



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Γεωηλεκτρική διασκόπηση στο λιγνιτωρυχείο Μαυροπηγής
Ν. Κοζάνης. Προσομοίωση του πειράματος ηλεκτρικής
τομογραφίας για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής
διασκόπησης και την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών
δεδομένων»

Αναστασιάδης Ανδρέας

Εξεταστική Επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ. (Επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής Π.Κ.

Στειακάκης Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής Π.Κ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής στην ηλεκτρική τομογραφία για τον εντοπισμό τυχόν ρηγμάτων και δομών υψηλής αντίστασης με την χρήση συνθετικών δεδομένων. Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να εξετασθεί η εφαρμοσιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας και των εξεταζόμενων διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής στον εντοπισμό ρηγμάτων και ασβεστολιθικών φακών στο λιγνιτορυχείο Μαυροπηγής Ν.Κοζάνης.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία μοντέλα ηλεκτρικής τομογραφίας που προσομοιάζουν καρστικοποιημένους ανθρακικούς σχηματισμούς και τρία μοντέλα που προσομοιάζουν δομή ρήγματος. Στο ένα μοντέλο ρήγματος προστέθηκε θόρυβος με σκοπό να εξεταστεί αν επηρεάζεται η απεικόνιση της σωστής θέσης και του βάθους της δομής αυτής. Σε όλα τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκε η διάταξη πόλου-διπόλου ώστε να εξετασθεί η καταλληλότητα και η χρησιμότητα της για τον εντοπισμό των εν λόγω δομών. Στα τρία τελευταία μοντέλα χρησιμοποιήθηκε και η διάταξη Schlumberger ώστε να γίνει σύγκριση των δυο διατάξεων.

Επίσης αναλύεται και εξηγείται ο αλγόριθμος δημιουργίας των συνθετικών δεδομένων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία και ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων χρησιμοποιώντας τα λογισμικά πακέτα Res2mod και Res2dinv. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι αντιστροφής. Η πρώτη χρησιμοποιεί περιορισμούς για την εξομάλυνση της γεωηλεκτρικής, η δεύτερη τονίζει τις απότομες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Robust) και η Τρίτη είναι συνδυασμός της μεθόδου Marquardt (κανονικοποίηση μηδενικού βαθμού με χρήση της νόρμας L2) ή ridge regression και τη μέθοδο Occam ή smoothness constrained (κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης) .

Τέλος, τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας δείχνουν ότι στα μοντέλα που εξετάστηκαν η διάταξη pole-dipole δίνει καλύτερα αποτελέσματα λόγω του καλύτερου βάθους διασκόπησης που έχει καθώς και τον καλό λόγο σήματος προς θόρυβο. Επίσης να αναφερθεί ότι από τις μεθόδους αντιστροφής αυτή που απεικονίζει καλύτερα τα όρια καθώς και τις αντιστάσεις είναι η κανονικοποίηση με την χρήση της νόρμας L1.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία με τίτλο <<Γεωηλεκτρική διασκόπηση στο λιγνιτωρυχείο Μαυροπηγής Ν. Κοζάνης . Προσομοίωση του πειράματος ηλεκτρικής τομογραφίας για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής διασκόπησης και την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων>> έχει σαν στόχο τον εντοπισμό τυχόν ρηγμάτων και δομών υψηλής αντίστασης με την χρήση συνθετικών δεδομένων , χρησιμοποιώντας την διάταξη πόλου-διπόλου και την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνη Βαφείδη, επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής και την συνεχής καθοδήγηση του.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής, κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ, καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και τον επίκουρο καθηγητή Ε. Στειακάκη της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Θέλω να ευχαριστήσω τον διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων εργαστηρίου εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Hamdan Hamdan για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε κάθε της βήμα. Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με την οικονομική και ψυχολογική τους βοήθεια με βοήθησαν να δουλέψω σε άνετο περιβάλλον όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	5
1.2 Δομή Διπλωματικής εργασίας	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	8
2. 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	8
2. 1. 1 Εισαγωγή.....	8
2.1.2 Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση.....	9
2. 2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	10
2.2.1 Διατάξεις Ηλεκτροδίων	12
2. 2. 2 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων	16
2. 2. 3 Χρήση Συνθετικών Δεδομένων για την περαιτέρω σύγκριση των διατάξεων .	17
2. 3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	19
2. 3. 1: Εισαγωγή.....	19
2. 3. 2 Ψευδοτομή	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	21
3. 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
3. 1. 1 Ελλειπτικές μερικές διαφορικές εξισώσεις.....	22
3. 1. 2 Τρόπος επίλυσης των ελλειπτικών διαφορικών εξισώσεων	23
3. 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	25
3. 3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	26
3. 4 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	29
3. 5 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΠΙΝΑΚΩΝ	31

3. 6 ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	35
3. 7 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	38
4. 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	38
4. 1. 1 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων	38
4. 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	43
5.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	43
5. 1.1: Μοντέλα και Συνθετικά Δεδομένα	50
5. 2: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	56
5. 2. 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	56
5.2.2 Επεξεργασία Συνθετικών δεδομένων	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Γεωφυσική είναι η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της φυσικής για να μελετήσει τη Γη. Μελετάει τις φυσικές ιδιότητες της Γης από το κέντρο της μέχρι και την εξωτερική ατμόσφαιρα, δηλαδή περιλαμβάνει την μελέτη της «στερεάς» Γής, της θάλασσας, της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας.

Η γεωφυσική έρευνα έχει στόχο την αξιοποίηση των γεωφυσικών γνώσεων για πρακτικούς σκοπούς. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έρευνα έχει μεγάλη πρακτική σημασία διότι με τις γεωφυσικές μεθόδους :

- Μελετάται η δομή και οι γεωδυναμικές διαδικασίες στον φλοιό και στον πάνω μανδύα της Γης που καθορίζουν τις θέσεις πολλών δομών οικονομικής σημασίας.
- Εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης δομές που σχετίζονται με κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικών αερίων, με μεταλλεύματα, με πηγές γεωθερμικής ενέργειας, με ορυκτούς άνθρακες κλπ.
- Προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων της Γης που έχουν σχέση με την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων όπως θεμελιώσεις γεφυρών, φραγμάτων κλπ.

Επίσης, είναι οικονομικές, σχετικά γρήγορες και μη καταστροφικές. Οι βασικότερες κατηγορίες των μεθόδων της γεωφυσικής διασκόπησης είναι:

- Σεισμικές μέθοδοι
- Βαρυτικές μέθοδοι
- Μαγνητικές μέθοδοι
- Ηλεκτρικές μέθοδοι
- Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι
- Ραδιομετρική μέθοδος
- Θερμική μέθοδος

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικές μέθοδοι, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

Ο όρος γεωφυσική διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με εφαρμογή των νόμων της φυσικής.

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της. Η ποσότητα που μετράται είναι η ηλεκτρική τάση, ενώ η ποσότητα η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται συνήθως ο καθορισμός και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι εφαρμόζονται επιτυχώς όταν υπάρχει σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπο μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος. Πρόσφατες αναφορές έδειξαν ότι ο συνδυασμός γεωλογικών και γεωφυσικών δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους, την στρωματογραφία και τον εντοπισμό πιθανών ανωμαλιών στα πετρώματα. Πρωταρχικός ρόλος των γεωφυσικών μελετών είναι η μέτρηση και η απεικόνιση των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η αγωγιμότητα και ο όγκος, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν γεωλογικές ιδιότητες όπως η στρωματογραφία, η δομή, ο κορεσμός, το σπάσιμο, και η διαπερατότητα [Geslin *et al*, 1994]. Επίσης, στην ηλεκτρική τομογραφία, η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους της γεωφυσικής διασκόπησης τόσο από την λειτουργική πλευρά όσο και από την θεωρητική πλευρά. Έχει σκοπό τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, ή καλύτερα την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή.

Λόγω χαμηλού κόστους και μεγάλου εύρους εφαρμογών είναι η πιο διαδεδομένη γεωφυσική μέθοδος και χρησιμοποιείται κυρίως στην Υδρογεωλογία, στην Τεχνική Γεωλογία στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνητών φραγμάτων, στην αρχαιομετρία κ. τ. λ.

- Κατά την μέθοδο της γεωηλεκτρικής διασκόπησης μετράμε τη διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη.
- Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους.
- Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και τον εντοπισμό δομών ενδιαφέροντος.

- Με τη μέθοδο αυτή παράγεται στο έδαφος με τεχνητό τρόπο ηλεκτρικό πεδίο. Η ποσότητα που μετριέται είναι η ηλεκτρική τάση και τελικός ο σκοπός είναι ο εντοπισμός δομών, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετική ειδική ηλεκτρική αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων των οποίων οι ιδιότητες επηρεάζονται από τη δομή του υπεδάφους.

1.2 Δομή Διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1: Στο πρώτο κεφάλαιο μετά από μία σύντομη αναφορά στις γεωφυσικές διασκοπήσεις και μεθόδους γίνεται μία τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στα γεωτεχνικά έργα.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εκτενής αναφορά στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και συγκεκριμένα στην αρχή λειτουργίας της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, καθώς επίσης και στις διατάξεις των ηλεκτροδίων και τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατάλληλη επιλογή

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναφορά στον αλγόριθμο δημιουργίας συνθετικών δεδομένων και την διαδικασία που απαιτείται ώστε να μετατραπεί μια διαφορική εξίσωση, σε εξίσωση πεπερασμένων διαφορών.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, οι μέθοδοι αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η χρησιμότητα του προγράμματος Res2dinv.

Κεφάλαιο 5: Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτονται όλα τα στοιχεία που επεξεργάστηκαν και τα αποτελέσματα αυτών που προέκυψαν από το πρόγραμμα Res2dinv. Επίσης γίνεται μια σύγκριση των μοντέλων και των γεωηλεκτρικών τομών.

Κεφάλαιο 6: Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας σχετικά με την καταλληλότητα της διάταξης πόλου-διπόλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

2. 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2. 1. 1 Εισαγωγή

Μία από τις γεωφυσικές τεχνικές που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην διασκόπηση και στον εντοπισμό "ρηχών δομών" είναι η ηλεκτρική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης, η οποία είναι επίσης γνωστή και ως "μέθοδος συνεχούς ρεύματος". Σκοπός της μεθόδου αυτής αποτελεί ο καθορισμός της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής αυτού, πραγματοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης.

Για τον σκοπό αυτό εισάγεται στο υπέδαφος ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων και μετράται η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπέδαφος ρεύμα, σε δύο άλλα ηλεκτρόδια. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μία ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους.

Η εμφάνιση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης χρονολογείται στις αρχές του εικοστού αιώνα. Πρωτοπόροι στην έρευνα υπήρξαν ο Wenner και ιδιαίτερα ο Schlumberger που το βιβλίο του «Etude sur la Prospection Electrique du Sous-Sol» (Σούρλας, 2000) συνέβαλε σημαντικά στη διάδοση των ηλεκτρικών μεθόδων. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών επιτεύχθηκε ο εντοπισμός φυσικού αερίου στη Ρουμανία το 1923 και αλατούχων δόμων στη Γαλλία το 1926. Η συστηματική εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων άρχισε μετά το 1970 εκμεταλλευόμενη της ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, που πρόσφεραν σημαντική βοήθεια τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Βασική επιδίωξη των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Μετρούμενο μέγεθος είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της κατανομής των τιμών της, μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης. Για την εφαρμογή των ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων απαιτείται σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

Η πρώτη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων και περιλαμβάνει (Σούρλας, 2000):

- Την μέθοδο του φυσικού δυναμικού.
- Την μέθοδο των τελλουρικών ρευμάτων.

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

- Την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Την μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας.
- Την μέθοδο των ισοδυναμικών γραμμών.

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

2.1.2 Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση. Ο υπολογισμός της στηρίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm (Robinson, 1988) (σχήμα 2. 1), σύμφωνα με τον τύπο:

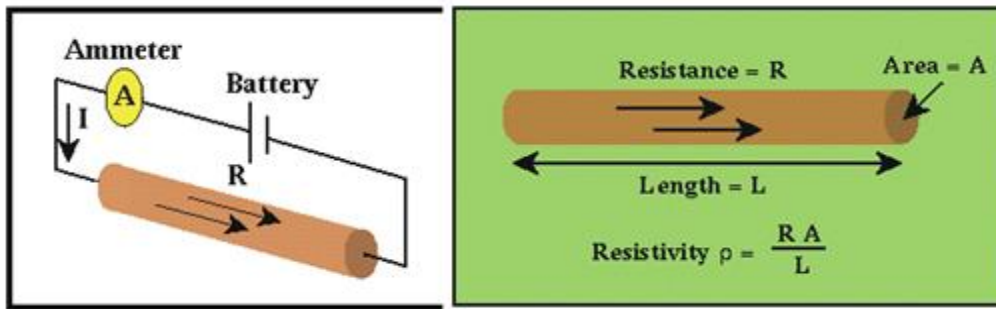
$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2. 1)$$

όπου η αντίσταση (R) ενός αγωγού ονομάζεται ο σταθερός λόγος της διαφοράς δυναμικού (ΔV) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση (I) του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

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

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2. 2)$$

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



Σχήμα 2. 1:Νόμος του Ωm

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

2. 2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Ο σκοπός της μεθόδου της ειδικής αντίστασης είναι να βρεθεί η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους και έμμεσα να ληφθούν πληροφορίες για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους.

Λόγω χαμηλού κόστους και μεγάλου εύρους εφαρμογών είναι η πιο διαδεδομένη γεωφυσική μέθοδος και χρησιμοποιείται κυρίως στην Υδρογεωλογία, στην Τεχνική Γεωλογία στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνητών φραγμάτων, στην αρχαιομετρία κ. τ. λ.

- Κατά την μέθοδο της γεωηλεκτρικής διασκόπησης μετράμε τη διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη.

- Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους.
- Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και τον εντοπισμό δομών ενδιαφέροντος.

Επειδή η Γη είναι ανομοιογενής και ανισότροπη η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και της γεωμετρικής διάταξης των ηλεκτροδίων. Για τον λόγο αυτό εισάγεται ο όρος της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, δηλαδή το ρεύμα διαρρέει τους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό που βρίσκεται στους πόρους τους.

Επομένως, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι συνδυασμός παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση, σύσταση του νερού που βρίσκεται στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς. Ειδικότερα εξαρτάται από τις υδρολογικές - υδρογεωλογικές συνθήκες, τη χημική σύσταση του νερού, το μέγεθος των πόρων (πορώδες) των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις, διακλάσεις, ρήγματα των σχηματισμών (δευτερογενές πορώδες), τη θερμοκρασία και την πίεση.

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

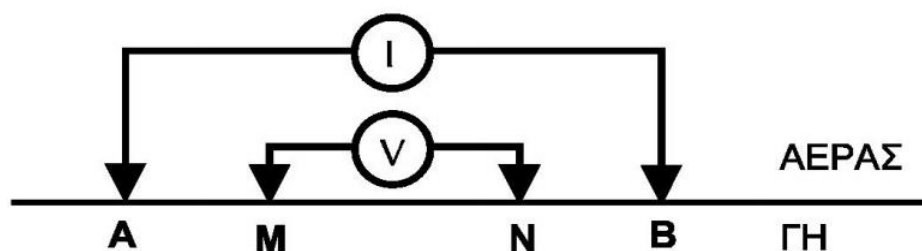
Πίνακας 2.1: Αντιστάσεις πετρωμάτων

Είναι σημαντικό να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο στάδιο ερμηνείας των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, για τους παρακάτω λόγους:

- Η ειδική αντίσταση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που μεταβάλλονται εύκολα.
- Οι διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης για τους ίδιους γεωλογικούς σχηματισμούς έχουν μεγάλο εύρος.
- Δυο τελείως διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί μπορεί να έχουν παρόμοιες ειδικές αντιστάσεις.

Επομένως είναι σημαντικό να δίνεται προσοχή στα εξής:

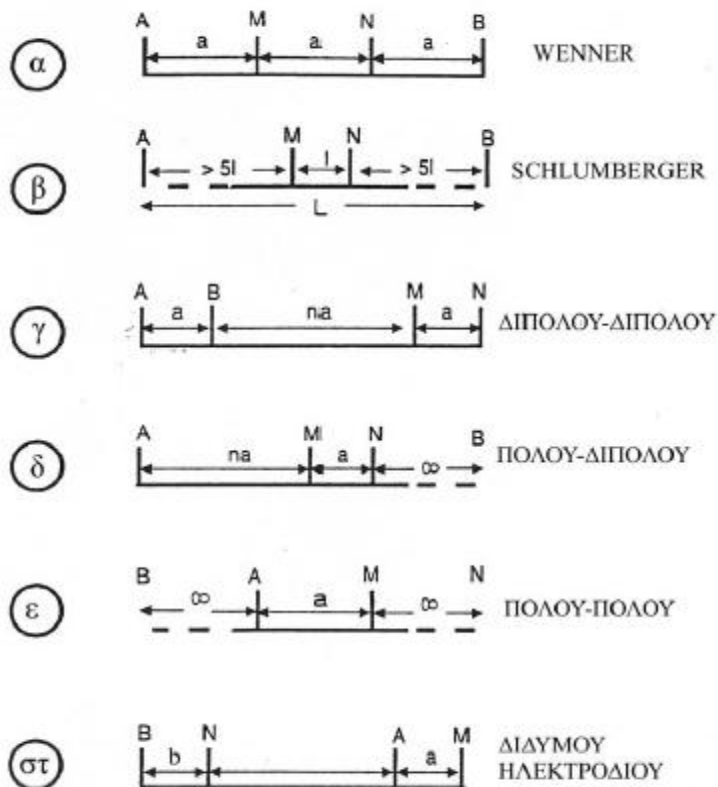
- Η ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να γίνεται με προσοχή.
- Ασφαλής είναι μόνο η σχετική σύγκριση των ειδικών αντιστάσεων σε μια περιοχή.
- Η μελέτη της ειδικής αντίστασης σε μια περιοχή μπορεί να δώσει (έμμεσα) ασφαλή συμπεράσματα για τη λιθολογία μόνο όταν η ερμηνεία γίνεται συνυπολογίζοντας όλες τις υπάρχουσες πληροφορίες για την περιοχή (γεωλογικοί χάρτες, γεωτρήσεις κ. α.).



Σχήμα 2. 2: Στην εικόνα αυτή φαίνεται μία τυπική διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων Α, Β (ηλεκτρόδια ρεύματος) και Μ, Ν (ηλεκτρόδια δυναμικού).

2.2.1 Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Υπάρχουν πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στην ύπαιθρο, ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος των δομών που αναμένονται, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές επειδή ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα της αντίστασης επαφής, δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στη θέση του ηλεκτροδίου (Βαφείδης, 1993).



Σχήμα 2. 3: Διατάξεις ηλεκτροδίων

Στη διάταξη Schlumberger, τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N είναι ανάμεσα στα A και B και σε απόσταση b από το κέντρο της διάταξης. Έτσι είναι $AB = 2L$ και $MN = 2b = l$, η απόσταση 2b μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση 2L μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Έτσι ο γεωμετρικός συντελεστής K θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} + \frac{1}{L-b} \right)^{-1} = (L^2 - b^2) \frac{\pi}{2b} \quad (2.3)$$

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

$$\rho_a = \frac{\pi L^2 \Delta V}{2b I} \quad (2.4)$$

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

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη για την διεξαγωγή ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρό χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων, επειδή αντίθετα με τις άλλες διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει επίσης στον περιορισμό των ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων.

Στη διάταξη διπόλου–διπόλου η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος είναι ίση με a . Ομοίως a είναι και το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγαριών των ηλεκτροδίων είναι μεγάλη και ίση με na ($na \gg a$), όπως φαίνεται στο.

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

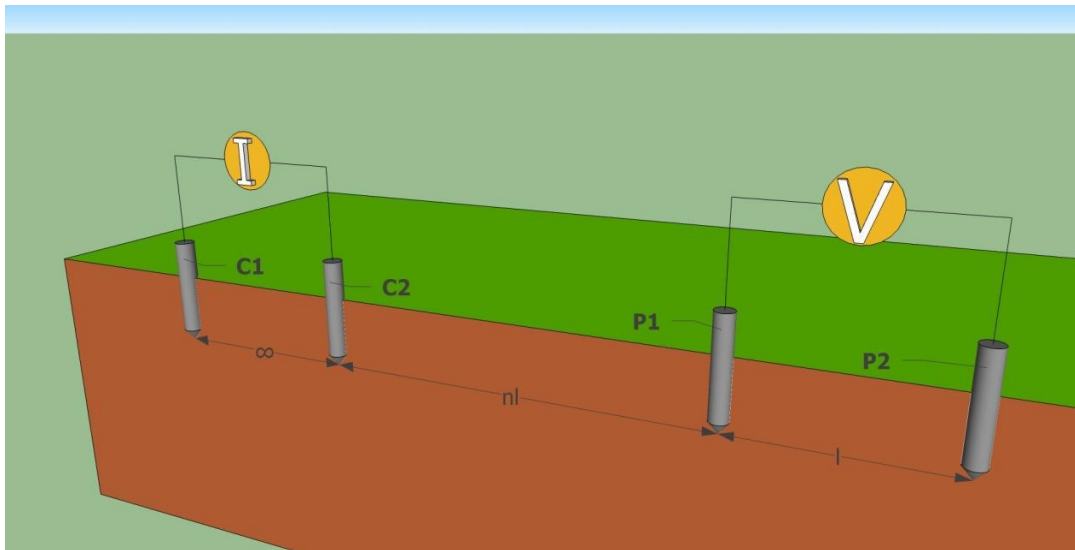
$$K = n\pi a(n+1)(n+2) \quad (2.5)$$

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από την σχέση

$$\rho_a = n\pi a(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad (2.6)$$

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διάταξης αποτελεί η απόσταση $2na$, ανάμεσα στα δίπολα ρεύματος και δυναμικού, που μπορεί να αυξηθεί αρκετά χωρίς να χρειάζονται καλώδια μεγάλου μήκους.

Η διάταξη πόλου-διπόλου (pole-dipole method) φαίνεται στο Σχήμα 2.4:



Σχήμα 2. 4: Διάταξη μεθόδου πόλου-διπόλου

Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, αυτή η μέθοδος δεν έχει συμμετρική διάταξη. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων P1, P2 είναι ίση με l, η απόσταση μεταξύ C2, P1 είναι nl και το ηλεκτρόδιο C1 απέχει αρκετά μεγάλη απόσταση από το C2. Όπως και στη διάταξη πόλου-πόλου, το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο C1 πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μεγαλύτερη από 5nl για να επηρεάζει όσο το δυνατόν λιγότερο τις μετρήσεις (<5% σφάλμα) .

Η ειδική αντίσταση εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = 2\pi \ln(n+1) \frac{V}{I} \quad (2.7)$$

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

l, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τάσης

n, ένας θετικός ακέραιος

V, I, οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε V, A αντίστοιχα

Για μετρήσεις με $n > 8$ θα πρέπει να αυξάνεται η απόσταση l λόγω σημαντικής πτώσης του μετρούμενου δυναμικού V.

Κάθε διάταξη παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τη θέση και τον σκοπό, για τον οποίο εφαρμόζεται. Η διάταξη Wenner δίνει την πιο έντονη

μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά παρουσιάζει το φαινόμενο της διπλής κορυφής, δηλαδή μεγάλη τιμή πριν και μετά τη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα, ενώ δίνει μικρή τιμή ακριβώς πάνω από τη δομή. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που η δομή έχει μικρότερη αντίσταση. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζει και η διάταξη Schlumberger με το επιπλέον πρόβλημα του μικρού σήματος, δηλαδή δε δίνει έντονα τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης. Το πρόβλημα της διπλής κορυφής δεν εμφανίζεται στις διατάξεις διπόλου – διπόλου και διδύμου ηλεκτροδίου. Η διάταξη διπόλου – διπόλου δίνει καθαρά τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι, επειδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι μικρή περιορίζεται το βάθος διεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως και η ευαισθησία της μεθόδου με την αύξηση του βάθους. Η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου έχει πλευρική διακριτική ικανότητα α , δηλαδή για να ξεχωρίσει δύο δομές πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά την οριζόντια διεύθυνση απόσταση α , με α να είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων κάθε ζευγαριού και απαιτεί τη μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων για κάθε μέτρηση. Όμως η εύκολη και γρήγορη εφαρμογή της και η έντονη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης που δίνει, την έχουν κάνει μια από τις πιο διαδεδομένες διατάξεις. (J. H. Coggon University of Otago)

2. 2. 2 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τις γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις. Η διάταξη των ηλεκτροδίων δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι παράγοντες-κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπ'όψιν πριν τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις είναι οι κάτωθι (Αποστολόπουλος 1993).

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο

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

2. Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες

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

3. Ευαισθησία σε βάθος

Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος δίνει

λεπτομερή ανάλυση της ειδικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

4. Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος

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

5. Βάθος διασκόπησης

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

6. Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου

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

7. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αραίωση των ρευματικών γραμμών. Άρα οι διατάξεις των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν διεύθυνση παράλληλη με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής (Κωσταρέλης, 2008).

2. 2. 3 Χρήση Συνθετικών Δεδομένων για την περαιτέρω σύγκριση των διατάξεων

Η Ηλεκτρική Τομογραφία χρησιμοποιείται ευρέως σε περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές εφαρμογές. Πολλές φορές οι γεωφυσικές έρευνες με την μέθοδο αυτή οδηγούν σε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω ελλιπούς αρχικού σχεδιασμού της έρευνας. Οι μαθηματικές προσομοιώσεις μπορούν να αποτελέσουν έναν οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο για τον σχεδιασμό κάθε γεωφυσικής έρευνας (Yang, 2003,. Ορφανός, 2011).

Όπως προαναφέρθηκε η κάθε διάταξη ηλεκτροδίων παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με την φύση του στόχου έρευνας και την γεωλογία της περιοχής. Μια πρώτη εκτίμηση της ανάλυσης και της αποδοτικότητας κάθε διάταξης μπορεί να γίνει με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων.

Οι γεωλογικές δομές μπορούν να περιγραφούν με μαθηματικά μοντέλα και με την χρήση του προγράμματος RES2MOD να υπολογιστούν οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την κάθε διάταξη αντίστοιχα. Η ερμηνεία αυτών των συνθετικών δεδομένων με την χρήση του προγράμματος αντιστροφής Res2dinv, δίνει σημαντικές πληροφορίες για το βάθος διασκόπησης, την ευαισθησία σε κάθετες και οριζόντιες ανομοιογένειες του υπεδάφους και το οριζόντιο εύρος μετρήσεων της κάθε διάταξης.

Περαιτέρω η σύγκριση των μοντέλων αυτών με στοιχεία από τις πραγματικές 2D-3D ηλεκτρικές τομογραφίες σε περιοχές ανάλογου γεωλογικού ενδιαφέροντος μπορεί να δώσει μια σαφή εικόνα των δυνατοτήτων και των περιορισμών της κάθε διάταξης στο ύπαιθρο, όπου επιδρούν και άλλοι εξωγενείς παράγοντες (θόρυβος λόγω χαμηλού σήματος, θόρυβος λόγω μη σωστής τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, ανομοιογένεια, ανισοτροπία κ. α) και να αποτελεί σημαντική βοήθεια για την επιλογή της κατάλληλης διατάξεως και της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά την εφαρμογή της 2D-3D ηλεκτρικής τομογραφίας. Επιπλέον οι πληροφορίες των συνθετικών μοντέλων μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην βέλτιστη αξιοποίηση των μετρήσεων υπαίθρου.

Πολλές φορές στην ύπαιθρο το επιτρεπόμενο ανάπτυγμα για την γραμμή διασκόπησης επιβάλλεται από τις συνθήκες της περιοχής και είναι συγκεκριμένο. Επίσης, το βάθος διασκόπησης δεν συμπίπτει με το βάθος στο οποίο είναι δυνατόν να εντοπιστεί ένα υπόγειο άνοιγμα. Για αυτό με τη βοήθεια των συνθετικών μοντέλων θα διερευνηθεί η επίδραση τριών βασικών παραγόντων στα μοντέλα ερμηνείας.

- Το μέγεθος του στόχου
- Το βάθος του στόχου
- Η επιλογή διάταξης ηλεκτροδίων

2. 3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

2. 3. 1: Εισαγωγή

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας και τα αποτελέσματά της μπορούν να συγκριθούν σε ακρίβεια με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων. Στην ηλεκτρική τομογραφία, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως π. χ. μεταπτώσεις.

Πολύ σημαντικός είναι ο καθορισμός της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος πριν να ξεκινήσει η χαρτογράφηση, καθώς από αυτή την απόσταση εξαρτάται το βάθος μέχρι το οποίο οι σχηματισμοί στο υπέδαφος επιδρούν στη διαμόρφωση της τιμής της ρ_a .

Μια σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Οι τιμές αυτές, κατά μήκος αρκετών παράλληλων γραμμών, τοποθετούνται σε χάρτη φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

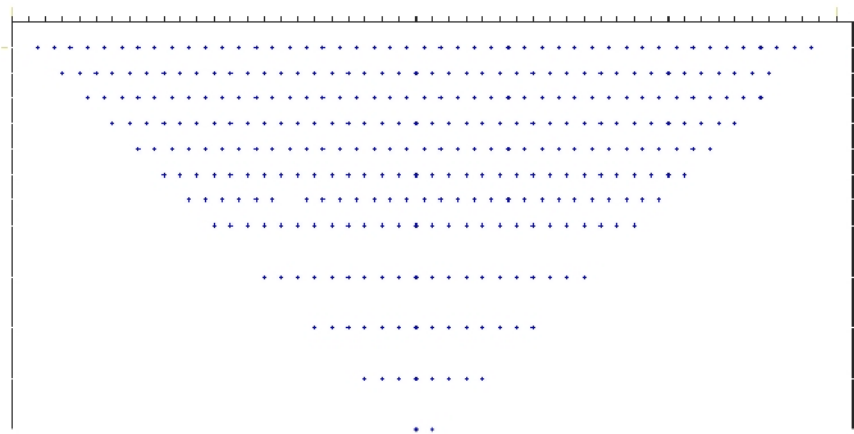
Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιώντας κάποια υπολογιστικά προγράμματα για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

2. 3. 2 Ψευδοτομή

Στην ψευδοτομή (pseudosection) οι φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι σχεδιασμένες σε μία τομή κατά τέτοιο τρόπο όπως οι πραγματικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σημεία ακριβώς κάτω από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και σε βάθος που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διάταξη.

Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει μια προσεγγιστική εικόνα της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο επίπεδο της τομής (Σχήμα 2.5) . Το επόμενο βήμα είναι η

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



Σχήμα 2. 5: Διάταξη των δεδομένων στην ψευδοτομή του υπεδάφους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3. 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα τα δεδομένα συνδέονται με μη γραμμικές σχέσεις με τις παραμέτρους του μοντέλου. Διακρίνονται 3 μεγάλες κατηγορίες προβλημάτων τα οποία περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις:

α) Το παραβολικό πρόβλημα

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad u(0,t) = u(1,t) \quad (3. 1)$$

Είναι το πρότυπο για χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα. Η εξίσωση ικανοποιείται σε μια λωρίδα $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq z \leq 1$. Στα όρια της λωρίδας οι τιμές της $u(x, t)$ είναι γνωστές.

β) Το ελλειπτικό πρόβλημα

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad 0 \leq x \leq 1, 0 \leq z \leq 1 \quad (3. 2)$$

Είναι το πρόβλημα Dirichlet. Αυτό, όπως και το παραβολικό πρόβλημα λύνεται, με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Περισσότερα για το ελλειπτικό πρόβλημα και την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών θα δοθούν στην συνέχεια.

γ) Το υπερβολικό πρόβλημα

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad -\infty < x < \infty, 0 \leq t \quad (3.3)$$

Αυτό είναι το πρότυπο για προβλήματα που αναφέρονται στην διάδοση κυμάτων και θερμότητας. Για την επίλυση τους χρησιμοποιούνται και εδώ οι μέθοδοι με τις πεπερασμένες διαφορές.

3. 1. 1 Ελλειπτικές μερικές διαφορικές εξισώσεις

Οι ελλειπτικές μερικές διαφορικές εξισώσεις έχουν την γενική μορφή.

$$a(x,z) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2b(x,z) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + c(x,z) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = d(x,z,u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (3. 4)$$

Και ισχύει $b^2 - ac < 0$ για κάθε σημείο που περιέχεται στην περιοχή R . Με a, b, c, d συμβολίζονται κάποιες γνωστές συναρτήσεις ως προς (x, z) εξαρτώμενες από το εκάστοτε πρόβλημα. Με $u(x, z)$ συμβολίζεται η άγνωστη συνάρτηση του προβλήματος.

Υπάρχουν 3 περιπτώσεις οριακών συνθηκών.

- i) Το πρόβλημα Dirichlet που ισχύει

$$u = f(x, z)$$

Οι τιμές της u στα όρια είναι γνωστές και δίνονται από την συνάρτηση f .

- ii) Το πρόβλημα Neumann όπου ισχύει:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = g(x,z) \quad , \quad \frac{\partial u}{\partial z} = g(x,z) \quad (3. 5)$$

Οι τιμές των πρώτων μερικών παραγώγων της u στα όρια είναι γνωστές και δίνονται από την συνάρτηση g .

- iii) Το πρόβλημα Robins όπου ισχύει:

$$\begin{aligned} a(x,z) u + \beta(x,z) \frac{\partial u}{\partial x} &= \gamma(x,z) \\ \text{ή} \\ a(x,z) u + \beta(x,z) \frac{\partial u}{\partial z} &= \gamma(x,z) \\ \text{και} \\ a(x,z) > 0 \quad , \quad \beta(x,z) > 0 \quad , \quad \forall (x,z) \in \text{όριο} \end{aligned} \quad (3. 6)$$

Εδώ παρατηρείται συνδυασμός των 2 πρώτων προβλημάτων. Με α, β συμβολίζονται κάποιες γνωστές συναρτήσεις που εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα ενώ οι οριακές συνθήκες δίνονται μέσω κάποιας συνάρτησης γ .

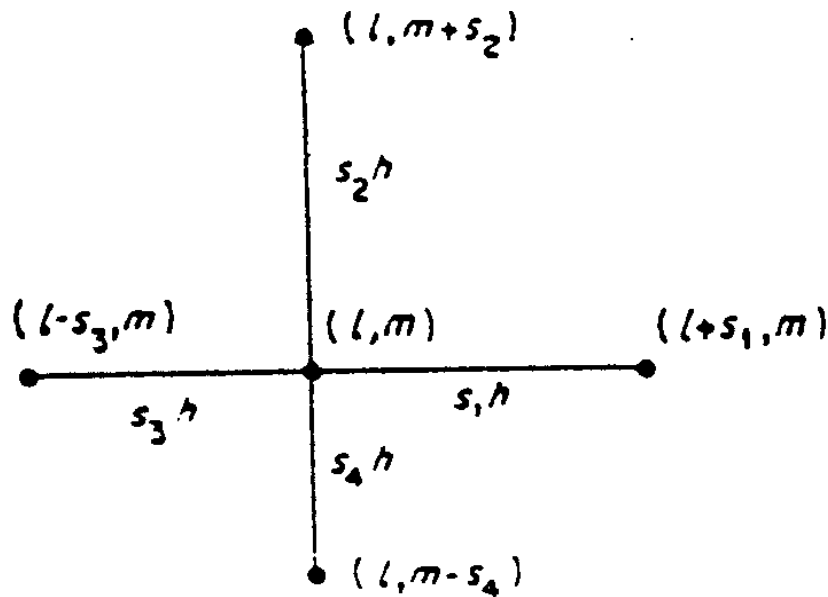
3. 1. 2 Τρόπος επίλυσης των ελλειπτικών διαφορικών εξισώσεων

Ο τρόπος με τον οποίο μετατρέπεται μια μερική δ. ε σε εξίσωση πεπερασμένων διαφορών είναι συνοπτικά ο εξής:

Εφαρμόζεται, μέσα στην περικλειόμενη από το όριο περιοχή ένας ορθογώνιος κανάβος (grid) του οποίου οι πλευρές είναι παράλληλες με τους άξονες Ox, Oz ενός τυχαίου συστήματος. Επίσης ισχύει ότι $x=l \cdot h_x, z=m \cdot h_z$, όπου x, z είναι συντεταγμένες των σημείων του κανάβου και h_x, h_z είναι τα μοναδιαία διανύσματα των αξόνων Ox, Oz αντίστοιχα. Αναπτύσσονται σε σειρά Taylor οι άγνωστοι όροι στη μερική δ. ε. Για να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor γύρω από το συγκεκριμένο σημείο (l, m) χρησιμοποιούνται τα τέσσερα γειτονικά του σημεία $(l+1, m), (l-1, m), (l, m+1), (l, m-1)$ τα οποία όπως παρατηρεί κανείς σχηματίζουν με το σημείο (l, m) ένα σταυρό. Με πρόσθεση των τεσσάρων αναπτυγμάτων Taylor και λαμβάνοντας υπόψη την μερική δ. ε. προκύπτει η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών. Πιο αναλυτικά θα δειχθεί ο τρόπος μετατροπής της μερικής δ. ε σε εξίσωση πεπερασμένων διαφορών κατά την επίλυση του ευθέως προβλήματος. Ας θεωρηθεί η μερική δ. ε. της μορφής:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} [\alpha_1(x, z) \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z} [\alpha_2(x, z) \frac{\partial u}{\partial z}] - f(x, z) = g(x, z) \quad (3. 7)$$

η οποία είναι ελλειπτική δ. ε.



Εικόνα 3. 1: Η Διάταξη των σημείων που χρησιμοποιείται κατά την μετατροπή της μερικής διαφορικής εξίσωσης, σε εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Εδώ οι συναρτήσεις a_1 , a_2 , f , g ορίζονται κατ' αναλογία των συναρτήσεων a , b , c , d της σχέσης (3. 4). Το ανάπτυγμα σε Taylor και οι διάφορες πράξεις οδηγούν στην παρακάτω εξίσωση διαφορών

$$p_1 u_{l+s_1, m} + p_2 u_{l, m+s_2} + p_3 u_{l-s_3, m} + p_4 u_{l, m-s_4} - (\sum_{i=1}^4 p_i + h^2 f_{l, m} u_{l, m}) = h^2 g_{l, m} \quad (3. 8)$$

Όπου

$$p_1 = \frac{2}{h_E} a_1(x, z)_{l+\frac{h_E}{2}, m} \quad (3. 9)$$

$$p_2 = \frac{2}{h_N} a_2(x, z)_{l, m+\frac{h_N}{2}} \quad (3. 10)$$

$$p_3 = \frac{2}{h_W} a_1(x, z)_{l-\frac{h_W}{2}, m} \quad (3. 11)$$

$$p_4 = \frac{2}{h_S} \alpha_2(x,z)_{l,m-\frac{h_S}{2}} \quad (3.12)$$

Έστω για κάθε σημείο μέσα στα όρια μιας εξίσωσης όπως η (3. 8) όπου οι συντελεστές p δίνονται από εξισώσεις όπως οι (3. 9), (3. 12) τότε το σύνολο των εξισώσεων αυτών μας δίνει ένα σύστημα της μορφής $p^*u=g$.

Στο σύστημα γραμμικών εξισώσεων $p^*u=g$ ο p είναι ένας πίνακας με αρκετά μηδενικά στοιχεία (αραιός). Το διάνυσμα g περιέχει τους γνωστούς όρους των προς επίλυση εξισώσεων και το διάνυσμα u τους άγνωστους.

Η επίλυση του γραμμικού συστήματος γίνεται με την χρήση τεχνικών που μπορούν να καταταγούν σε δυο κατηγορίες: οι επαναληπτικές και οι μη επαναληπτικές μέθοδοι.

Στις μη επαναληπτικές υπολογίζεται ο αντίστροφος p^{-1} του πίνακα p . Οι μη επαναληπτικές μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα ότι οδηγούν στην λύση του συστήματος $p^*u=g$ με πεπερασμένο αριθμό πράξεων ο οποίος είναι δυνατόν να προβλεφθεί. Επίσης δε χρειάζεται κάποια αρχική εκτίμηση της λύσης. Αντίθετα, στις επαναληπτικές μεθόδους πρέπει να δοθεί μια αρχική εκτίμηση για την λύση. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ένα πλήθος επαναλήψεων και εφόσον ισχύουν ορισμένες συνθήκες τότε η μέθοδος συγκλίνει προς τη σωστή λύση. Επειδή ο αριθμός των επαναλήψεων εξαρτάται από την αρχική εκτίμηση καθώς και το κριτήριο σύγκλισης, δεν είναι δυνατόν να γίνει πρόβλεψη για τον συνολικό αριθμό επαναλήψεων. Το μεγάλο πλεονέκτημα των επαναληπτικών μεθόδων είναι η εκμετάλλευση του γεγονότος ότι ο πίνακας p είναι αραιός, για αυτό και προτιμώνται όταν η τάξη του p είναι μεγάλη.

3. 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Το δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου στις τρεις διαστάσεις και για ανομοιογενές μέσο το οποίο περιέχει και την πηγή του ρεύματος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$-\nabla\left[\frac{1}{\rho(x,y,z)} \nabla u(x,y,z)\right] = \frac{\partial Q(x,y,z)}{\partial t} \quad (3.13)$$

Όπου:

ρ : Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου σε Ωm

u: Το δυναμικό σε Volt

Q: Η πυκνότητα του φορτίου σε coul*m⁻³

Για την απλοποίηση των συμβολισμών εισάγονται τα:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = q(x,y,z) \quad (3. 14)$$

και

$$\frac{1}{\rho(x,y,z)} = \sigma(x,y,z) \quad (3. 15)$$

Όπου:

q : πυκνότητα του ρεύματος σε amp*m⁻³

σ : ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου σε mhos*m⁻¹

Για το πρόβλημα σε δυο διαστάσεις (x, z) ισχύει

$$\frac{\partial}{\partial x}[\sigma(x,z) \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z}[\sigma(x,z) \frac{\partial u}{\partial z}] + q(x,z) = 0 \quad (3. 16)$$

Όπου το q είναι σε amp/m² στο επίπεδο x-z. Η (3. 16) είναι μια τυπική περίπτωση μερικής διαφορικής εξίσωσης ελλειπτικού τύπου. Παρενθετικά αναφέρεται ότι στην κλασική μέθοδο της ειδικής αντίστασης τόσο τα ηλεκτρόδια ρεύματος όσο και αυτά του δυναμικού βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους. Όμως η ακόλουθη διαδικασία επίλυσης της (3. 16) μπορεί με μικρές τροποποιήσεις, να εφαρμοστεί και όταν τα ηλεκτρόδια, βρίσκονται μέσα στο έδαφος, όπως για παράδειγμα σε γεώτρηση.

3. 3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Αρχικά και για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών πρέπει να τεθούν τεχνητά όρια στην περιοχή που υπολογίζονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 3. 2) . Δηλαδή, η περιοχή περιβάλλεται από το όριο ABCDA όπου, το μεν τμήμα AB αντιστοιχεί στην επιφάνεια του εδάφους, το δε BCDA είναι τεχνητό όριο. Το συνεχές μέσο διαιρείται σε ορθογώνια τμήματα. Το σημείο P του ορθογώνιου abcd

βρίσκεται στην τομή των τεσσάρων κυψελίδων (blocks). Ονομάζουμε κάθε τέτοιο σημείο ως στοιχείο (element) του διακριτοποιημένου μέσου. Οι συντεταγμένες x , z συμβολίζονται με τις μεταβλητές j , l αντίστοιχα.

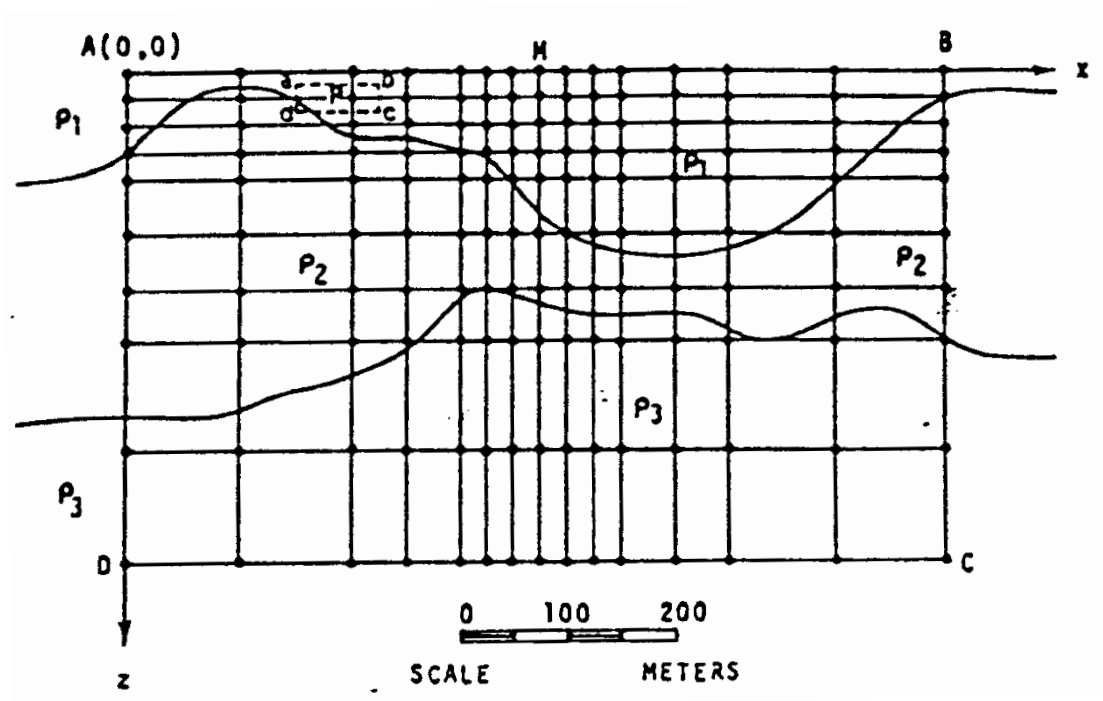
Η πυκνότητα ρεύματος q στην (3. 16) εκφράζεται συναρτήσει της έντασης του ρεύματος I . Αν P (Σχήμα 3. 2) είναι η θέση του ηλεκτροδίου ρεύματος. Η πυκνότητα ρεύματος q_p στην μικρή επιφάνεια $abcd$ δίνεται από τον τύπο:

$$q_p = \frac{I}{(\text{εμβαδόν } abcd)} = \frac{4 I}{[(h_E + h_W)(h_N + h_S)]} \quad (3. 17)$$

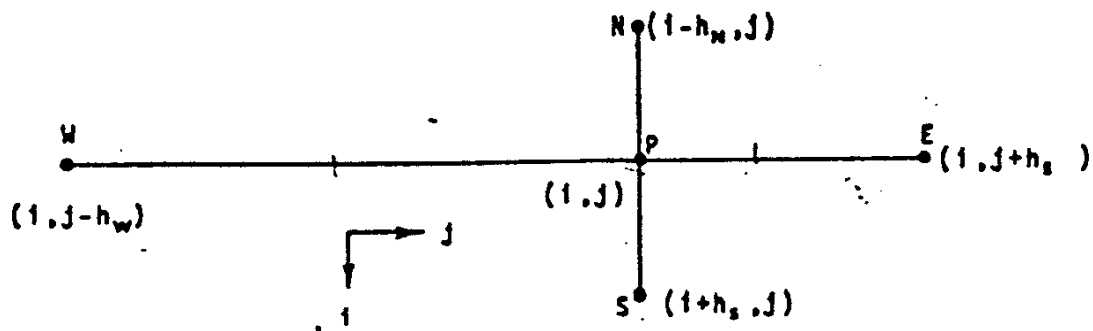
όπου οι γειτονικές κυψελίδες συμβολίζονται με E , W , N , S (Σχήμα 3. 3). Αν το h_n τείνει στο μηδέν τότε

$$\lim_{h_N \rightarrow 0} q_p = \frac{4 I}{[h_S (h_E + h_W)]} \quad (3. 18)$$

Η (3. 18) ισχύει όταν το ηλεκτρόδιο ρεύματος είναι στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 3. 2: Τα τεχνητά όρια ABCDA σε μια γεωλογική δομή τριών στρωμάτων με ειδικές αντιστάσεις p_1 , p_2 , p_3



Σχήμα 3. 3: Το σημείο P και τα τέσσερα γειτονικά του E, S, W, N σημεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίλυση της μερικής ελλειπτικής διαφορικής εξίσωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Τώρα θα οριστούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Αν συμβολιστεί με G το σύνολο των στοιχείων μέσα στην περιοχή ABCDA και με Γ το σύνολο των στοιχείων πάνω στο όριο ABCDA (Σχήμα 3. 2). Ακόμη συμβολίζονται με Γ_1 το σύνολο των στοιχείων πάνω στο όριο AB και Γ_2 το σύνολο των στοιχείων πάνω στο τεχνητό όριο BCDA οπότε $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$.

Οι οριακές συνθήκες είναι: (Mufti, 1976)

- a) $U_i, j = f(x, z)$ πάνω στο Γ_2 όπου η $f(x, z)$ είναι γνωστή $\forall (i, j) \in \Gamma_2$
- b) $\partial U / \partial Z = 0$ για στοιχεία $(i, j) \in \Gamma_1$
- c) $Q_{i, j} = 0$ εκτός από στοιχεία που ανήκουν στο $G \cup \Gamma_1$

Στην μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης το $q_{i, j} \neq 0$ μόνο στην επιφάνεια του εδάφους και στην θέση όπου υπάρχει ηλεκτρόδιο ρεύματος.

3. 4 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Θεωρείται ένα σημείο $P \in G$ και τα τέσσερα γειτονικά του E, W, S, N (Σχήμα 3. 3). Για να επιλυθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών την (3. 16) εφαρμόζεται στο σημείο P η παρακάτω σχέση (Mufti, 1976)

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i,j+h_E/2} - u_{i,j-h_W/2}}{(h_E+h_W)/2} \quad (3. 19)$$

Για τα σημεία E ($i, j+h_{E/2}$) και W($i, j-h_{W/2}$) ισχύει:

$$\begin{aligned} &\text{Σημείο E} \\ &\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j+h_E/2} = h_E^{-1} (u_{i,j+h_E} - u_{i,j}) \Leftrightarrow \\ &(\sigma \frac{\partial u}{\partial x})_{i,j+h_E/2} = \sigma_{i,j+h_E/2} h_E^{-1} * (u_{i,j+h_E} - u_{i,j}) \\ &\text{Σημείο W} \\ &\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j-h_W/2} = h_W^{-1} (u_{i,j} - u_{i,j-h_W}) \Leftrightarrow \\ &(\sigma \frac{\partial u}{\partial x})_{i,j-h_W/2} = \sigma_{i,j-h_W/2} h_W^{-1} (u_{i,j} - u_{i,j-h_W}) \end{aligned} \quad (3. 20)$$

Κάνοντας τις πράξεις προκύπτει

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial x}(\sigma \frac{\partial u}{\partial x})\right]_{i,j} &= \frac{2}{h_E+h_W} [(\sigma \frac{\partial u}{\partial x})_{i,j+h_E/2} - (\sigma \frac{\partial u}{\partial x})_{i,j-h_W/2}] \\ &= \frac{2}{h_E+h_W} \left[\frac{\sigma_{i,j+h_E/2}}{h_E} (u_{i,j+h_E} - u_{i,j}) - \frac{\sigma_{i,j-h_W/2}}{h_W} (u_{i,j} - u_{i,j-h_W}) \right] \end{aligned} \quad (3. 21)$$

Συνεχίζοντας την ίδια εργασία και για τα υπόλοιπα τρία σημεία προκύπτει η λύση της (3. 16):

$$\alpha_E * u_{i,j+h_E} + \alpha_N * u_{i-h_N,j} + \alpha_W * u_{i,j-h_W} + \alpha_S * u_{i+h_S,j} - \alpha_P * u_{i,j} + q_{i,j} = 0 \quad (3. 22)$$

όπου

$$\alpha_E = \frac{2 \sigma_{i,j+h_E/2}}{h_E (h_E+h_W)} \quad (3. 23)$$

$$\alpha_N = 2 \sigma_{i-h_N/2,j} [h_N (h_N+h_S)]^{-1} \quad (3.24)$$

$$\alpha_W = 2 \sigma_{i,j-h_W/2} [h_W (h_E+h_W)]^{-1} \quad (3.25)$$

$$\alpha_S = 2 \sigma_{i+h_S/2,j} [h_S (h_N+h_S)]^{-1} \quad (3.26)$$

$$\alpha_P = \alpha_E + \alpha_W + \alpha_S + \alpha_N \quad (3.27)$$

Τώρα, θα εξετασθεί η περίπτωση όπου το P ανήκει στην επιφάνεια, δηλαδή $P \in \Gamma_1$ (Σχήμα 3. 4). Επειδή γίνεται αναφορά για το πρώτο στρώμα προσωρινά, ας θεωρηθεί (Mufti, 1976) ότι υπάρχει ένα υποθετικό στρώμα πάνω από την επιφάνεια της Γής (Σχήμα 3. 4), ίδιας αγωγιμότητας σ με το επιφανειακό έτσι ώστε:

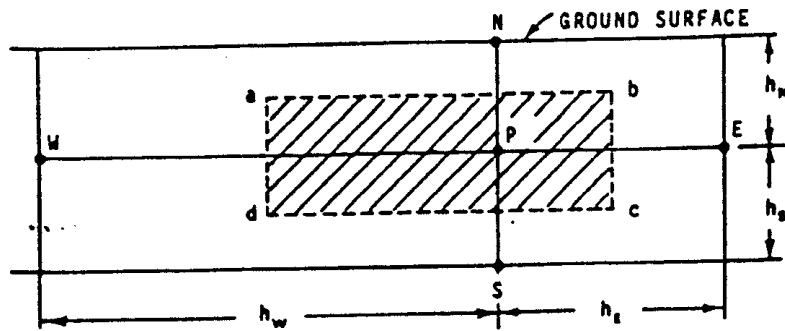
$$h_n = h_s \quad (3.28)$$

Από τα προηγούμενα ισχύει ότι:

$$a_n = a_s \quad (3.29)$$

Για την επιφάνεια ισχύει ότι: (Mufti, 1976)

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (3.30)$$



Σχήμα 3. 4: Το υποθετικό στρώμα που χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό της μορφής της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών στην επιφάνεια της γής.

Αυτή η προϋπόθεση ικανοποιείται αν:

$$u_{1+h_S, j} = u_{1-h_N, j} \quad (3.31)$$

Απο τις σχέσεις (3.29), (3.31), (3.22) προκύπτει:

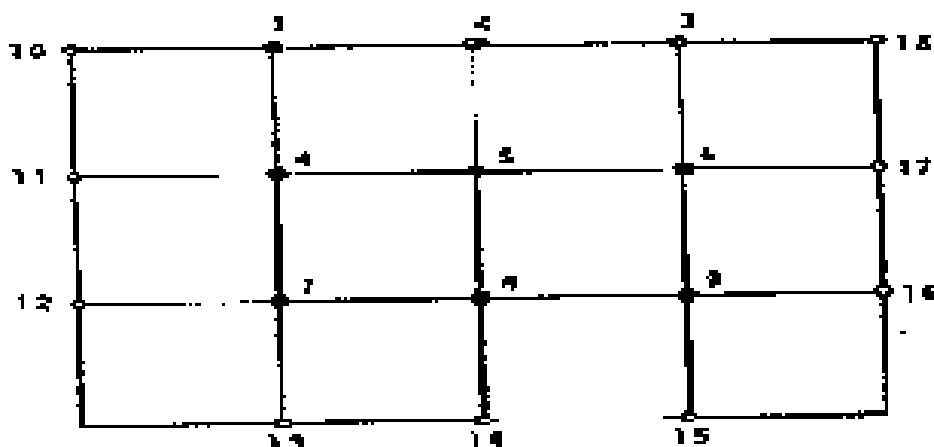
$$\alpha_E u_{1,j+h_E} + 2\alpha_S u_{1+h_S, j} + \alpha_W u_{1,j-h_W} - \alpha_P u_{1,j} + q_{i,j} = 0 \quad (3.32)$$

όπου το q_i δίνεται από την (3.18).

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για το θετικό ηλεκτρόδιο ρεύματος. Προκειμένου για το αρνητικό ηλεκτρόδιο το $q_{i,j}$ γίνεται $-q_{i,j}$. Το $q_{i,j}$ είναι μη μηδενικό όταν αντιστοιχεί σε θέση του ηλεκτροδίου ρεύματος και είναι μηδέν οπουδήποτε αλλού. Τώρα μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές του δυναμικού $U_{i,j}$ για κάθε στοιχείο $(i, j) \in \Gamma_2$. Ακόμη η τιμή του $U_{i,j}$ για κάθε στοιχείο $(i, j) \in \Gamma_2$ είναι γνωστή.

3.5 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σε αυτήν την παράγραφο θα εξετασθεί η πινακοποίηση των εξισώσεων διαφορών (3.22) και (3.32). Ας θεωρηθεί κάναβος διαστάσεων 3×3 (Σχήμα 3.5). Ακόμη έστω ότι υπάρχουν ομοιόμορφες κυψελίδες (κελιά) αν και η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και για μη ομοιόμορφο δίκτυο. Θα εκφραστεί το δυναμικό κάθε σημείου συναρτήσει του δυναμικού στα τέσσερα γειτονικά του σημεία και των παραμέτρων $\alpha_E, \alpha_N, \alpha_W, \alpha_P, \alpha_S$. Τα κελιά αριθμούνται στο Σχήμα 3.5. Το δυναμικό στα όρια θεωρείται γνωστό.



Σχήμα 3. 5: Το δίκτυο 3*3 που χρησιμοποιείται ως παράδειγμα για την γραφή των εξισώσεων

Για το στοιχείο 1 η εξίσωση (3. 32) δίνει:

$$-\alpha_P(1) u_1 + \alpha_E(1) u_2 + 2 \alpha_S(1) u_4 + \alpha_W(1) u_{10} + q_P(1) = 0 \quad (3. 33)$$

Ξεχωρίζοντας τους γνωστούς από τους αγνώστους όρους ισχύει:

$$\alpha_P(1) u_1 - \alpha_E(1) u_2 - 2 \alpha_S(1) u_4 = q_P(1) + \alpha_W(1) u_{10} = b_1 \quad (3. 34)$$

Ομοίως τώρα για τα υπόλοιπα 8 στοιχεία ισχύει:

$$\alpha_P(2) u_2 - \alpha_E(2) u_3 - \alpha_W(2) u_1 - 2 \alpha_S(1) u_5 = q_P(2) = b_2 \quad (3. 35)$$

$$\alpha_P(3) u_3 - \alpha_W(3) u_2 - 2 \alpha_S(3) u_6 = q_P(3) + \alpha_E(3) u_{18} = b_3 \quad (3. 36)$$

$$\alpha_P(4) u_4 - \alpha_E(4) u_5 - \alpha_N(4) u_1 - \alpha_S(4) u_7 = q_P(4) + \alpha_W(4) u_{11} = b_4 \quad (3. 37)$$

$$\alpha_P(5) u_5 - \alpha_E(5) u_6 - \alpha_N(5) u_2 - \alpha_W(5) u_4 - \alpha_S u_8 = q_P(5) = b_5 \quad (3. 38)$$

$$\alpha_P(6) u_6 - \alpha_N(6) u_3 - \alpha_W(6) u_5 - \alpha_S(6) u_9 = q_P(6) + \alpha_E(6) u_{17} = b_6 \quad (3. 39)$$

$$\alpha_P(7) u_7 - \alpha_E(7) u_8 - \alpha_N(7) u_4 = q_P(7) + \alpha_W(7) u_{12} + \alpha_S(7) u_{13} = b_7 \quad (3.40)$$

$$\alpha_P(8) u_8 - \alpha_E(8) u_9 - \alpha_N(8) u_5 - \alpha_W(8) u_7 = q_P(8) + \alpha_S(8) u_{14} = b_8 \quad (3.41)$$

$$\alpha_P(9) u_9 - \alpha_N(9) u_6 - \alpha_W(9) u_8 = q_P(9) + \alpha_E(9) u_{16} + \alpha_S(9) u_{15} = b_9 \quad (3.42)$$

Αν γραφτούν υπό μορφή πινάκα οι εξισώσεις (3. 35)-(3. 42) δημιουργείται το γραμμικό σύστημα (πίνακας 3. 1)

$$\begin{bmatrix}
 \alpha_P(1) & -\alpha_E(1) & 0 & -2\alpha_S(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\alpha_W(2) & \alpha_P(2) & -\alpha_E(2) & 0 & -2\alpha_S(2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\alpha_W(3) & \alpha_P(3) & 0 & 0 & -2\alpha_S(3) & 0 & 0 & 0 \\
 -\alpha_N(4) & 0 & 0 & \alpha_P(4) & -\alpha_E(4) & 0 & -\alpha_S(4) & 0 & 0 \\
 0 & -\alpha_N(5) & 0 & -\alpha_W(5) & \alpha_P(5) & -\alpha_E(5) & 0 & -\alpha_S(5) & 0 \\
 0 & 0 & -\alpha_N(6) & 0 & -\alpha_W(6) & \alpha_P(6) & 0 & 0 & -\alpha_S(6) \\
 0 & 0 & 0 & -\alpha_N(7) & 0 & 0 & \alpha_P(7) & -\alpha_E(7) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_N(8) & 0 & -\alpha_W(8) & \alpha_P(8) & -\alpha_E(8) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_N(9) & 0 & -\alpha_W(9) & \alpha_P(9)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \\ b_9
 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 3. 1: Οι εξισώσεις (3. 35)-(3. 42) υπό μορφή πίνακα

Σε πιο συνεπτυγμένη μορφή ο Πίνακας (3. 1) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Rv=b \quad (3. 43)$$

όπου

$$R=[r_{i,j}], i,j=[1,2,...,9]$$

$$v=[u_1,u_2,...,u_9]$$

$$b=[b_1,b_2,...,b_9]$$

Ο Πίνακας R καλείται και πίνακας των αντιστάσεων (Resistivity matrix), επειδή τα στοιχεία του εξαρτώνται άμεσα από την ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους.

3. 6 ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έχει ήδη αναφερθεί ότι στην πράξη υπάρχει μεγάλο πλήθος μετρήσεων και άρα ανάλογος αριθμός εξισώσεων. Για το λόγο αυτό λύνετε το σύστημα των εξισώσεων με τη μέθοδο S. O. R. (successive overrelaxation) η οποία βασίζεται στον αλγόριθμο Gauss-Seidel και δίνει τη λύση μετά απο ένα ορισμένο πλήθος επαναλήψεων. Η μέθοδος αυτή δίνει ταχύτερα τη λύση σε σχέση με άλλες μεθόδους για μεγάλο πλήθος μετρήσεων.

Η μέθοδος έχει ως εξής: Αρχικά θεωρείται μια αυθαίρετη τιμή για το $U_{i,j}$ όπου $(i,j) \in G$. Μετά βελτιώνεται αυτή η εκτίμηση με τη βοήθεια της (3. 22) ή αν πρόκειται για το πρώτο στρώμα, της (3. 32) προχωρώντας κατά αύξοντα αριθμό γραμμών και κατά αύξοντα αριθμό στηλών για την ίδια γραμμή, κατά την διάρκεια της λύσης. Απλούστερα κατά την διάρκεια της λύσης, διατρέχεται ο πίνακας R από τα αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Μια επανάληψη θεωρείται λήξασα όταν έχουν υπολογιστεί εκτιμήσεις του δυναμικού για όλα τα κελιά.

Αν συμβολιστούν τα αποτελέσματα για κάθε $U_{i,j}$ μετά το πέρας της k επανάληψης ως $U_{i,j}^k$, τότε για την k+1 επανάληψη οι διαφορές δυναμικού συμβολίζονται ως $U_{i,j}^{k+1}$. Θα υπολογιστούν το διάνυσμα v που δίνεται από την:

$$\vec{v} = \lim_{k \rightarrow \infty} u^k \quad (3. 44)$$

Η επαναληπτική διαδικασία τελειώνει όταν η διαφορά τιμών μεταξύ δυο επαναλήψεων σε κάθε $U_{i,j}$, είναι μικρότερη από ε όπου το ε είναι πολύ μικρός αριθμός

και ονομάζεται ανοχή των διαφορών δυναμικού, που εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια στη λύση, δηλαδή

$$d^{(k)} < \varepsilon, \quad d^{(k)} = \max_{(i,j) \in \Gamma_1} |u_{i,j}^{(k)} - u_{i,j}^{(k-1)}| \quad (3.45)$$

Τώρα ας θεωρηθεί ότι είμαστε στην $k+1$ επανάληψη, με την βοήθεια της (3.41) μπορεί να βρεθεί η σχέση που υπολογίζει τα U_i, j^{k+1} . Επειδή τα U_i, j^k καθώς και τα απο προηγουμένως υπολογισμένα U_i, j^{k+1} είναι γνωστά ισχύει:

$$u_{i,j}^{(k+1)} = \frac{\alpha_E(i,j) u_{i,j}^{(k)} + \alpha_N(i,j) u_{i-1,j}^{(k+1)} + \alpha_W(i,j) u_{i,j-1}^{(k+1)} + \alpha_S(i,j) u_{i+1,j}^{(k)} + q_{i,j}}{\alpha_P(i,j)} \quad (3.46)$$

Παραπλήσια έκφραση μπορεί να διατυπωθεί και για την επιφάνεια με τη βοήθεια της (3.32). Η σχέση (3.46) ονομάζεται και αλγόριθμος των Gauss-Seidel.

3.7 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όταν η περιοχή ABCD του σχήματος 3.2 είναι μεγάλη και το όριο BCDA είναι αρκετά μακριά από τα ηλεκτρόδια ρεύματος μπορεί να αγνοηθεί η ροή φορτίου από τα όρια. Αυτό έχει ως συνέπεια τις ακόλουθες οριακές συνθήκες του Neumann:

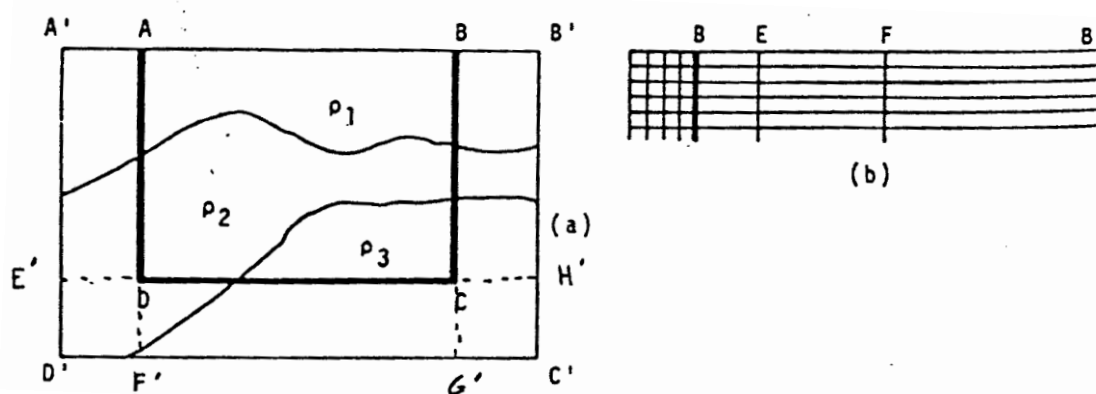
$$\left. \frac{\partial u(x,z)}{\partial x} \right|_{i,j} = 0 \quad \text{για } i=0, \dots, m+1 \text{ και } j=0, n+1 \quad (3.47)$$

$$\left. \frac{\partial u(x,z)}{\partial z} \right|_{i,j} = 0 \quad \text{για } j=0, 1, \dots, n+1 \text{ και } i=m+1 \quad (3.48)$$

Επίσης για τα μοντέλα με χαμηλή αγωγιμότητα, θεωρείται ότι το δυναμικό στο όριο BCDA είναι μηδέν δηλαδή να ακολουθηθεί η απλούστερη οριακή συνθήκη του Dirichlet:

$$u(i,j) = 0 \quad \forall (i,j) \in \Gamma_2 \quad (3.49)$$

Έχει παρατηρηθεί εμπειρικά, ότι το μοντέλο που εξετάζεται πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε με τη βοήθεια των (3. 47) έως και (3. 49) να προκύπτουν ακριβή αποτελέσματα. Σε αντίθετη περίπτωση οι (3. 47-3. 48) μας δίνουν υπερεκτιμημένα αποτελέσματα ενώ η (3. 49) υποεκτιμημένα. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί αν χρησιμοποιηθεί ένα ακόμη τεχνητό όριο $A'B'C'D'A'$ που περικλείει το ABCDA (Σχήμα 3. 6). Στο σχήμα 3. 6β παρατηρείται ότι ανάμεσα στις γραμμές BC, $B'C'$ υπάρχουν τρεις ακόμη κυψελίδες οι οποίες είναι οι BE, EF, FB' που είναι 10, 100, 1000 φορές μεγαλύτερες από τις κυψελίδες μέσα στο ABCD. Ίδια αντιμετώπιση υπάρχει και για το κάτω κομμάτι του ορίου. Μέσα σε αυτές τις κυψελίδες οι τιμές των αντιστάσεων καθορίζονται από τις αντίστοιχες τιμές στα όρια της περιοχής ABCD.



Σχήμα 3. 6: α) Η επέκταση $A'B'C'D'A'$ του δικτύου με σκοπό την καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Β) Μια μεγένθυση της επέκτασης όπου φαίνονται επιπρόσθετα στρώματα.

Οι παραπάνω επεκτάσεις του δικτύου προς τα δεξιά, αριστερά και κάτω, διασφαλίζουν ότι δεν υπάρχει ροή ρεύματος από τα όρια. Ο αριθμός των επιπρόσθετων κελίων εξαρτάται από τις διαστάσεις του μοντέλου που έχει υπολογιστεί. Για μοντέλο με 6 σταθμούς και 15 μετρήσεις ανά σταθμό έχουν προστεθεί 100 γραμμές στο κάτω τμήμα και 250 στήλες σε κάθε ένα από τα πλαϊνά όρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

4. 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ επιτυγχάνεται με την χρήση του λογισμικού πακέτου Res2dinv. Το RES2DINV είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας και μοντελοποίησης γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου. Παρέχει τη δυνατότητα έκφρασης του βάθους σε μέτρα (m), της οριζόντιας απόστασης όπου αναπτύσσεται η γραμμή σε μέτρα (m) και της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε Ohm-m. Λεπτομερέστερα το πρόγραμμα αυτό χωρίζει το υπέδαφος σε έναν αριθμό παραλληλογράμμων και θεωρεί σταθερή την πραγματική ειδική αντίσταση σε κάθε ορθογώνιο. Ξεκινώντας από αρχικό μοντέλο υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό και συγκρίνονται με τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης αντίστασης.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα, εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο dat. Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές. Υπάρχει η δυνατότητα να μην ληφθούν υπόψη μετρήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο σφάλμα. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του αριθμού των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής.

4. 1. 1 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων

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

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

$$d_i=f_i(m_1, m_2, \dots, m_M)+e \quad (4. 1)$$

όπου e το σφάλμα των μετρήσεων ή και του μοντέλου.

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

$$d_i = f_i(m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0) + e \quad (4.2)$$

Προσεγγίζοντας τη συνάρτηση f_i από τον πρώτο όρο της σειράς Taylor γύρω από το m^0 προκύπτει

$$f_i(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, \dots, m_M^0 + \delta m_M) + \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \right|_{m^0} \delta m_j \right\} \quad (4.3)$$

Το σφάλμα από τη σχέση (3. 1) είναι:

$$e_i = d_i - f_i(m) \approx d_i - f_i(m^0) - \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \right|_{m^0} \delta m_j \right\} \quad (4.4)$$

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

$$e_i \approx \Delta d - Ax \quad (4.5)$$

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

$$q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad (4.6)$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το q ως προς x και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν. Η λύση x προστίθεται στο αρχικό μοντέλο m^0 και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο m^1

$$m^1 = m^0 + x \quad (4.7)$$

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

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad (4.8)$$

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

Από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι κανονικές εξισώσεις:

$$(A^T D^T D A) x = (A^T D^T D) \Delta d \quad (4.9)$$

όπου D είναι ο πίνακας στατιστικών βαρών, τα στοιχεία του οποίου είναι τα σχετικά βάρη που εξαρτώνται από την ακρίβεια κάθε μέτρησης. Από την επίλυσή τους ως προς x προκύπτει η νέα εξίσωση :

$$x = (A^T D^T D A)^{-1} (A^T D^T D) \Delta d \quad (4.10)$$

όπου το $(A^T D^T D A)^{-1} (A^T D^T D)$ είναι ο ψευδοαντίστροφος του A .

Με βάση την παραπάνω εξίσωση (3. 10) μπορεί να καθοριστεί ένας επαναληπτικός αλγόριθμος επίλυσης του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος. Έστω ότι κατά την k επανάληψη η εκτίμηση του μοντέλου της αντίστασης είναι m_k τότε:

- Υπολογίζονται οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις $f(m_k)$ και ο Ιακωβιανός πίνακας A_k για την κατανομή της αντίστασης m_k , μέσω της επίλυσης του ευθέως προβλήματος.
- Υπολογίζεται το διάνυσμα διόρθωσης του μοντέλου των αντιστάσεων

$$x_k = (A_k^T D^T D A_k)^{-1} (A_k^T D^T D) \Delta d_k \quad (4. 11)$$

- Το βελτιωμένο μοντέλο των αντιστάσεων προκύπτει από την πρόσθεση της διόρθωσης στο προηγούμενο μοντέλο $m_{k+1} = m_k + x_k$. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν κάποια προκαθορισμένα κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού.

4. 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την αντιστροφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2Dinv. Το συγκεκριμένο λογισμικό περιέχει διάφορες μεθόδους για την αντιστροφή των δεδομένων. Από αυτές, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω:

- Κανονικοποίηση με Περιορισμούς Εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion)

Με τη μέθοδο αυτή ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων με χρήση της νόρμας L_2 . Αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

- Συνδυασμένη Μέθοδος Αντιστροφής (combined inversion method)

Όταν η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης έχει μεγάλο εύρος, δεν είναι εύκολος ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Επίσης, όταν παρατηρείται πολύ χαμηλή τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενδέχεται να υπολογιστούν χαμηλότερες τιμές από τις πραγματικές και να μη γίνει σωστή η απεικόνιση του υπεδάφους. Στις παραπάνω περιπτώσεις, χρησιμοποιείται η μέθοδος αντιστροφής που συνδυάζει τη μέθοδο Marquardt (κανονικοποίηση μηδενικού βαθμού με χρήση της νόρμας L_2) ή ridge regression και τη μέθοδο Occam ή smoothness constrained (κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης). Η μέθοδος Marquardt μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνη

της, αν και θεωρείται ότι παρουσιάζει αστάθεια για μετρήσεις που περιέχουν θόρυβο, όταν χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός παραμέτρων.

- Μέθοδος Αντιστροφής με τη Χρήση της Νόρμας L1 (Robust)

Με την παραπάνω μέθοδο, ελαχιστοποιείται η απόλυτη διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων της αντίστασης. Με αυτό τον τρόπο στο μοντέλο που παράγεται, διακρίνονται καλύτερα οι διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ των περιοχών που παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από σχεδόν σταθερή τιμή αντίστασης. Η μέθοδος Robust παρουσιάζει καλά αποτελέσματα όταν το υπέδαφος αποτελείται από διαφορετικά γεωλογικά στρώματα, π. χ εδαφικός σχηματισμός και βράχος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

5.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή δομείται από προαλπικούς, αλπικούς και μεταλπικούς σχηματισμούς που είναι με σειρά από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους οι ακόλουθοι:

1. Αμφιβολιτικοί και μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι του προαλπικού Πελαγονικού υποβάθρου.
2. Μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα, όπως κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα που συσχετίζονται με την Τριαδική – Ιουρασική περίοδο της αλπικής ιζηματογένεσης.

Οι δύο αυτές ομάδες πετρωμάτων, εμφανίζονται σε ασυμφωνία, με τον σχηματισμό των μαρμάρων-κρυσταλλικών ασβεστολίθων, τεκτονικά επωθημένο πάνω στους υποκείμενους σχιστόλιθους-γνευσίους.

Ενδιάμεσα των δύο αυτών σχηματισμών, εμφανίζεται τόσο στην περιοχή διερεύνησης (σε δείγματα γεωτρήσεων) όσο και σε πρηνή της ευρύτερης περιοχής, η έντονα τεκτονισμένη ζώνη επώθησης πάχους από μερικά μέτρα έως και 10-15m. Πρόκειται επί της ουσίας για ένα τεκτονικό mélange, με σχιστολιθικής κυρίως προέλευσης υλικό, στο οποίο το ανώτερο τμήμα «κλυμπούν» διάσπαρτα ασβεστολιθικά τεμάχια, μεγέθους λίθου έως και χαλίκων.

Πάνω από τους προαναφερόμενους γεωλογικούς σχηματισμούς, έχει αποτεθεί σε ασυμφωνία κατά το Νεογενές, σειρά κλαστικών ιζημάτων (μάργες, αμμούχες μάργες, αργιλούχες μάργες κλπ), πάχους μερικών εκατοντάδων μέτρων, εντός των οποίων αναπτύσσονται σημαντικής ανάπτυξης λιγνιτικές ενδιαστρώσεις.

Πάνω από τον Νεογενές, έχει αποτεθεί σε ασυμφωνία κατά το Τεταρτογενές, σειρά κλαστικών ιζημάτων, ποταμοχερσαίας προέλευσης, (Αγιουτάντης Ζ. 2012).

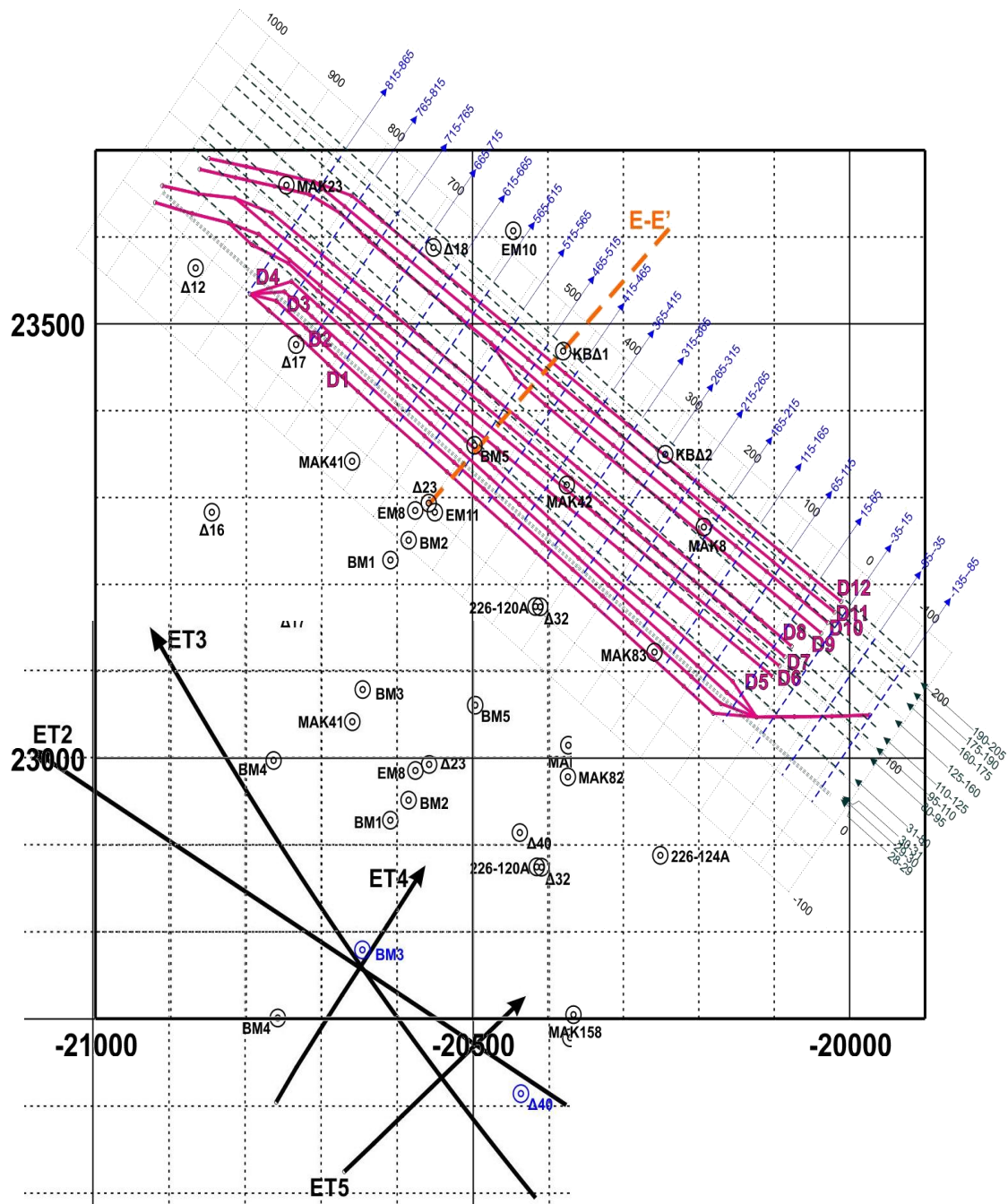
Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής στην ηλεκτρική τομογραφία για τον εντοπισμό τυχόν ρηγμάτων και δομών υψηλής αντίστασης με την χρήση συνθετικών δεδομένων. Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να εξετασθεί η εφαρμοσιμότητα της

ηλεκτρικής τομογραφίας και των εξεταζόμενων διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής στον εντοπισμό ρηγμάτων και ασβεστολιθικών φακών στο λιγνιτορυχείο Μαυροπηγής Ν.Κοζάνης.

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται οι θέσεις των γεωηλεκτρικών γραμμών μελέτης και των γεωτρήσεων που απαντώνται στο νότιο τμήμα του ορυχείου της Μαυροπηγής. Οι συντεταγμένες του χάρτη αντιστοιχούν στο γεωδαιτικό σύστημα Hatt (παλαιό). Οι γραμμές ET2 – ET5 διασκοπήσαν το βραχώδες υπόβαθρο της περιοχής μελέτης, ενώ οι γραμμές D1-D12 πραγματοποιήθηκαν επί των βαθμίδων της εκσκαφής του ορυχείου με στόχο τον εντοπισμό της διεπιφάνειας μεταξύ νεογενών σχηματισμών και σχιστολιθικού υποβάθρου (Αγιουτάντης, Ζ. 2012).

Στο Σχήμα 5.2 παρατίθεται η συνδυαστική απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών που προέκυψαν από την εφαρμογή της διάταξης Πόλου - Διπόλου στις γραμμές μελέτης ET2 και ET3 με προοπτική από τα ΒΑ. Οι υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($> 300 \text{ ohm.m}$) που εμφανίζονται στο κεντρικό και επιφανειακό τμήμα των γεωηλεκτρικών τομών αποδίδονται στον ασβεστόλιθο του Τριαδικού – Ιουρασικού. Οι ενδιάμεσες έως υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($50 - 800 \text{ ohm.m}$) που εμφανίζονται σχεδόν σε όλο το μήκος των γεωηλεκτρικών τομών, ακριβώς κάτω από τον ασβεστόλιθο αποδίδονται στους σχιστόλιθους του υποβάθρου. Οι χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($< 50 \text{ ohm.m}$) που εμφανίζονται στα άκρα των γεωηλεκτρικών τομών αντιστοιχούν στα ιζήματα του Νεογενούς-Τεταρτογενούς. Το πάχος του ασβεστόλιθου στην θέση της γεώτρησης BM3 που προέκυψε από τις γεωηλεκτρικές τομές συμφωνεί με το πάχος του ανορυγμένου ασβεστολίθου, καθώς επίσης και το ΝΑ άκρο του εν λόγω σχηματισμού, όπως προέκυψε από τις τομές, συνάδει με τα ευρήματα της γεώτρησης Δ40 (Αγιουτάντης Ζ, 2012).

Στο Σχήμα 5.3 παρατίθεται η γεωηλεκτρική τομή από την συνδυασμένη τρισδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων των γραμμών μελέτης D1-D12 (διατάξεις Wenner-Schlumberger και Διπόλου-Διπόλου). Η θέση της τομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3 (Υ dist.: 31-80). Με μαύρο χρώμα απεικονίζονται στην γεωτρητική στήλη BM5 οι Τεταρτογενείς και Νεογενείς σχηματισμοί, ενώ με κόκκινο ο σχιστόλιθος. Η άσπρη γραμμή ορίζει τα όρια του σχιστόλιθου στη γεωηλεκτρική τομή.



5.1.1 Γεωτρητικά δεδομένα

Για την αξιολόγηση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων ελήφθησαν υπόψη όλα τα ήδη υπάρχοντα γεωτρητικά δεδομένα στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, καθώς επίσης και τα δεδομένα των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του εν λόγω έργου (Σχήμα 5.1).

Στην παρούσα έκθεση παρουσιάζεται συνοπτικά (Πίνακας 5.1) η περιγραφή των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιγράφονται έχουν ενοποιηθεί σε: 1) Τεταρτογενή-Νεογενή ιζήματα, 2) Ασβεστόλιθος του Τριαδικού – Ιουρασικού, 3) Αμφιβολιτικοί και μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι του προαλπικού Πελαγονικού υποβάθρου και 4) Τεκτονισμένη ζώνη επώθησης.

Πίνακας 5.1: Περιγραφή των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων.

BM2			
X=-20585.000 Y=23251.000 Z=710.000			
Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
710.000	0	Τεταρτογενή-Νεογενή ιζήματα	35.30
—	—		
674.700	35.30	Ασβεστόλιθος	45.70
674.700	35.30		
—	—		
629.000	81.00	Τεκτονισμένη ζώνη επώθησης	9.00
629.000	81.00		
—	—		
620.000	90.00	Σχιστόλιθος	18.00
620.000	90.00		
—	—	Σχιστόλιθος	18.00
602.000	108.00		
602.000	108.00	Τέλος γεώτρησης	108.00

BM3			
X=-20645.170 Y=23078.860 Z=727.170			
Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
727.170	0	Ασβεστόλιθος	46.50
—	—		
680.670	46.50	Τεκτονισμένη ζώνη επώθησης	15.50
680.670	46.50		
—	—		
665.170	62.00	Σχιστόλιθος	188.00
665.170	62.00		
—	—		
477.170	250.00	Τέλος γεώτρησης	250.00
477.170	250.00		

BM4			
X=-20763.81 Y=22997.18 Z=737.24			
Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
734.240	0	Ασβεστόλιθος	21.60
—	—		
716.640	21.60	Τεκτονισμένη ζώνη επώθησης	4.40
716.640	21.60		
—	—		
712.240	26.00	Σχιστόλιθος	136.00
712.240	26.00		
—	—		
626.240	160.00	Τέλος γεώτρησης	160.00
626.240	160.00		

BM5			
X=-20497.45 Y=23359.99 Z=649.45			
Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
649.45	0	Τεταρτογενή-Νεογενή ιζήματα	191.00
—	—		
458.45	191.00	Σχιστόλιθος	6.00
458.45	191.00		
—	—		
452.45	197.00	Τέλος γεώτρησης	160.00
452.45	197.00		

MAK158			
X=-20366.160 Y=22704.530 Z=704.300			

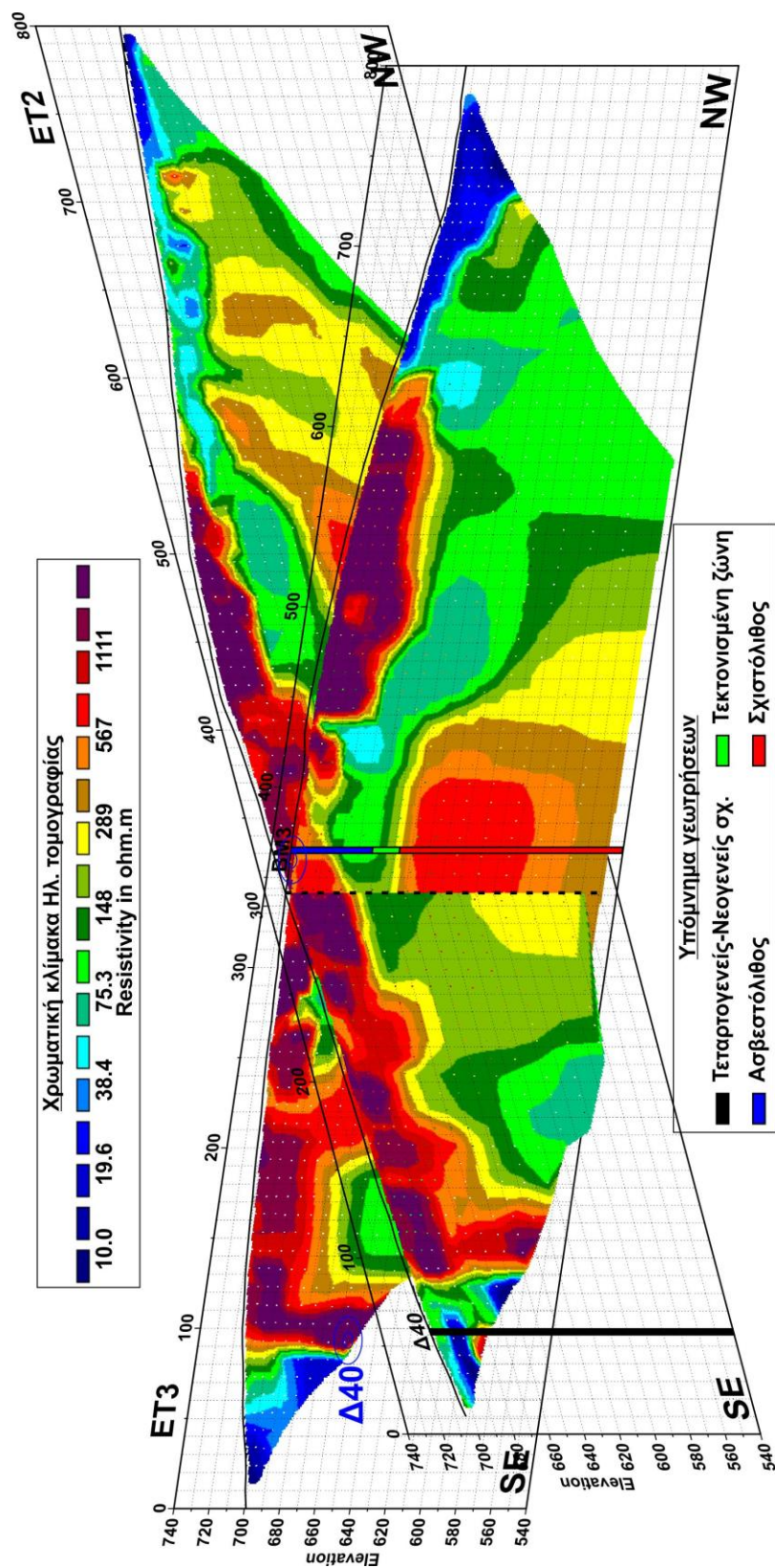
Δ16			
X=-20845.710 Y=23282.95 Z=707.670			

Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
704.300	0	Τεταρτογενή- Νεογενή ιζήματα	6.00
— 698.300	- 6.00		
698.300	6.00	Σχιστόλιθος	144.00
— 554.300	- 150.00		
554.300	150.00		
		Τέλος γεώτρησης	150.00

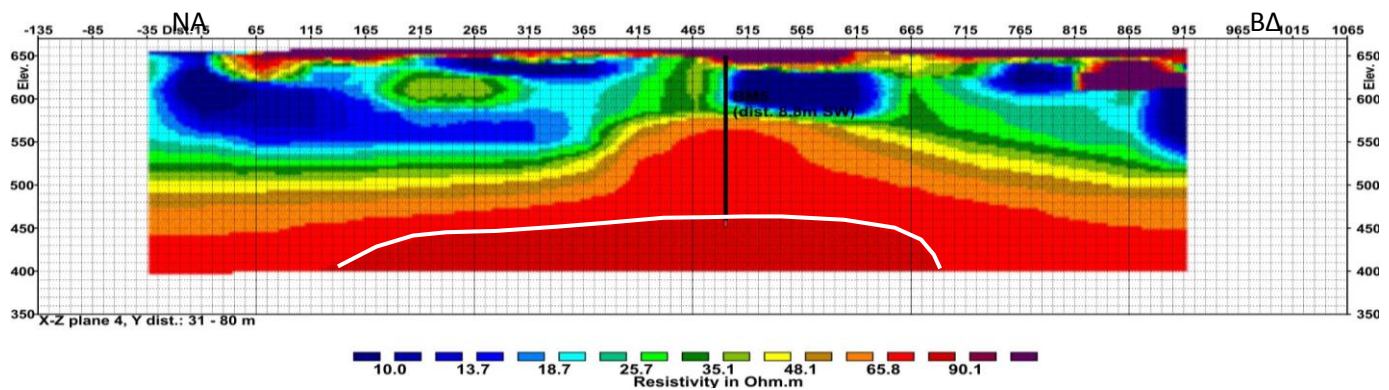
Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
707.670	0	Τεταρτογενή- Νεογενή ιζήματα	3.00
— 704.670	- 3.00		
704.670	3.00	Ασβεστόλιθος	28.00
— 676.670	- 31.00		
676.670	31.00		
		Τέλος γεώτρησης	31.00

Δ23			
Χ=-20558.080 Y=23293.500 Z=714.020			
Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
714.020	0	Τεταρτογενή- Νεογενή ιζήματα	105.00
— 609.020	- 105.00		
609.020	105.00	Ασβεστόλιθος	12.00
— 597.020	- 117.00		
597.020	117.00		
		Τέλος γεώτρησης	117.00

Δ40			
Χ=-20437.340 Y=22914.150 Z=710.370			
Απόλυτο Υψόμετρο	Βάθος (m)	Περιγραφή	Πάχος (m)
710.370	0	Τεταρτογενή- Νεογενή ιζήματα	195.00
— 515.370	- 195.00		
515.370	195.00	Τέλος γεώτρησης	195.00

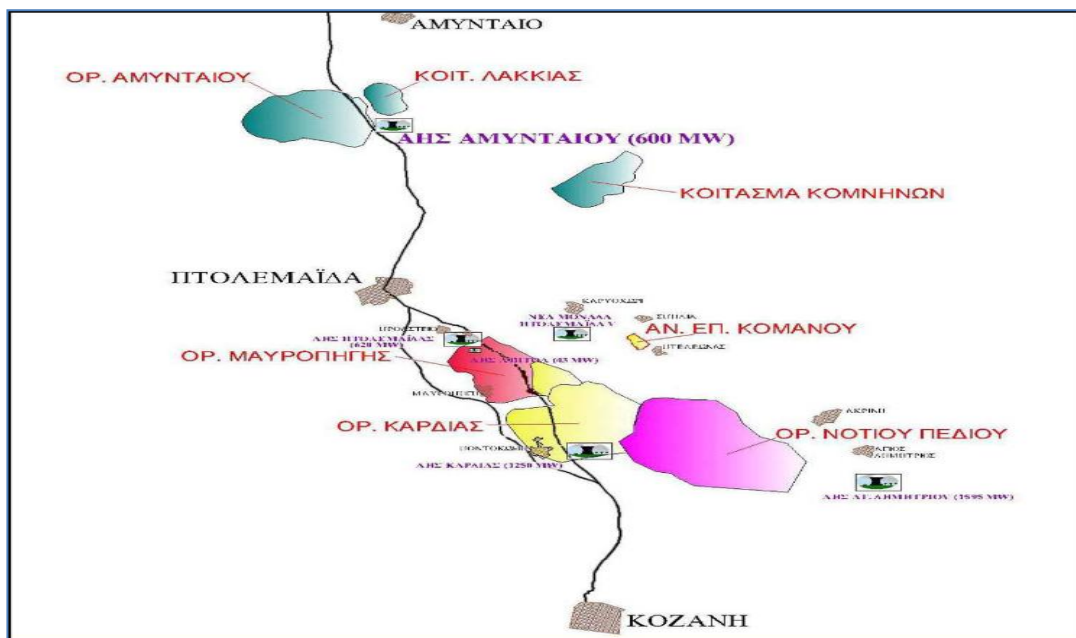


Σχήμα 5.2: Συνδυαστική απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών που προέκυψαν από την εφαρμογή της διάταξης Πόλου - Διπόλου στις γραμμές μελέτης ΕΤ2 και ΕΤ3. Προοπτική από τα ΒΑ.



Σχήμα 5.3: Γεωηλεκτρική τομή από την συνδυασμένη τρισδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων των γραμμών μελέτης D1-D12 (διατάξεις Wenner-Schlumberger και Διπόλου-Διπόλου). Η θέση της τομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10 (Y dist.:31-80). Με μαύρο χρώμα απεικονίζονται στην γεωτρητική στήλη οι Τεταρτογενείς και Νεογενείς σχηματισμοί, ενώ με κόκκινο ο σχιστόλιθος. Η άσπρη γραμμή ορίζει τα όρια του σχιστόλιθου στη γεωηλεκτρική τομή.

Η διεύθυνση της γραμμής μελέτης είναι NA προς ΒΔ. Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν 55 ηλεκτρόδια σε ισαποστάσεις των 10 m, ενώ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την διάταξη Wenner – Schlumberger και την διάταξη Πόλου – Διπόλου. Η συγκεκριμένη γραμμή αποτελείται από 2 αναπτύγματα 55 ηλεκτροδίων με αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους κατά 50%.

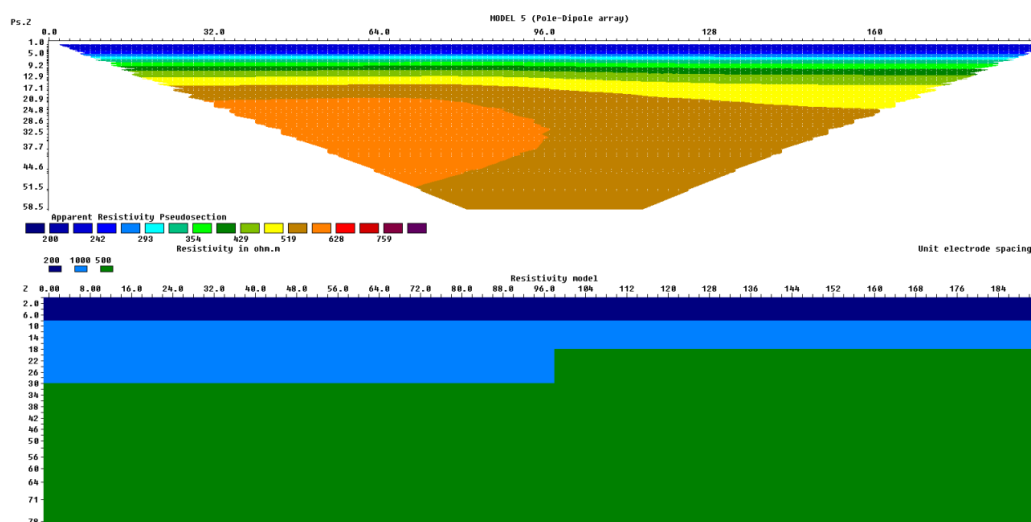


Σχήμα 5.4: Γενική διάταξη Ορυχείων - Κοιτασμάτων Λιγνιτοφόρου λεκάνης Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου (ΔΕΗ, 2009).

5. 1.1: Μοντέλα και Συνθετικά Δεδομένα

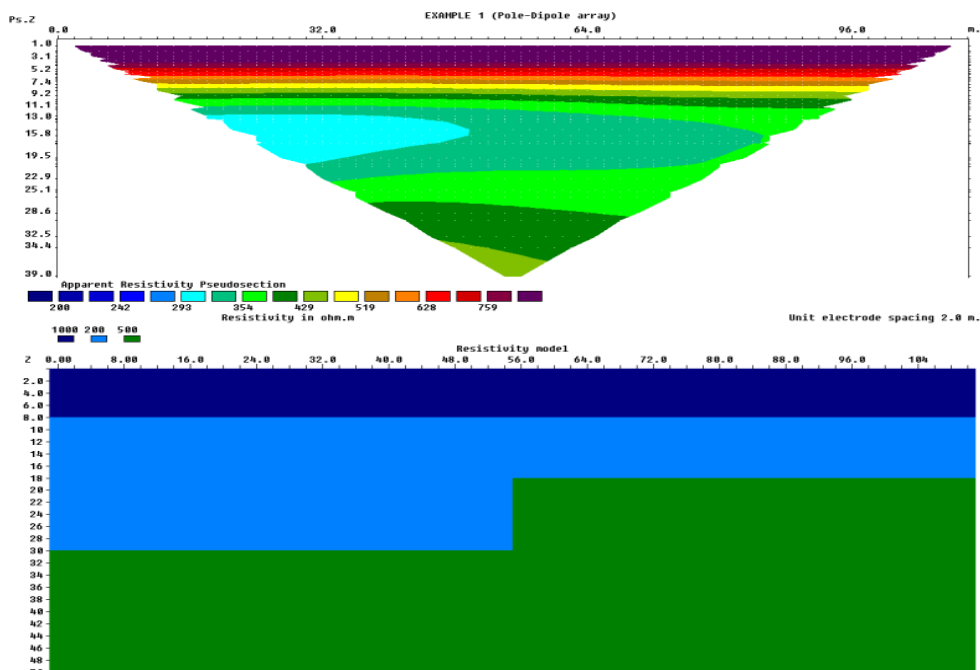
Χρησιμοποιήθηκαν 6 μοντέλα. Στα 3 πρώτα μοντέλα τοποθετήθηκε ρήγμα στην μέση της γραμμής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη πόλου-διπόλου με τις αντιστάσεις των στρωμάτων να αλλάζουν τιμές και τον αριθμό των ηλεκτροδίων να υποδιπλασιάζεται. Επίσης προστέθηκε θόρυβος. Στα μοντέλα 4, 5, 6 τοποθετήθηκε δομή υψηλής αντίστασης στην μέση της γραμμής μελέτης, εναλλάσσοντας τις αντιστάσεις των στρωμάτων και αυξομειώνοντας το βάθος.

1ο Μοντέλο: Χρησιμοποιήθηκε διάταξη πόλου-διπόλου και διάταξη Schlumberger (Σχήμα 5.5) με αριθμό ηλεκτροδίων **99**, ισαπόσταση ηλεκτροδίων **2m** και επίπεδα βάθους **30m**. Σε αυτό το μοντέλο τοποθετήθηκε ρήγμα στην μέση της γραμμής μελέτης **98m**. Η αντίσταση του πρώτου στρώματος είναι **200 Ωm**, του δεύτερου στρώματος **1000 Ωm** ενώ του τρίτου **500 Ωm**.



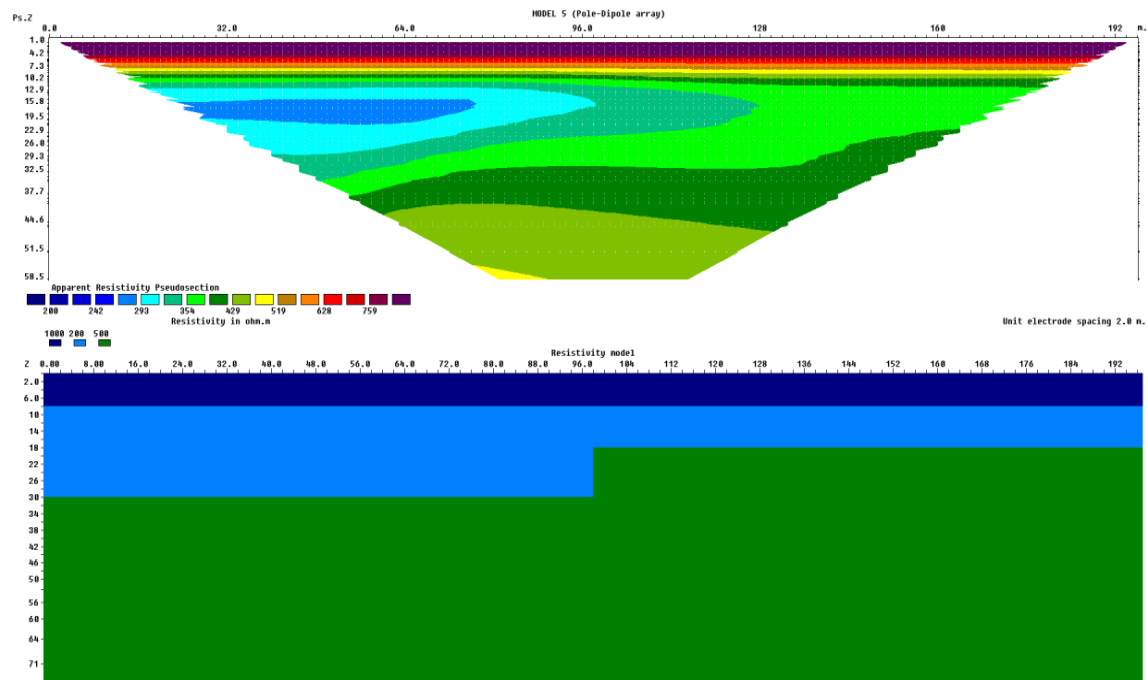
Σχήμα 5.5: Απεικόνιση του μοντέλου 1. Πάνω διακρίνεται η συνθετική ψευδοτομή με διάταξη pole-dipole. Η χρωματική κλίμακα στην πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ενώ κάτω διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου (βάθος, αντίσταση στρώματος, διαστάσεις).

2ο Μοντέλο: Χρησιμοποιήθηκε διάταξη πόλου-διπόλου(Σχήμα 5.6) με αριθμό ηλεκτροδίων **56**, ισαπόσταση ηλεκτροδίων **2m** και επίπεδα βάθους **10m**. Σε αυτό το μοντέλο τοποθετήθηκε ρήγμα στην μέση της γραμμής μελέτης **56m**. Η αντίσταση του πρώτου στρώματος είναι **1000 Ωm**, του δεύτερου στρώματος **200 Ωm** ενώ του τρίτου **500Ωm**.



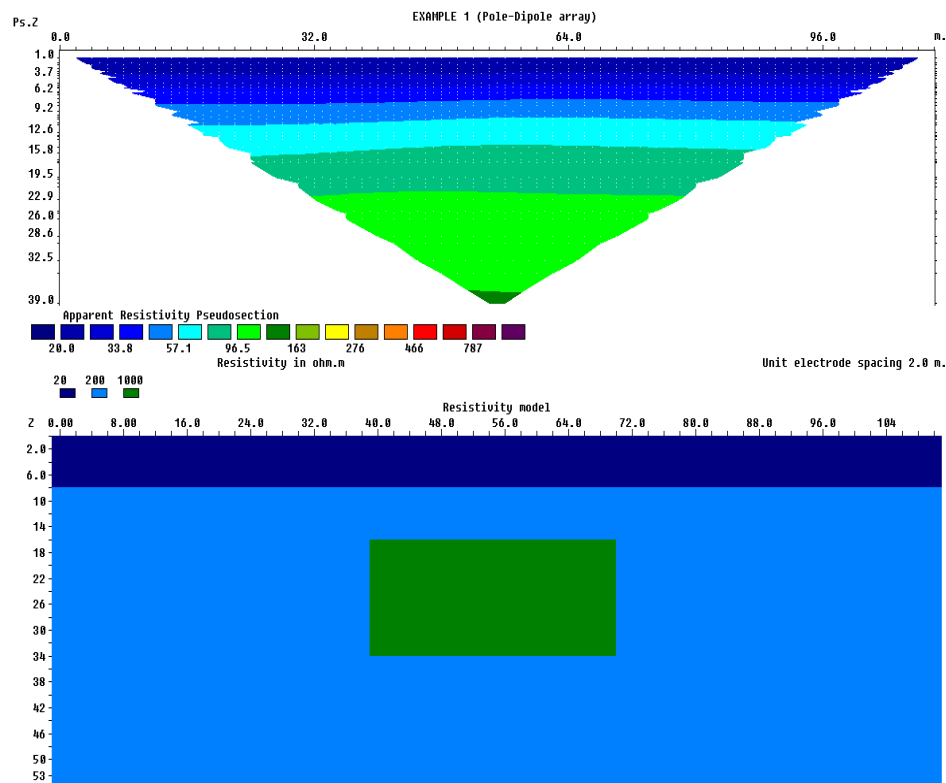
Σχήμα 5.6: Απεικόνιση του μοντέλου 2. Πάνω διακρίνεται η συνθετική ψευδοτομή με διάταξη pole-dipole. Η χρωματική κλίμακα στην πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ενώ κάτω διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου(βάθος, αντίσταση στρώματος, διαστάσεις).

3ο Μοντέλο : Χρησιμοποιήθηκε διάταξη πόλου-διπόλου και διάταξη Schlumberger(Σχήμα 5.7) με αριθμό ηλεκτροδίων **99**, ισαπόσταση ηλεκτροδίων **2m** και επίπεδα βάθους **30m**. Σε αυτό το μοντέλο τοποθετήθηκε ρήγμα στην μέση της γραμμής μελέτης **98m**. Η αντίσταση του πρώτου στρώματος είναι **1000 Ωm**, του δεύτερου στρώματος **200 Ωm** ενώ του τρίτου **500 Ωm**.



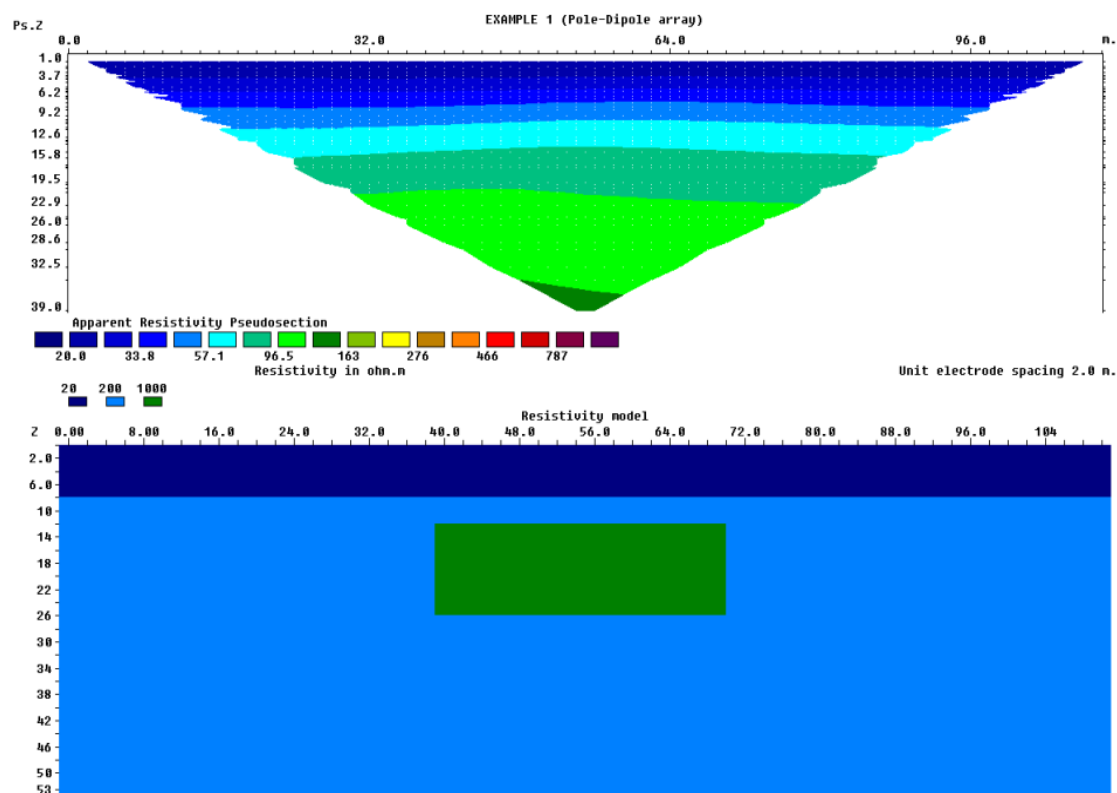
Σχήμα 5.7: Απεικόνιση του μοντέλου 3. Πάνω διακρίνεται η συνθετική ψευδοτομή με διάταξη pole-dipole. Η χρωματική κλίμακα στην πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ενώ κάτω διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου(βάθος, αντίσταση στρώματος, διαστάσεις).

4ο Μοντέλο: Χρησιμοποιήθηκε διάταξη πόλου-διπόλου (Σχήμα 5.8) με αριθμό ηλεκτροδίων 56, ισαπόσταση ηλεκτροδίων 2m και επίπεδα βάθους 10m. Το πρώτο στρώμα εκτείνεται σε βάθος 8m με αντίσταση **20 Ωm**. Το δεύτερο στρώμα έχει αντίσταση **200 Ωm** ενώ το τρίτο στρώμα έχει αντίσταση **1000 Ωm** και βρίσκεται στην μέση της γραμμής μελέτης σε βάθος 16m-34m.



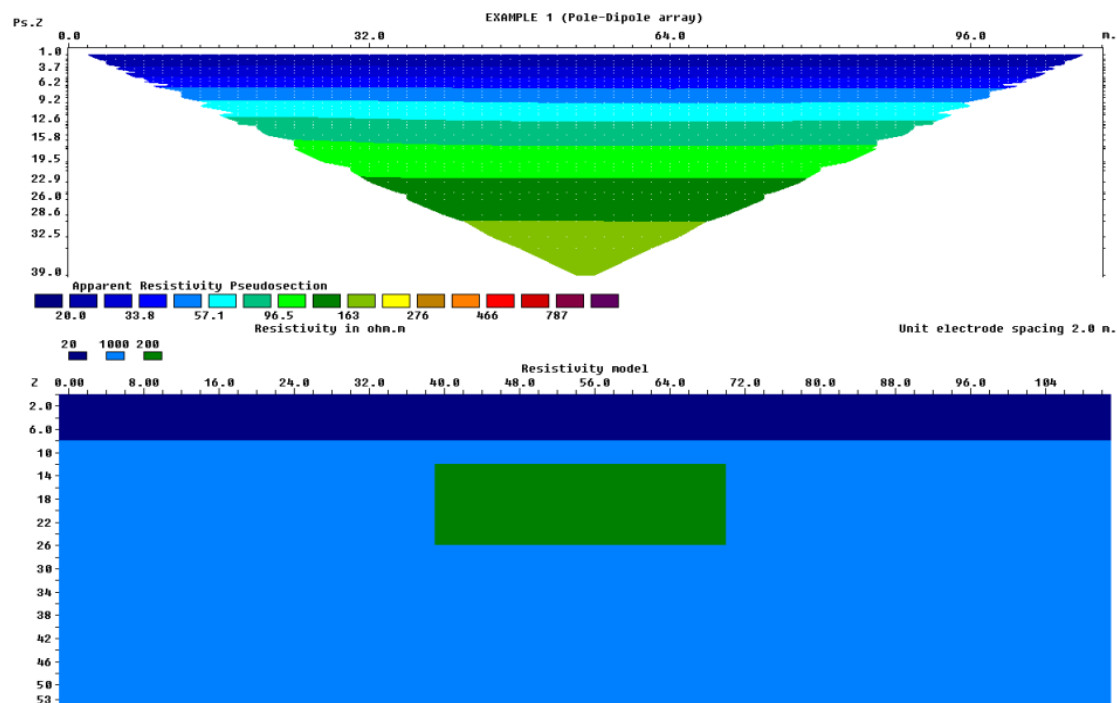
Σχήμα 5.8: Απεικόνιση του μοντέλου 4. Πάνω διακρίνεται η συνθετική ψευδοτομή με διάταξη pole-dipole. Η χρωματική κλίμακα στην πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ενώ κάτω διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου (βάθος, αντίσταση στρώματος, διαστάσεις)

5ο Μοντέλο: Χρησιμοποιήθηκε διάταξη πόλου-διπόλου (Σχήμα 5.9) με αριθμό ηλεκτροδίων **56**, ισαπόσταση ηλεκτροδίων **2m** και επίπεδα βάθους **10m**.. Το πρώτο στρώμα εκτείνεται σε βάθος 8m με αντίσταση **20 Ωm**. Το δεύτερο στρώμα έχει αντίσταση **200 Ωm** ενώ το τρίτο στρώμα έχει αντίσταση **1000 Ωm** και βρίσκεται στην μέση της γραμμής μελέτης, σε βάθος **12-26m**.



Σχήμα 5.9: Απεικόνιση του μοντέλου. Πάνω διακρίνεται η συνθετική ψευδοτομή με διάταξη pole-dipole. Η χρωματική κλίμακα στην πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ενώ κάτω διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου(βάθος, αντίσταση στρώματος, διαστάσεις)

6° Μοντέλο: Χρησιμοποιήθηκε διάταξη πόλου-διπόλου (Σχήμα 5.10) με αριθμό ηλεκτροδίων **56**, ισαπόσταση ηλεκτροδίων **2m** και επίπεδα βάθους **10m**. Τοποθετήθηκε στόχος στην μέση της γραμμής μελέτης, σε βάθος **12-26m**. Η αντίσταση του πρώτου στρώματος είναι **20 Ωm**, του δεύτερου στρώματος είναι **1000 Ωm** ενώ του τρίτου στρώματος είναι **200 Ωm**.



Σχήμα 5.10: Απεικόνιση του μοντέλου 6. Πάνω διακρίνεται η συνθετική ψευδοτομή με διάταξη pole-dipole. Η χρωματική κλίμακα στην πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ενώ κάτω διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου(βάθος, αντίσταση στρώματος, διαστάσεις)

5. 2: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

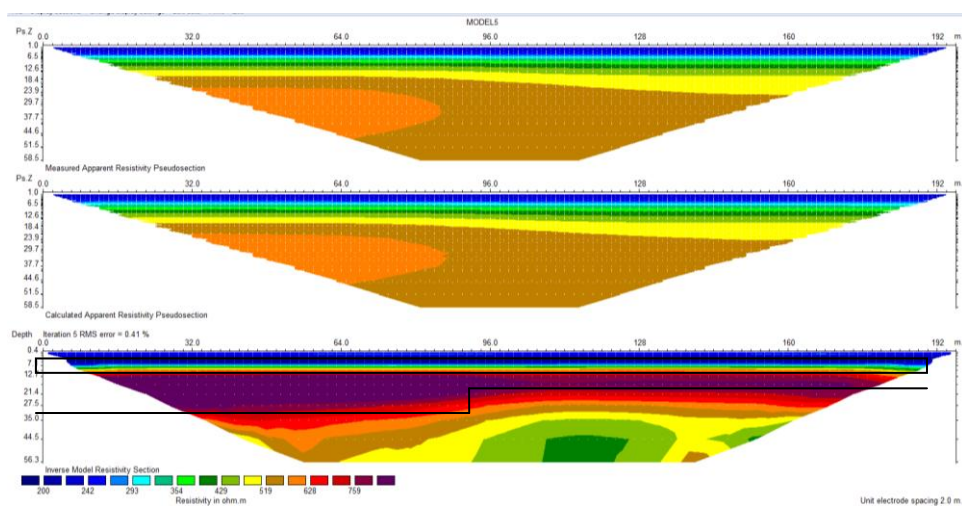
5. 2. 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι smoothness constrained, combined inversion και robust με σκοπό να εξετασθεί ποια από τις διατάξεις δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

5.2.2 Επεξεργασία Συνθετικών δεδομένων

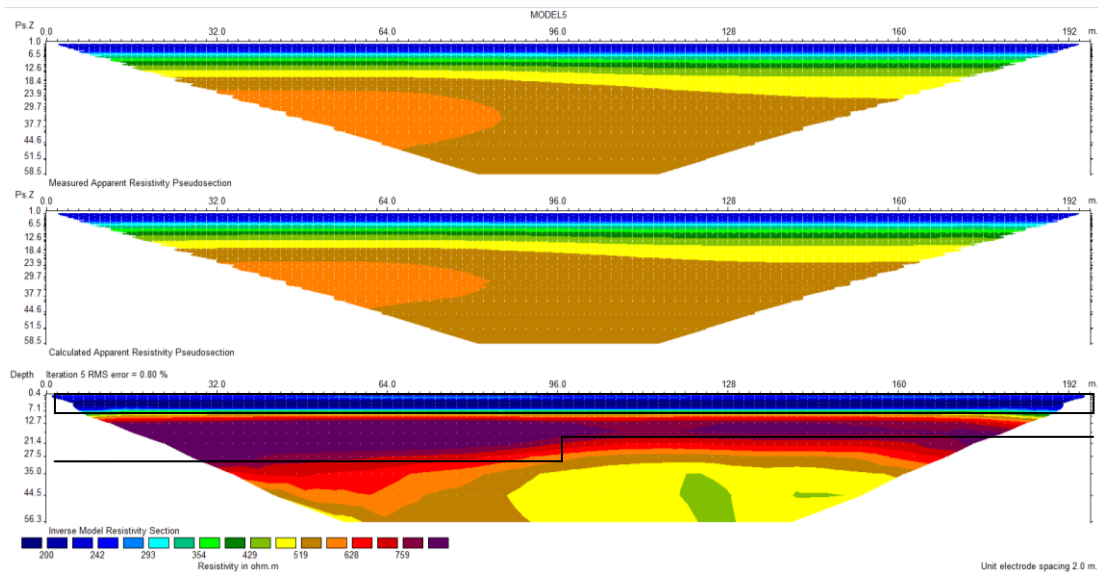
Μοντέλο 1

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.11) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος smoothness απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες.



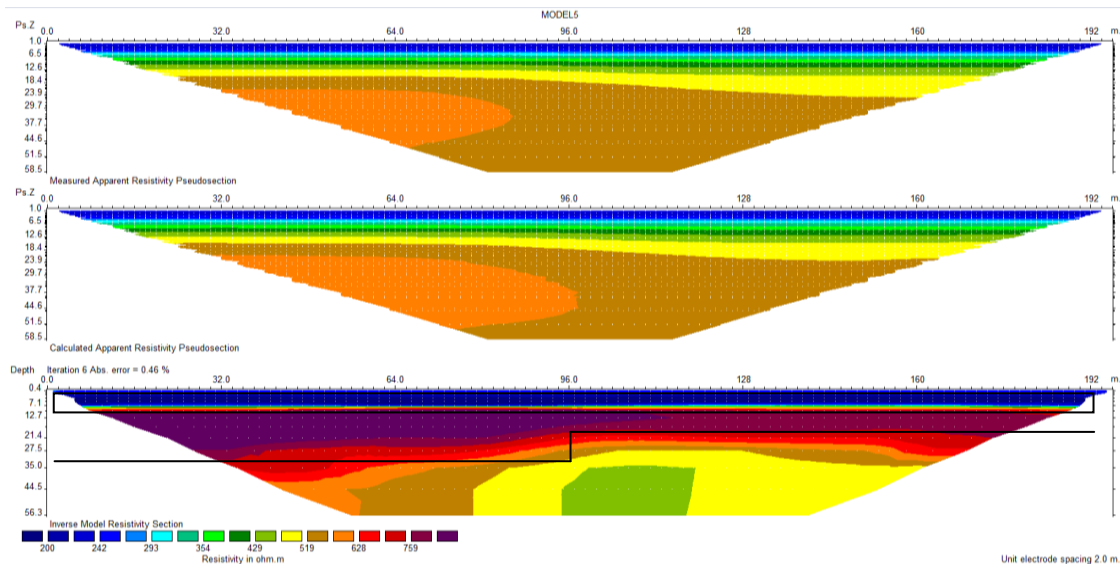
Σχήμα 5.11 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.12) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες.



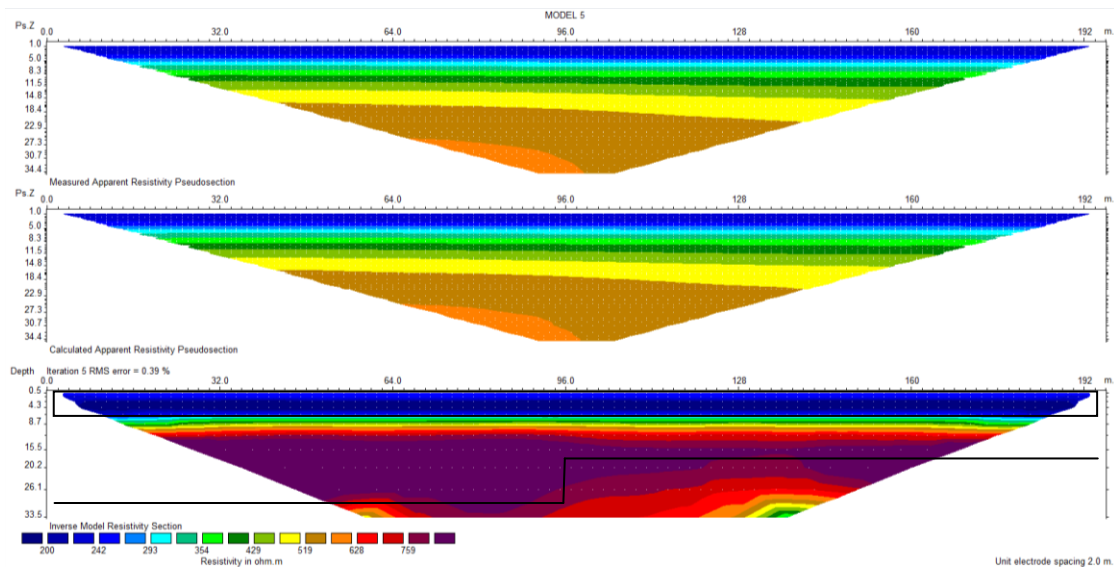
Σχήμα 5.12 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union combined.

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.13) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες.



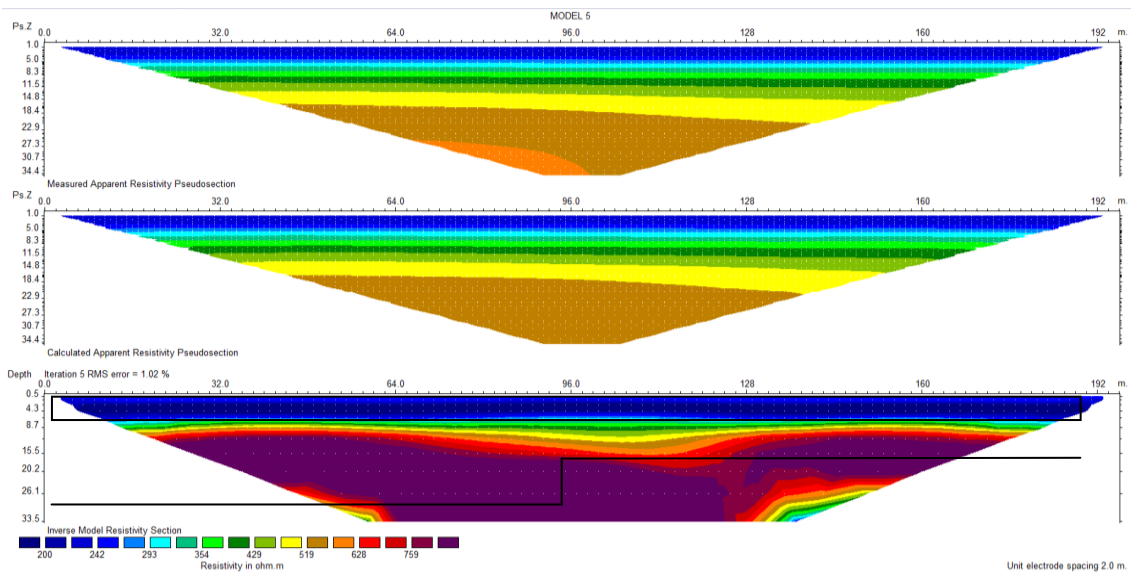
Σχήμα 5.13 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Robust .

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.14) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness και η διάταξη Schlumberger απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



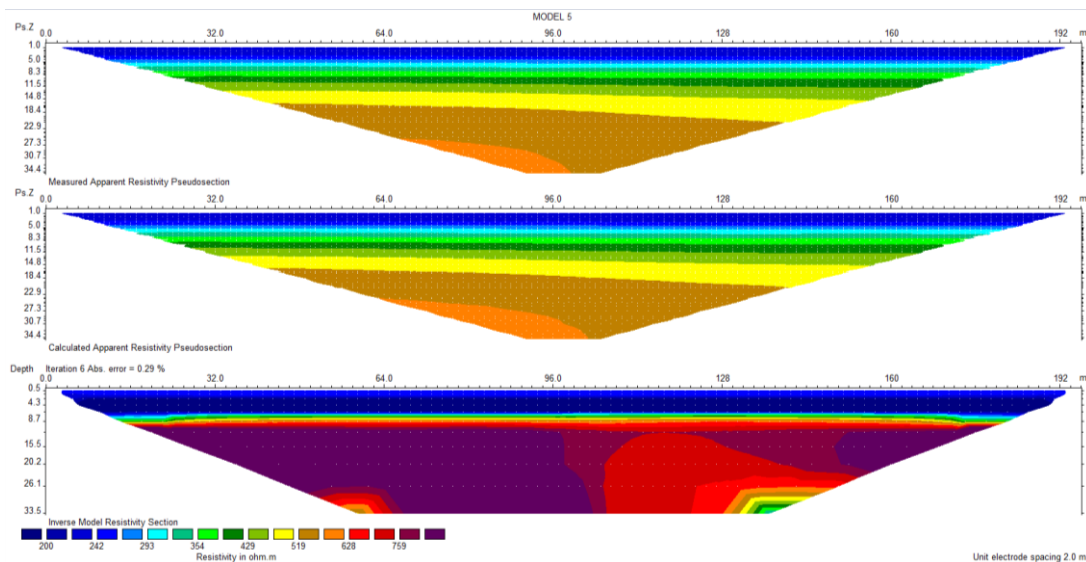
Σχήμα 5.14: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Schlumberger Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.15) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined και η διάταξη Schlumberger απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα (πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



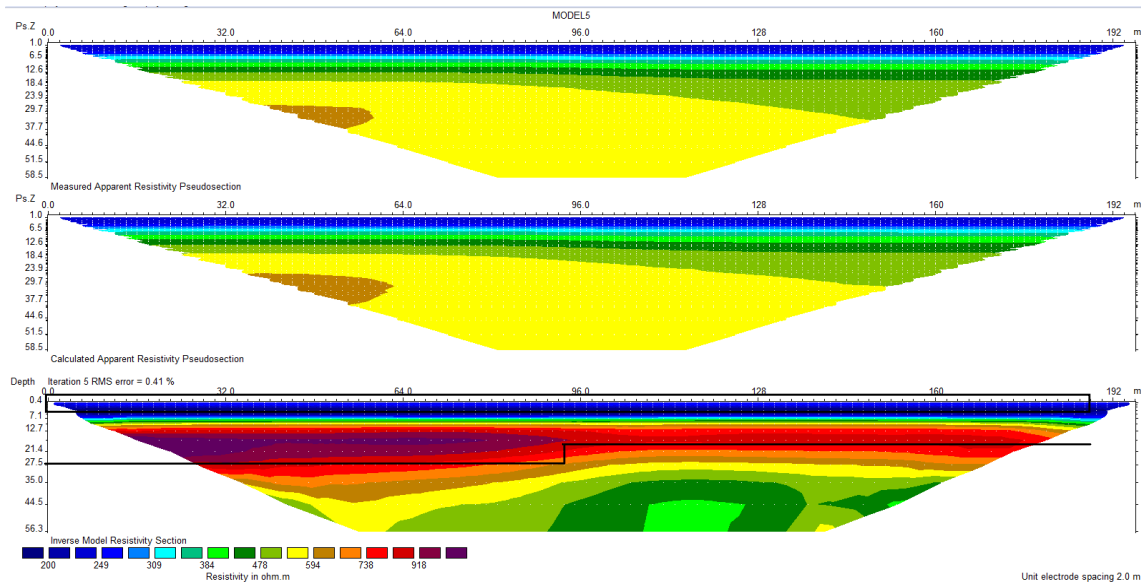
Σχήμα 5.15: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Schlumberger Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.16) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και η διάταξη Schlumberger απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



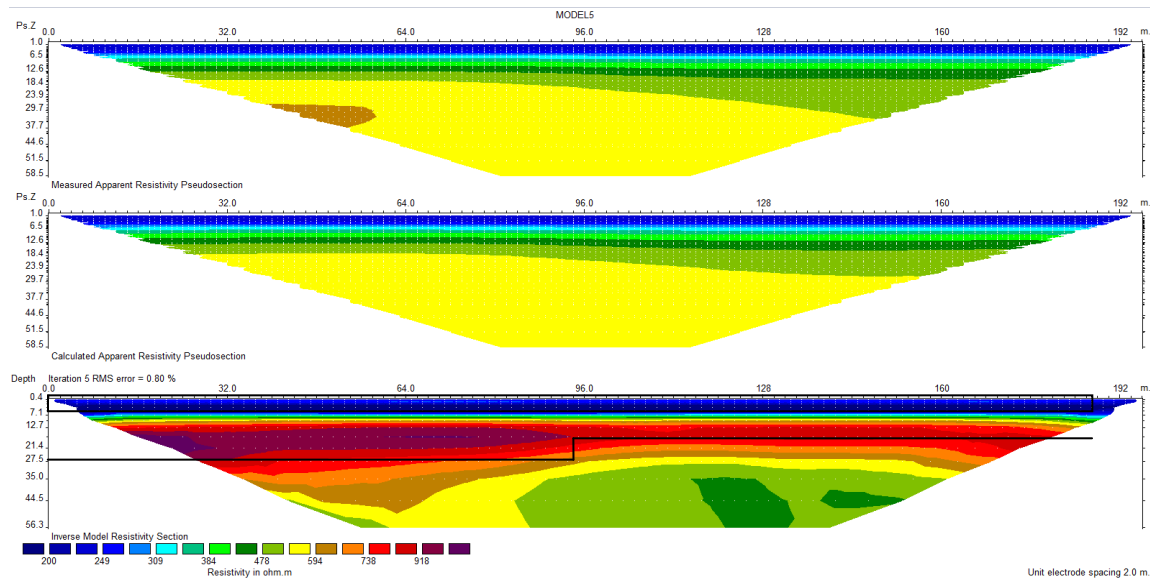
Σχήμα 5.16: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Schlumberger Robust

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.17) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness και προστέθηκε θόρυβος της τάξης 0,1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες.



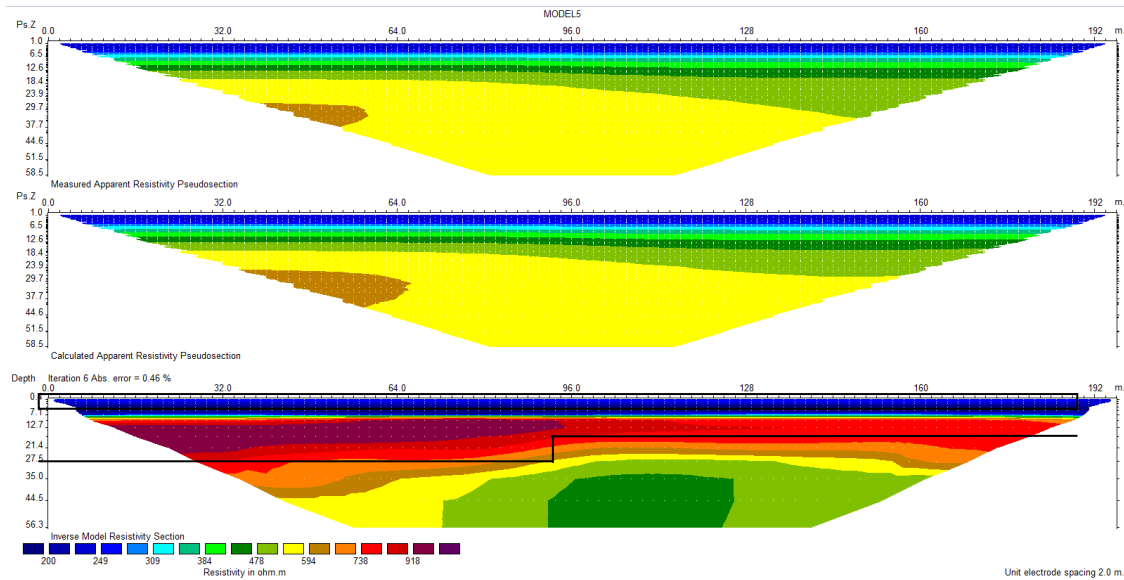
Σχήμα 5.17 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Smoothness.

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.18) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined και προστέθηκε θόρυβος της τάξης 0,1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες.



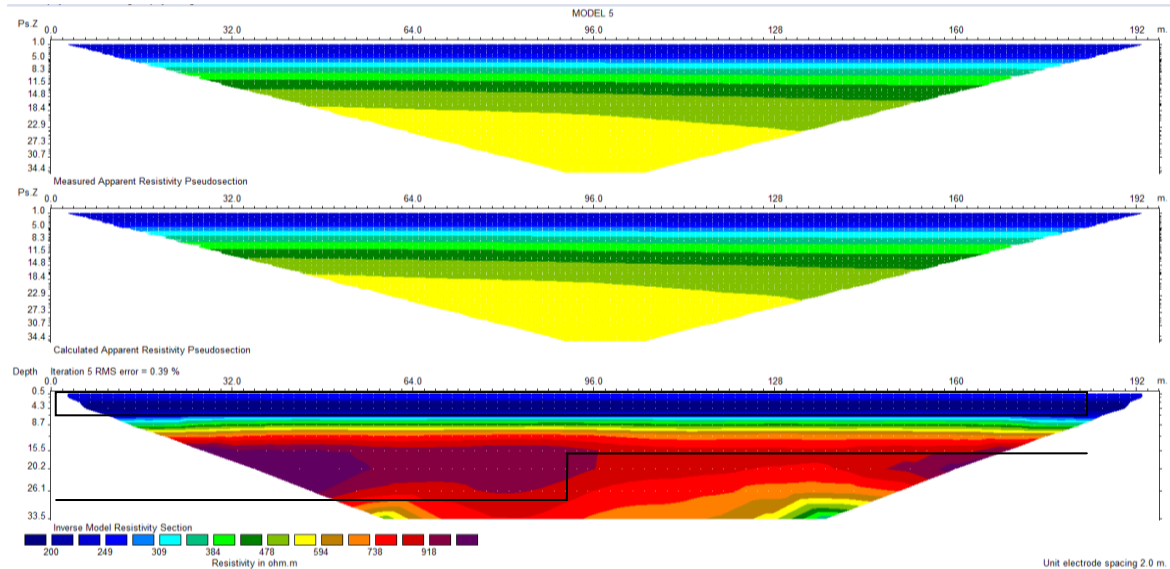
Σχήμα 5.18 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.19) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και προστέθηκε θόρυβος 0,1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες.



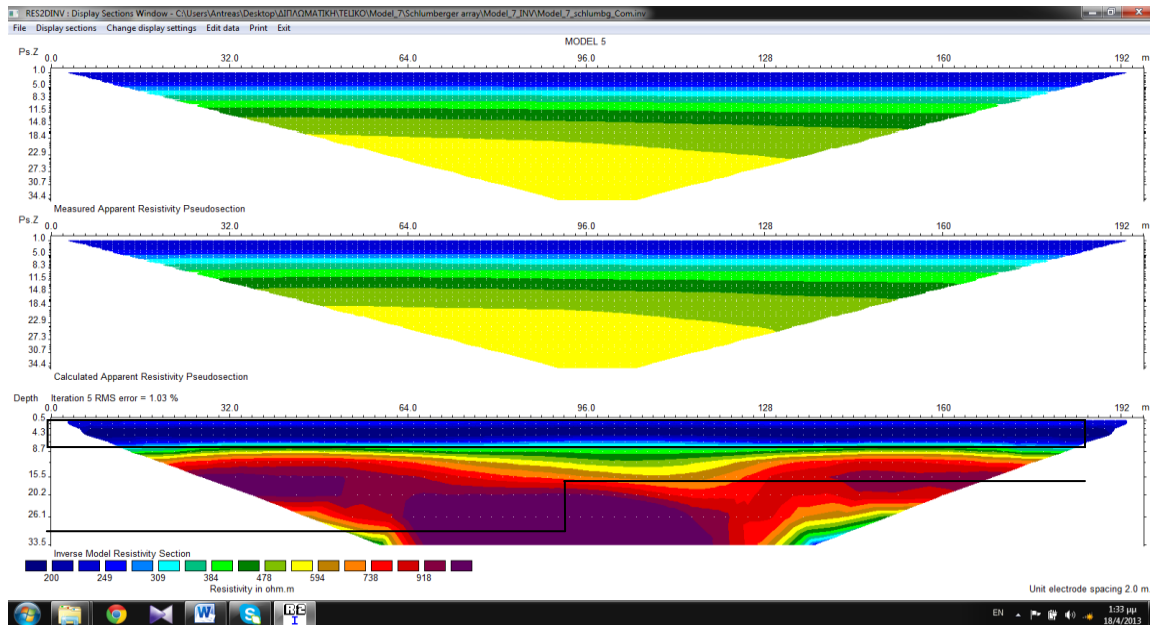
Σχήμα 5.19 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου - Διπόλου. Pole-dipole Union Robust

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.20) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 0,1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



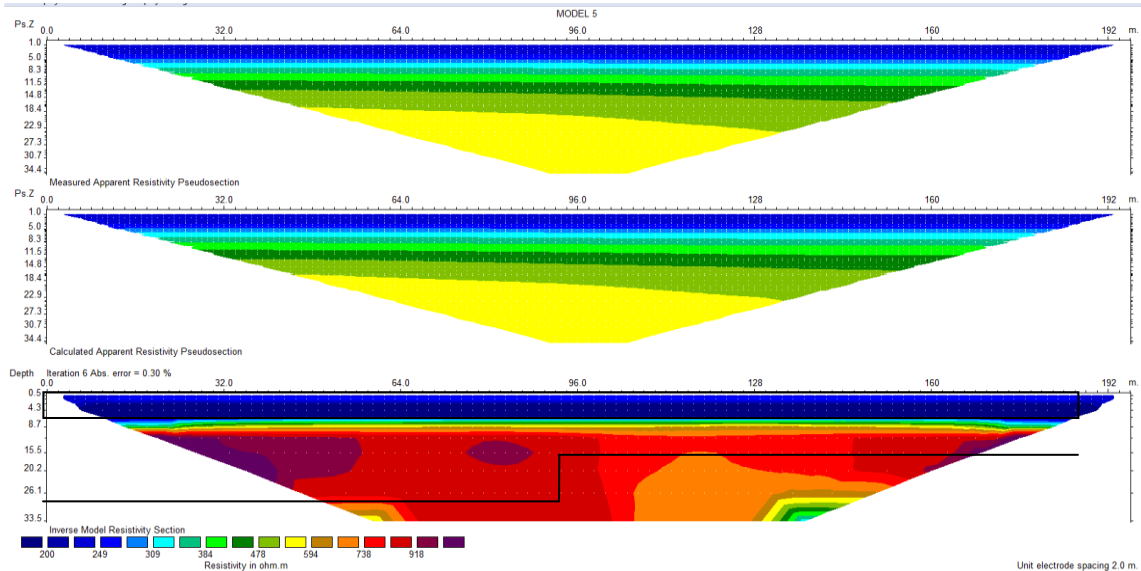
Σχήμα 5.20: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Schlumberger Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.21) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 0,1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



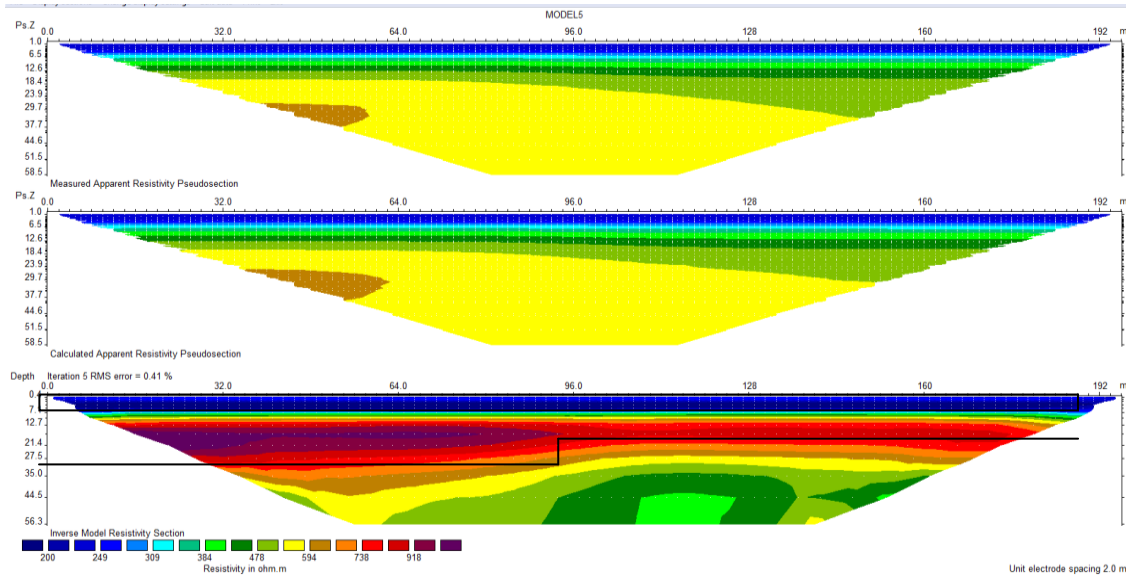
Σχήμα 5.21: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Schlumberger Combined.

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.22) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 0,1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



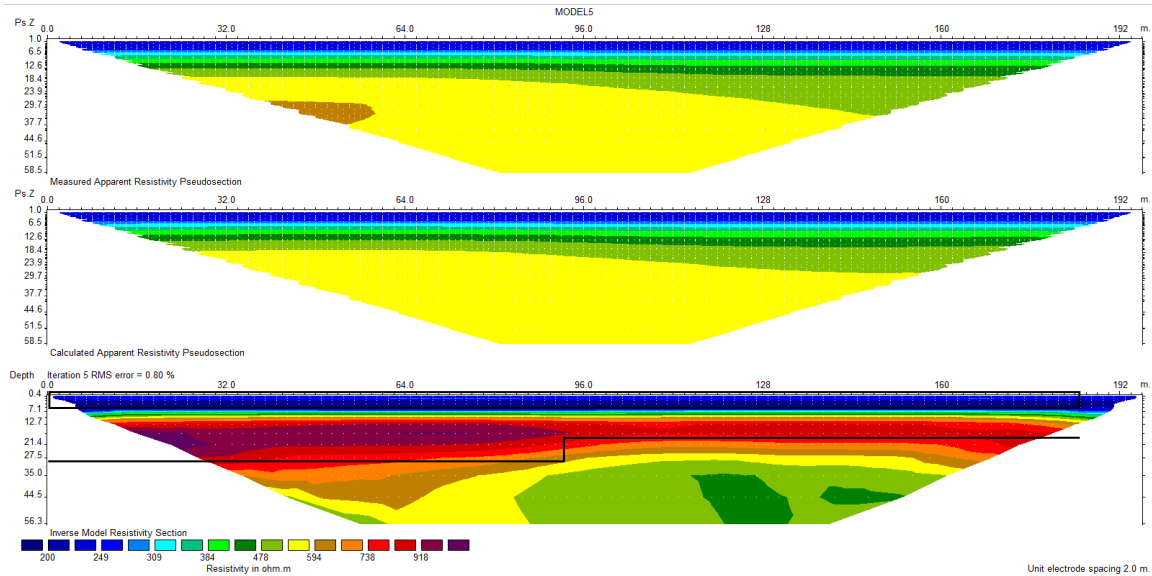
Σχήμα 5.22: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Schlumberger Robust

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.23) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness και προστέθηκε θόρυβος 1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες.



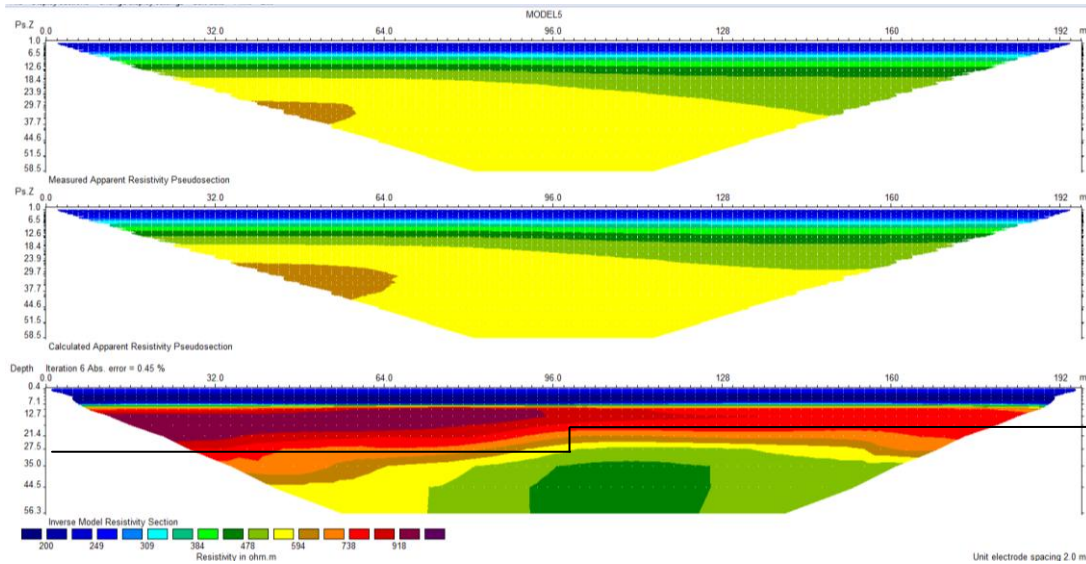
Σχήμα 5.23 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. . Pole-dipole Union Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.24) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined και προστέθηκε θόρυβος 1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες.



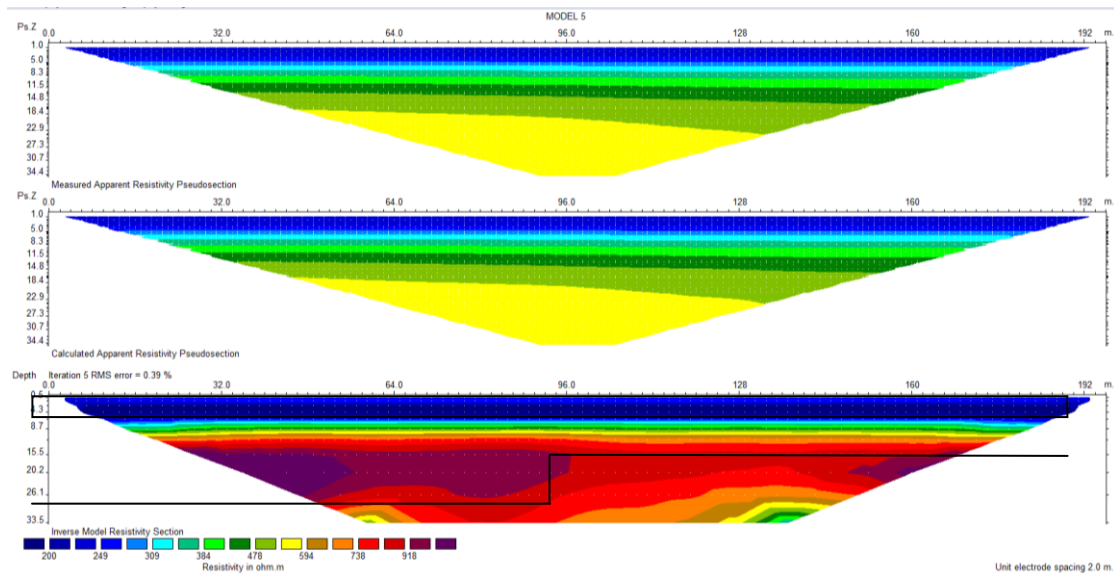
Σχήμα 5.24 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.25) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και προστέθηκε θόρυβος 1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες



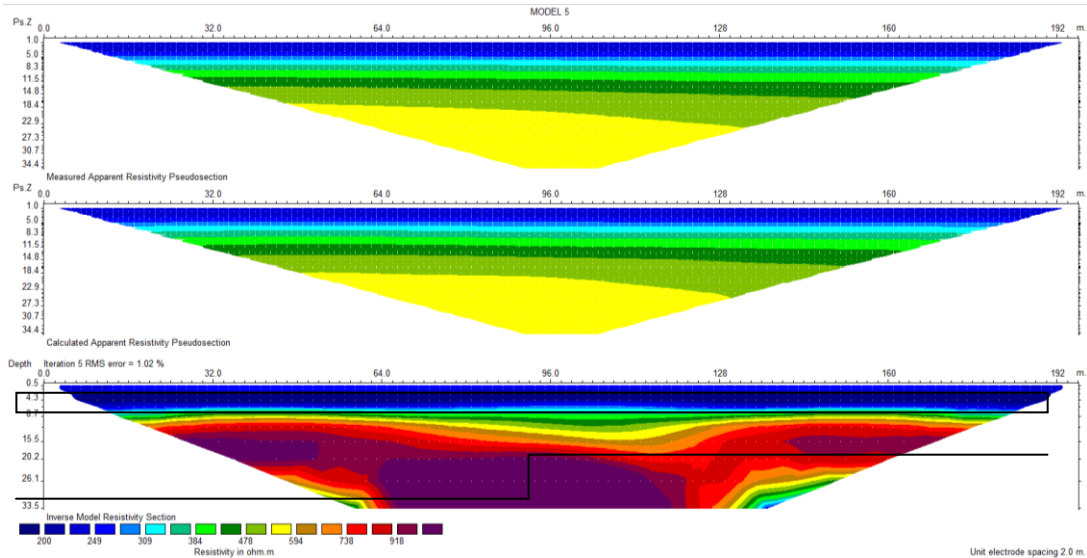
Σχήμα 5.25 Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. .Pole-dipole Union Robust

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.26) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



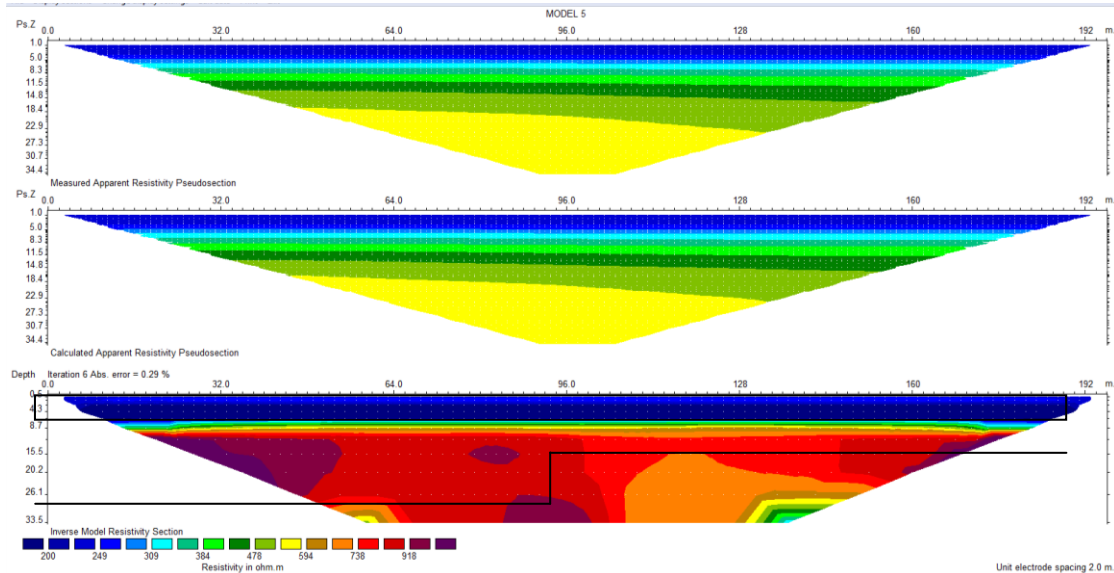
Σχήμα 5.26: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . Schlumberger Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.27) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



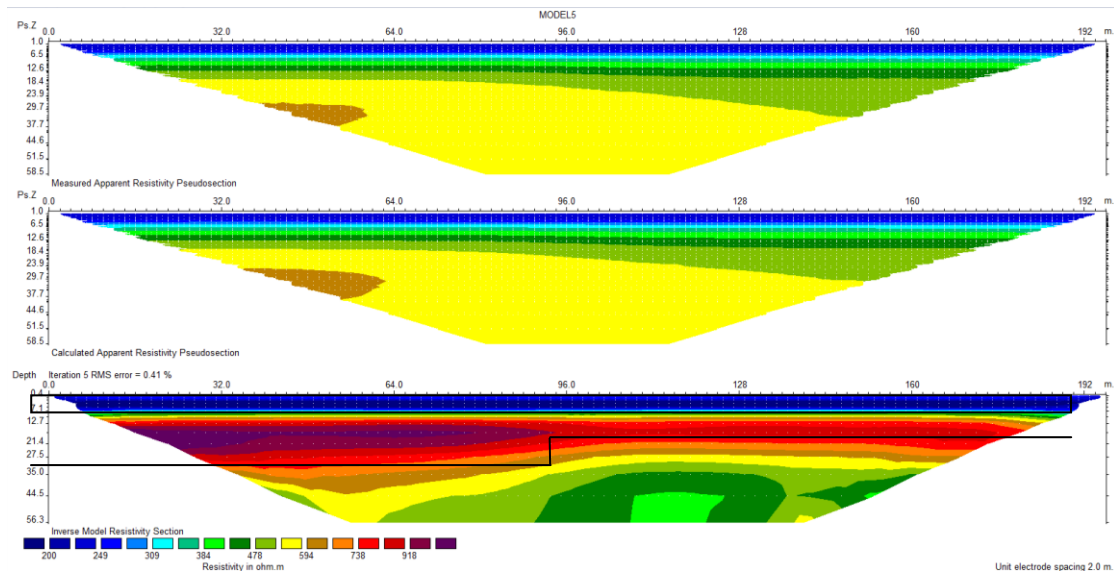
Σχήμα 5.27: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . Schlumberger Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.28) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 1% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



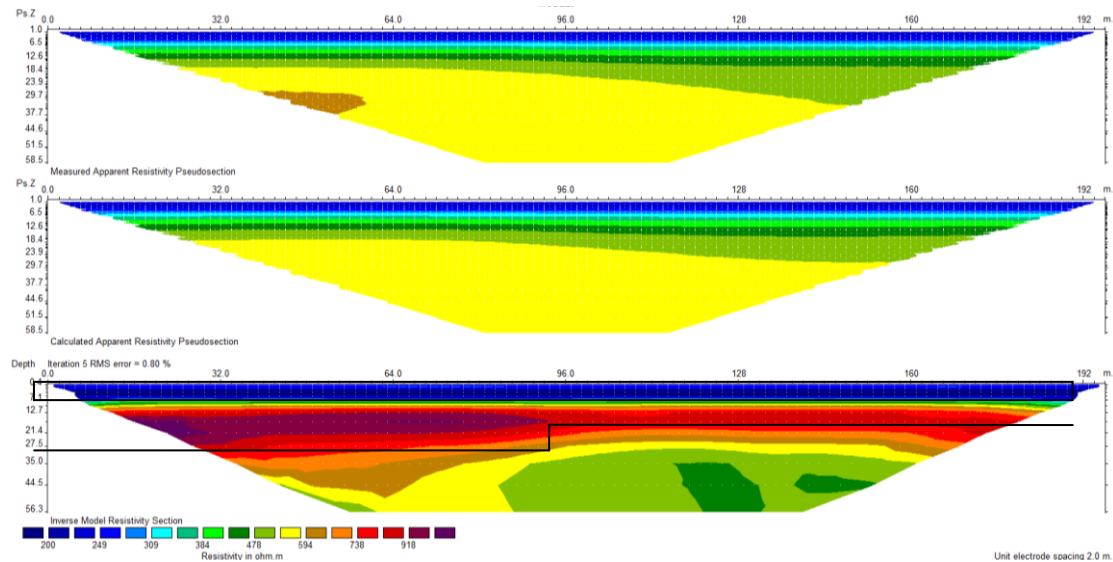
Σχήμα 5.28: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . Schlumberger Robust

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.29) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness και προστέθηκε θόρυβος 10% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες



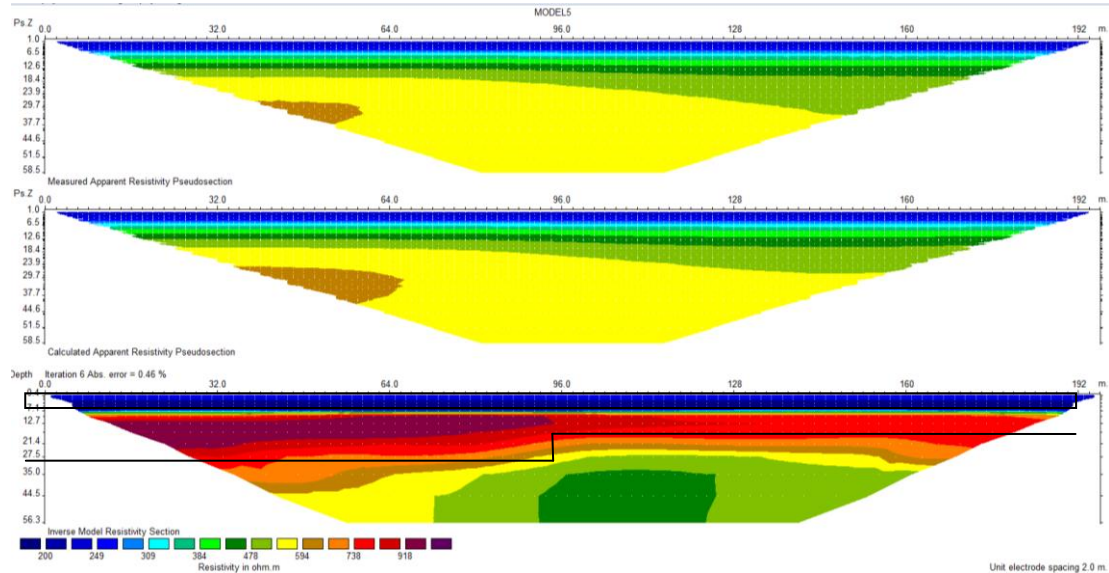
Σχήμα 5.29: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου - Διπόλου. . Pole-dipole Union Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.30) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined και προστέθηκε θόρυβος 10% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες.



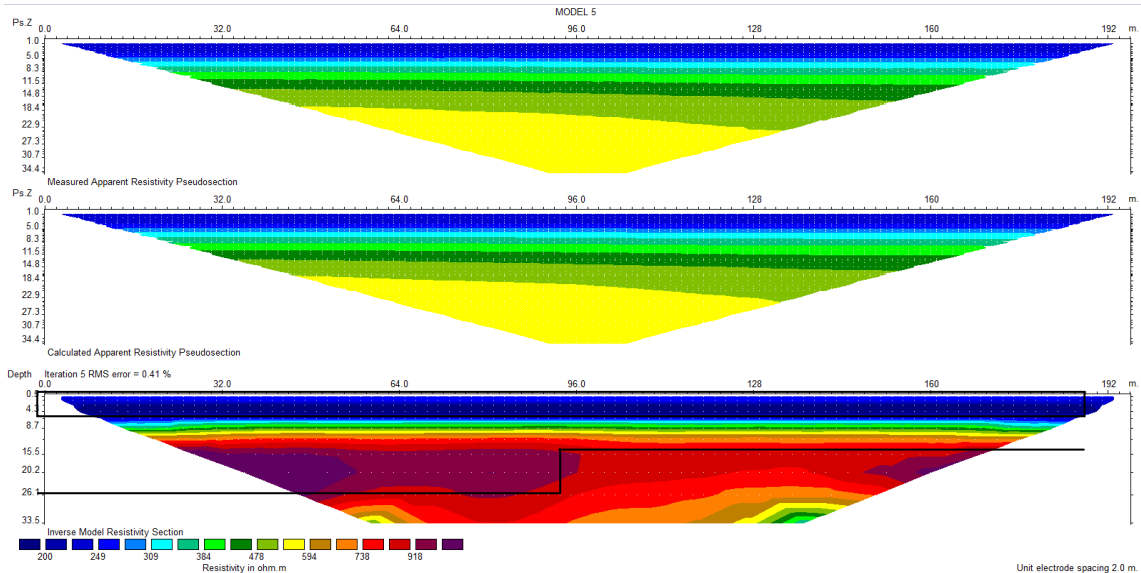
Σχήμα 5.30: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.31) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και προστέθηκε θόρυβος 10% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος είναι καλά καθορισμένα όπως επίσης και οι αντιστάσεις είναι σωστά εκτιμημένες.



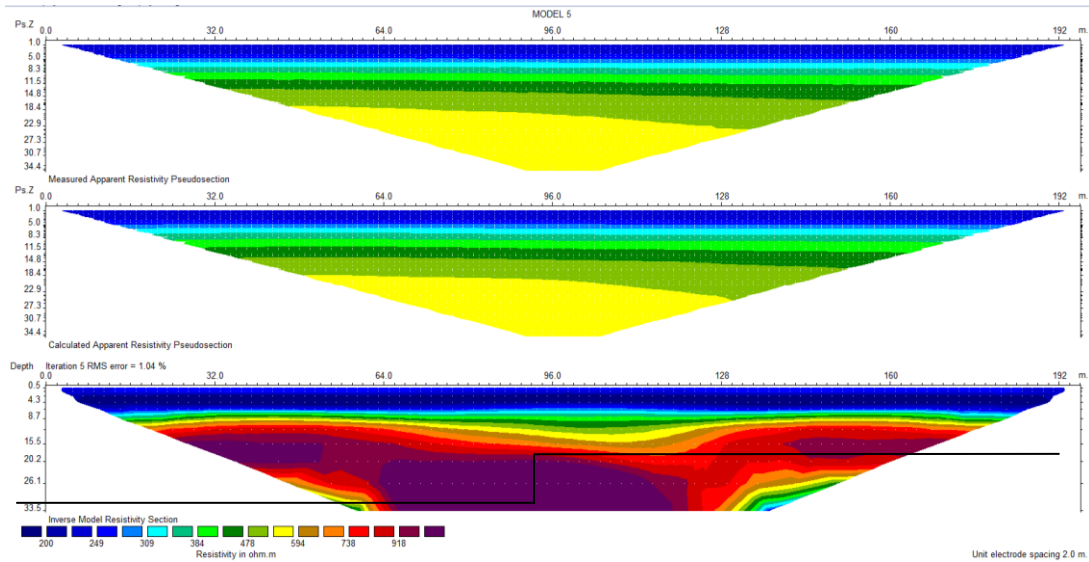
Σχήμα 5.31: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. . Pole-dipole Union Robust

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.32) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 10% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



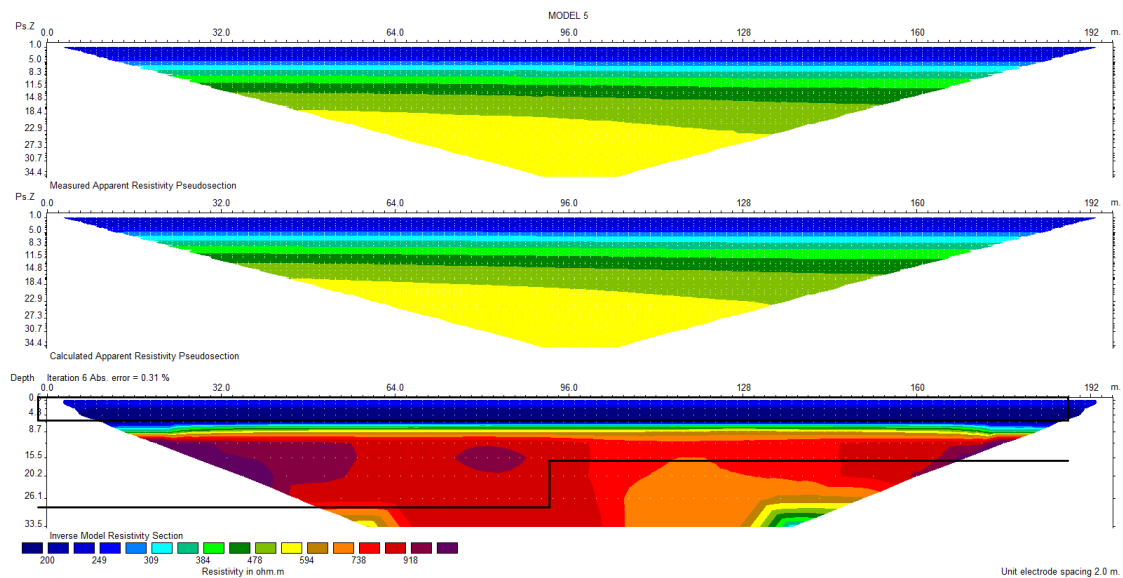
Σχήμα 5.32: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . Schlumberger Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.33) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 10% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



Σχήμα 5.33: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . Schlumberger Combined

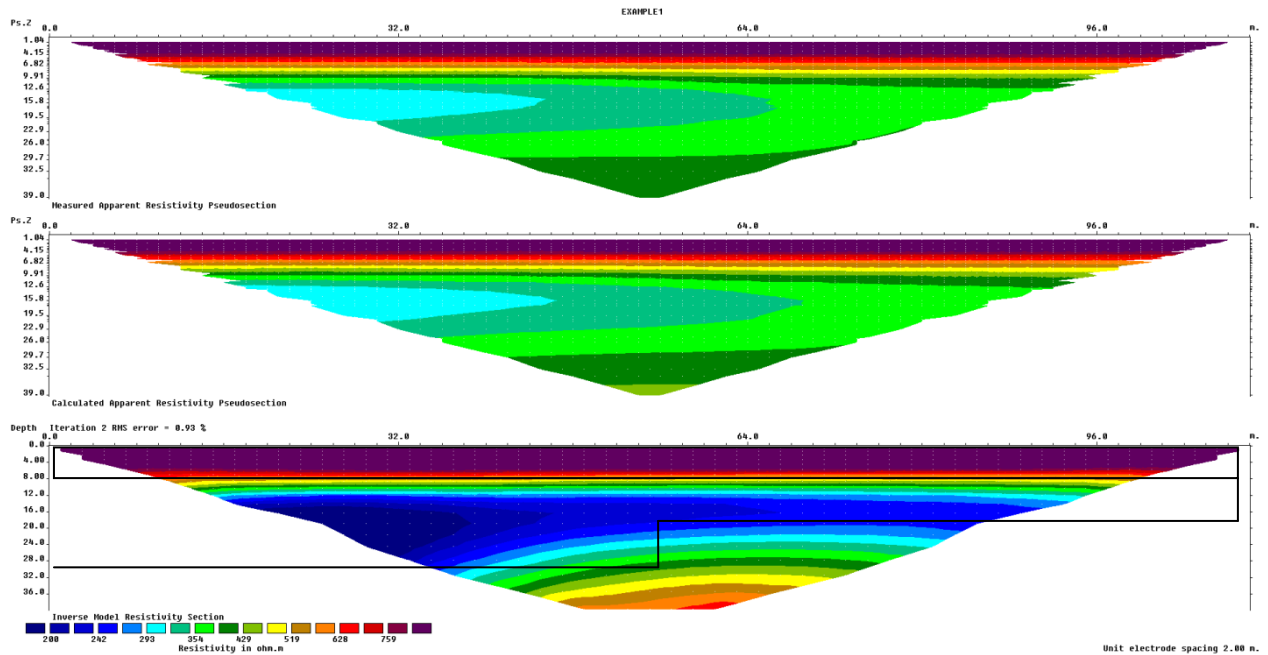
Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.34) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και η διάταξη Schlumberger και προστέθηκε θόρυβος 10% απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση). Το δεύτερο στρώμα και τα όρια του ρήγματος δεν φαίνονται καθαρά.



Σχήμα 5.34: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . Schlumberger Robust

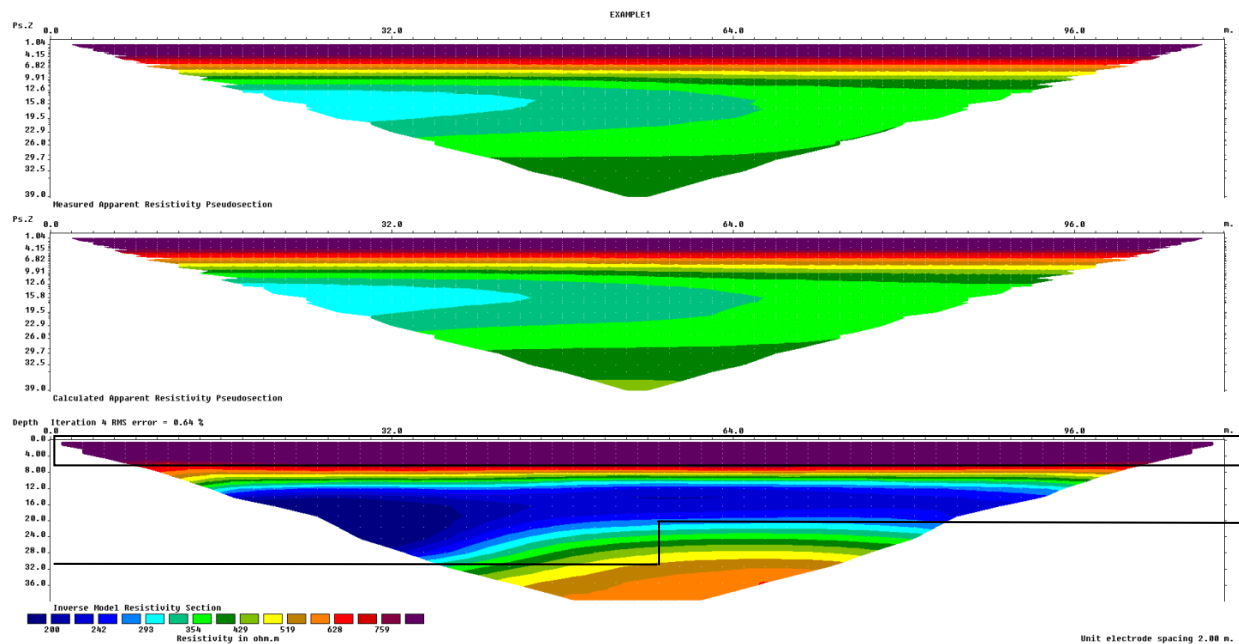
Μοντέλο 2

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.35) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες.



Σχήμα 5.35: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 5.36) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες



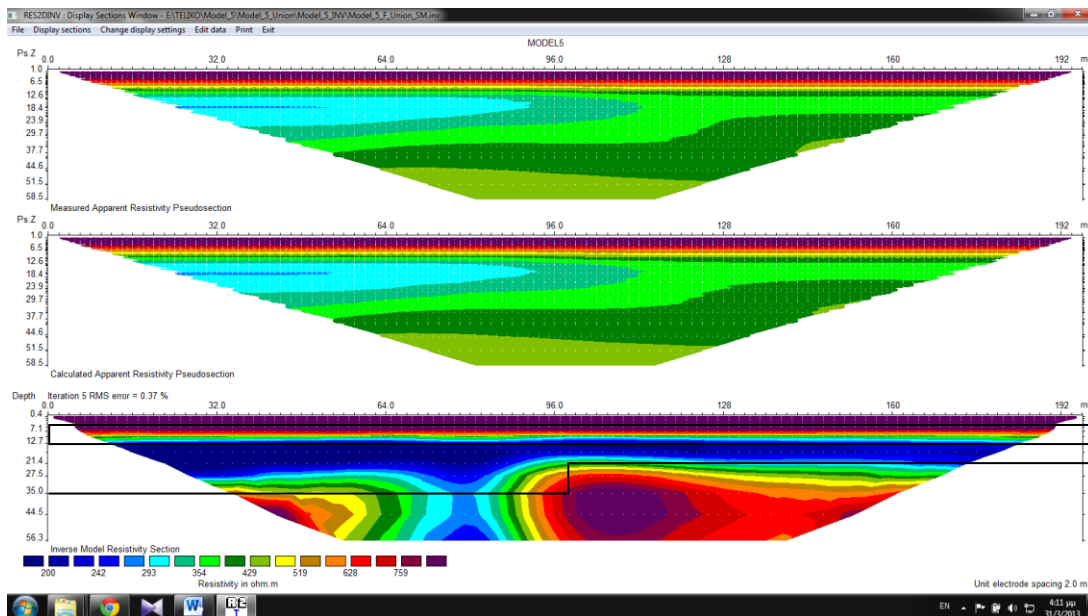
Σχήμα 5.36: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Combined

Figure 10 displays three resistivity pseudosections for a 2.00 m unit electrode spacing, labeled EXAMPLE1. The top plot shows the 'Measured Apparent Resistivity Pseudosection' with depth (0.0 to 39.0 m) on the y-axis and distance (0.0 to 96.0 m) on the x-axis. The middle plot shows the 'Calculated Apparent Resistivity Pseudosection' with the same axes. The bottom plot shows the 'Inverse Model Resistivity Section' with depth (0.0 to 36.0 m) on the y-axis and distance (0.0 to 96.0 m) on the x-axis. A color bar at the bottom indicates resistivity values in ohm.m, ranging from 200 (dark blue) to 759 (dark red). The bottom plot also includes a text label 'Iteration 5 Abs. error = 1.24 %'.

81

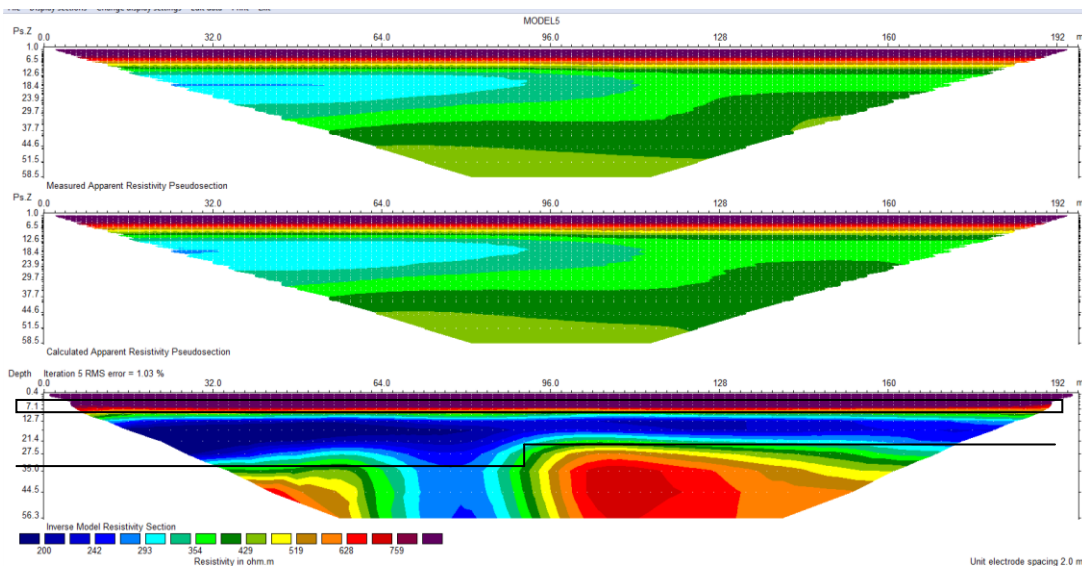
Μοντέλο 3

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.38) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες.



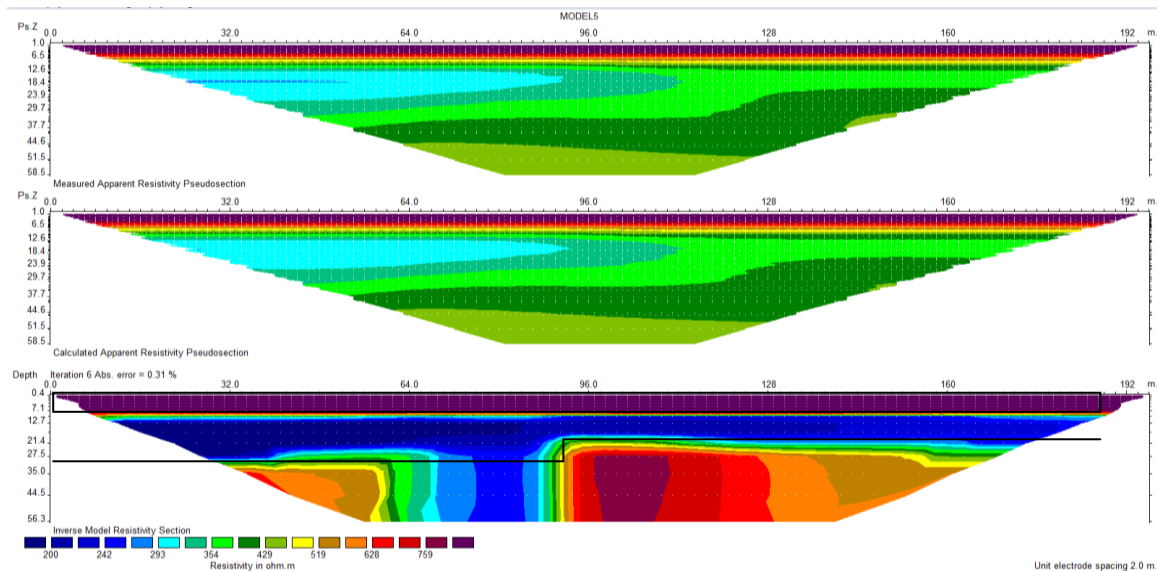
Σχήμα 5.38: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. POLE-DIPOLE Union SMOOTHNESS

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.39) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες αν και εμφανίζεται ένα κενό αριστερά του ρήγματος σε οριζόντια απόσταση μεγαλύτερη των 40m.



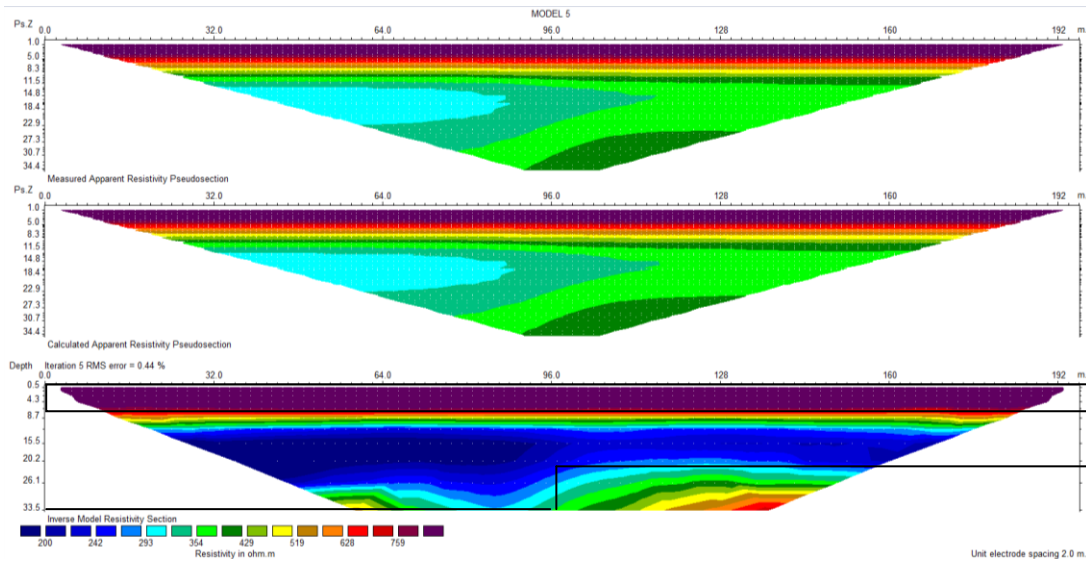
Σχήμα 5.39: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. POLE-DIPOLE Union Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.40) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος,την δεξιά πλευρά του ρήγματος.Οι αντιστάσεις είναι καλά εκτιμημένες αν και εμφανίζεται ένα κενό αριστερά του ρήγματος σε οριζόντια απόσταση μεγαλύτερη των 40m.



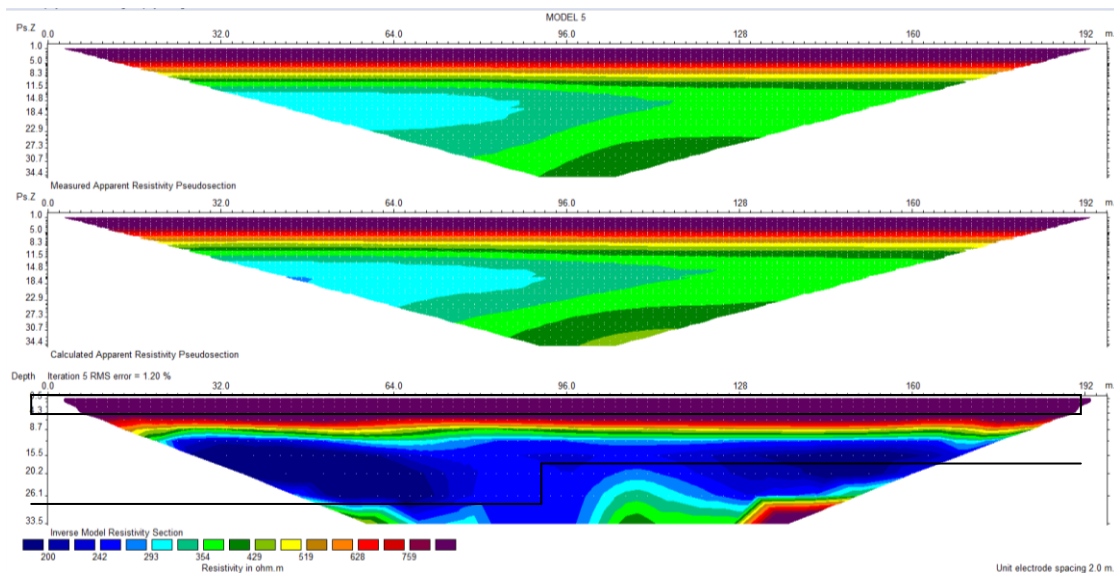
Σχήμα 5.40: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου - Διπόλου. POLE-DIPOLE Union ROBUST

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.41) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness και η διάταξη Schlumberger απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω και κάτω όριο του δεύτερου στρώματος.Οι αντιστάσεις είναι καλάεκτιμημένες.



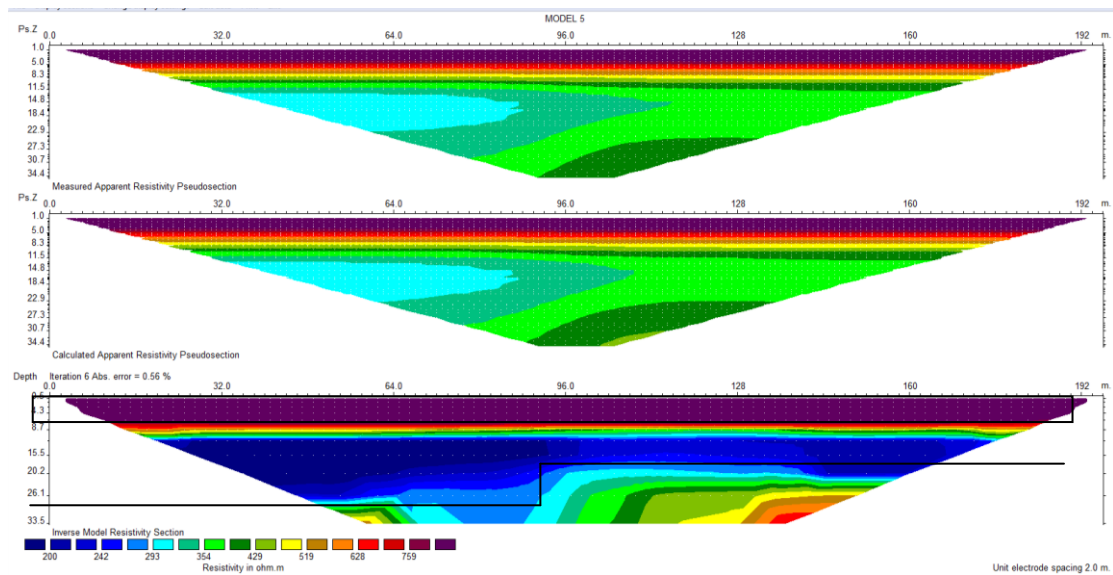
Σχήμα 5.41: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . SCHLUMBERGER SMOOTHNESS

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.42) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined και η διάταξη Schlumberger απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω όριο του δεύτερου στρώματος.



Σχήμα 5.42: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . SCHLUMBERGER COMBINED

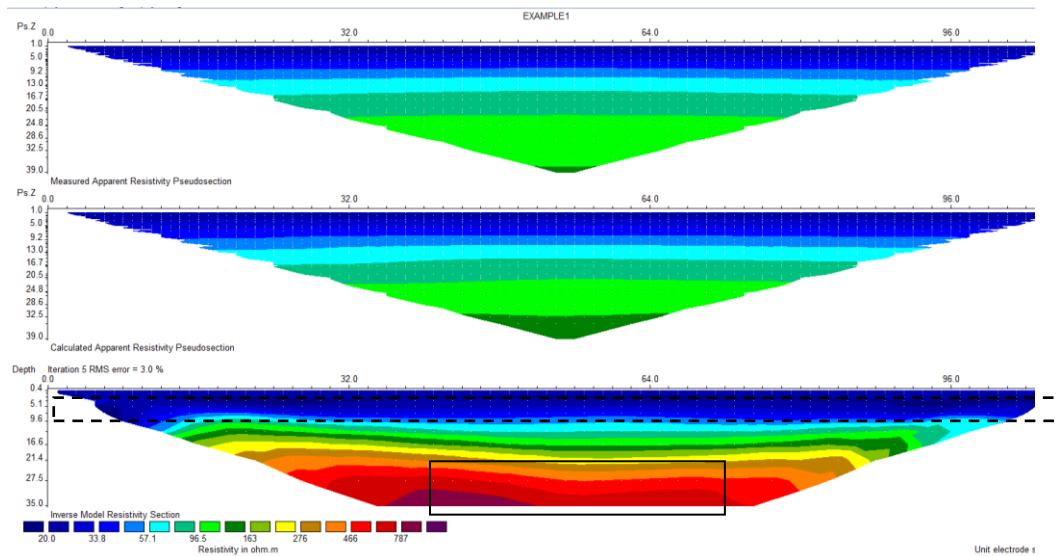
Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.43) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust και η διάταξη Schlumberger απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω, κάτω και πλευρικό όριο του δεύτερου στρώματος.



Σχήμα 5.43: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger . SCHLUMBERGER ROBUST

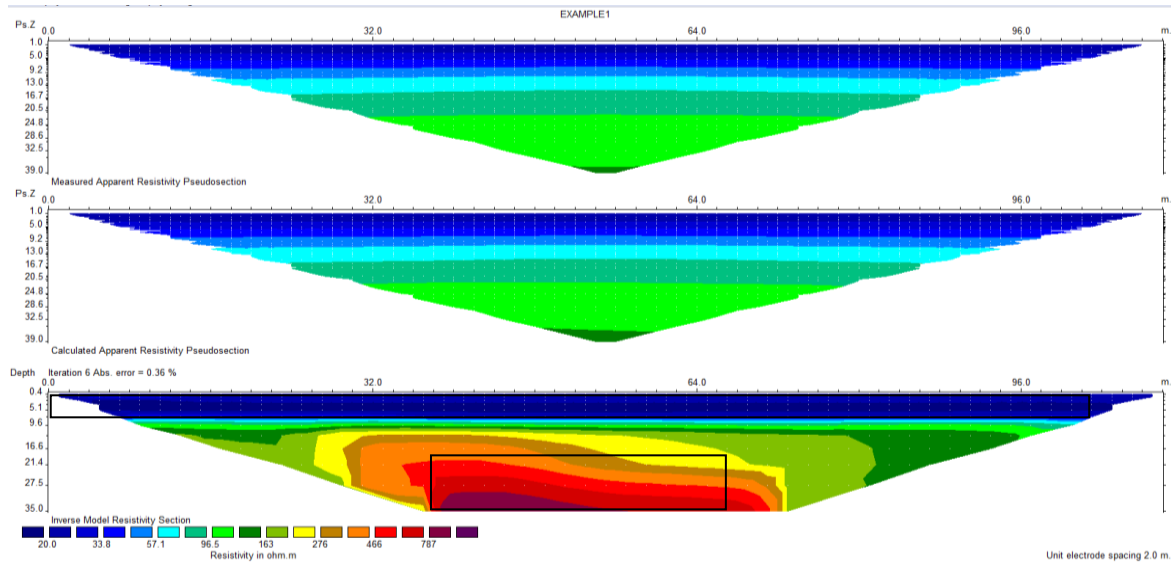
Μοντέλο 4

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.44) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined απεικονίζει καλά το πρώτο και δεύτερο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω όριο της δομής υψηλής αντίστασης.



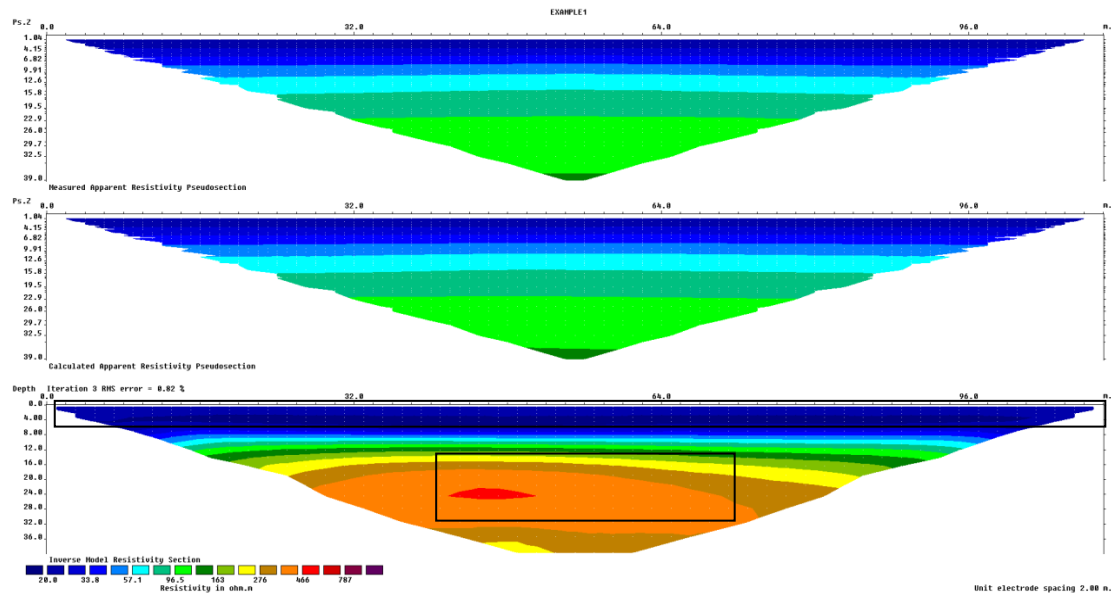
Σχήμα 5.44: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου - Διπόλου. Pole-dipole Union Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.45) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust απεικονίζει καλά μόνο το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) και τα πάνω και πλευρικά όρια της δομής υψηλής αντίστασης.Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του δεύτερου στρώματος απεικονίζεται υποεκτιμημένη.



Σχήμα 5.45: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου . Pole-dipole Union Robust

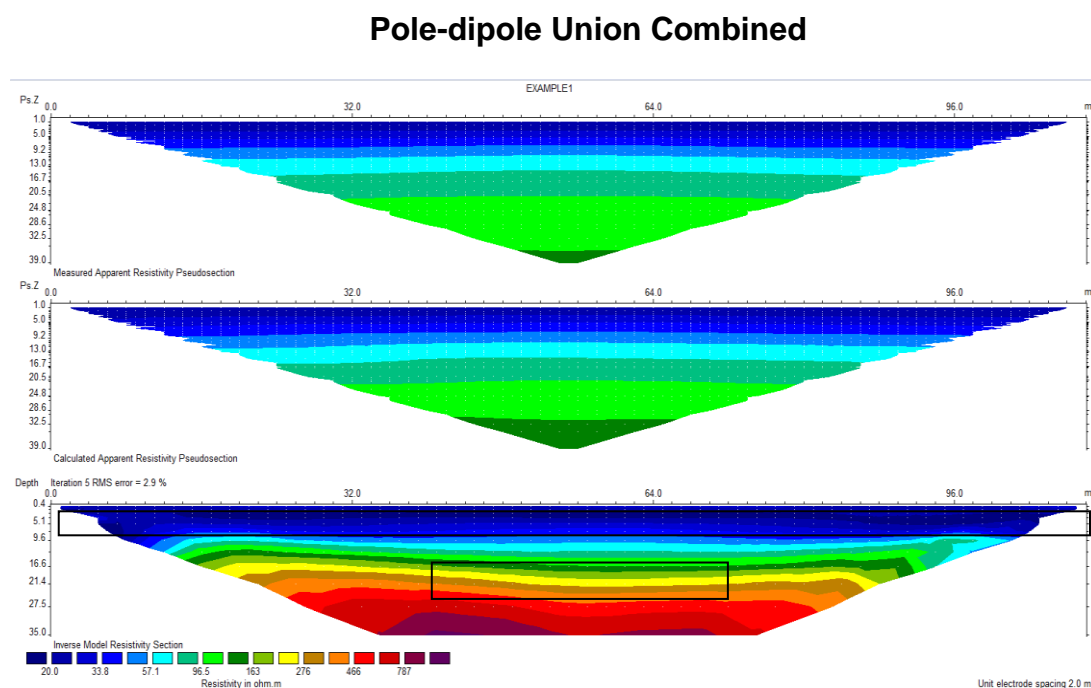
Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.46) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness απεικονίζει καλύτερα τόσο το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) όσο και τα όρια της δομής υψηλής αντίστασης αλλά η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι υποεκτιμημένη.



Σχήμα 5.46: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου - Διπόλου. Pole-dipole Union Smoothness

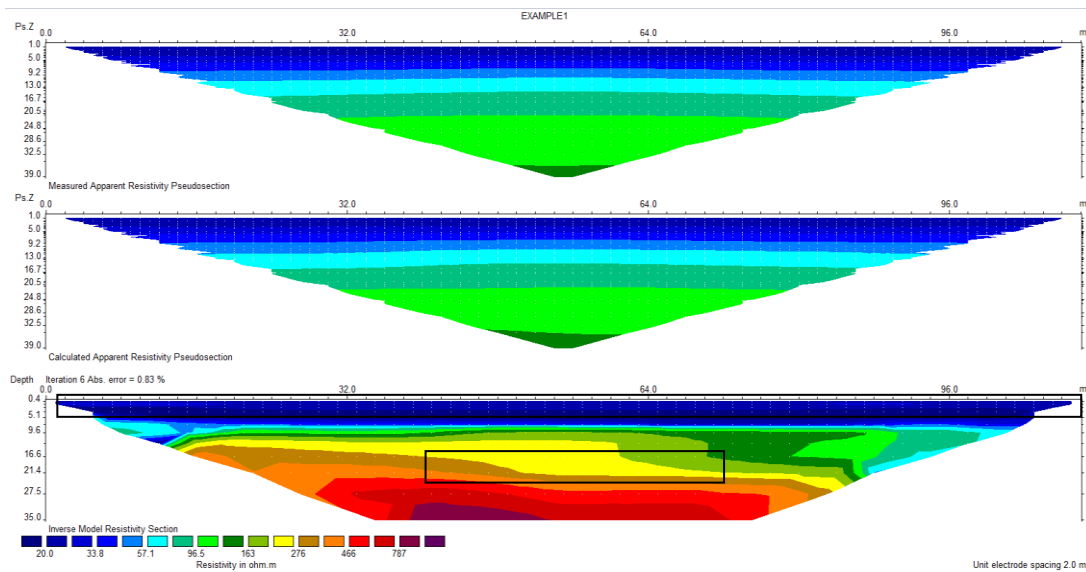
Μοντέλο 5

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.47) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω όριο της δομής υψηλής αντίστασης.



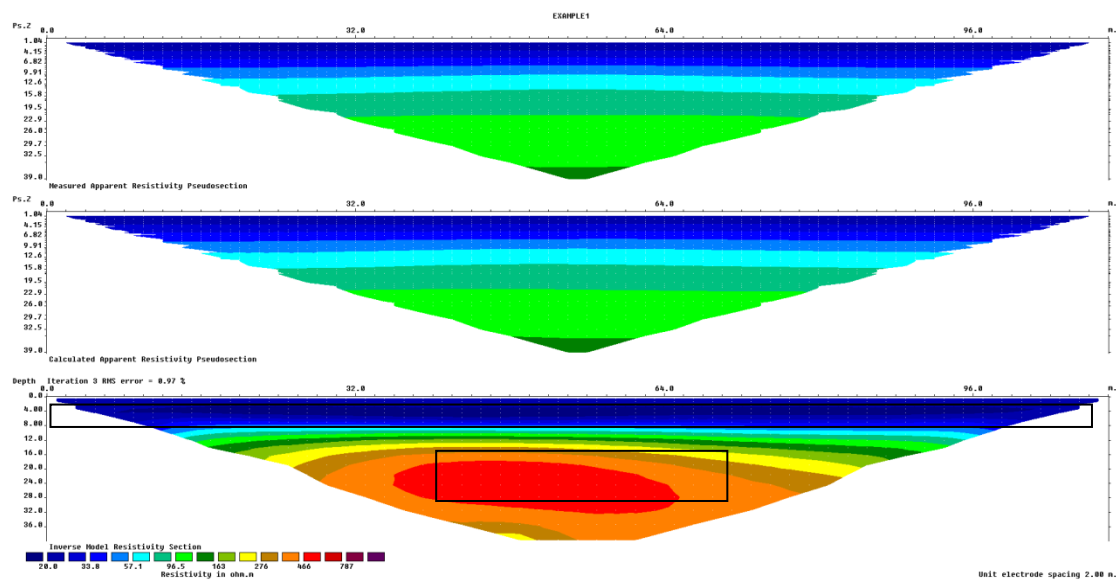
Σχήμα 5.47: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.48) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και το πάνω όριο της δομής υψηλής αντίστασης.



Σχήμα 5.48: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Robust

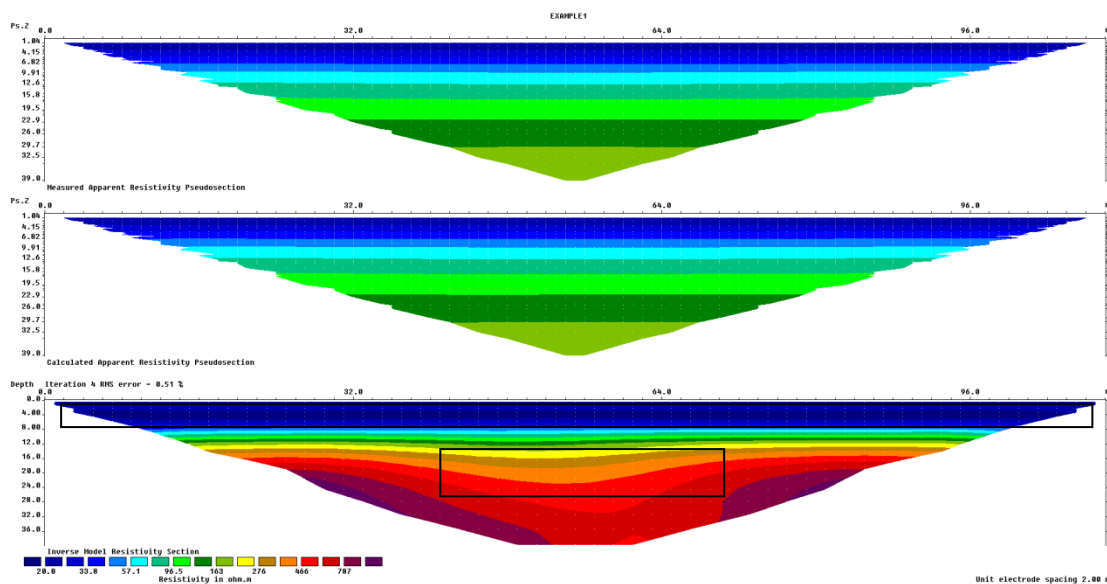
Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.49) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness απεικονίζει καλά το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση) καθώς επίσης και τα όρια της δομής υψηλής αντίστασης.Η αντίσταση της δομής είναι υποεκτιμημένη.



Σχήμα 5.49: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) και την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. . Pole-dipole Union Smoothness

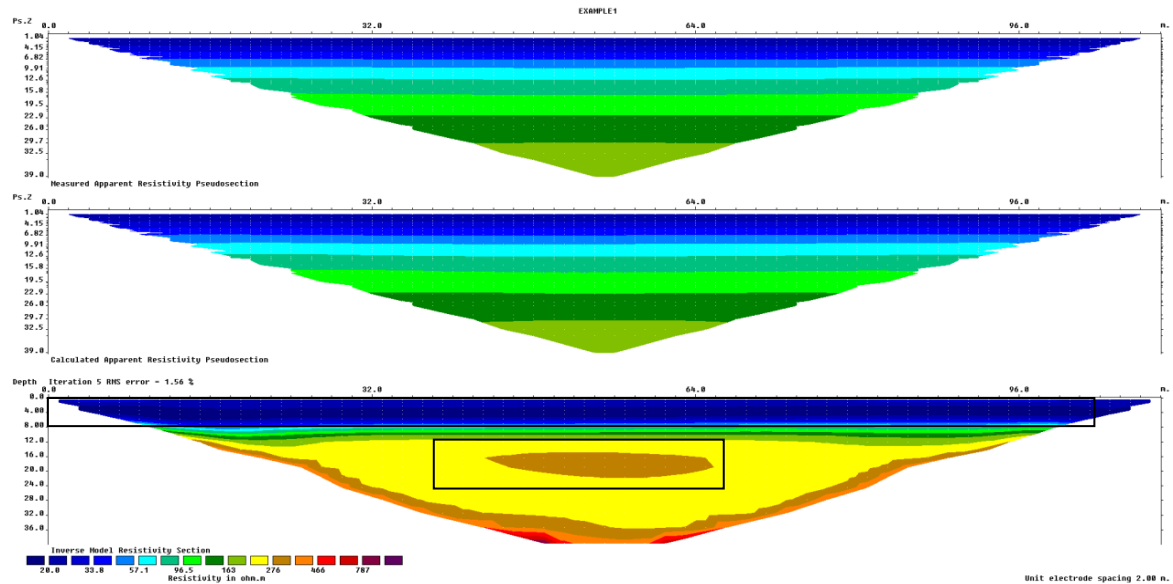
Μοντέλο 6

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.50) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Smoothness απεικονίζει καλά μόνο το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση).Τα όρια του δεύτερου στρώματος δεν είναι καλά καθορισμένα και η αντίσταση μέσα στην ζώνη είναι υπερεκτιμημένη.



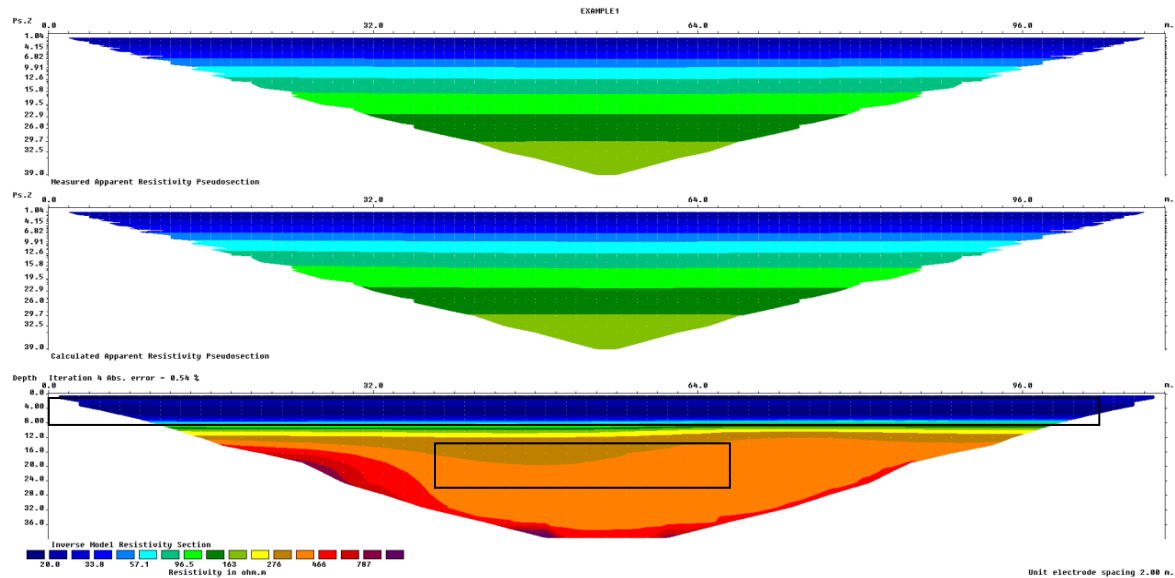
Σχήμα 5.50: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) και την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου – Διπόλου. Pole-dipole Union Smoothness

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.51) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Combined απεικονίζει καλά μόνο το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση).Τα όρια του δεύτερου στρώματος δεν είναι καλά καθορισμένα και η αντίσταση μέσα στην ζώνη είναι υπερεκτιμημένη.



Σχήμα 5.51: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου - Διπόλου. Pole-dipole Union Combined

Η Γεωηλεκτρική τομή(σχήμα 5.52) στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Robust απεικονίζει καλά μόνο το πρώτο στρώμα(πάχος,αντίσταση).Τα όρια του δεύτερου στρώματος δεν είναι καλά καθορισμένα και η αντίσταση μέσα στην ζώνη είναι υπερεκτιμημένη.



Σχήμα 5.52: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίστοιχη γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Πόλου - Διπόλου. Pole-dipole Union Robust

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν ο σχεδιασμός της γεωηλεκτρικής διασκόπησης της ευρύτερης περιοχής της Μαυροπηγής του νομού Κοζάνης, για τον εντοπισμό τυχόν ρηγμάτων και έγκοιλων μέχρι βάθους 60 m. Η γεωφυσική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας ενώ παράλληλα έγινε συσχέτισμός των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής διασκόπησης με πληροφορίες που προέρχονται από τα έξι μοντέλα συνθετικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Στο πρώτα 3 μοντέλα με το ρήγμα στην μέση της γραμμής μελέτης παρατηρείται ότι με την διάταξη role-dipole απεικονίζεται το πρώτο και το δεύτερο στρώμα καλά καθώς επίσης και τα όρια του ρήγματος με τις αντιστάσεις σωστά εκτιμημένες. Αντίθετα με την διάταξη Schlumberger απεικονίζεται καλά μόνο το πρώτο στρώμα και αυτό οφείλεται στο μικρό βάθος διασκόπησης που έχει σε σχέση με την διάταξη role-dipole. Πιο συγκεκριμένα για τον ίδιο αριθμό ηλεκτροδίων η διάταξη role-dipole εκτείνεται σε βάθος 57m ενώ η διάταξη Schlumberger σε βάθος 34m. Επίσης όταν προστέθηκε θόρυβος η διάταξη role-dipole φαίνεται να μην επηρεάζεται σημαντικά καθώς έχει καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο.
- Στα μοντέλα 4,5,6 με το δομή υψηλής αντίστασης στην μέση της γραμμής μελέτης παρατηρείται ότι η διάταξη πόλου-διπόλου απεικονίζει σωστά μόνο το πρώτο στρώμα και παρουσιάζει προβλήματα τόσο στην εκτίμηση της αντίστασης όσο και στον εντοπισμό των ορίων της δομής.
- Τέλος στα μοντέλα που εξετάστηκαν η διάταξη role-dipole δίνει καλύτερα αποτελέσματα λόγω του καλύτερου βάθους διασκόπησης που έχει καθώς και του καλού λόγου σήματος προς θόρυβο. Επίσης να αναφερθεί ότι από τις μεθόδους αντιστροφής αυτή που απεικονίζει καλύτερα τα όρια καθώς και τις αντιστάσεις είναι η αυτή της κανονικοποίησης με τη νόρμα L1.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Σούρλας, Γ., (2000), “Συμβολή της Γεωφυσικής Διασκόπησης στην Αναζήτηση Θαμμένων Αρχαιοτήτων στην Ίτανο, Λασιθίου.”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Βαφείδης Α., (2001), Εφαρμοσμένη Γεωφυσική 2 Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. Βαφείδης Α., (1993), Εφαρμοσμένη Γεωφυσική 1: Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. Αποστολόπουλος(1993)
5. Κωσταρέλης Κωνσταντίνος(2008) "Γεωηλεκτρική διασκόπηση στην περιοχή Στύλου Αποκορώνου Χανίων"
6. Γκανιάτσος, Ι, (2000), “Γεωηλεκτρική Τομογραφία σε τρεις Διαστάσεις”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. Αγιουτάντης Ζ.(2012), «ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΜΑΥΡΟΠΗΓΗΣ»
8. Αγιουτάντης Ζ.(«Γεωλογική, Γεωφυσική και Γεωτεχνική διερεύνηση του συστήματος Ασβεστολίθου - Σχιστολίθου στα Ν-ΝΔ του Ορυχείου Μαυροπηγής»

ΞΕΝΗ

1. Robinson, E. S. & Coruh, C., (1988), “Basic Exploration Geophysics”, New York: John Wiley.
2. J. H. Coggon University of Otago, Dunedin, New Zealand “ A COMPARISON OF IP ELECTRODE ARRAYS”
3. YUTAKA SASAKI “ RESOLUTION OF RESISTIVITY TOMOGRAPHY INFERRED FROM NUMERICAL SIMULATION”
4. Les P. Bear Alan C. Tripp “ Investigating the resolution of IP arrays using inverse theory”
5. Mufti(1976)