

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ
ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΗΝΩΣΗΣ ΤΗΣ
ΕΝΟΡΙΑΣ ΤΟΥ ΑΓ.ΤΙΤΟΥ ΣΤΗ ΡΟΓΔΙΑ
ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ.

ΦΟΥΝΤΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

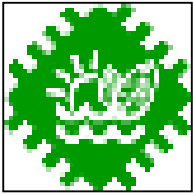
Επιτροπή εποπτείας

Ηλίας Παπαδόπουλος

Παντελής Σουπιός

Γιώργος Χλούπης

Μάρτιος 2008



Technological Institute of Crete
Department of Natural Resources and Environment
Laboratory of Geophysics and Seismology

Pre-Graduate Thesis

**GEOPHYSICAL PROSPECTING AT THE
FOUNDATION OF BUILDINGS IN CAMPUS OF
St. TITOS TERRITORY AT ROG DIA
HERAKLEION.**

FOUNTAS ANASTASIOS

Examination comitee

Ilias Papadopoulos

Pantelis Soupis

George hloupis

March 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Σκοπός.....	7
1.2 Ανάθεση	8
1.3 Υπάρχοντα διαθέσιμα στοιχεία	8
2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ	13
2.1 Γεωγραφική θέση	13
2.2 Γεωλογικά-Υδρολιθολογικά-Σεισμολογικά χαρακτηριστικά περιοχή έρευνας.....	13
3. ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗΝ ΥΠΕΔΑΦΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑ	17
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Γεωφυσικές μέθοδοι στην γεωτεχνική έρευνα	17
4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	21
4.1 Εισαγωγή.....	21
4.2 Σχέση Γεωλογίας και Αντίστασης.....	21
4.3 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος	23
4.4 Φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση	24
4.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων	25
4.6 Μέθοδοι έρευνας.....	28
4.7 Επιλογή διάταξης	30
4.8 Βάθος διείσδυσης.....	31
4.9 Πίνακας ευαισθησίας	34
4.10 Μέθοδος ψευδοτομής.....	36
4.11 Θεωρία επίλυσης ευθέως προβλήματος	37
4.12 Θεωρία αντιστροφου προβλήματος.....	39
4.12.1 Εισαγωγή	39
4.12.2 Γραμμικοποίηση του προβλήματος.....	41
4.12.3 Μη γραμμική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Gauss-Newton)	43
4.12.4 Μέθοδος Levenberg-Marquadt (Damped least-squares)	44
4.12.5 Μέθοδος εξομαλυσμένης αντιστροφής (Occam)	45
4.12.6 Μέθοδος σταθερής αντιστροφής (Robust inversion)	46
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	47
5.1 Προγραμματισμός και Λήψη Γεωφυσικών Μετρήσεων	47
5.2 Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικής τομογραφίας	50
5.3 Εξοπλισμός	50
5.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της γεωηλεκτρικής (ERT) διασκόπησης	51
5.4.1 Τομογραφία 1 (24 ηλεκτρόδια ανά 1 μέτρο και 48 ηλεκτρόδια ανά 0.5 μέτρα)	51
5.4.2 Τομογραφία 2 (24 ηλεκτρόδια ανά 1 μέτρο).....	57

5.4.3 Τομογραφία 3 (24 ηλεκτρόδια ανά 2 μέτρα)	59
5.4.4 Συνολική ερμηνεία της πρώτης θέσης θεμελίωσης (Τομογραφίες 1, 2 και 3)	62
5.4.5 Τομογραφία 4 (24 ηλεκτρόδια ανά 2 μέτρα)	63
5.4.6 Τομογραφία 5 (24 ηλεκτρόδια ανά 3 μέτρα)	64
5.4.7 Τομογραφία 6 (24 ηλεκτρόδια ανά 4 μέτρα)	66
5.4.8 Συνολική ερμηνεία της δεύτερης θέσης θεμελίωσης (Τομογραφίες 4, 5 και 6)	69
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εκτέλεση και ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων γεωηλεκτρικής τομογραφίας στο χώρο θεμελίωσης των κτιριακών εγκαταστάσεων της κατασκήνωσης της ενορίας του Αγ. Τίτου-Ηρακλείου στη Ρογδιά-Ηράκλειο.

Το έργο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή ένωση και το Ελληνικό Δημόσιο ενώ συμπληρωματικές εργασίες όπως αυτή που εκτελέστηκε χρηματοδοτείται από ιδίους πόρους της εκκλησίας.

Παράλληλα με την ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων που ελήφθησαν, έγινε αξιολόγηση και των διαθέσιμων γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών που έχουν έως τώρα εκτελεστεί πλησίον της παρούσης θέσης με στόχο την ολοκληρωμένη γνώση της υπό μελέτη περιοχής.

INTRODUCTION

The aim of this pre-graduate thesis is the presentation of the processing and results of geophysical prospecting that has been conducted to the foundation of the campus of St. Titos at Rogdia Hrakleio.

The foundation of the campus is being funded by the EU and Greek Government, while some of the rest of the works are being funded by resources of the St. Titos Church Committee.

Apart from the geophysical prospecting, there has been also an evaluation of the geological geotechnical and hydrogeological studies that have been done in the past, in order to have a better result.

1.2 Ανάθεση

Με τη σύμβαση η οποία υπεγράφη την 26 Απριλίου 2007, ανατέθηκαν από το Ιδρυμα Διακονίας Νεότητας Ενορίας Αγ. Τίτου, στο Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τ.Ε.Ι Κρήτης τα καθήκοντα έρευνας: «Εκτέλεση γεωφυσικών διασκοπήσεων στο χώρο θεμελίωσης των κτιριακών εγκαταστάσεων της κατασκήνωσης της ενορίας του Αγ. Τίτου στη Ρογδιά Ηρακλείου».

1.3 Υπάρχοντα διαθέσιμα στοιχεία

Διαθέσιμα στοιχεία αποτέλεσαν όλες οι πληροφορίες που χορηγήθηκαν από τους επιβλέποντες μηχανικούς του έργου καθώς και η επιτόπου επίσκεψη στο χώρο όπου ήταν φανερή η παρουσία καρστικών εγκοίλων (φωτογρ. 1 και 2) τα οποία και αποτελούσαν το κύριο πρόβλημα στη θεμελίωση των κτιριακών εγκαταστάσεων. Τέλος, χρήσιμες πληροφορίες δόθηκαν από τον επιστάτη/φύλακα του έργου από τον οποίο συλλέχθηκαν πληροφορίες για την παρουσία πηγών στην ευρύτερη περιοχή έρευνας (στοιχεία για την παρουσία και το δυναμικό του υπόγειου υδροφόρου στη περιοχή έρευνας), καθώς και την παρουσία άλλων καρστικών δομών.



Φωτογραφία 1. Παρουσία καρστικών εγκοίλων μεσαίου μεγέθους όπως αποκαλύφθηκαν

κατά τη διαμόρφωση της πάνω θέσης θεμελίωσης.



Φωτογραφία 2. Παρουσία καρστικών εγκοίλων μεγάλου μεγέθους όπως αποκαλύφθηκαν κατά τη διαμόρφωση του πρανούς της κάτω θέσης θεμελίωσης.

Ειδικότερα, υποδείχθηκε θέση στην οποία βρίσκεται η είσοδος καρστικής χωάνης (Sinkhole-Cave, Σχήμα 20, Φωτογραφία 3) βάθους μεγαλύτερης των 40 μέτρων η οποία μάλιστα είναι καταγεγραμμένη και επισκέψιμη από το σύλλογο σπηλαιολόγων Ηρακλείου.



Φωτογραφία 3. Στη φωτογραφία εικονίζεται η είσοδος της καρστικής χωάνης.

Τέλος, ο μηχανικός/κατασκευαστής του έργου κος. Μιχάλης Νεονάκης υπέδειξε θέσεις στις οποίες κατά την εκσκαφή και διαμόρφωση των πρανών και των «παταριών», εμφανίστηκαν έγκοιλα μικρού και μεγάλου μεγέθους (Σχήμα 20, φωτογρ. 4 και 5) τα οποία βρίσκονται ανάντι του χώρου θεμελίωσης. Στο ένα από τα σημεία αυτά σπηλαιολόγος προχώρησε εντός του εγκοίλου/σπηλαίου μέχρι και το βάθος των 7.5 μέτρων όπου και σταμάτησε λόγω στενότητας/μη προσβασιμότητας του σπηλαίου.



Φωτογραφία 4. Είσοδος καρστικού εγκοίλου σε περιοχή ανάντι του πρώτου (πάνω παταριού) χώρου θεμελίωσης.



Φωτογραφία 5. Είσοδος καρστικού εγκοίλου σε περιοχή ανάντι του πρώτου (πάνω παταριού) χώρου θεμελίωσης.

Επίσης, ο μηχανικός έδειξε τη θέση (φωτογρ. 6, σχήμα 20) εκτέλεσης

παραγωγικής υδρογεώτρησης με χαμηλή παροχή στην οποία κατά τη διάτρηση και από τα 40 μέτρα έως και τα 70 μέτρα παρατηρήθηκε απώλεια υδάτων (επιστρεφόμενα) κατά 100% το οποίο δίνει ισχυρές ενδείξεις παρουσίας τεκτονισμένης και καρστικής ζώνης στα εν λόγω βάρη μέσω των οποίων έγινε η διάχυση και απώλεια των επιστρεφόμενων.



Φωτογραφία 6. Στη φωτογραφία εικονίζεται η κεφαλή της υδρογεώτρησης στην οποία παρουσιάστηκαν οι απώλειες ύδατος κατά τη διάτρηση από τα 40-70 μέτρα.

2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

2.1 Γεωγραφική θέση

Η περιοχή ενδιαφέροντος βρίσκεται 600 μέτρα δυτικότερα του χωριού Ρογδιά, 2.31 χιλιόμετρα από τις βόρειες ακτές της Κρήτης ενώ βρίσκεται σε απόσταση περί τα 15 χιλιόμετρα από τη πόλη του Ηρακλείου (Σχήμα 1).



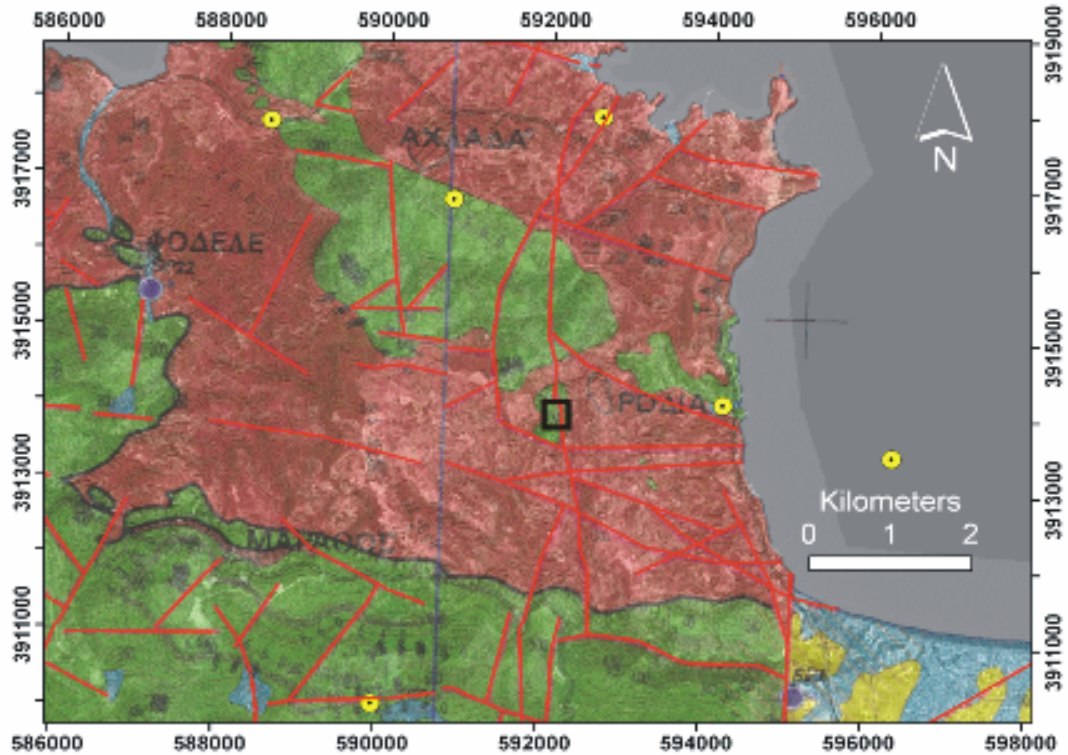
Σχήμα 1. Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας της περιοχής ενδιαφέροντος από το GoogleEarth (4.0.2742). Στη φωτογραφία με κίτρινα σημεία υποδεικνύεται η περιοχή ενδιαφέροντος.

2.2 Γεωλογικά-Υδρολιθολογικά-Σεισμολογικά στοιχεία περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας δομείται από καρστικούς σχηματισμούς υψηλής διαπερατότητας και αδιαπέρατους μεταμορφωμένους/πυριγενής σχηματισμούς (φυλλίτες,

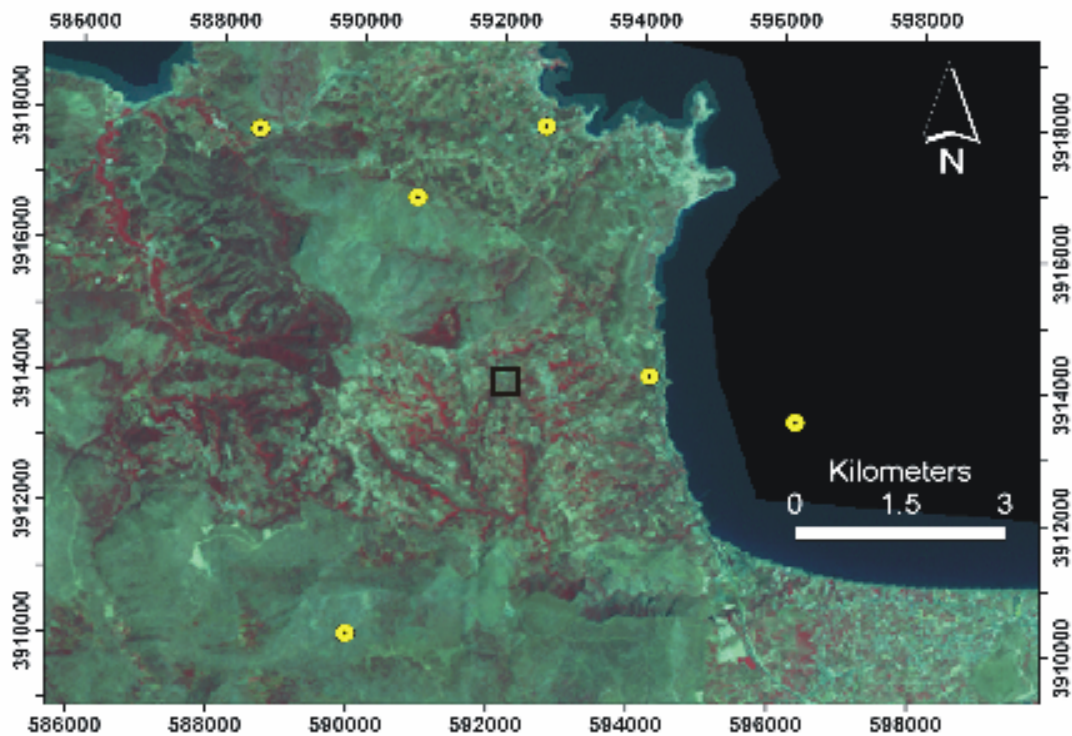
σχιστόλιθους).

Ειδικότερα η περιοχή έρευνας βρίσκεται στην επαφή των δύο προαναφερόμενων γεωλογικών ενοτήτων (σχήμα 2).



Σχήμα 2. Απόσπασμα υδρολιθολογικού χάρτη Ν. Ηρακλείου. Με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι Φυλλίτες (Μεταμορφωμένοι και πυριγενής αδιαπέρατοι σχηματισμοί), με πράσινο χρώμα περιγράφονται οι καρστικοί σχηματισμοί (υψηλής διαπερατότητας), με κίτρινο χρώμα περιγράφονται οι πορώδεις, κοκκώδεις σχηματισμοί (μικρής διαπερατότητας) ενώ τέλος με γαλάζιο χρώμα περιγράφονται οι πορώδεις, κοκκώδεις σχηματισμοί (μεγάλης – μέτριας διαπερατότητας). Στο χάρτη εμφανίζονται επίσης τα κύρια ρήγματα.

Στο σχήμα (3), παρουσιάζεται η κατανομή των επικέντρων σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου των 3.0 ρίχτερ. Φαίνεται καθαρά ότι η περιοχή ενδιαφέροντος δεν έχει παρουσιάσει σεισμική δράση στην πρόσφατη ιστορία.

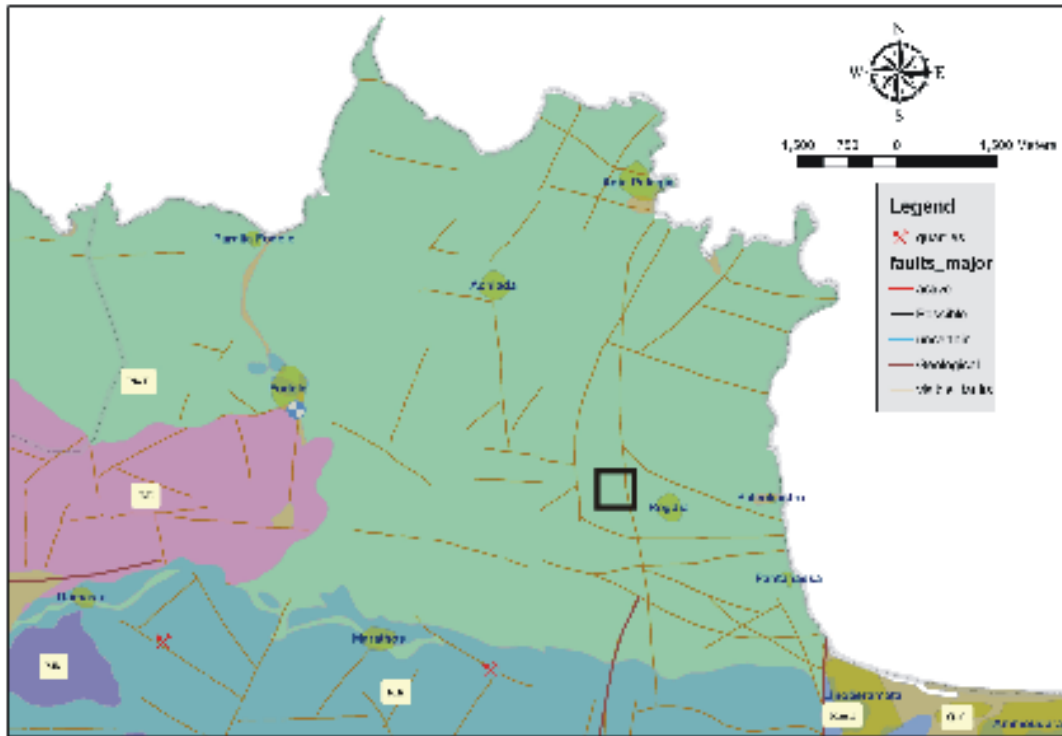


Σχήμα 3. Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας Landsat –ETM (4,3,2) R,G,B (30 μέτρα χωρική ανάλυση) στην οποία με μαύρο τετράγωνο απεικονίζεται η περιοχή έρευνας.

Στο σχήμα (4), παρουσιάζεται η κατανομή των επικέντρων των σεισμών του σχήματος (3) με υπέρθεση των κύριων ρηγμάτων στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος με σκοπό την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής θεμελίωσης από την εγγύτητα ρηγμάτων.

Στο σχήμα (4), φαίνεται ότι η περιοχή (μαύρο τετράγωνο) βρίσκεται πάνω σε ρήγμα με γενική διεύθυνση Β-Ν το οποίο βρίσκεται σε πλήρη συνάφεια/ακολουθία με την ακτογραμμή. Το εν λόγω ρήγμα δεν χαρακτηρίζεται ως ενεργό (προσωπική επικοινωνία με τον γεωλόγο Δρ. Χ. Φασσουλά) ενώ και από τον ίδιο χάρτη το ρήγμα που βρίσκεται στην εγγύτητα της περιοχής έρευνας δεν αναφέρεται ότι παρουσιάζει κάποια ένδειξη πρόσφατης ενεργοποίησης που να συνδέεται με την περιοχή.

Πλησίον της περιοχής βρίσκεται και ομάδα ρηγμάτων με γενική διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ μικρότερων γενικά διαστάσεων και πιθανών μικρότερης σημαντικότητας.



Σχήμα 4. Απόσπασμα ψηφιακού γεωλογικού χάρτη στον οποίο απεικονίζονται τόσο οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος όσο και τα κύρια τεκτονικά στοιχεία (ρήγματα με διευθύνσεις Β-Ν και ΒΔ-ΝΑ). Τέλος, με μαύρο τετράγωνο απεικονίζεται η περιοχή έρευνας.

Είναι φανερό ότι, η ταυτόχρονη παρουσία σχετικά ρηχού υδροφόρου ο οποίος εκδηλώνεται με την παρουσία πηγών υπερχείλισης σε απόσταση μικρότερη των 1500 μέτρων από το χώρο έρευνας, η επαφή δύο γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετικές υδρολιθολογικές ιδιότητες (ασβεστόλιθος με υψηλή περατότητας και αδιαπέρατα μεταμορφωμένα) καθώς και η παρουσία ρηγμάτων τα οποία μπορούν να δράσουν εύκολα ως οδοί κίνησης του υπεδάφειου νερού, οδήγησαν στην παρουσία των καρστικών εγκοίλων όπως αυτά καταγράφηκαν και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

3. ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗΝ ΥΠΕΔΑΦΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

3.1 Εισαγωγή

Η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης στηρίζεται στην ικανότητα αυτών να εντοπίζουν ανομοιογένειες που προκαλούνται στις γεωφυσικές παραμέτρους του εδάφους. Οι μέθοδοι αυτές, χωρίζονται στις ενεργητικές, όπου κάποιο σήμα εισάγεται στο έδαφος, για παράδειγμα ηλεκτρικό ρεύμα ή ηλεκτρομαγνητικό κύμα, και λαμβάνεται η απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους, και στις παθητικές οι οποίες στηρίζονται στην μέτρηση φυσικών υπαρχόντων πεδίων, όπως για παράδειγμα η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ένας κλίβανος. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ηλεκτρομαγνητικές, σεισμικές και ηλεκτρικές μέθοδοι, ενώ στην δεύτερη οι μαγνητικές και βαρυτικές.

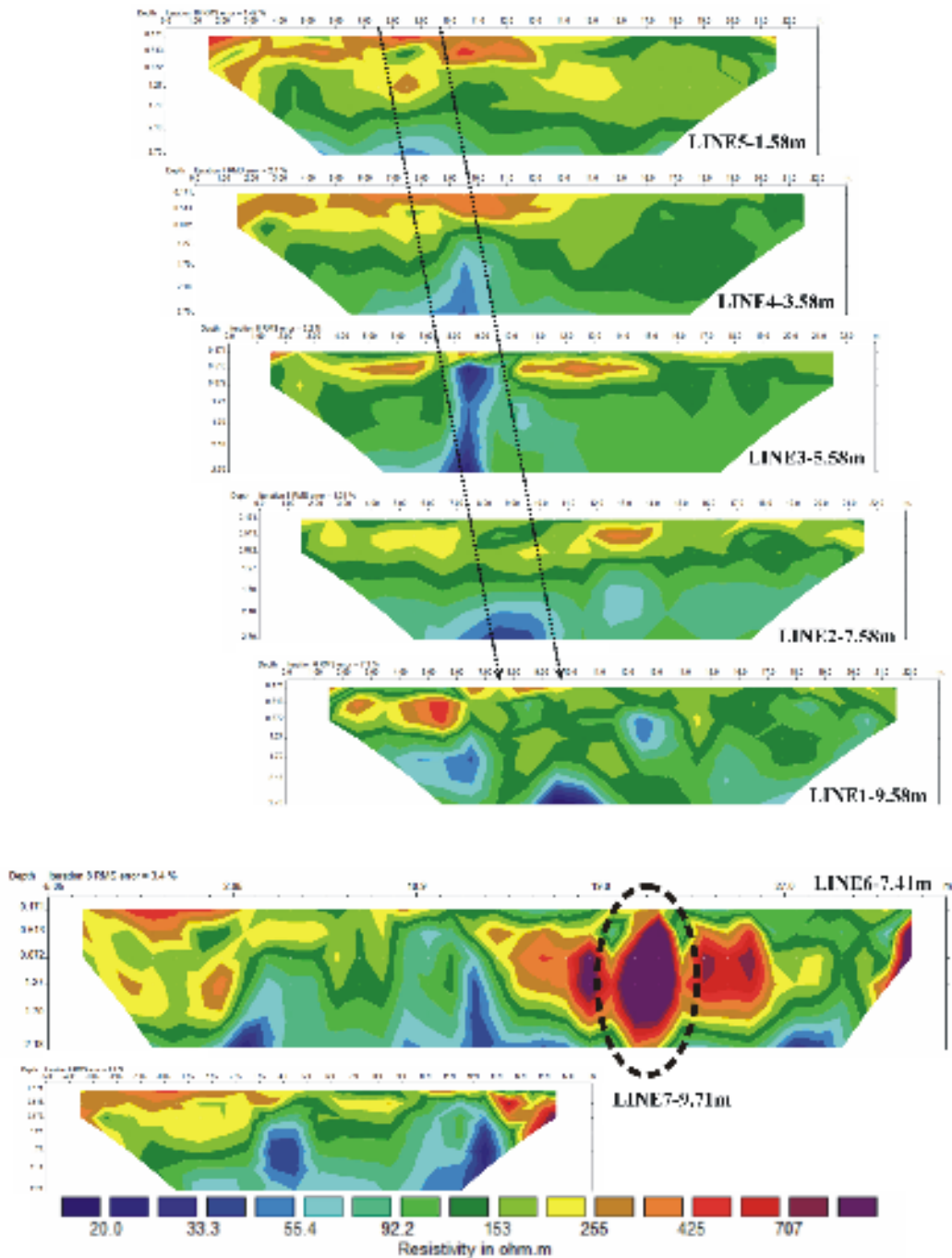
Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις συχνά προηγούνται οποιασδήποτε τεχνικής παρέμβασης σε χώρους ανοικοδόμησης διότι οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται, είναι μη καταστρεπτικές για το χώρο. Επίσης, είναι πιο οικονομικές στην εφαρμογή τους από τη διεξαγωγή μιας έρευνας βασισμένης σε γεωτρήσεις που δίνουν ούτως ή άλλως μόνο μονοδιάστατη ερμηνεία. Έτσι, οι γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης χρησιμοποιούνται ως το αρχικό εργαλείο στην έρευνα μιας περιοχής, ενώ μετρήσεις λίγων ημερών ή εβδομάδων, είναι δυνατόν να καθοδηγούν την μετέπειτα έρευνα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

3.2 Γεωφυσικές μέθοδοι στη γεωτεχνική έρευνα

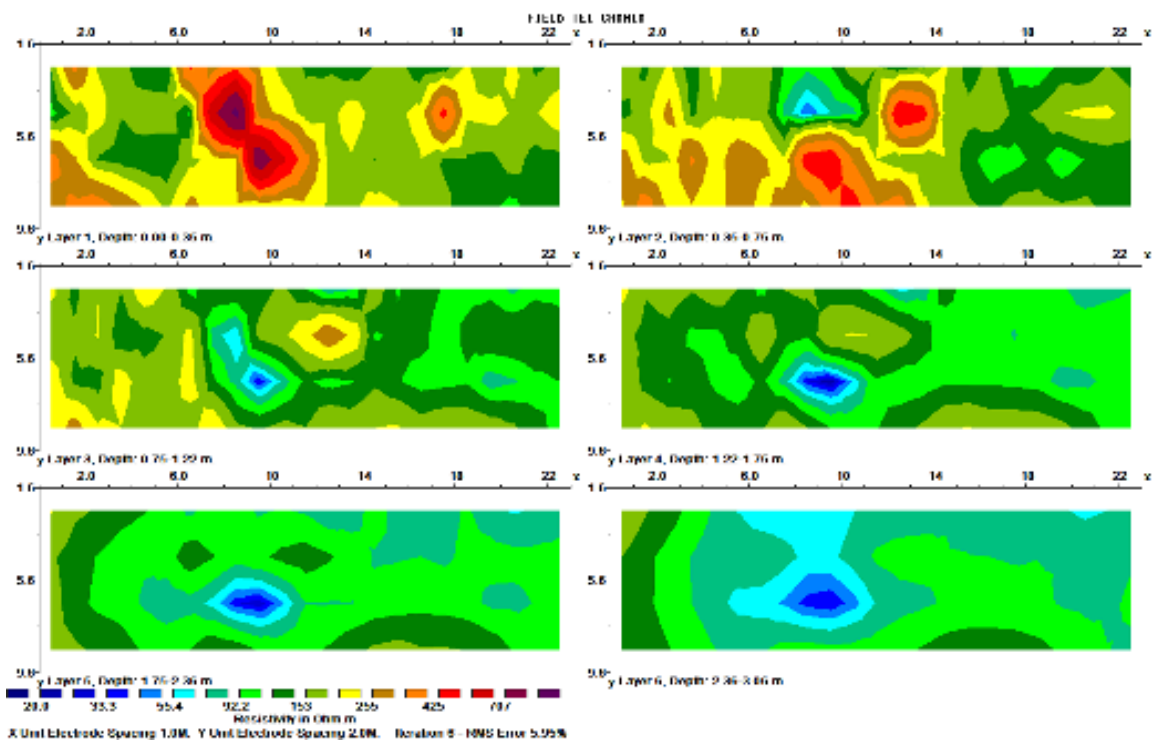
Οι πιο συχνά εφαρμόσιμες γεωφυσικές μέθοδοι στη γεωτεχνική έρευνα είναι η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι (υπεδάφειο ραντάρ).

Η έρευνα στη γεωτεχνική μηχανική χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης ξεκίνησαν πολύ πρόσφατα (σχήμα 5 και 6). Αν και οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις των πετρωμάτων παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα τιμών, όταν οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στη γεωτεχνική έρευνα είναι αρκετό να υποθεθεί ότι οι

υπεδάφειες δομές (π.χ. υπόγεια κενά, στρώσεις αργίλλου, κ.α.), παρουσιάζουν αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται.

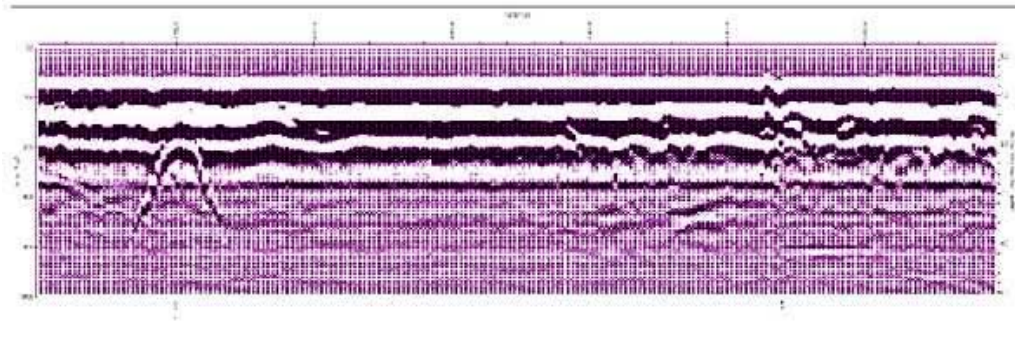


Σχήμα 5. Ψευδοχρωματισμένη απεικόνιση γεωηλεκτρικών τομογραφιών που εκτελέστηκε σε θέση θεμελίωσης τετραώροφης οικοδομής (Soupios et al., 2007).



Σχήμα 6. Τριδιάστατη κατανομή γεωηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος σε περιοχή θεμελίωσης τετραρόφης οικοδομής στα Χανιά (Soupios et al., 2007).

Από τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στη γεωτεχνική έρευνα είναι αυτή του υπεδάφιου ραντάρ ή GPR (Ground Penetrating Radar), όπως είναι διεθνώς γνωστό. Η χρήση του GPR άρχισε στη δεκαετία του 1970 για στρατιωτικούς σκοπούς, κυρίως για τον εντοπισμό πλαστικών ναρκών. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 άρχισε να χρησιμοποιείται στις γεωφυσικές έρευνες. Στο σχήμα (7) παρουσιάζεται μια εικόνα δεδομένων του γεωραντάρ, από ένα χωριό Ινδιάνων του δέκατου όγδοου αιώνα, το οποίο βρίσκεται στην Georgia των Η.Π.Α. Η εμφανής ανάκλαση οφείλεται σε τάφο του νεκροταφείου που άνηκε στον οικισμό (Briuer et al. 1996).



Σχήμα 7. Δεδομένα GPR σε οικισμό Ινδιάνων, στη Georgia των Η.Π.Α. (Briuer et al. 1996).

Το μειονέκτημα χρήσης του υπεδάφειου ραντάρ στην επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων που συνδέονται με την παρουσία καρστικών δομών όπως στην συγκεκριμένη μελέτη είναι το γεγονός ότι το ραντάρ θα εντοπίσει μόνο την οροφή του εγκοίλου αδυνατώντας να δώσει άλλα γεωμετρικά στοιχεία για τα καρστικά συστήματα.

4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.1 Εισαγωγή

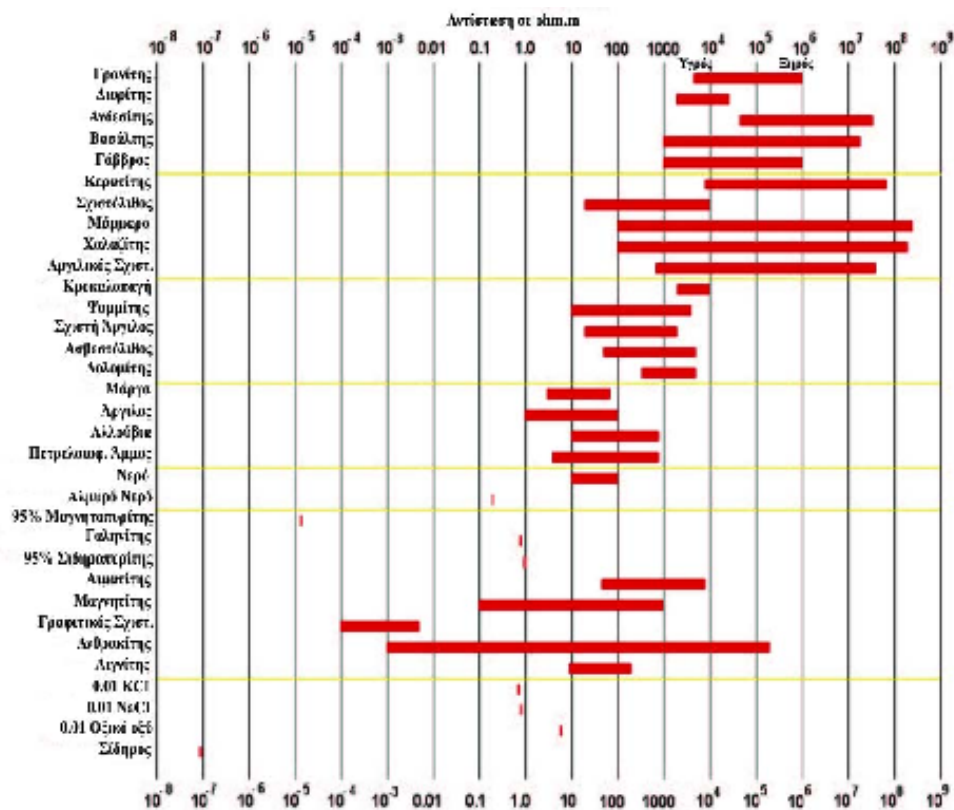
Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης, με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Ηλεκτρικό ρεύμα εισάγεται στο έδαφος και η ποσότητα που μετράμε είναι η ηλεκτρική τάση. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Η ηλεκτρική αντίσταση είναι η ποσότητα που παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως, στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία και στην Τεχνική Γεωλογία. Μία από τις σπουδαιότερες ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, της οποίας η χρήση στην αρχαιομετρία θα αναπτυχθεί σε αυτή την εργασία.

4.2 Σχέση Γεωλογίας και Αντίστασης

Εφόσον τελικός σκοπός είναι να αποκτηθεί η γεωλογική εικόνα της υπό έρευνα περιοχής από την κατανομή της αντίστασης, είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της αντίστασης για τα διάφορα είδη πετρωμάτων. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό το οποίο βρίσκεται στους πόρους και τις ρωγμές των γεωλογικών σχηματισμών. Η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται και από πολλές παραμέτρους όπως είναι η ορυκτολογική σύσταση, το πορώδες, η θερμοκρασία καθώς και η γεωλογική ηλικία του πετρώματος.

Το σχήμα (8), δίνει τις τιμές της αντίστασης διάφορων πετρωμάτων και χημικών στοιχείων (Keller and Frischknecht 1966, Daniels and Alberty 1966, Telford et al. 1990).



Σχήμα 8. Αντίσταση διάφορων πετρωμάτων και ορυκτών (Keller and Frischknecht 1966).

Τα μεταμορφωμένα και τα πυριγενή πετρώματα έχουν υψηλές τιμές αντίστασης. Η αντίσταση αυτών των πετρωμάτων εξαρτάται από το βαθμό ρωγμάτωσής τους και από το ποσοστό του νερού που περιέχουν στους πόρους τους. Τα ίζηματογενή πετρώματα, τα οποία είναι συνήθως περισσότερο πορώδη και περιέχουν υψηλότερο ποσοστό νερού, έχουν χαμηλότερες αντιστάσεις. Η αντίσταση του νερού ποικίλει από 10 έως 100 Ohm-m, πράγμα που εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε διαλυμένα άλατα. Η εξίσωση η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης, ρ ενός πετρώματος και του πορώδους, ϕ αυτού, είναι

$$\rho = a \rho_w \phi^{-m} \quad (4.1)$$

όπου, ρ_w είναι η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος, ϕ είναι ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες) και a και m σταθερές (Keller and Frischknecht 1966). Για τα περισσότερα

πετρώματα τα α και m είναι περίπου 1 και 2 αντίστοιχα. Η σχέση (4.1) είναι γνωστή ως νόμος του Archie και δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.

Λόγω του ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες που μεταβάλλονται εύκολα, οι διακυμάνσεις των τιμών της έχουν μεγάλο εύρος ακόμη και για τους ίδιους γεωλογικούς σχηματισμούς. Είναι όμως πιθανό δύο διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί να έχουν παρόμοιες τιμές ειδικής αντίστασης. Επομένως ασφαλής είναι η σχετική σύγκριση των ειδικών αντιστάσεων στην ίδια περιοχή. Για τους παραπάνω λόγους, είναι απαραίτητο, η ερμηνεία των μετρήσεων να γίνεται με προσοχή και για τη λήψη ασφαλών συμπερασμάτων για τη λιθολογία, θα πρέπει να συνυπολογίζονται όλες οι υπάρχουσες πληροφορίες για την κάθε περιοχή (γεωλογικοί χάρτες, γεωτρήσεις κ.α.)

4.3 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος

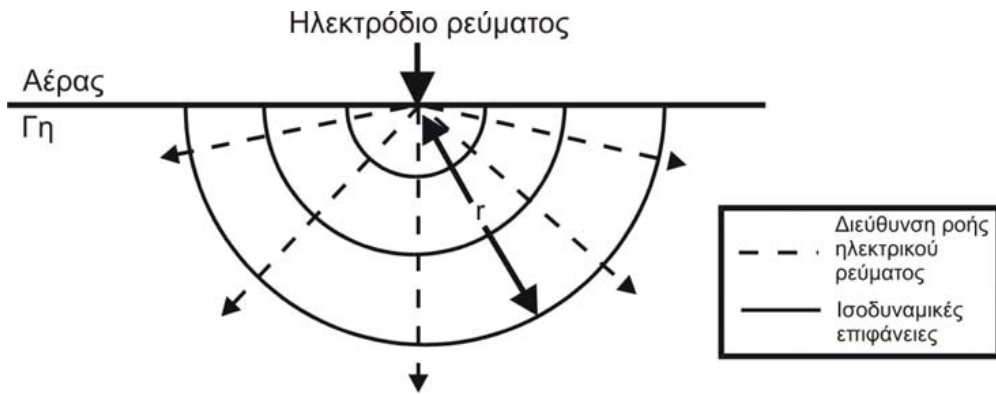
Ο νόμος του Ohm είναι ο βασικός νόμος που χρησιμοποιείται για τη ροή του ρεύματος στο έδαφος. Αυτός εκφράζεται από τη σχέση

$$J = \sigma E \quad (4.2)$$

όπου, J είναι η πυκνότητα του ρεύματος, σ η αγωγιμότητα και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Συνήθως χρησιμοποιείται η ποσότητα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία είναι ισοδύναμη με το αντίστροφο της αγωγιμότητας.

Στην απλή περίπτωση, όπου το έδαφος είναι ομογενές και ισότροπο, το ρεύμα που εισέρχεται σε αυτό μέσω μιας σημειακής πηγής (ηλεκτροδίου), ρέει ακτινικά διερχόμενο από ένα ημισφαίριο εμβαδού $S = 2\pi r^2$, όπου, r η απόσταση της περιφέρειας του ημισφαιρίου από το σημείο εισαγωγής του ρεύματος. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες έχουν σχήμα ημισφαιρίου και οι γραμμές του ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες (σχήμα 9). Σε αυτή την περίπτωση το δυναμικό δίνεται από τη σχέση

$$V = \frac{\rho I}{2m} \quad (4.3)$$

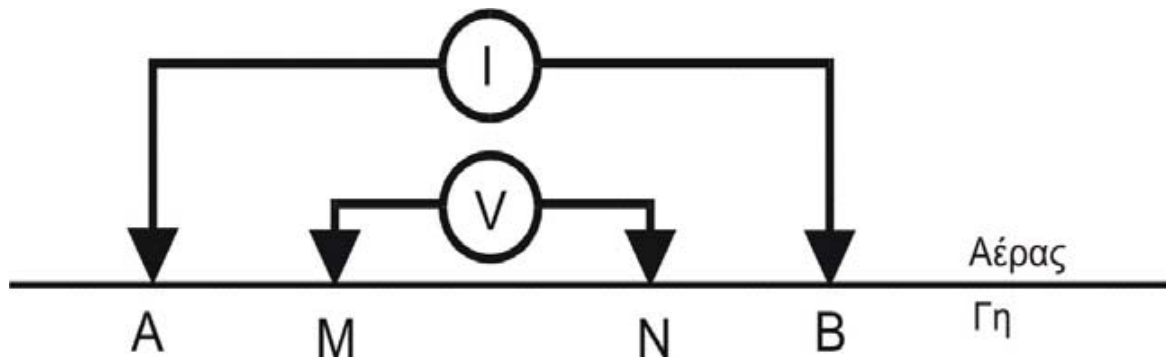


Σχήμα 9. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες και η διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος για μια σημειακή πηγή

4.4 Φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση

Στην πράξη χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια για να γίνει μέτρηση της ειδικής αντίστασης ενός ημιχώρου. Τα δύο από αυτά χρησιμεύουν στην εισαγωγή και κυκλοφορία του ρεύματος και τα ονομάζουμε A και B, ενώ με τη βοήθεια των δύο άλλων μετράμε τη διαφορά δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία και τα ονομάζουμε M και N. Έστω r_1 απόσταση του M από το θετικό ηλεκτρόδιο A, r_2 από το αρνητικό B και r_3 και r_4 οι αντίστοιχες αποστάσεις του N από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος (σχήμα 10). Επομένως από την σχέση (4.3), η διαφορά δυναμικού μεταξύ των A και B για έναν ομογενή ημιχώρο και για μια διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, είναι

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (4.4)$$



Σχήμα 10. Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων.

Επομένως, η ειδική αντίσταση του ημιχώρου μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$\rho = k \frac{AV}{I}, \quad (4.5)$$

όπου, k είναι ο παράγοντας μέσα στην αγκύλη της σχέσης (4.4), ο οποίος λέγεται γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από την διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων. Στην περίπτωση ομογενούς και ισότροπου εδάφους και για οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίων, όταν ο γεωμετρικός παράγοντας πολλαπλασιάζεται με την μετρούμενη αντίσταση, το αποτέλεσμα είναι η πραγματική αντίσταση του εδάφους.

Στην περίπτωση μη ομογενούς και ισότροπου χώρου, η σχέση (4.5), ορίζει μία παράμετρο που ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ημιχώρου, ρ_a . Η παράμετρος αυτή εισάγεται για να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία της μέτρησης, οι θέσεις δηλαδή των ηλεκτροδίων. Η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι η πραγματική αντίσταση του υπεδάφους, αλλά μια φαινόμενη τιμή η οποία είναι η αντίσταση που θα είχε το έδαφος εάν ήταν γεωηλεκτρικά ομογενές. Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή αυτή ταυτίζεται με την πραγματική αντίσταση όταν πρόκειται για ομογενή γη.

Στην πράξη η φαινόμενη αντίσταση ρ_a , αποτελεί ένα είδος μέσου όρου των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Άρα δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια “παραμορφωμένη” εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Για αυτόν τον λόγο η απευθείας χρήση των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι παρακινδυνευμένη. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ο καθορισμός της πραγματικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης είναι η λύση του αντίστροφου προβλήματος, για το οποίο θα γίνει λόγος παρακάτω.

4.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια του ρεύματος και του δυναμικού κατά την χρήση της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σε αυτό το σημείο θα περιγραφούν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις.

Διάταξη Πόλου-πόλου. Η απλούστερη διάταξη είναι αυτή όπου ένα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος, B , και ένα από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού, N , είναι τοποθετημένα σε

πολύ μεγάλη απόσταση από τα άλλα δύο (A, M), έτσι ώστε να μπορέσει να θεωρηθεί ότι βρίσκονται στο άπειρο (σχήμα 11Aε). Επομένως από τη σχέση (4.4), η φαινόμενη ειδική αντίσταση θα είναι

$$\rho_a = 2\pi \frac{AM}{I} \quad (4.6)$$

Εάν τα δύο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τα τοποθετήσουμε κοντά μεταξύ τους, τότε προκύπτει η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου (twin probe) (σχήμα 11Aστ), και η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

$$\rho_a = 2\pi \frac{ab}{a+b} \frac{\Delta V}{I} \quad (4.7)$$

όπου, a και b είναι οι αποστάσεις μεταξύ των A, M και B, N ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου $AM = BN = a$, η σχέση (4.7) γίνεται

$$\rho_a = \pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.8)$$

Διάταξη Πόλου-διπόλου. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N, βρίσκονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος, A, B, ένα από τα οποία τοποθετείται στο άπειρο (σχήμα 11Aδ). Η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_a = 2\pi \frac{ab}{b-a} \frac{\Delta V}{I} \quad (4.9)$$

Όταν η απόσταση b είναι πολλαπλάσια της απόστασης a ($b = na$), τότε η σχέση (4.9) γίνεται

$$\rho_a = 2\pi n(n+1) a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.10)$$

Διάταξη Wenner. Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N, τοποθετούνται ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος A, B (σχήμα 11Aα). Οι αποστάσεις των τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ίσες (a), επομένως από τη σχέση (4.4) προκύπτει ότι

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.11)$$

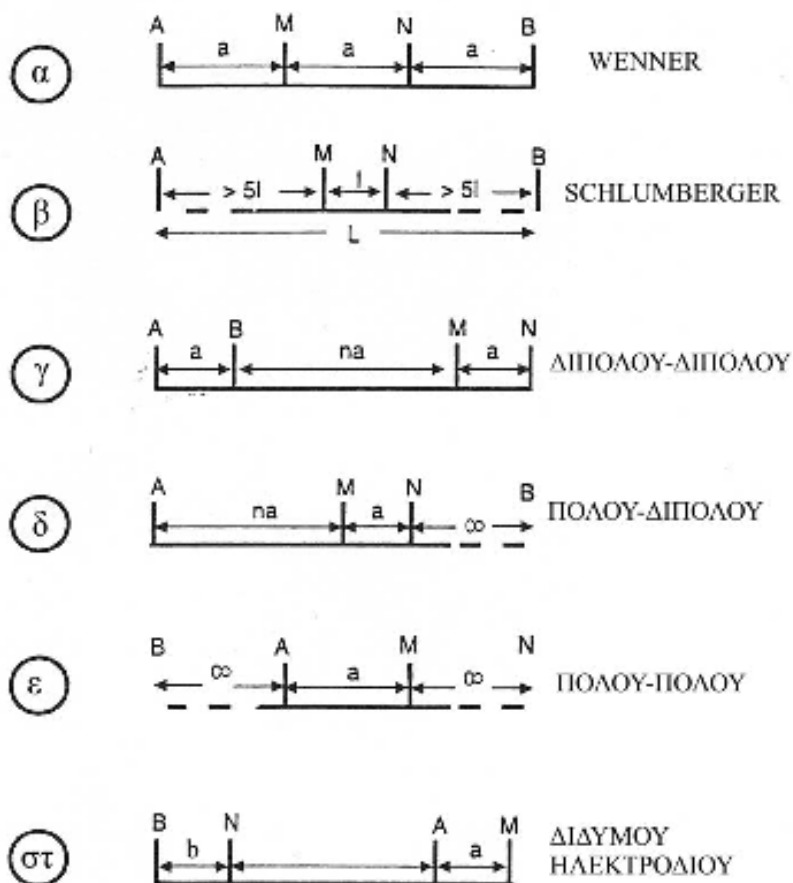
Διάταξη Schlumberger. Τα M και N ηλεκτρόδια βρίσκονται πάλι ανάμεσα στα A, B με τη διαφορά ότι τοποθετούνται συμμετρικά ως προς ένα κέντρο O. Η απόσταση μεταξύ

των A, B είναι L και η απόσταση μεταξύ των M, N είναι l. Ισχύει ότι $L \gg l$ (σχήμα 11Αβ). Σε αυτή την περίπτωση η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I} \quad (4.12)$$

Διάταξη Διπόλου-διπόλου. Στη διάταξη αυτή, το δίπολο του ρεύματος (ηλεκτρόδια A, B) βρίσκεται σε απόσταση na από το δίπολο του δυναμικού (ηλεκτρόδια M, N), ενώ η απόσταση των A, B και M, N είναι ίση με a, όπως φαίνεται στο σχήμα (11Αγ). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

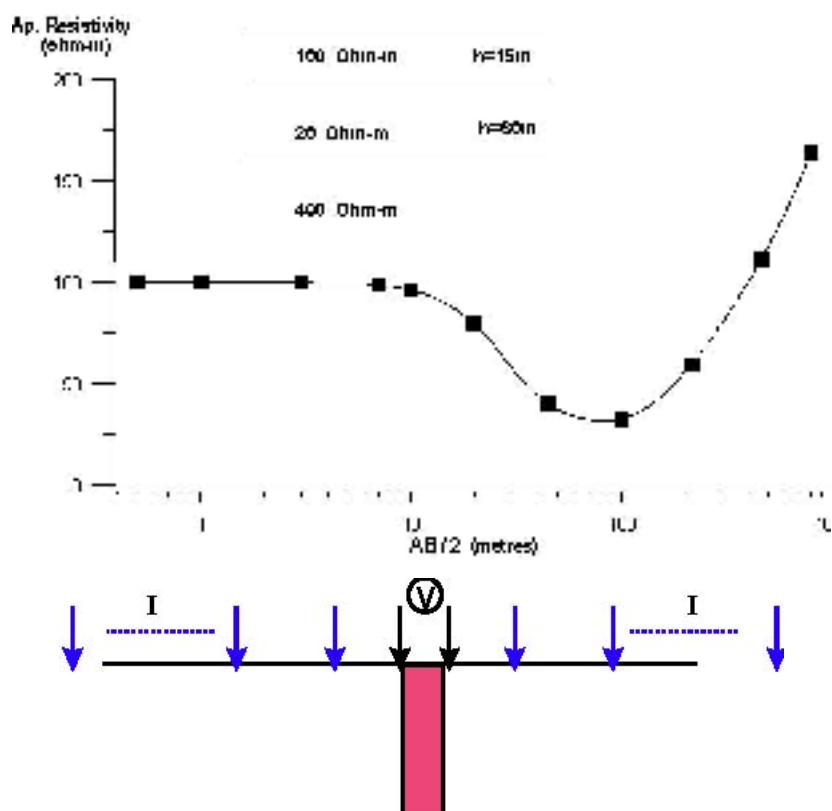
$$\rho_a = -\pi na (n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad (4.13)$$



Σχήμα 11. Διάφορες διατάξεις: (α) Wenner (β) Schlumberger (γ) διπόλου-διπόλου (δ) πόλου-διπόλου (ε) πόλου-πόλου (στ) διδύμου ηλεκτροδίου.

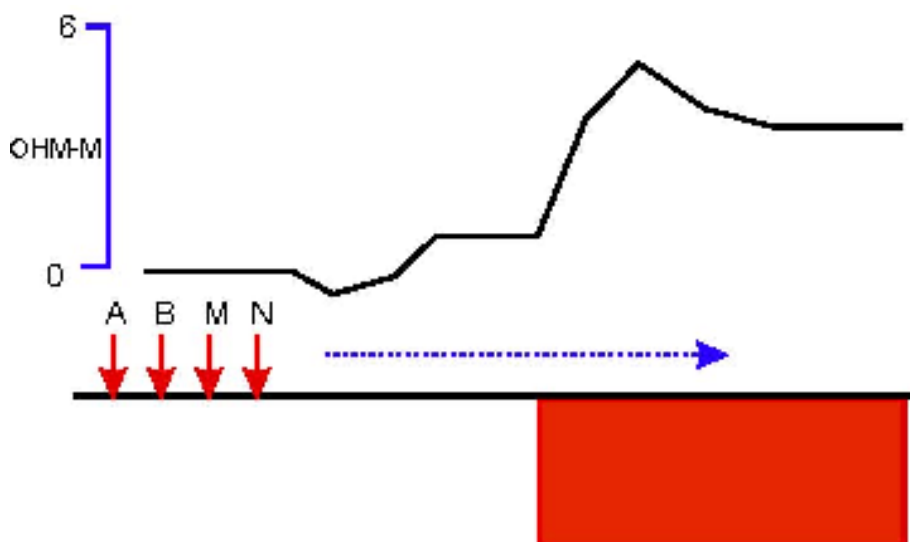
4.6 Μέθοδοι έρευνας

Βυθοσκόπηση (Sounding). Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε συνάρτηση με το βάθος. Το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και με την συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος και διαρρέονται βαθύτεροι σχηματισμοί. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η διάταξη Schlumberger. Έτσι, μετράται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων. Η ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων γίνεται θεωρώντας ύπαρξη οριζόντιων στρωμάτων για αυτό και εφαρμόζεται κυρίως σε ιζηματογενείς λεκάνες (μονοδιάστατη γεωηλεκτρική δομή) (σχήμα 12). Κλασικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών.



Σχήμα 12. Δεδομένα βυθοσκόπησης με διάταξη Schlumberger για ένα μοντέλο τριών στρωμάτων.

Όδευση (Profiling). Χρησιμοποιείται για να εντοπίζει πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό βήμα. Έτσι, χαρτογραφούνται οι μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος κατά μήκος μιας όδευσης και εντοπίζονται δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Στη γεωλογία χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρηγμάτων, φακών άμμου ή χαλικιών, επαφών, κενών κ.α. (σχήμα 13), ενώ η χρήση της είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη στην αρχαιομετρία.



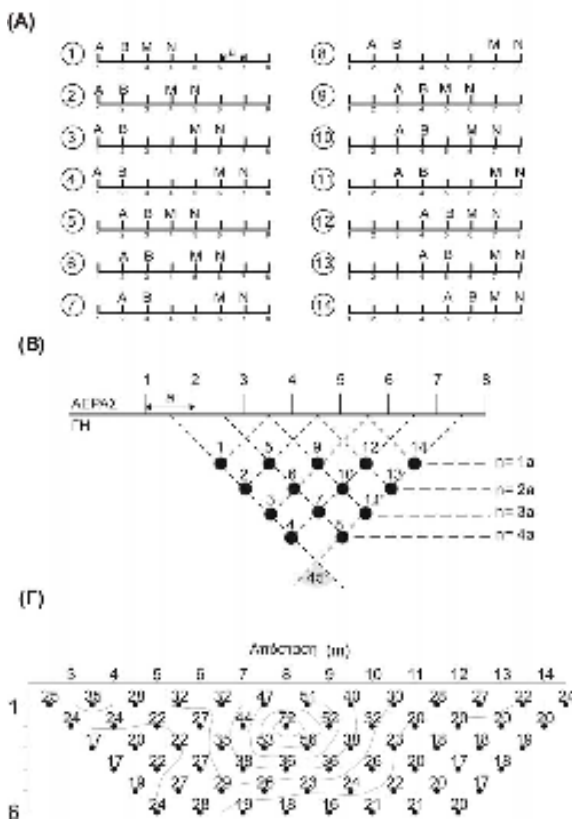
Σχήμα 13. Οριζοντιογραφία στον εντοπισμό ρήγματος.

Δισδιάστατη διασκόπηση (Συνδυασμός sounding και profiling). Με την ηλεκτρική τομογραφία, (συνδυασμός όδευσης και βυθοσκόπησης), είναι δυνατό να πάρουμε πληροφορίες τόσο για την πλευρική όσο και για την σε βάθος μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό γίνεται για παράδειγμα, με διαδοχικές οδεύσεις πάνω από την περιοχή μελέτης, με συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων. Με τον τρόπο αυτό παίρνουμε μια δισδιάστατη εικόνα της ερευνηθείσας περιοχής. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνικές, η ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων, επομένως αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και η ανάλυση της ηλεκτρικής μεθόδου.

Παράδειγμα εφαρμογής της δισδιάστατης διασκόπησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου, φαίνεται στο σχήμα (14) (Tsourlos 1995).

4.7 Επιλογή διάταξης

Ένα σημαντικό πρόβλημα πριν την διεξαγωγή μιας γεωφυσικής έρευνας, είναι η επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων η οποία θα χρησιμοποιηθεί. Παραπάνω περιγράφηκαν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας διάταξης είναι η ευαισθησία της διάταξης σε σχέση με τις κατά βάθος και οριζόντιες αλλαγές της αντίστασης του υπεδάφους (ανάλυση σε κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές αντίστοιχα), και ο λόγος σήματος προς θόρυβο, δηλαδή το μέγιστο βάθος μέχρι το οποίο μπορεί να ανιχνευθεί μια ανωμαλία.



Σχήμα 14. Δισδιάστατη διασκόπηση με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου (α) Τρόπος διάταξης ηλεκτροδίων κατά τη συλλογή των δεδομένων με 8 ηλεκτρόδια και μέγιστο $n=4$ (β) Τρόπος τοποθέτηση των μετρήσεων κατά την απεικόνιση με τη μέθοδο της ψευδοτομής (γ) Ψευδοτομή δεδομένων από τον αχαιολογικό χώρο της Ευρωπού (Tsourlos 1995)

Πίνακας 4.1. Αξιολόγηση διατάξεων (Ward 1989).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΛΟΓΟΣ S/N	ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ
Wenner	1	5	1
Schlumberger	2	4	1
Διπόλου-διπόλου	5	2	2
Πόλου-διπόλου	4	3	2
	1:καλύτερη	5:χειρότερη	

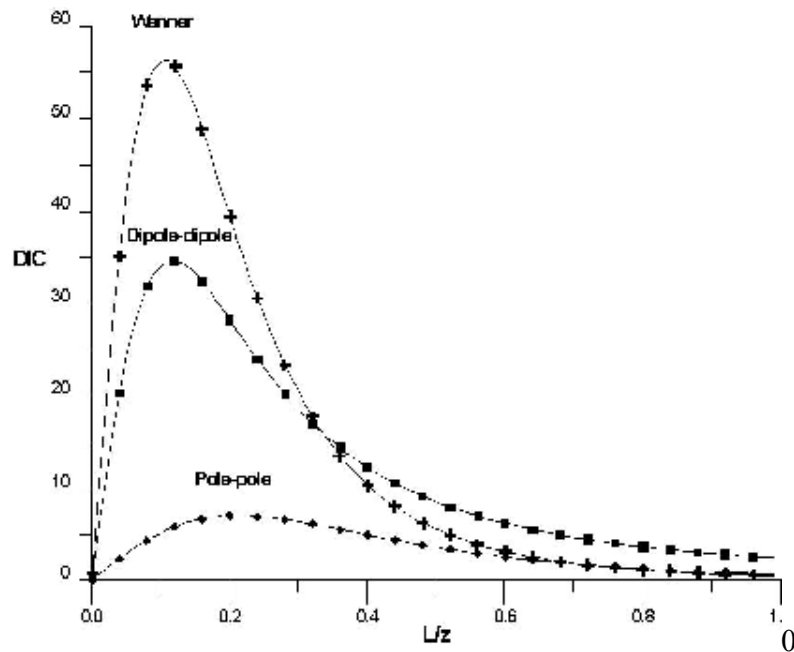
Ο Ward (1989) αξιολόγησε τις διάφορες διατάξεις και τα πιο σημαντικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα (4.1). Από τον πίνακα αυτό φαίνεται πως η διάταξη διπόλου-διπόλου, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των γεωηλεκτρικών δεδομένων στην παρούσα εργασία, έχει μια ικανοποιητική ανάλυση στις κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές της αντίστασης. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο φαίνεται πως έχει την μικρότερη τιμή για τη διάταξη αυτή, με την κατάλληλη επιλογή όμως των παραμέτρων διασκόπησης, η διάταξη αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

4.8 Βάθος διείσδυσης

Η δυσκολία στο να καθοριστεί το βάθος διείσδυσης οφείλεται στο ότι οι θεωρητικοί υπολογισμοί που έχουν γίνει υποθέτουν ομογενή γη, πράγμα το οποίο δεν ισχύει στην πραγματικότητα, και στο ότι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που μετρώνται στην επιφάνεια, δεν οφείλονται αποκλειστικά σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος.

Οι Roy και Appaao (1971), έδειξαν πως η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος μόνο, δεν είναι ενδεικτική για την εύρεση του βάθους διείσδυσης κατά τη χρήση μιας συγκεκριμένης διάταξης ηλεκτροδίων. Αυτό αποδεικνύεται ως εξής: αν σε ένα σύστημα ηλεκτροδίων τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια δυναμικού στις θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και αντίθετα, παρατηρείται ότι τα βάθη διείσδυσης είναι ίδια ενώ η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τελείως διαφορετική (Helmholtz's reciprocity theorem). Αντιστρόφως, δύο συστήματα ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να έχουν παρόμοια κατανομή των γραμμών του ρεύματος αλλά τελείως διαφορετικά βάθη διείσδυσης. Ενώ δηλαδή η

διείσδυση και η κατανομή του ρεύματος έχει άμεση σχέση μόνο με τη θέση των ηλεκτροδίων του ρεύματος, το βάθος διείσδυσης χρησιμοποιώντας κάποια διάταξη ηλεκτροδίων, εξαρτάται και από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού.



Σχήμα 15. DIC καμπύλες για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου.

Πίνακας 4.2. Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Roy and Apparao 1971, Roy 1971).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΒΑΘΟΣ
Wenner	0.11 L
Schlumberger	0.125 L
Διπόλου-διπόλου	0.195 L
Πόλου-πόλου	0.35 L
L: συνολικό μήκος διάταξης	

Για αυτό το λόγο οι παραπάνω ερευνητές, λαμβάνοντας υπ όψιν τη συνεισφορά κάθε απειροστού όγκου στο συνολικό σήμα, δηλαδή στη συνολική διαφορά δυναμικού που μετράται στην επιφάνεια του εδάφους, υπολόγισαν, για τις διάφορες διατάξεις, καμπύλες οι οποίες απεικονίζουν την απόκριση ενός λεπτού οριζόντιου στρώματος με

μεταβαλλόμενο βάθος. Η καμπύλη (DIC - Depth of Investigation Characteristic), για διάφορα βάθη, για μια γενικευμένη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων και για ένα μοντέλο ομογενούς γης, έχει την παρακάτω μορφή (Roy and Apparao 1971)

$$DK = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2e^{-kz}}{k} \left[\frac{1}{(a^2 + 4e^2)^{3/2}} - \frac{1}{(b+c)^2 + 4e^2} - \frac{1}{(a+b)^2 + 4e^2} - \frac{1}{(c^2 - 4e^2)^{3/2}} \right] dz \quad (4.14)$$

όπου, xy είναι το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους, $z(0,0,0)$ ο άξονας του βάθους, $(a,0,0)$ η θέση του θετικού ηλεκτροδίου ρεύματος, $(a+b,0,0)$ οι θέσεις των ηλεκτροδίων του δυναμικού και $(a+b+c,0,0)$ η θέση του αρνητικού ηλεκτροδίου του ρεύματος. Οι καμπύλες DIC για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου, φαίνονται στο σχήμα (15) και το βάθος διείσδυσης z , σε συνάρτηση με την απόσταση L των δύο εξωτερικών ενεργών ηλεκτροδίων της διάταξης, (εκτός των ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε 'άπειρη' απόσταση, εάν υπάρχουν), στον πίνακα (4.2) (Roy and Apparao 1971, Roy 1971). Σύμφωνα με τους ερευνητές, το βάθος στο οποίο η καμπύλη DIC γίνεται μέγιστη, είναι το βάθος το οποίο συνεισφέρει περισσότερο στο σήμα που λαμβάνεται στην επιφάνεια, δηλαδή το βάθος διείσδυσης.

Τα βάθη που υπολόγισαν οι Roy και Apparao (1971), συγκρινόμενα με εμπειρικές τιμές (Zhody 1989) αποδείχτηκε πως είναι υποτιμημένα. Ο Edwards (1977) πρότεινε ότι το μέγιστο βάθος διείσδυσης μιας διάταξης, δεν είναι αυτό στο οποίο η καμπύλη DIC γίνεται μέγιστη (σχήμα 15), αλλά το βάθος στο οποίο η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη DIC, χωρίζεται σε δύο μέρη ίσου εμβαδού, γεγονός το οποίο υποστηρίχθηκε και από τον Barker (1989).

Το βάθος, το οποίο ονομάστηκε μέσο βάθος διείσδυσης και που προτάθηκε από τον Edwards (1977) είναι η λύση της παρακάτω εξίσωσης

$$z_{med} = \int_{z=0}^{z_{med}} NDIC = 1/2 \quad (4.15)$$

όπου, είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη που έγινε με βάση τους γεωμετρικούς παράγοντες, από τους Roy και Apparao. Στον πίνακα (4.3) φαίνονται οι τιμές του βάθους διείσδυσης για τις διάφορες διατάξεις σε συνάρτηση με το συνολικό μήκος της διάταξης L , όπως υπολογίστηκαν από τον Edwards (1977).

Συγκριτικά με τις τιμές που υπολόγισαν οι Roy και Apparao (πίνακας 4.2), οι τιμές του πίνακα (4.3) βρίσκονται σε καλύτερη συμφωνία με διάφορους εμπειρικούς

υπολογισμούς και αποτελέσματα (Zhody 1989).

Πίνακας 3.3. Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Edwards 1977).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΒΑΘΟΣ
Wenner	0.17 L
Schlumberger	0.195 L
Διπόλου-διπόλου	0.25 L
Διδύμου ηλεκτροδίου	0.77 L
Πόλου-διπόλου	0.52 L
L: συνολικό μήκος διάταξης	

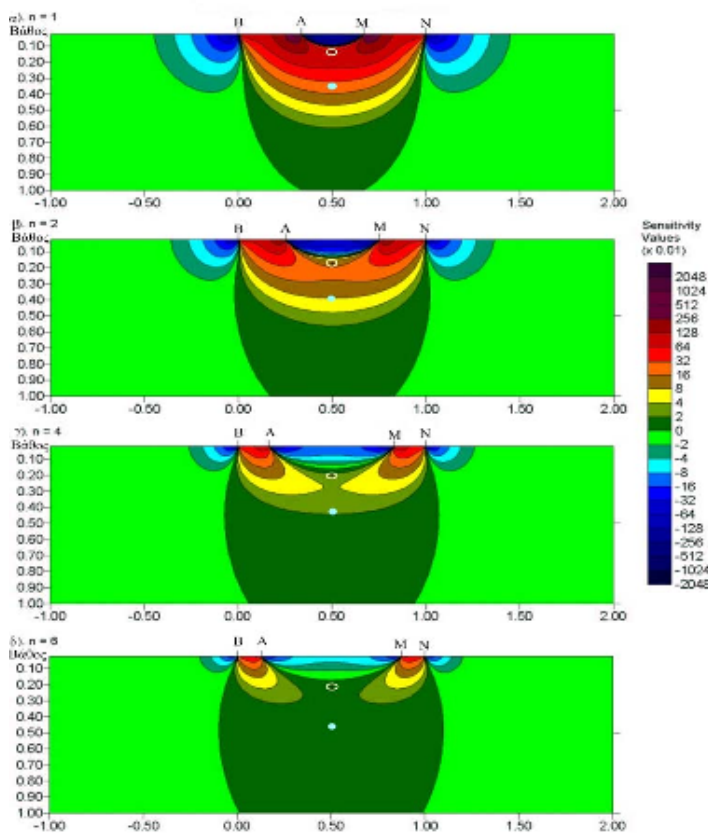
Στον πίνακα (4.4), (Edwards 1977), παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου βάθους διείσδυσης z_{med} διάφορων διατάξεων, για διάφορες τιμές του n και σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων a και το συνολικό μήκος της διάταξης L . Ουσιαστικά αν και το βάθος διείσδυσης έχει να κάνει με την στρωματογραφία του εδάφους, για παράδειγμα ένα χαμηλής αντίστασης στρώμα μειώνει το βάθος διείσδυσης, οι υπολογισμοί που έχουν γίνει θεωρούν ένα μοντέλο ομογενούς ημιχώρου μιας και η δομή της γης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι άγνωστη. Τα βάθη αυτά έχει αποδειχτεί από διάφορες εφαρμογές πως δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και στην πραγματικότητα.

4.9 Πίνακας ευαισθησίας

Ουσιαστικά, η καμπύλη δείχνει το βαθμό στον οποίο επηρεάζεται η κάθε μέτρηση από τη μεταβολή της αντίστασης με το βάθος. Για την μελέτη όμως της καταλληλότητας των διάφορων διατάξεων κατά την εφαρμογή τους σε διασκοπήσεις δύο διαστάσεων, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η ευαισθησία της διάταξης κατά τον οριζόντιο άξονα. Έτσι, για ένα συγκεκριμένο σημείο με συντεταγμένες (x,z) , προστίθεται η συνεισφορά στο συνολικό σήμα από όλα τα σημεία για τιμές του y από το 1 έως το 2. Ο πίνακας που περιέχει αυτές τις πληροφορίες, ονομάζεται πίνακας ευαισθησίας ή Ιακωβιανός πίνακας, και θα περιγραφεί παρακάτω στη θεωρία του αντιστρόφου προβλήματος.

Στο σχήμα (16) απεικονίζονται οι δύο διαστάσεων τομές 'ευαισθησίας', δηλαδή η μεταβολή του Ιακωβιανού πίνακα, για την διάταξη διπόλου-διπόλου και για τιμές του n από 1 έως 6 (Loke 1996). Φαίνεται πως οι μεγαλύτερες θετικές τιμές βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων A-B και M-N, πράγμα που σημαίνει πως η διάταξη είναι πιο ευαίσθητη στις αλλαγές της αντίστασης τμημάτων που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές, επομένως αυτές οι περιοχές δίνουν τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

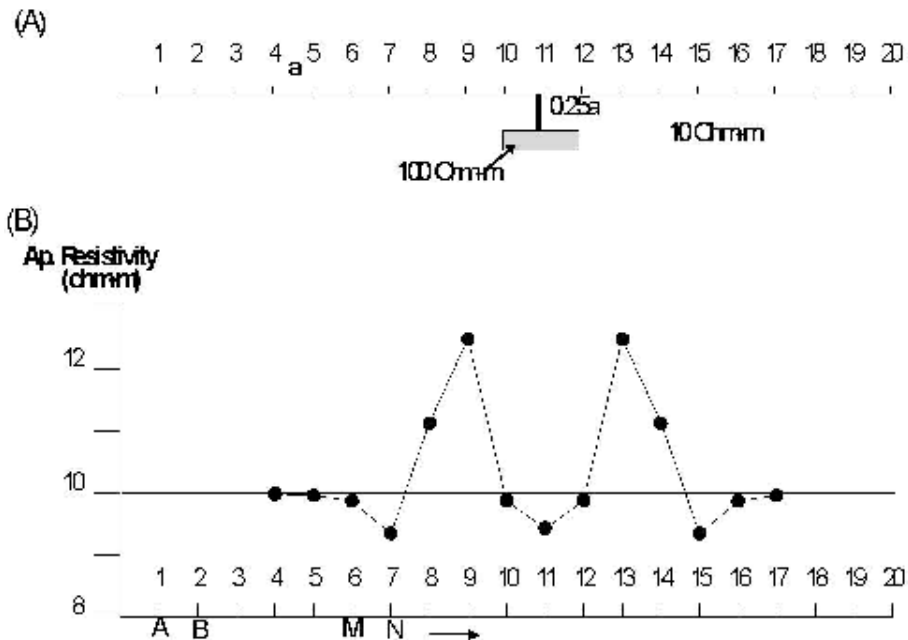
Όσο η τιμή του n αυξάνει οι υψηλές τιμές συγκεντρώνονται περισσότερο κάτω από τα δίπολα A-B και M-N, ενώ οι τιμές κάτω από το κέντρο της διάταξης, μεταξύ των ηλεκτροδίων A-M, μειώνονται. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται με σταυρό, μέσα στο κίτρινο κύκλο, και το σημείο το οποίο προκύπτει από την καμπύλη (Edwards 1977). Φαίνεται πως το σημείο αυτό βρίσκεται σε περιοχές με χαμηλές τιμές της συνάρτησης ευαισθησίας για τιμές του n μεγαλύτερες του 4 (Loke 1996).



Σχήμα 16. Δύο διαστάσεων τομές ευαισθησίας για την διάταξη διπόλου-διπόλου (α) $n=1$, (β) $n=2$, (γ) $n=4$, (δ) $n=6$ (Loke 1996).

Η κατανομή των τιμών του Ιακωβιανού πίνακα δίνει εξήγηση στη μορφή της

ανωμαλίας που προκύπτει χρησιμοποιώντας διαφορετικές διατάξεις. Στο σχήμα (17) απεικονίζεται η γραφική παράσταση των τιμών της φαινόμενης αντίστασης στην



Σχήμα 17. Γραφική παράσταση φαινόμενων αντιστάσεων για τη διάταξη διπόλου-διπόλου πάνω από σώμα υψηλής αντίστασης.

περίπτωση όδευσης με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Την ανωμαλία αυτή προκαλεί ένα σώμα υψηλής αντίστασης που βρίσκεται σε βάθος $0,25a$, όπου a είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η μορφή της γραφικής παράστασης αυτής, μπορεί να εξηγηθεί αν συγκριθεί με τις τομές ευαισθησίας της διάταξης (σχήμα 17). Φαίνεται πως η διάταξη διπόλου-διπόλου προκαλεί μια μείωση της αντίστασης όταν τα ηλεκτρόδια βρίσκονται πάνω από το σώμα και δύο μεγάλες αυξήσεις της αντίστασης όταν βρίσκονται πλευρικά από αυτό. Οι μεγάλες τιμές οφείλονται στις υψηλές τιμές της 'ευαισθησίας' κάτω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος.

4.10 Μέθοδος ψευδοτομής

Για την αρχική ερμηνεία των μετρήσεων, σε μια ή δύο διαστάσεων απεικόνιση των δεδομένων, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ψευδοτομής. Με τη μέθοδο αυτή, κάθε μέτρηση της φαινόμενης αντίστασης τοποθετείται κατά την οριζόντια διεύθυνση στο κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση προβάλλεται

σε βάθος που σχετίζεται με την απόσταση των ηλεκτροδίων.

Συγκεκριμένα για την διάταξη διπόλου-διπόλου, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, κάθε μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θεωρείται ότι προέρχεται από το σημείο τομής των δύο ευθειών που ξεκινάνε με γωνία 45⁰ από το μέσο της απόστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος, AB και το μέσο της απόστασης των ηλεκτροδίων του δυναμικού, MN (Hallof 1957) (σχήμα 14). Πρέπει να σημειωθεί πως αυτό δεν σημαίνει ότι το βάθος διείσδυσης δίνεται από το σημείο τομής των δύο ευθειών με 45⁰ κλίση, είναι μια υπόθεση που γίνεται για λόγους απεικόνισης των μετρήσεων μας (Loke 1996).

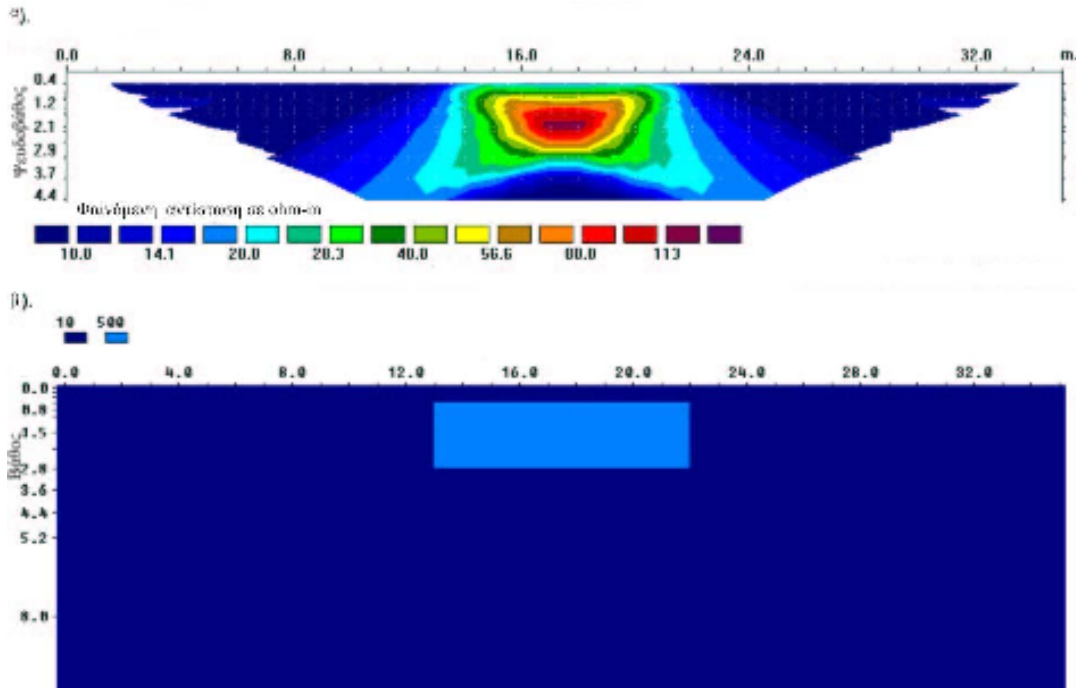
Μια άλλη τεχνική είναι αντί να χρησιμοποιηθεί η γωνία 45⁰ να χρησιμοποιηθούν τα βάθη του Edwards (1977). Η τεχνική αυτή περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Εξάλλου από το σχήμα (17) φαίνεται ότι αν απεικονιζόταν το σημείο που προκύπτει από την τομή των δύο ευθειών με 45⁰ γωνία (μπλε κύκλος στο σχήμα), θα βρισκόταν σε περιοχή όπου οι τιμές της συνάρτησης ευαισθησίας είναι σχεδόν μηδενικές.

Πρέπει να σημειωθεί πως η μέθοδος της ψευδοτομής δεν πρέπει να χρησιμοποιείται από μόνη της για την ερμηνεία των μετρήσεων, γιατί δίνει μια παραμορφωμένη εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, μιας και απεικονίζει την κατανομή των φαινόμενων, και όχι των πραγματικών, ηλεκτρικών αντιστάσεων, οι τιμές των οποίων, όπως σημειώθηκε, έχουν να κάνουν και με την γεωμετρία της διάταξης των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται. Ειδικότερα, η διάταξη διπόλου-διπόλου είναι ιδιαίτερα παραπλανητική μιας και δίνει μια εικόνα όπου παρουσιάζονται περιοχές υψηλών αντιστάσεων με μορφή υπερβολής (σχήμα 18). Η διαδικασία για να απομακρυνθεί η επιρροή της γεωμετρίας της διάταξης από την ψευδοτομή και να προκύψει μια εικόνα της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος, είναι αυτή της αντιστροφής η οποία θα περιγραφεί παρακάτω.

4.11 Θεωρία επίλυσης ευθέως προβλήματος

Κατά την επίλυση του ευθέως γεωηλεκτρικού προβλήματος υπολογίζεται η φαινόμενη αντίσταση που θα προέκυπτε από τη διεξαγωγή μιας γεωφυσικής έρευνας εάν μας ήταν γνωστή η κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Λόγω του ότι

σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές η πηγή του ρεύματος θεωρείται σημειακή, αν υποθεθεί πως οι συντεταγμένες της πηγής του ρεύματος I είναι (x_s, y_s, z_s) , τότε η σχέση μεταξύ της πυκνότητας και της έντασης του ρεύματος πάνω από μια απειροστή ποσότητα όγκου ΔVol (Dey and Morrison 1979α), είναι,



Σχήμα 18. Ψευδοτομή φαινόμενης αντίστασης με την διάταξη διπόλου-διπόλου. ($AB=MN=1-3$, $n=1-5$) (Loke 1996).

$$\nabla J = \left(\frac{I}{\Delta Vol} \right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s), \quad (4.16)$$

όπου, δ είναι η συνάρτηση του Dirac. Επομένως η σχέση γίνεται

$$-\nabla[\sigma(x, y, z) \nabla V(x, y, z)] = \left(\frac{I}{\Delta Vol} \right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (4.17)$$

Η τελευταία σχέση αποτελεί την βασική εξίσωση που δίνει την κατανομή του δυναμικού στο υπέδαφος που προκαλείται από μια σημειακή πηγή. Η λύση της εξίσωσης αυτής αποτελεί ουσιαστικά την επίλυση του ευθέως προβλήματος.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων υπολογισμού των τιμών της

φαινόμενης αντίστασης για ένα συγκεκριμένο μοντέλο:

Αναλυτικές μέθοδοι. Αυτές είναι οι πιο ακριβείς, αλλά περιορίζονται από το ότι προσδιορίζουν μόνο απλές δομές, όπως οι σφαιρικές ή οι κυλινδρικές (Cook and Van Nostrand 1954).

Αριθμητικές μέθοδοι. Αν και είναι πιο 'ευέλικτες' από τις πρώτες όσο αφορά την γεωμετρία των δομών, περιορίζουν τον αριθμό των περιοχών με διαφορετικές τιμές της αντίστασης. Τις περισσότερες φορές ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος από δέκα. Οι αριθμητικές μέθοδοι χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

Μέθοδοι ολοκληρωτικών εξισώσεων (Integral equation methods). Αριθμητικές μέθοδοι όπου η λύση τους βρίσκεται στην επιφάνεια γεωηλεκτρικών ασυνεχειών και οι αριθμητικοί υπολογισμοί βασίζονται στη χρήση συναρτήσεων του Green. Ουσιαστικά, υποτίθεται ότι η ύπαρξη μιας δομής διαφορετικής αντίστασης από το περιβάλλον είναι ισοδύναμη με μια κατανομή στοιχειωδών ηλεκτροστατικών πηγών στην επιφάνειά του.

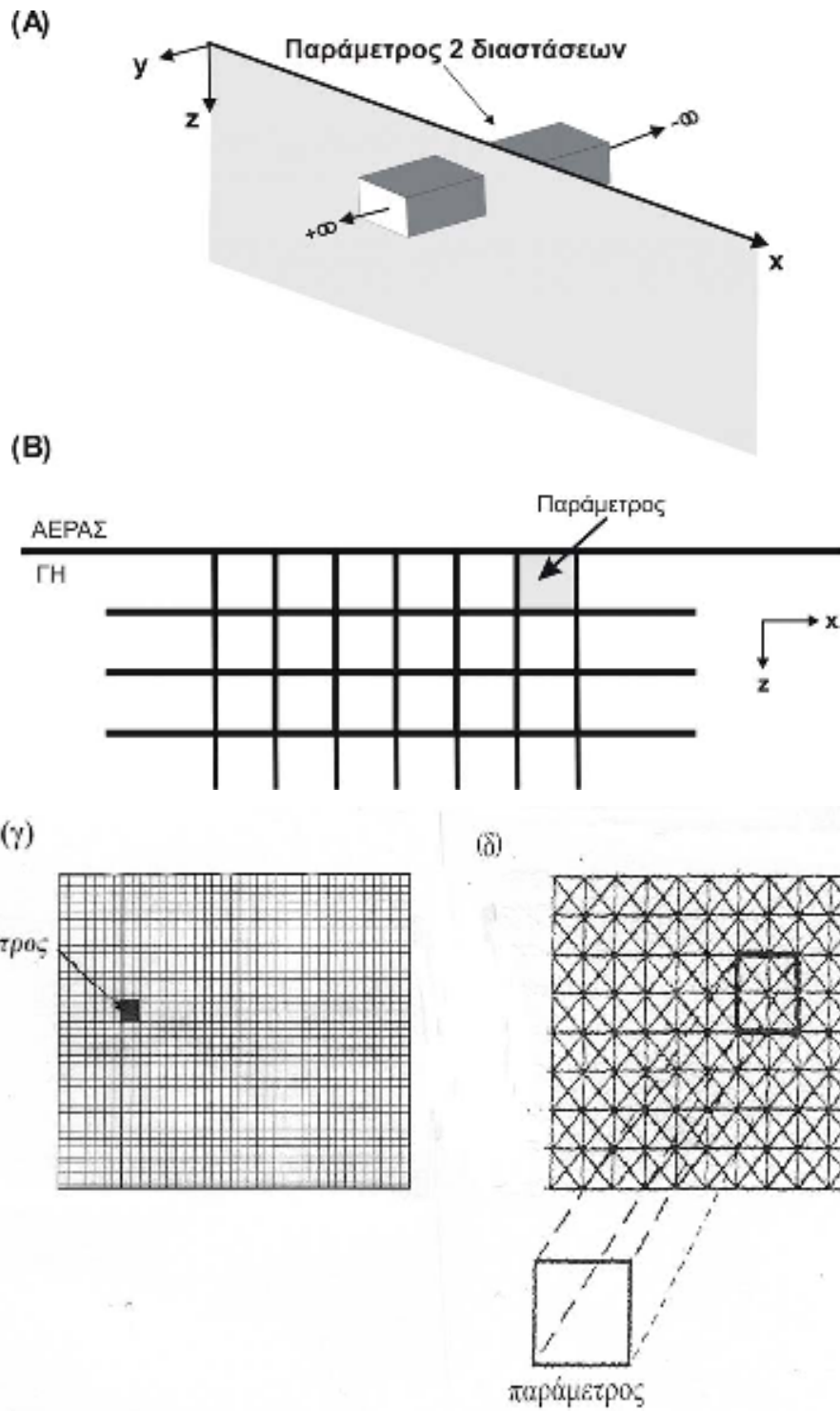
Διαφορικές μέθοδοι. Οι γνωστότερες τεχνικές αυτού του είδους είναι οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών. Αυτές υποδιαιρούν το υπέδαφος σε όσα κελιά διαφορετικής αντίστασης είναι επιθυμητό (σχήμα 19). Η τιμή της αντίστασης σε κάθε κελί θεωρείται σταθερή. Επομένως μιας και το υπέδαφος έχει τυχαία και πολύπλοκη κατανομή της αντίστασης, οι μέθοδοι αυτές είναι τις περισσότερες φορές η καλύτερη επιλογή και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Η διαφορά των δύο αυτών τεχνικών βασίζεται στο ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Mufti 1976, Dey and Morrison 1979a,b), χωρίζει το υπέδαφος σε έναν μεγάλο αριθμό ορθογώνιων κελιών (σχήμα 19γ), ενώ στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Coggon 1971, Silvester and Ferrari 1990), χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία (σχήμα 19δ). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργίας του δικτύου του υπεδάφους, είναι δυνατόν να προσομοιωθούν ακανόνιστα όρια, δομές και η τοπική γεωμορφολογία.

4.12 Θεωρία αντίστροφου προβλήματος

4.12.1 Εισαγωγή

Η λύση του αντιστρόφου προβλήματος είναι ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία από αυτή του ευθέως προβλήματος που περιγράφηκε παραπάνω. Δηλαδή μετρώντας την



Σχήμα 19. (α) Παράμετρος 2-διαστάσεων (β) Διαδικασία παραμετροποίησης (γ) Διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (δ) Διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

φαινόμενη αντίσταση που προκύπτει από μια γεωφυσική έρευνα προσδιορίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις οι οποίες να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές.

Λόγω του ότι το πρόβλημα της αντιστροφής στην ηλεκτρική μέθοδο είναι μη γραμμικό και λόγω του ότι μικρές διαφοροποιήσεις στα δεδομένα είναι δυνατό να δώσουν πολύ διαφορετικές λύσεις, (ill-conditioned problem), η λύση του απαιτεί σταθερούς αλγόριθμους αντιστροφής οι οποίοι θα δώσουν μια ικανοποιητική λύση μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει τα δεδομένα να έχουν καλή ποιότητα, δηλαδή να είναι όσο το δυνατό περισσότερο απαλλαγμένα από θόρυβο (Tsourlos et al. 1998).

Οι τεχνικές επεξεργασίας για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος χωρίζονται στις προσεγγιστικές μεθόδους, μερικές από τις οποίες είναι η μέθοδος Bristow (Bristow 1966), η μέθοδος Zhody-Barker (Zhody 1989, Barker 1992), η μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al. 1993), και στις ακριβείς μη γραμμικές μεθόδους αντιστροφής. Κάποιες από τις μεθόδους αυτές είναι η μη γραμμική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Gauss-Newton), η μέθοδος των ιδιζουσών τιμών (SVD) (Press et al. 1987), η μέθοδος Levenberg-Marquadt (Marquadt 1963), η μέθοδος εξομαλυσμένης αντιστροφής (Occam) (Constable et al. 1987, DeGroot-Hedlin and Constable 1990), η μέθοδος σταθερής αντιστροφής (Robust) (Claerbout and Muir 1973).

4.12.2 Γραμμικοποίηση του προβλήματος

Όλες οι παραπάνω τεχνικές προσπαθούν να λύσουν προσεγγιστικά το μη γραμμικό γεωηλεκτρικό πρόβλημα μετατρέποντάς το σε μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης γραμμικών προβλημάτων. Το αποτέλεσμα είναι ο καθορισμός ενός μοντέλου του οποίου η 'απόκριση' είναι παρόμοια με τις πραγματικές τιμές που μετρώνται κατά τη διάρκεια της γεωφυσικής διασκόπησης. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται στην λύση όλων των μη γραμμικών συστημάτων στη γεωφυσική. Υποθέτοντας ότι η κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης είναι ένα διάνυσμα x με άγνωστες τιμές και ότι οι m μετρήσεις είναι ένα διάνυσμα y , τότε η γενική μορφή της εξίσωσης που πρέπει να λυθεί είναι

$$f_j(x) = y_j \quad j=1,2,\dots \quad (4.18)$$

όπου, f είναι η συνάρτηση που περιγράφει το ευθύ πρόβλημα.

Θεωρείται πως η συνάρτηση $f(x)$ είναι γραμμική γύρω από το x , επομένως για μια μικρή μεταβολή της αντίστασης dx μπορεί να αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας το θεώρημα Taylor (Meju 1994)

$$f(x_i + dx_i) = f(x_i) + \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} dx_i + O((dx_i)^2) \quad (4.19)$$

όπου, $i=1,2,\dots,n$, $j=1,2,\dots,m$ και $O((dx_i)^2)$ είναι οι όροι μεγαλύτερης τάξης οι οποίοι μπορούν να αγνοηθούν μόνο όταν η σειρά συγκλίνει, δηλαδή μόνο όταν το dx είναι πολύ μικρό για κάθε x , γεγονός το οποίο θεωρείται ότι ισχύει. Στην παραπάνω εξίσωση οι όροι $J_{ij} = \frac{\partial f_j(x_i)}{\partial x_i}$ σχηματίζουν έναν $(n \times m)$ πίνακα ο οποίος ονομάζεται Ιακωβιανός

πίνακας. Ο πίνακας αυτός συνδέει τις μετρήσεις με τις τιμές του μοντέλου. Επομένως η σχέση (4.19) μπορεί να εκφραστεί με τη γενικότερη μορφή

$$f(x + dx) = f(x) + J dx \quad (4.20)$$

Λόγω του ότι η διαδικασία της αντιστροφής είναι μια επαναληπτική διαδικασία η οποία προσπαθεί να μειώσει τις διαφορές ανάμεσα στις τιμές των μετρήσεων και στις τιμές του μοντέλου, θα πρέπει να υπάρχει ένα κριτήριο σύγκλισης μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογιζόμενων δεδομένων. Οι στατιστικοί όροι που χρησιμοποιούνται συνήθως για την διαδικασία αυτή, είναι το επί τις εκατό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS-12 norm) και το χ^2 (chi square-11 norm), των οποίων οι σχέσεις δίνονται παρακάτω

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i - f_i(x)}{d_i} \right)^2}, \quad (4.21)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i - f_i(x)}{\sigma_i} \right)^2, \quad (4.22)$$

όπου, το m δηλώνει τον αριθμό των μετρήσεων και σ_i είναι η τυπική απόκλιση στην

μέτρηση.

4.12.3 Μη γραμμική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Gauss-Newton)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα αρχικό μοντέλο διαφοροποιείται μέσω ενός επαναληπτικού τρόπου, έτσι ώστε το τελικό μοντέλο να απεικονίζει όσο το δυνατό καλύτερα την πραγματικότητα. Αν οι μετρήσεις είναι ένα διάνυσμα m και η ‘απόκριση’ του μοντέλου μια συνάρτηση $f(x)$, τότε σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί μια κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης, για την οποία η διαφορά

$$dy = d - f(x), \quad (4.23)$$

να γίνεται ελάχιστη (Meju 1994).

Ουσιαστικά, σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί η παρακάτω συνάρτηση

$$q = dy^T dy = (d - f(x))^T (d - f(x)) \rightarrow 0. \quad (4.24)$$

Αυτό συμβαίνει όταν η παράγωγος αυτής της συνάρτησης ως προς τη μεταβολή του x γίνεται μηδέν, δηλαδή όταν

$$\frac{\partial q}{\partial dx} = \frac{\partial [(d - f(x) - Jdx)^T (d - f(x) - Jdx)]}{\partial dx} = 0. \quad (4.25)$$

Κάνοντας την παραγωγή ως προς dx , η εξίσωση (3.27) καταλήγει τελικά στη λύση των ελαχίστων τετραγώνων

$$dx = (J^T J)^{-1} J^T dy, \quad (4.26)$$

όπου, το dy είναι το διάνυσμα των διαφορών μεταξύ των μετρήσεων m και του αρχικού μοντέλου. Η μεταβολή αυτή της αντίστασης dx , προστίθεται στο αρχικό μοντέλο για την απόδοση μιας καλύτερης εκτίμησης της λύσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου να προκύψει ένα μοντέλο το οποίο να είναι σε μια ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις. Μετά από κάθε επανάληψη, η τιμή της καινούργιας κάθε φορά αντίστασης είναι

$$x^{k+1} = x^k + (J^T J)^{-1} J^T dy. \quad (4.27)$$

Ο πίνακας $(J^T J)^{-1}$ είναι γνωστός ως γενικευμένος αντίστροφος του Ιακωβιανού πίνακα.

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτείται μια καλή

εκτίμηση του αρχικού μοντέλου για να υπάρξει σύγκλιση, και ότι ο πίνακας μπορεί να είναι ιδιάζων, επομένως η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων δεν θα δίνει λύση για το dx , ή σχεδόν ιδιάζων $J^T J$, γεγονός το οποίο μπορεί να συμβεί όταν η εκτίμηση του αρχικού μοντέλου δεν είναι καλή. Σε αυτή την περίπτωση το καινούργιο μοντέλο που υπολογίζεται από τη σχέση (4.27) δεν είναι ρεαλιστικό.

4.12.4 Μέθοδος Levenberg-Marquadt (Damped least-squares)

Για την αποφυγή των ασταθών λύσεων όταν ο πίνακας $J^T J$ είναι ιδιάζων, ο Levenberg (1944) αρχικά και στη συνέχεια ο Marquadt (1963) πρότειναν τη λύση των αποσβενόμενων ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στη Γεωφυσική.

Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση της σχέσης (4.24) υπό την προϋπόθεση ότι το πλάτος του διανύσματος της λύσης να έχει περιορισμένο εύρος τιμών, δηλαδή να ισχύει $dx \leq x_b$, όπου, ο όρος x είναι ένας αριθμός. Μπαίνει δηλαδή ένα όριο στο μέγεθος των διακυμάνσεων που μπορεί να έχουν οι διορθώσεις του μοντέλου, περιορίζοντας έτσι τις λύσεις. Τελικά, η συνάρτηση που ελαχιστοποιείται είναι

$$K(\lambda) = dy^T dy + \lambda(dx^T dx - x_b), \quad (4.28)$$

όπου, λ είναι ο πολλαπλασιαστής του Lagrange. Από την ελαχιστοποίηση της παραπάνω συνάρτησης προκύπτει ότι η εξίσωση που δίνει τη διόρθωση του μοντέλου σε κάθε επανάληψη είναι

$$dx = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T dy. \quad (4.29)$$

Όταν ο πολλαπλασιαστής του Lagrange έχει μικρή τιμή ($\lambda \rightarrow 0$), τότε η λύση της εξίσωσης (4.29) είναι πολύ κοντά στη λύση της μεθόδου Gauss-Newton (σχέση 4.26). Η μοναδική διαφορά μεταξύ των δύο εξισώσεων, είναι η σταθερά λ η οποία προστίθεται στα στοιχεία της κύριας διαγωνίου του πίνακα $J^T J$.

Δύο βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι πρώτον, ότι το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται κατά πολύ από το αρχικό μοντέλο (Smith and Vozoff 1984), και δεύτερον, ότι κάποιες φορές παράγονται πολύπλοκες λύσεις οι οποίες αν και είναι μαθηματικά σωστές, δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

4.12.5 Μέθοδος εξομαλυσμένης αντιστροφής (Occam)

Ένας άλλος τρόπος επίλυσης του αντιστρόφου γεωηλεκτρικού προβλήματος είναι να εισαγάγουμε έναν περιορισμό εξομάλυνσης. Σκοπός είναι να βρεθεί το πιο εξομαλυσμένο μοντέλο που να ταιριάζει με τα δεδομένα. Η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής (Constable et al. 1987, DeGroot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992), δεν δίνει την κατ' ανάγκη βέλτιστη λύση, αλλά το μοντέλο που παράγεται, είναι μια 'συντηρητική' και λογική απεικόνιση του υπεδάφους.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ορίζεται αρχικά, ένας όρος ο οποίος περιγράφει τις σχέσεις εξομάλυνσης μεταξύ των παραμέτρων, ως συνάρτηση της αντίστασης (Constable et al. 1987, DeGroot-Hedlin and Constable 1990). Ένας απλός όρος εξομάλυνσης περιγράφηκε από τον Sasaki (1992): Εάν υπάρχουν στρώματα και παράμετροι σε κάθε στρώμα, των οποίων το σχήμα θεωρείται ορθογώνιο, τότε η συνολική τραχύτητα LQR του μοντέλου δίνεται από τη σχέση

$$R = \sum_{i=2}^{L-1} \sum_{j=2}^{G-1} [x_{i,j-1} + x_{i,j+1} - 4x_{i,j} + x_{i-1,j} + x_{i+1,j}]^2, \quad (4.30)$$

όπου, ο όρος) εκφράζει την αντίσταση της παραμέτρου που ανήκει στο στρώμα και στην στήλη και τα στοιχεία είναι οι αντιστάσεις των δυτικού, βόρειου, νότιου και ανατολικού παραμέτρων αντίστοιχα. Η παραπάνω εξίσωση για μεταβολή των αντιστάσεων του μοντέλου γράφεται ως εξής,

$$\mathcal{X}_{(x_{i,j})} k \mathcal{X}_{(x_{i-1,j})} \mathcal{X}_{(x_{i,j-1})} \mathcal{X}_{(x_{i,j+1})} \mathcal{X}_{(x_{i+1,j})} \mathcal{X}_{(x_{i,j})} dx, \Delta R = (C dx)^T (C dx), \quad (4.31)$$

όπου, C είναι ο πίνακας εξομάλυνσης του οποίου τα στοιχεία της γραμμής περιέχουν πληροφορίες για την παράμετρο. Το στοιχείο της γραμμής που αντιστοιχεί στην παράμετρο έχει τιμή -4, ενώ τα στοιχεία που αντιστοιχούν στις γειτονικές παραμέτρους, (βόρεια, νότια, ανατολική, δυτική), έχουν τιμή 1. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είναι 0.

Σε κάθε επανάληψη η ποσότητα ΔR της σχέσης (4.31), ελαχιστοποιείται υπό τον περιορισμό ότι η συνάρτηση (σχέση 4.24), να γίνεται ελάχιστη (Constable et al. 1987). Ακολουθώντας τα ίδια βήματα όπως στην προηγούμενη μέθοδο, η εξίσωση που τελικά δίνει την διόρθωση του μοντέλου σε κάθε επανάληψη, είναι

$$dx = [J^T J + \lambda C^T C]^{-1} J^T dy, \quad (4.32)$$

όπου, λ είναι ένας πολλαπλασιαστής του Lagrange η τιμή του οποίου ορίζεται είτε εμπειρικά, είτε με μεθόδους βελτιστοποίησης. Ο πολλαπλασιαστής λ , αποτελεί έναν παράγοντα ελέγχου της εξομάλυνσης του μοντέλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λ , τόσο πιο εξομαλυσμένο είναι το μοντέλο.

4.12.6 Μέθοδος σταθερής αντιστροφής (Robust inversion)

Όταν στην υπό μελέτη περιοχή οι τιμές των αντιστάσεων μεταβάλλονται απότομα, τότε η εικόνα των αντιστάσεων του υπεδάφους που λαμβάνεται από την εξομαλυσμένη αντιστροφή απέχει αρκετά από την πραγματικότητα, καθώς αυτή παράγει ένα μοντέλο με ομαλή μεταβολή των τιμών των αντιστάσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις η μέθοδος της σταθερής αντιστροφής δίνει καλύτερα αποτελέσματα (Olayinka and Yaramanci 2000).

Σε αυτή την τεχνική, η σχέση (4.24) τροποποιείται έτσι ώστε η συνάρτηση ελαχιστοποίησης να είναι όχι η q , αλλά αυτή της απόλυτης τιμής των σφαλμάτων (Claerbout and Muir 1973)

$$q' = |d - f(x)| \quad (4.33)$$

Σε αυτή τη μέθοδο εισάγεται ένας καινούργιος όρος, ο πίνακας βαρών, ο οποίος περιέχει τις πληροφορίες που υπάρχουν για την ακρίβεια των μετρήσεων. Αν γνωρίζουμε πως τα δεδομένα μας έχουν σφάλματα, τότε τα στοιχεία του θα είναι τα w_i, d_i, s_i

$$w_i = \frac{1}{s_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.34)$$

Όταν κάποια από τις μετρήσεις i έχει μεγάλο σφάλμα, τότε το αντίστοιχο w_i παίρνει μια πολύ μικρή τιμή, επομένως δίνεται στη συγκεκριμένη μέτρηση ένα πολύ μικρό βάρος και δεν λαμβάνεται πολύ υπ' όψιν κατά τη διάρκεια της αντιστροφής. Ο τύπος που δίνει τελικά την διόρθωση κάθε φορά του μοντέλου σε αυτή την περίπτωση είναι

$$dx = (J^T J + \lambda C^T W_m C)^{-1} (J^T W_m dy - \lambda C^T W_m Cx) \quad (4.35)$$

όπου, W_m και W_d είναι οι πίνακες βαρών του μοντέλου και των δεδομένων αντίστοιχα.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Προγραμματισμός και Λήψη Γεωφυσικών Μετρήσεων

Στο σχήμα (20) παρουσιάζεται απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας από το Google Earth στο οποίο απεικονίζεται η περιοχή έρευνας καθώς και η εκκλησία που βρίσκεται εντός της ιδιοκτησίας του Ιδρύματος Νεότητας και Διακονίας της Ενορίας του Αγ. Τίτου.



Σχήμα 20. Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας της περιοχής έρευνας. Στη φωτογραφία απεικονίζονται επίσης θέσεις εμφανών καρστικών εγκοίλων (karstic1 και karstic2-higher), η θέση της υδρογεώτρησης (borehole) που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και η θέση της καρστικής χωάνης (sinkhole-cave). Με μαύρο παραλληλόγραμο απεικονίζεται η περιοχή έρευνας.

Στο σχήμα (21) παρουσιάζεται το πλήθος και η ακριβής θέση των μετρήσεων δίνοντας τις σχετικές θέσεις των τομών έχοντας ως σταθερά σημεία τα όρια των υπό

θεμελίωση κτιρίων. Με μαύρα τετράγωνα παρουσιάζονται οι θέσεις των πασσάλων που οριοθετούσαν το υπό ανέγερση κτίριο. Δεν υπήρχαν όλοι οι πάσσαλοι και έτσι το «δέσιμο» των γραμμών έγινε με όσα διαθέσιμα σταθερά σημεία υπήρχαν.

Στο σύνολο εκτελέστηκαν 7 γεωηλεκτρικές τομογραφίες. Οι δύο πρώτες εκτελέστηκαν στην ίδια γραμμή με διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων έτσι ώστε να βαθμονομήσουμε το όργανο στους γεωλογικούς σχηματισμούς που εφαρμόσαμε τη μεθοδολογία, καθώς και να ορίσουμε τη βέλτιστη διακριτική ικανότητα του μοντέλου. Το συνολικό μήκος των τομών ήταν 322,5 μέτρα.

Οι μετρήσεις υπαίθρου ξεκίνησαν την 20/04/2007 στο πάνω πατάρι των εκσκαφών όπως υποδείχθηκε από τους ενδιαφερόμενους. Στην περιοχή αυτή εκτελέστηκαν 4 τομογραφίες σε 3 διαφορετικές διατομές και με διαφορετικά διαστήματα μεταξύ των ηλεκτροδίων με σκοπό να «δούμε» σε μεγαλύτερα βάθη και να συσχετίσθουν με ευκολία τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις στα δύο διαφορετικά επίπεδα δόμησης. Όλες οι τομογραφίες εκτελέστηκαν με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ.

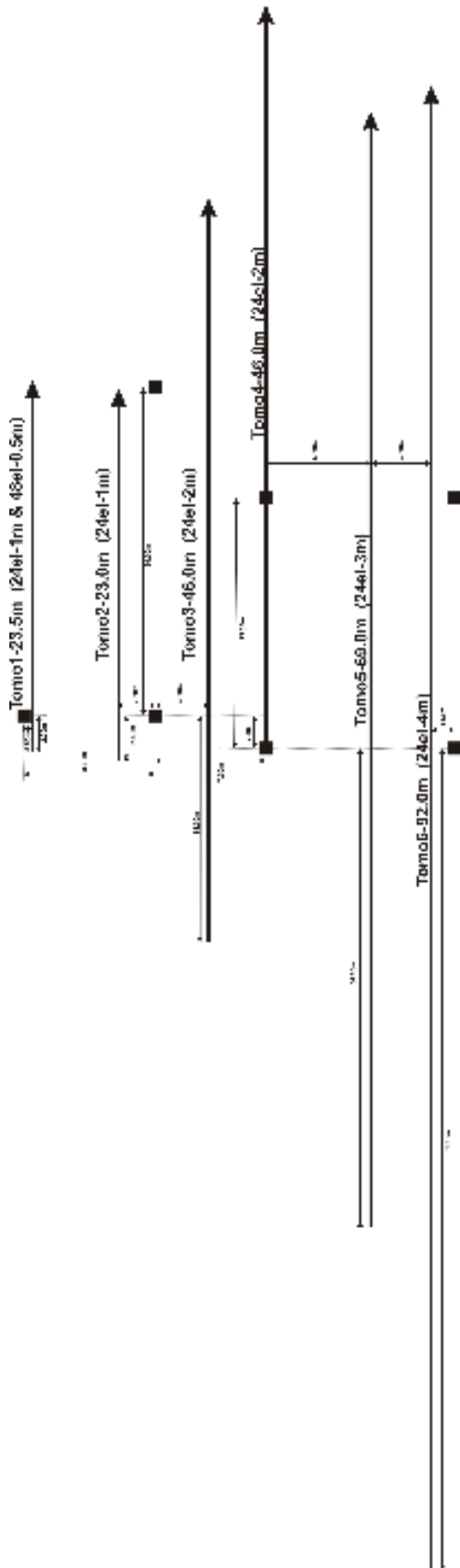
Η διακριτική ικανότητα ήταν της τάξης του 0.5 μέτρου κατά μήκος (X) της τομής για την τομογραφία 1, 1.0 μέτρο για τις τομογραφίες 2 και 3, 2.0 μέτρα για τη τομογραφία 4, 3.0 μέτρα για την τομογραφία 5 και 4.0 μέτρα για τη τομογραφία 6. Οσον αφορά τη διακριτική ικανότητα με το βάθος (Z) ήταν για κάθε τομή το μισό της διακριτικής ικανότητας κατά X.

Οι μετρήσεις ολοκληρώθηκαν την 20/04/2007 και έλαβαν μέρος οι,

- Παντελεήμων Σουπιός, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης– Τ.Φ.Π.Π
- Ηλίας Παπαδόπουλος, Εργαστηριακού Συνεργάτη Τ.Ε.Ι. Κρήτης– Τ.Φ.Π.Π
- Δημήτριος Πλιάκης, Επ. Συνεργάτης Τ.Ε.Ι. Κρήτης – Τ.Φ.Π.Π.

Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε από τον υπογράφο τα την πτυχιακή εργασία, Φούντα Αναστάσιο, φοιτητή του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά τομή και επίπεδο μετρήσεων έτσι ώστε να οδηγηθούμε στο τέλος στην συνολική ερμηνεία λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που μας παραχωρήθηκαν για τη μελέτη.



Σχήμα 21. Στο σκαρίφημα απεικονίζεται το σύνολο και οι θέσεις των μετρήσεων σε σχέση με τα σταθερά σημεία (μαύρα τετράγωνα) της θεμελίωσης. Οι τομογραφίες περιγράφονται ως Τομο#-##.#m (ο αριθμός της μέτρησης και το μήκος της τομής σε μέτρα) ενώ στη παρένθεση δίνονται στοιχεία όπως πλήθος ηλεκτροδίων (##el) και η μεταξύ τους απόσταση σε μέτρα). Για όλες τις τομογραφίες εφαρμόστηκε το ίδιο σύστημα συντεταγμένων.

5.2 Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικής τομογραφίας

Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με ένα αλγόριθμο αντιστροφής (Loke, 2000, 2002). Ο αλγόριθμος RES2DINV είναι δισδιάστατης μη γραμμικής αντιστροφής και εκτελεί επαναληπτική βελτιστοποίηση βασισμένος σε ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία. Ο αλγόριθμος είναι τελείως αυτοματοποιημένος και χρησιμοποιεί το σχήμα της αντιστροφής Occam (Constable et al. 1991). Η διαδικασία αντιστροφής μπορεί να επιταχυνθεί με τη χρήση τεχνικών Quasi-Newton για την ενημέρωση του Ιακωβιανού πίνακα.

Όλες οι αντιστροφές παρουσίασαν σχετικά μικρό σφάλμα (RMS 15-30%) δεδομένης της έντονης υπεδάφειας ανομοιογένειας της περιοχής έρευνας. Η έντονη μεταβολή του r.m.s σχετίζεται με τη μεγάλη μεταβλητότητα των τιμών της υπεδάφιας ηλεκτρικής αντίστασης που μεταβάλλεται από τα 0.5 έως 50 Ωm των υλικών εκσκαφής που βρίσκονται σε μερικό κορεσμό, αντιστάσεις που κυμαίνονται από τα 50 έως τα 300 Ωm των ασβεστομαργαϊκών συγκριμμάτων, αντιστάσεις που κυμαίνονται από 500 έως και τα 1200 Ωm τα οποία συνιστούν το μεταμορφωμένο υπόβαθρο το οποίο υπέρκειται του ασβεστολιθικού όγκου (παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθος) με αντιστάσεις που κυμαίνονται από 2000-15000 Ωm. Κατά θέσεις οι αντιστάσεις φτάνουν τα 400000 Ωm όπου και εντοπίζεται έντονη καρστικοποίηση του ασβεστολιθικού υποβάθρου.

5.3 Εξοπλισμός

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι επιστημονικά όργανα:

- SYSCAL Jr. Switch 48 (v. 11.4++). Ένα αυτόματο πολυκαναλικό σύστημα (48 καναλιών) μέτρησης αντιστάσεων με εσωτερικό επιλογέα καναλιών (πολυπλέκτης 48 θέσεων).
- 2 πολύκλωνα καλώδια (26 κλώνων) μεταφοράς του σήματος με 24 εξόδους το καθένα ανά 5 μέτρα.
- 48 πάσσαλοι και 48 καλώδια σύνδεσης αυτών με τα καλώδια μεταφοράς του σήματος.
- 1 μπαταρία 12V και 143Ah για μεγάλη αυτονομία στο ύπαιθρο.

- Καλώδιο RS232 για μεταφορά των δεδομένων από το σύστημα καταγραφής στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.
- Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή HP450 για την αποτύπωση των θέσεων και τη συλλογή φωτογραφικού υλικού.
- GPS Garmin 12XL για την αποτύπωση των γραμμών μέτρησης.

5.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της γεωηλεκτρικής (ERT) διασκόπησης

5.4.1 Τομογραφία 1 (24 ηλεκτρόδια ανά 1 μέτρο και 48 ηλεκτρόδια ανά 0.5 μέτρα)

Στην πρώτη περιοχή η θέση έρευνας δομείται παχυστρωματόδεις ασβεστολίθους (φωτογρ. 7) με κλίσεις περί τις 35 μοίρες προς ΒΒΔ. Μετά το μέσο της τομής (φωτογρ. 8, 9, 10, 11 και 12) παρατηρείται αλλαγή σχηματισμών με μεταβατική ζώνη (ασβεστιτικών συγκριμμάτων) πάχους 8 μέτρων και οδηγούμαστε στη μεταμορφωμένη ζώνη (φυλλίτες και σχιστόλιθοι).



Φωτογραφία 7. Στη φωτογραφία παρουσιάζεται η αρχή της πρώτης τομογραφίας πλησίον του πρανούς.



Φωτογραφία 8. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το τέλος της πρώτης διασκόπησης καθώς και οι 2 πρώτες εμφανίσεις εγκοίλων εντός του χώρου διαμόρφωσης για τη θεμελίωση.



Φωτογραφία 9. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το τέλος της πρώτης διασκόπησης καθώς και οι 2 πρώτες εμφανίσεις εγκοίλων εντός του χώρου διαμόρφωσης για τη θεμελίωση.



Φωτογραφία 10. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το ένα εκ των δύο εγκοίλων που εντοπίστηκαν κατά τη διαμόρφωση του χώρου θεμελίωσης στο πάνω «πατάρι». Επίσης εμφανίζονται όλα τα τυπικά χαρακτηριστικά καρστικών εγκοίλων και παρουσίας νερού (απόθεση αλάτων, κ.α.).



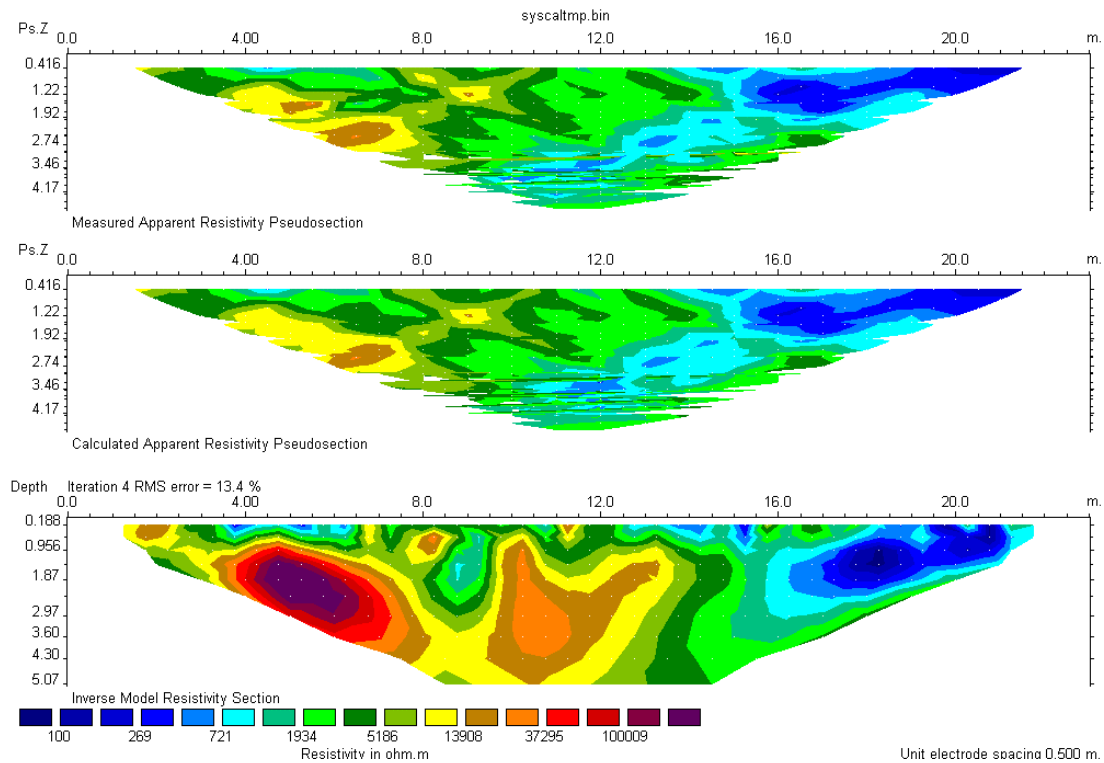
Φωτογραφία 11. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το δεύτερο εκ των δύο εγκοίλων που εντοπίστηκαν κατά τη διαμόρφωση του χώρου θεμελίωσης στο πάνω «πατάρι». Το μεγαλύτερο μέρος της εισόδου καλύφθηκε από χώματα που έπεσαν με την πρώτη βροχόπτωση.



Φωτογραφία 12. Στη φωτογραφία απεικονίζεται η αρχή της πρώτης διασκόπησης.

Στη συνέχεια δίνεται η ερμηνεία της τομογραφίας που εκτελέστηκε με απόσταση ηλεκτροδίων ίσο με 1 μέτρο. Το βάθος διερεύνησης έφτασε τα 5 μέτρα. Με κόκκινα χρώματα εμφανίζονται οι υψηλές αντιστάσεις ενώ με βαθύ μπλε περιγράφονται οι περιοχές υψηλής αγωγιμότητας.

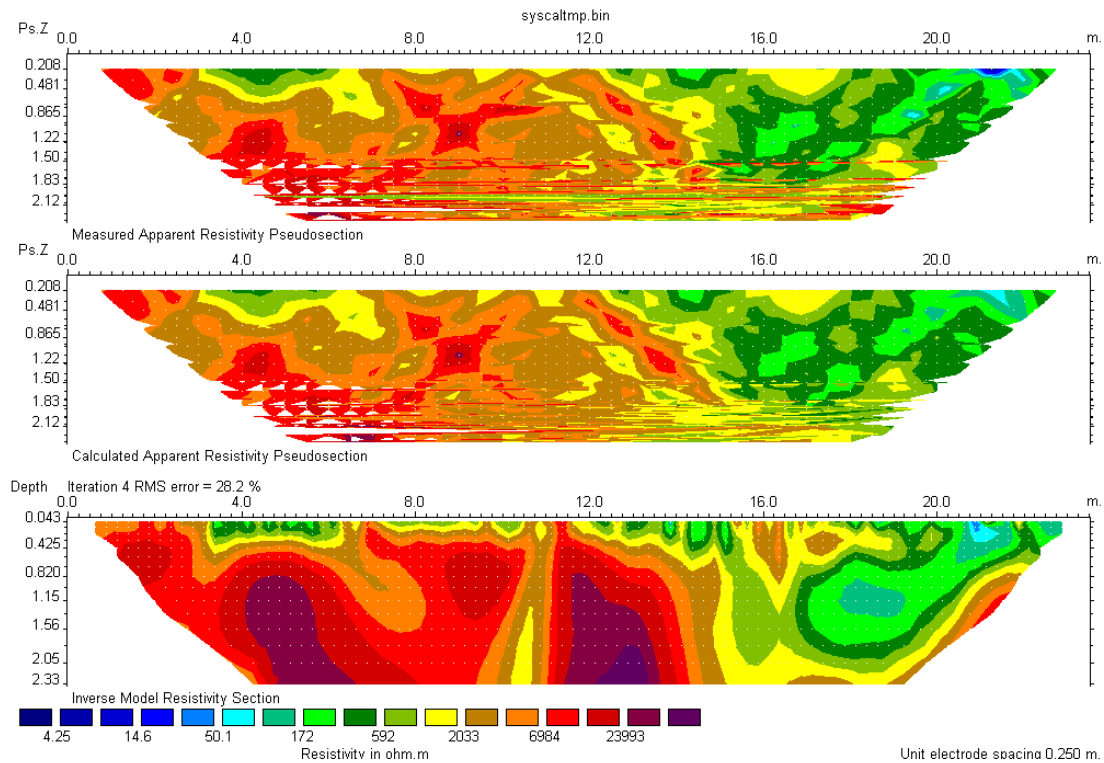
Από τα 4.5-6.5 μέτρα κατά μήκος της τομής και από το 1.0-3.0 μέτρα βάθος, εμφανίζεται μια αντιστατική δομή με πεπερασμένα όρια με αντίσταση της τάξης των 100000 Ohm-m το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί ως καρστική δομή. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε σημεία με τέτοια χαρακτηριστικά δεν σημαίνει ότι η 2.00X2.00 μέτρα δομή είναι ένα σπήλαιο (κενό) αλλά το πιο πιθανό σενάριο είναι ότι πρόκειται για ισχυρά καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο με κενά που πιθανόν δεν ξεπερνούν τα 20 εκατοστά σε διάμετρο.



Σχημα 22. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος.

Στη συνέχεια (σχήμα 23) δίνεται η ερμηνεία της τομογραφίας που εκτελέστηκε με απόσταση ηλεκτροδίων ίσο με 0.5 μέτρο. Το βάθος διερεύνησης έφτασε τα 2.4 μέτρα. Με κόκκινα χρώματα εμφανίζονται οι υψηλές αντιστάσεις ενώ με βαθύ μπλε περιγράφονται οι περιοχές υψηλής αγωγιμότητας.

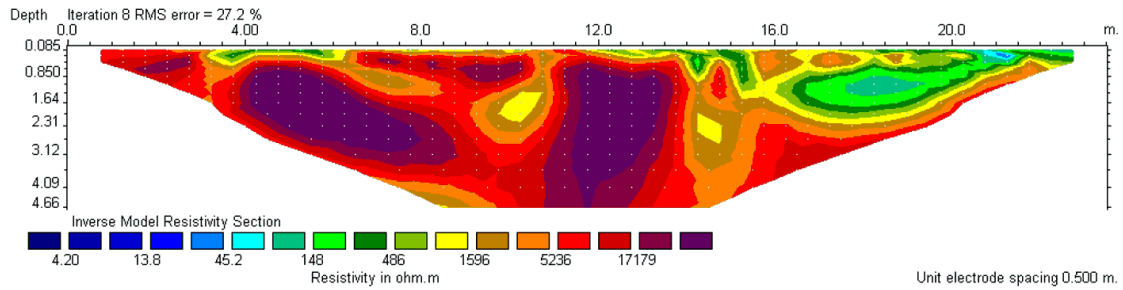
Από τα 4.0-6.0 μέτρα κατά μήκος της τομής και από το 1.0-2.4 μέτρα σε βάθος εμφανίζεται μια αντιστατική δομή με πεπερασμένα όρια με αντίσταση της τάξης των 20000 Ohm-m το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί ως καρστική δομή. Επίσης στα 12.0-13.0 μέτρα και σε βάθος 1.5-2.4 μέτρα εντοπίστηκε μια ανάλογη αντιστατική δομή. Τα παραπάνω είναι σε απόλυτη συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ερμηνεία.



Σχημα 23. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Η ερμηνεία αφορά τη πρώτη τομογραφία με απόσταση ηλεκτροδίων ίση με 0.5 μέτρα, 48 ηλεκτρόδια και βάθος διασκόπησης ίσο με 2.4 μέτρα.

Τέλος, με σκοπό να αποδόσουμε από κοινού τις δύο μετρήσεις (με διαφορετική διακριτική ικανότητα) που ελήφθησαν, ενοποιήθηκαν τα δύο σετ μετρήσεων και έγινε συνολική αντιστροφή των μετρήσεων όπου μέχρι τα 3 μέτρα υπάρχει υψηλή διακριτική ικανότητα της τάξης των 0.25 μέτρων ενώ στα βαθύτερα στρώματα (-5 μέτρα) η διακριτική ικανότητα είναι ίση με 0.5 μέτρα (σχήμα 24).

Από τα 4.0-6.0 μέτρα και από τα 12.0-13.0 μέτρα κατά μήκος της τομής εντοπίζονται όσες δομές (αντιστατικές) έχουν ήδη σχολιαστεί. Τα παραπάνω είναι σε απόλυτη συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ερμηνείες.



Σχημα 24. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Η ερμηνεία αφορά την συνολική ερμηνεία και των δύο μετρήσεων που ελήφθησαν στην ίδια θέση.

5.4.2 Τομογραφία 2 (24 ηλεκτρόδια ανά 1 μέτρο)

Η δεύτερη τομογραφία (φωτογρ. 13, 14 και 15) εκτελέστηκε σε απόσταση περίπου 6.0 μέτρων από την προηγούμενη και πρώτη τομογραφία. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ακριβώς οι ίδιοι.



Φωτογραφία 13. Στη φωτογραφία απεικονίζεται η αρχή της δεύτερης διασκόπησης.

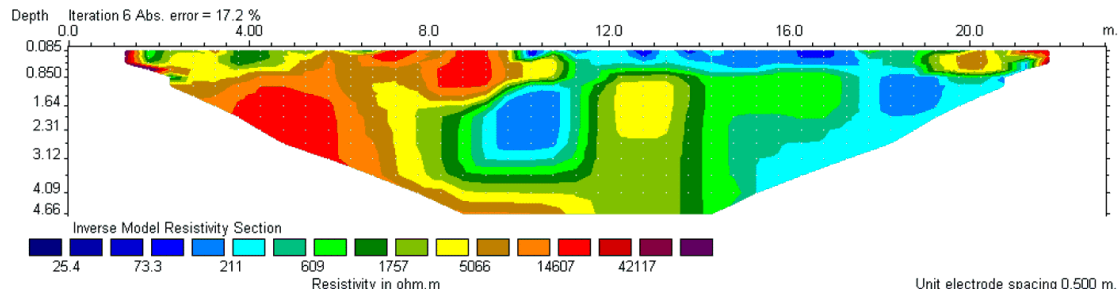


Φωτογραφία 14. Στη φωτογραφία απεικονίζεται η αρχή της δεύτερης διασκόπησης.



Φωτογραφία 15. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το τέλος της δεύτερης διασκόπησης.

Στο σχήμα (25) δίνεται η ερμηνεία της τομογραφίας που εκτελέστηκε με απόσταση ηλεκτροδίων ίσο με 1 μέτρο. Το βάθος διερεύνησης έφτασε τα 5 μέτρα. Με κόκκινα χρώματα εμφανίζονται οι υψηλές αντιστάσεις ενώ με βαθύ μπλε περιγράφονται οι περιοχές υψηλής αγωγιμότητας.



Σχημα 25. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Η ερμηνεία αφορά τη δεύτερη τομογραφία και έχουν εφαρμοστεί όλοι οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι κανονικοποίησης και εξομάλυνσης των δεδομένων.

Από τα 4.5-5.5 μέτρα κατά μήκος της τομής και σε βάθος από 1.5-3.0 μέτρα εμφανίζεται μια αντιστατική δομή με πεπερασμένα όρια με αντίσταση της τάξης των 30000 Ohm-m το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί ως καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος. Στην ερμηνεία δεν εμφανίζεται η δεύτερη καρστική δομή στα 12 μέτρα. Αυτό σημαίνει ότι η δεύτερη δομή ήταν κάτι τελείως τοπικό χωρίς υπεδάφεια συνέχεια.

5.4.3 Τομογραφία 3 (24 ηλεκτρόδια ανά 2 μέτρα)

Η τρίτη τομογραφία είναι η τελευταία που εκτελέστηκε στο πάνω πατάρι και πραγματοποιήθηκε ακριβώς στο «φρύδι» του πρανούς με σκοπό να αναγνωρίσει με τον πιο εύκολο τρόπο το μεγαλύτερο μεγέθους έγκοιλο (φωτογρ. 16, 17 και 18) που εμφανίστηκε κατά την εκσκαφή και διαμόρφωση του κάτω παταριού. Η υψομετρική διαφορά των δύο παταριών εκτιμήθηκε περί τα 4.0 μέτρα.



Φωτογραφία 16. Στη φωτογραφία απεικονίζονται τα έγκοιλα που εντοπίστηκαν στο πρανές του κάτω παταριού.



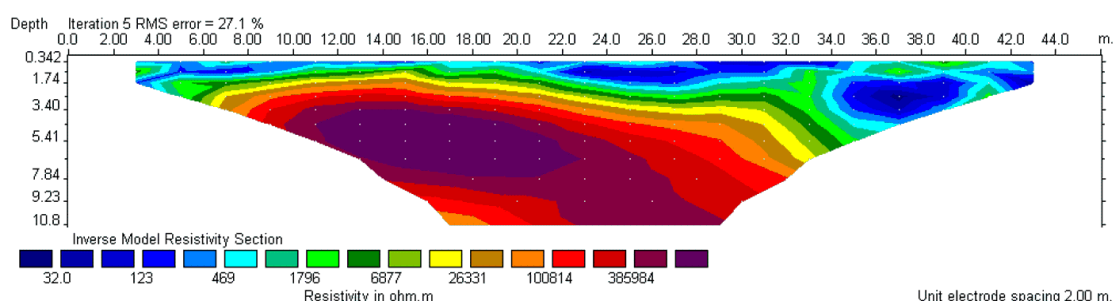
Φωτογραφία 17. Στη φωτογραφία απεικονίζονται τα έγκοιλα που εντοπίστηκαν στο πρανές του κάτω παταριού. Οι δομές έχουν ύψος περίπου 2.0 μέτρα.



Φωτογραφία 18. Στη φωτογραφία απεικονίζονται τα έγκοιλα που εντοπίστηκαν στο πρανές του κάτω παταριού.

Η διατομή εκτελέστηκε περίπου με 5.50 μέτρα απόσταση από την προηγούμενη (δεύτερη τομογραφία). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ακριβώς οι ίδιοι.

Στο σχήμα (26) δίνεται η ερμηνεία της τομογραφίας που εκτελέστηκε με απόσταση ηλεκτροδίων ίσο με 2 μέτρα. Το βάθος διερεύνησης έφτασε τα 11 μέτρα. Με κόκκινα χρώματα εμφανίζονται οι υψηλές αντιστάσεις ενώ με βαθύ μπλε περιγράφονται οι περιοχές υψηλής αγωγιμότητας.



Σχημα 26 Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Η ερμηνεία αφορά τη τρίτη τομογραφία (σφάλμα 27.1%, 5 επαναλήψεις)

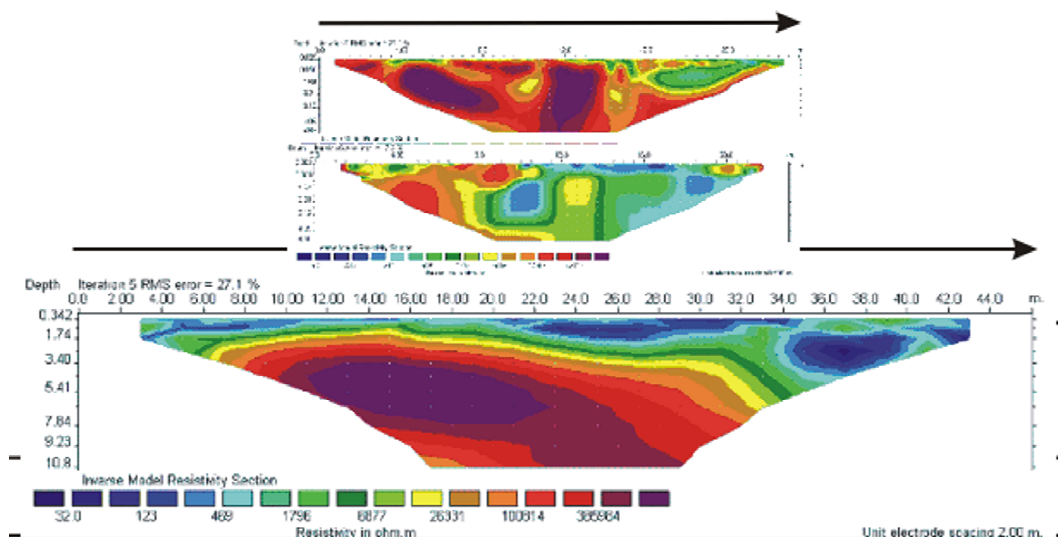
Από τα 12.0-20.0 μέτρα κατά μήκος της τομής και από το 3.40-6.00 μέτρα σε βάθος εμφανίζεται μια αντιστατική δομή με πεπερασμένα όρια με αντίσταση της τάξης των 300000 Ohm-m το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί με σιγουριά ως καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος.

Κατά την επιτόπου παρατήρηση είδαμε ότι η τομή τέμνει τα εμφανή έγκοιλα (φωτογραφίες 16, 17 και 18) στα 17-25 μέτρα. Από την ερμηνεία παρατηρούμε ότι η οροφή του εγκοίλου βρίσκεται στα 12.0 μέτρα κατά X και σε βάθος 3.40 μέτρων αλλά κατευθύνεται προς ΒΒΔ όπως φαίνεται και επιβεβαιώνεται και μακροσκοπικά όπως προαναφέρθηκε.

5.4.4 Συνολική ερμηνεία της πρώτης θέσης θεμελίωσης (Τομογραφίες 1, 2 και 3)

Στο σχήμα (27) παρουσιάζονται από κοινού οι τρεις τομογραφίες που εκτελέστηκαν στο πάνω χώρο θεμελίωσης. Οι τομές απεικονίζονται με τις πραγματικές τους ως προς τη θεμελίωση θέσεις.

Παρατηρείται ότι το κύριο πρόβλημα εντοπίζεται στη τρίτη τομογραφία όπου πραγματικά με βάση τις τιμές των αντιστάσεων αλλά και τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις εντοπίζεται περιοχή με σχετικά μεγάλα έγκοιλα (8.00 X 2.50 μέτρα).



Σχημα 27 Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος για τις τομογραφίες 1, 2 και 3.

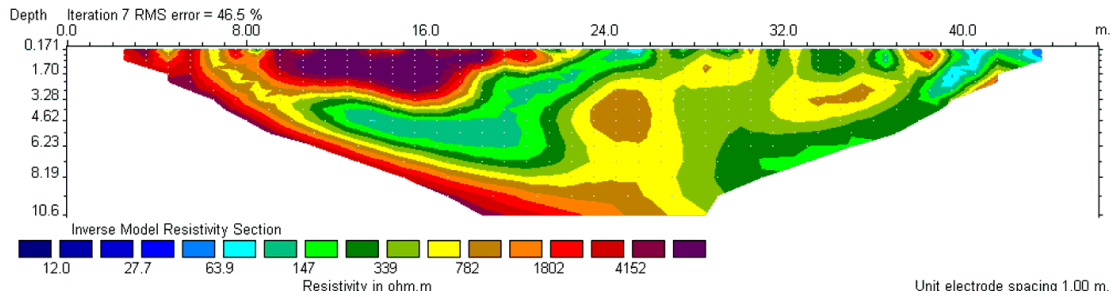
5.4.5 Τομογραφία 4 (24 ηλεκτρόδια ανά 2 μέτρα)

Η τέταρτη τομογραφία εκτελέστηκε περίπου με 3.5 μέτρα απόσταση από την προηγούμενη και τρίτη τομογραφία αλλά με υψομετρική διαφορά περί τα 4.0 μέτρα όση και η διαφορά των δύο επιπέδων δόμησης. Είναι η πρώτη τομογραφία που εκτελεσθηκε στο κάτω επίπεδο (φωτογρ. 19). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ακριβώς οι ίδιοι.



Φωτογραφία 19. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το τέλος της τέταρτης διασκόπησης.

Στο σχήμα (28) δίνεται η ερμηνεία της τομογραφίας που εκτελέστηκε με απόσταση ηλεκτροδίων ίσο με 2 μέτρα. Το βάθος διερεύνησης έφτασε τα 10.70 μέτρα. Με κόκκινα χρώματα εμφανίζονται οι υψηλές αντιστάσεις ενώ με βαθύ μπλε περιγράφονται οι περιοχές υψηλής αγωγιμότητας.



Σχημα 28. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Η ερμηνεία αφορά τη τέταρτη τομογραφία και έχουν εφαρμοστεί όλοι οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι κανονικοποίησης και εξομάλυνσης των δεδομένων.

Από τα 9.00-18.00 μέτρα κατά μήκος της τομής και από την επιφάνεια μέχρι τα 3.20 μέτρα εμφανίζεται μια αντιστατική δομή με πεπερασμένα όρια με αντίσταση της τάξης των 6000 Ohm-m. Για τη συγκεκριμένη θέση ήταν και οπτικά δυνατόν να συσχετίσουμε την ανωμαλία αυτή με τα έγκοιλα που απεικονίζονται στις φωτογραφίες (16, 17 και 18).

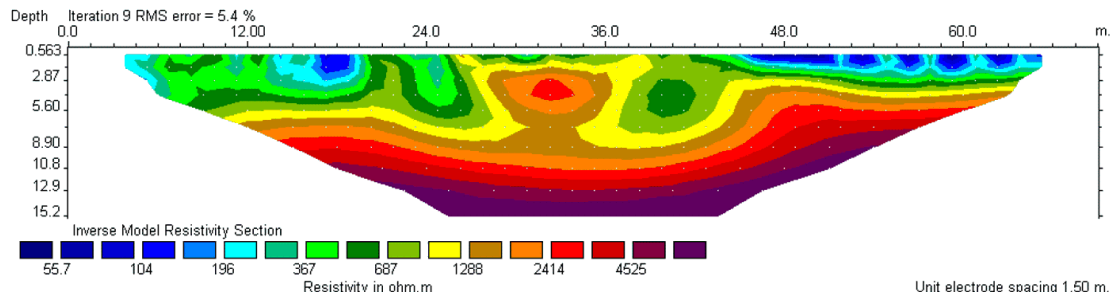
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η βύθιση του ασβεστολιθικού υποβάθρου όπως αυτό φαίνεται από την αρχή της τομής μέχρι και τα 24.00 μέτρα όπου στα 10.60 μέτρα βάθος χάνεται από το μοντέλο.

5.4.6 Τομογραφία 5 (24 ηλεκτρόδια ανά 3 μέτρα)

Η πέμπτη τομογραφία εκτελέστηκε περίπου με 6.50 μέτρα απόσταση από την προηγούμενη και τέταρτη τομογραφία. Είναι η δεύτερη τομογραφία που εκτελεστηκε στο κάτω επίπεδο (φωτογρ. 20). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που μελετήθηκαν είναι ακριβώς οι ίδιοι με αυτούς των άλλων τομογραφιών.



Φωτογραφία 20. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το τέλος της πέμπτης διασκόπησης.



Σχήμα 29. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Η ερμηνεία αφορά τη πέμπτη τομογραφία και έχουν εφαρμοστεί όλοι οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι κανονικοποίησης και εξομάλυνσης των δεδομένων.

Στο σχήμα (29) δίνεται η ερμηνεία της τομογραφίας που εκτελέστηκε με απόσταση ηλεκτροδίων ίσο με 3 μέτρα. Το βάθος διερεύνησης έφτασε τα 15.20 μέτρα. Με κόκκινα χρώματα εμφανίζονται οι υψηλές αντιστάσεις ενώ με βαθύ μπλε

περιγράφονται οι περιοχές υψηλής αγωγιμότητας.

Κατά μήκος όλης της διατομής από το βάθος των 8.90 μέτρων συναντάται το ασβεστολιθικό υπόβαθρο με αντιστάσεις της τάξης των 5000 Ohm-m.

5.4.7 Τομογραφία 6 (24 ηλεκτρόδια ανά 4 μέτρα)

Η έκτη και τελευταία τομογραφία (φωτογρ. 21, 22, 23 και 24) εκτελέστηκε περίπου με 3.50 μέτρα απόσταση από την προηγούμενη (πέμπτη) τομογραφία. Είναι η τρίτη και τελευταία τομογραφία που εκτελεστηκε στο κάτω επίπεδο. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που μελετήθηκαν είναι ακριβώς οι ίδιοι με αυτούς των άλλων τομογραφιών.



Φωτογραφία 21. Στη φωτογραφία απεικονίζεται η αρχή της έκτης διασκόπησης.



Φωτογραφία 22. Στη φωτογραφία απεικονίζονται χαρακτηριστικές δομές καρστικής διάβρωσης επί του ασβεστολιθικού υποβάθρου στην αρχή της έκτης διασκόπησης.

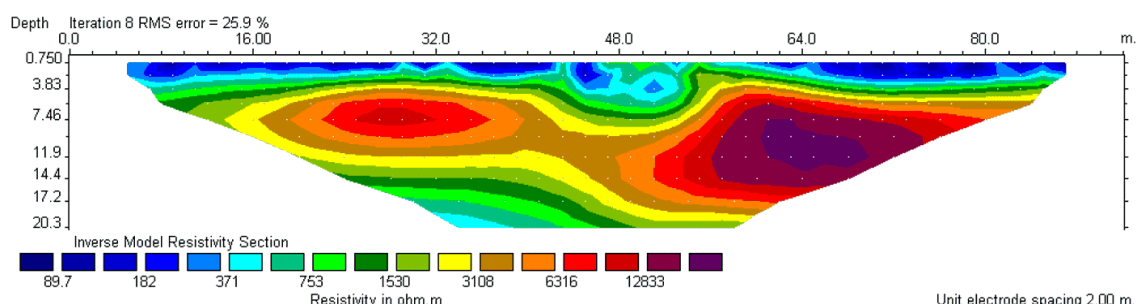


Φωτογραφία 23. Στη φωτογραφία απεικονίζονται χαρακτηριστικές δομές καρστικής διάβρωσης επί του ασβεστολιθικού υποβάθρου στην αρχή της έκτης διασκόπησης.



Φωτογραφία 24. Στη φωτογραφία απεικονίζεται το τέλος της έκτης διασκόπησης.

Στο σχήμα (30) δίνεται η ερμηνεία της τομογραφίας που εκτελέστηκε με απόσταση ηλεκτροδίων ίσο με 4 μέτρα. Το βάθος διερεύνησης έφτασε τα 20.30 μέτρα. Με κόκκινα χρώματα εμφανίζονται οι υψηλές αντιστάσεις ενώ με βαθύ μπλε περιγράφονται οι περιοχές υψηλής αγωγιμότητας.



Σχημα 30. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Η ερμηνεία αφορά την έκτη και τελευταία τομογραφία.

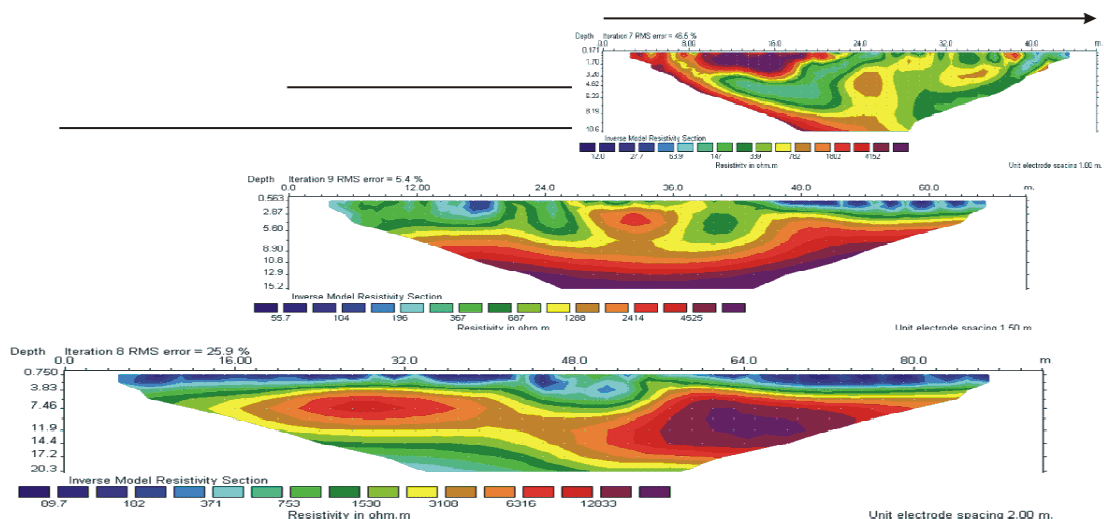
Στην τομογραφική ερμηνεία παρουσιάζεται ότι κατά μήκος όλης της διατομής από το βάθος των 4.00 μέτρων με εξαιρέσεις κάποιες κατά θέσεις ταπεινώσεις και εξάρσεις του υποβάθρου συναντάται το ασβεστολιθικό υπόβαθρο με αντιστάσεις της τάξης των 5000-9000 Ohm-m.

Πρέπει να αναφέρουμε ότι η συγκεκριμένη τομογραφία ξεπέρασε σε βάθος το υψόμετρο της μικρής κοιλάδας που βρίσκεται παράλληλα με το δρόμο προς την εκκλησία όπως απαιτήθηκε από τον μηχανικό κο. Μιχάλη Νεονάκη.

5.4.8 Συνολική ερμηνεία της δεύτερης θέσης θεμελίωσης (Τομογραφίες 4, 5 και 6)

Στο σχήμα (31) παρουσιάζονται από κοινού οι τρεις τομογραφίες που εκτελέστηκαν στο κάτω χώρο θεμελίωσης. Οι τομές απεικονίζονται με τις πραγματικές τους, ως προς τη θεμελίωση θέσεις.

Παρατηρείται ότι μόνο στην πρώτη τομογραφία εμφανίζεται και επιβεβαιώνεται το καρστικό έγκοιλο του πρανούς ενώ στις υπόλοιπες τομογραφίες εμφανίζεται το υπόβαθρο άλλοτε να βυθίζεται προς Βορρά ή να παρουσιάζει κατά θέσεις εξάρσεις ή ταπεινώσεις.



Σχημα 31. Διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος για τις τομογραφίες 4, 5 και 6.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην περιοχή που υποδείχθηκε από τους επιβλέποντες μηχανικούς του έργου εκτελέστηκαν συνολικά 7 γεωηλεκτρικές τομογραφίες σε 6 διαφορετικές θέσεις. Σε κάθε θέση θεμελίωσης εκτελέστηκαν 3 διατομές καλύπτοντας με τη μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα την περιοχή έρευνας με σκοπό να γίνει εντοπισμός της γεωμετρίας των υπεδάφινων δομών (στην περίπτωση μας τα καρστικά έγκοιλα) που πιθανόν να οδηγήσουν σε αστοχία του έργου/ανωδομής.

Επίσης οι διατομές εκτελέστηκαν με πολλαπλές επαναληπτικές μετρήσεις με σκοπό την αποφυγή οποιονδήποτε σφαλμάτων του μετρητικού συστήματος και πιθανή κακή/λανθασμένη ερμηνεία των κακής ποιότητας πρωτογενών δεδομένων.

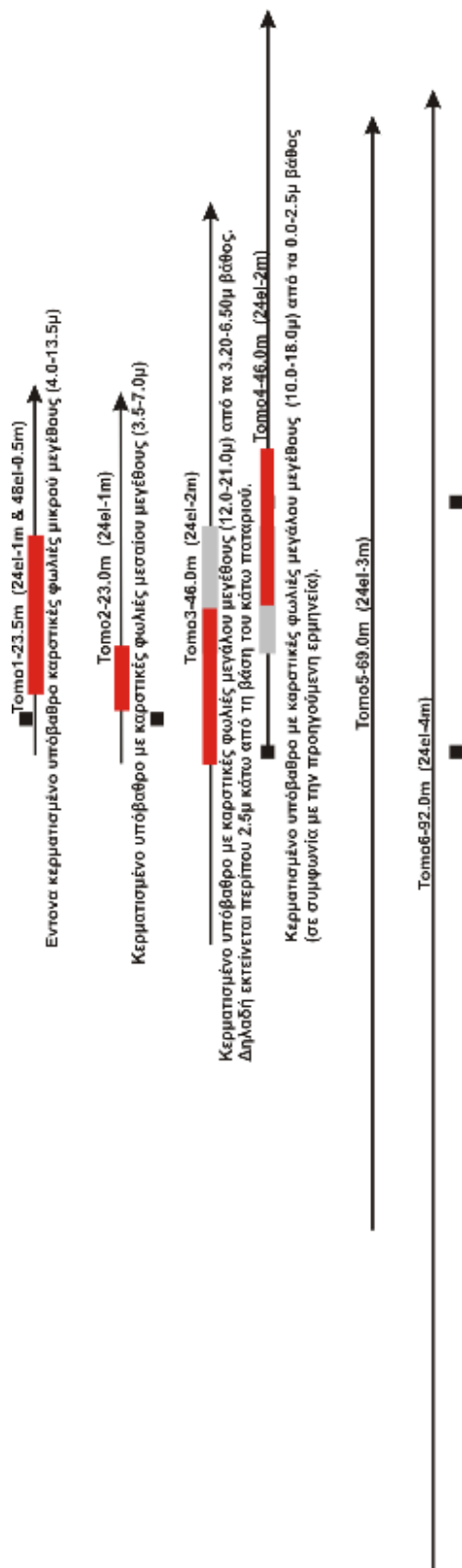
Οι διασκοπήσεις και η ερμηνεία των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν με τις πλέον σύγχρονες οργανολογίες και μεθοδολογίες δισδιάστατης και τρισδιάστατης απεικόνισης γεωφυσικών δεδομένων ενώ για την τελική ερμηνεία των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκαν πληθώρα μεθοδολογιών φιλτραρίσματος, κανονικοποίησης και εξομάλυνσης των δεδομένων με σκοπό οι μετρήσεις να προσομοιάζουν το γεωλογικό καθεστώς που παρατηρείται μακροσκοπικά.

Με βάση την ερμηνεία των διατομών και σύμφωνα με όλα τα διαθέσιμα στοιχεία και πληροφορίες που συλλέχθηκαν από κάθε διαθέσιμη πηγή, πρέπει να τονίστουν τα εξής (σχήμα 32), στην πρώτη και δεύτερη διατομή στο πάνω χώρο θεμελίωσης εμφανίζονται περιοχές όπου ο ασβεστόλιθος έχει υποστεί ισχυρή καρστικοποίηση αλλά με βάση τις τιμές αντίστασης οι καρστικές «φωλιές» δεν ξεπερνούν τη διάμετρο των 15-20 εκατοστών. Δεδομένου ότι ο υγιής ασβεστόλιθος είναι πραγματικά συμπαγής με αυξημένη φέρουσα ικανότητα, θεωρείται ότι δεν μπορεί να δημιουργήσει κάποιο κατασκευαστικό πρόβλημα στις ανωδομές. Φυσικά η τελική απόφαση βαρύνει τον μηχανικό/κατασκευαστή του έργου ο οποίος έχει συνολική εικόνα των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων θεμελίωσης. Σχετικό πρόβλημα εντοπίζεται στη θέση στην οποία εκτελέστηκε η τρίτη τομογραφία όπου παρατηρήθηκε ισχυρά καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος του οποίου το κάτω μέρος εμφανίστηκε κατά την εκσκαφή και διαμόρφωση της χαμηλής θέσης θεμελίωσης. Δεδομένου ότι η πρόσβαση από το ένα πατάρι στο άλλο θα γίνεται με σκάλα που θα «πατάει» στο χείλος του πάνω παταριού,

προτείνεται η εξυγίανση της συγκεκριμένης θέσης με εκσκαφή, ή με την κατασκευή κάποιου μικρού έργου αντιστήριξης ή χρήση άλλων μεθόδων που θα μειώσουν την αστοχία και τρωτότητα της κατασκευής.

Στην κάτω περιοχή θεμελίωσης εκτελέστηκαν 3 επιπλέον τομογραφίες εκ των οποίων η πρώτη και κοντινότερη στο σκάμμα εκτελέστηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να συναξιολογηθεί με τη τελευταία μέτρηση στο πάνω «πατάρι». Ειδικότερα, στην πρώτη τομογραφία από τα 9.00-18.00 παρατηρήθηκε η παρουσία καρστικών εγκοίλων τα οποία έχουν ήδη καταγραφεί διότι αφενός εντοπίστηκαν κατά την ερμηνεία της 3^{ης} τομογραφίας στον πάνω χώρο θεμελίωσης και αφετέρου αποκαλύφθηκαν κατά την εκσκαφή και διαμόρφωση του κάτω χώρου θεμελίωσης. Η συγκεκριμένη υπεδάφεια ανωμαλία δεν μπορεί να δημιουργήσει κάποια κατασκευαστική ανωμαλία διότι δεν παρουσιάζει συνέχεια με το βάθος ενώ είναι και χωρικά περιορισμένη. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το υγιές υπόβαθρο που βρίσκεται βαθύτερα απλά «βυθίζεται» προς Βορρά. Οι υπόλοιπες δύο τομογραφίες απλά αναγνώρισαν το βραχώδες ασβεστολιθικό υπόβαθρο το οποίο κατά θέσεις παρουσίαζε εξάρσεις και ταπεινώσεις χωρίς αυτές να σχετίζονται όμως με τη παρουσία τεκτονικών στοιχείων που να συνδέονται και με ενεργό τεκτονική.

Συμπερασματικά, ο κατασκευαστής λαμβάνοντας υπόψη την πληθώρα πληροφοριών που συλλέχθηκαν και παρουσιάστηκαν στα πλαίσια του έργου και αφορούν την ανομοιογένεια του υπεδάφους, μπορεί να προβεί, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο (με υποδείξεις των σημείων από το εργαστήριο που εκτέλεσε το έργο), σε εργασίες ενίσχυσης/εξυγίανσης του χώρου.



Σχήμα 32. Σκαρίφημα των διατομών που εκτελέστηκαν στην περιοχή έρευνας. Με μαύρα τετράγωνα ορίζονται οι θέσεις/όρια των κτιρίων που πρόκειται να ανεγερθούν. Με γκριζα παραλληλόγραμμα παρουσιάζονται οι θέσεις στις οποίες μακροσκοπικά παρατηρήθηκαν έγκοιλα ενώ με κόκκινα παραλληλόγραμμα εμφανίζονται οι ανωμαλίες όπως αυτές προκύψαν από την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομογραφιών. Επιπλέον, κάποια σχόλια ανά θέση ανωμαλίας αναφέρονται σχετικά με τη φύση της καρστικοποίησης.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barker, R. D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, 1031-1037.
- Barker, R. (1992). A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break*, 10 (2), 53-63.
- Briuer, F.L., Simms, J. and Smith, L.M. (1996). Site Mapping, Geophysical Investigation and Geomorphic Reconnaissance at Site 9ME395 Upatoi Town Fort Benning, Georgia, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Bristow, C.M. (1966). A new graphical resistivity technique for detecting air-filled cavities. *Study in Speleology*, 1, 204-227.
- Claerbout, J.F. and Muir, F. (1973). Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, 38, 826-844.
- Claerbout, J.F. (1992). *Earth Soundings Analysis: Processing versus Inversion*. Blackwell Scientific.
- Cook, K.L. and Van Nostrand, R.G. (1954). Interpretation of Resistivity Data Over Filled Sinks. *Geophysics*, 19, 761-790.
- Coggon, J.H. (1971). Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 36, 132-155.
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289-300.
- Daniels, F. and Alberty, R.A. (1966). *Physical Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc.
- DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Dey, A. and Morrison, H.F. (1979a). Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 106-136.
- Dey, A. and Morrison, H.F. (1979b). Resistivity modeling for arbitrarily three-dimensional structures. *Geophysics*, 44, 753-780.
- Edwards, L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42,

1020-1036.

- Hallof, P.G. (1957). On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. Ph.D. Thesis, MIT.
- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quart. Appl. Math.*, 2, 164-168.
- Loke, M.H. (1996). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. <http://www.geoelectrical.com>
- Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Marquadt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, 11, 431-441.
- Meju, M.A. (1994). Geophysical data analysis: Understanding inverse problem, theory and practice. Course notes series, Vol. 6, Domenico, S.N., Editor.
- Mufti, L. (1976). Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysics*, 41, 62-78.
- Olayinka, A.I. and Yaramanci, U. (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 63-81.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. (1992). *Numerical Recipes in Fortran: the art of scientific computing* (2nd edition). Cambridge University Press.
- Roy, A. (1971). Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, 20, 29-340.
- Roy, A. and Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 943-959.
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Savvaidis, G. Tsokas, P. Soupios, G. Vargemezis, M. Manakou, P. Tsourlos, I. Fikos,

- 1999, Geophysical Prospecting in the Krousovitis dam (N.Greece) by Seismic and Resistivity geophysical methods, Journal of Balkan Geophysical Society (BGS), Vol. 2, No. 4, 128-139.
- Silvester, P.P. and Ferrari, R.L. (1990). Finite elements for electrical engineers (2nd edition). Cambridge University Press.
- Soupios Pantelis, Ilias Papadopoulos, Maria Kouli, Irene Georgaki, Filippos Vallianatos, Eleni Kokkinou, 2006, Investigation of Waste Disposal Areas Using Electric Methods : A Case Study from Hania – Crete, Greece, Environ Geol (2006) DOI 10.1007/s00254-006-0418-7.
- Soupios Pantelis, Panos Georgakopoulos, Nikos Papadopoulos, Vasilios Saltas, Filippos Vallianatos, Apostolos Sarris, John P. Makris, 2007, Use of Engineering Geophysics to Investigate a Site for a Building Foundation, J. Geophys. Eng. 4 (2007) 94–103 doi:10.1088/1742-2132/4/1/011.
- Soupios Pantelis, Nikos Papadopoulos, Ilias Papadopoulos, Maria Kouli, Filippos Vallianatos, Apostolos Sarris, Thrassyvoulos Manios, 2007, Application of Integrated Methods in Mapping Waste Disposal Areas, Environ Geol., DOI 10.1007/s00254-007-0681-2
- Smith, N. and Vozoff, K. (1984). Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data. IEEE Trans. Geosc., 22, (1), 21-28.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990). Applied Geophysics (2nd edition).Cambridge University Press.
- Tsourlos, P., Szymanski, J., Dittmer, J. and Tsokas, G. (1993). The use of back-projection for fast inversion of 2-D resistivity data. Proceedings of the 2nd congress of the Greek Geophysical Union, Florina, Greece, 5-7 ay, 1, 71-81.
- Tsourlos, P.I. (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Ph.D. Thesis, Department of Electronics, University of York.
- Tsourlos, P.I., Szymanski, J.E. and Tsokas, G.N. (1998). A smoothness constrained algorithm for the fast 2-D inversion of DC resistivity and induced polarization data. Journal of the Balkan Geophysical Society, 1, 3-13.

Ward, S. (1989). Resistivity and induced polarization methods: in Investigations in Geophysics no 5, Geotechnical and Environmental Geophysics vol. I, ed. S. Ward, SEG, Tulsa, 147-189.

Zhody, A. (1989). A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics, 54, 245-253.