ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΛΕΠΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

"ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΕΛΕΦΙΝΑΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΛΑΚΩΝΙΑΣ"

Εξεταστική επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ. (επιβλέπων)
Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής Π.Κ.
Γαλετάκης Μιχαήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Κ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

Ταυτόχρονα έγινε χρήση δύο μεθόδων αντιστροφής, κανονικοποιήση με περιορισμούς εξομάλυνσης (smoothness constrained) και με χρήση της νόρμας L1 (Robust) με σκοπό τη σύγκρισή τους για καλύτερη ερμηνεία των σχηματισμών της προς μελέτης περιοχή.

Η προς μελέτη περιοχή εντοπίζεται σε απόσταση περί τα 11km ΒΑ της πόλης της Σπάρτης στον ομώνυμο ποταμό (Κελεφίνας ή Οινούς) και υπάγεται διοικητικά στον δήμο Οινούντος, του νομού Λακωνίας.

Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν και με βοήθησαν επιστημονικά αλλά και ηθικά.

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

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Οικονόμου Νικόλαο, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και μέλος ΕΤΕΠ του τμήματος και τον κ. Hamdan Hamdan υποψήφιο διδάκτορα επίσης για την συνεχή υποστήριξη και βοήθεια σε κάθε απορία - δυσκολία που μου παρουσιαζόταν.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία βασίζεται στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, η οποία εφαρμόστηκε στα πλαίσια γεωφυσικής διασκόπησης στην ευρύτερη περιοχή της Κελεφίνας του νομού Λακωνίας. Στόχος της γεωφυσικής διασκόπησης ήταν η απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής από την θέση όπου πρόκειται να κατασκευαστεί μελλοντικά φράγμα. Τα δεδομένα συλλέχτηκαν τον Σεπτέμβριο του 2010 κατά μήκος οκτώ γραμμών μελέτης συνολικού μήκους 4800m. Το βάθος της γεωφυσικής διασκόπησης τις περισσότερες φορές έφτασε τα 120m.

Η επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας έγινε με το λογισμικό πακέτο Res2Dinv με το οποίο έγινε η απεικόνιση των γεωηλεκτρικών δομών του υπεδάφους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι αντιστροφής, κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης και με την χρήση της νόρμας L1, με σκοπό την σύγκρισή τους και μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης κατάκλυσης του φράγματος Κελεφίνας παρατηρήθηκαν δύο γεωτεκτονικές ενότητες, η ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών και η υπερκείμενη τεκτονικά (επωθημένη) ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης. Η ενότητα των φυλλιτών – χαλαζιτών αποτελείται από μια σειρά μεταμορφωμένων σχηματισμών που κατά κύριο λόγο περιλαμβάνει σχιστολίθους διαφόρων πετρογραφικών τύπων, φυλλίτες και στρώματα ή παρεμβολές χαλαζιτών. Οι σχηματισμοί εναλλάσσονται τυχαία μεταξύ τους τόσο σε πλάτος όσο και σε βάθος εμφάνισης. Η ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης αντιπροσωπεύεται στην περιοχή της λεκάνης κατάκλυσης από τους ανθρακικούς σχηματισμούς Τριαδικής ηλικίας.

Η απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών εμφάνισε την επώθηση των ανθρακικών σχηματισμών στην φυλλιτική – σχιστολιθική σειρά κατά θέσεις.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

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 και ερμηνεία των γεωλογικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή κατασκευής του φράγματος.

Στη περιοχή μελέτης όπου πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας σε συνεργασία με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής καθώς και τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων που είχαν διεξαχθεί, έγινε προσπάθεια σύνδεσης των γεωλογικών στοιχείων με τα γεωφυσικά δεδομένα.

Με τη χρησιμοποίηση γεωφυσικών μεθόδων παρέχονται επιπλέον πληροφορίες για τα γεωλογικά δεδομένα της περιοχής, για το βάθος των σχηματισμών, πιθανά πήγματα και επωθήσεις, προσδιορισμό βάθους που αναμένεται ο υδροφόρος ορίζοντας όπως επίσης και διάφορες θέσεις και σημεία που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Ταυτόχρονα με τη χρησιμοποίηση των δύο διαφορετικών μεθόδων της αντιστροφής κατά την επεξεργασία, κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης και με χρήση της νόρμας L1, είχε ως στόχο τη σύγκρισή τους και την εύρεση της καταλληλότερης για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της προς μελέτης περιοχή.

1.2 Περιγραφή διπλωματικής εργασίας

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αξιολογούνται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα γεωφυσικής έρευνας (μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας), η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μελέτης για τον χαρακτηρισμό γεωλογικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή της Κελεφίνας, του νομού Σπάρτης και αφορά τη μελλοντική κατασκευή φράγματος στη περιοχή.

Οι μετρήσεις πάρθηκαν την περίοδο 22-27 Σεπτεμβρίου 2010 κατά τη διασκόπηση στην ευρύτερη περιοχή της Κελεφίνας από τους κυρίους, Οικονόμου Νικόλαο και Hamdan Hamdan, που ανήκουν στο επιστημονικό προσωπικό του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και τον φοιτητή Κλέπκο Βασίλειο του ίδιου τμήματος.

Στα πλαίσια της διασκόπησης αυτής σχεδιάστηκε γεωφυσική έρευνα, η οποία περιλαμβάνει 8 γραμμές μελέτης συνολικού μήκους 4800m, με τη διάταξη Wenner - Schlumberger. Το μέγιστο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων ρεύματος ήταν 500m και είχε ως αποτέλεσμα το βάθος διασκόπησης να φτάνει περί τα 120m. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που αντλείται από μπαταρία κυμαινόταν από 20-200mA.

1.3 Γεωφυσικές μέθοδοι

Οι γεωφυσικές μέθοδοι είναι χρήσιμες, αξιόπιστες και αποτελεσματικές. Βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων. Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό υδρογονανθράκων και πολλών μεταλλευμάτων πολύτιμων και μη, όπως και για τον εντοπισμό υπόγειων υδάτων. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υπεδάφους σε τεχνικά έργα, τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων και τον εντοπισμό δομών διάφορων ορυκτολογικών συστάσεων που δημιουργήθηκαν με την πάροδο των χρόνων (π.χ. θεμέλια παλαιών κοιτασμάτων, αρχαιολογικοί τάφοι, κ.α.). Είναι επίσης οικονομικές, σχετικά γρήγορες και μη καταστροφικές. Οι σημαντικότερες κατηγορίες γεωφυσικών μεθόδων είναι:

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

Μαγνητικές Μέθοδοι. Είναι οι παλαιότερες μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης και βασίζονται στον εντοπισμό μεταβολών της μαγνήτισης των πετρωμάτων μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις των τοπικών μεταβολών της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της γης.

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

Ηλεκτρικές Μέθοδοι. Με αυτές τις μεθόδους επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό επιτυγχάνεται με μετρήσεις της ηλεκτρικής τάσης στην επιφάνεια της γης. Εφαρμόζονται επιτυχώς όταν υπάρχει σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος.

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

Εκτός από τις παραπάνω μεθόδους εφαρμόζονται και άλλες, όπως είναι η θερμική και η ραδιομετρική μέθοδος. Παρόλο που οι αρχές στις οποίες στηρίζονται είναι αρκετά απλές, πολλές από τις μεθόδους αυτές δεν βρίσκουν εφαρμογή, λόγω της περίπλοκης δομής της γης.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μία από τις σημαντικότερες στη γεωφυσική διασκόπηση. Ο όρος γεωφυσική διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με εφαρμογή των νόμων της φυσικής. Έχει ως στόχο τον εντοπισμό δομών με ιδιαίτερο οικονομικό ενδιαφέρον.

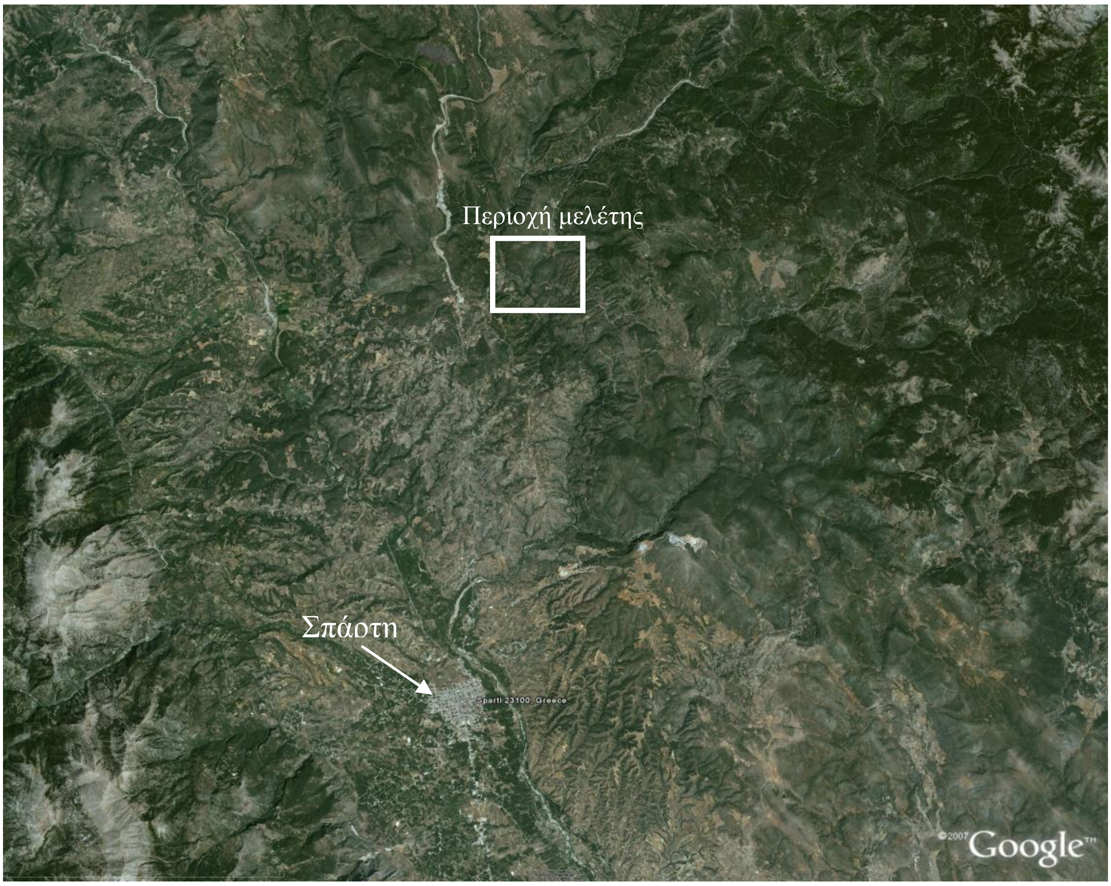
Πρόσφατες αναφορές έδειξαν ότι ο συνδυασμός γεωλογικών και γεωφυσικών δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους, την στρωματογραφία και τον εντοπισμό πιθανών ανωμαλιών στα πετρώματα.

1.4 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης και ειδικότερα η θέση του μελλοντικού φράγματος βρίσκεται σε απόσταση περί τα 11 χιλιόμετρα ΒΑ της πόλης της Σπάρτης (σε γεωγραφικό μήκος ίσο περίπου με αυτό της Σελλασίας) στον ομώνυμο ποταμό (Κελεφίνας ή Οινούς) και υπάγεται διοικητικά στον δήμο Οινούντος, του νομού Λακωνίας.

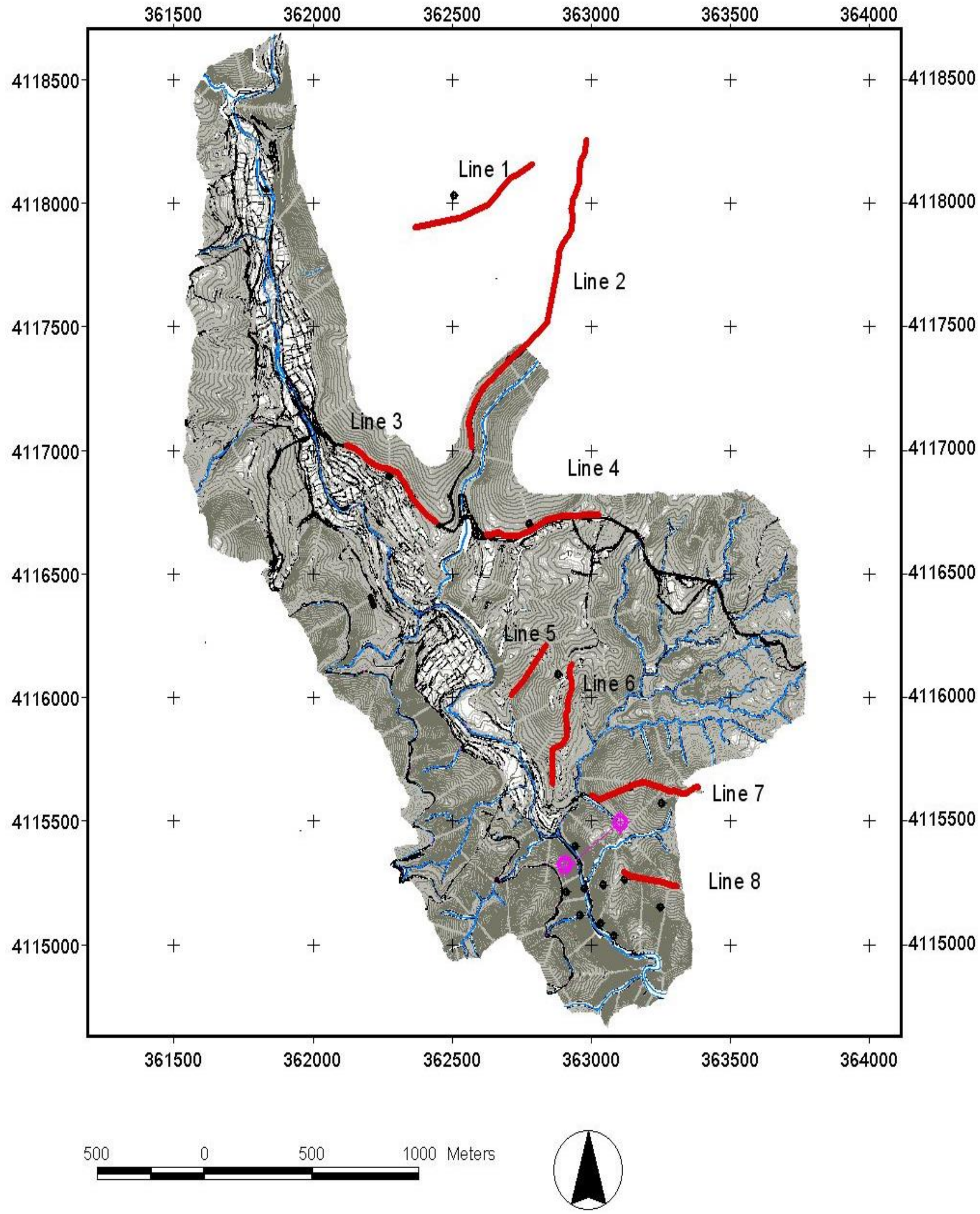
Η ευρεία περιοχή είναι ημιορεινή-λοφώδης και η πρόσβαση στην θέση του άξονα του φράγματος, γίνεται μέσω χωματόδρομου, που ξεκινάει από την επαρχιακή οδό προς Βασσαρά. Το υψόμετρο φτάνει μέχρι και τα 600 περίπου μέτρα.

Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε στην ευρύτερη περιοχή του μελλοντικού φράγματος (Σχήμα 4.1, άσπρο τετράγωνο).



Σχήμα 1.1: Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης. Το πάνω μέρος της εικόνας είναι ο Βορράς.

Σχήμα 1.1α: Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης. Απεικονίζεται η περιοχή που περικλείει το άσπρο τετράγωνο στο Σχήμα 1.1. Το πάνω μέρος της εικόνας είναι ο Βορράς.



Σχήμα 1.1β: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης, με τις θέσεις των γραμμών μελέτης (κόκκινο χρώμα).

1.5 Γεωλογικά δεδομένα

Στη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης κατάκλυσης του φράγματος Κελεφίνας συμμετέχουν δύο γεωτεκτονικές ενότητες, η ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών και η υπερκείμενη τεκτονικά (επωθημένη) ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης.

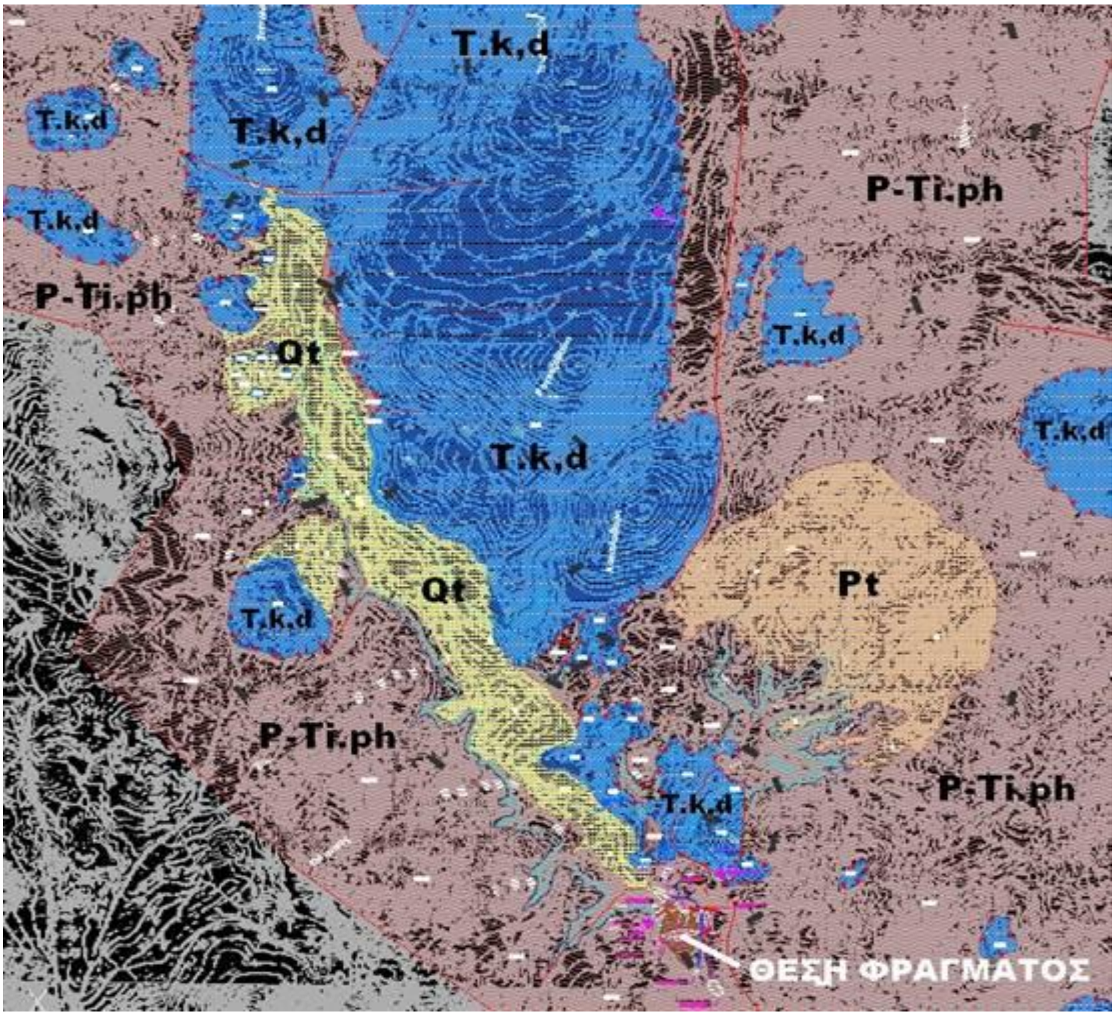
Η ενότητα των φυλλιτών – χαλαζιτών αποτελείται από μια σειρά μεταμορφωμένων σχηματισμών που κατά κύριο λόγο περιλαμβάνει σχιστολίθους διαφόρων πετρογραφικών τύπων, φυλλίτες και στρώματα ή παρεμβολές χαλαζιτών. Οι σχηματισμοί εναλλάσσονται τυχαία μεταξύ τους τόσο σε πλάτος όσο και σε βάθος εμφάνισης.

Η Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης αντιπροσωπεύεται στην περιοχή της λεκάνης κατάκλυσης κατά αποκλειστικότητα από τους κατώτερους στρωματογραφικούς της ορίζοντες, τους ανθρακικούς σχηματισμούς Τριαδικής ηλικίας.

Είναι γενικά, δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι τεφρού ή σκουρόφαιου χρώματος, άστρωτοι, κατά θέσεις μέσο-παχυστρωματώδεις κρυσταλλικοί, που εμφανίζονται ελαφριά-μέτρια αποσαθρωμένοι και κατά θέσεις έντονα καρστικοποιημένοι.

Σε ορισμένες θέσεις και ειδικότερα κοντά στην «τεκτονική» επαφή τους με το φυλλιτικό υπόβαθρο εμφανίζονται έντονα κερματισμένοι και λατυποποιημένοι και συχνά εναλλάσσονται με ορίζοντες σχιστοποιημένων φυλλιτών ή ασβεστιτικών σχιστολίθων έντονα τεκτονισμένων και αποσαθρωμένων («τεκτονική ζώνη επώθησης»).

Την στρωματογραφική στήλη της περιοχής, συμπληρώνουν τα νεότερα μεταλπικά, ολοκαινικά ιζήματα (Qt) (μανδύες αποσάθρωσης, κορήματα, προσχώσεις ποταμών και ρεμάτων κ.α.) και οι πλειο-πλειστοκαινικές λιμναίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις (Pt) – που καταλαμβάνουν μικρή περιοχή βόρεια της θέσεως του φράγματος.

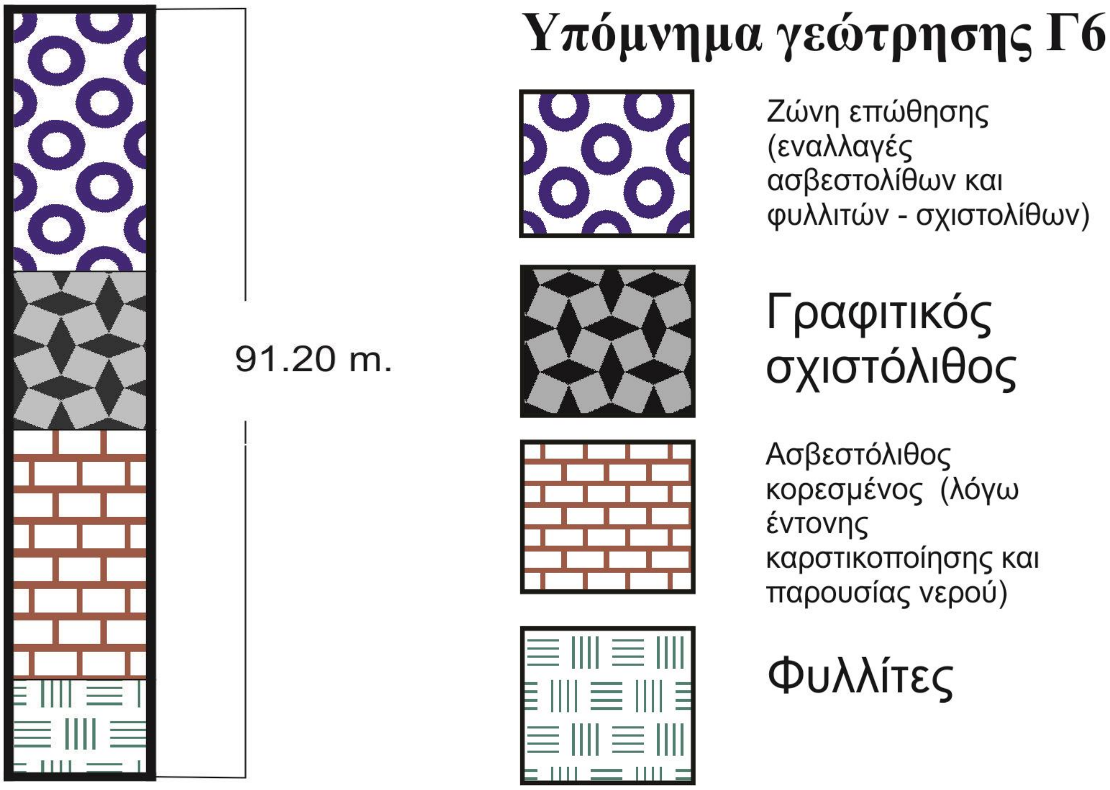


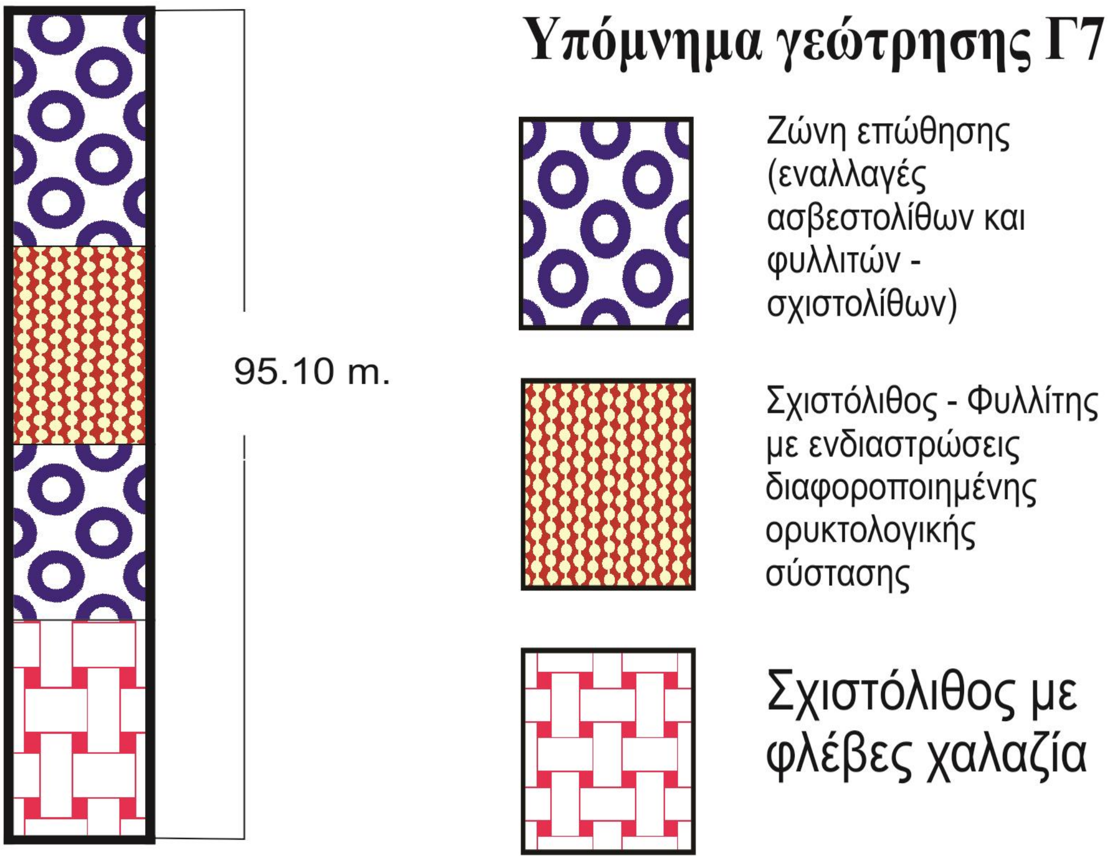
Σχήμα 1.2: Γεωλογικός χάρτης στη περιοχή μελέτης

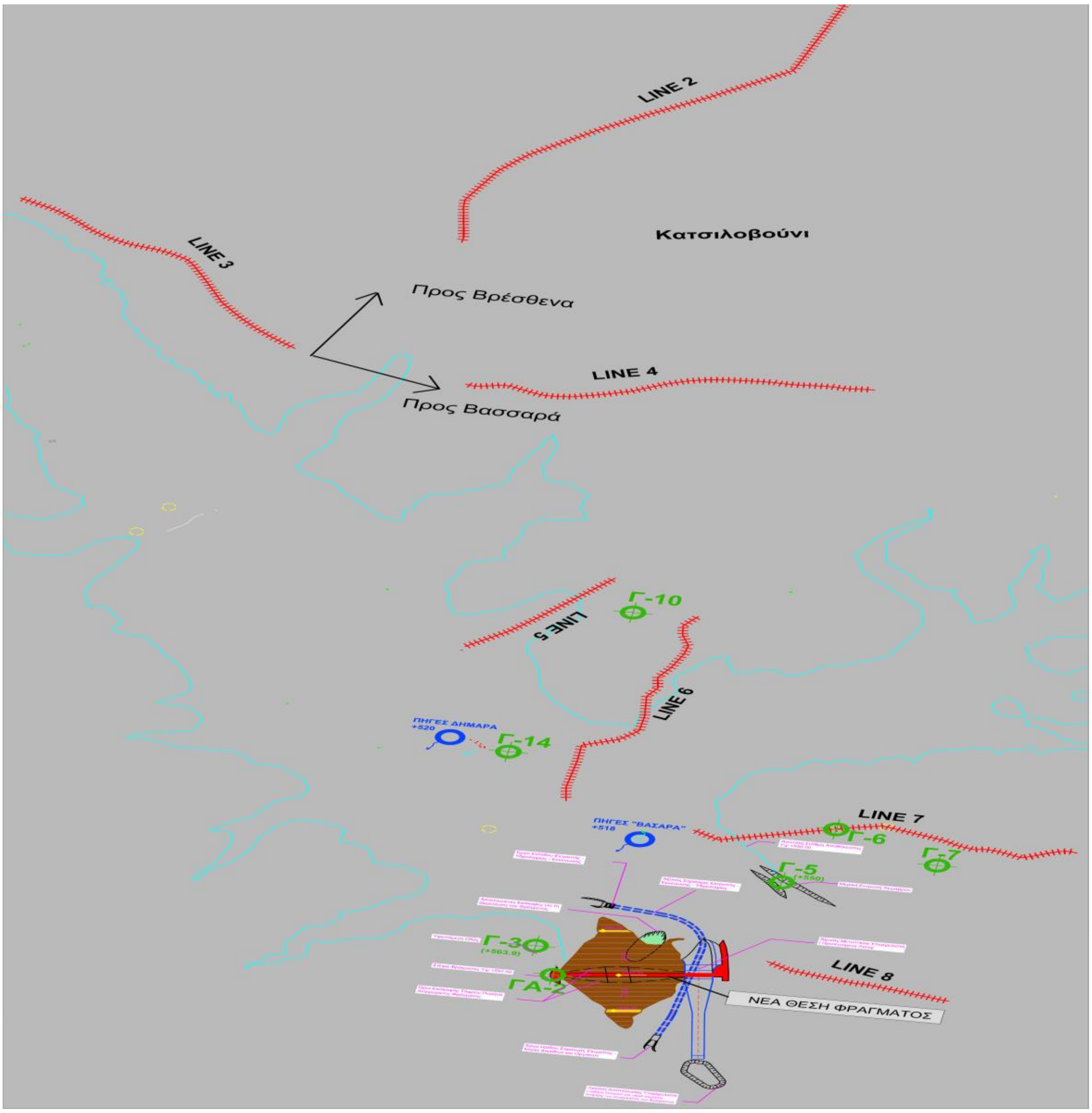
1.6 Στοιχεία γεωτρήσεων

Στη περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν αρκετές γεωτρήσεις, ιδιαίτερα στον χώρο όπου επρόκειτο να κατασκευαστεί το φράγμα, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Στη γραμμή "line 7" υπάρχει η γεώτρηση Γ6 που βρίσκεται ακριβώς πάνω στη γραμμή μελέτης μας και με την οποία έγινε η βαθμονόμηση των γεωφυσικών μας δεδομένων. Υπάρχει επίσης και η γεώτρηση Γ7 που βρίσκεται λίγα μέτρα μακρυά από την γραμμή μελέτης, η οποία όμως μας βοήθησε σημαντικά στη ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων. Το ίδιο συνέβη και με τις υπόλοιπες γεωτρήσεις.


91.20 m.
Υπόμνημα γεώτρησης Γ6
Ζώνη επώθησης (εναλλαγές ασβεστολίθων και φυλλιτών - σχιστολίθων)
Γραφιτικός σχιστόλιθος
Ασβεστόλιθος κορεσμένος (λόγω έντονης καρστικοποίησης και παρουσίας νερού)
Φυλλίτες


95.10 m.
Υπόμνημα γεώτρησης Γ7
Ζώνη επώθησης (εναλλαγές ασβεστολίθων και φυλλιτών - σχιστολίθων)
Σχιστόλιθος - Φυλλίτης με ενδιαστρώσεις διαφοροποιημένης ορυκτολογικής σύστασης
Σχιστόλιθος με φλέβες χαλαζία



Σχήμα 1.3: Χάρτης όπου φαίνονται οι γραμμές μελέτης αλλά και οι θέσεις τον γεωτήσεων και οι δύο κύριες πηγές που εκδηλώνονται εντός της λεκάνης κατάκλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Μέθοδος 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 όπως επίσης 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.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων έχουν σα στόχο τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Η ποσότητα που μετριέται είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη και συγχρόνως χρησιμοποιούμενη από τις ηλεκτρικές μεθόδους, τόσο από τη λειτουργική όσο και από τη θεωρητική της πλευρά. Έχει σκοπό τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, ή καλύτερα την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους, και επομένως από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της δομής.

2.1.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ, είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που κυρίως εστιάζουμε, αλλά και παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση. Ο υπολογισμός της στηρίζεται στο νόμο του Ohm (George Simon Ohm, 1827) : Αν σε ορθογώνια ράβδο με διατομή A και μήκος L διαπεράσει ρεύμα έντασης I, η τάση V ανάμεσα στις άκρες της ράβδου θα είναι :

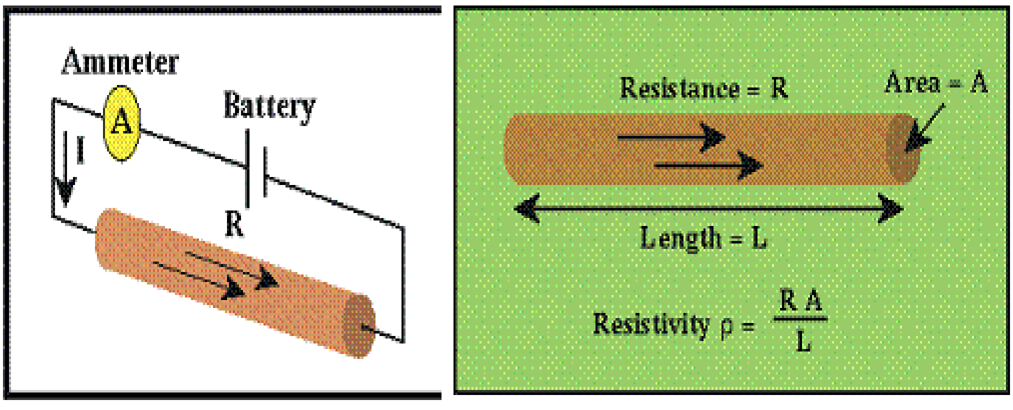
$$\mathbf{V = I*R}$$

Όπου R η ηλεκτρική αντίσταση σε Ω.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση

$$\rho = \frac{\mathbf{RA}}{\mathbf{L}}$$

- **R**: η ηλεκτρική αντίσταση ενός ομοιόμορφου δείγματος του υλικού (μετριέται σε Ω)
- **A**: η διατομή του δείγματος (σε m2)
- **L**: το μήκος του δείγματος (σε m)

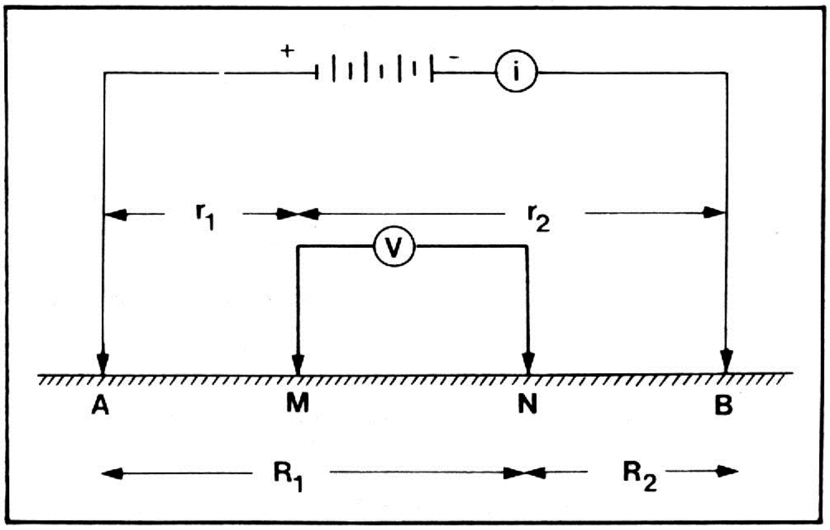


Σχήμα 2.1: Ο νόμος του Ohm σε σχηματική απεικόνιση

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI), είναι το Ωm. Ορισμένες φορές χρησιμοποιείται και η υπομονάδα 1 Ωcm όπου 1 Ωcm = 0,01 Ωm. Το αντίστροφο, σ = 1/ρ, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα το siemens/m.

Το σχήμα 2.2 αντιπροσωπεύει μια τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος AB είναι συνδεδεμένα με ένα αμπερόμετρο για τον υπολογισμό της έντασης του ρεύματος που εισάγεται στο έδαφος, ενώ τα ηλεκτρόδια MN είναι τα ηλεκτρόδια τάσης, που συνδέονται με βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης. Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm προκύπτει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

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



Σχήμα 2.2: Τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

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} Ωm σε ορισμένα ορυκτά όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι 10^{15} Ωm σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και 10^{-1} Ωm χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{8} και 10^{15} Ωm. 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 (Ωm)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Άργιλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
Συμπαγής δολομίτης	>104
Πορώδης δολομίτης	100-1000
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι - Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500
ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	102 –106

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

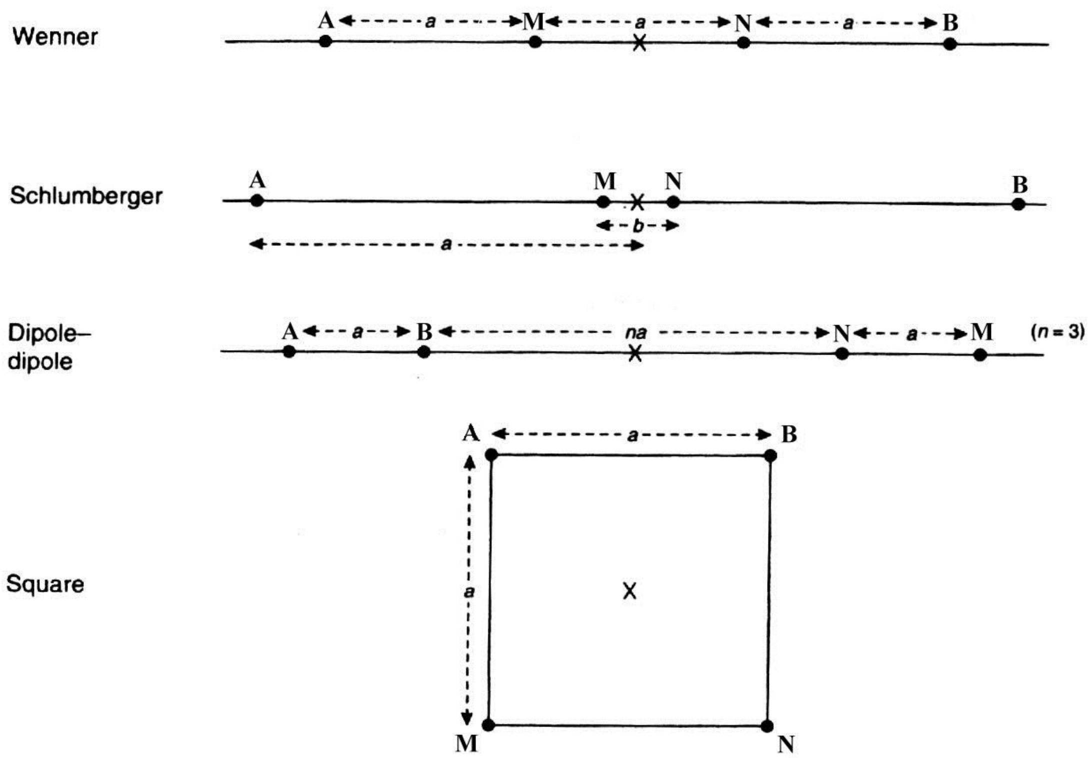
2.1.3 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα. Οι παραπάνω σχέσεις προέκυψαν θεωρώντας ότι τα επιφανειακά στρώματα της Γης είναι ομογενή. Αυτό όμως δεν ισχύει και συνεπώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι σταθερή σε αυτά. Έτσι λοιπόν η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των υλικών στα διάφορα στρώματα.

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

2.1.4 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Υπάρχουν πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στην ύπαιθρο. Υπάρχουν όμως και κάποιοι παράγοντες βάση των οποίων επιλέγουμε τους τρόπους διάταξης των ηλεκτροδίων. Ανάλογα με την περιοχή μελέτης, το μέγεθος των δομών που αναμένονται, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι διάταξης. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές διότι ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα της αντίστασης επαφής, δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στην θέση του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 2.3: Διατάξεις ηλεκτροδίων

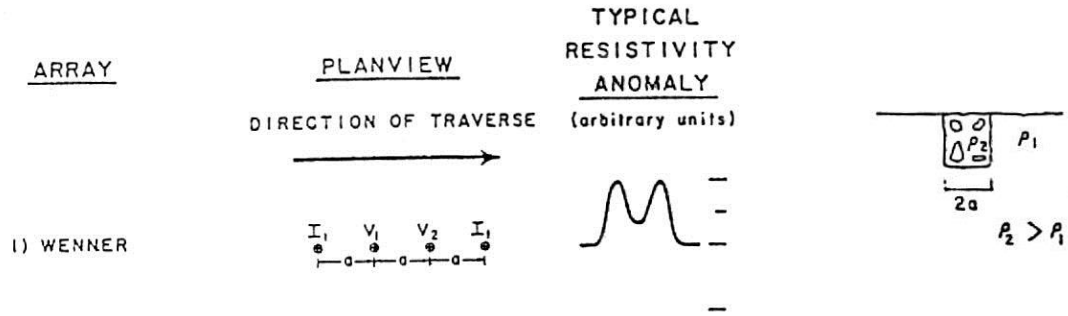
α) <u>Διάταξη Wenner</u>

Στη διάταξη **Wenner** ισχύει ΑΜ = ΜΝ = ΝΒ = α δηλαδή τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha\frac{\Delta V}{I}$$

όπου η ποσότητα 2πα ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής και συμβολίζεται με Κ. Μπορεί να υπολογιστεί εάν οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι γνωστές.

Η διάταξη Wenner είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά λόγω των αρκετών πλεονεκτημάτων. Με τη χρήση ενός πέμπτου ηλεκτροδίου και ενός διακόπτη (rotary switch) το τελευταίο ηλεκτρόδιο μπορεί να απενεργοποιηθεί και να τοποθετηθεί στην αρχή της διάταξης, ενώ ο χειριστής παίρνει τη μέτρηση με τα άλλα τέσσερα ηλεκτρόδια. Μ' αυτόν τον τρόπο κάθε επιπλέον μέτρηση παίρνεται με τη μετακίνηση ενός μόνο ηλεκτροδίου. Ειδάλλως πρέπει να μετακινούνται όλα τα ηλεκτρόδια. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου Wenner είναι το πρόβλημα ερμηνείας εξαιτίας του χαρακτηριστικού σήματος διπλής κορυφής (Σχήμα 2.4) όταν η διάταξη διασχίζει κάθετα γραμμική δομή. Επίσης, είναι δύσκολο να διαχωριστούν γειτονικές δομές.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα διάταξης ηλεκτροδίων με την αντίστοιχη ανωμαλία που παρατηρείται εξαιτίας μιας ιδεατής δομής που φαίνεται στο σχήμα

β) <u>Διάταξη Schlumberger</u>

Στη διάταξη Schlumberger, τα ηλεκτρόδια ρεύματος Α και Β βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού Μ και Ν είναι ανάμεσα στα Α και Β και σε απόσταση b από το κέντρο της διάταξης. Έτσι έχουμε AB = 2L και MN = 2b . Η απόσταση 2b μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση 2L μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση για την διάταξη Schlumberger υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2\,b}\frac{\Delta V}{\mathrm{I}}$$

Όπου $\pi L^2/2b$ ο γεωμετρικός συντελεστής.

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη. Αυτό κυρίως οφείλεται στο μικρό χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων. Αντίθετα οι με τις υπόλοιπες διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική διασκοπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει επίσης στον περιορισμό των πιθανοτήτων ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές γεωλογικές ασυνέχειες. Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger για ηλεκτρική διασκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά. Αντίθετα η απόσταση για τα ηλεκτρόδια ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

γ) <u>Διάταξη διπόλου – διπόλου</u>

Στη διάταξη διπόλου – διπόλου τα ηλεκτρόδια σχηματίζουν ένα δίπολο ρεύματος όπου το ανάπτυγμα παραμένει ίδιο. Αντίστοιχα τα ηλεκτρόδια δυναμικού σχηματίζουν το δίπολο δυναμικού με ανάπτυγμα α. Η απόσταση των διπόλων είναι nα (ακέραιο πολλαπλάσιο του α). Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

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

Όπου πn(n+1)(n+2)α ο γεωμετρικός συντελεστής.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διάταξης αποτελεί η απόσταση 2nα, 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.

2.1.5 Παράγοντες επιλογής 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 αγώγιμου 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 αγώγιμου στρώματος (Επίδραση του επιδερμικού φαινομένου)

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

5. Βάθος διασκόπησης

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

6. Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου

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

7. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας

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

2.1.6 Ηλεκτρική τομογραφία

2.1.6.1 Θεωρία

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας και τα αποτελέσματά της μπορούν να συγκριθούν με ακρίβεια με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων. Στην ηλεκτρική τομογραφία, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. 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_α, 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. Πολύ σημαντικός είναι ο καθορισμός της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος πριν να ξεκινήσει η χαρτογράφηση, καθώς από αυτή την απόσταση εξαρτάται το βάθος μέχρι το οποίο οι σχηματισμοί στο υπέδαφος επιδρούν στη διαμόρφωση της τιμής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_α.

2.1.6.2 Διεξαγωγή της ηλεκτρικής τομογραφίας

Κατά την εκτέλεση των ηλεκτρικών τομογραφιών ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Λαμβάνεται μέριμνα ώστε η ανάπτυξη των γραμμών ρεύματος να γίνεται σε ευθεία.
- Τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια κατά μήκος της γραμμής μελέτης, όπου το κάθε ηλεκτρόδιο απέχει απόσταση α από το άλλο.
- Τα ηλεκτρόδια συνδέονται με πολύκλωνα καλώδια, που καταλήγουν στο όργανο μέτρησης.
- Συνδέεται το όργανο με τα καλώδια, και τοποθετείται στο τέλος της γραμμής μελέτης.

- Ανάμεσα στο όργανο μέτρησης και στα πολύκλωνα καλώδια συνδέονται δύο αυτόματοι εναλλάκτες ηλεκτροδίων, οι οποίοι καθορίζουν ποια ηλεκτρόδια θα είναι ενεργά κατά την διάρκεια κάθε μέτρησης.
- Γίνεται έλεγχος επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος και όπου η επαφή αυτή δεν είναι ικανοποιητική, χρησιμοποιείται αλατόνερο.
- Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, όπου λαμβάνονται συγκεκριμένες τιμές ρεύματος i και δυναμικού V, για κάθε τέσσερα διαφορετικά ηλεκτρόδια.

Σχήμα 2.5: Εξοπλισμός ηλεκτρικής τομογραφίας κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων

Στην ηλεκτρική τομογραφία της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Wenner – Schlumberger. 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 α και όλη η διάταξη μετακινείται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_\alpha = 2\pi\alpha\frac{\Delta V}{I}$$

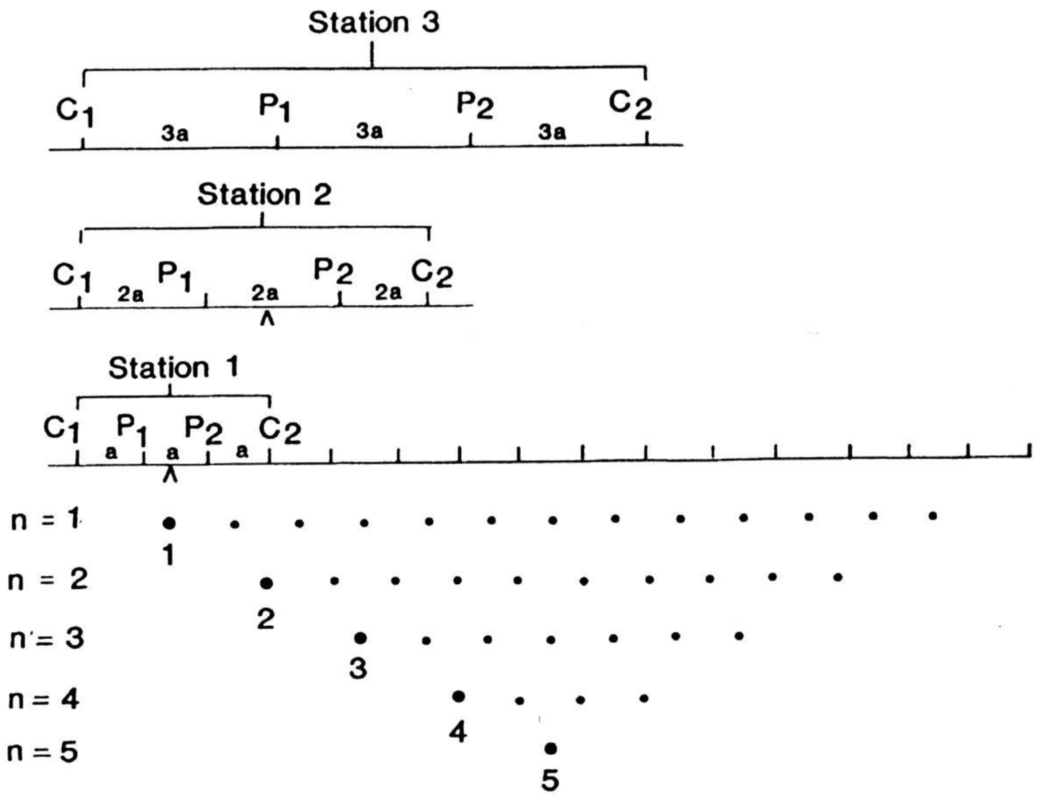
Στη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα βάθη, αυξάνεται σταδιακά η απόσταση σε 2α,3α κ.ο.κ.

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:

$$\rho_\alpha = \frac{\pi L^2}{2b}\frac{\Delta V}{I}$$

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 2.6: Σχηματική παράσταση κατασκευής ψευδοτομής

Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται μια προσεγγιστική εικόνα 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 ηλεκτρικές αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό. Οι θεωρητικές αυτές τιμές μαζί με τις πραγματικές 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. 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 Αντιστροφή των δεδομένων

2.1.7.1 Βασική θεωρία της αντιστροφής

Όλες οι μέθοδοι αντίστροφης επιδιώκουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός μοντέλου του υπεδάφους, το οποίο αναπαράγει τα μετρούμενα δεδομένα κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς. Για τις μεθόδους αντιστροφής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του κάθε κελιού ή στοιχείου του μοντέλου, ενώ τα μετρούμενα μεγέθη είναι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Αν θεωρηθεί ότι **m** είναι το διάνυσμα που περιέχει το σύνολο των παραμέτρων του μοντέλου, δηλαδή η φυσική παράμετρος της οποίας επιδιώκεται ο υπολογισμός (π.χ. πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση), και το **d** είναι διάνυσμα που περιέχει το σύνολο των παρατηρούμενων τιμών της απόκρισης του μοντέλου (π.χ. τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) τότε η διαδικασία επίλυσης του ευθέως προβλήματος **F** (γραμμικό ή μη-γραμμικό) συνδέει τις παραμέτρους του μοντέλου (**m**) με τα παρατηρούμενα δεδομένα (**d**). Μαθηματικά αυτό μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω συνάρτηση:

$$d = \mathrm{F}(m) \tag{2.1}$$

Αντίστοιχα, η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος αφορά στην εύρεση των παραμέτρων του μοντέλου, η οποία εκφράζεται με την γενική σχέση:

$$m = \mathrm{F}^{-1}(d) \tag{2.2}$$

Το $\mathbf{F}^{-1}$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση που συνδέει το γνωστό διάνυσμα των παρατηρήσεων με το άγνωστο διάνυσμα των παραμέτρων του μοντέλου.

Το βασικότερο πρόβλημα που ενδέχεται να αντιμετωπιστεί κατά την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος είναι να μην υπάρχει η αντίστροφη συνάρτηση $\mathbf{F}^{-1}$. Σ' αυτήν την περίπτωση το αντίστροφο πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως ασθενώς ορισμένο ή "αόριστο", πράγμα που σημαίνει ότι ο προσδιορισμός των φυσικών παραμέτρων, οι οποίες ερμηνεύουν την παρατήρηση και υπακούν δεδομένους φυσικούς περιορισμούς, δεν οδηγεί απαραίτητα σε μοναδική λύση. Επιπρόσθετα, μικρές αλλαγές στα πραγματικά δεδομένα **d** μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες μεταβολές στο διάνυσμα των λύσεων **m**.

Γενικά στην ηλεκτρική τομογραφία, για την μέθοδο επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος χρησιμοποιούνται αλγεβρικές μέθοδοι όπου γίνεται εκτίμηση των παραμέτρων μοντέλου που αναπαράγει τις μετρούμενες παρατηρήσεις. Στην ουσία ελαχιστοποιείται το σφάλμα μεταξύ της απόκρισης του μοντέλου και των παρατηρήσεων, συνήθως με την χρήση της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων. Τα προβλήματα της αντιστροφής που αντιμετωπίζονται στην γεωφυσική είναι είτε γραμμικά, είτε μη γραμμικά. Στην περίπτωση μας όπου το πρόβλημα είναι μη γραμμικό, η λύση του προβλήματος προσεγγίζεται από σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται επαναληπτικά, μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος.

2.1.7.2 Επίλυση του αντίστροφου προβλήματος

Εάν η συνάρτηση **F(m)** της εξίσωσης d = F(m) αναπτυχθεί σε σειρά Taylor, γύρω από ένα αρχικό μοντέλο $\mathbf{m_0}$ (πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση) και παραλειφθούν οι όροι μεγαλύτερης τάξης, προκύπτει ότι:

$$F(m) = F\left(m_0\right) + \frac{\partial F\left(m_0\right)}{\partial m} \bullet \Delta m + \ldots \approx F\left(m_0\right) + J\Delta m \tag{2.3}$$

Όπου: $\Delta m = m - m_0$

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i(m)}{\partial m_j} \quad , \text{ i=1,2…,M, j=1,2,…,N}$$

M ο συνολικός αριθμός των δεδομένων

N ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων

το σύμβολο “ • ” υποδηλώνει πολλαπλασιασμό πινάκων ή διανυσμάτων

Ο πίνακας J ονομάζεται Ιακωβιανός πίνακας ή πίνακας ευαισθησίας, και εκφράζει το πόσο θα μεταβληθεί η τιμή μιας μέτρησης (τιμή της φαινόμενης αντίστασης) αν μεταβληθεί η ιδιότητα μιας παραμέτρου του μοντέλου (πραγματική αντίσταση).

Από την εξίσωση (2.3) προκύπτει η σχέση:

$$J \bullet \Delta m = d - F(m_0) \Leftrightarrow J \bullet \Delta m = \Delta d \tag{2.4}$$

Όπου $\mathbf{\Delta d = d - F(m_0)}$ είναι η διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων, που αντιστοιχούν στο αρχικό μοντέλο $\mathbf{m_0}$. Έτσι η επίλυση του αρχικού μη γραμμικού προβλήματος της εξίσωσης (2.1) ανάγεται στην επαναληπτική επίλυση του γραμμικού προβλήματος της εξίσωσης (2.4). Θεωρώντας ότι το διάνυσμα των δεδομένων **d** (φαινόμενες αντιστάσεις) συμπεριλαμβάνουν τυχαία ή συναφή σφάλματα **e**, η διαφορά μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών τιμών **Δd** της εξίσωσης 2.4 μπορεί ξαναγραφτεί ως εξής:

$$\Delta d = J \bullet \Delta m + e \quad \text{ή καλύτερα} \quad e = \Delta d - J \bullet \Delta m \qquad (2.5)$$

Το διάνυσμα **e** στην ουσία περιέχει τα τυχαία ή/και συναφή σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Επίσης, συμπεριλαμβάνει σφάλματα που οφείλονται στις παραμέτρους του μοντέλου ή ακόμα που προέρχονται από την αποκοπή των όρων ανώτερης τάξης της σειράς Taylor (εξίσωση 2.3). Η συνάρτηση 2.5 ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση, και ο στόχος της διαδικασίας της αντιστροφής είναι ελαχιστοποίηση της.

Η συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση ορίζεται από την σχέση:

$$\Phi = e^T \bullet e = (\Delta d - J \bullet \Delta m)^T (\Delta d - J \bullet \Delta m) \qquad (2.6)$$

όπου ο εκθέτης “ T ” υποδηλώνει ανάστροφο πίνακα ή διάνυσμα.

Στην παραπάνω σχέση το σφάλμα είναι συνάρτηση των παραμέτρων του μοντέλου. Η τιμή του **Φ** γίνεται ελάχιστη όταν η πρώτη του παράγωγος σε σχέση με τις αγνώστους (**Δm**) μηδενίζεται, οπότε

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Delta m} = \frac{\partial \left| (\Delta d - J \bullet \Delta m)^{\mathrm{T}} (\Delta d - J \bullet \Delta m) \right|}{\partial \Delta m} \qquad (2.7)$$

Απλοποιώντας την εξίσωση 2.7 προκύπτει το ακόλουθο σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$-\Delta d \bullet J^T + J^T \bullet J \bullet \Delta m = 0 \qquad (2.8)$$

Ο όρος **Δm** όμως περιγράφει την διαφορά του μοντέλου **m** από το αρχικό $\mathbf{m_0}$, ενώ ο όρος **Δd** την διαφορά μεταξύ των πραγματικών **d** και συνθετικών δεδομένων $\mathbf{F(m_0)}$:

$$\Delta m = m - m_0$$

$$\Delta d = d - F(m_0)$$

Και επιλύοντας την εξίσωση 2.8 ως προς το διάνυσμα των αγνώστων **m** προκύπτει:

$$m = (J^T \bullet J)^{-1} \bullet \left(J^T \bullet d - F(m_0)\right) + m_0 \qquad (2.9)$$

Δεδομένου ότι η (2.5) προέκυψε προσεγγιστικά από τη μη γραμμική σχέση (2.1), θα πρέπει να καθοριστεί επαναληπτικός αλγόριθμος επίλυσης του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος. Έστω ότι κατά την **k** επανάληψη, η εκτίμηση του μοντέλου των φυσικών παραμέτρων είναι $\mathbf{m_k}$, τότε:

- Υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης αντίστασης και του χρόνου πρώτων αφίξεων $\mathbf{F(m_k)}$ και ο Ιακωβιανός πίνακας $\mathbf{J_k}$ για την κατανομή των φυσικών παραμέτρων $\mathbf{m_k}$, μέσω της επίλυσης του ευθέως προβλήματος.
- Υπολογίζεται το καινούριο βελτιωμένο μοντέλο $\mathbf{m_{k+1}}$ από την 2.9, όπου το αρχικό μοντέλο ($\mathbf{m_0}$) σε κάθε επανάληψη αντιστοιχεί στο μοντέλο $\mathbf{m_k}$, ενώ το βελτιωμένο μοντέλο $\mathbf{m_{k+1}}$ αντιστοιχεί στο τελικό αποτέλεσμα της εξίσωσης:

$$m_{k+1} = (J^T \bullet J)^{-1} \bullet \left(J^T \bullet d - F(m_k)\right) + m_k \qquad (2.10)$$

- Το καινούριο βελτιωμένο μοντέλο $\mathbf{m_{k+1}}$ εισάγεται ως αρχικό μοντέλο και επιλύεται ξανά το ευθύ πρόβλημα για το καινούριο βελτιωμένο μοντέλο παραμέτρων αυτήν την φορά.
- Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν κάποια προκαθορισμένα κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού.

2.1.7.3 Αποτίμηση αποτελεσμάτων της αντιστροφής

Το τελευταίο στάδιο κατά την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος αφορά την αξιολόγηση του σφάλματος και την εκτίμηση της αξιοπιστίας του ανακατασκευασμένου μοντέλου. Έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγίσεις και μεθοδολογίες που αφορούν στην στατιστική επεξεργασία και αξιολόγηση των σφαλμάτων, τα οποία αποτελούν συνήθως και κριτήριο για τον τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας που περιγράφηκε προηγουμένως. Τα πιο δημοφιλή στατιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται συνήθως στην αποτίμηση των αποτελεσμάτων του αντίστροφου προβλήματος είναι το μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα και ο πίνακας διακριτικής ικανότητας.

Μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα (RMS): Αποτελεί ίσως το πιο διαδεδομένο κριτήριο σύγκλισης στους αλγόριθμους αντιστροφής, και εκφράζει την διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων. Συνήθως το σφάλμα αυτό ανάγεται σε ποσοστιαίες μονάδες προκειμένου να είναι ανεξάρτητο από μέγεθος των τιμών των πειραματικών μετρήσεων. Το μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη από την σχέση:

$$\%RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{M} \frac{100\left(d_i - F\left(m_i\right)\right)^2}{\left(d_i\right)^2}}{M}} \qquad (2.11)$$

όπου M είναι ο αριθμός των μετρήσεων. Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν αρχίζει να αποκλίνει, δηλαδή το σφάλμα μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει συνήθως στις περιπτώσεις αρκετά θορυβωδών μετρήσεων. Όταν η σχετική μεταβολή των σφαλμάτων μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων της αντιστροφής είναι πολύ μικρή τότε η συνέχιση της επαναληπτικής διαδικασίας δεν προσφέρει επιπλέον πληροφορίες στο τελικό μοντέλο παραμέτρων (μικρός ρυθμός σύγκλισης) και τερματίζεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

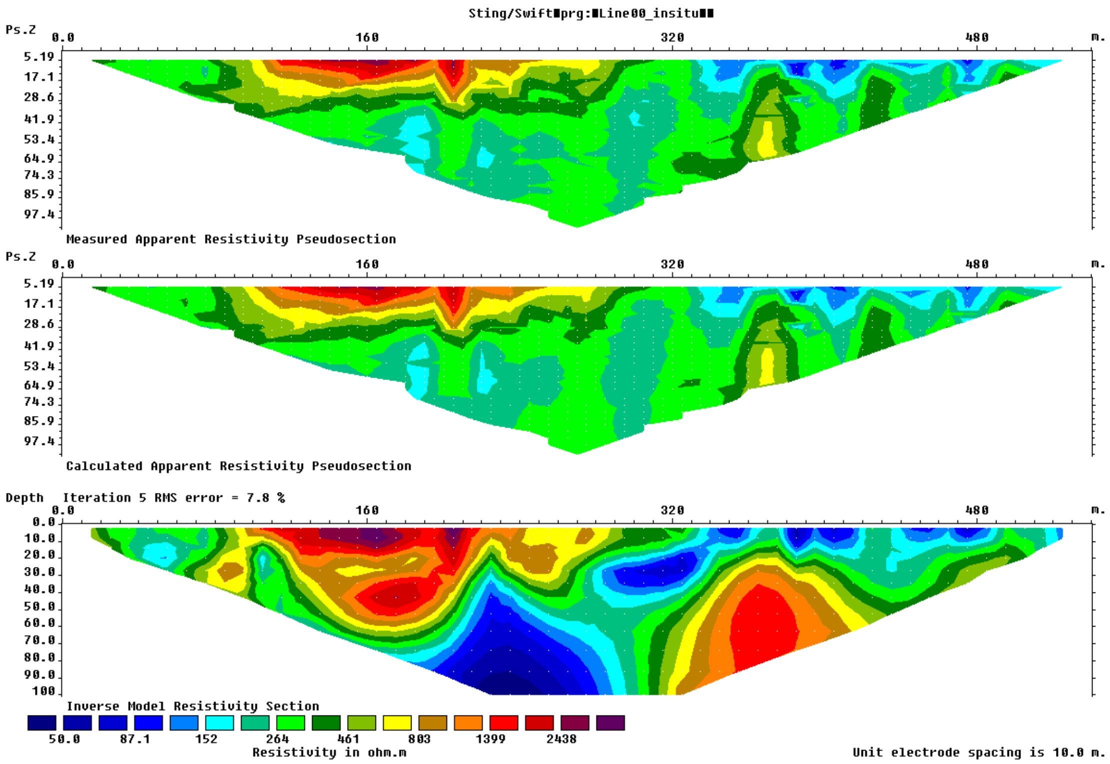
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ επιτυγχάνεται με την χρήση του λογισμικού πακέτου **Res2Dinv**. Στο πρόγραμμα αυτό θεωρείται ότι κάθε τομή του υπεδάφους διαιρείται σε τμήματα σχήματος παραλληλόγραμμου. Η πραγματική ειδική αντίσταση θεωρείται σταθερή σε κάθε τμήμα. Ξεκινώντας από αρχικό μοντέλο το οποίο προκύπτει θέτοντας κάποιες τιμές για την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό και συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές της φαινόμενης αντίστασης. Χρησιμοποιείται μη γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων για την αντιστροφή των δεδομένων, τα οποία συλλέχθησαν με τη διάταξη Wenner – Schlumberger. 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 (Σχήμα 3.1) . 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 γεωηλεκρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Κάνοντας διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα, δηλαδή η 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, δηλαδή όταν η επαναληπτική διαδικασία παρουσιάζει σύγκλιση. Επίσης, το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής των υψόμετρων για καλύτερη προσέγγιση του πραγματικού μοντέλου του υπεδάφους. Σε όλες τις γραμμές μελέτης εισήχθηκαν τα απόλυτα υψόμετρα.



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

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων στην Κελεφίνα χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μεθόδους αντιστροφής. Η πρώτη είναι η μέθοδος **Α**: κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης (Default, Smoothness constrained least - squares method) και η δεύτερη είναι η μέθοδος **Β**: με την χρήση της νόρμας L1 (Robust).

Πιο αναλυτικά η μέθοδος Α (κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης), υπαγορεύει ότι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μοντέλου αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια παραλλαγή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, που βασίζεται στην τεχνική της βελτιστοποίησης του Quasi Newton. 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 ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο.

Η μέθοδος Β (με την χρήση της νόρμας L1), χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το υπεδάφους αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς που ναι 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 ηλεκτρικής αντίστασης.

3.2 Ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων

Διασκοπήθηκαν οκτώ γραμμές μελέτης με σκοπό την απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή όπου επρόκειτο να κατασκευασθεί μελλοντικά φράγμα. Το συνολικό μήκος διασκόπησης έφτασε τα 4800m και το μέγιστο βάθος στα 120m. Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τα χαρακτηριστικά της κάθε γραμμής μελέτης ηλεκτρικής τομογραφίας:

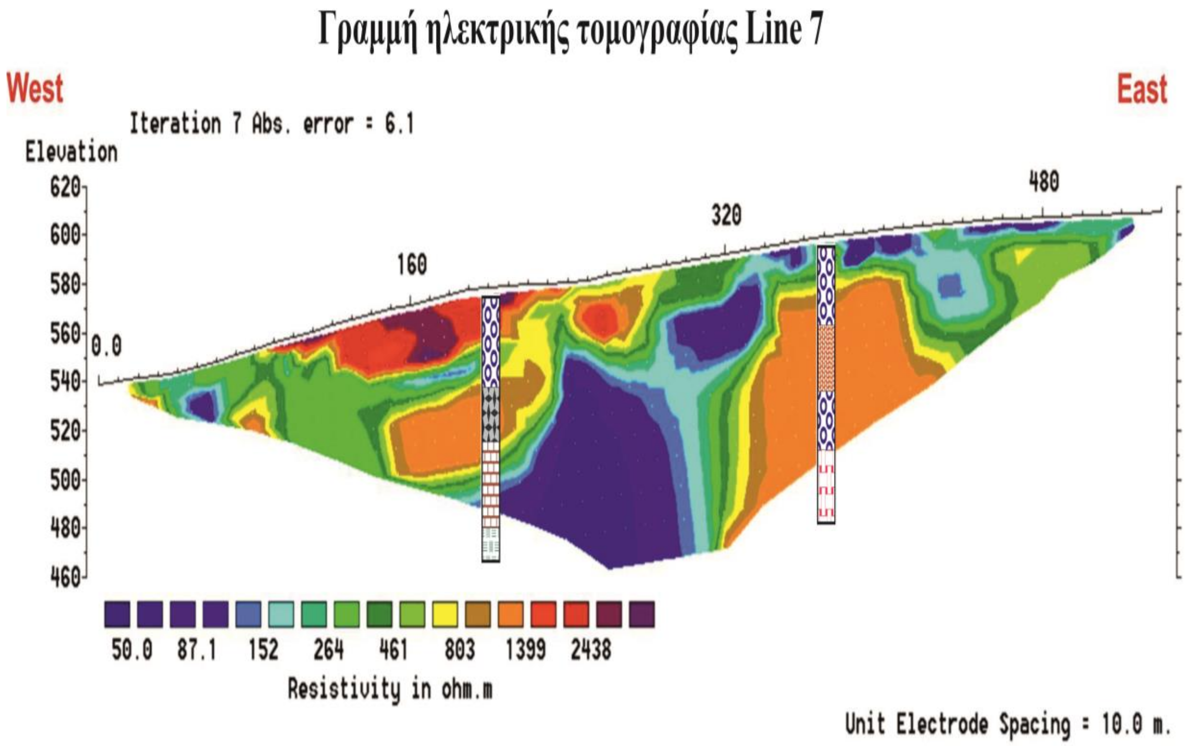
Γραμμή Μελέτης	**Μέγιστο Βάθος Διασκόπησης (m)**	**Μήκος (m)**	**Ισαπόσταση Σταθμών (m)**
1	120	660	10
2	120	1440	10
3	120	540	10
4	120	540	10
5	55	270	10
6	120	540	10
7	120	540	10
8	55	270	10

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά γραμμών μελέτης ηλεκτρικής τομογραφίας

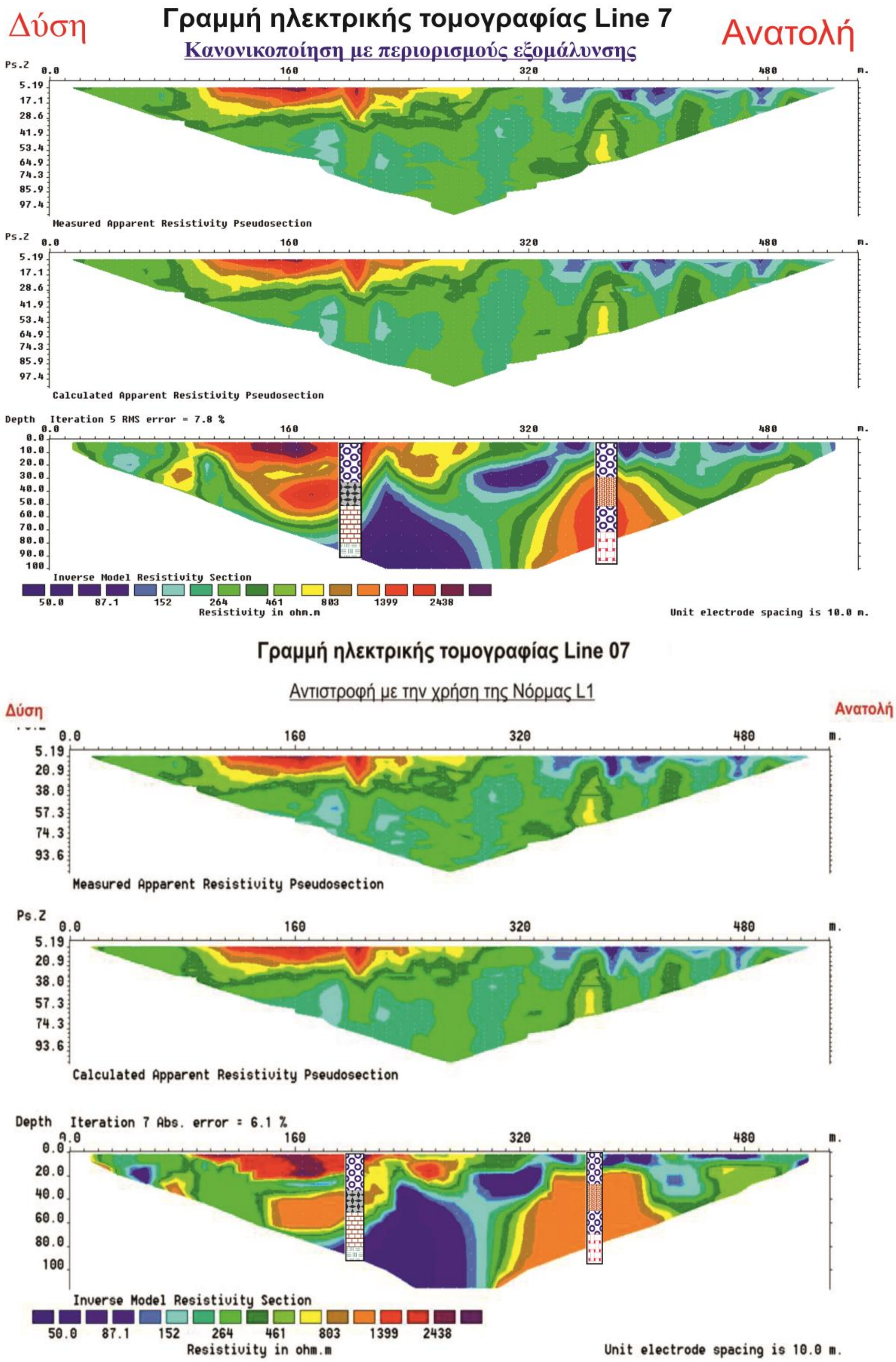
Σύμφωνα με την γραμμή μελέτης 7 και τις γεωτρήσεις Γ6 και Γ7 με τις οποίες έγινε η βαθμονόμηση των γεωφυσικών δεδομένων, ο φυλλιτικός σχηματισμός παρουσιάζει τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται στα 50-150 Ωm, ο σχιστολιθικός σχηματισμός με ασβεστολιθικές ενστρώσεις 1400-2000 Ωm (στεγνός) και <1400 το στρώμα σχιστολίθων – φυλλιτών. Ο κατακερματισμένος γραφιτικός σχιστόλιθος τιμές 150-200 Ωm. Ο ασβεστολιθικός σχηματισμός της περιοχής, που κατά κανόνα υπέρκειται του φυλλιτικού - σχιστολιθικού σχηματισμού του υποβάθρου, φαίνεται να έχει πάνω από 2400 Ωm ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Παρουσία νερού και λόγω της έντονης καρστικοποίησής του, ο ασβεστόλιθος έχει 300-800 Ωm ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Τέλος, ο υδροφόρος φαίνεται να συναντάται σε υψόμετρα περίπου μεταξύ 480 και 520 μέτρα.

Κωδικοποίηση	**Γεωλογικός σχηματισμός**
I	Ασβεστόλιθος
II	Ασβεστόλιθος κορεσμένος
III	Σχιστόλιθος – Φυλλίτης με ενδιαστρώσεις διαφοροποιημένης ορυκτολογικής σύστασης ή φυλλιτικός σχηματισμός μέτριας αποσάθρωσης με πυκνό δίκτυο διακλάσεων εξαιτίας Τεκτονικής δράσης
IV	Κατακερματισμένος γραφιτικός σχιστόλιθος
V	Φυλλίτες
VI	Ζώνη επώθησης (εναλλαγές ασβεστολίθων και φυλλιτών – σχιστολίθων)

Πίνακας 3.2: Κωδικοποίηση γεωλογικών σχηματισμών



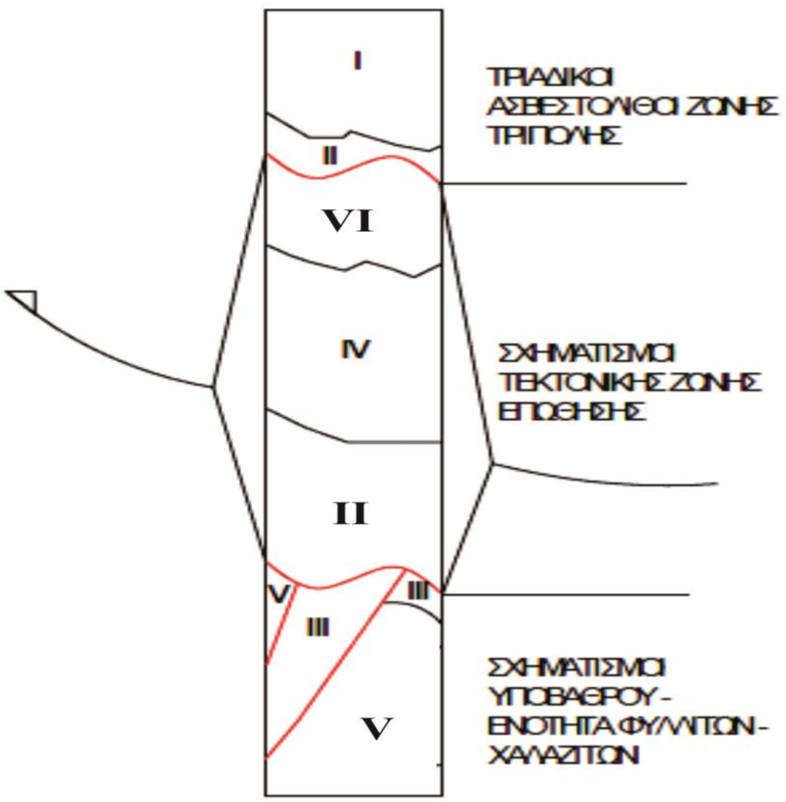
Σχήμα 3.1α: Γεωηλεκτρική τομή Line 7 μετά από εισαγωγή του απόλυτου υψομέτρου αλλά και των γεωτρήσεων.



Σχήμα 3.1 β), γ): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 7 με την εισαγωγή των γεωτρήσεων

3.3 Συναξιολόγηση γεωφυσικών – γεωλογικών και γεωτεχνικών δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και ερμηνεύονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας για κάθε γραμμή μελέτης ξεχωριστά, συναξιολογώντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία (γεωφυσικά – γεωλογικά – γεωτεχνικά).



Σχήμα 3.2: Απλοποιημένη στρωματογραφική ακολουθία των γεω-ηλεκτρικά αναγνωρισθέντων στρωμάτων βάσει του Πίνακα 3.2

Η στρωματογραφική στήλη που παρατίθεται στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζει την αλληλουχία των γεωηλεκτρικά διακριθέντων σχηματισμών. Τόσο το πάχος των γεωηλεκτρικών στρωμμάτων που συνδέονται με τεκτονική δράση (ρήματα ή ζώνη επώθησης) όσο και ή παρατιθέμενη στρωματογραφική τους σειρά διαφοροποιείται αρκετά από περιοχή σε περιοχή δεδομένου ότι η θέση τους δεν ακολουθεί κανόνες ιζηματογένεσης αλλά τεκτονικής.

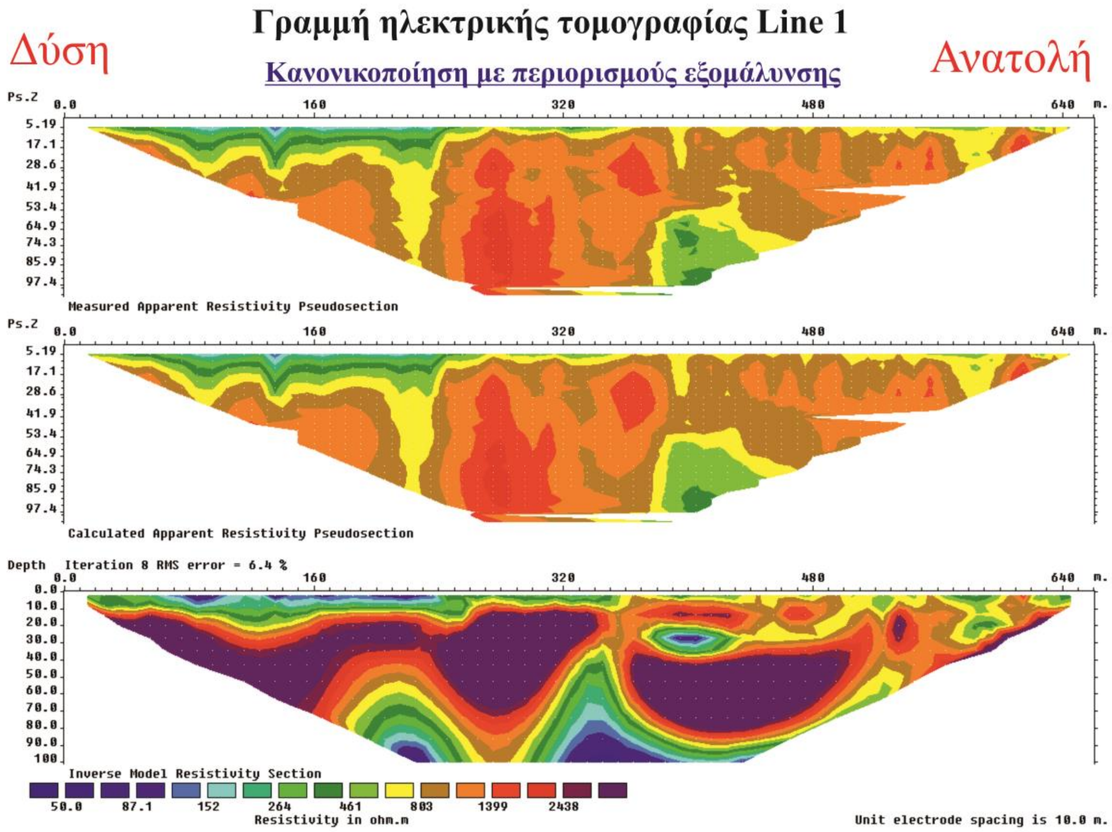
3.3.1 Γεωηλεκτρική τομή 01

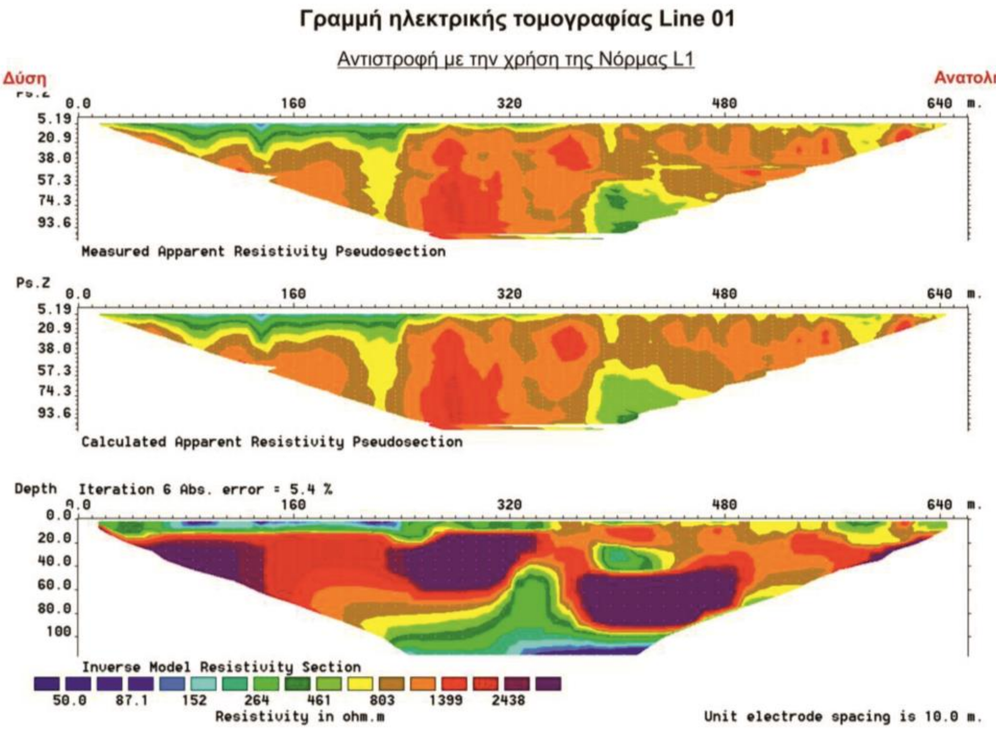
Η γεωηλεκτρική τομή 01 έχει μήκος 660m και η διεύθυνσή της είναι Δύση – Ανατολή. Το πρώτο ηλεκτρόδιο δηλαδή τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 660m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 120m. Παρακάτω παρατίθενται οι γεωηλεκτρικές τομές της συγκεκριμένης γραμμής και με τις δύο μεθόδους αντιστροφής. Επίσης παρατίθεται μια ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή όπου έχουν εισαχθεί και τα απόλυτα υψόμετρα του σημείου εκτέλεσης αυτής.

Οι υψηλές έως πολύ υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που παρατηρούνται κατά μήκος της γραμμής 1, από την επιφάνεια του εδάφους έως το απόλυτο υψόμετρο των +550m περίπου, συσχετίζονται με τους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς που έχουν χαρτογραφηθεί στην περιοχή και δομούν τους ορεινούς όγκους της στα ανάντη και κατάντη αντίστοιχα της γραμμής μελέτης.

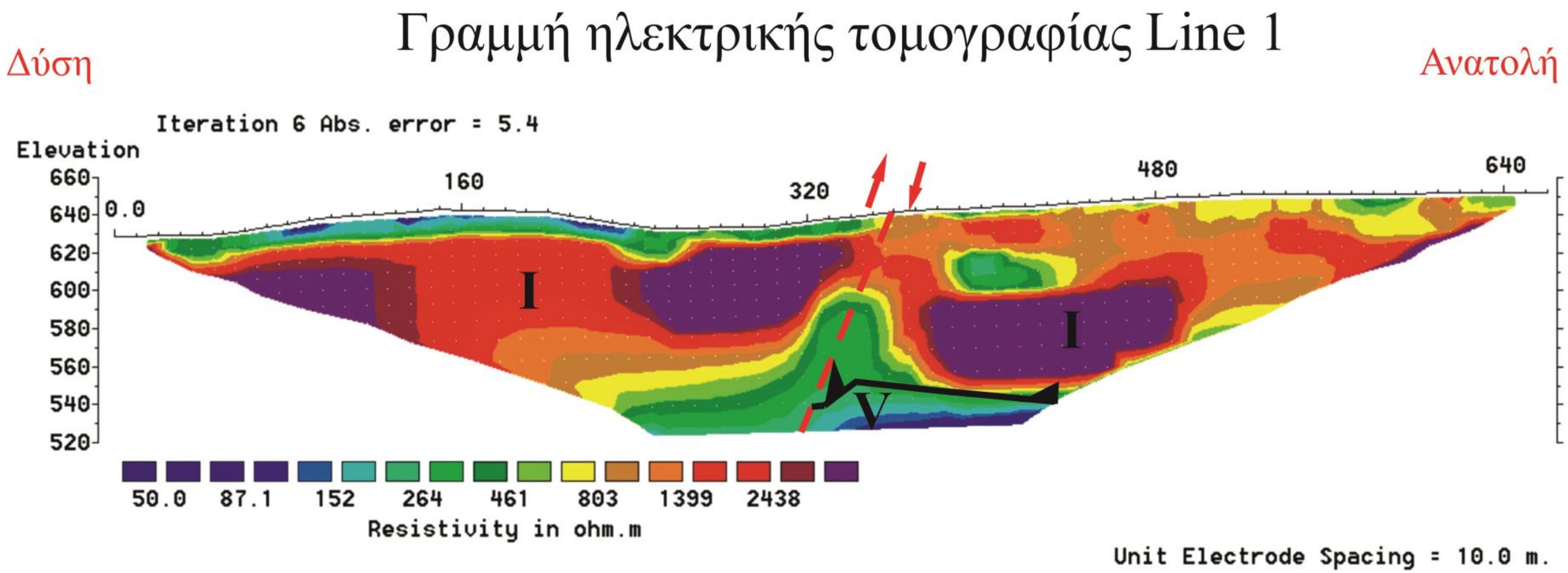
Οι χαμηλότερες τιμές (300-500Ωm) που εμφανίζονται στο μέσο περίπου της γραμμής (περί τα 360m περίπου από την αρχή της) συνδέονται με τη ρηξιγενή ζώνη που έχει αναγνωριστεί κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση στην περιοχή, διεύθυνσης περίπου Α – Δ και φορά κλίσης προς Ν.

Στα κατώτερα τμήματα του ανατολικού μέρους της γραμμής μελέτης (ανερχόμενο σκέλος ρήγματος) εκτιμάται η εμφάνιση του υποκείμενου τεκτονικά φυλλιτικού υποβάθρου (με χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της τάξης των 50-150Ωm), γεγονός που επιβεβαιώνει και τη διεύθυνση κλίσης του ρήγματος που συναντήθηκε.





Σχήμα 3.3.1 α), β): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 1. 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 3.3.1 γ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 01 με βάση τον Πίνακα 3.2

3.3.2 Γεωηλεκτρική τομή 02

Η γεωηλεκτρική τομή 02 έχει μήκος 1440m και η διεύθυνσή της είναι Νοτιοδυτική - Βορειοανατολική. Το πρώτο ηλεκτρόδιο δηλαδή τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 1440m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 120m. Είναι αρκετά μεγάλη γραμμή μελέτης, με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες διακυμάνσεις των ηλεκτρικών αντιστάσεων.

Η μεταβολή των ειδικών αντιστάσεων που παρατηρείται κατά την οριζόντια διεύθυνση, στα τελευταία 200m της γραμμής αντιστοιχεί στην επώθηση του ασβεστολιθικού καλύμματος επί των φυλλιτικών σχηματισμών του υποβάθρου.

Πιο συγκεκριμένα οι πολύ υψηλές ειδικές αντιστάσεις (>2500Ωm) που μετρήθηκαν στα πρώτα 1240m της γραμμής και για μέγιστο βάθος περί τα 20m από την επιφάνεια αντιστοιχούν στον συμπαγή ασβεστολιθικό σχηματισμό, ενώ αντίστοιχα οι χαμηλές αντιστάσεις στα τελευταία μέτρα αντιστοιχούν στον φυλλιτικό – σχιστολιθικό σχηματισμό του υποβάθρου. Η συγκεκριμένη επαφή (τεκτονική) έχει αναγνωριστεί στην θέση αυτή και κατά τη διάρκεια της γεωλογικής χαρτογράφησης με φορά κλίσης Ν-ΝΔ/κή.

Η διακύμανση στις τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του φυλλιτικού σχηματισμού (50-400Ωm) μπορούν να δικαιολογηθούν τόσο από τις διαφορές στη σύστασή τους όσο και από την τεκτονική τους καταπόνηση, ιδιαίτερα πλησίον της επιφάνειας επώθησης του ασβεστολιθικού καλύμματος της Τρίπολης. Αντίστοιχα, και οι μεγάλες διακυμάνσεις των μετρήσεων με το βάθος στους ασβεστολίθους που συναντώνται στο μεγαλύτερο τμήμα της γραμμής, μπορούν να δικαιολογηθούν λόγω τεκτονικών ή/και υδρογεωλογικών παραγόντων.

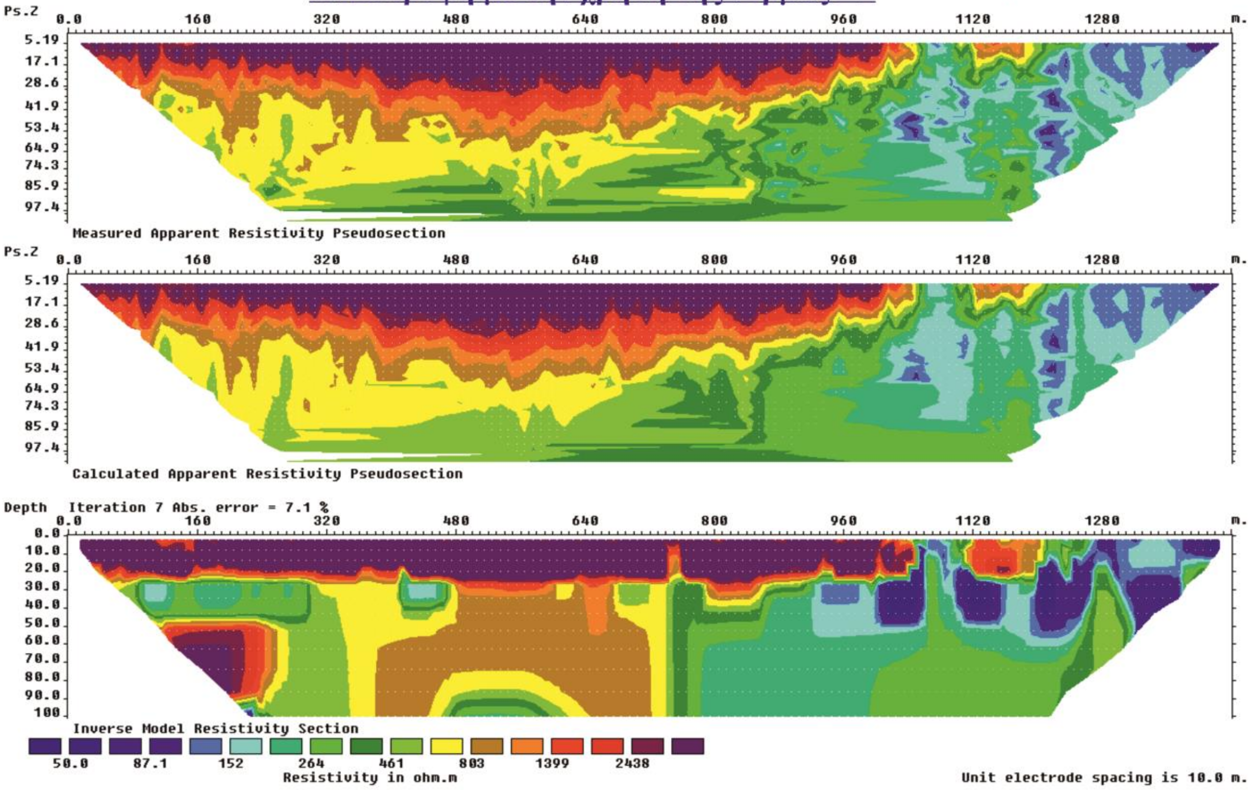
Πιο συγκεκριμένα, οι αρκετά χαμηλότερες τιμές αντιστάσεων μεταξύ των 300 και 850m (από την αρχή της γραμμής) και σε βάθη μεγαλύτερα των 20m περίπου από την επιφάνεια, συνδέονται με ρηξιγενή ζώνη που διέρχεται στα ανάντη της γραμμής, με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, παράλληλα σχεδόν και πλησίον της γραμμής μελέτης στο τμήμα αυτό. Το ρήγμα αυτό φαίνεται να τέμνει τη γραμμή στο μέσο της περίπου (~750m από την αρχή), όπου παρατηρείται και η απότομη διακοπή των επιφανειακών υψηλών τιμών.

Η διακύμανση των τιμών ειδικής αντίστασης μπορεί να δικαιολογηθεί επίσης λόγω έντονης καρστικοποίησης των ανθρακικών σχηματισμών και πιθανής ανάπτυξης υδροφορίας στα κατώτερα τμήματα κυρίως της ζώνης αυτής (στάθμη υπογείων υδάτων σε απόλυτο υψόμετρο περί τα 480m).

Παρακάτω παρατίθενται οι γεωηλεκτρικές τομές της συγκεκριμένης γραμμής και με τις δύο μεθόδους αντιστροφής, μια ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή με τα απόλυτα υψόμετρα του σημείου εκτέλεσης αυτής.

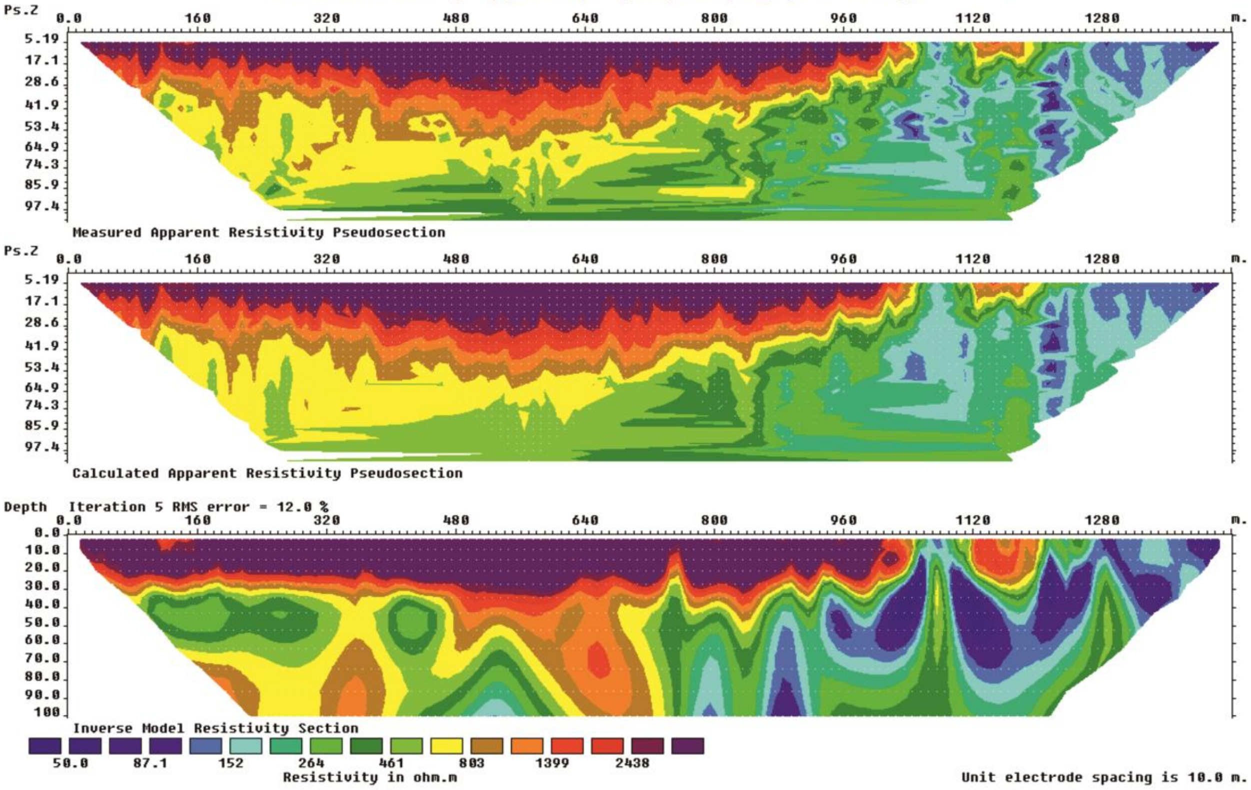
Γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας Line 2

Νοτιοδυτικά — **Αντιστροφή με την χρήση της νόρμας L1** — Βορειοανατολικά

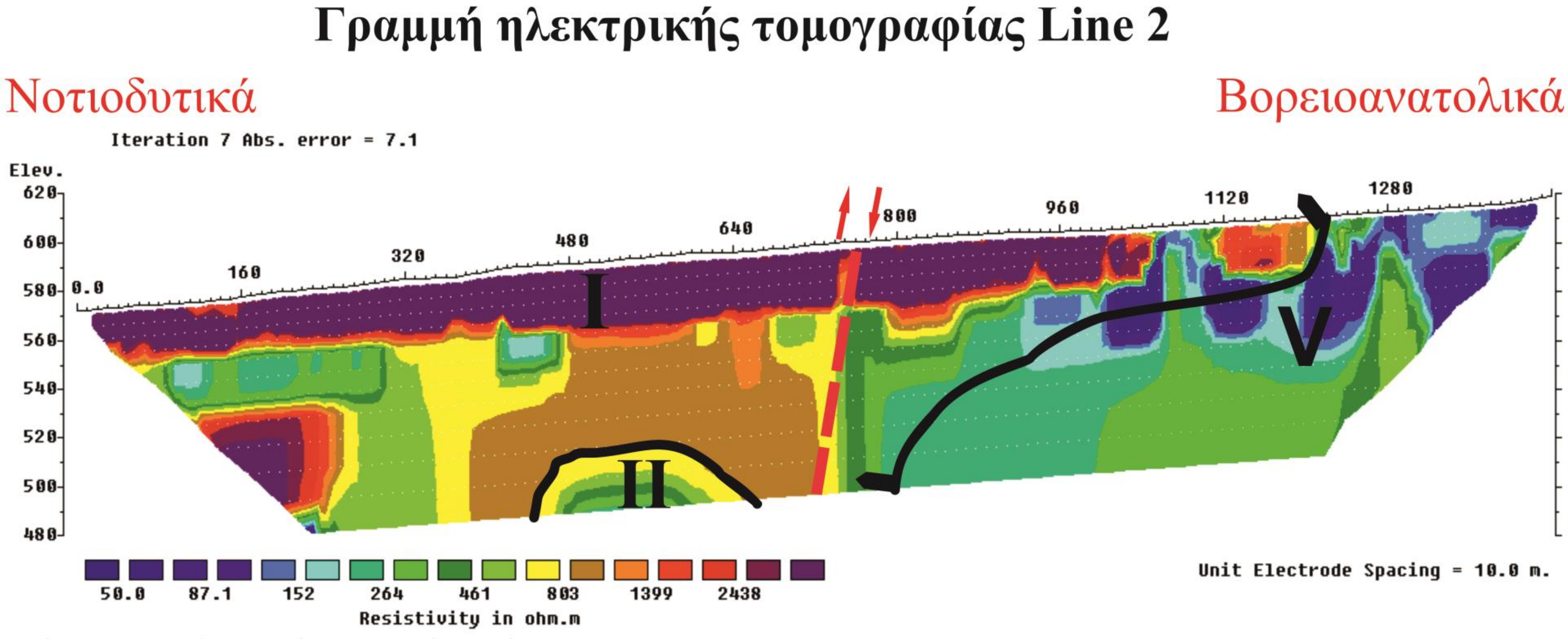


Γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας Line 2

Νοτιοδυτικά — **Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης** — Βορειοανατολικά



Σχήμα 3.3.2 α), β): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 2



Σχήμα 3.3.2 γ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 02 με βάση τον Πίνακα 3.2

3.3.3 Γεωηλεκτρική τομή 03

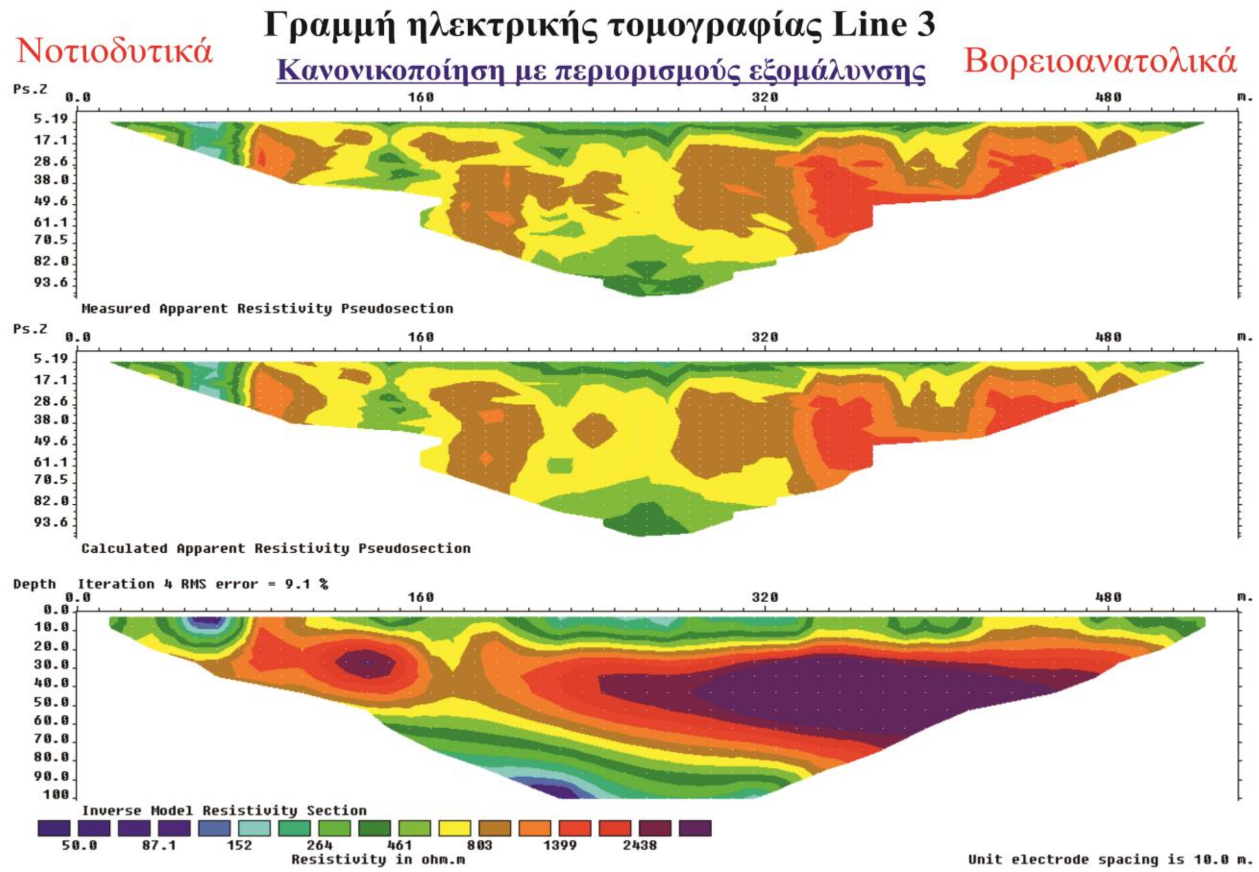
Η γεωηλεκτρική τομή 03 έχει μήκος 540m και η διεύθυνσή της είναι Νοτιοδυτική - Βορειοανατολική. Το πρώτο ηλεκτρόδιο δηλαδή τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 540m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 120m. Χρησιμοποιήθηκαν και εδώ δύο μέθοδοι αντιστροφής για καλύτερη ερμηνεία αποτελεσμάτων.

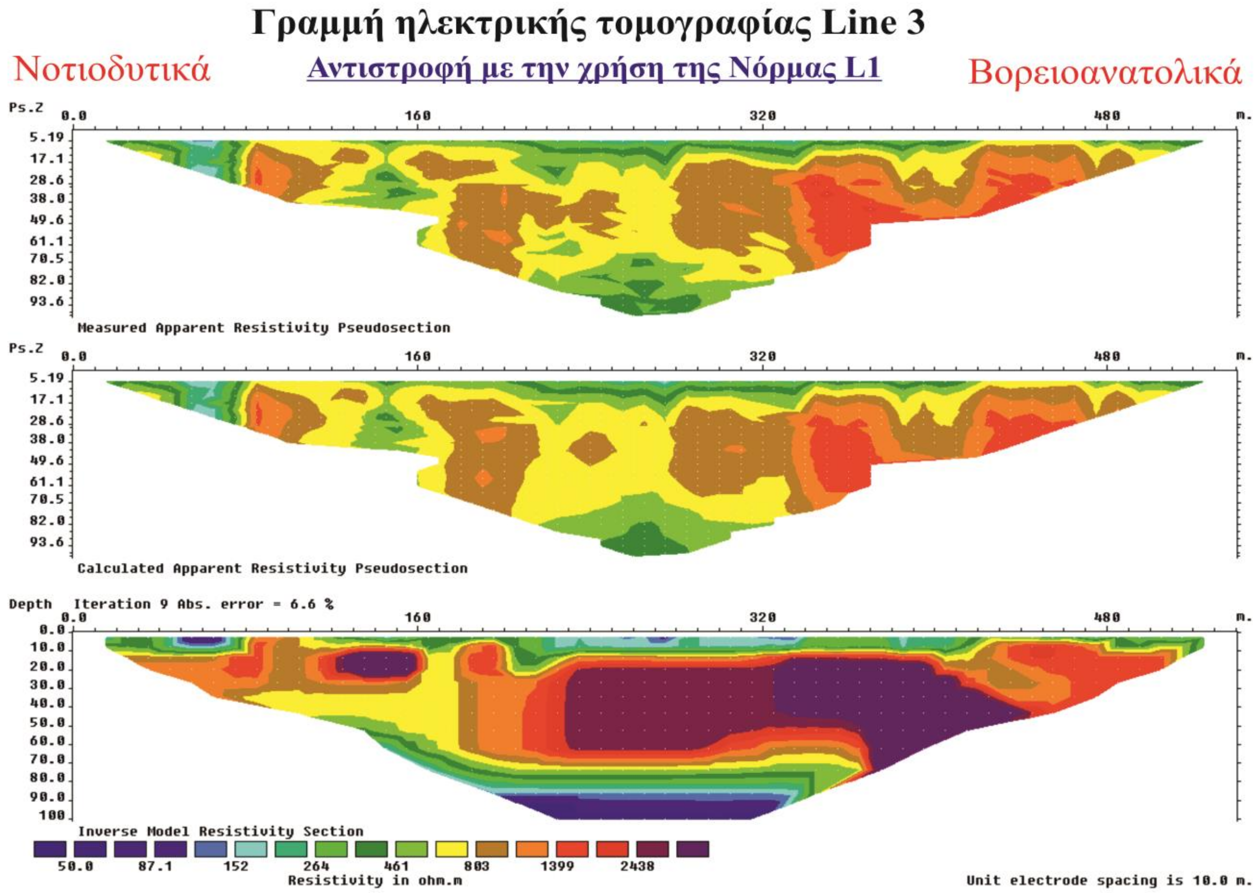
Κατά μήκος της γραμμής 3 και για το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης μετρήθηκαν κατά κύριο υψηλές έως πολύ υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης, που αντιστοιχούν σε ασβεστόλιθο, όπως έχει χαρτογραφηθεί και επιφανειακά.

Η σημαντικότερη μεταβολή και διακοπή της ομοιογένειας των μετρήσεων παρατηρείται σε απόσταση 160m περίπου από την αρχή της γραμμής. Η ζώνη αυτή των μικρότερων τιμών ειδικής αντίστασης ταυτίζεται με την ρηξιγενή ζώνη διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ/κης που έχει χαρτογραφηθεί στην περιοχή και συναντήθηκε και στην γεωηλεκτρική τομή 02, όπως προαναφέρθηκε.

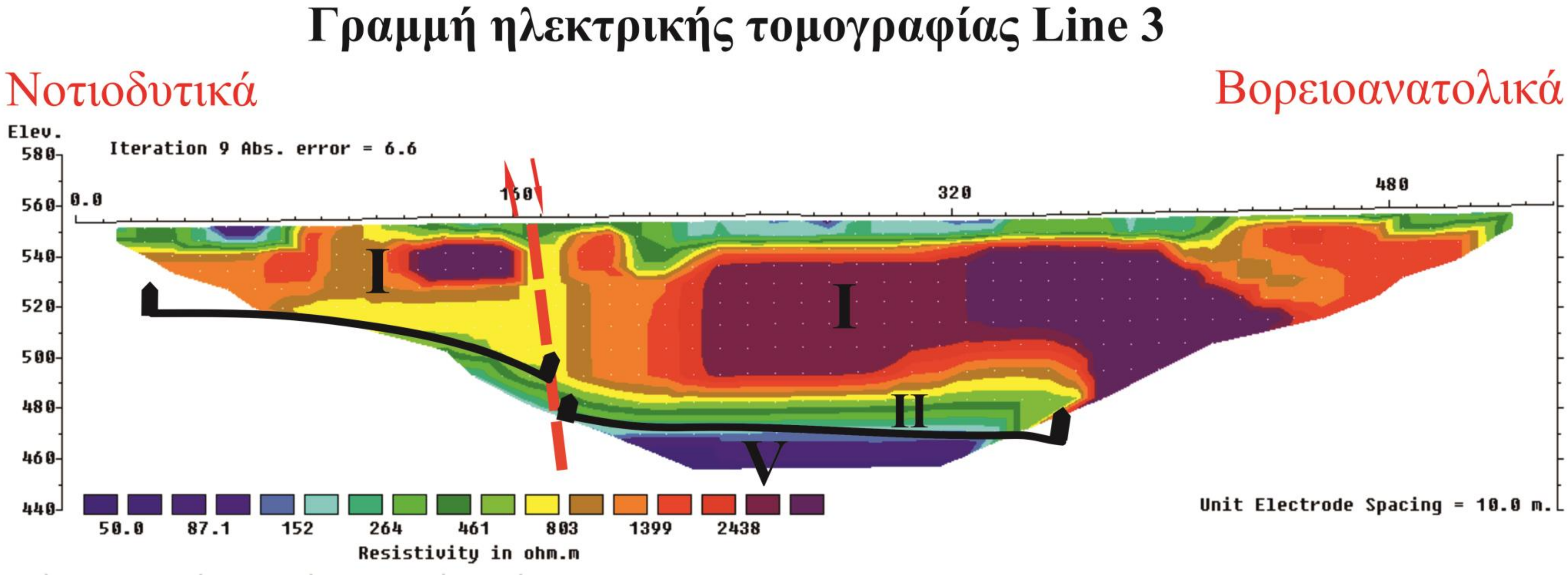
Οι ιδιαίτερα χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης που μετρήθηκαν στα βαθύτερα τμήματα της γραμμής (σε βάθος μεγαλύτερο των 80-90m περίπου) αντιστοιχούν στο υποκείμενο τεκτονικά, φυλλιτικό υπόβαθρο.

Η βαθμιαία, τέλος, μείωση των μετρούμενων αντιστάσεων που παρατηρείται μεταξύ των απόλυτων υψομέτρων +480 και +460, πιθανότατα δικαιολογείται από την ανάπτυξη υδροφορίας στη βάση του τεκτονικού ασβεστολιθικού καλύμματος.





Σχήμα 3.3.3 α), β): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 3



Σχήμα 3.3.3 γ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 03 με βάση τον Πίνακα 3.2

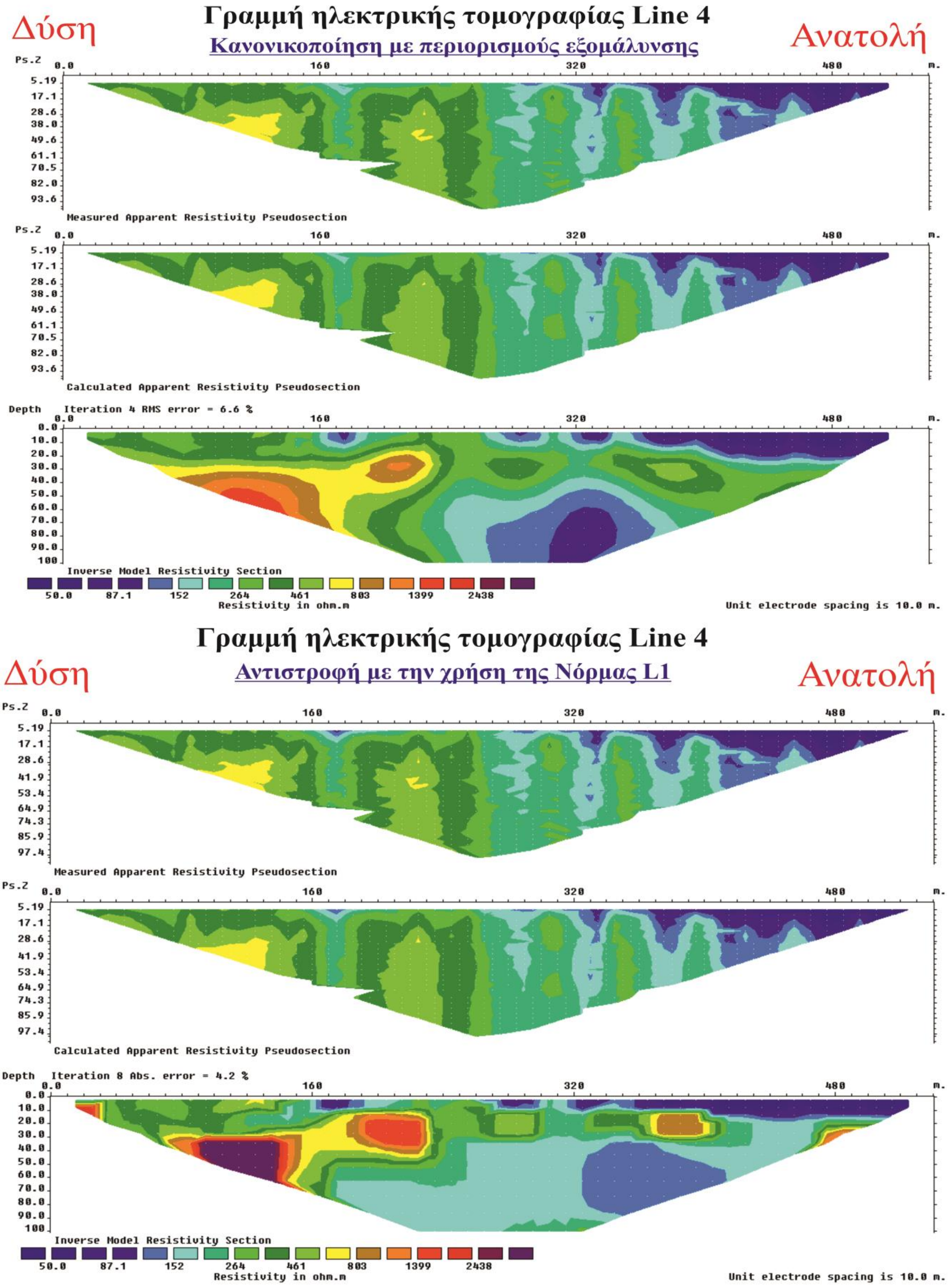
3.3.4 Γεωηλεκτρική τομή 04

Η γεωηλεκτρική τομή 04 έχει μήκος 540m και η διεύθυνσή της είναι Δύση – Ανατολή. Το πρώτο ηλεκτρόδιο δηλαδή τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 540m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 120m. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων της αντιστροφής χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι αντιστροφής κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης και με την χρήση της νόρμας L1.

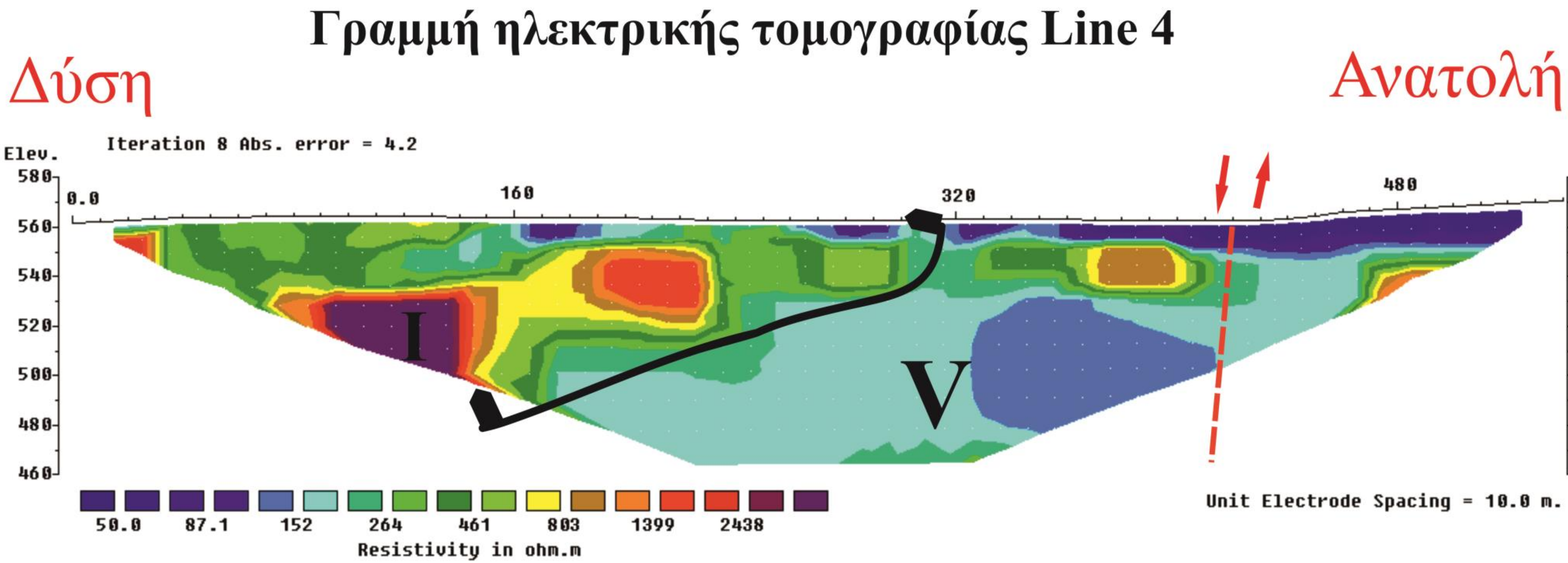
Από την συναξιολόγηση των δεδομένων της γεωλογικής χαρτογράφησης και των γεωφυσικών μετρήσεων κατά μήκος της γραμμής 04, επιβεβαιώνεται και σ’ αυτή την περιοχή η επώθηση των ασβεστολίθων επί των σχιστολίθων – φυλλιτών και η επιφανειακή ανάπτυξη του μεταμορφωμένου υποβάθρου προς τα ανατολικά.

Οι υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που συναντήθηκαν στα πρώτα 320m της γραμμής και μέχρι το μέγιστο βάθος των 70m περίπου αντιστοιχούν σε ασβεστόλιθους. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις μετρήσεις εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματα κυρίως και συνδέονται με ζώνες έντονου κερματισμού ή και καρστικοποίησης.

Το υπόλοιπο τμήμα της γεωηλεκτρικής τομής χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες έως πολύ χαμηλότερες τιμές αντίστασης που αντιστοιχούν σε φυλλιτικούς – σχιστολιθικούς σχηματισμούς.



Σχήμα 3.3.4 α), β): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 4



Σχήμα 3.3.4 γ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 04 με βάση τον Πίνακα 3.2

3.3.5 Γεωηλεκτρική τομή 05

Η γεωηλεκτρική τομή 05 έχει μήκος 270m και η διεύθυνσή της είναι Βορειοανατολική - Νοτιοδυτική. Το πρώτο ηλεκτρόδιο δηλαδή τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 270m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 55m.

Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος της γραμμής μελέτης 05 παρουσιάζουν μεγάλη ομοιομορφία και ομοιογένεια καθ' όλο σχεδόν το μήκος του κεντρικού τμήματός της, με τιμές που δεν φαίνεται να ξεπερνούν τα 100-150Ωm. Μικρή διαφοροποίηση των μετρούμενων τιμών παρατηρείται στα άκρα της τομής με τιμές τα 150-250Ωm.

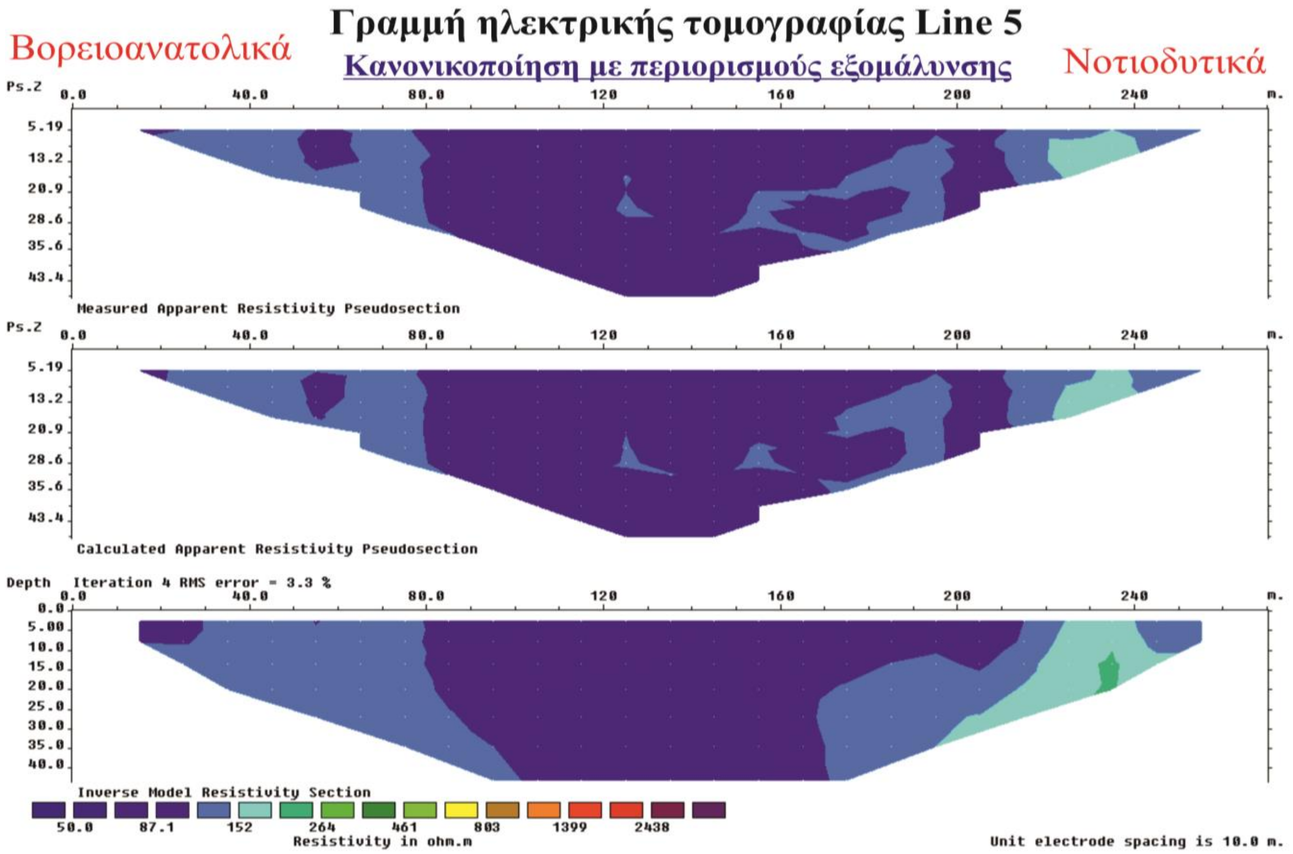
Σύμφωνα με παρατηρήσεις υπαίθρου κατά τη διάρκεια της γεωλογικής χαρτογράφησης στην περιοχή, οι ορεινοί όγκοι εκατέρωθεν της γραμμής δομούνται από σχηματισμούς όπου επικρατεί το ανθρακικό στοιχείο. Αντίθετα κατά μήκος της όδευσης της γραμμής παρατηρείται έξαρση του φυλλιτικού υποβάθρου.

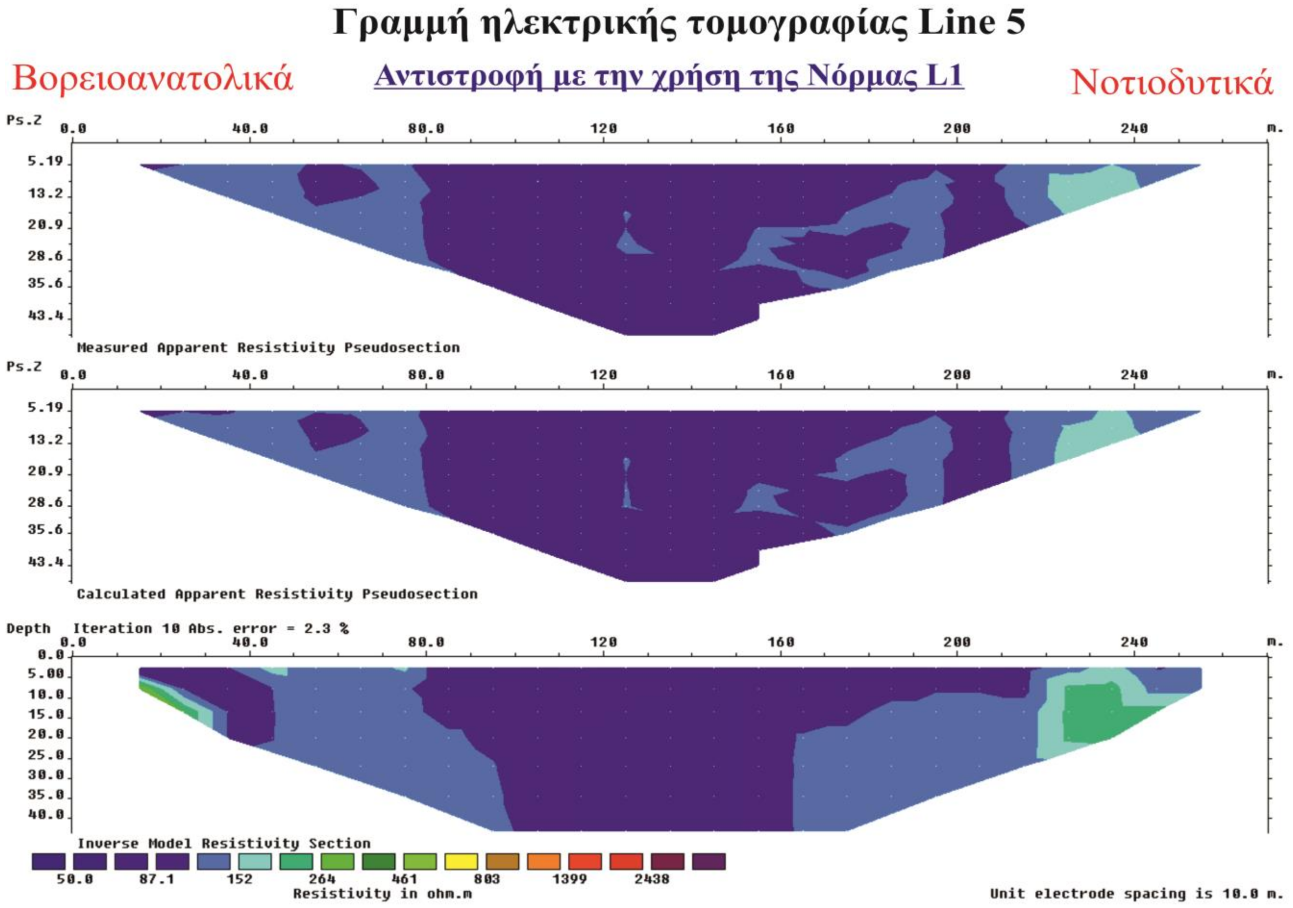
Συγκεκριμένα σε ότι αφορά στα τμήματα που αντιπροσωπεύουν τα άκρα της τομής χαρτογραφήθηκαν ρηξιγενείς ζώνες, οι οποίες φέρνουν σε επαφή το φυλλιτικό υπόβαθρο με τους σχηματισμούς που υπέρκεινται αυτού τεκτονικά.

Νοτιοδυτικά οι φυλλίτες έρχονται σε επαφή με κορεσμένους ασβεστόλιθους έντονα καρστικούς και ισχυρά αποσαθρωμένους από τεκτονικά κυρίως αίτια, ενώ Βορειοανατολικά με σχηματισμούς της ζώνης επώθησης όπου είναι έντονη η παρουσία ανθρακικών σχηματισμών που εναλλάσσονται με στρώσεις αποσαθρωμένων και εξαλλοιωμένων φυλλιτών – σχιστολίθων.

Οι μετρήσεις επομένως που αποτυπώνονται στην τομή πιστεύεται ότι αντιστοιχούν κυρίως στο σχηματισμό των φυλλιτών που τεκτονικά υπέρκεινται των ανθρακικών σχηματισμών.

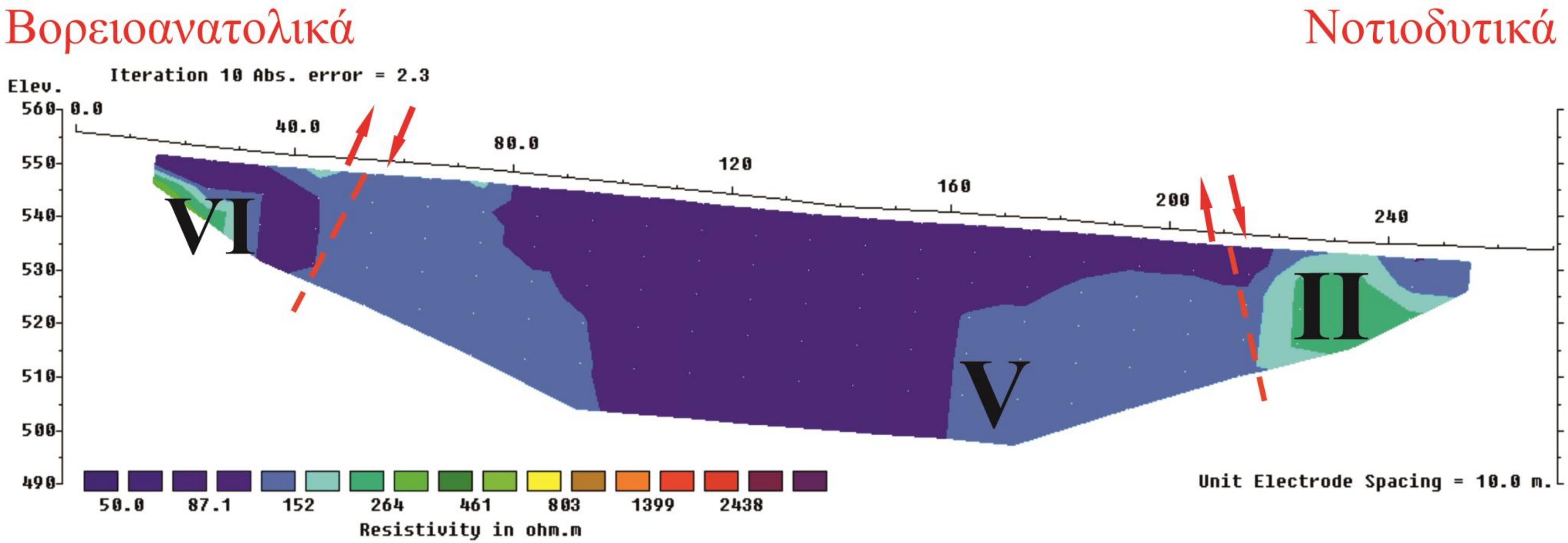
Σε ότι αφορά την διαφοροποίηση των τιμών στα άκρα της τομής, για μεν το Βορειοανατολικό αντιστοιχούν στην τεκτονική ζώνη επώθησης που χαρτογραφήθηκε – στις περισσότερες περιπτώσεις – στη βάση του ασβεστολιθικού καλύμματος και θεωρείται ιδιαίτερα περατή ενώ στα Νοτιοδυτικά δικαιολογούνται από την παρουσία των ασβεστολίθων και την ανάπτυξη υδροφορίας στον σχηματισμό.





Σχήμα 3.3.5 α), β): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 5

Γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας Line 5



Σχήμα 3.3.5 γ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 05 με βάση τον Πίνακα 3.2

3.3.6 Γεωηλεκτρική τομή 06

Η γεωηλεκτρική τομή 06 έχει μήκος 540m και η διεύθυνσή της είναι Νότος - Βοράς. Το πρώτο ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 540m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 120m.

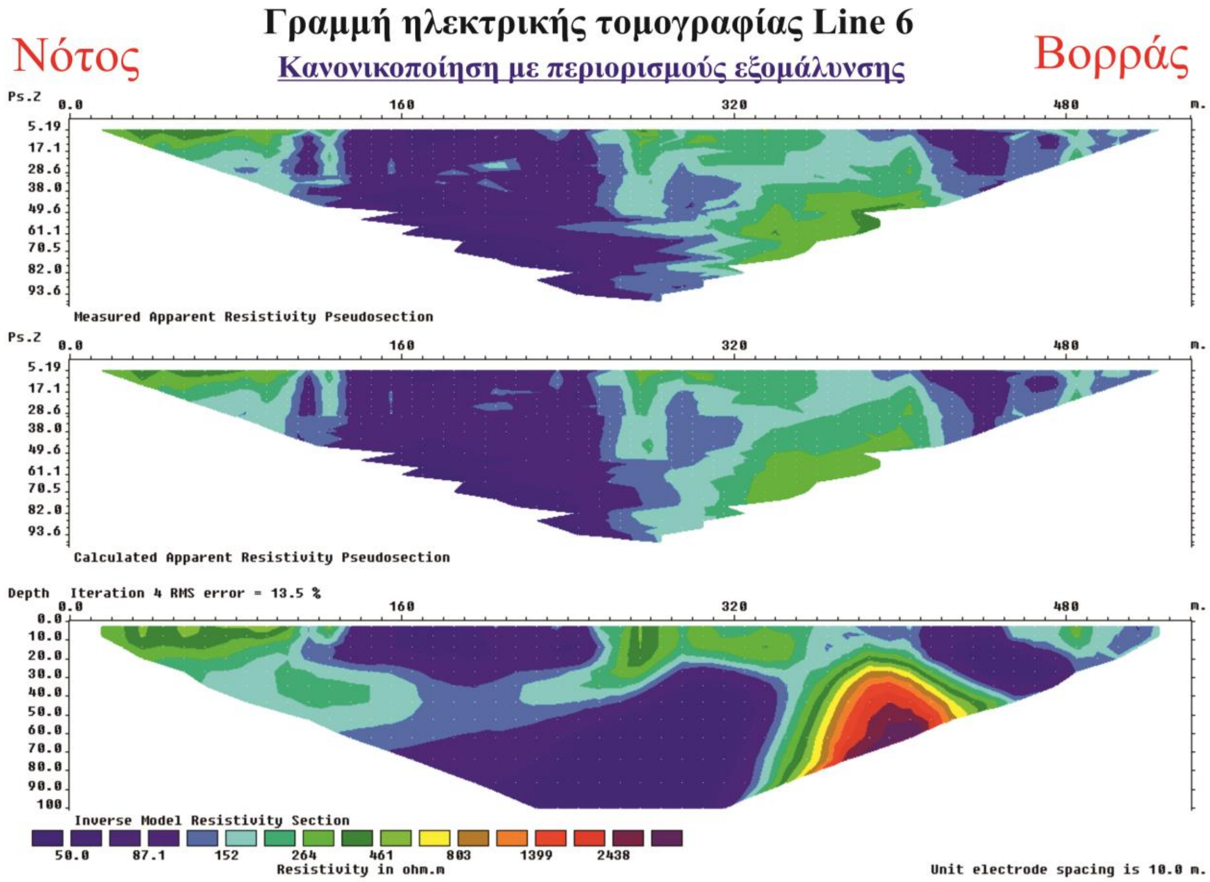
Η απότομη μεταβολή των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που παρατηρείται στα 180-190m περίπου από την αρχή της γραμμής, συσχετίζεται με ρηξιγενή ζώνη διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ/κης και φοράς κλίσης ΝΔ/κης. Η ζώνη αυτή έχει αναγνωριστεί τόσο κατά τη διάρκεια της γεωλογικής χαρτογράφησης, όσο και κατά την εκτέλεση πρόσφατης γεωτεχνικής έρευνας.

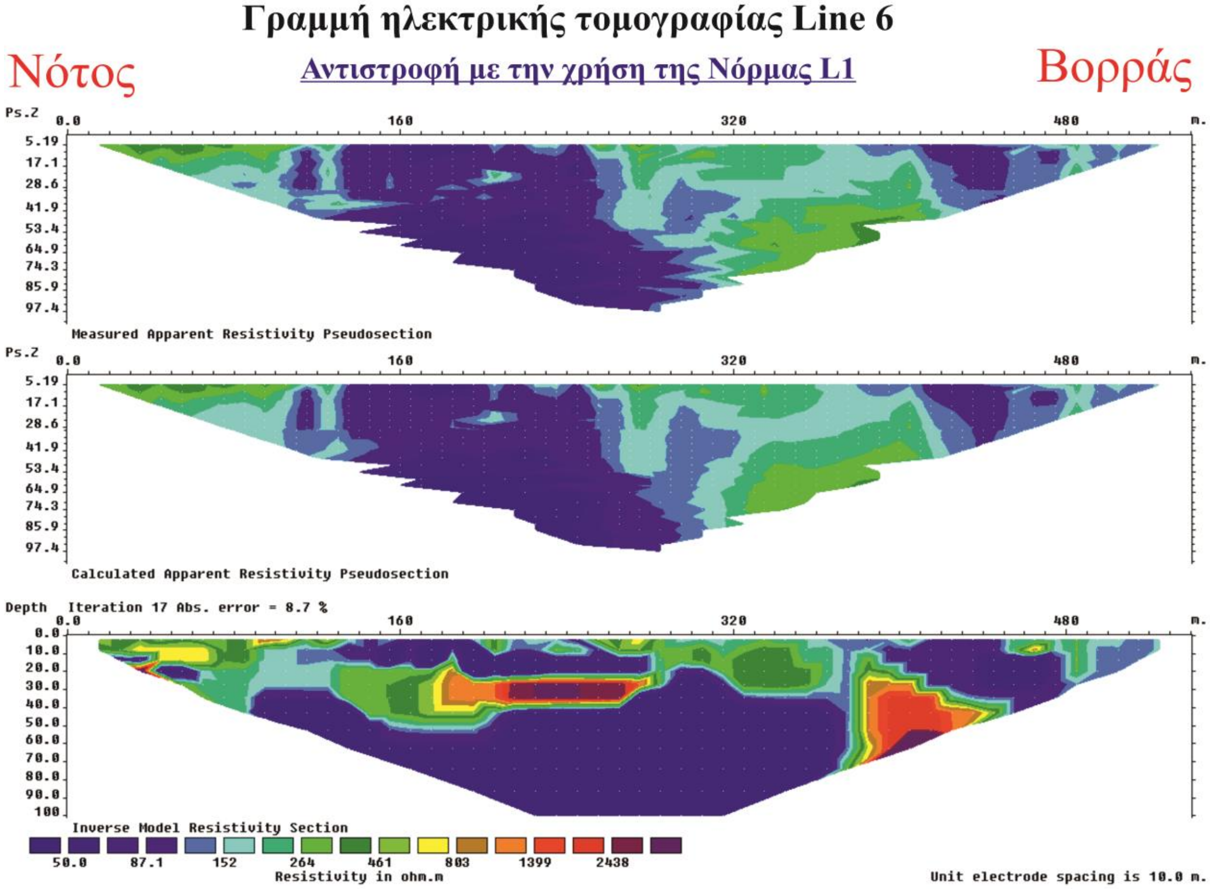
Οι μετρήσεις που αποτυπώνονται στο αρχικό αυτό τμήμα της γραμμής αποδίδονται στον ασβεστολιθικό σχηματισμό που δομεί την περιοχή ανάντη της πηγής. Το χαμηλό εύρος των τιμών (~200-500Ωm) δικαιολογείται από την έντονη τεκτονική καταπόνηση και καρστικοποίηση που έχει υποστεί ο σχηματισμός και την ανάπτυξη σημαντικής υδροφορίας που εκδηλώνεται μέσω της πηγής.

Στο κεντρικό, τμήμα της γραμμής και έως τα 345m του αναπτύγματός της, οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αποτυπώνονται αντιστοιχούν κυρίως στο σχηματισμό των φυλλιτών.

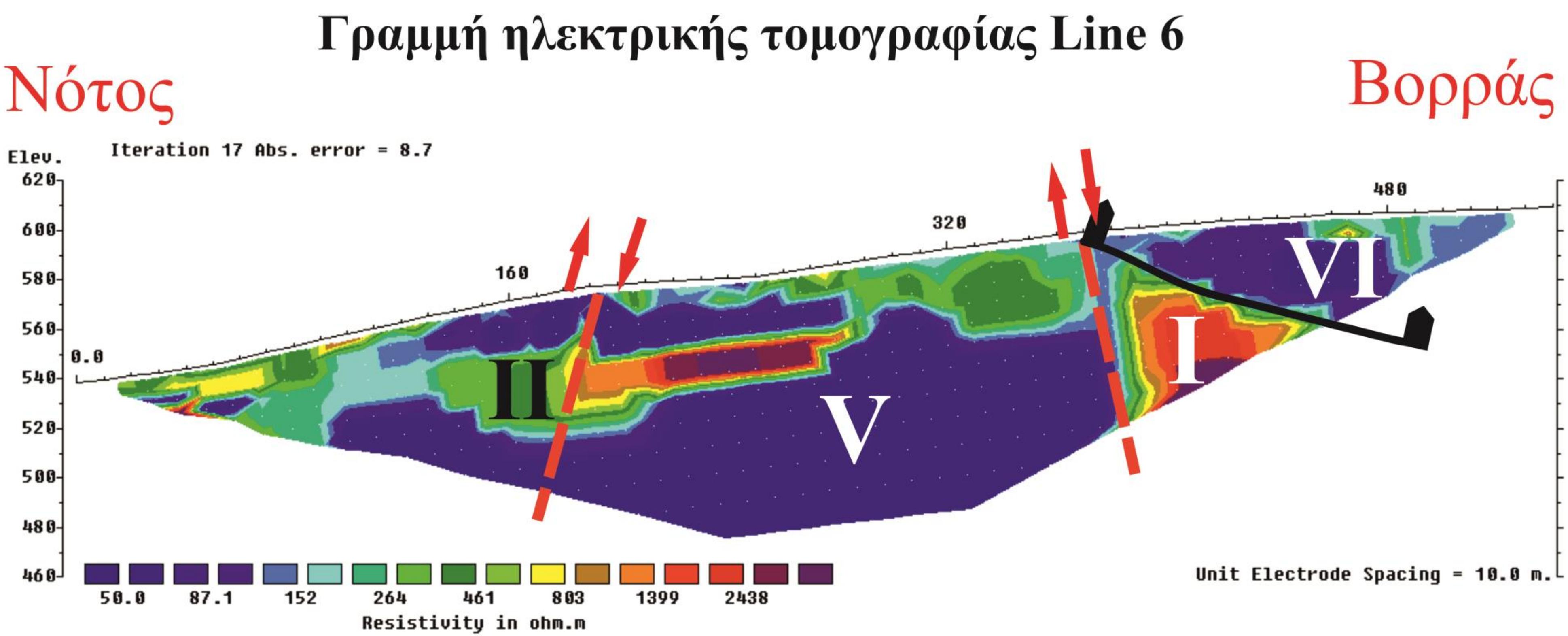
Τέλος στο βόρειο τμήμα της τομής οι φυλλίτες έρχονται σε επαφή με σχηματισμούς της ζώνης επώθησης όπου είναι έντονη η παρουσία ανθρακικών σχηματισμών που εναλλάσσονται με στρώσεις αποσαθρωμένων και εξαλλοιωμένων φυλλιτών – σχιστολίθων. Σε βάθος στο τμήμα αυτό της τομής επικρατεί το ανθρακικό στοιχείο.

Γενικότερα το γεωηλεκτρικό - γεωλογικό μοντέλο Γραμμή 6 είναι ταυτόσημο με αυτό που περιγράφηκε στην Γραμμή 5.





Σχήμα 3.3.6 α), β): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 6



Σχήμα 3.3.6 γ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 06 με βάση τον Πίνακα 3.2

3.3.7 Γεωηλεκτρική τομή 07

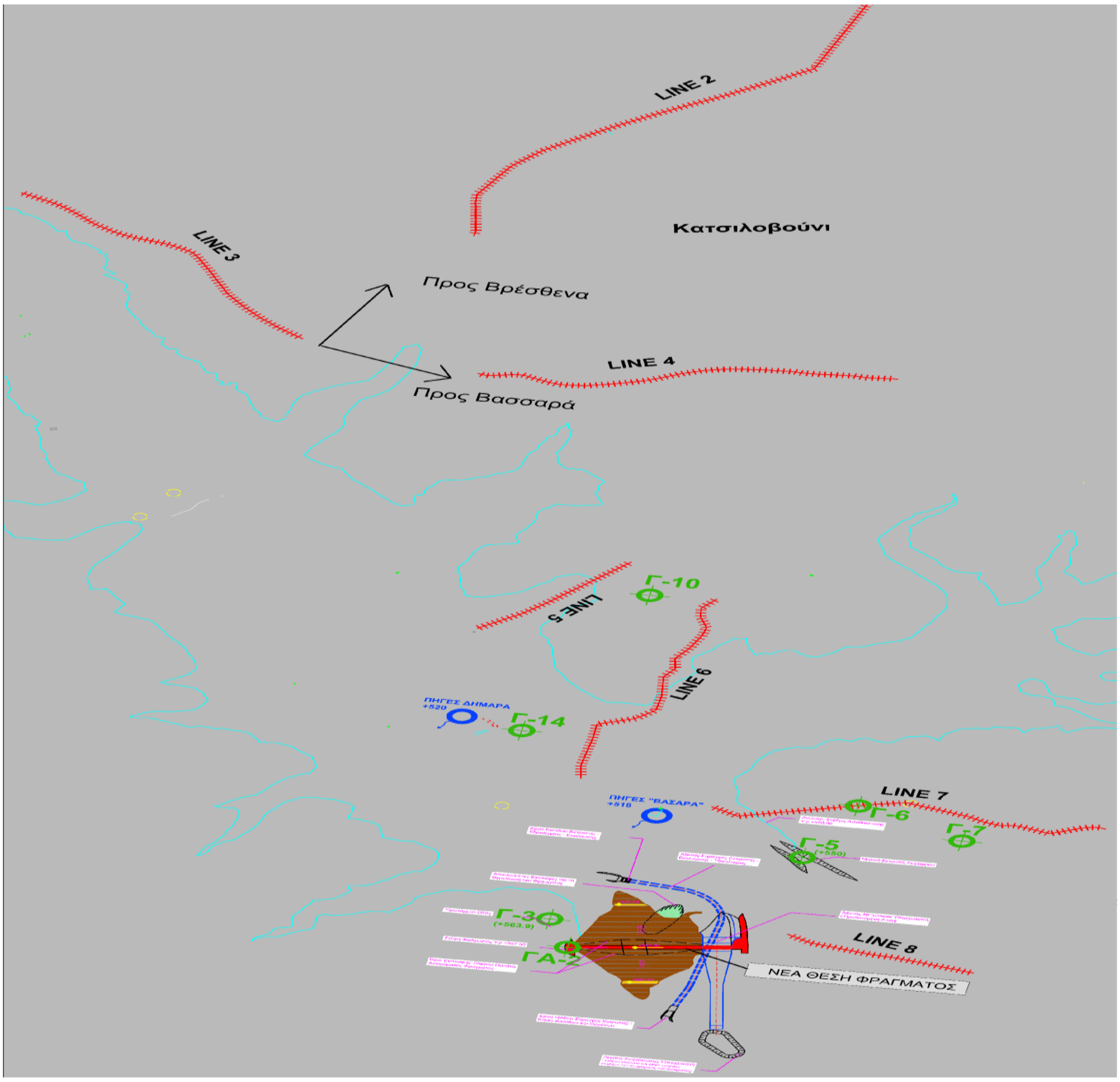
Η γεωηλεκτρική τομή 07 έχει μήκος 540m και η διεύθυνσή της είναι Δύση - Ανατολή. Το πρώτο ηλεκτρόδιο δηλαδή τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 540m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 120m.

Από τις μετρήσεις που αποτυπώνονται κατά μήκος της γεωηλεκτρικής τομής 07, σε συνδυασμό με τα δεδομένα της γεωλογικής χαρτογράφησης και των γεωτεχνικών ερευνών που έχουν εκτελεστεί στην περιοχή (γεωτρήσεις Γ6 και Γ7) εντοπίζεται η σύνθετη και πολύπλοκη γεωλογική – τεκτονική δομή. Στην περιοχή έχει αναγνωριστεί έντονος ρηγματογόνος τεκτονισμός και φαινόμενα επωθήσεων στους κατώτερους ορίζοντες του ασβεστολιθικού καλύμματος της ζώνης της Τρίπολης, ως επακόλουθο του έντονου τεκτονισμού που έχει υποστεί η ενότητα.

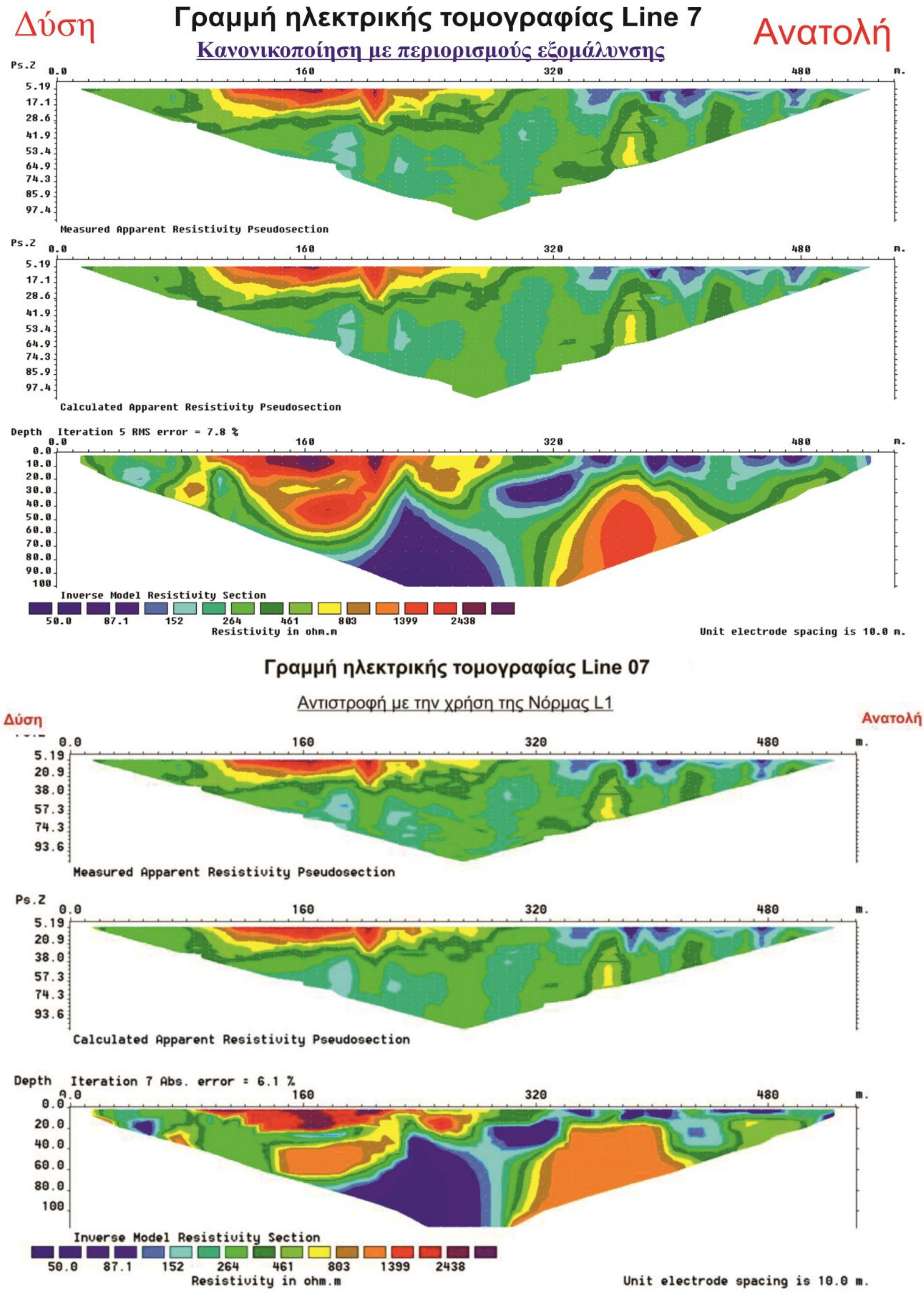
Οι ρηξιγενείς ζώνες εντοπίστηκαν και κατά την γεωφυσική έρευνα και αντιστοιχούν στις ασθενείς ζώνες (ζώνες χαμηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) που συναντήθηκαν στα 50m, 320m και 440m περίπου, αντίστοιχα (οι αποστάσεις αναφέρονται από την αρχή της γραμμής).

Μεταξύ των δύο πρώτων ρηξιγενών ζωνών εντοπίζεται η επώθηση του ασβεστολιθικού σχηματισμού (γεωηλεκτρικό στρώμα ΙΙ) επί του φυλλιτικού υποβάθρου (γεωηλεκτρικό στρώμα V) και η επικάθιση τμημάτων της τεκτονικής «ζώνης επώθησης» (γεωηλεκτρικά στρώματα IV και VI) επί των ασβεστολίθων. Ανατολικότερα, η περιοχή δομείται κατά κύριο λόγο από τους φυλλιτικούς - σχιστολιθικούς σχηματισμούς του υποβάθρου (γεωηλεκτρικό στρώμα ΙΙΙ) με ενστρώσεις διαφοροποιημένης ορυκτολογικής σύστασης και τεκτονικά καταπονημένους, όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας.

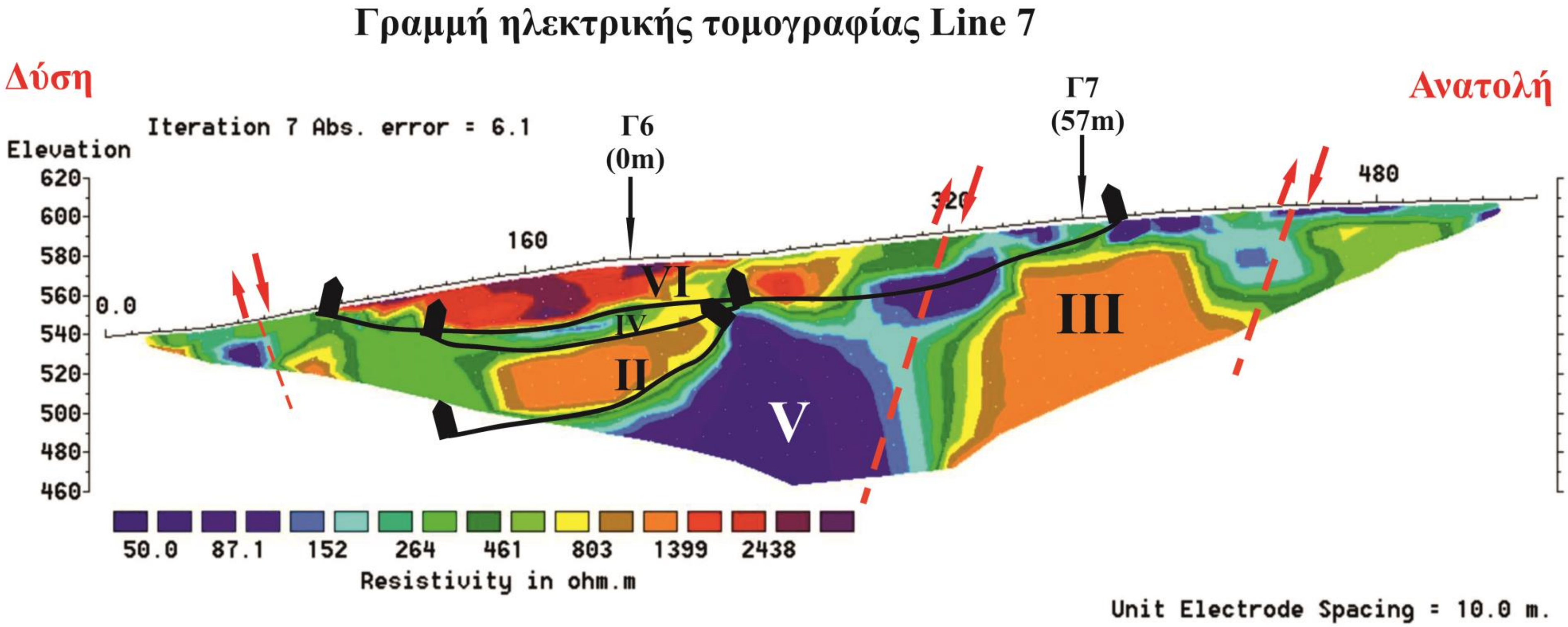
Από την κατανομή των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης, σε συνδυασμό και με τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας (στάθμη υπογείων υδάτων σε βάθος 59m στη γεώτρηση Γ6) προκύπτει η ανάπτυξη υδροφορίας στον λατυποποιημένο ασβεστολιθικό σχηματισμό που βρίσκεται επωθημένος επί της φυλλιτικής - σχιστολιθικής σειράς.



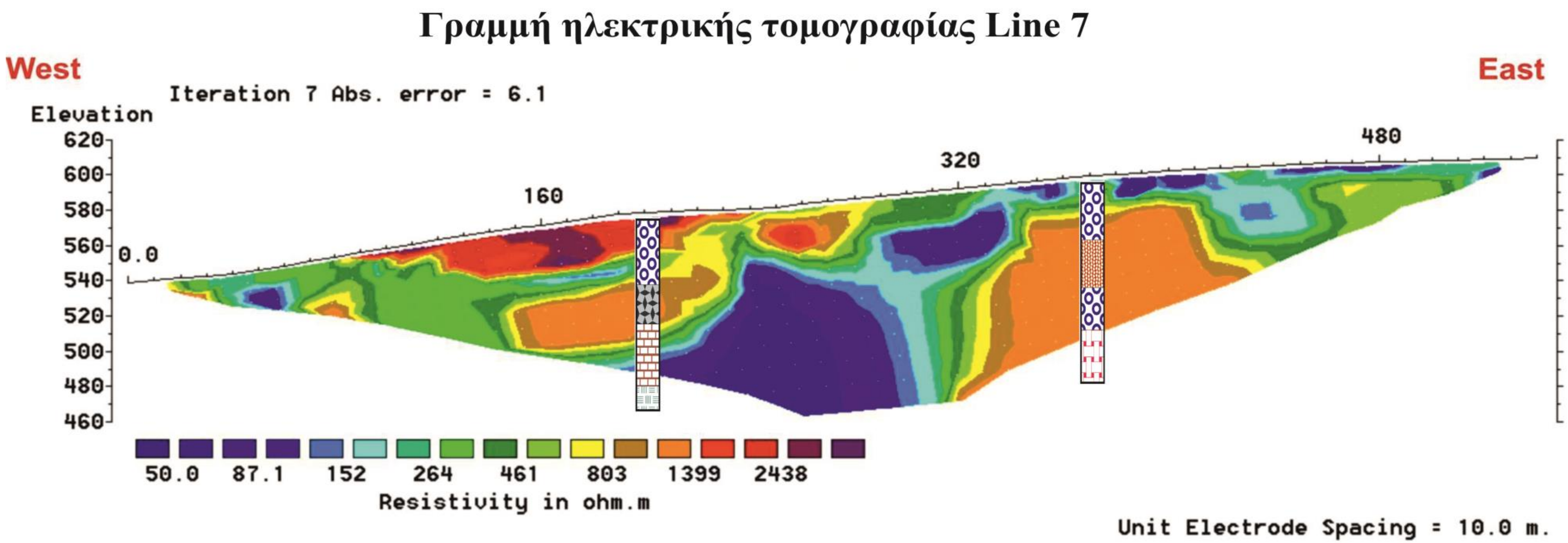
Σχήμα 3.3.7 α): Χάρτης όπου φαίνονται οι γραμμές μελέτης, οι θέσεις τον γεωτήσεων και οι δύο κύριες πηγές που εκδηλώνονται εντός της λεκάνης κατάκλυσης.



Σχήμα 3.3.7 β), γ): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής με τη μέθοδο κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης και με την χρήση της νόρμας L1, της γραμμής μελέτης Line 7



Σχήμα 3.3.7 δ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 07 με βάση τον Πίνακα 3.2



3.3.7 ε): Γεωηλεκτρική τομή Line 7 μετά από εισαγωγή του απόλυτου υψομέτρου αλλά και των γεωτρήσεων.

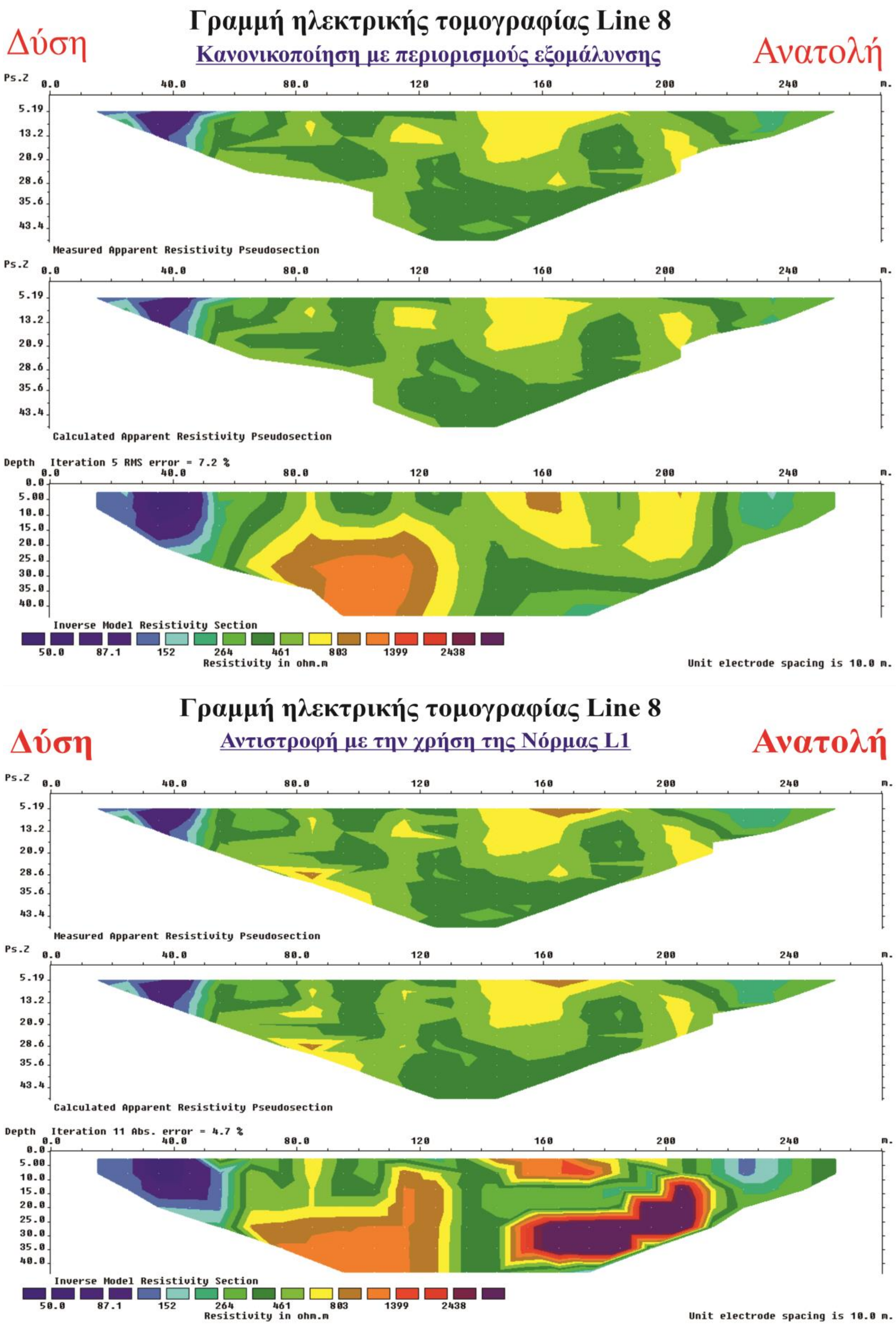
3.3.8 Γεωηλεκτρική τομή 08

Η γεωηλεκτρική τομή 08 έχει μήκος 270m και η διεύθυνσή της είναι Δύση - Ανατολή. Το πρώτο ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο 270m. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 10m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης έφτασε τα 55m.

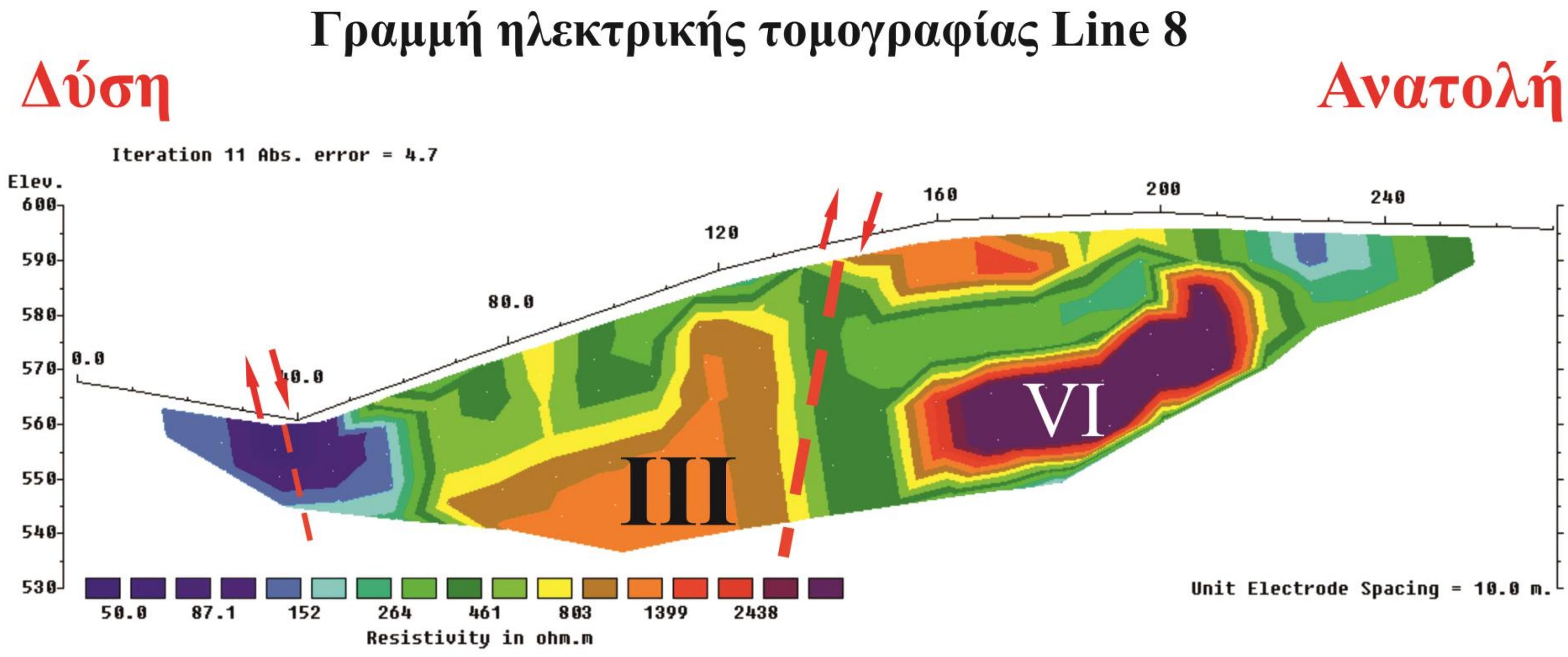
Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αποτυπώνονται κατά μήκος της τομής 08, σε συνδυασμό με τα στοιχεία της γεωλογικής χαρτογράφησης και τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή, αποδίδονται σε σχηματισμούς του μεταμορφωμένου υποβάθρου (Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών). Οι μεγάλες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορούν να δικαιολογηθούν είτε λόγω τεκτονικών καταπονήσεων είτε λόγω ανομοιογένειας στη σύσταση του μεταμορφωμένου συμπλέγματος.

Συγκεκριμένα, οι ασθενείς ζώνες (ζώνες χαμηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) που εντοπίζονται στα πρώτα 40m και στο μέσο περίπου της γραμμής (~140m από την αρχή) συνδέονται με ρηξιγενείς ζώνες που έχουν χαρτογραφηθεί στην περιοχή, διεύθυνσης σχεδόν Β-Ν και φορά κλίσης προς Α και Δ αντίστοιχα.

Οι σχετικά υψηλές, κατά τόπους, τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που μετρήθηκαν (της τάξης των 800-1400Ωm) οφείλονται στην συχνή και πυκνή παρουσία κερματισμένων ζωνών ή ζωνών ορυκτολογικής διαφοροποίησης, ενώ οι ακόμα υψηλότερες (της τάξης των 2000-2500Ωm ή και >2500Ωm) σε στρώμα ασβεστολιθικής σύστασης μέσα στον φυλλιτικό - σχιστολιθικό σχηματισμό. Εντοπίζεται δηλαδή μια ζώνη επώθησης (εναλλαγές ασβεστολίθων και φυλλιτών – σχιστολίθων).



Σχήμα 3.3.8 α), β): Ψευδοτομές και τελικό μοντέλο πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μετά την διαδικασία της αντιστροφής, της γραμμής μελέτης Line 8



Σχήμα 3.3.8 γ): Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή 08 με βάση τον Πίνακα 3.2

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα - Προτάσεις

4.1 Συμπεράσματα

Διασκοπήθηκαν 8 γραμμές μελέτης, συνολικού μήκους 4800m και μέγιστου βάθους 120m με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι γραμμές μελέτης οριοθετούνται στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης κατάκλυσης όπου επρόκειτο να κατασκευαστεί μελλοντικά φράγμα.

Στην επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι αντιστροφής Α) κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης και Β) με την χρήση της νόρμας L1 από όπου προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Επαληθεύτηκε, εντοπίστηκε και χαρτογραφήθηκε η επώθηση του ασβεστολιθικού σχηματισμού στην φυλλιτική – σχιστολιθική σειρά κατά θέσεις. Ο υδροφόρος ορίζοντας συναντάται κυρίως σε υψόμετρο περίπου 480 - 520 μέτρα.

4.2 Προτάσεις

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

1. Την δημιουργία γεωλογικών μηκοτομών, βάσει τόσο των γεωφυσικών αποτελεσμάτων, όσο και των γεωτρητικών στοιχείων.
2. Την διάτρηση των γεωλογικών σχηματισμών στο μέσον περίπου της γραμμής μελέτης 3, για την επαλήθευση της ερμηνείας της.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιοφραφία

1. **Βαφείδης Α. (1994)**, "Αξιολόγηση σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους ", Χανιά
2. **Βαφείδης Α. (2001)**, " Εφαρμοσμενη Γεωφυσική ΙΙ", σημειώσεις Π.Κ
3. **Βαφείδης, Α. και Αμολοχίτης, Γ., 1992**, Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές και σεισμικές διασκοπήσεις στον οικισμό Άνω Μέρους, Ν. Ρεθύμνης, Έκθεση, Νομαρχιακό Ταμείο Ρεθύμνης, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ. 9.
4. **Βαφειδης, Α., Μονόπωλης, Δ., Αμολοχίτης, Γ. και Στειακάκης, Μ., 1991**, Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις στην κοιλάδα του Κερίτη ποταμού, Εκθεση, ΓΓΕΤ, ΟΑΔΥΚ, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ. 11.
5. **Παπαζάχος, Β., 1986**, Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
6. **Hamdan H. (2002),** "Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του νομού Χανίων". Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. **ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΕΠΕ – ΙΣΤΡΙΑ**, Μελέτη φράγματος Κελεφίνας Ν.Λακωνίας

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. **Anderson, N.L., 1979**, Computer program for numerical integration of related Hankel transforms of order O and I by adaptive digital filtering: Geophysics 44,1287-1305.
2. **Howell, B., 1959**, *Introduction to Geophysics*, McGraw-Hill, New York.
3. **Inman, J.R., 1975**, *Resistivity inversion with ridge regression*, Geophysics 40,788-817.
4. **Miller R., D., & Xia J., 1999**, Using MASW to Map Bedrock in Oathle, Kansas, Open file report No. 99-9. Harding Lawson Associates, Lee's Summit, Missouri.
5. **Miller R., D., Xia J., Park C., B., & Ivanov J., M., 1999**, Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. The Leading Edge, 18(12),1392-1396.

6. **Misiek R., 1996**, Surface waves: Application to lithostructural interpretation of near-surface layers in the meter and decameter range, Ph. D. Thesis (unpubl.), University of Ruhr, Bochum. p.109
7. **Reynolds, M. J., 1997**, *An introduction to applied and environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, ISBN 0-471-95555-8
8. **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.
9. **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.