



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**‘ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ ΛΥΓΑΡΙΑ-
ΠΕΡΙΒΟΛΙ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΑΞΟΝΑ Ε65’**



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ε. ΑΡΓΥΡΗΣ

Εξεταστική επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος , Καθηγητής Π.Κ.(επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Κ.

Γαλετάκης Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής Π.Κ.

ΧΑΝΙΑ

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο χαρακτηρισμός των γεωλογικών σχηματισμών με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Ταυτόχρονα έγινε χρήση κατά την επεξεργασία τριών διαφορετικών μεθόδων αντιστροφής, κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης (Default), με συνδυασμό αντιστροφής (Use combined inversion method) και με την χρήση της νόρμας L1 (Robust) με σκοπό την σύγκριση τους και την εύρεση της καταλληλότερης για την ερμηνεία της προς μελέτη περιοχής

Η προς μελέτη περιοχή όπου πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική έρευνα είναι, το τμήμα Λυγαριά-Περιβόλι του οδικού άξονα Ε65 στην Μοσχοκαρυάς Λαμίας.

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν και με βοήθησαν στην πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνιο Βαφείδη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ανάθεση της εργασίας και τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, και τον κ. Μιχαήλ Γαλετάκη, Επίκουρο καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Επίσης, ευχαριστώ κ. Hamdan Hamdan, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Ορυκτών Πόρων για την συνεχή υποστήριξη και βοήθεια.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική υποστήριξη κατά τη διάρκεια περάτωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, η οποία εφαρμόστηκε στα πλαίσια γεωφυσικής διασκόπησης στην ευρύτερη περιοχή της Μοσχοκαρυάς, Λαμίας. Στόχος της γεωφυσικής διασκόπησης ήταν η απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών που θα διατρήσει η σήραγγα της Μοσχοκαρυάς του οδικού άξονα Ε65. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν τον Μάρτιο του 2006 κατά μήκος τριών γραμμών μελέτης συνολικού μήκους 2050 m.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πακέτα RES2DINV και IPI2WIN για την απεικόνιση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους σε μια ή δυο διαστάσεις. Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι αντιστροφής, κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης, συνδυασμένη αντιστροφή και αντιστροφή με την νόρμα L1 με σκοπό την σύγκριση τους και την επιλογή της καταλληλότερης γεωηλεκτρική τομής.

Σε τρεις γεωτρήσεις παρακείμενες στις γραμμές μελέτης διατρήθηκαν δολερίτες και σχιστοκερατόλιθοι. Στην γεωηλεκτρική τομή S5 όλη η σήραγγα βρίσκεται μέσα σε σχηματισμούς που παρουσιάζουν υδροφορία. Στην γεωηλεκτρική τομή S4 η σήραγγα φαίνεται να διατρήει δολερίτες και σχιστοκερατόλιθους. Στην γεωηλεκτρική τομή S3, εμφανίζεται πιθανό ρήγμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</i>	6
1.1 Στόχος της διπλωματικής εργασίας	6
1.2 Περιγραφή της διπλωματικής εργασίας.....	6
1.3 Γεωφυσικές μέθοδοι	7
1.4 Περιοχή μελέτης	10
1.5 Γεωλογικά δεδομένα	13
1.6 Στοιχεία γεωτρήσεων	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	17
<i>ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</i>	17
2.1 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	17
2.1.1 Εισαγωγή	17
2.1.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη	18
2.1.3 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	21
2.1.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων	21
2.1.5 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων	24
2.1.6 Γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση	25
2.1.6.1 Εισαγωγή	25
2.1.6.2 Τρόπος πραγματοποίησης μετρήσεων στην ηλεκτρική βυθοσκόπηση	26
2.1.6.3 Διαδικασία ηλεκτρικής βυθοσκόπησης	27
2.1.6.4 Προβλήματα στην ερμηνεία των Γεωηλεκτρικών Βυθοσκοπήσεων....	28
2.1.7 Ηλεκτρική Τομογραφία	30
2.1.7.1 Θεωρία	30
2.1.7.2 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων	30
2.1.7.3 Αντιστροφή των δεδομένων	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	35
<i>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....</i>	<i>35</i>
3.1 Εισαγωγή	35
3.2 Επεξεργασία της γραμμής μελέτης S3	38
3.2.1 Μέθοδος Α) Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης.....	38
3.2.2 Μέθοδος Β) Με την χρήση της νόρμας L1	43
3.2.3 Μέθοδος Γ) Με συνδυασμό αντιστροφής.....	46
3.3 Επεξεργασία της γραμμής μελέτης S4.....	49
3.3.1 Μέθοδος Α) Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης.....	49
3.3.2 Μέθοδος Β) Με την χρήση της νόρμας L1	52
3.3.3 Μέθοδος Γ) Με συνδυασμό αντιστροφής.....	55
3.4 Επεξεργασία της γραμμής μελέτης S5.....	58
3.4.1 Μέθοδος Α) Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης.....	58
3.4.2 Μέθοδος Β) Με την χρήση της νόρμας L1	62
3.4.3 Μέθοδος Γ) Με συνδυασμό αντιστροφής.....	64
3.5 Σύγκριση των μεθόδων αντιστροφής.....	67
3.6 Βαθμονόμηση	68
3.6.1 Λογισμικό πακέτο IPI2WIN.....	68
3.6.2 Απεικόνιση αποτελεσμάτων	69
3.6.2.1 Βυθοσκόπηση Δολερίτη	69
3.6.2.2 Βυθοσκόπηση Σχιστοκερατόλιθου	70
3.6.2.3 Βυθοσκόπηση Περιδοτίτη	71
3.7 Ερμηνεία	72
3.7.1 Γραμμή μελέτης S3.....	72
3.7.2 Γραμμή μελέτης S4.....	76
3.7.3 Γραμμή μελέτης S5.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	85
<i>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</i>	<i>85</i>
4.1 Συμπεράσματα	85
4.2 Προτάσεις	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**ΕΙΣΑΓΩΓΗ****1.1 Στόχος της διπλωματικής εργασίας**

Η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή αυτής της διπλωματικής εργασίας είχε ως στόχο την απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών, τους οποίους θα διατρήσει η σήραγγα του οδικού άξονα Ε65.

Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Με δεδομένο το γεωλογικό χάρτη της περιοχής, καθώς και γεωτρήσεων που είχαν διεξαχθεί, έγινε προσπάθεια σύνδεσης των γεωλογικών στοιχείων με τα γεωφυσικά αποτελέσματα.

Η απεικόνιση των σχηματισμών αυτών συντελεί στην αναγνώριση δομών που σχετίζονται με πιθανά ρήγματα και επωθήσεις, στον προσδιορισμό τόσο του βάθους που αναμένεται ο υδροφόρος, όσο και θέσεων που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Με τις γεωφυσικές μεθόδους δίνονται πληροφορίες για την σε βάθος εμφάνιση των γεωλογικών σχηματισμών ανάμεσα στις υφιστάμενες γεωτρήσεις.

Ταυτόχρονα με την χρήση κατά την επεξεργασία τριών διαφορετικών μεθόδων αντιστροφής, κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης, συνδυασμένη αντιστροφή και αντιστροφή με την νόρμα L1 από το ίδιο λογισμικό πακέτο που είχε ως στόχο την σύγκριση τους και την εύρεση της καταλληλότερης για την ερμηνεία της προς μελέτη περιοχής.

1.2 Περιγραφή της διπλωματικής εργασίας

Στην διπλωματική εργασία αυτή παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας (εκτέλεση ηλεκτρικής τομογραφίας), η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μελέτης για τον χαρακτηρισμό των γεωλογικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή της Μοσχοκαρυάς, Λαμίας και αφορά το τμήμα Λυγαριά-Περιβόλι του οδικού άξονα Ε65. Ταυτόχρονα έγινε χρήση κατά την επεξεργασία τριών διαφορετικών μεθόδων αντιστροφής, κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης, συνδυασμένη αντιστροφή και αντιστροφή με την νόρμα

L1, με σκοπό την σύγκριση τους και την εύρεση της καταλληλότερης για την ερμηνεία της προς μελέτη περιοχής.

Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την διασκόπηση στην ευρύτερη περιοχή της Μοσχοκαρυάς, Λαμίας, από τους κυρίους ,Νικόλαο Οικονόμου, Νικόλαο Ανδρονικίδη, Hamdan Hamdan που ανήκουν στο επιστημονικό προσωπικό του πολυτεχνείου της Κρήτης του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και τους φοιτητές Νικόλαο Τσούση και Κωνσταντίνο Αργύρη του ιδίου τμήματος, τον Μάρτιο του 2006.

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής σχεδιάστηκε γεωφυσική έρευνα, η οποία περιλαμβάνει 3 γραμμές μελέτης, συνολικού μήκους 2050 μέτρων, με την διάταξη Schlumberger-Wenner. Το μέγιστο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων ρεύματος ήταν 500 m (γραμμή μελέτης S5), που είχε σαν αποτέλεσμα το βάθος διασκόπησης να φτάσει μέχρι και στα 180 m περίπου. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος κυμαινόταν από 20–200 mA. Αυτές είναι, η γραμμή μελέτης S3 με μήκος 400 m και διεύθυνσης περίπου N-B αποτελείται από 38 κέντρα με ισαπόσταση 10 m, η γραμμή μελέτης S4 μήκους 600 m και διεύθυνσης περίπου N-B αποτελείται από 28 κέντρα με ισαπόσταση 20 m και η γραμμή μελέτης S5 μήκους 1050 m και διεύθυνσης N-B αποτελείται από 34 κέντρα με ισαπόσταση 30 m.

1.3 Γεωφυσικές μέθοδοι

Οι γεωφυσικές μέθοδοι είναι χρήσιμες, αξιόπιστες και αποτελεσματικές, γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων όπως για τον εντοπισμό δομών, που ευνοούν το σχηματισμό κοιτασμάτων πετρελαίου, φυσικού αερίου και μεταλλευμάτων. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, για τον εντοπισμό υδροφόρων οριζόντων, γεωθερμικών πεδίων, κ.ά.

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

Βαρυτικές Μέθοδοι. Άμεσος σκοπός αυτών των μεθόδων είναι ο καθορισμός των οριζόντιων μεταβολών της πυκνότητας των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μέτρηση των μεταβολών της έντασης του πεδίου βαρύτητας και των χωρικών παραγώγων αυτής.

Μαγνητικές Μέθοδοι. Βασίζονται στον εντοπισμό μεταβολών της μαγνήτησης των πετρωμάτων μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις στην επιφάνεια της γης τοπικών μεταβολών της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου, (μαγνητικών ανωμαλιών μικρής κλίμακας).

Ηλεκτρικές Μέθοδοι. Με αυτές τις μεθόδους επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις της ηλεκτρικής τάσης στην επιφάνεια της γης.

Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι. Βασίζονται στον καθορισμό της ηλεκτρικής δομής (κατανομή της ειδικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης μετρώντας τις ιδιότητες του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που παράγεται μέσα στα στρώματα αυτά.

Σεισμικές Μέθοδοι. Με τις μεθόδους σεισμικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των μεταβολών της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών (σεισμικών) κυμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις των χρόνων διαδρομής τους μέσα στα στρώματα αυτά.

Εκτός από τις παραπάνω μεθόδους εφαρμόζονται και άλλες, όπως είναι η θερμική μέθοδος και η ραδιομετρική μέθοδος. Όμως, ενώ οι αρχές πάνω στις οποίες στηρίζονται είναι πολύ απλές, πολλές από τις μεθόδους αυτές εμφανίζουν σημαντικές δυσκολίες στην εφαρμογή τους, λόγω του ότι η δομή της γης είναι πολύπλοκη.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια από τις πιο σημαντικές στην γεωφυσική διασκόπηση. 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. Έχει σαν στόχο της τον εντοπισμό περιοχών με οικονομική σημασία.

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. Παρακάτω, ακολουθούν αναφορές, για διάφορες περιοχές της Κρήτης, στις οποίες γίνεται συνδυασμός γεωλογικών και γεωφυσικών μεθόδων.

Οι Hamdan και οι συνεργάτες (2002) στην εργασία τους με τίτλο «Τρισδιάστατη χαρτογραφική απεικόνιση πιθανών υδροφόρων σχηματισμών στην περιοχή Κισσάμου, Ν.Χανίων» αναζήτησαν τους υδροφόρους σχηματισμούς με την χρήση ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και δημιούργησαν ένα τρισδιάστατο ομοίωμα - πρότυπο (μοντέλο) των γεωλογικών σχηματισμών και ιδιαίτερα αυτών που

παρουσιάζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον για την περιοχή Κίσσαμου του νομού Χανίων. Ο εντοπισμός/διαχωρισμός των γεωλογικών σχηματισμών έγινε με γεωηλεκτρική διασκόπηση. Το πάχος των επάλληλων γεωλογικών σχηματισμών, όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών δεδομένων, στις διάφορες θέσεις των βυθοσκοπήσεων, εισάγεται σε λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιεί μεθόδους παρεμβολής για την δημιουργία τομών και τρισδιάστατων ομοιωμάτων της προσεγγιστικής γεωλογικής δομής της περιοχής μελέτης.

Οι Βαφείδης και οι συνεργάτες (2004) στην εργασία τους με τίτλο «Γεωφυσική διασκόπηση στο οροπέδιο του Ομαλού, Ν. Χανίων», συνδύασαν γεωφυσικές μεθόδους για τη διερεύνηση της γεωλογικής δομής στο οροπέδιο και κατέληξαν στο ότι η ηλεκτρική τομογραφία είναι η πλέον κατάλληλη για τον εντοπισμό των διαφόρων στρωμάτων του υπεδάφους και την απεικόνιση των ζητούμενων καρστικών μορφών.

Η γεωφυσική διασκόπηση αποσκοπούσε στον υπολογισμό του πάχους του εδαφικού καλύμματος και του συνόλου των κλαστικών σχηματισμών καθώς και στην απεικόνιση των δολίνων και καρστικών εγκοίλων τμήματος του Οροπεδίου. Η μελέτη απέδειξε ότι η συνδυασμένη εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, με τη συμβολή πάντα της γεωλογίας, είναι σε θέση να εξάγει ορθά συμπεράσματα σχετικά με τις γεωλογικές μορφές στην περιοχή του Ομαλού και την ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και περιοχών ενδιαφέροντος.

Οι Βαφείδης και οι συνεργάτες (2004) στην εργασία τους με τίτλο «Συμβολή της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και της Σεισμικής Διάθλασης στην επιλογή θέσης για τη δημιουργία Λιμνοδεξαμενής στην Κουντούρα, Δ.Πελεκάνου, Ν.Χανίων», που είχε ως στόχο τον προσδιορισμό με γεωφυσικές μεθόδους του πάχους των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών πάνω στους οποίους θα εδραστεί η λιμνοδεξαμενή και την υπόδειξη θέσεων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, έδειξε ότι τόσο τα αποτελέσματα της Σεισμικής Διάθλασης όσο και αυτά της Ηλεκτρικής Τομογραφίας συμφωνούν μεταξύ τους και επιβεβαιώνονται από τα γεωτρητικά στοιχεία.

Οι Horeftaki και οι συνεργάτες (2004) στην εργασία τους με τίτλο «Integrated Geophysical Survey at Zoforoi Quarry, Iraklion, Crete» περιγράφουν γεωφυσική έρευνα στο λατομείο ασβεστολίθων στην περιοχή Ζωφόροι του Ν. Ηρακλείου, προκειμένου να ανιχνευθούν έγκοιλα με τις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ. Έδειξαν ότι υπάρχουν τρία έγκοιλα πληρωμένα με εδαφικό υλικό. Η μελέτη απέδειξε ότι με συνδυασμό γεωφυσικών μεθόδων σε λατομείο, μπορεί να διευκολυνθεί η

διαδικασία της εξόρυξης χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ποσότητα εκρηκτικών, για την καλύτερη απόληψη του πετρώματος.

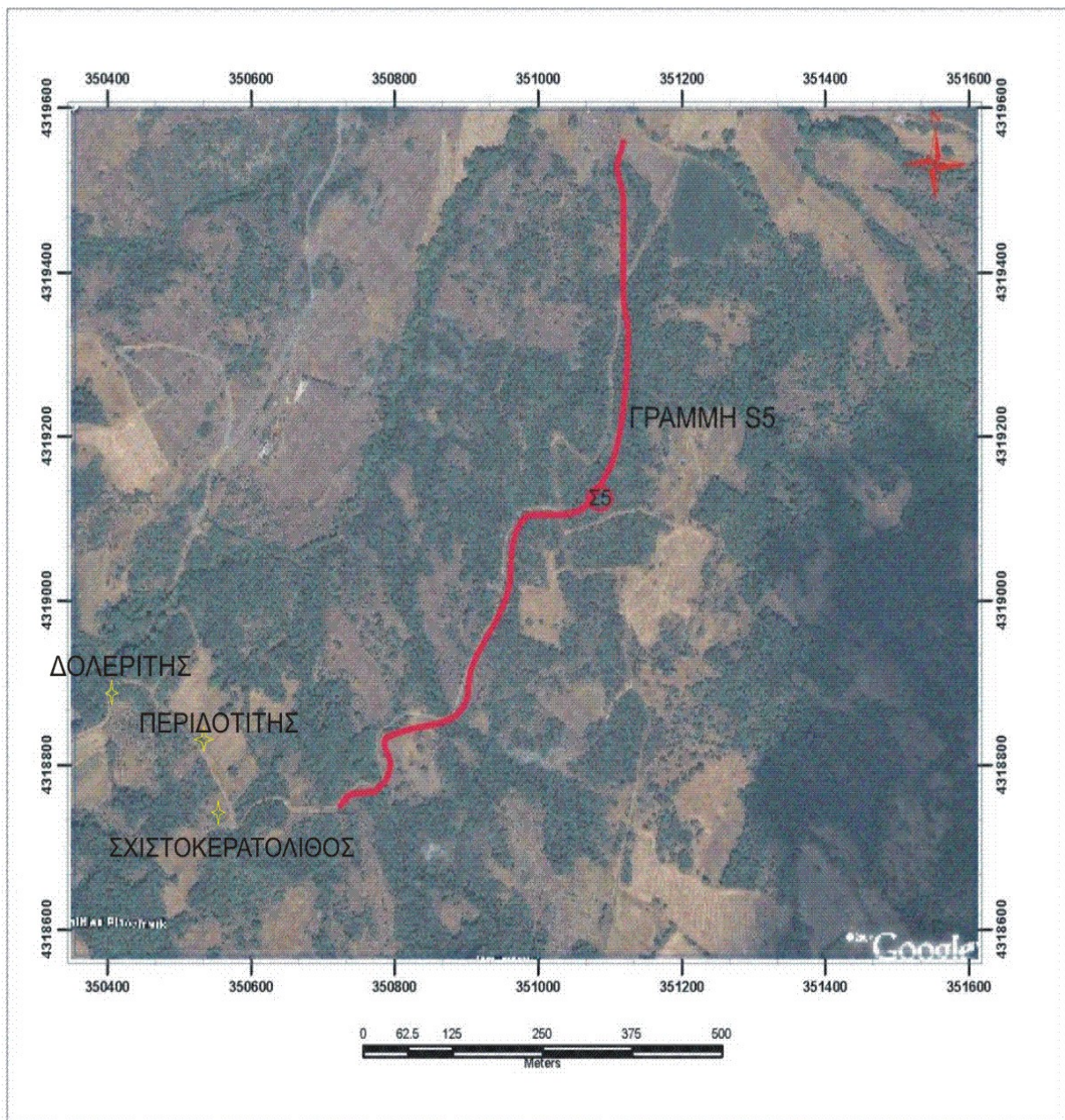
1.4 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή της Μοσχοκαρυάς βρίσκεται βορειοδυτικά της Λαμίας. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι σχετικά έντονο, ενώ το υψόμετρο στην περιοχή μελέτης φτάνει μέχρι και τα 650 περίπου μέτρα.

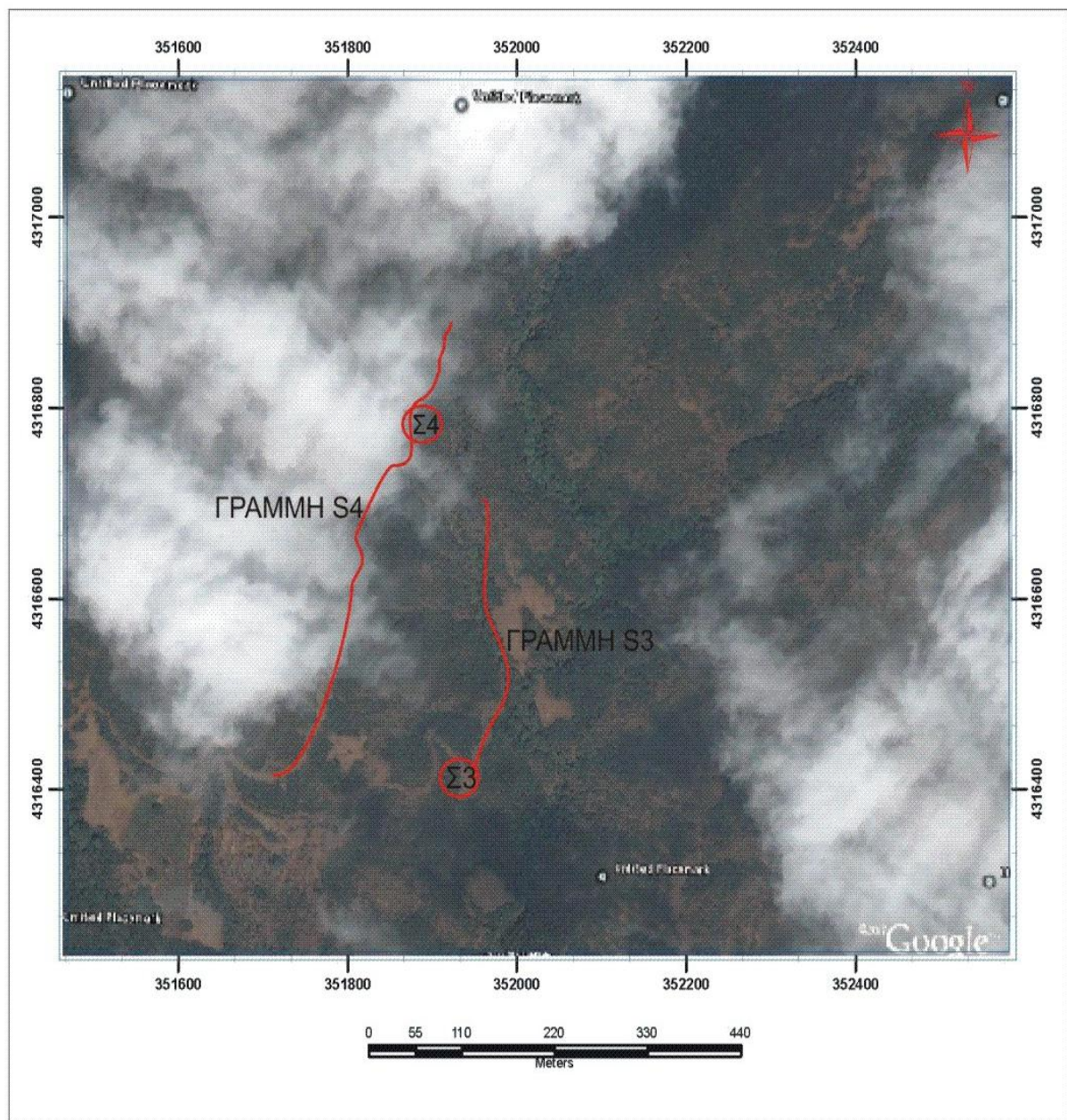
Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε στο βόρειο και στο νότιο τμήμα της μελλοντικής χάραξης της σήραγγας του οδικού άξονα Ε65, που θα ενώσει το βόρειο με το νότιο τμήμα των παριών του ορεινού όγκου βόρεια της Μοσχοκαρυάς. Με την χρήση του Google Earth και του λογισμικού πακέτου Ark Map, έγινε η απεικόνιση σε χάρτη των γραμμών μελέτης καθώς και τον σημείων όπου πραγματοποιήθηκαν οι γεωτρήσεις και οι in situ μετρήσεις Δολερίτη, Περιδοτίτη και Σχιστοκερατόλιθου.



Σχήμα 1.1: Χάρτης περιοχής μελέτης.



Σχήμα 1.1α :Χάρτης περιοχής όπου φαίνονται η γραμμή μελέτης S5, τα σημεία όπου έγινε η γεώτρηση Σ5 με κόκκινο χρώμα και οι μετρήσεις στο πεδίο (in situ) με κίτρινο χρώμα.



Σχήμα 1.1β : Χάρτης περιοχής όπου φαίνονται η γραμμή μελέτης S4 και S3, τα σημεία όπου έγινε η γεώτρηση Σ4 και Σ3 με κόκκινο χρώμα.

1.5 Γεωλογικά δεδομένα

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τους εξής γεωλογικούς σχηματισμούς:

α) Τεταρτογενείς αποθέσεις : είναι οι νεότερες αποθέσεις της περιοχής και αποτελούνται από χάλικες, άμμους και άλλα υλικά χαλαρής συνεκτικότητας.

β) Πλειο-τεταρτογενείς αποθέσεις: αποτελούνται κυρίως από φακούς και ενστρώσεις λατύπων και κροκαλών οφιολιθικής σύστασης και από κορηματικά υλικά.

γ) Ανθρακικοί σχηματισμοί ανώτερου τριαδικού - ιουρασικού μεσωστρωματώδεις τεφρού χρώματος.

δ) Οφιολιθικοί σχηματισμοί: Δολερίτες, περιδοτίτες και σχιστοκερατόλιθοι.

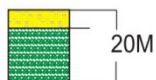
Ο ορεινός όγκος της Μοσχοκαρυάς χαρακτηρίζεται από αλλεπάλληλες επωθήσεις μεταξύ κυρίως των οφιολιθικών σχηματισμών, ενώ έντονος είναι και ο βαθμός αποσάρθρωσης των σχηματισμών .

Σύμφωνα με τα στοιχεία γεωτρήσεων στην περιοχή ο υδροφόρος ορίζοντας κυμαίνεται από τα 10 περίπου μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους έως και τα 40 μέτρα περίπου. Η παρουσία του νερού ανάμεσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι έντονη κατά θέσεις, κάτι που επιβεβαιώνει και τον υψηλό βαθμό αποσάρθρωσης ή/και κατακερματισμού των βραχωδών σχηματισμών.

1.6 Στοιχεία γεωτρήσεων.

Στην περιοχή μελέτης είχαν πραγματοποιηθεί γεωτρήσεις σε κοντινή περιοχή στις γραμμές μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Κοντά στην γραμμή μελέτης S3 υπάρχει η γεώτρηση Σ3 σε βάθος 20 m από την οποία προέκυψε εδαφικό κάλυμμα (Άμμοι, Χάλικες και Άργιλοι) και Δολερίτης.(Γεωφυσική Διασκόπηση στο Τμήμα Λυγαριά-Περιβόλι του οδικού άξονα Ε65,2006)

Σ3**Υπόμνημα γεώτρησης**

Άμμοι, Χαλίκες, άργιλοι

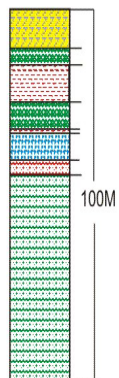


Δολερίτης

Σχήμα 1.2:Γεώτρηση Σ3.

Στην γραμμή μελέτης S4 έγινε δειγματοληψία από την γεώτρηση Σ4 σε βάθος 120 m και στην γραμμή μελέτης S5 όπου πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία από την γεώτρηση Σ5 σε βάθος 100 m, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που προέκυψαν είναι όμοιοι και παρουσιάζονται στα σχήματα 1.3 και 1.4 αντίστοιχα.

Σ5



Υπόμνημα γεώτρησης



Άμμοι, Χαλίκες, άργιλοι



Κερατόλιθος



Σχιστοκερατόλιθος



Περιδοτίτης



Δολερίτης

Σχήμα 1.4:Γεώτρηση Σ5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ****2.1 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης****2.1.1 Εισαγωγή**

Η εμφάνιση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης χρονολογείται από τις αρχές του εικοστού αιώνα. 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 τους ξεκίνησε τη δεκαετία του '70 και αυτό λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γεγονός που βοήθησε τόσο στη συλλογή των δεδομένων όσο και στην επεξεργασία τους.

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. Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο καθορισμός της τιμής, καθώς και η μελέτη των μεταβολών αυτής στα επιφανειακά στρώματα, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Για την εφαρμογή των ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων απαιτείται σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος.

Από τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης οι πιο σημαντικές είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων. Για τη συλλογή δεδομένων στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκεκριμένα η ηλεκτρική τομογραφία, η ηλεκτρική βυθοσκόπηση και η ηλεκτρική χαρτογράφηση.

2.1.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη

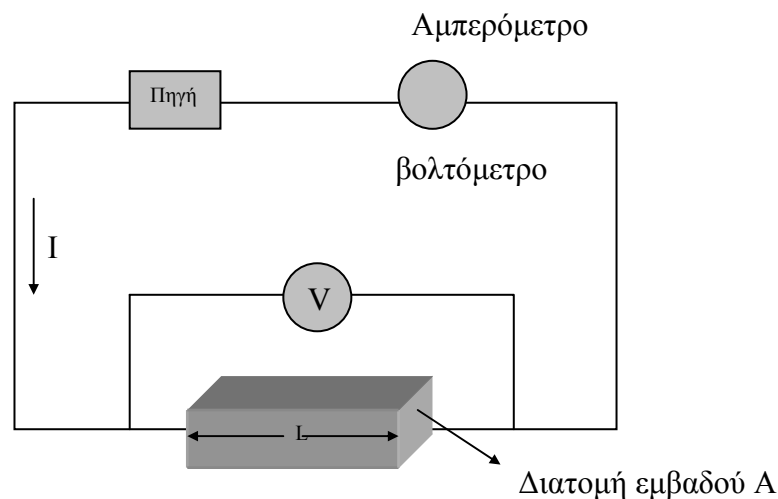
Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm (Robinson, 1988), σύμφωνα με τον οποίο αντίσταση R (σε Ohm) ενός αγωγού ονομάζεται ο σταθερός λόγος της διαφοράς δυναμικού ΔV (σε Volt) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση I (σε Ampere) του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

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

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

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

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



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

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) μονάδα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το $1 \Omega\text{m}$. Πολλές φορές όμως χρησιμοποιείται και η μονάδα $1\Omega\text{cm}$ και είναι $1 \Omega\text{m} = 100 \Omega\text{cm}$. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο

μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από $10^{-6} \Omega m$ σε ορισμένα ορυκτά όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι $10^{15} \Omega m$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1} \Omega m$ χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15} \Omega m$. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι: α) η λιθολογία των πετρωμάτων, β) το πορώδες των πετρωμάτων, γ) η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων, δ) η θερμοκρασία των πετρωμάτων.

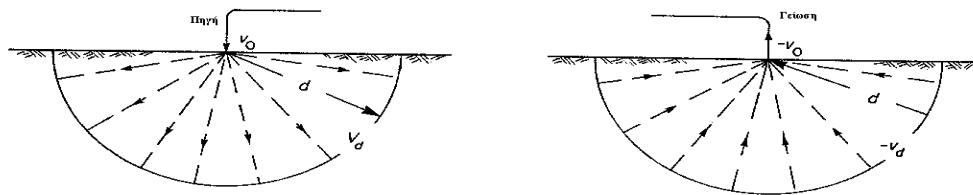
ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ($\Omega m.m$)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ <i>Άργιλοι</i> Μάργες Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα Εβαπορίτες (Γύψοι) Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι Κροκαλοπαγή βάσεως Ψαμμίτες	2-20 20-60 50-500 200 150-500 200-300 50-70
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ Φλύσχης Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι Ασβεστόλιθοι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

Πίνακας 2.1 : Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων.

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

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

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

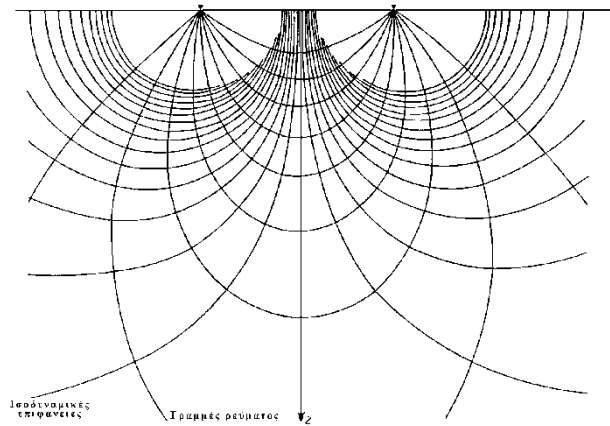


Σχήμα 2.2: Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη στην περίπτωση που δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων (Γκανιάτσος, 2000, Σούρλας, 2000).

Το συνολικό δυναμικό V σε ένα σημείο του υπεδάφους που απέχει αποστάσεις d_1 και d_2 από την πηγή και τη γείωση αντίστοιχα, ισούται με το άθροισμα του δυναμικού V_{d1} που οφείλεται στην πηγή, με το δυναμικό V_{d2} που οφείλεται στη γείωση:

$$V = V_{d1} + V_{d2} = V_{d1} - V_0 + V_0 + V_{d2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (2.3)$$

Με βάση τη σχέση (2.3) υπολογίζεται το δυναμικό σε όλα τα σημεία του υπεδάφους και γίνεται η σχεδίαση των ισοδυναμικών επιφανειών. Οι γραμμές ρεύματος σχεδιάζονται κάθετα στις ισοδυναμικές επιφάνειες. Τόσο οι γραμμές ρεύματος όσο και οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι συμμετρικές ως προς την ευθεία που τέμνει κάθετα και στο μέσο το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα δύο ηλεκτρόδια.



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

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

2.1.3 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα.

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

2.1.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων

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

α) Διάταξη Wenner

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

$$\rho_a = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I} \quad 2.4$$

Η ποσότητα

$$2\pi \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = 2\pi a \quad 2.5$$

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

β) Διάταξη Schlumberger

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

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} + \frac{1}{L-b} \right)^{-1} = (L^2 - b^2) \frac{\pi}{2b} \quad 2.6$$

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

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{I} \quad 2.7$$

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

γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Σε αυτή τη διάταξη η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος είναι ίση με a . Ομοίως a είναι και το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγαριών των ηλεκτροδίων είναι μεγάλη και ίση με na ($n \gg 1$), όπως φαίνεται στο σχήμα (2.4.γ).

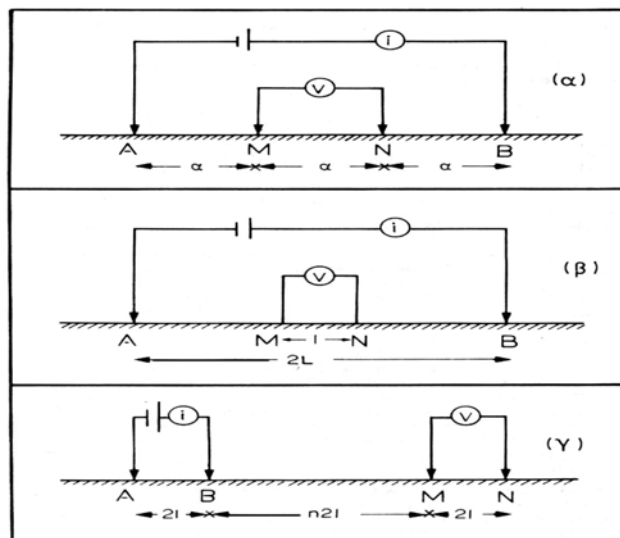
Ο γεωμετρικός συντελεστής K για την διάταξη διπόλου-διπόλου και για $n \gg 1$, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \pi na(n+1)(n+2) \quad 2.8$$

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από την σχέση

$$\rho_a = \pi na(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{i} \quad 2.9$$

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



Σχήμα 2.4: Διατάξεις Wenner (α), Schlumberger (β), διπόλου-διπόλου (γ) (Παπαζάχος, 1986, σελ. 253).

2.1.5 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τη γεωηλεκτρική διασκόπηση. Η διάταξη των ηλεκτροδίων δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι παράγοντες-κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι οι κάτωθι.

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο

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

2. Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες

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

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

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

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

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

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

5. Βάθος διασκόπησης

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

6. Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου

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

7. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

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

2.1.6 Γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση

2.1.6.1 Εισαγωγή

Η γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση αποτελεί μέρος της ηλεκτρικής διασκόπησης, στην οποία μελετάται η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Απεικονίζει δηλαδή την μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης κατά μία μόνο διάσταση, αυτή του βάθους, πράγμα το οποίο επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της με πληροφορίες από γεώτρηση. Στην ηλεκτρική βυθοσκόπηση προκύπτει γράφημα της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους. Η βυθοσκόπηση είναι μία σχετικά γρήγορη και μικρού κόστους γεωηλεκτρική

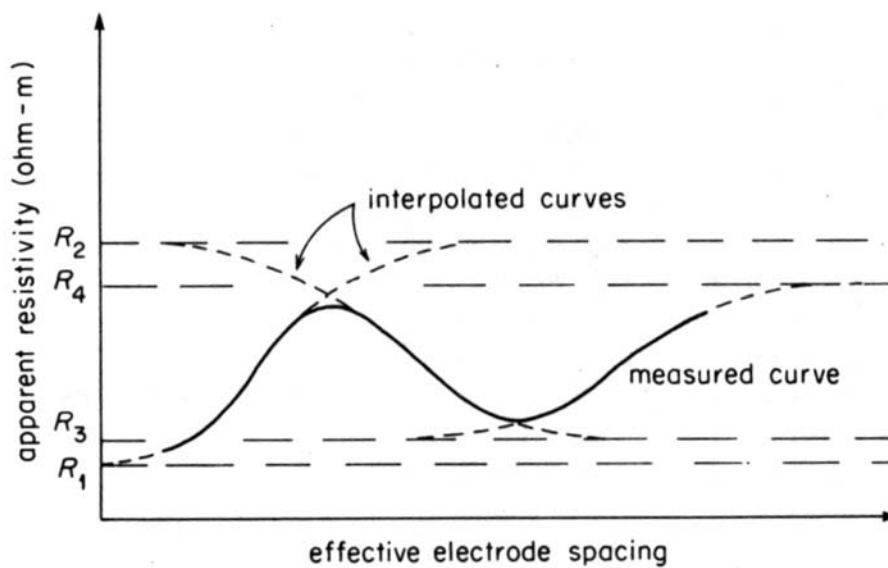
διασκόπηση η οποία επιτρέπει την εξαγωγή αξιόλογων συμπερασμάτων για την εναλλαγή των στρωμάτων με το βάθος.

2.1.6.2 Τρόπος πραγματοποίησης μετρήσεων στην ηλεκτρική βυθοσκόπηση

Η περιγραφή της γεωλογικής δομής του υπεδάφους κατά την εφαρμογή της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης, προκύπτει από τον υπολογισμό των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του πάχους ή/και του βάθους των γεωλογικών στρωμάτων.

Με τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση προσδιορίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση R_a σε σταθερό σημείο της επιφάνειας για διαδοχικά αυξανόμενες τιμές του γεωμετρικού συντελεστή K . Αυτό συμβαίνει αυξάνοντας συνεχώς την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Καθώς η διάταξη των ηλεκτροδίων απλώνεται, η ίδια ποσότητα ρεύματος διαρέει μεγαλύτερα βάθη. Άρα, η ηλεκτρική αντίσταση των βαθύτερων γεωλογικών στρωμάτων επηρεάζει τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Εναλλαγές, υψηλής και χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης, μπορεί να εμφανισθούν σε γράφημα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της απόστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος (σχήμα 2.5).

Ανάμεσα στις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων, η διάταξη Wenner είναι η λιγότερο κατάλληλη για τις γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (παρόλο που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά), λόγω της μετακίνησης των τεσσάρων ηλεκτροδίων σε κάθε πρόσθετη μέτρηση. Αντίθετα στη διάταξη Schlumberger τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν στην ίδια θέση, και μόνο τα ηλεκτρόδια του ρεύματος μετακινούνται για κάθε επιπλέον μέτρηση.



Σχήμα 2.5 Γράφημα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής και της αντίστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος, για τον υπολογισμό εναλλασσόμενων υψηλής και χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης στρωμάτων, με τη βοήθεια της διάταξης Wenner. (Robinson, Coruh, 1988, σελ. 466)

2.1.6.3 Διαδικασία ηλεκτρικής βυθοσκόπησης

Η διαδικασία εκτέλεσης της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης αποτελείται από τα παρακάτω βήματα, αναφερόμενα με σειρά προτεραιότητας.

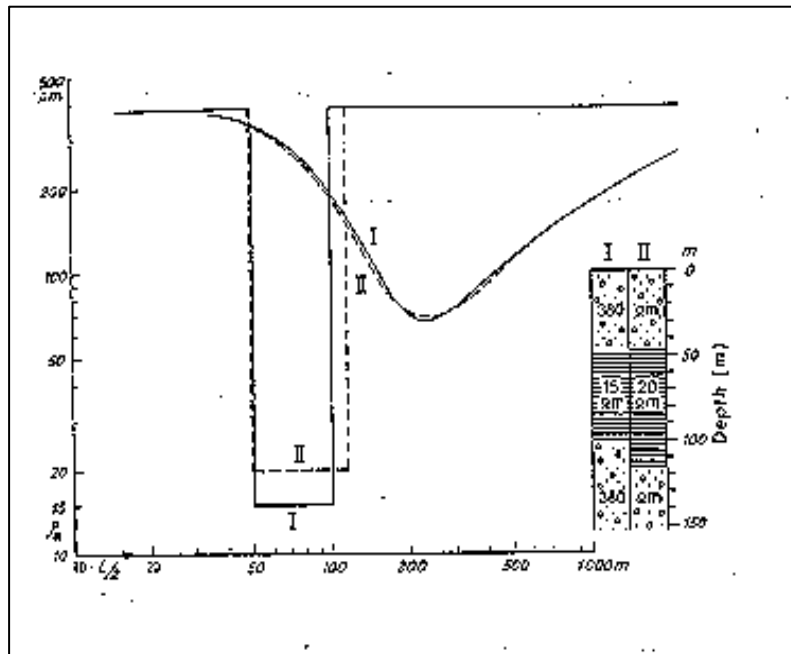
- Ορίζεται η ευθεία πάνω στην οποία θα γίνει η ανάπτυξη των ηλεκτροδίων. Έτσι, ελέγχεται η περιοχή μελέτης πριν να ξεκινήσει η βυθοσκόπηση για την αποφυγή εμποδίων όπως η ύπαρξη χειμάρρων, φαραγγίων, λόφων, οικημάτων, φρακτών κ.α.
- Συνδέεται το όργανο με τα καλώδια, και τοποθετείται στο σημείο που θα αποτελεί το κέντρο της Βυθοσκόπησης (O).
- Τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος εκατέρωθεν του σημείου O σε απόσταση $MN/2$ και $AB/2$ αντίστοιχα. Στη συνέχεια γίνεται η σύνδεση των ηλεκτροδίων A, B με τα καλώδια, διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα και πραγματοποιείται η μέτρηση, όπου λαμβάνονται συγκεκριμένες τιμές του δυναμικού V. Στη συνέχεια τοποθετούνται τα

ηλεκτρόδια του ρεύματος σε μεγαλύτερη απόσταση $AB/2$ και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.

- Η συνάρτηση μεταβολής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ_a , με το βάθος σχεδιάζεται σε διπλό λογαριθμικό χαρτί κατά τη λήψη των μετρήσεων έτσι ώστε να ελέγχεται η αξιοπιστία των μετρήσεων.
- Η διαφορά δυναμικού μειώνεται με την αύξηση της απόστασης $AB/2$, ενώ όταν η τιμή προσεγγίζει το $0,1 \text{ mV}$, η μέτρηση θεωρείται μη αξιόπιστη. Σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται το μήκος του $MN/2$ και για το ίδιο $AB/2$ λαμβάνεται διπλή μέτρηση.
- Το μέγιστο μήκος της ανάπτυξης των ηλεκτροδίων ρεύματος καθορίζεται από το αν έχει εντοπιστεί γεωηλεκτρικά το πέτρωμα που στόχο έχει η βυθοσκόπηση. Αυτό διαπιστώνεται από την γεωηλεκτρική καμπύλη.
- Η απόσταση του ημιαναπτύγματος $AB/2$ και οι μετρούμενες τιμές της έντασης του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού καταγράφονται σε ειδικά διαμορφωμένα έντυπα για την μετέπειτα επεξεργασία τους

2.1.6.4 Προβλήματα στην ερμηνεία των Γεωηλεκτρικών Βυθοσκοπήσεων

Κατά την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων, παρουσιάζονται κάποια προβλήματα όπως είναι η αρχή της ισοδυναμίας και η αρχή της επικάλυψης. Θεωρείται απαραίτητη η ύπαρξη πληροφοριών για το πάχος των στρωμάτων και τις τιμές της ειδικής αντίστασης, για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων και την καλύτερη ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων.



Σχήμα 2.6 Απεικόνιση της αρχής της ισοδυναμίας για ένα αγωγίμο στρώμα ανάμεσα από δύο μη αγωγίμα.(P.V.Sharma, 1986, σελ.283).

Η αρχή της ισοδυναμίας παρουσιάζεται όταν η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχεί σε μοντέλο τριών στρωμάτων, όπου το ενδιάμεσο στρώμα εμφανίζει ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεγαλύτερη ή μικρότερη σε σχέση με τα δύο στρώματα που το περικλείουν (σχήμα 2.6).

Στην περίπτωση που το ενδιάμεσο στρώμα έχει την μεγαλύτερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η καμπύλη της φαινόμενης αντίστασης δεν μεταβάλλεται όταν το γινόμενο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ επί το πάχος του ενδιάμεσου στρώματος h είναι σταθερό, ενώ ξεχωριστά οι δύο παράμετροι μεταβάλλονται. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν άπειρα μοντέλα για τα οποία το πάχος και η αντίσταση του ενδιάμεσου στρώματος έχουν διαφορετική τιμή, ενώ το γινόμενο τους, που ονομάζεται Εγκάρσια Αντίσταση T , παραμένει σταθερό. Η Εγκάρσια Αντίσταση T δίνεται από τον τύπο,

$$T = h\rho \quad (2.10)$$

Στην περίπτωση που το ενδιάμεσο στρώμα είναι αγωγίμο, η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεν μεταβάλλεται όταν ο λόγος πάχους του ενδιάμεσου στρώματος προς την ειδική ηλεκτρική αντίσταση R είναι σταθερός, ανεξάρτητα αν οι

επιμέρους παράμετροι μεταβάλλονται. Ο παραπάνω λόγος χαρακτηρίζεται ως Διαμήκης Αγωγιμότητα και είναι,

$$S = h/\rho \quad (2.11)$$

Η αρχή της επικάλυψης αναφέρεται σε μοντέλο τριών στρωμάτων όπου το ενδιάμεσο στρώμα έχει μικρό πάχος και η ειδική αντίσταση αυτού είναι ενδιάμεση των στρωμάτων που το περικλείουν. Το ενδιάμεσο στρώμα επιδρά ελάχιστα στην καμπύλη της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτει, και συνεπώς δεν είναι εύκολη η αναγνώρισή του με τη μέθοδο της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης.

2.1.7 Ηλεκτρική Τομογραφία

2.1.7.1 Θεωρία

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

Επειδή δεν είναι εύκολος ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος από μετρήσεις στην επιφάνεια της γης, υπολογίζεται αρχικά η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

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

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

2.1.7.2 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων

Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Wenner – Schlumberger και η διάταξη διπόλου-διπόλου. Η διάταξη Wenner – Schlumberger είναι ένας συνδυασμός των δύο διατάξεων, όπου η θέση των ηλεκτροδίων δυναμικού και

ρεύματος για την πρώτη μέτρηση είναι σύμφωνη με τη διάταξη Wenner. Εν συνεχεία η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού παραμένει σταθερή από το κέντρο της διάταξης και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, πάντα συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης (τρόπος πραγματοποίησης μετρήσεων με τη διάταξη Schlumberger). Στη διάταξη Wenner η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερή και ίση με a και όλη η διάταξη μετακινείται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση :

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I} \quad (2.12)$$

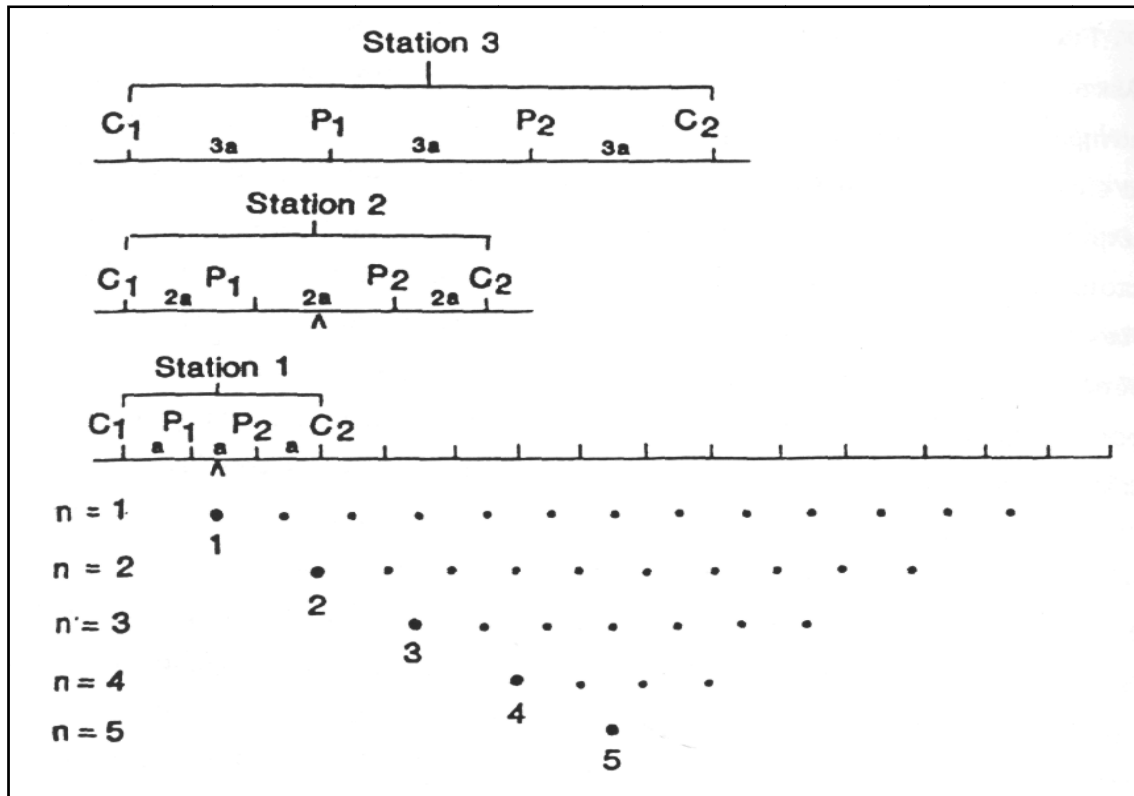
Στη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα βάθη, αυξάνεται σταδιακά η απόσταση σε 2α, 3α κ.ο.κ.

Στη διάταξη Schlumberger η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, συμμετρικά πάντα με το κέντρο της όλης διάταξης. Στη συγκεκριμένη διάταξη η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i} \quad (2.13)$$

Για την επίτευξη διέλευσης ρεύματος σε μεγαλύτερα βάθη αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους. Στην ψευδοτομή (pseudosection) οι φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι σχεδιασμένες σε μία τομή σε σημεία ακριβώς κάτω από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και σε βάθος που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διάταξη.



Σχήμα 2.7: Ψευδοτομή (pseudosection) φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται μια προσεγγιστική εικόνα της κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. 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.

2.1.7.3 Αντιστροφή των δεδομένων

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

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

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

$$d_i = f_i(m_1, m_2, \dots, m_M) + e \quad (2.14)$$

όπου e το σφάλμα των μετρήσεων.

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

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

Προσεγγίζοντας τη συνάρτηση f_i με σειρά Taylor γύρω από το m^0 προκύπτει:

$$f_i(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, \dots, m_M^0 + \delta m_M) \quad (2.15)$$

Το σφάλμα από τη σχέση (2.14) είναι:

$$e_i = d_i - f_i(m) \approx d_i - f_i(m^0) - \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \right\}_{m_j=m_j^0} \cdot \delta m_j \quad (2.16)$$

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:

$$e_i \approx \Delta d - Ax \quad (2.17)$$

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

$$q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad (2.18)$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το q ως προς x και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων επιβάλλεται περιορισμός στον πίνακα x με στόχο να μην αυξάνεται απότομα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Η λύση x προστίθεται στο αρχικό μοντέλο m^0 και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο m^1

$$m^1 = m^0 + x \quad (2.19)$$

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),

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad (2.20)$$

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

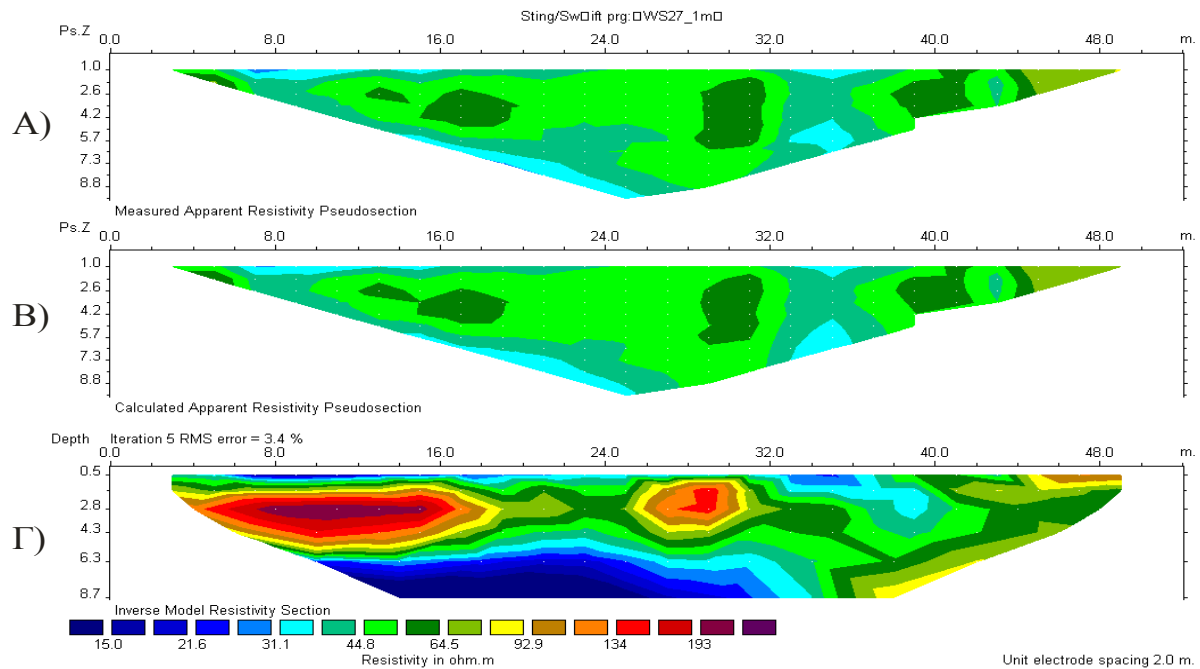
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ****3.1 Εισαγωγή**

Ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ επιτυγχάνεται με την χρήση του λογισμικού πακέτου Res2dinv. Το Res2dinv (έκδοση 3.4) καθορίζει αυτόματα δισδιάστατο (2-D) μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Griffiths and Barker 1993). Αυτό το πρόγραμμα αντιστρέφει δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν με τη χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων.

Χρησιμοποιείται μη γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων για την αντιστροφή των δεδομένων (deGroot-Hedlin and Constable, 1990, Loke and Barker, 1996a) τα οποία συλλέχθηκαν με οποιαδήποτε από τις παρακάτω διατάξεις: Wenner, πόλου-πόλου, διπόλου-διπόλου, πόλου-δίπολου, Schlumberger, Wenner - Schlumberger και τις ορθογώνιες σειρές. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί ψευδοτομές με έως και 650 ηλεκτρόδια και 6500 σημεία δεδομένων.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα, εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο dat. Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές. Η πρώτη τομή είναι η ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η δεύτερη τομή είναι η ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή. Υπάρχει η δυνατότητα να μην ληφθούν υπόψη μετρήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο σφάλμα. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του αριθμού των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής. Ακόμα, στα αποτελέσματα του προγράμματος συγκαταλέγεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS.

Ως παράδειγμα παραθέτεται το σχήμα 3.1 πιο κάτω.



Σχήμα 3.1: Γεωηλεκτρική τομή από το πακέτο Res2dinv A) ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, B) ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων στην Λυγαριά χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μεθόδους αντιστροφής. Η πρώτη είναι η μέθοδος A: κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης (Default, Smoothness-constrained least-squares method), η δεύτερη είναι η μέθοδος B: με την χρήση της νόρμας L1 (Robust) και η τρίτη είναι η μέθοδος Γ: συνδυασμένη αντιστροφή (Use combined inversion method).

Πιο αναλυτικά η μέθοδος A: (de Groot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992), υπαγορεύει ότι η τιμές της ειδικής αντίστασης του μοντέλου αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια παραλλαγή της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων, που βασίζεται στην τεχνική της βελτιστοποίησης του Quasi-Newton (Loke and Barker 1996). Αυτή η τεχνική είναι αρκετά πιο γρήγορη από τη συμβατική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, ειδική για μεγάλο όγκο δεδομένων και απαιτεί λιγότερη υπολογιστική μνήμη.

Η συγκεκριμένη μέθοδος εξασφαλίζει ένα μοντέλο με ομαλή κατανομή της ειδικής αντίστασης. Αυτή η προσέγγιση είναι αποδεκτή μόνο σε περίπτωση που οι πραγματικές τιμές της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο.

Η μέθοδος B: (Claerbout and Mur 1973), χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το υπεδάφους αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς που ναί μεν είναι ομοιογενείς στο εσωτερικό τους, παρουσιάζουν δε απότομες αλλαγές μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος αντιστροφής είναι λιγότερο ευαίσθητη στις μετρήσεις με υψηλό θόρυβο, συνεπώς ικανή να δώσει μικρό σφάλμα ειδικής αντίστασης.

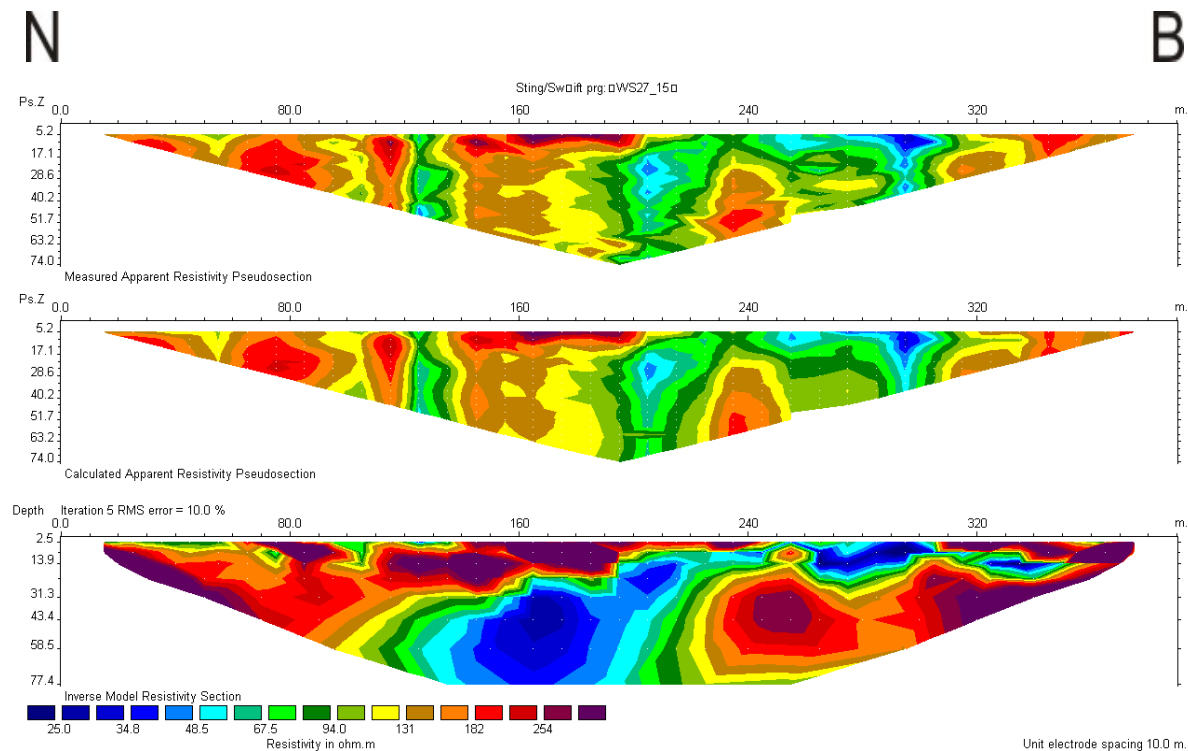
Τέλος στη μέθοδο Γ: Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου λόγω της μεγάλης ποικιλίας των τιμών της ειδικής αντίστασης, οι τιμές ευαισθησίας των δεδομένων είναι σημαντικά διαταραγμένες. Σε περιπτώσεις όπου η διασκόπηση πραγματοποιείται πάνω σε σχηματισμούς με πολύ μικρή τιμή ειδικής αντίστασης, η διαδρομή του ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να διαταράσσεται με τέτοιο τρόπο ώστε το υπέδαφος να μην χαρτογραφείται σωστά. Ως συνέπεια, προτάσσονται πολύ χαμηλές τιμές ευαισθησίας στο μοντέλο αντιστροφής, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη διαταραχή ακριβώς κάτω από τον αγωγίμο σχηματισμό. Συνδυάζοντας την μέθοδο Marquardt (ridge regression method, Inman 1975) και τη μέθοδο αντιστροφής με περιορισμούς εξομάλυνσης, η διαταραχή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Σύμφωνα με τον Loke (Manual Res2div 2002) σε περίπτωση όπου υπάρχουν συμπαγείς σχηματισμοί με οριζόντιες διαστάσεις ελαφρώς μικρότερες από το βάθος αυτή η μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

3.2 Επεξεργασία της γραμμής μελέτης S3

Σχήμα 3.2: Φωτογραφία κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων στη γραμμή μελέτης S3.

3.2.1 Μέθοδος Α)

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης στην γραμμή μελέτης S3, ήταν η κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης. Κάνοντας διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα που οφείλεται στη διαφορά των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τελικά επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα όταν οι επόμενες επαναλήψεις δεν μειώνουν σημαντικά το σφάλμα αυτό. κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης.



Σχήμα 3.2: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Η γεωηλεκτρική τομή S3 μήκους 400 m και διεύθυνσης περίπου N-B αποτελείται από 38 κέντρα με ισαπόσταση 10 m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης ήταν 77 μέτρα. Στην τελική γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης S3 παρατηρούνται τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 100Ωm μέχρι 254 Ωm και πάνω. Στο μέσο της τομής οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κυμαίνονται κάτω από 40 Ωm. Μετά από τη ζώνη χαμηλών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, παρατηρείται άλλη μια ζώνη υψηλών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Το λογισμικό πακέτο Res2Dinv παρέχει την δυνατότητα αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Αυτό γίνεται ελέγχοντας την ευαισθησία, την αβεβαιότητα καθώς και τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουν υπολογιστεί.

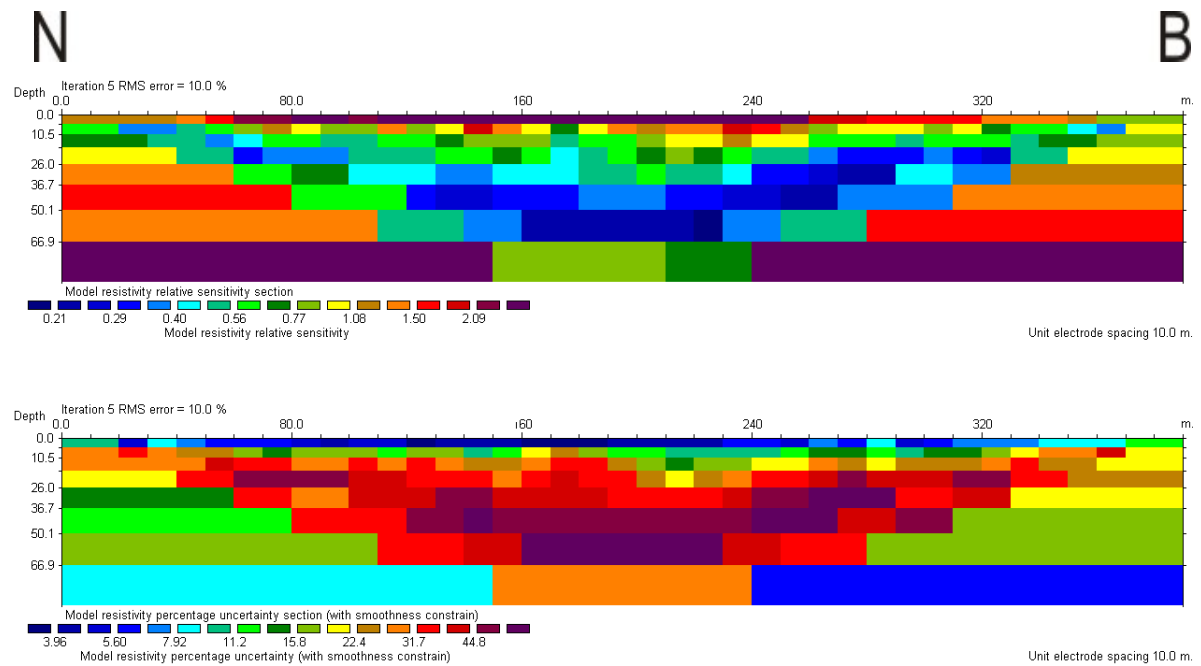
Πιο αναλυτικά, η τιμή της ευαισθησίας είναι ένα μέτρο της αξιοπιστίας για την ειδική αντίσταση στην γεωηλεκτρική τομή. Όσο υψηλότερη η τιμή της ευαισθησίας, τόσο πιο αξιόπιστη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης. Γενικά, κοντά στην επιφάνεια της γης

εμφανίζεται συνήθως υψηλή τιμή ευαισθησίας επειδή βρίσκονται κοντά στα ηλεκτρόδια. Επίσης η ευαισθησία είναι υψηλή στα πλάγια και στα κάτω όρια της τομής.

Η αβεβαιότητα της ειδικής αντίστασης εκφράζεται με ποσοστό επί της 100 (%) της τιμής της. Αν η αβεβαιότητα για έναν παραλληλόγραμμο με την ειδική αντίσταση ρ είναι 100%, αυτό σημαίνει ότι η ειδική αντίσταση μπορεί να κυμανθεί από 0.5ρ (δηλ. όχι 0.0ρ) έως 2ρ δεδομένου ότι η υπορουτίνα αντιστροφής εξετάζει πραγματικά το λογάριθμο της ειδικής αντίστασης. Η τιμή της αβεβαιότητας εξαρτάται από το επίπεδο θορύβου στα στοιχεία, το βάθος και το μέγεθος του, τη διανομή των σημείων, την σειρά που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και από την μέση ειδική αντίσταση. Οι περιοχές υψηλής ειδικής αντίστασης τείνουν να έχουν τις υψηλότερες τιμές αβεβαιότητας. Μια αλλαγή στην ειδική αντίσταση, π.χ. από 10000 Ωm σε 20000 Ωm , δεν αλλάζει τις μετρημένες προφανείς τιμές ειδικής αντίστασης πάρα πολύ. (Manual Res2div 2002).

Ελέγχοντας τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουν υπολογιστεί παρουσιάζονται δύο μοντέλα με τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές αυτής που υπολογίζονται από την αβεβαιότητα στις τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασης που έχουν υπολογιστεί. Οι τιμές που είναι κοινές και για τα δύο τμήματα είναι πολύ πιθανό να είναι πραγματικές. (Manual Res2div 2002).

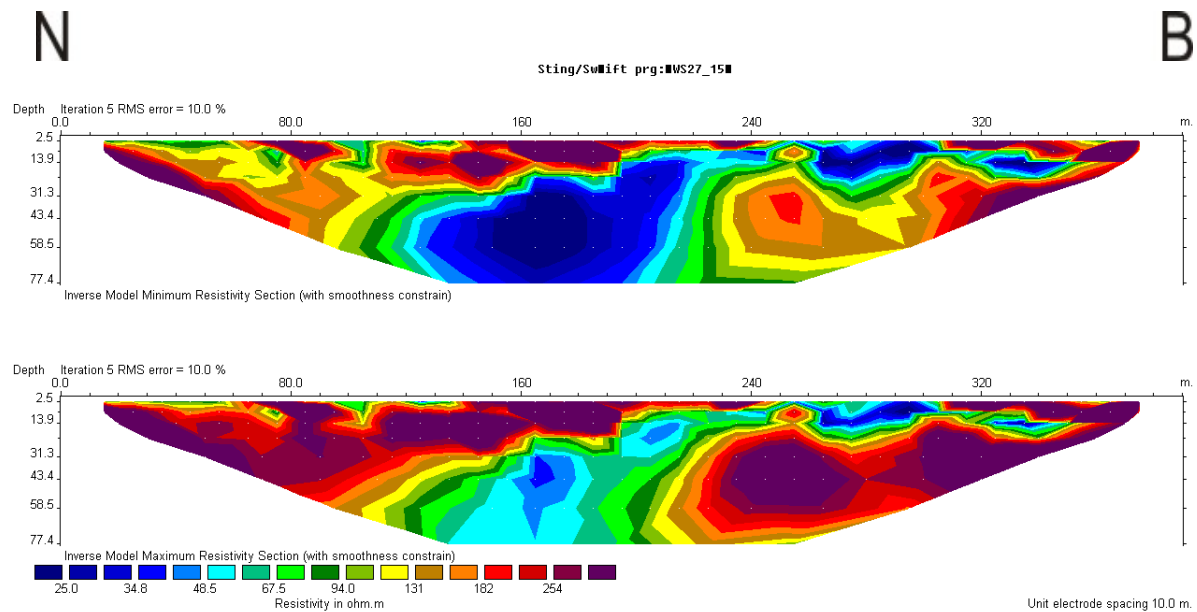
Χρησιμοποιώντας την δυνατότητα που μας παρέχει το λογισμικό πακέτου Res2Dinv για έλεγχο της ευαισθησίας και της αβεβαιότητας προκύπτουν τα ακόλουθα μοντέλα.



Σχήμα 3.3: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.3 για τα πρώτα πέντε μέτρα βάθους σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης παρατηρούνται υψηλές τιμές ευαισθησίας, ενώ καθώς αυξάνεται το βάθος οι τιμές αυτές μειώνονται. Το αντίθετο ακριβώς παρατηρείται για τις τιμές της αβεβαιότητας, όπου είναι μικρές κοντά στην επιφάνεια της Γης, στην συνέχεια και καθώς το βάθος αυξάνει παρατηρείται αύξηση των τιμών της.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουν υπολογιστεί απεικονίζονται στο ακόλουθο μοντέλο με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου Res2Dinv.



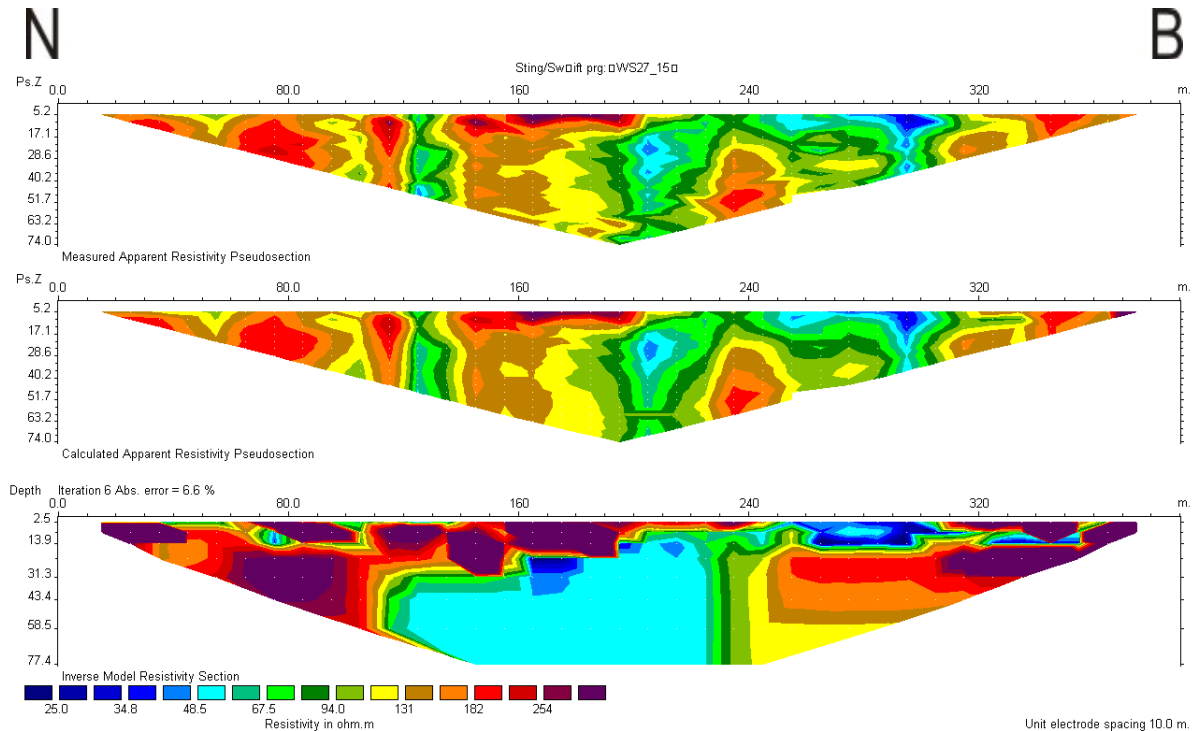
Σχήμα 3.4: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.4 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 25Ωm μέχρι και 254 Ωm, ενώ στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 34.8 Ωm μέχρι και πάνω από 254 Ωm.

3.2.2 Μέθοδος B)

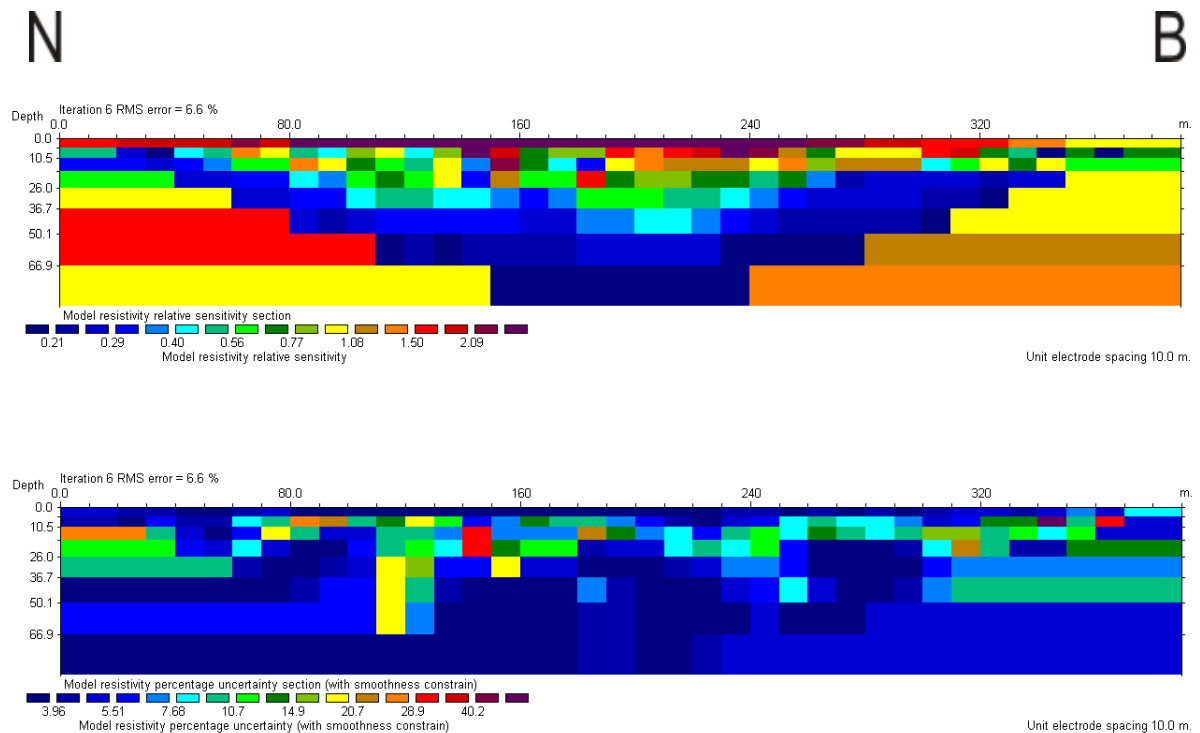
Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσουμε τις ηλεκτρικές ιδιότητες στην γραμμής μελέτης S3, ήταν με την χρήση της νόρμας L1.

Με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα και επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα.



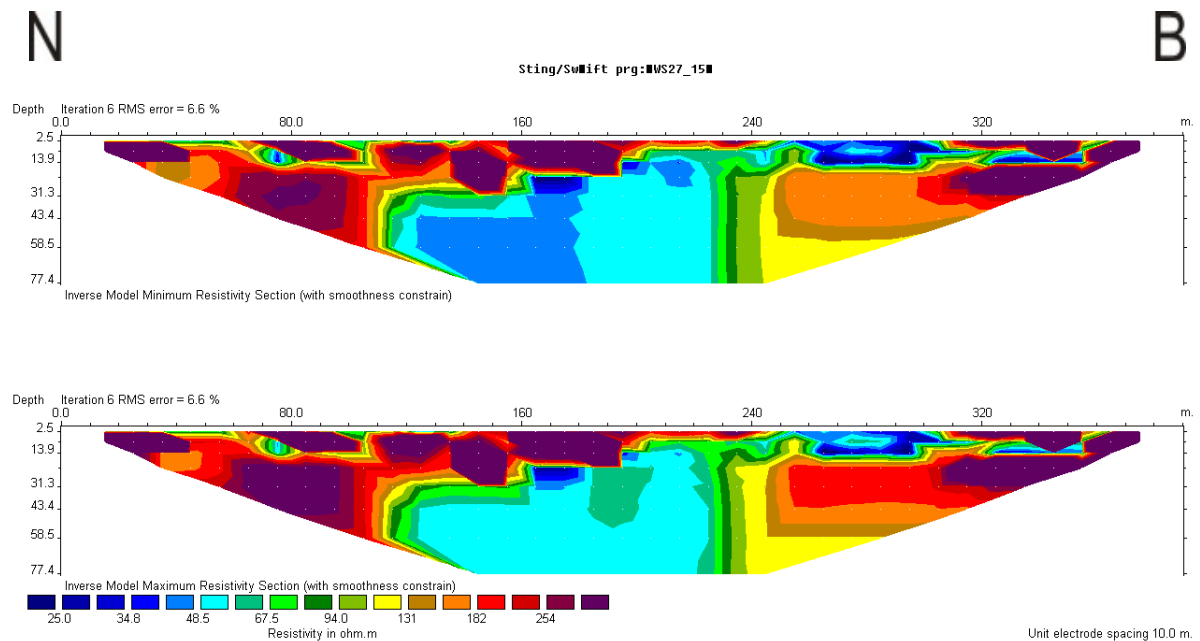
Σχήμα 3.5: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Όπως στην προηγούμενη μέθοδος εμφανίζονται δυο ζώνες με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενώ στο μέσο της τομής οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι κάτω των 40 Ωm.



Σχήμα 3.6: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Για μικρά βάθη κοντά στην επιφάνεια της Γης και σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης S3 οι τιμές της ευαισθησίας είναι μεγάλες και σε αυτή την μέθοδο και ενώ αυξάνει το βάθος μειώνονται. Οι τιμές της αβεβαιότητας είναι μικρές και καθώς το βάθος αυξάνει οι τιμές της αβεβαιότητας αυξάνονται ελάχιστα, ενώ όταν το βάθος γίνεται της τάξεως των 35m έως και 70m ξανά μειώνονται και φτάνουν τις ελάχιστες τιμές της κλίμακας.



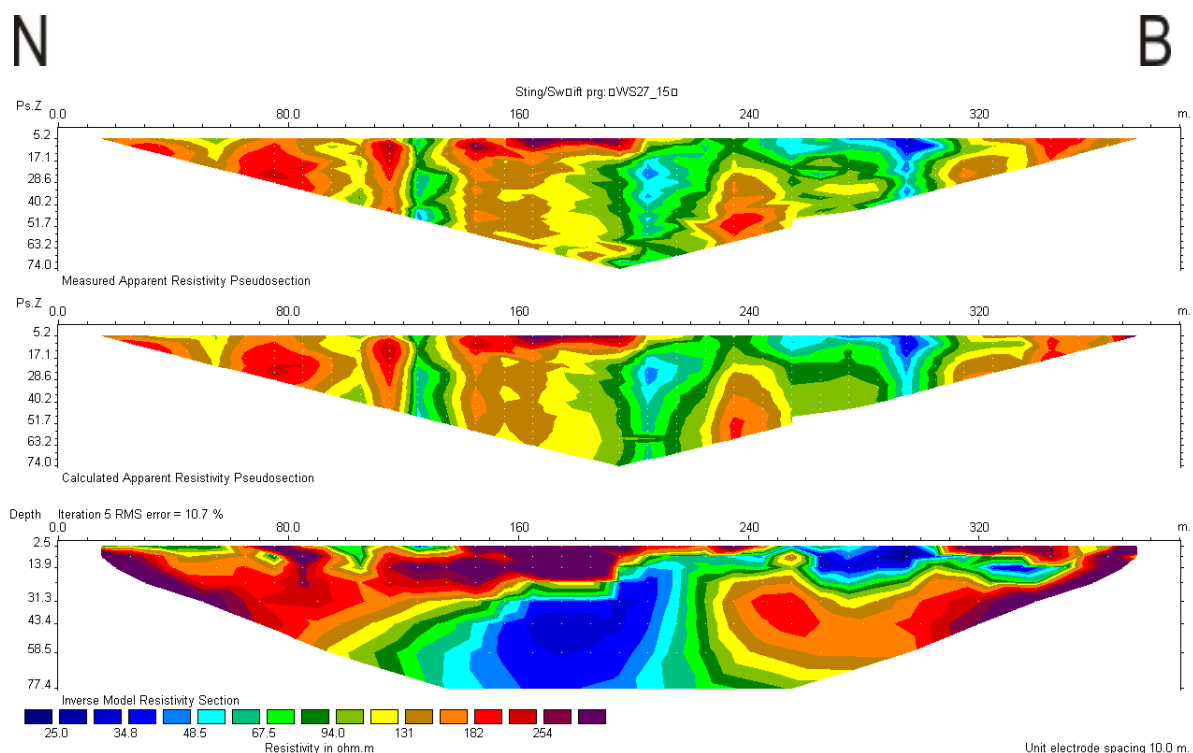
Σχήμα 3.7: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.7 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 34.8Ωm μέχρι και 254 Ωm, ενώ στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 48.5 Ωm έως 254 Ωm. Παρατηρείται σε σχέση με την Μέθοδο Α) ότι το μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και το μοντέλο με τις μέγιστες τιμές αυτής δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, σε αντίθεση με την Μέθοδο Α) όπου οι διαφορές αυτές ήταν πιο εμφανείς.

3.2.3 Μέθοδος Γ)

Για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης στην γραμμής μελέτης S3 χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της συνδυασμένης αντιστροφής.

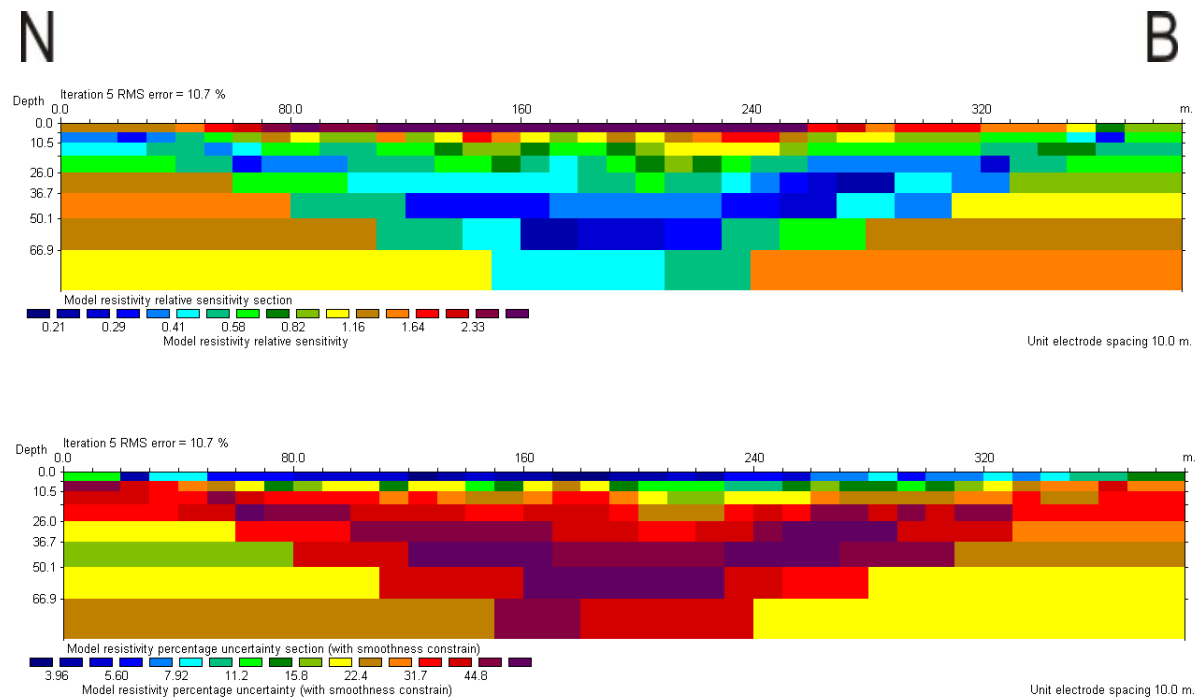
Δουλεύοντας όπως και προηγουμένως με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα που οφείλεται στη διαφορά των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τελικά επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα όταν οι επόμενες επαναλήψεις δεν μειώνουν σημαντικά το σφάλμα αυτό.



Σχήμα 3.8: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Παρατηρούνται δυο ζώνες με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενώ στο μέσο της τομής οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι κάτω των 40 Ωm.

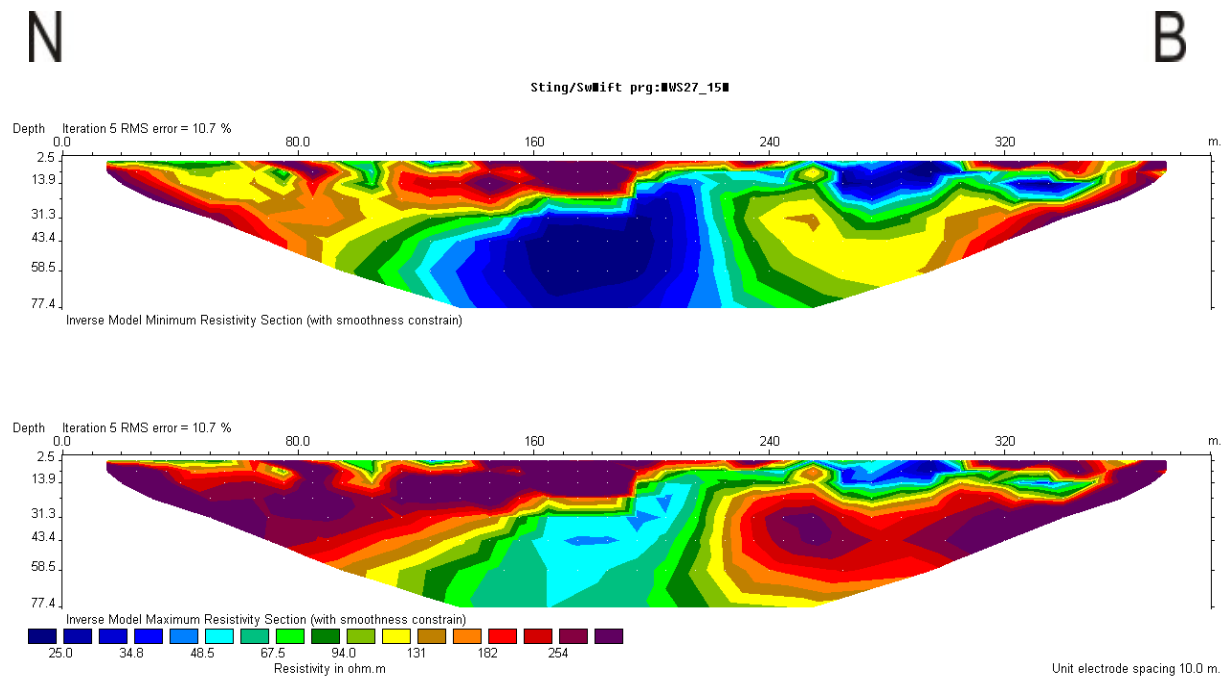
Με το λογισμικό πακέτο Res2Dinv γίνεται έλεγχος της ευαισθησίας της αβεβαιότητα καθώς και των ελάχιστων και των μέγιστων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 3.9: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Για μικρά βάθη και σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης παρατηρούνται υψηλές τιμές ευαισθησίας, ενώ καθώς αυξάνεται το βάθος οι τιμές αυτές μειώνονται. Σε βάθη της τάξεως των 35m έως και 65m οι τιμές της ευαισθησίας γίνονται ελάχιστες.

Για τα πρώτα πέντε μέτρα βάθους και σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης οι τιμές της αβεβαιότητας είναι μικρές. Στην συνέχεια και καθώς το βάθος αυξάνει παρατηρείται αύξηση των τιμών της αβεβαιότητας, οι οποίες λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους σε βάθη από 35m έως και 65m.



Σχήμα 3.10: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

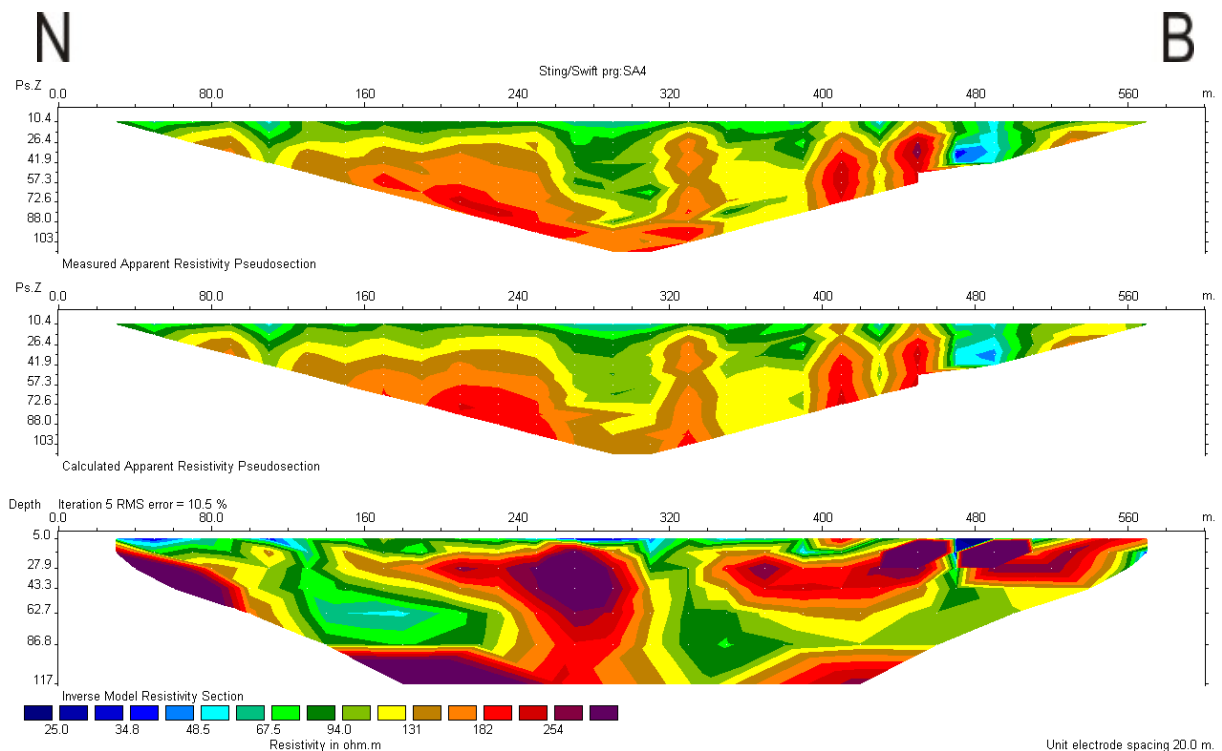
Στο Σχήμα 3.10 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 25Ωm μέχρι και 254 Ωm, ενώ στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 48.5 Ωm έως 254 Ωm. Παρατηρείται σε σχέση με την Μέθοδο Α) ότι τα μοντέλα με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι παρόμοια, ενώ σε σχέση με την Μέθοδο β) υπάρχουν διαφορές, σε ότι αφορά το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που καλύπτουν.

3.3 Επεξεργασία της γραμμής μελέτης S4



Σχήμα 3.11: Φωτογραφία κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων στη γραμμή μελέτης S4.

3.3.1 Μέθοδος A)



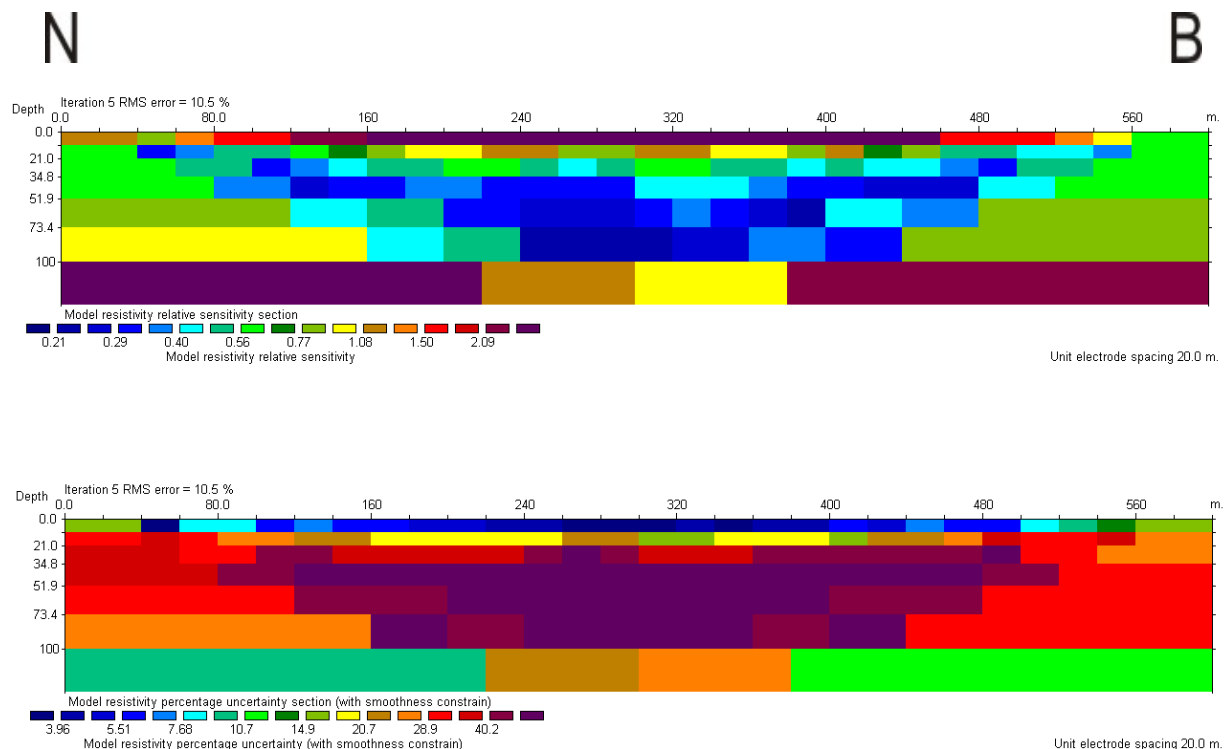
Σχήμα 3.12: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Η γεωηλεκτρική τομή S4 μήκους 600m και διεύθυνσης περίπου N-B αποτελείται από 28 κέντρα με ισαπόσταση 20m, τα οποία τοποθετήθηκαν κατά μήκος του δρόμου και το μέγιστο βάθος διασκόπησης ήταν 117m.

Παρατηρείται μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπου ζώνες μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διακόπτουν αντίστοιχες με αυξημένη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, υποδεικνύοντας αλληπάλληλες επωθήσεις.

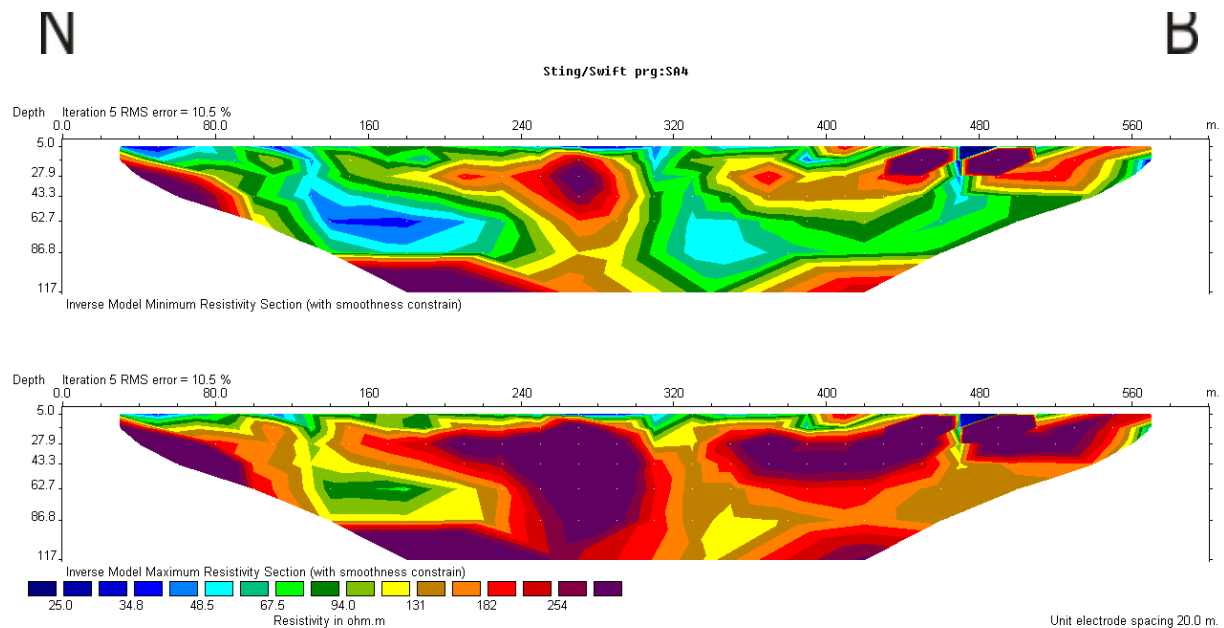
Στα πρώτα 160m παρατηρείται ζώνη μειωμένων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στα επόμενα 140m έχουμε την εμφάνιση υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Έπειτα εμφανίζεται ζώνη χαμηλότερων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, για τα επόμενα 100m μήκος μέχρι βάθος 50 μέτρων περίπου. Τέλος για τα υπόλοιπα 200m έως το τέλος της γεωηλεκτρικής τομής S4 παρατηρούνται σχετικά υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (130 – 250 Ω m).

Με το λογισμικό πακέτο Res2Dinv όπως έγινε και στη γραμμή μελέτης S3 πραγματοποιείται έλεγχος των τιμών της ευαισθησία, των τιμών της αβεβαιότητα καθώς και των ελάχιστων και των μέγιστων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουμε υπολογιστεί.



Σχήμα 3.13: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.13 για τα πρώτα δέκα μέτρα βάθους σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης παρατηρούνται υψηλές τιμές ευαισθησίας, ενώ καθώς αυξάνει το βάθος οι τιμές αυτές μειώνονται. Το αντίθετο ακριβώς παρατηρείται για τις τιμές της αβεβαιότητας, όπου είναι μικρές κοντά στην επιφάνεια της Γης, στα πρώτα δέκα μέτρα βάθους, στην συνέχεια και καθώς το βάθος αυξάνει παρατηρείται αύξηση των τιμών της.

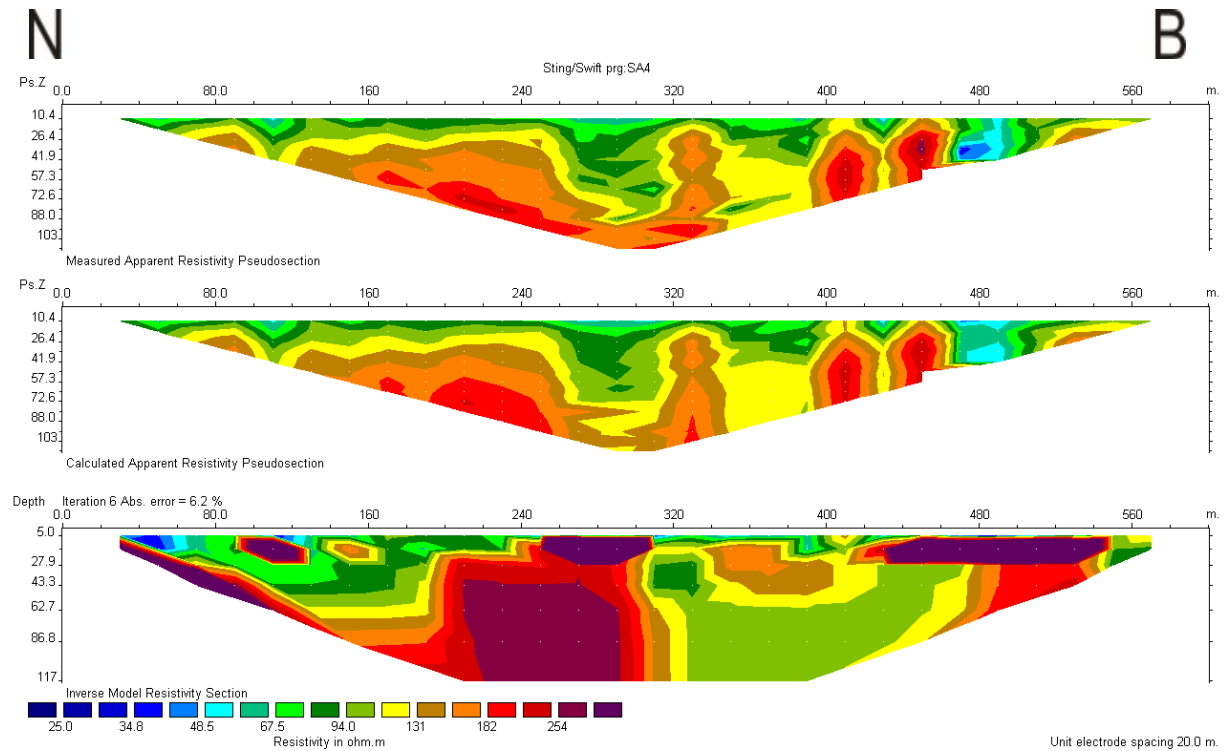


Σχήμα 3.14: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.14 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 48.5Ωm μέχρι και 254 Ωm, ενώ στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 67.5 Ωm μέχρι και πάνω από 254 Ωm.

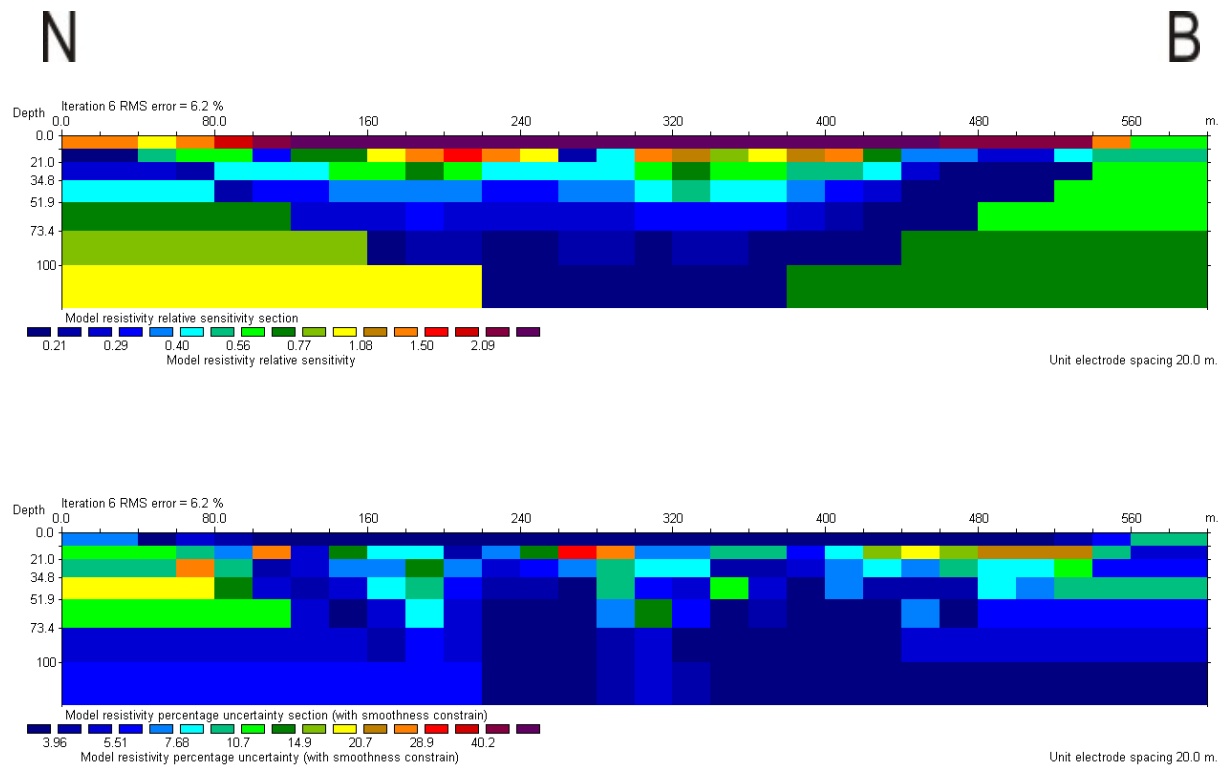
3.3.2 Μέθοδος Β)

Δουλεύοντας όπως και στις προηγούμενες μεθόδους με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα και επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα.



Σχήμα 3.15: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

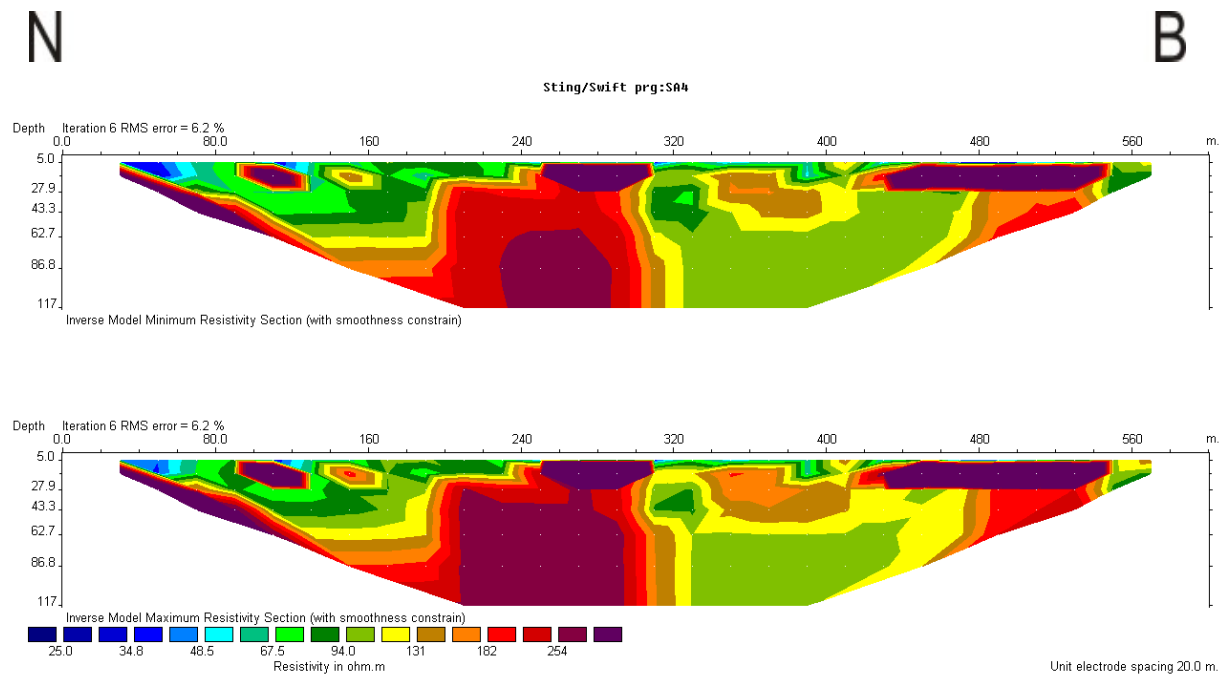
Όπως στη Μέθοδο Α) παρατηρούνται ζώνες μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης να διακόπτουν αντίστοιχες με αυξημένη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 3.16: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.16 για τα πρώτα μέτρα βάθους οι τιμές της ευαισθησίας είναι υψηλές σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης ενώ καθώς το βάθος αυξάνεται, αυτές πέφτουν σταδιακά. Παρατηρείται ότι η αβεβαιότητα έχει πολύ μικρές τιμές σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης S4. Κοντά στην επιφάνεια η αβεβαιότητα έχει τις ελάχιστες τιμές της, σε βάθη της τάξεως των 20m μέχρι και 50m οι τιμές αυτές αυξάνονται ενώ σε μεγαλύτερα βάθη ξανά αποκτά ελάχιστες τιμές.

Τέλος τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουμε υπολογίσει τις βλέπουμε στο ακόλουθο μοντέλο:



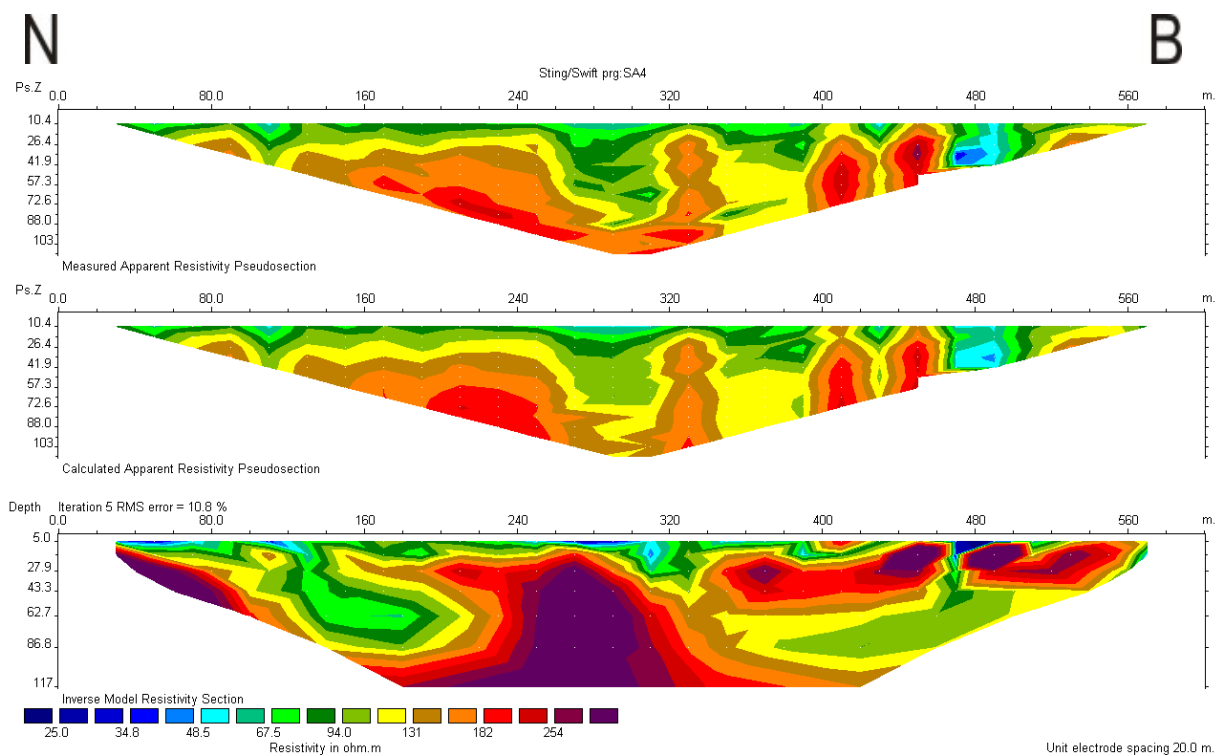
Σχήμα 3.17: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.17 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 34.8Ωm μέχρι και 254 Ωm. Το αντίστοιχο παρατηρείται και στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σε αντίθεση με την Μέθοδο Α) όπου οι διαφορές αυτές ήταν πιο εμφανείς.

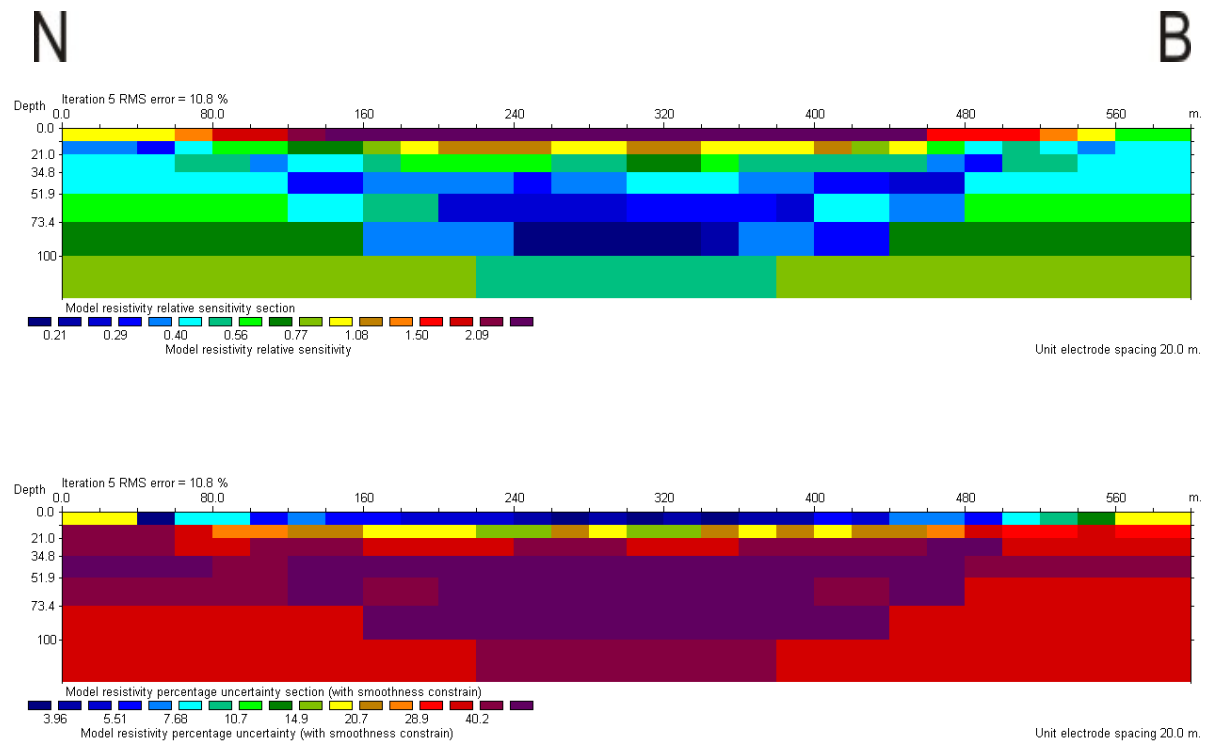
3.3.3 Μέθοδος Γ)

Για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης στην γραμμή μελέτης S4, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της συνδυασμένης αντιστροφής.

Δουλεύοντας όπως και προηγουμένως με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα που οφείλεται στη διαφορά των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τελικά επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα όταν οι επόμενες επαναλήψεις δεν μειώνουν σημαντικά το σφάλμα αυτό.



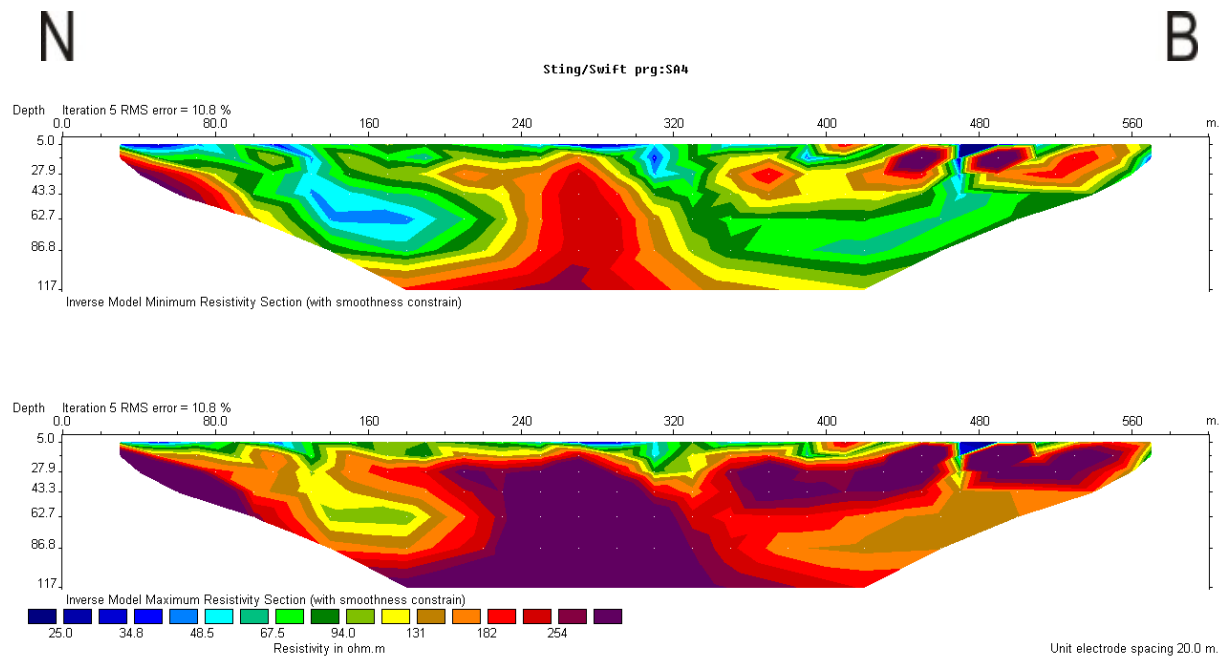
Σχήμα 3.18: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



Σχήμα 3.19: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Για τα πρώτα δέκα μέτρα βάθους και σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης η ευαισθησία είναι αρκετά μεγάλη και οι τιμές της αβεβαιότητας μικρές. Στην συνέχεια και καθώς το βάθος αυξάνει οι τιμές της ευαισθησίας μειώνονται ενώ αυξάνονται υπερβολικά οι τιμές της αβεβαιότητας.

Το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων, της γραμμής μελέτης S4 σε σύγκριση με την αβεβαιότητα δεν έχει μεγάλη ευκρίνειας αλλά χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε να έχουμε μια κοινή κλίμακα στα μοντέλα έλεγχου της αβεβαιότητας.



Σχήμα 3.20: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.20 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 48.5 Ωm μέχρι και 254 Ωm, ενώ στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 94 Ωm έως 254 Ωm.

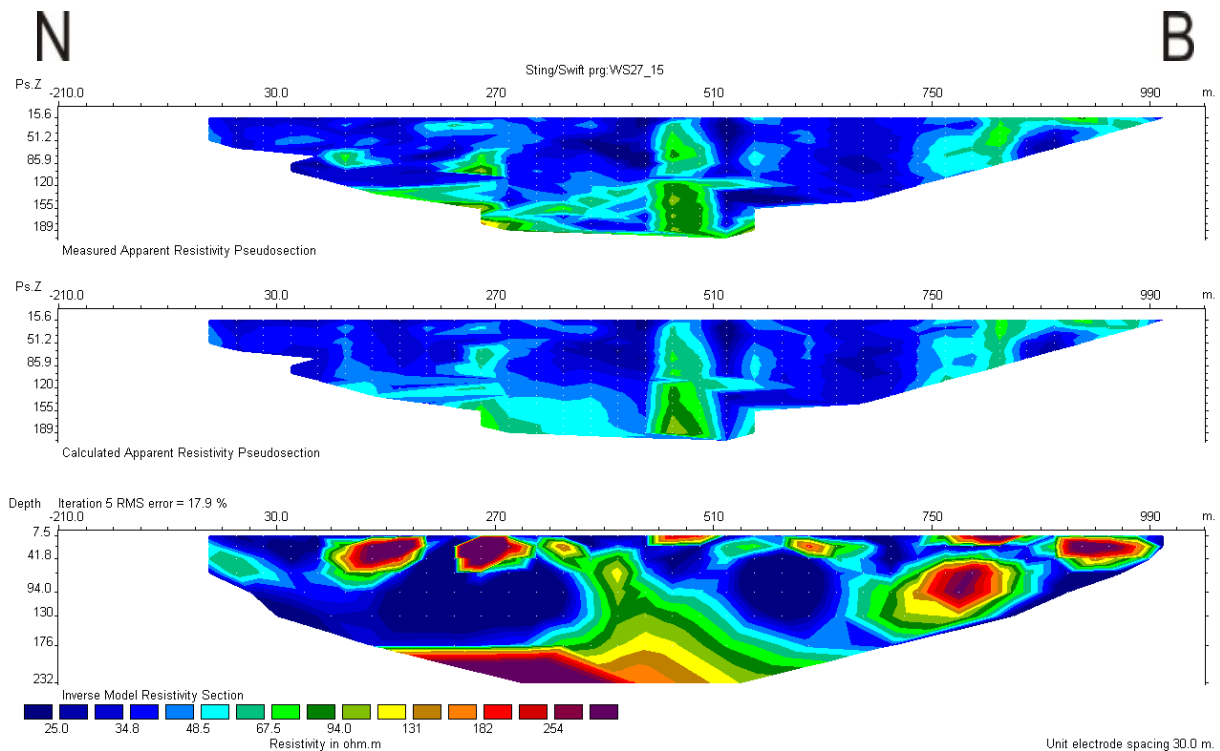
3.4 Επεξεργασία της γραμμής μελέτης S5



Σχήμα 3.21: Φωτογραφία κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων στη γραμμή μελέτης S5.

3.4.1 Μέθοδος Α)

Με την ίδια διαδικασία με την οποία έγινε η επεξεργασία για τις μετρήσεις των γραμμών μελέτης S3 και S4 πραγματοποιούνται διαδοχικές επαναλήψεις ώστε να μειώνεται συνεχώς το σφάλμα και επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα.

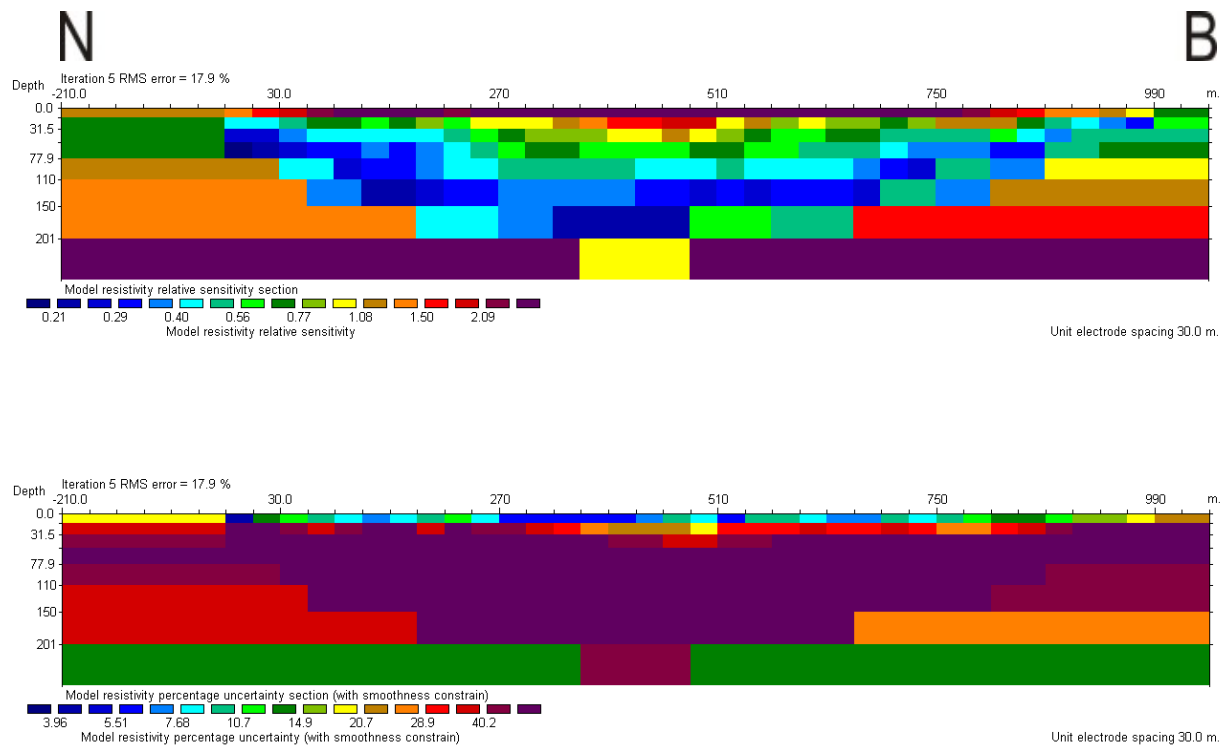


Σχήμα 3.22: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Η γεωηλεκτρική τομή S5 μήκους 1050 m και διεύθυνσης N-B αποτελείται από 34 κέντρα με ισαπόσταση 30 m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης ήταν 232m.

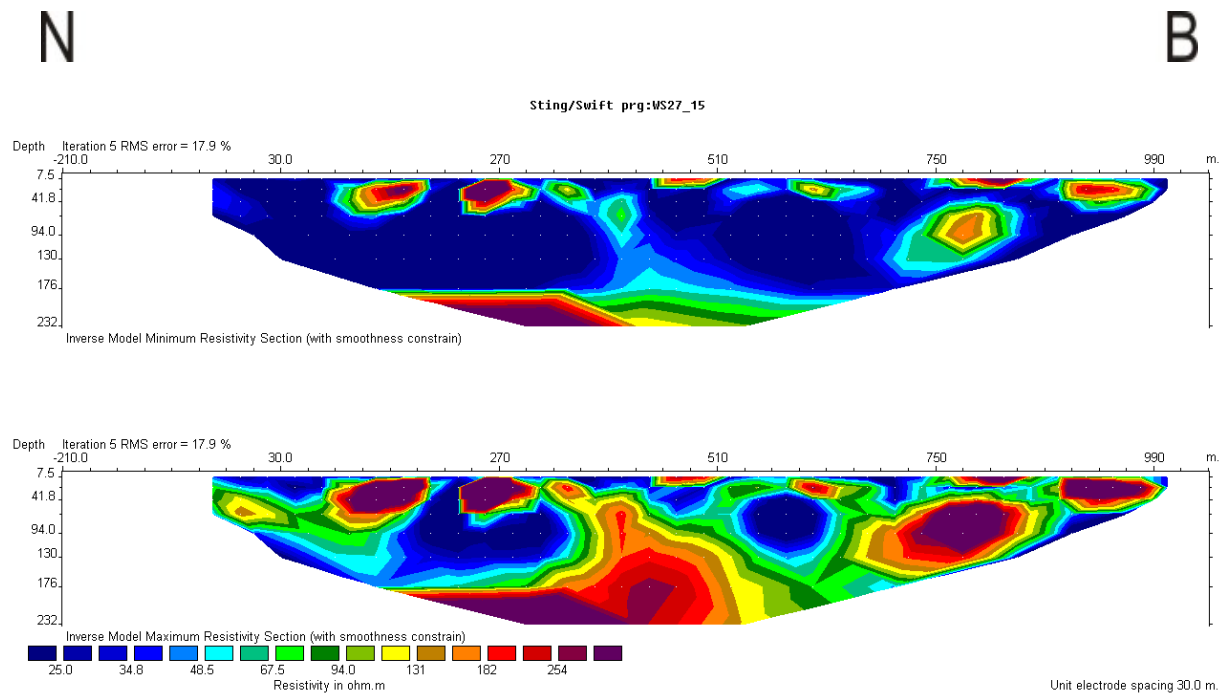
Παρατηρείται ζώνες αυξημένης τιμής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπου βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια καθώς και κάποιες που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη, να εναλλάσσονται με αντίστοιχες με μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ζώνη με τις ενδιάμεσες τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (90-250 Ωm) στο μέσο περίπου της τομής και σε βάθος μεγαλύτερο των 20 m, που φαίνεται να διακόπτει τις ζώνες χαμηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.



Σχήμα 3.23: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.23, στο μοντέλο που πραγματοποιείται έλεγχος της ευαισθησίας για τα πρώτα 10m βάθους. Σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης οι τιμές που παρατηρούνται είναι υψηλές ενώ σταδιακά όσο αυξάνεται το βάθος αυτές μειώνονται.



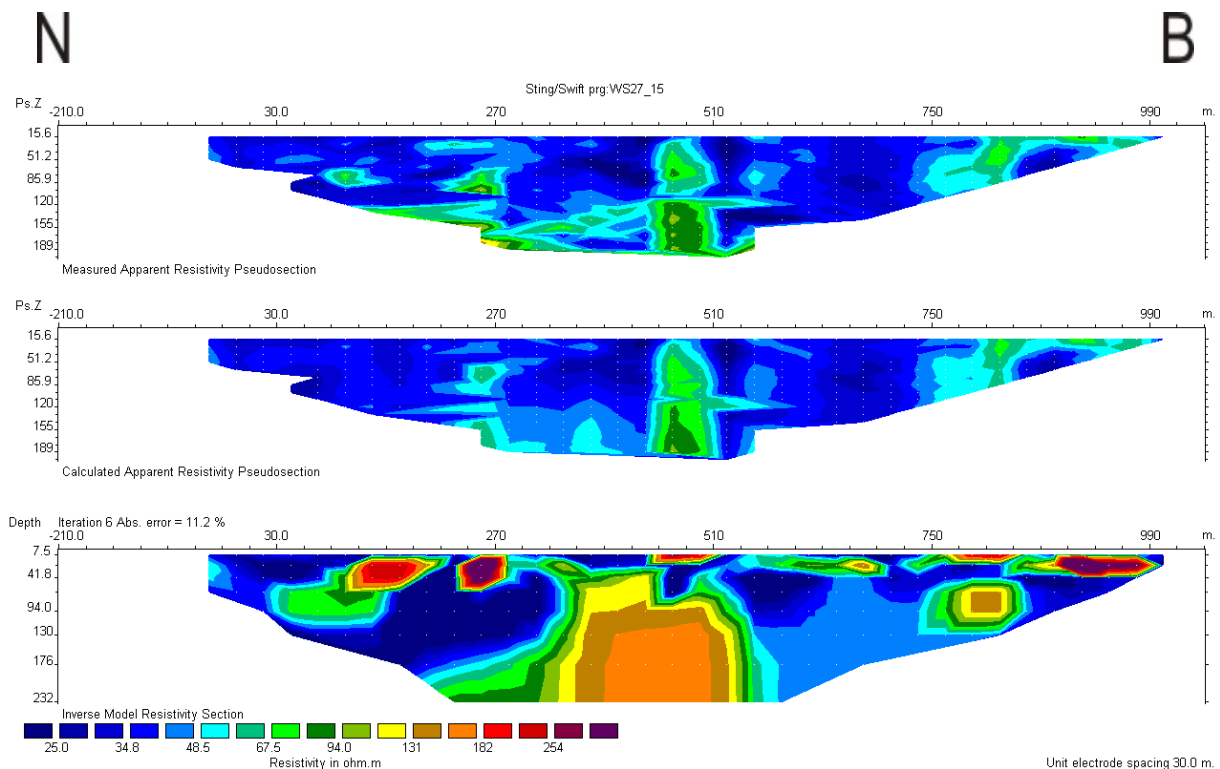
Σχήμα 3.24: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 25Ωm όπου στο μεγαλύτερο μέρος του μοντέλου επικρατούν αυτές οι τιμές μέχρι και 254 Ωm όπου απαντώνται ελάχιστα, ενώ στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 34.8 Ωm μέχρι και πάνω από 254 Ωm.

3.4.2 Μέθοδος B)

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην γραμμή μελέτης S5, ήταν με την χρήση της νόρμας L1.

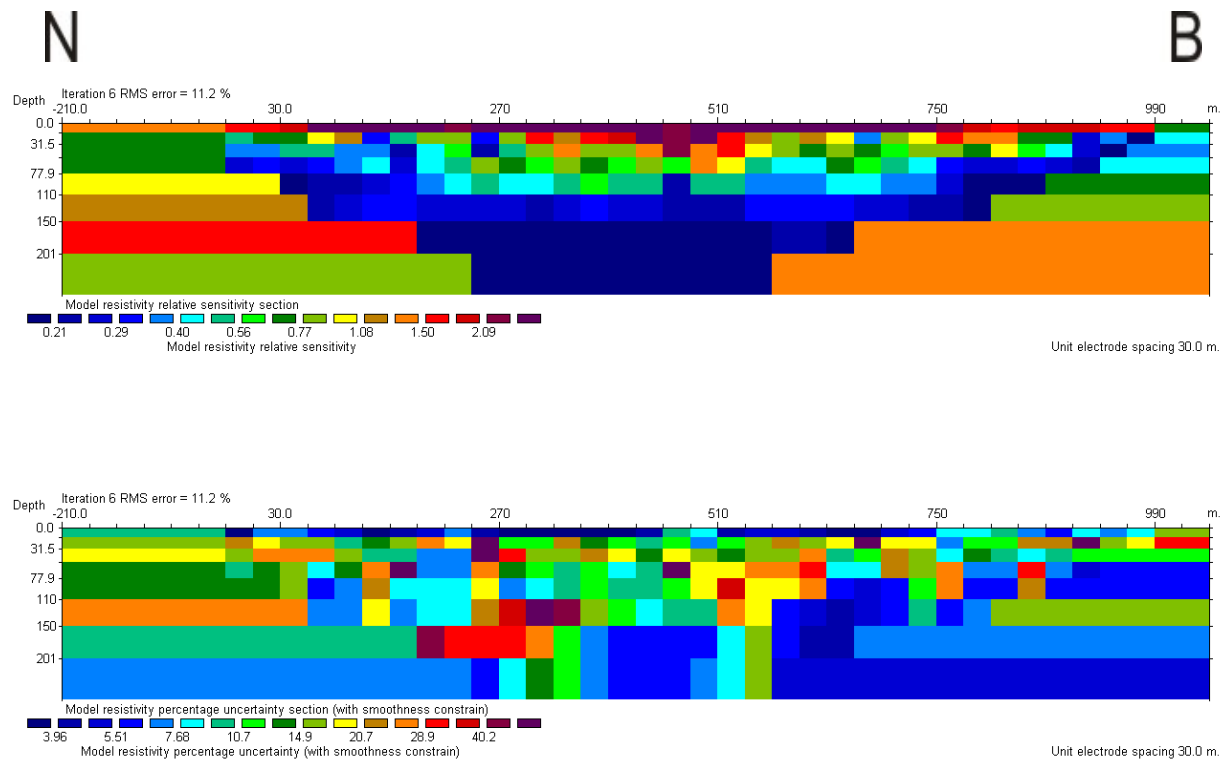
Με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα και επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα.



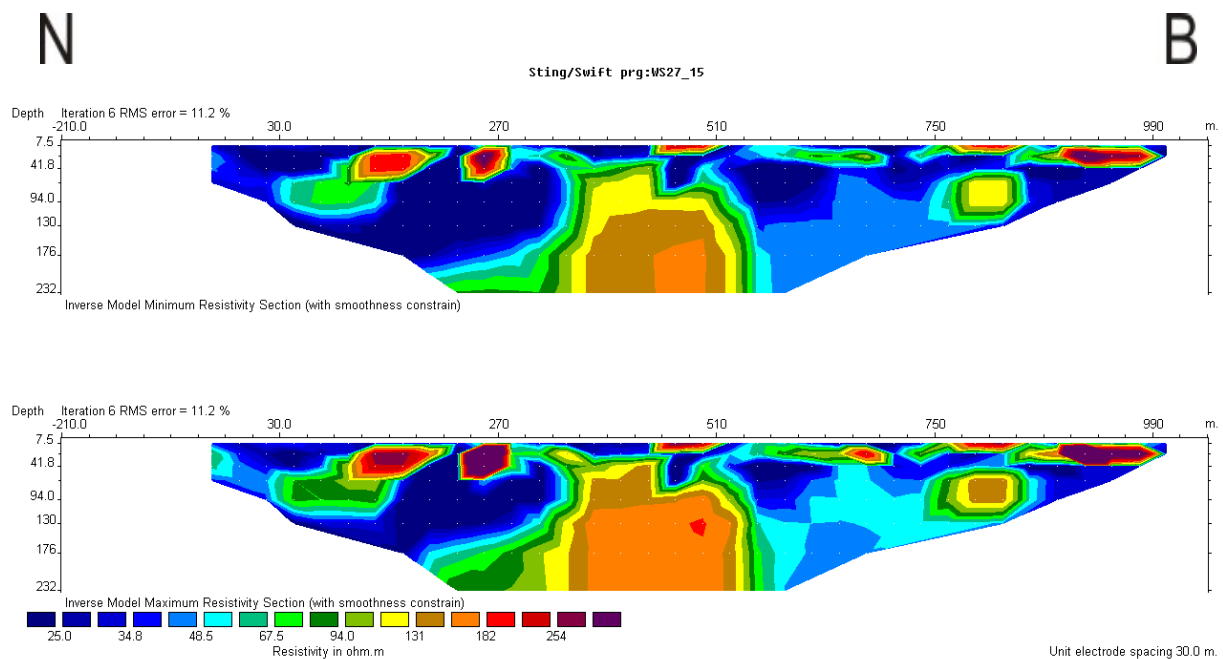
Σχήμα 3.25: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Κύριο χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη ζωνών αυξημένης τιμής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εναλλάσσονται με αντίστοιχες με μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Με το λογισμικό πακέτο Res2Dinv γίνεται έλεγχος της ευαισθησία της αβεβαιότητα καθώς και των ελάχιστων και των μέγιστων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 3.26: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



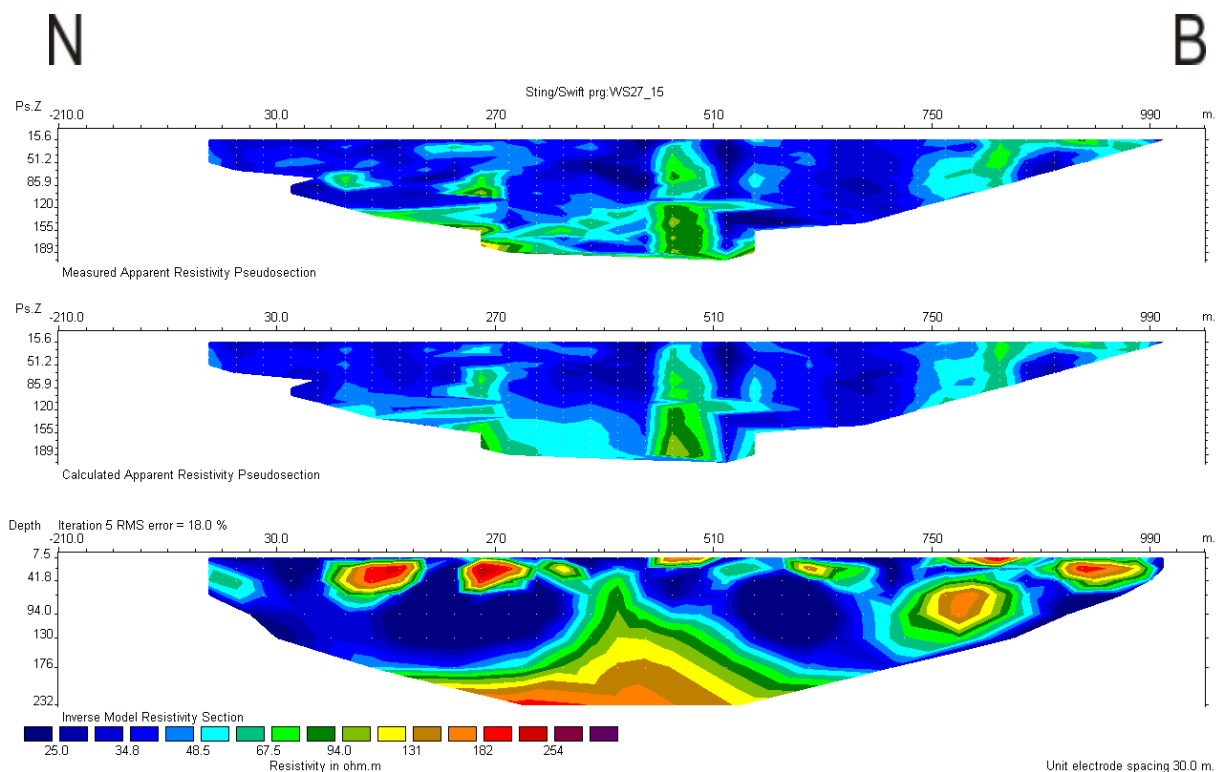
Σχήμα 3.27: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του

σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.27 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 25Ωm μέχρι και 254 Ωm. Το αντίστοιχο παρατηρείται και στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σε αντίθεση με την Μέθοδο Α) όπου οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στα μοντέλα με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές αυτής διαφορές είναι εμφανείς.

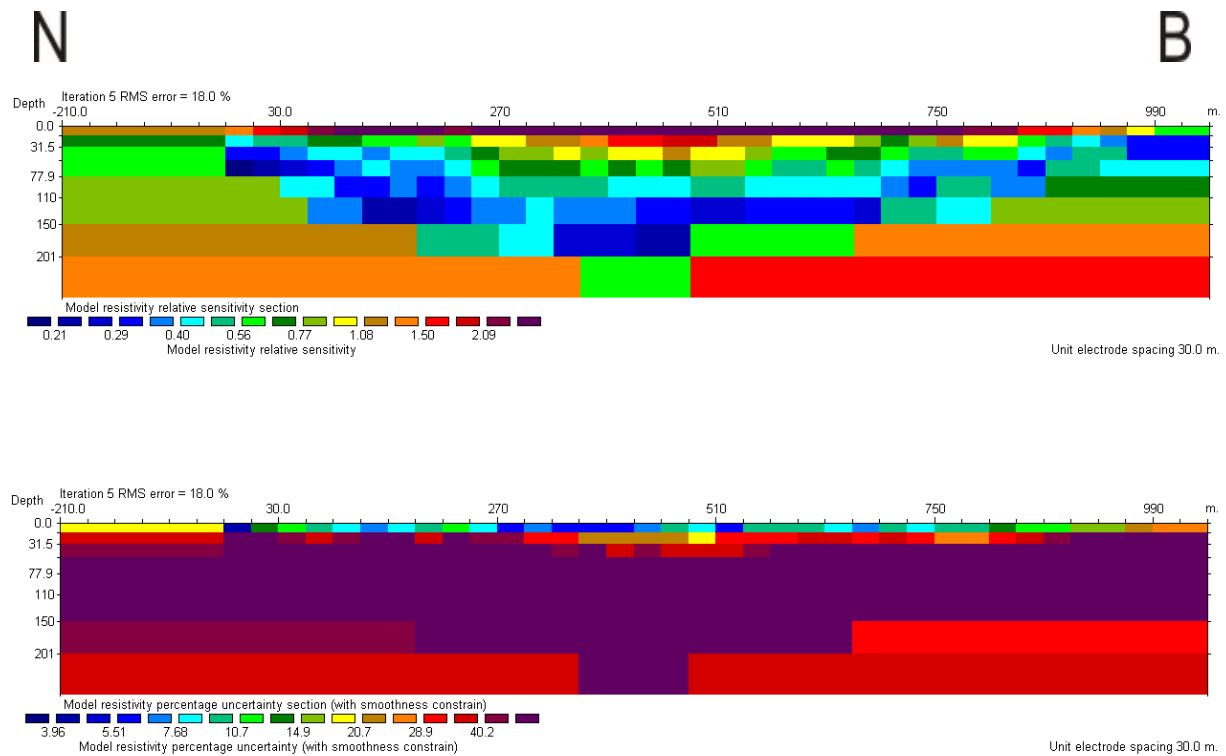
3.4.3 Μέθοδος Γ)

Για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων στην γραμμή μελέτης S5, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της συνδυασμένης αντιστροφής.

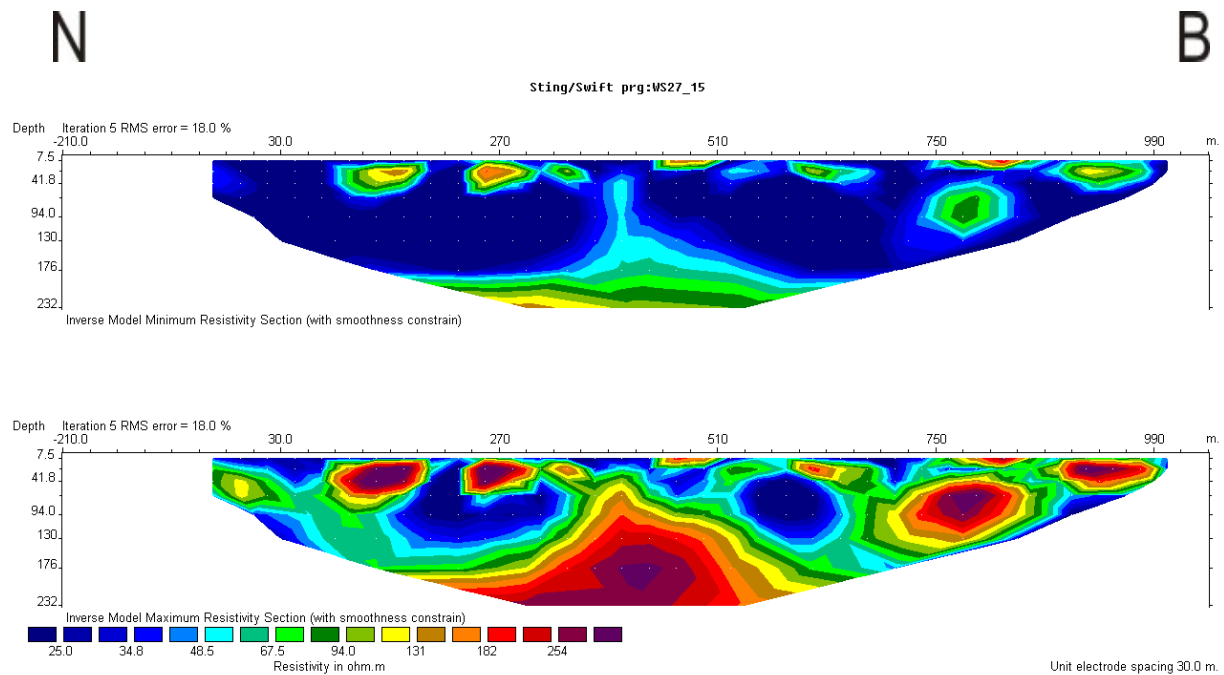


Σχήμα 3.28: Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Όπως και στις άλλες δυο μεθόδους παρατηρείται ζώνες αυξημένης τιμής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπου βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια καθώς και κάποιες που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη, να εναλλάσσονται με αντίστοιχες με μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 3.29: Ευαισθησία (πάνω) και αβεβαιότητα (κάτω) για το τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



Σχήμα 3.30: Τελικό μοντέλο με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γραμμής μελέτης S5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στο Σχήμα 3.30 στο μοντέλο με τις ελάχιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι τιμές κυμαίνονται από 25 Ωm μέχρι και 94 Ωm , ενώ στο μοντέλο με τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 25 Ωm έως 254 Ωm . Παρατηρείτε και εδώ σε σχέση με την Μέθοδο Α) ότι τα μοντέλα με τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι παρόμοια, ενώ σε σχέση με την Μέθοδο β) έχουν διαφορές μεταξύ τους, σε ότι αφορά το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

3.5 Σύγκριση των μεθόδων αντιστροφής

Από τη σύγκριση των γεωηλεκτρικών τομών παρατηρείται ότι οι μέθοδοι Α) και Γ) παρουσιάζουν αρκετά κοινά στοιχεία. Αυτό φαίνεται τόσο στη γεωηλεκτρική τομή όσο και στα μοντέλα της ευαισθησίας της αβεβαιότητας και των ελάχιστων και των μέγιστων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Στην μέθοδο Β) η γεωηλεκτρική τομή χαρακτηρίζεται από αρκετά μικρότερο σφάλμα. Σχεδόν όλες οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι λίγο πιο υψηλές από ότι είναι στις γεωηλεκτρικές τομές από τις άλλες δυο μεθόδους. Τέλος, αρκετές διαφορές εμφανίζονται στην εικόνα της αβεβαιότητας σε σχέση με τις άλλες δυο, αφού οι τιμές της αβεβαιότητας κυμαίνονται σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Τα παραπάνω παρατηρούνται και στις τρεις γραμμές μελέτης S3, S4 και S5.

Επιπροσθέτως οι γεωηλεκτρικές τομές της γραμμής μελέτης S4 κάνοντας χρήση τόσο της Α)μεθόδου όσο και της Γ)μεθόδου έχουν μόνη διαφορά στην θέση χάραξης 546 όπου διαπιστώνεται η εμφάνιση πολύ πιο υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και σε μεγαλύτερο βάθος.

Στη γραμμή μελέτης S5 κύριο χαρακτηριστικό των γεωηλεκτρικών τόμων, είναι η ύπαρξη ζωνών αυξημένης τιμής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, στις ίδιες θέσεις χάραξης και για τις δυο μεθόδους, οι οποίες εναλλάσσονται με αντίστοιχες με μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στη γεωηλεκτρική τομή από την μέθοδο Β), παρατηρείται ότι μεγαλώνει η ζώνη με τις ενδιάμεσες τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (90-250 Ωm) στο μέσο περίπου της τομής και εμφανίζονται μικρότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

3.6 Βαθμονόμηση

Σε συγκεκριμένη επιφανειακή εμφάνιση δολεριτών, περιδοιτών και σχιστοκερατολίθων (Σχήμα 1.1α) πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες μετρήσεις για την βαθμονόμηση της ηλεκτρικής τομογραφίας.



Σχήμα 3.31: Φωτογραφία κατά την διεξαγωγή των επιτόπιων μετρήσεων για την βαθμονόμηση της ηλεκτρικής τομογραφίας.

3.6.1 Λογισμικό πακέτο IPI2WIN

Η επεξεργασία των δεδομένων των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πακέτο IPI2WIN. Το πρόγραμμα IPI2WIN χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που του δίνονται καταλήγει σε ένα μονοδιάστατο μοντέλο της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

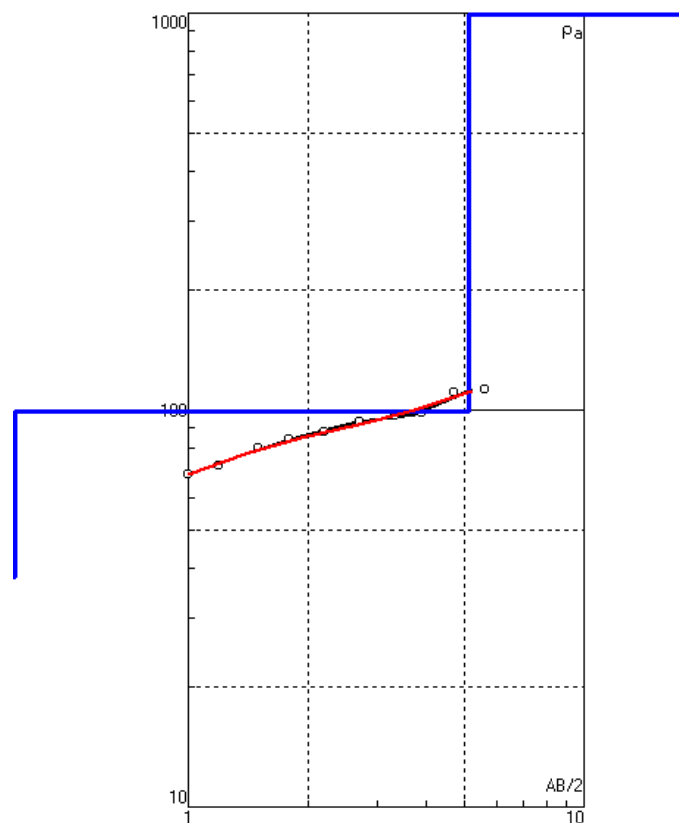
Παρακάτω, απεικονίζονται τα μοντέλα, όπως αυτά προέκυψαν μετά την επεξεργασία των δεδομένων. Το ποσοστό πάνω από τα μοντέλα εκφράζει το σφάλμα στη διαδικασία της αντιστροφής. Επίσης, για κάθε μοντέλο, παρατίθεται ο προσανατολισμός της εκάστοτε γραμμής μελέτης και ο πίνακας με τις τιμές για κάθε σχηματισμό, όπου:

- ρ = ειδική ηλεκτρική αντίσταση
- h = πάχος σχηματισμού
- d = βάθος σχηματισμού

3.6.2 Απεικόνιση αποτελεσμάτων

3.6.2.1 Βυθοσκόπηση Δολερίτη (B-N)

Το μοντέλο παρουσιάζει τρία στρώματα, εκ των οποίων το πρώτο (εδαφικό κάλυμμα) έχει πολύ μικρό πάχος. Το δεύτερο και το τρίτο στρώμα αποδίδονται σε Δολερίτη του οποίου η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι μεγαλύτερη των $99\Omega m$. Το σφάλμα της επεξεργασίας κυμαίνεται στο 1.3%.



Σχήμα 3.32: Γεωηλεκτρική καμπύλη (κόκκινη γραμμή) και μοντέλο (μπλε γραμμή).

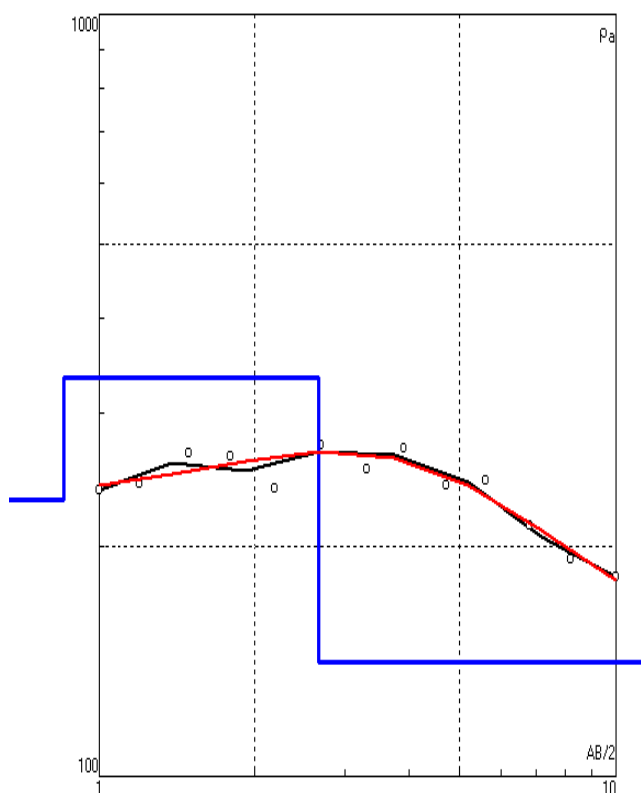
Σφάλμα: 1,3%.

N	1	2	3
p (Ωm)	38.12	99.34	1321
h (m)	0.2533	4.852	
d (m)	0.2533	5.105	

Πίνακας 3.1: Τιμές Δολερίτη.

3.6.2.2 Βυθοσκόπηση Σχιστοκερατόλιθου (B-N)

Στο σχήμα 3.33 στο μοντέλο παρουσιάζονται τρία στρώματα, εκ των οποίων το τρίτο αποδίδεται σε Σχιστοκερατόλιθο με ειδική ηλεκτρική αντίσταση $140\Omega\text{m}$.



Σχήμα 3.33: Γεωηλεκτρική καμπύλη (κόκκινη γραμμή) και μοντέλο (μπλε γραμμή).

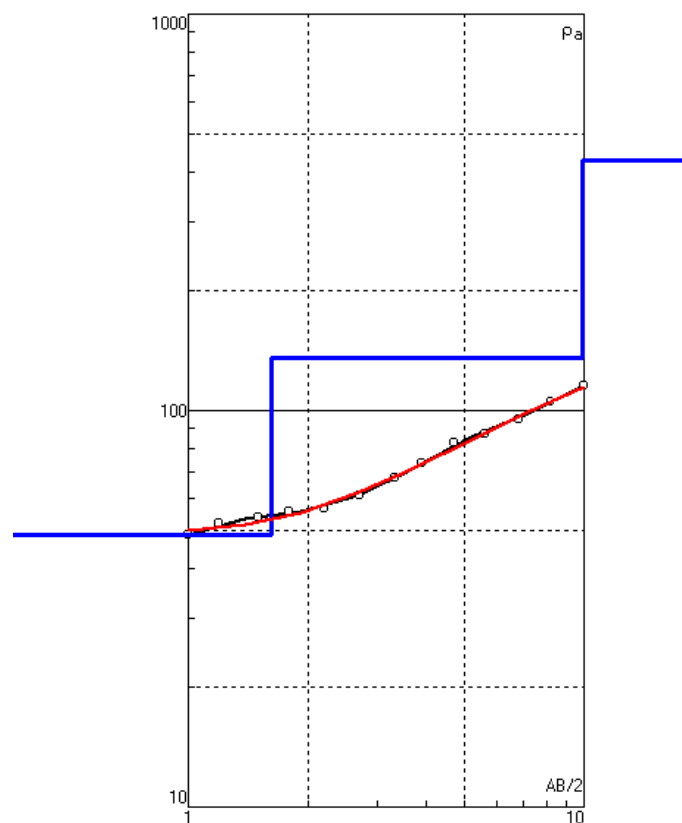
Σφάλμα: 1,91%.

N	1	2	3
ρ (Ωm)	230.5	334.2	140.9
h (m)	0.8551	1.807	
d (m)	0.8551	2.662	

Πίνακας 3.2: Τιμές Σχιστοκερατόλιθου.

3.6.2.3 Βυθοσκόπηση Περιδοτιτή (B-N)

Στο σχήμα 3.34 παρουσιάζονται τρία στρώματα, εκ των οποίων το εδαφικό κάλυμμα έχει πολύ μικρό πάχος. Το δεύτερο στρώμα αποδίδεται σε Περιδοτιτή με πάχος σχηματισμού 8.2μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι 135 Ωm .



Σχήμα 3.34: Γεωηλεκτρική καμπύλη βυθοσκόπησης (κόκκινη γραμμή) και μοντέλο (μπλε γραμμή).

Σφάλμα: 1,36%

N	1	2	3
p (Ωm)	48.65	135.7	427.3
h (m)	1.629	8.273	
d (m)	1.629	9.902	

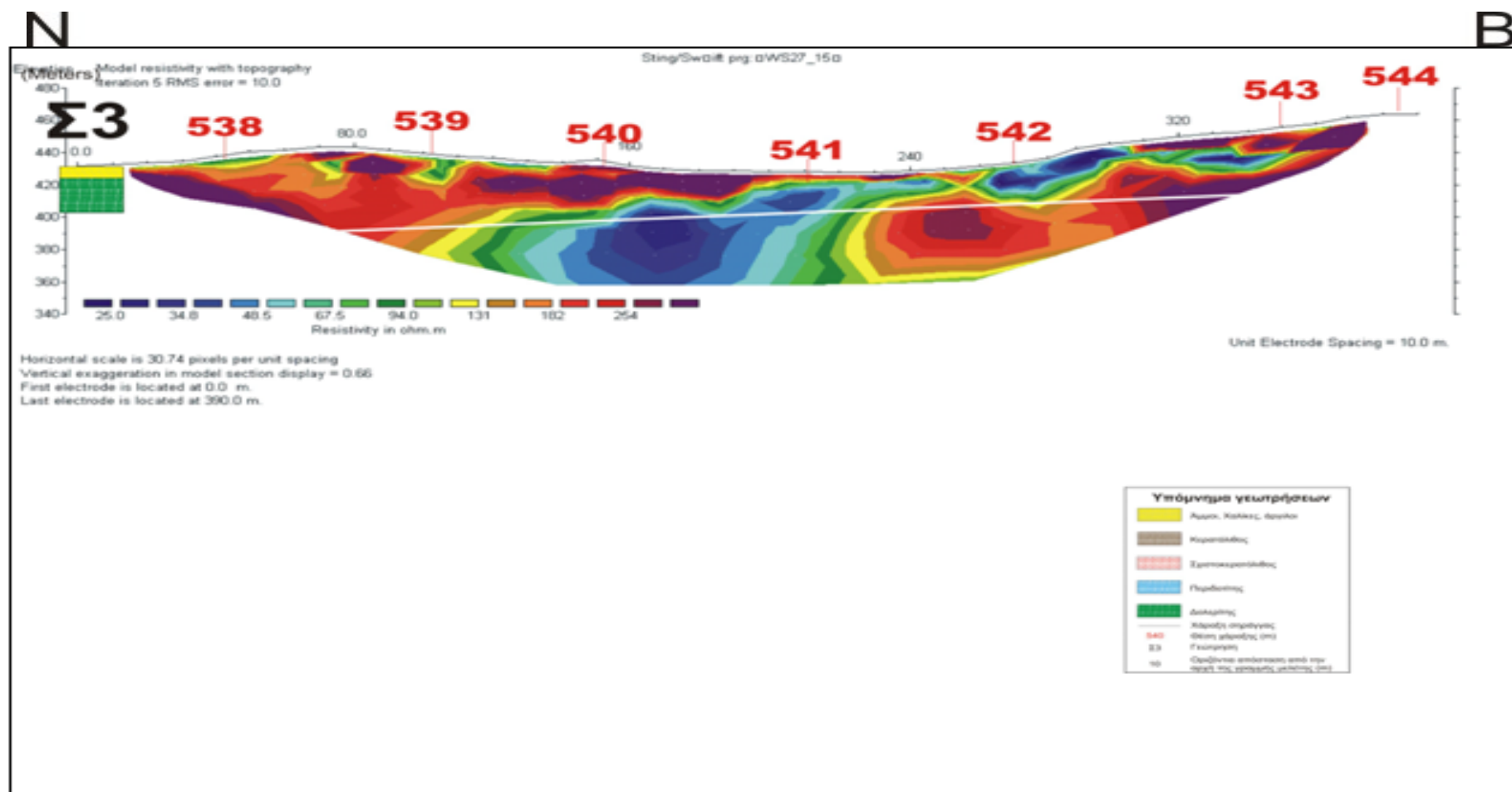
Πίνακας 3.3: Τιμές Περιδοτίτη.

3.7 Ερμηνεία

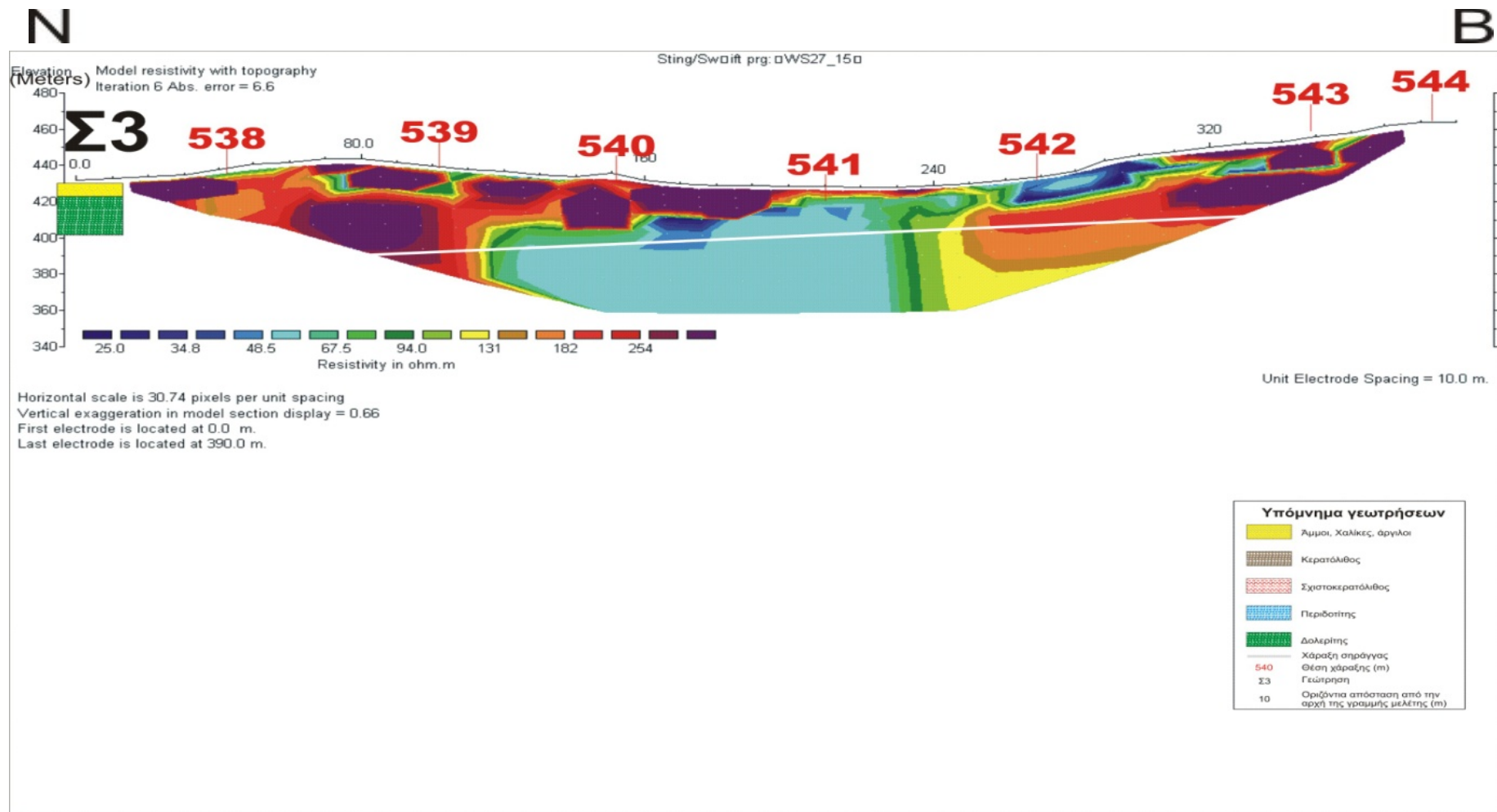
Στο κεφάλαιο ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Το λογισμικό πακέτο Res2Dinv παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής των υψόμετρων. Σε όλες τις γραμμές μελέτης εισήχθηκαν τα απόλυτα υψόμετρα. Επίσης με το σχεδιαστικό πρόγραμμα COREL έγινε η εισαγωγή των σημείων χάραξης και των γεωτρήσεων Σ3, Σ4 και Σ5 αντίστοιχα.

3.7.1 Γραμμή μελέτης S3

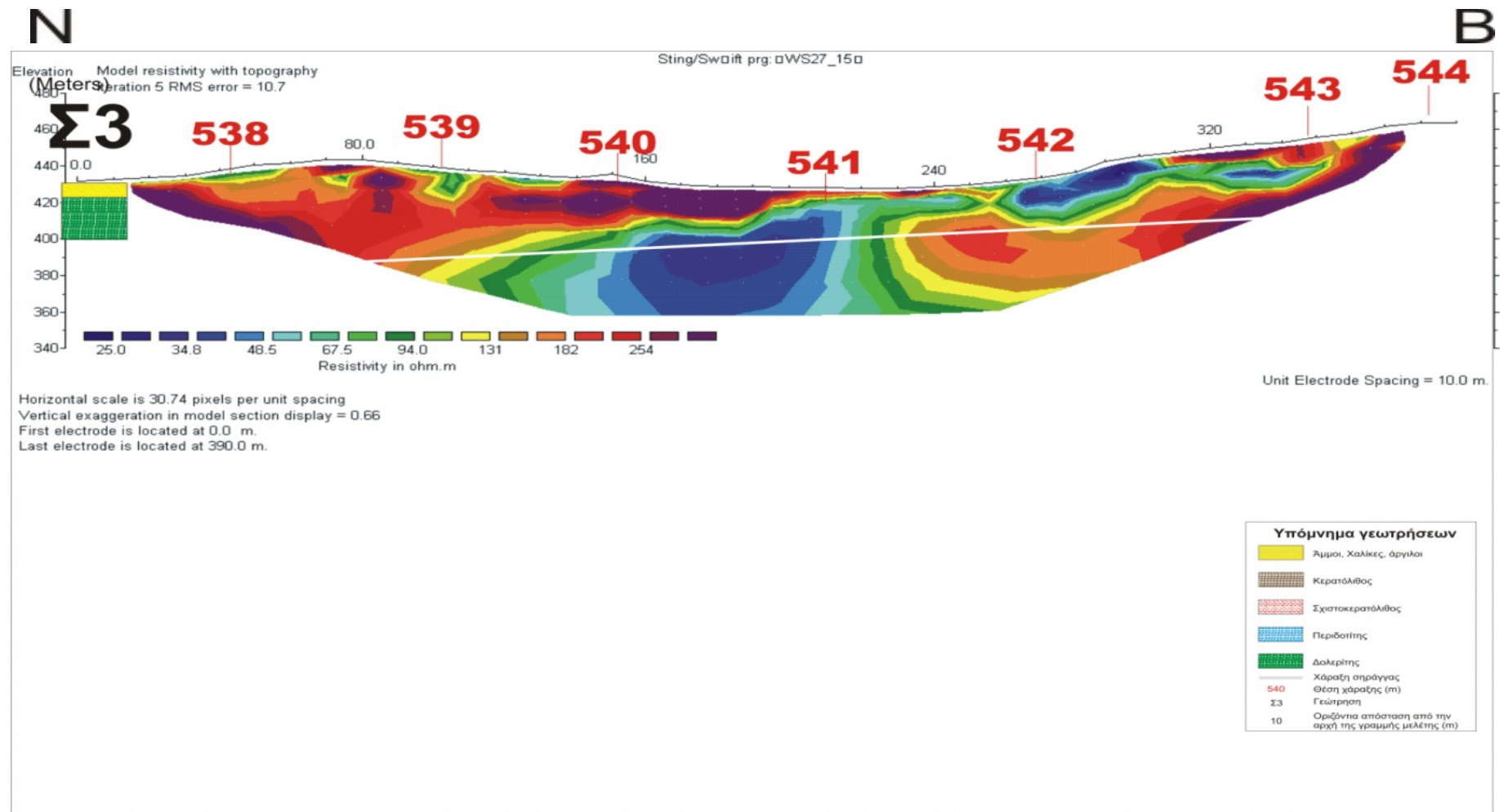
Η γεωηλεκτρική τομή S3 μήκους 400 m και διεύθυνσης περίπου N-B αποτελείται από 38 κέντρα με ισαπόσταση 10 m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης ήταν 77 μέτρα.



Σχήμα 3.35: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S3 με την Μέθοδο Α), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υπομέτρων της περιοχής, των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



Σχήμα 3.36: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S3 με την Μέθοδο B), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υπομέτρων της περιοχής, των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα



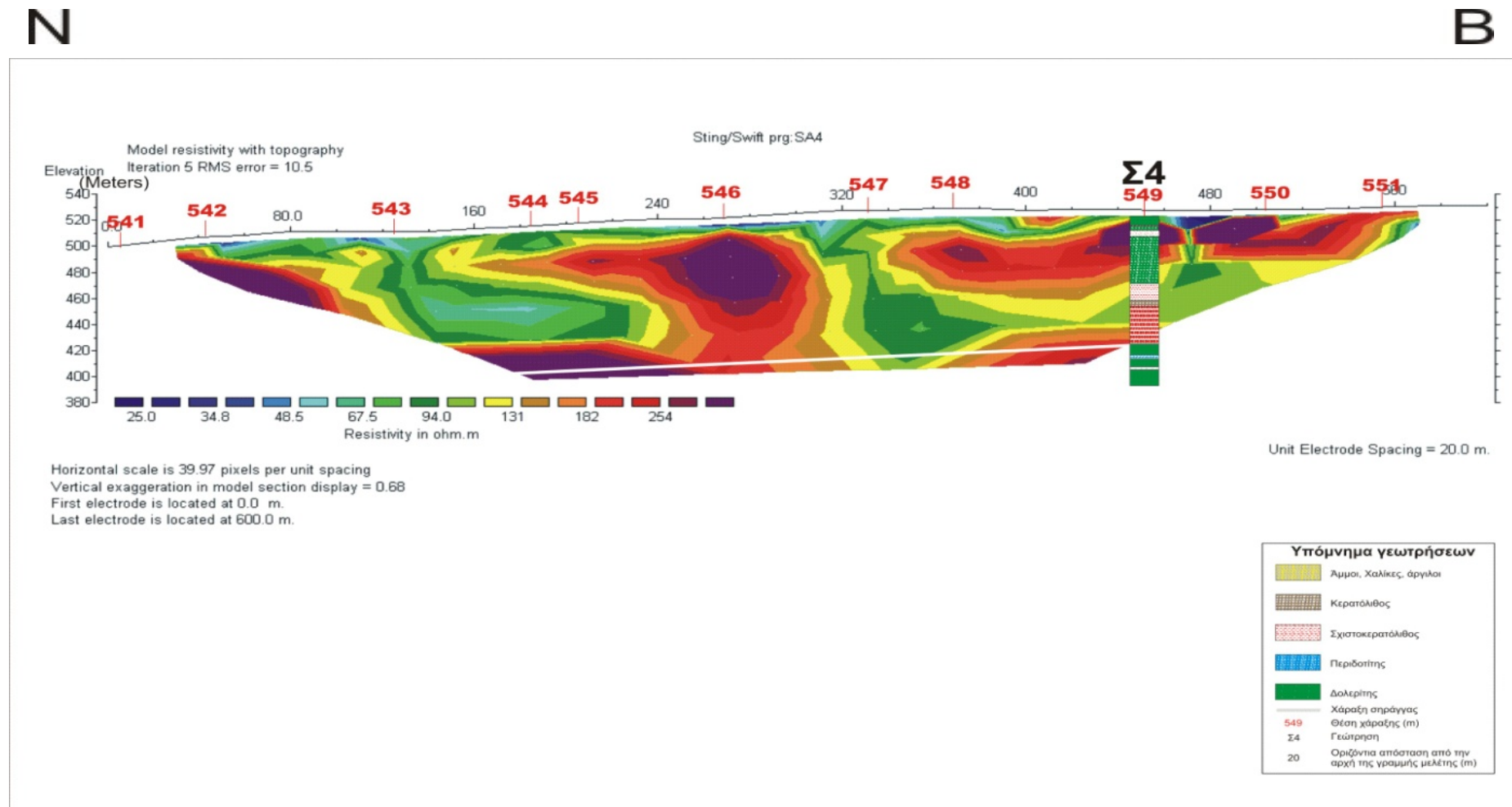
Σχήμα 3.37: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S3 με την Μέθοδο Γ), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υψομέτρων της περιοχής, των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ3. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στη γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης S3 παρατηρούνται υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 100Ωm μέχρι 254 Ωm. Στο μέσο της τομής οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μικρότερες από 40 Ωm. Βόρεια από τη ζώνη χαμηλών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, παρατηρείται άλλη μια ζώνη υψηλών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, (100Ωm μέχρι 254 Ωm).

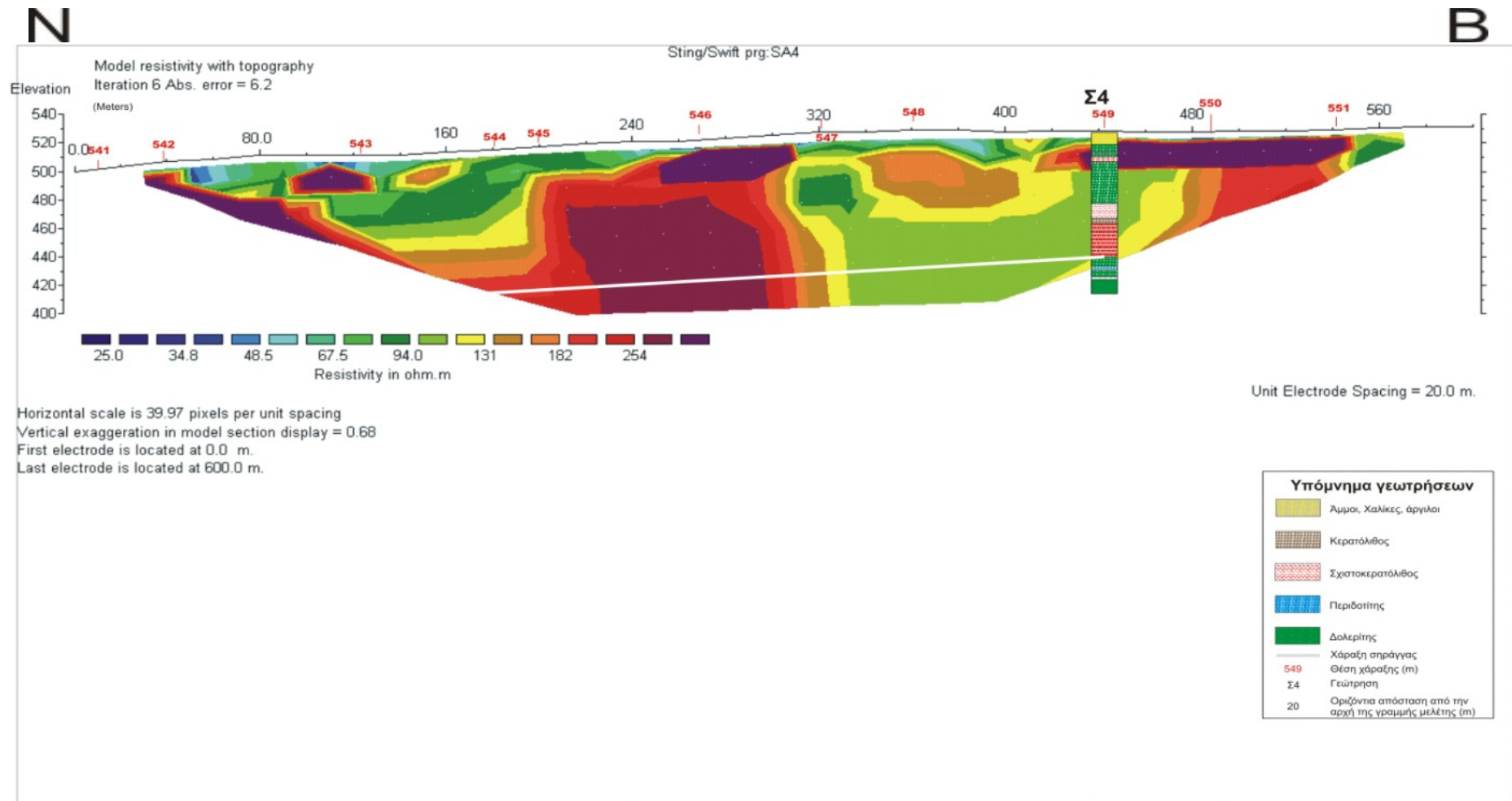
Η ζώνη χαμηλών αντιστάσεων αποδίδεται σε πιθανό ρήγμα ή σε ζώνη με αυξημένα ποσοστά υγρασίας. Σύμφωνα με την γεώτρηση Σ3 που έχει πραγματοποιηθεί στη περιοχή και την βυθοσκόπηση βαθμονόμησης η σήραγγα (άσπρη γραμμή) θα διατρήσει κυρίως δολερίτες.

3.7.2 Γραμμή μελέτης S4

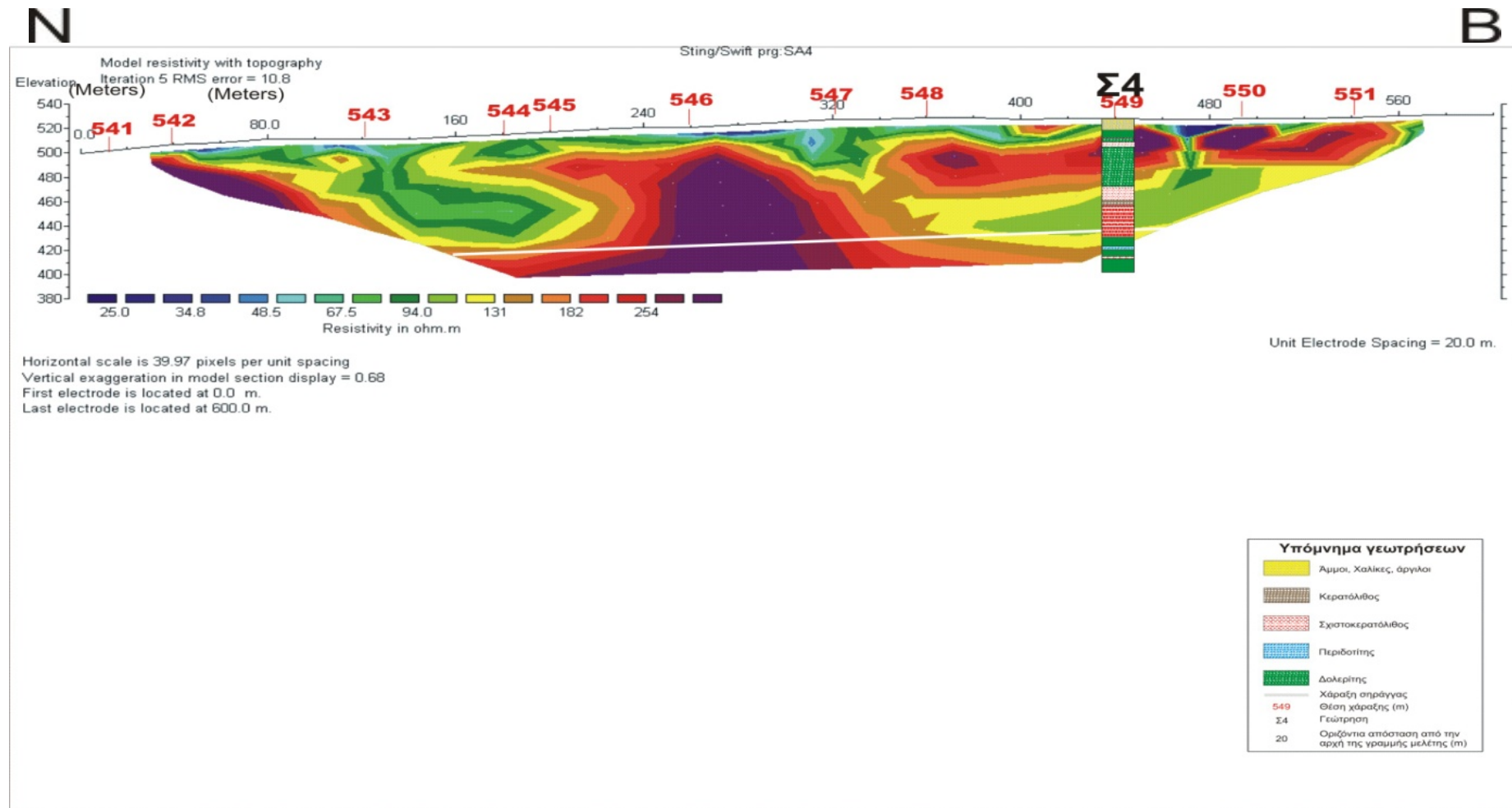
Η γεωηλεκτρική τομή S4 μήκους 600m και διεύθυνσης περίπου N-B αποτελείται από 28 κέντρα με ισαπόσταση 20m, τα οποία τοποθετήθηκαν κατά μήκος του δρόμου που οδηγεί στην γεώτρηση Σ4.



Σχήμα 3.38: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S4 με την Μέθοδο A), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υπομέτρων της περιοχής, των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



Σχήμα 3.39: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S4 με την Μέθοδο B), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υψομέτρων της περιοχής, των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



Σχήμα 3.40: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S4 με την Μέθοδο Γ), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υψομέτρων της περιοχής, των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ4. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

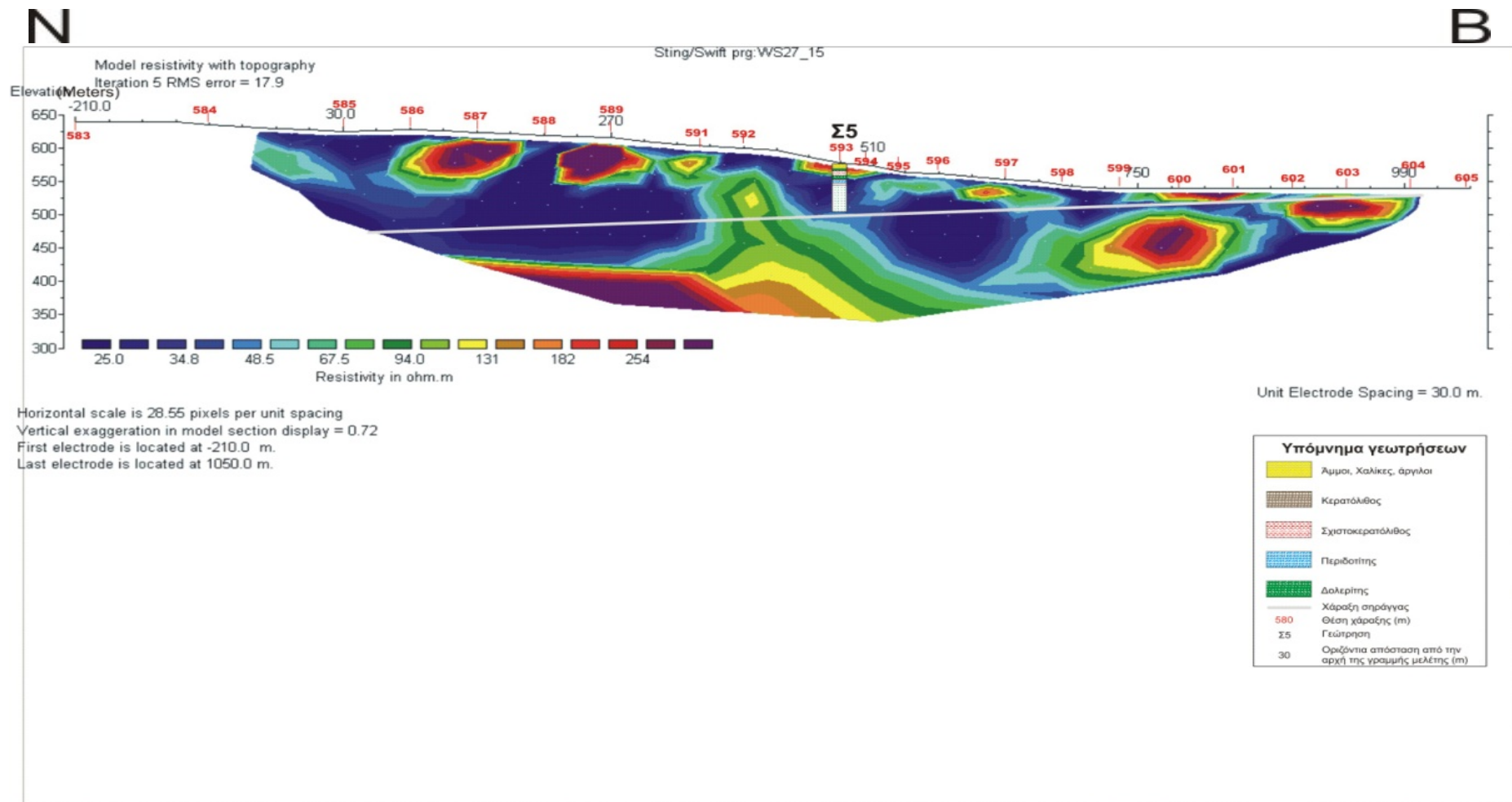
Στην γεωηλεκτρική τομή S4 παρατηρείται μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπου ζώνες μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διακόπτουν αντίστοιχες με αυξημένη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην γεώτρηση Σ4 που βρίσκεται στην θέση χάραξης 549, εναλλαγή δολεριτών και σχιστοκερατόλιθων.

Επεκτείνοντας την πληροφορία αυτή στην γεωηλεκτρική τομή και με βάση τις βυθοσκοπήσεις βαθμονόμησης νότια της γεώτρησης στην θέση χάραξης 543 παρατηρείται ζώνη μειωμένων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία αποδίδεται, είτε σε σχιστοκερατόλιθους, είτε σε ρήγμα. Στην θέση χάραξης 546 παρουσιάζονται υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πιθανόν να σχετίζεται με δολεριτικά πετρώματα. Βόρεια της γεώτρησης Σ4 στην θέση χάραξης 551 εμφανίζονται σχετικά υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (130 – 250 Ωm) οι οποίες αποδίδονται σε δολερίτες.

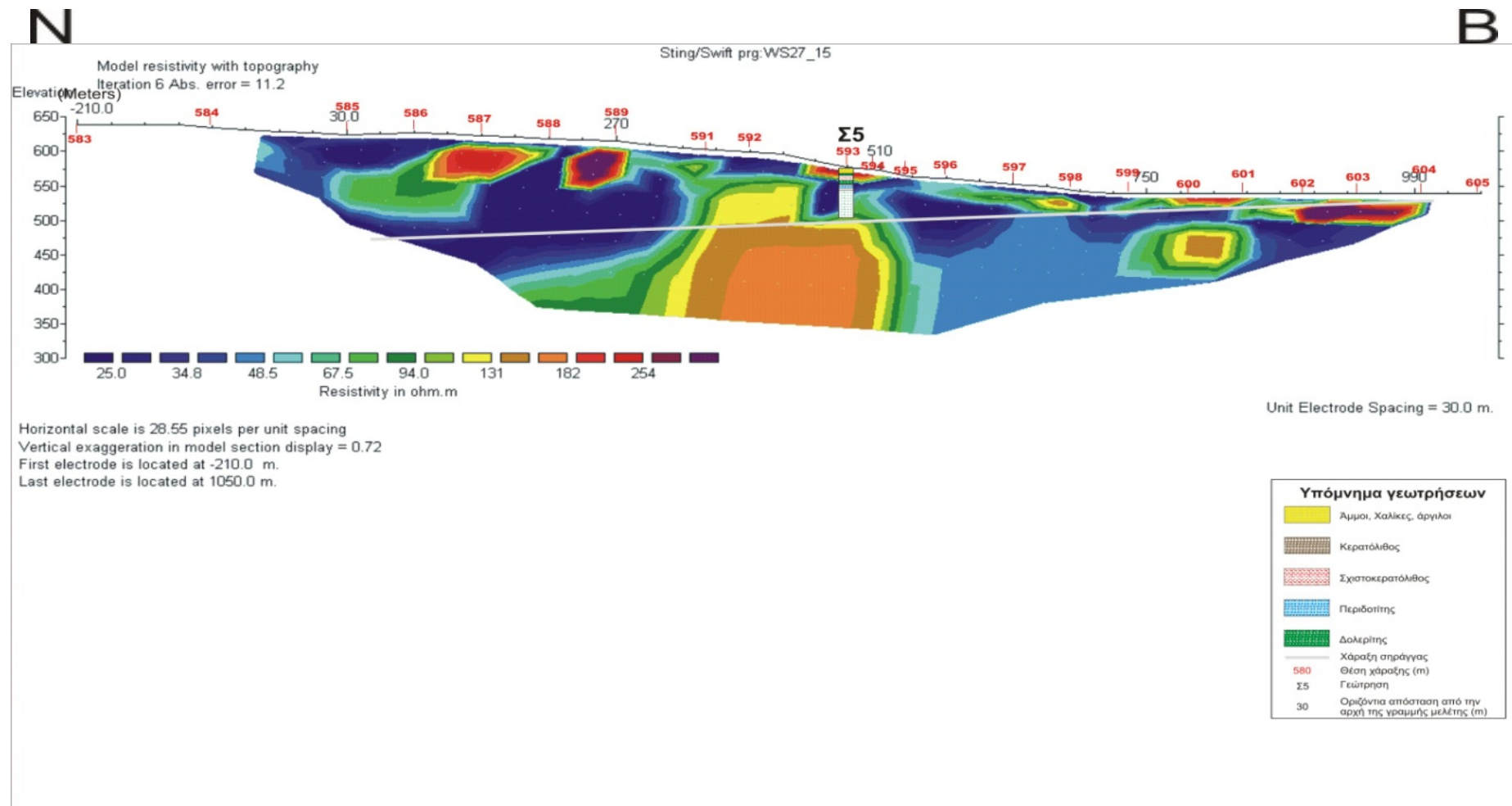
Κατά μήκος της γραμμής μελέτης S4, η σήραγγα (άσπρη γραμμή) θα διατρήσει δολερίτες και σχιστοκερατόλιθους.

3.7.3 Γραμμή μελέτης S5

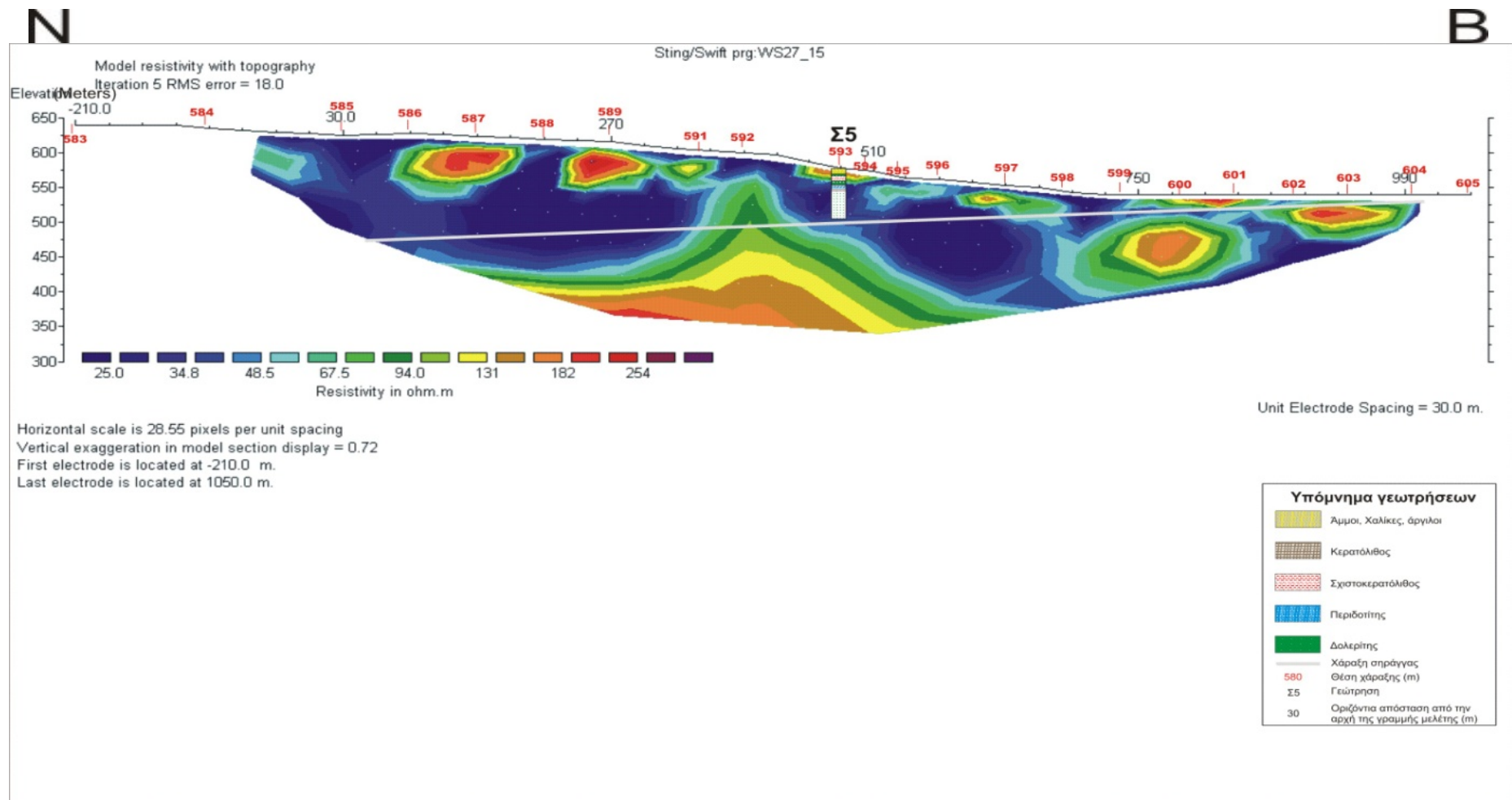
Η γεωηλεκτρική τομή S5 μήκους 1050 m και διεύθυνσης N-B αποτελείται από 34 κέντρα με ισαπόσταση 30 m.



Σχήμα 3.41: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S5 με την Μέθοδο Α) , μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υψομέτρων της περιοχής ,των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



Σχήμα 3.42: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S5 με την Μέθοδο B), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υπομέτρων της περιοχής ,των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.



Σχήμα 3.43: Τελικό μοντέλο ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων της γραμμής μελέτης S5 με την Μέθοδο Γ), μετά από την εισαγωγή των απόλυτων υψομέτρων της περιοχής, των σημείων χάραξης και της γεώτρησης Σ5. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα.

Στην γεωηλεκτρική τομή S5 παρατηρούνται ζώνες αυξημένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σε μικρό σχετικά βάθος στις θέσεις χάραξης 587, 589, 597, 593 (όπου υπάρχει η γεώτρηση Σ5), 600, 601 και 603 όπου βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια καθώς και αυτές στις θέσεις χάραξης 587 έως 592 και 599 έως 601 που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη, να εναλλάσσονται με αντίστοιχες με μειωμένης τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σύμφωνα με την γεώτρηση Σ5 αυτές οι ζώνες με υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποδίδονται σε πρόσφατες επιφανειακές προσχώσεις, (άμμους και χάλικες).

Οι σχετικά χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κάτω από 50 Ωm) οφείλονται σε δολεριτικούς σχηματισμούς, με υψηλό βαθμό αποσάθρωσης οι οποίοι είναι κορεσμένοι σε νερό σύμφωνα με την γεώτρηση Σ5. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ζώνη με τις ενδιάμεσες τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (90-250 Ωm) στο μέσο περίπου της τομής (σημεία χάραξης 590-592) και σε βάθος μεγαλύτερο των 20 m, που φαίνεται να διακόπτει τις ζώνες χαμηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Τέτοιες υψηλές τιμές δικαιολογούνται από λιγότερο διαταραγμένο βράχο πιθανόν περιδοτιτικής ή δολεριτικής προέλευσης.

Άρα, στην γεωηλεκτρική τομή S5 η σήραγγα (άσπρη γραμμή), θα συναντήσει γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους αναμένεται υδροφορία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ****4.1 Συμπεράσματα**

Διασκοπήθηκαν 3 γραμμές μελέτης, συνολικού μήκους περίπου 2050 μέτρων. Η γραμμή μελέτης S5, οριοθετείται από τις θέσεις χάραξης 584 και 604, η γραμμή μελέτης S4, οριοθετείται από τις θέσεις χάραξης 540 έως 554 και η γραμμή μελέτης S3, οριοθετείται από τις θέσεις χάραξης 538 έως 545. Τα μέγιστα βάθη διασκόπησης είναι 176, 117 και 77 μέτρα στις γραμμές μελέτης S5, S4 και S3 αντίστοιχα.

Στην επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι αντιστροφής Α) κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης, Β) με συνδυασμό αντιστροφής και Γ) με την χρήση της νόρμας L1. Για την ερμηνεία προτιμήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομές από την μέθοδο Γ) από όπου προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την περιοχή μελέτης:

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, στις παραπάνω θέσεις είναι δολερίτες ή σχιστοκερατόλιθοι, σύμφωνα με τις γεωτρήσεις. Στην γραμμή μελέτης S5 όλη η σήραγγα βρίσκεται μέσα σε σχηματισμούς που παρουσιάζουν υδροφορία. Στην γραμμή μελέτης S4 η σήραγγα φαίνεται να διατρύει δολερίτες, με εξαίρεση τις παρεμβολές σχιστοκερατόλιθων. Στην γραμμή μελέτης S3, υπάρχει η εμφάνιση πιθανού ρήγματος ή ζώνης με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Στην γεωηλεκτρική τομή S4 διακρίνεται τόσο στην οριζόντια, όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αποδίδεται σε εναλλαγή δολεριτών και σχιστοκερατολίθων και σχετίζεται με επωθήσεις. Η σήραγγα αναμένεται να συναντήσει κυρίως δολερίτες. Πάνω από την σήραγγα στις θέσεις χάραξης 547-549, αναμένεται, σύμφωνα και με την γεώτρηση, η εμφάνιση σχιστοκερατολίθων.

Κατά την σύγκριση των τριών διαφορετικών μεθόδων αντιστροφής, δεν προέκυψαν διαφορετικά αποτελέσματα κατά την επεξεργασία των μετρήσεων για τις τρεις γραμμές μελέτης, S3, S4 και S5.

4.2 Προτάσεις

Με βάση τα προαναφερθέντα συμπεράσματα της γεωφυσικής διασκόπησης προτείνονται τα παρακάτω:

- 1) Την δημιουργία γεωλογικής μηκοτομής, βάσει τόσο των γεωφυσικών αποτελεσμάτων, όσο και των γεωτρητικών στοιχείων.
- 2) Την περαιτέρω έρευνα για τον προσδιορισμό του ρήγματος που ανιχνεύθηκε στην γραμμή μελέτης Γ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. **Βαφείδης Α. (1994).** “Αξιολόγηση σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους”, Χανιά
2. **Βαφείδης Α. (2001).** “Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II”
3. **Κρητικάκης Γ. (2001)** “Συμβολή των σεισμικών μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης σε γεωτεχνικές και υδρολογικές μελέτες”. Εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού μαθήματος “Ειδικά Κεφάλαια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας”. Πολυτεχνείο Κρήτης , Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. **Παπαζάχος Β. (1986),** “Εισαγωγή Στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική”, Εκδόσεις “Ζήτη”, Θεσσαλονίκη
5. **Σπανουδάκης Ν. (2001).** “Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων”. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
6. **Hamdan H. (2002),** “Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του νομού Χανίων”. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. **Hamdan H. (2002),** “Τρισδιάστατη χαρτογραφική απεικόνιση πιθανών υδροφόρων σχηματισμών στην περιοχή Κισσάμου, Ν. Χανίων”
8. **Βαφείδης Α. (2004),** “Γεωφυσική διασκόπηση στο οροπέδιο του Ομαλού, Ν. Χανίων”,
9. **Βαφείδης Α. (2004),** “Συμβολή της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και της Σεισμικής Διάθλασης στην επιλογή θέσης για τη δημιουργία Λιμνοδεξαμενής στην Κουντούρα, Δ. Πελεκάνου, Ν. Χανίων”.
10. **Βαφείδης Α. (2006),** “Γεωφυσική Διασκόπηση στο Τμήμα Λυγαριά-Περιβόλι του οδικού άξονα Ε65”.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Batayneh A.T., Barjous M.O. (2005).** “Resistivity surveys near a waste-disposal site in the Qasr Tuba area of central Jordan”. Bull. Eng. Geol. Env. 64, 287-294
2. **Bavusi M., Rizzo E., Lapenna V. (2006).** “Electromagnetic methods to characterize the Savoia di Lucania waste dump (Southern Italy)”. Environ. Geol. 51, 301-308

3. **Choudhury, K., Saha, D.K., Chakraborty, P., (2001).** “Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain”. *J. Appl. Geophys.* 46, 189–200.
4. **Dobrin, M., (1976),** “Introduction to geophysical prospecting”, McGraw Hill Book Comp.Inc., New York, USA.
5. **Griffiths D.H. and Barker R.D.(1993).** “Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology”. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
6. **Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A., (1986).** “New prospects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological applications”. *Geophysics* 51, 585–594.
7. **Li Y. and Oldenburg D.W. (1992).** “Approximate inverse mappings in DC resistivity problems”. *Geophysical Journal International* **109**, 343-362.
8. **Loke M.H. and Barker R.D.,(1996).** “Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method”. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
9. **Newmark, R., W. Daly, K. Kyle, and A. Ramirez. (1998).** “Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques”. *JEEG*, Vol. 3, Issue 1, March 1998,p7-13
10. **Olayinka, A.I., Yaramanci, U., (2000).** “Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data”. *Geophys. Prospec.* 48, 293–316.
11. **Park, S., (1998).** “Fluid migration in the vadose zone from 3-D inversion of resistivity monitoring data”. *Geophysics* 63, 41–51.
12. **RES2DINV user’s manual version 3.4**
13. **Robinson, E. S. and Coruh, C. (1988).** ‘Basic Exploration Geophysics’, New York : Johny Wily.
14. **Samouelian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G. (2004).** “Electrical resistivity survey in soil science: a review”.