



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΧΩΡΟ
ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗ.ΠΕΡ. ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ
ΚΡΗΤΗΣ»**

ΓΑΝΤΑΔΑΚΗ ANNA

A.M. 2004020024

Εξεταστική επιτροπή

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητής Π.Κ.

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ. (επιβλέπων)

Σουπιός Παντελής, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία με τίτλο «Γεωφυσική Διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας σε χώρο ανέγερσης των κτιριακών εγκαταστάσεων του τμήματος ΜΗ.ΠΕΡ. του Πολυτεχνείου Κρήτης» έχει σαν στόχο να μας δείξει τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής για την ανέγερση του νέου κτιρίου που θα στεγάσει τα γραφεία των διδασκόντων του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Η περιοχή αυτή βρίσκεται στον χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης, ανάμεσα στα κτίρια του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος.

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

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής, κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτη, και τον κ. Σουπιό Παντελή, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης, για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Θέλω να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Hamdan Hamdan για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε κάθε της βήμα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου, Αβαγιαννό Αλέξανδρο και Ζανετίδη Σταμάτη για την συμμετοχή και την βοήθεια τους στην ολοκλήρωση των μετρήσεων της περιοχής με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή των μεθόδων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκεκριμένα της ηλεκτρικής τομογραφίας, για την απεικόνιση του ανθρακικού υπόβαθρου και τον εντοπισμό καρστικών δομών και έγκοιλων στους γεωλογικούς σχηματισμούς σε περιοχή οικοδόμησης νέων κτιρίων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν σε πρώτη φάση, πέντε γραμμές μελέτης ηλεκτρικής τομογραφίας (line 1, line 2, line 3, line 4, line 5) μαζί με την διάτρηση πέντε γεωτρήσεων σε όλη την περιοχή έρευνας που θα ανεγερθούν τα κτίρια, ενώ σε δεύτερη φάση χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε γραμμές μελέτης σε μία μικρότερη περιοχή της συνολικής περιοχής έρευνας.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο RES2DINV. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών τομογραφιών των γραμμών μελέτης συγκρίθηκαν και συνδυάστηκαν στο χώρο κατά την εκσκαφή της περιοχής.

Από τις ηλεκτρικές τομογραφίες και τις γεωτρήσεις εντοπίστηκαν τρεις γεωλογικές ζώνες. Η ζώνη «Α» αντιστοιχεί σε αργιλικό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους με ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις $< 200 \Omega m$. Η ζώνη «Β» αντιστοιχεί σε ζώνη ασυνεχειών και κατακερματισμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο με ηλεκτρικές αντιστάσεις $> 900 \Omega m$. Τέλος, η ζώνη «Γ» αντιστοιχεί σε πιο υγιή ασβεστόλιθο με ηλεκτρικές αντιστάσεις $300 - 700 \Omega m$.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	v

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....1

1.1. Γεωφυσικές διασκοπήσεις.....	1
1.2. Γεωφυσική και γεωφυσικές μέθοδοι.....	1
1.3. Γεωφυσικές μέθοδοι στα γεωτεχνικά έργα.....	3
1.4. Δομή διπλωματικής εργασίας.....	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....9

2.1. Εισαγωγή.....	9
2.2. Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	11
2.2.1. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ο νόμος του Ohm σε ομοιογενή και ισότροπη γη.....	12
2.2.2. Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	18
2.2.3. Διατάξεις των ηλεκτροδίων.....	22
2.3. Ηλεκτρική τομογραφία.....	26
2.3.1. Βασική θεωρία αντίστροφης.....	28
2.3.2 Μέθοδοι δισδιάστατης έρευνας.....	30
2.4. Λογισμικό πακέτο RES2DINV.....	32
2.4.1. Γενικά.....	32
2.4.2. Εγκατάσταση και περιγραφή των βημάτων.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ	
ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	41
3.1. Εισαγωγή.....	41
3.2. Περιοχή μελέτης.....	41
3.2.1. Γεωλογία περιοχής.....	44
3.3. Πραγματοποίηση των μετρήσεων.....	45
3.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ηλεκτρικής τομογραφίας.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	65
4.1. Γενικά.....	65
4.2. Αποτελέσματα επεξεργασίας των μετρήσεων.....	65
4.2.1. Επεξεργασία μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας.....	66
4.2.2. Επεξεργασία μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	81
5.1. Εισαγωγή.....	81
5.2. Βαθμονόμηση της ηλεκτρικής τομογραφίας με βάση την γεώτρηση.....	81
5.3. Ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομών.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	91
6.1. Συμπεράσματα.....	91
6.2. Προτάσεις.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1: Μερικές πιθανές γεωτεχνικές εφαρμογές με την χρήση των γεωφυσικών μεθόδων. (Anderson,2006)	5
2.1: Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Ohm.....	13
2.2: Τρόπος υπολογισμού της Ωμικής αντίστασης.....	13
2.3: Ισοδυναμικές επιφάνειες και γραμμές ροής ρεύματος.....	15
2.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση των ισοδυναμικών γραμμών.....	16
2.5: Μια πανοραμική φωτογραφία όπου φαίνονται οι ισοδυναμικές επιφάνειες με μπλε χρώμα και οι γραμμές ροής του ρεύματος με κόκκινο χρώμα.....	18
2.6: Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων	19
2.7: Διάταξη των ηλεκτροδίων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN)	19
2.8: Η εξάρτηση του βάθους διείσδυσης του ρεύματος από την απόσταση των ηλεκτροδίων μέτρησης.....	20
2.9: Ροή ρεύματος σε σχέση με την απόσταση των ηλεκτροδίων μέτρησης.....	21
2.10: Διατάξεις των ηλεκτροδίων.....	22
2.11: Διάταξη διπόλου - διπόλου	23
2.12: Δισδιάστατα τμήματα ευαισθησίας της διάταξης διπόλου-διπόλου με (α) $n=1$, (β) $n=2$, (γ) $n=4$ και (δ) $n=6$. (Loke,2004).....	24
2.13. Δύο πιθανές διαφορετικές ρυθμίσεις για μια μέτρηση με την διάταξη διπόλου-διπόλου. (Loke,2004)	25
2.14. Η ρύθμιση των ηλεκτροδίων για μια δισδιάστατη ηλεκτρική έρευνα και η ακολουθία μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν μια ψευδοτομή. (Loke,2004).....	31
2.15. Δεδομένα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με μορφή σχεδιαγράμματος (με κόκκινο κύκλο σημειώνονται τα σημεία τα οποία επιλέγονται να αφαιρεθούν).....	33
2.16: Υποδιαίρεση του υπέδαφους σε ορθογώνια πλέγματα σε δισδιάστατη έρευνα απεικόνισης η οποία χρησιμοποιεί διαφορετικούς αλγορίθμους. Τα πρότυπα ελήφθησαν με (α) τον αλγόριθμο προεπιλογής, (β) επιτρέποντας στον αριθμό των πλεγμάτων να υπερβούν τα λάθος δεδομένα, (γ) ένα πρότυπο που επεκτείνεται στις άκρες της γραμμής ερευνών και (δ) χρησιμοποιώντας τις τιμές ευαισθησίας για ένα ομοιογενές γήινο πρότυπο.....	35
2.17: Παράδειγμα αντιστροφής δεδομένων γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας. Η 1η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.	39
3.1 : Άποψη του Πολυτεχνείου Κρήτης από ψηλά. (http://www.tuc.gr/xartis/megala/TUCCampsmall.jpg).....	41

3.2 :	α) Το ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης όπου στο βάθος βγαίνει στο δρόμο της Πολυτεχνειούπολης, β) Το τμήμα της περιοχής μετά την εκσκαφή.....	42
3.3:	α) Το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης όπου στο βάθος διακρίνεται ένα μέρος του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, β), γ), δ) Το τμήμα της περιοχής μετά την εκσκαφή.....	43
3.4:	α) Το δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης με το νέο κτίριο του Γενικού τμήματος να φαίνεται στο βάθος, β), γ) Το τμήμα της περιοχής μετά την εκσκαφή.....	44
3.5:	Μετρητής αντίστασης STING R1.....	46
3.6:	Διάταξη διπόλου – διπόλου.....	46
3.7:	Κάνναβοι μέτρησης της διάταξης διπόλου – διπόλου.....	47
3.8:	Σκαρίφημα περιοχής του Πολυτεχνείου Κρήτης και απεικόνιση των γραμμών μελέτης πάνω στην περιοχή έρευνας.....	48
3.9:	Γεωηλεκτρικές τομές 1-15 από το πακέτο Res2dinv A) 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.....	49
4.1:	Τοπογραφική αποτύπωση του οικοπέδου όπου απεικονίζονται οι θέσεις των γεωφυσικών μετρήσεων.....	66
4.2:	Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T1 και η γεωλογική στήλη της γεώτρησης MP3. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7. α) Σύμφωνα με την διάταξη διπόλου - διπόλου, β) Σύμφωνα με την διάταξη Wenner – Schlumberger...	68
4.3:	Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T2 και η γεωλογική στήλη της γεώτρησης MP4. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7. α) Σύμφωνα με την διάταξη διπόλου - διπόλου, β) Σύμφωνα με την διάταξη Wenner – Schlumberger...	70
4.4:	Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T3. α) Σύμφωνα με την διάταξη διπόλου- διπόλου, β) Σύμφωνα με την διάταξη Wenner – Schlumberger.....	72
4.5:	Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T4 και η γεωλογική στήλη των γεωτρήσεων MP1 και MP2. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7. Η γεώτρηση MP1 δεν βρίσκεται επάνω στην γραμμή μελέτης και απέχει 2 μέτρα.....	73
4.6:	Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T5 και η γεωλογική στήλη της γεώτρησης MP5. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7.....	74
4.7:	Υπόμνημα γεωλογικών σχηματισμών των γεωτρήσεων.....	75
4.8:	Χάρτης κλίμακας χρωμάτων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψε από την χαρτογράφηση με την H/M συσκευή CM-031.....	78
5.1:	α) Γεωηλεκτρική τομή (Γραμμή 8), β) υπόμνημα γεωλογικών σχηματισμών της γεώτρησης, γ) γεωλογική στήλη της γεώτρησης.....	82
5.2:	Βαθμονόμηση ηλεκτρικής τομογραφίας όπως αυτή προέκυψε από τον συνδυασμό των γεωηλεκτρικών τομών και γεωτρήσεων.....	83
5.3:	Οι γεωηλεκτρικές τομές 1-15 χωρισμένες στις τρεις γεωηλεκτρικές ζώνες.....	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις εφαρμόζονται ευρέως στην απεικόνιση του υπεδάφους. Έχουν καθιερωθεί πλέον σε τομείς όπως η μεταλλευτική έρευνα, η αναζήτηση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, η εφαρμοσμένη μηχανική, η αρχαιομετρία και πρόσφατα σε περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές εφαρμογές.

Η γεωφυσική διασκόπηση είναι η εφαρμογή των φυσικών μεθόδων (όπως η σεισμική, βαρυτικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι) για τη μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων.

1.2 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η Γεωφυσική είναι μια από τις επιστήμες που με βάση τους νόμους της φυσικής χρησιμοποιείται για να μελετήσει τις φυσικές ιδιότητες της Γης. Ο όρος γεωφυσική όμως έχει ευρεία έννοια γι αυτό το λόγο έχει επικρατήσει ο όρος αυτός να ταυτίζεται με την έρευνα του υπεδάφους ενώ για τις άλλες επιστήμες χρησιμοποιούνται πιο ειδικευμένοι όροι. Επομένως η γεωφυσική χρησιμοποιεί μεθόδους μέτρησης φυσικών μεγεθών στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να το καταστρέφει. Όλες αυτές οι μέθοδοι της γεωφυσικής λέγονται "μη-καταστροφικές" και είναι συνεπώς φιλικές προς το περιβάλλον.

Εδώ μπαίνει η έννοια "γεωφυσικός στόχος". Οτιδήποτε αναζητείται κάτω από το έδαφος, χρησιμοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνειά του εδάφους, χωρίς αυτές να το καταστρέφουν ονομάζεται "γεωφυσικός στόχος".

Γεωφυσικοί στόχοι μπορούν να είναι:

- ❖ το νερό μέσα στο υπέδαφος
- ❖ ένα σπήλαιο
- ❖ ένα ρήγμα που δεν φαίνεται στην επιφάνεια

- ❖ Ένα θαμμένο μέσα στους αιώνες αρχαιολογικό κτίσμα
- ❖ μια ρωγμή επάνω στα θεμέλια μιας γέφυρας
- ❖ ένα κοίτασμα πετρελαίου

Η γεωφυσική έρευνα βασίζεται στη συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία των γεωφυσικών παρατηρήσεων που γίνονται απευθείας στη φύση με γεωφυσικά όργανα. Οι φυσικές παράμετροι του εδάφους είναι η ηλεκτρική του αντίσταση, η επιδεκτικότητα, η πυκνότητα, η θερμοκρασία, οι ελαστικές σταθερές, η πίεση κλπ. Μέσα από αυτές τις μετρήσεις και τον συνδυασμό τους αποκαλύπτεται σιγά σιγά η εικόνα του υπεδάφους δίνοντας μας πληροφορίες τόσο για την φυσική κατάσταση και σύσταση του υλικού και τις κινήσεις του, όσο και για τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της γης.

Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έρχεται σήμερα να απαντήσει όλα τα ερωτήματα που έχουν να κάνουν με το υπέδαφος, δίνοντας μια γρήγορη και ακριβή εικόνα με ταυτόχρονα χαμηλό κόστος. Το μεγάλο πλεονέκτημά της είναι ότι δίνει πληροφορίες χωρίς καμία παρέμβαση επί του εδάφους (εκσκαφή, διάτρηση κ.α.) καθώς επίσης και συνεχή δεδομένα σε αντίθεση με εκείνα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που αναφέρονται μόνο σε ένα σημείο.

Οι μέθοδοι όπου η εφαρμοσμένη γεωφυσική ασχολείται για την ανεύρεση δομών οικονομικής σημασίας είναι οι εξής:

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

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων έγινε πάνω στα τεχνικά έργα.

Ως τεχνικά έργα μπορούν να θεωρηθούν τα οδοστρώματα, υποδομές οδοποιίας, τα συστήματα γεφυρών-υπόγειας δομής, συστήματα γεφυρών-υπέργειας δομής, είτε η χαρτογράφηση του υπεδάφους.

1.3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Οι γεωτεχνικές έρευνες εκτελούνται συνήθως σε τρεις φάσεις: κατά την αναγνώριση, την προκαταρκτική έρευνα και τη λεπτομερή έρευνα. Οι φάσεις αυτές συνήθως συναρτώνται με τα αντίστοιχα στάδια εκπόνησης των μελετών (προκαταρκτική μελέτη, προμελέτη και οριστική μελέτη).

Η φάση της γεωτεχνικής αναγνώρισης συνήθως περιλαμβάνει τη συγκέντρωση και αξιολόγηση των διαθέσιμων τοπογραφικών δεδομένων, γεωλογικών στοιχείων, αεροφωτογραφιών, στοιχείων από προηγούμενες γεωτεχνικές έρευνες στην ευρύτερη περιοχή και επιτόπου επισκέψεις. Κατά τη φάση της αναγνώρισης εκτελούνται και γεωφυσικές διασκοπήσεις. Σκοπός των γεωτεχνικών ερευνών κατά τη φάση της αναγνώρισης είναι:

- (α) Ο εντοπισμός πιθανών προβλημάτων που θα πρέπει να διερευνηθούν κατά τις επόμενες φάσεις των ερευνών.
- (β) Η σύνταξη του προγράμματος των γεωτεχνικών ερευνών της επόμενης φάσης (συνήθως προκαταρκτική έρευνα).

Η έκταση της προκαταρκτικής γεωτεχνικής έρευνας εξαρτάται από το είδος του έργου και τα αποτελέσματα της αναγνώρισης. Η προκαταρκτική έρευνα συνήθως περιλαμβάνει τη διάνοιξη ερευνητικών φρεάτων, την εκτέλεση περιορισμένου αριθμού γεωτρήσεων, την εκτέλεση κάποιων εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής ή/και βραχομηχανικής και τέλος όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εκτελούνται και γεωφυσικές διασκοπήσεις. Σκοπός της προκαταρκτικής έρευνας είναι η διαπίστωση της εδαφικής στρωματογραφίας (είδος και πάχος των εδαφικών στρώσεων), των υδραυλικών συνθηκών (στάθμες και δίαιτα του υπογείου ορίζοντα) και των φυσικών, μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφικών στρώσεων σε βαθμό λεπτομέρειας ανάλογο της σημασίας και της έκτασης του έργου. Η έκταση και το είδος της

λεπτομερούς έρευνας εξαρτώνται από το είδος του έργου και τις εδαφικές συνθήκες.

Οι γεωτεχνικές έρευνες διακρίνονται σε επιτόπου έρευνες που εκτελούνται στο ύπαιθρο και σε εργαστηριακές δοκιμές που εκτελούνται στο εργαστήριο σε εδαφικά δείγματα που λαμβάνονται κατά τις επιτόπου έρευνες. Οι επιτόπου έρευνες περιλαμβάνουν τις γεωφυσικές έρευνες, τη διάνοιξη ερευνητικών φρεάτων, τη διάνοιξη γεωτρήσεων και την εκτέλεση επιτόπου δοκιμών.

Οι γεωφυσικές έρευνες εκτελούνται για τη διερεύνηση μεγάλων εκτάσεων ταχέως και με μικρό κόστος, με σκοπό τον προσδιορισμό της κατά προσέγγιση στρωματογραφίας. Οι μέθοδοι βασίζονται στον εντοπισμό της διεπιφάνειας μεταξύ επάλληλων εδαφικών στρώσεων με σημαντική αύξηση των τιμών των μηχανικών παραμέτρων με το βάθος. Το μειονέκτημα των γεωφυσικών μεθόδων είναι ότι δεν δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα στις περιπτώσεις που συμβαίνουν συχνές εναλλαγές εδαφικών στρώσεων με το βάθος, στις περιπτώσεις που οι ιδιότητες μεταξύ των γειτονικών στρώσεων δεν διαφέρουν σημαντικά (και συνεπώς δεν υπάρχει διακριτή επιφάνεια) καθώς και στις περιπτώσεις που μια στρώση με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες υπέρκειται μιας στρώσης με υποδεέστερες ιδιότητες. Οι γεωφυσικές έρευνες απαιτούν διάνοιξη ενός αριθμού γεωτρήσεων για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων τους. Χαρακτηριστική περίπτωση βέλτιστης απόδοσης των γεωφυσικών μεθόδων είναι ο εντοπισμός της θέσης του βραχώδους υποβάθρου (π.χ. ασβεστολίθου) σε περίπτωση που οι στρώσεις που υπέρκεινται του υποβάθρου αποτελούνται από μαλακές αργίλους ή χαλαρές άμμους. Επιπλέον, δεν δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα στην περίπτωση εναλλασσόμενων στρώσεων αποσαθρωμένων και υγιών βραχωδών σχηματισμών ή στην περίπτωση που οι σχηματισμοί που υπέρκεινται του βραχώδους υποβάθρου είναι συνεκτικά κορήματα, σκληρές άργιλοι, μάργες κλπ (Καβαδάς, 2007).

Συνοψίζοντας, οι γεωτεχνικές έρευνες πραγματοποιούνται για να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και των

πετρωμάτων γύρω από μία τοποθεσία. Αυτό έχει ως στόχο τον σχεδιασμό χωματοургικών έργων και θεμελιώσεων για οικοδόμηση που πρόκειται να γίνει κυρίως για αποκατάσταση του κινδύνου στα τεχνικά έργα εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η Επιφανειακή έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με γεωλογική χαρτογράφηση, είτε με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων καθώς και με τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας. Η Υπόγεια έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί με γεωφυσικές μεθόδους.

Στον παρακάτω πίνακα (Σχήμα 1.1) παρατίθενται μερικές από τις πιο συχνές εφαρμογές των γεωτεχνικών τεχνολογιών και η μέθοδος που χρησιμοποιείται για καθεμία από αυτές.

Σχήμα 1.1 : Μερικές πιθανές γεωτεχνικές εφαρμογές με την χρήση των γεωφυσικών μεθόδων (Anderson, 2006)

Application	Refr.	Refl.	Seis. Tomo.	GPR	EM	Resist.	IP	SP	Mag.	Grav.	MASW	ReMi
Mapping lithology (<30-ft depth)	M	X		M	X	X					M	M
Mapping lithology (>30-ft depth)	X	M	X		X	X					M	M
Estimating clay-mineral content					M	X	X				X	X
Locating shallow sand and gravel deposits				M	M						X	X
Locating sand and gravel deposits (that contain heavy minerals)									M			
Determining volume of organic material in filled-in lakes or karsted features	M	M			M					M	X	X
Mapping top of ground water surface	M (p-wave)	M (p-wave)		M	M	M						
Determining water depths (including bridge scour)				M								
Mapping groundwater cones of depression	X	X		M	X	X						
Subsurface fluid flow								M				
Mapping contaminant plumes				M	M	X		X				
Mapping crop land salination and desalination over time					M	M						
Locating underwater ferromagnetic objects				M					M			
Mapping bedrock topography (<30-ft depth)	M			M	X	X				X	M	M
Mapping bedrock topography (>30-ft depth)	X	M			X	X				X	M	M
Mapping sub-bedrock structure	X	M		X	X	X					X	X
Delineating steeply dipping geologic contacts (<30-ft depth)	M			M	M	M						

NOTE: M = Major Application; X = Minor Application.

Application	Refr.	Ref.	Seis. Tomo.	GPR	EM	Resist.	IP	SP	Mag.	Grav.	MASW	ReMi
Delineating steeply dipping geologic contacts (>30-ft depth)	X	M	X		X	X			X			
Mapping fracture orientation (near-surface bedrock)	M			M								
Identifying regions of potential weakness (e.g., shear zones and faults; <30-ft depth)	M		X	M	X	X			X			
Identifying regions of potential weakness (e.g., shear zones and faults; >30-ft depth)	X	X	M		X	X			X			
Identifying near-surface karstic sinkholes and the lateral extent of their chaotic, brecciated, and otherwise disrupted ground	M	M		M	X	X				X		
Mapping air-filled cavities, tunnels, (<30 ft depth)	X	X	X	M	X	M				X	X	X
Mapping air-filled cavities, tunnels, (>30-ft depth)	X	M	M		X	X				X	X	X
Mapping water-filled cavities, tunnels	X (p-wave)	M (p-wave)	M	X							X	X
Mapping clay-filled cavities, tunnels	x	M	M		X	X						
Estimating rippability	M		X								X	X
Foundation integrity studies	M		X	M							M	M
Dam-site integrity studies	M	M	M	M	X	X		M			M	M
Landslide site evaluation	M		M	X	M	M					X	X
Locating buried well casings (metal)				M	M				M			
Locating buried drums, pipelines, and other ferromagnetic objects			M	M				M				
Locating buried nonmagnetic utilities			M									
Locating buried nonmagnetic utilities				M								
Mapping archeological sites (buried ferro-magnetic objects, fire beds, burials, etc)				M	M				M			
Mapping archeological sites (nonmagnetic—excavations, burials, etc.)				M								
Detection of voids beneath pavement				M								
Detection and delimitation of zones of relatively thin subgrade or base course material				M								
Detection and monitoring of areas of insufficiently dense subbase				M							X	X
Mapping fracture orientation	M		M									
Detection of bodies of subgrade in which moisture content is anomalously high, as a precursor to development of pitting and potholes				M								
Mapping—locating landfills	X			X	M	X			M		X	X
Determining in situ rock properties (bulk, shear, and Young's moduli)	M		M								M	M
Estimating in situ rock properties (saturation, porosity, permeability)					M	M					X	X
Determining in situ rock densities										M		
Determining in situ rock properties (dielectric constant)				X								
Mapping abandoned, in-filled open-pit mines and quarries	M	M		X	X	X			X	X	X	X
Mapping abandoned underground mines		M	X			X						
Detecting abandoned mine shafts		X	X	M	M	X			X			

NOTE: M = Major Application; X = Minor Application.

Οι γεωφυσικές έρευνες στα γεωτεχνικά έργα περιλαμβάνουν σεισμικές, ηλεκτρομαγνητικές και ηλεκτρικές μεθόδους. Το γεωραντάρ (G.P.R.) και η ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιούνται περισσότερο για την ανάλυση στρωματογραφίας του υπεδάφους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, της οποίας στόχος είναι να αναδείξει την σημαντικότητα της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων στα γεωτεχνικά έργα και πιο συγκεκριμένα η γίνει εύρεση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους της περιοχής εκείνης ώστε να κριθεί κατάλληλο ή όχι για οικοδόμηση, πραγματοποιήθηκε γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης.

Σε επόμενα κεφάλαια θα γίνει μία εκτενέστερη περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

1.4 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

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

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εκτενής αναφορά στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και συγκεκριμένα στην αρχή λειτουργίας της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, καθώς επίσης και το πρόγραμμα Res2Dinv.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται μια αναφορά στο χώρο όπου έγιναν οι μετρήσεις, παραθέτονται όλα τα στοιχεία που συλλέχθηκαν κι επεξεργάστηκαν καθώς και η επεξεργασία αυτών των στοιχείων. Παραθέτονται επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα RES2DINV.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων από την ηλεκτρική τομογραφία και την

ηλεκτρομαγνητική μέθοδο καθώς επίσης και η ταύτιση των γεωηλεκτρικών τομών με τις γεωτρήσεις.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων από την ηλεκτρική τομογραφία και η αξιολόγηση τους.

Κεφάλαιο 6: Το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τα συμπεράσματα σχετικά με τη καταλληλότητα του εδάφους για οικοδόμηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι μία σχετικά νέα μέθοδος που έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Οι παραδοσιακές δισδιάστατες μετρήσεις παρουσίαζαν κάποιες δυσκολίες όπως το ότι η λήψη μετρήσεων στο έδαφος ήταν αργή καθώς επίσης και δυσκολία στην ερμηνεία των μετρήσεων. Σύμφωνα με τις εξελίξεις των τελευταίων χρόνων η μέθοδος αυτή έχει γίνει περισσότερο εύχρηστη με χρήση οργάνων που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη λήψη μετρήσεων. Επιπλέον, οι εξελιγμένες τεχνικές ερμηνείας επιτρέπουν την ακριβή απεικόνιση των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Η ηλεκτρική τομογραφία θεωρείται μία από τις μέθοδος έρευνας των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι εφαρμόζονται επιτυχώς όταν υπάρχει σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος.

Κατά τη διαδικασία βιβλιογραφικής έρευνας, μελετήθηκαν επιστημονικές πηγές που αναφέρονται κυρίως στις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να προσδιοριστούν ιδιότητες του υπεδάφους χρήσιμες για τις διάφορες γεωτεχνικές εφαρμογές.

Αρχικά, ως σημείο αναφοράς στην επιστημονική έρευνα, τίθεται έρευνα που δημοσιεύτηκε από την American Society of Civil Engineers (Andreson et al., 2009). Στην έρευνα, η οποία στηρίχτηκε πάνω στην γεωφυσική διασκόπηση για τον εντοπισμό της καλύτερης τοποθεσίας για θεμελίωσης, παρουσιάζονται τα προφίλ της ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψαν από 3 παράλληλες ηλεκτρικές τομές σε μια απότομη πλαγιά στη περιοχή Μισσούρι στο Κάνσας. Σκοπός ήταν να προσδιοριστεί το βάθος του βραχώδους υποστρώματος και να διαφοροποιηθεί το στρώμα του ασβεστόλιθου από τον σχιστόλιθο. Ο προσδιορισμός του βάθους του υποστρώματος ήταν αρκετά περίπλοκος. Ένας παράγοντας που δυσκόλεψε στον προσδιορισμό αυτό ήταν οι

εναλλαγές των στρώσεων του ασβεστόλιθου και του σχιστόλιθου. Έτσι οι τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης δεν μπορούσαν να οριστούν εύκολα. Τελικά οι αντιστάσεις προσδιορίστηκαν με την βοήθεια τριών γεωτρήσεων.

Μία έρευνα που έγινε τον Οκτώβριο του 2006 (Anderson et al., 2006) αναφέρεται στον εντοπισμό ενεργών καταβόθρων σε δύο εργοτάξια στο Μισσούρι. Η μία εντοπίστηκε σε εργοτάξιο της περιοχής Greene, Missouri και η δεύτερη σε εργοτάξιο της περιοχής Jefferson, Missouri. Οι ενεργές καταβόθρες εντοπίστηκαν ύστερα από μία επιθεώρηση στο χώρο του εργοταξίου. Η γεωλογική έρευνα θεωρήθηκε απαραίτητη και πιο συγκεκριμένα η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας. Αρχικός στόχος ήταν ο καθορισμός της ύπαρξης καρστικών κοιλοτήτων γεμάτες με αέρα στο υπέδαφος. Στην συνέχεια εκτιμήθηκε το βάθος του βραχώδους υποστρώματος και ο προσδιορισμός των συνθηκών του υπεδάφους που θα έθεταν σε κίνδυνο την κατασκευή. Με την βοήθεια της ηλεκτρικής τομογραφίας διαπιστώθηκε ότι οι περιοχές ήταν καρστικοποιημένες χωρίς όμως να υπάρχουν κοιλότητες με αέρα ή νερό και η καταβόθρα δημιουργήθηκε από τα νερά έντονης βροχόπτωσης.

Το 2008, στο πανεπιστήμιο του Μισσούρι, το θέμα διπλωματικής εργασίας της φοιτήτριας Iana Muchaidze με επιβλέποντα τον Neil L. Anderson, ο οποίος ήταν επικεφαλής σε έρευνα που αναφέραμε νωρίτερα, αφορούσε την απεικόνιση του καρστικοποιημένου εδάφους με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Το υπουργείο μεταφορών του Μισσούρι σχεδίαζε να κατασκευάσει μια διασταύρωση μεταξύ δύο αυτοκινητόδρομων με σκοπό την διευκόλυνση της κυκλοφορίας. Το υπόστρωμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως καρστικό. Πριν την έναρξη της κατασκευής, διεξήχθη γεωφυσική έρευνα με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας με σκοπό να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως έγκοιλα, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα μακροπρόθεσμα.

Από το πανεπιστήμιο της Σλοβενίας έγινε έρευνα (Stepisnik, 2008) η οποία διεξήχθη στην καρστικοποιημένη περιοχή Divaca της Σλοβενίας με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι δολίνες που βρίσκονται στην ενδοχώρα του ποταμού Reka, έχουν κατακλυστεί με αργιλώδη ιζήματα. Η

μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας φάνηκε να είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος για την απεικόνιση της δομής του υπεδάφους.

Έρευνα, που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Geophysical Prospecting* (Cardarelli et al., 2010) είχε να κάνει με τις κοιλότητες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια και οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρούς κινδύνους και προβλήματα ιδιαίτερα στα κέντρα των πόλεων. Η θέση των κοιλοτήτων, η εκτίμηση του μεγέθους τους καθώς επίσης και ο προσδιορισμός του πάχους των υπερκειμένων είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση του κινδύνου κατάρρευσης. Σε αυτή την έρευνα, η γεωηλεκτρική τομογραφία (EPT) και η σεισμική τομογραφία διάθλασης εντάσσονται σε μια κοινή διαδικασία ερμηνείας για τη θέση κοιλοτήτα στην πόλη της Ρώμης. Οι δύο αυτές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης έχουν οδηγήσει σε επιτυχή αποτελέσματα για την ανίχνευση κοιλοτήτων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους.

Το 2006 δημοσιεύτηκε μία έρευνα από την GSSA (Geological Society of South Africa), η οποία στηρίχτηκε πάνω στην γεωφυσική διασκόπηση για τον εντοπισμό και την διατήρηση των αποθεμάτων του υπόγειου νερού, στην πόλη Mamre, της νότιας Αφρικής. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης, η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και η μέθοδος ειδικής αντίστασης. Η έρευνα ολοκληρώθηκε με επιτυχία προσδιορίζοντας το βάθος του γεωλογικού υποβάθρου και την εύρεση των ορίων των ζωνών αποσάθρωσης (Anderson et al., 2006).

2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Στις ηλεκτρικές τεχνικές διασκόπησης περιλαμβάνονται οι μέθοδοι:

- της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης
- της επαγόμενης πόλωσης
- η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών
- η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και
- η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων.

Η πιο σημαντική από τις μεθόδους αυτές είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σκοπός της μεθόδου είναι να βρεθεί η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους και έμμεσα να ληφθούν πληροφορίες για τη γεωλογική του δομή. Λόγω χαμηλού κόστους και μεγάλου εύρους εφαρμογών είναι η πιο διαδεδομένη γεωφυσική μέθοδος και χρησιμοποιείται κυρίως στην Υδρογεωλογία, στην Τεχνική Γεωλογία στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνητών φραγμάτων, στην αρχαιομετρία κ.τ.λ.

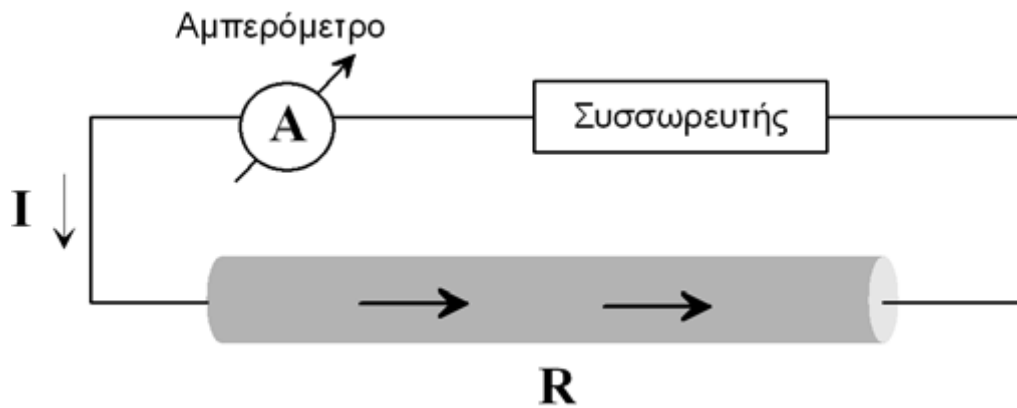
Κατά την μέθοδο της γεωηλεκτρικής διασκόπησης μετράμε τη διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική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

2.2.1 ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΗ ΚΑΙ ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΓΗ

Το 1827 ο Georg Ohm, όρισε μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει ένα συρμάτινο καλώδιο και της διαφοράς δυναμικού (τάσης) που απαιτείται για να δημιουργηθεί το ρεύμα.

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

Ο Ohm βρήκε ότι η ένταση του ρεύματος, I , είναι ανάλογη της τάσης, ΔV , για μία μεγάλη κατηγορία υλικών τα οποία θα αποκαλούμε στο εξής ωμικά υλικά. Η σταθερά αναλογίας, R , καλείται ωμική αντίσταση (resistance) του υλικού και έχει ως μονάδα μέτρησης τη διαφορά δυναμικού (volt) ανά ένταση ρεύματος (ampere), δηλαδή το Ω (ohm).



Σχήμα 2.1 : Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Ohm.

Η χρήση των μετρήσεων της ωμικής αντίστασης παρουσιάζει πρόβλημα καθώς αυτή δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το συρμάτινο καλώδιο, αλλά και από τη γεωμετρία του καλωδίου. Αν, για παράδειγμα, μεγάλωνε το μήκος του συρμάτινου καλωδίου, τότε θα αυξανόταν και η μετρούμενη αντίσταση. Επίσης, αν μειωνόταν η διάμετρος του συρμάτινου καλωδίου, η μετρούμενη αντίσταση θα αυξανόταν. Πρέπει να οριστεί μια ιδιότητα η οποία να περιγράφει την ικανότητα του υλικού να διαβιβάζει ηλεκτρικό ρεύμα και να είναι ανεξάρτητη των γεωμετρικών παραγόντων. Η γεωμετρικά ανεξάρτητη ποσότητα που χρησιμοποιείται ονομάζεται ειδική αντίσταση (resistivity) και συνήθως συμβολίζεται με ρ .



Σχήμα 2.2 : Τρόπος υπολογισμού της ωμικής αντίστασης.

Στην περίπτωση του συρμάτινου καλωδίου, η ειδική αντίσταση, ρ , ορίζεται ως η ωμική αντίσταση του καλωδίου, R , επί την επιφάνεια διατομής του, A , δια το μήκος, L , του καλωδίου:

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

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

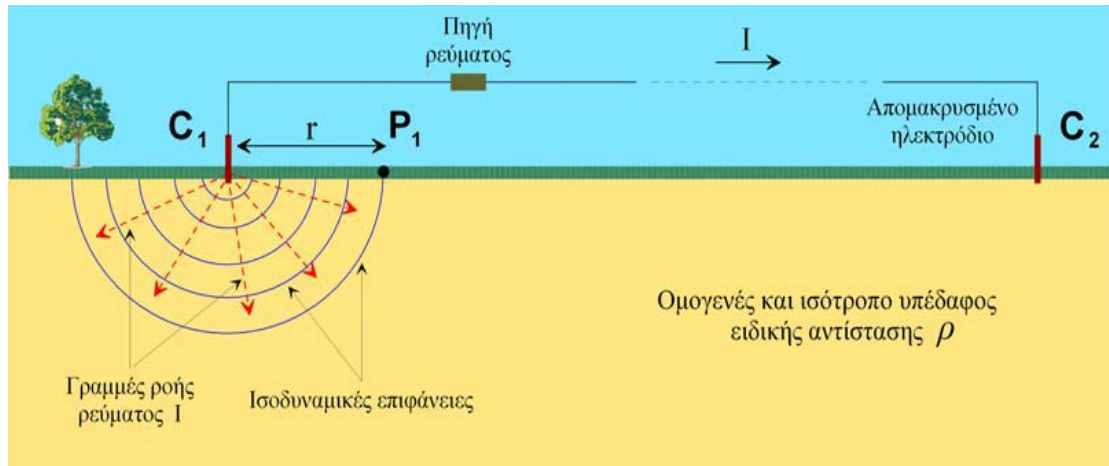
Επειδή η Ωμική αντίσταση R ισούται με $R = \frac{\Delta V}{I}$ (από την σχέση 2.1), η ειδική αντίσταση ρ σύμφωνα με τη προηγούμενη σχέση θα είναι:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{L} \Rightarrow \frac{\Delta V}{L} = \rho \frac{I}{A} \quad (2.3)$$

Οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι: α) το πορώδες των πετρωμάτων και την περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα. Συγκεκριμένα, όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος, η ειδική αντίσταση αυξάνει. β) η λιθολογία των πετρωμάτων και η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων. Τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα παρουσιάζουν συνήθως μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. γ) η θερμοκρασία των πετρωμάτων. Συνήθως με αύξησή της, η ειδική αντίσταση ελαττώνεται, καθώς αυξάνεται η ευκινησία των ιόντων. Επιπλέον, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υδροφόρων και μη σχηματισμών ελαττώνεται με την αύξηση:

- του όγκου του νερού στο πέτρωμα
- της περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα του υπόγειου ύδατος
- της περιεκτικότητας σε αργίλους
- του βαθμού κορεσμού του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος
- της καρστικοποίησης
- της εξαλλοίωσης.

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση όπου το δεύτερο ηλεκτρόδιο C2 τοποθετείται στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I , της σημειακής πηγής, C1, είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο.



Σχήμα 2.3 : Ισοδυναμικές επιφάνειες και γραμμές ροής του ρεύματος (Λούης, 2004).

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες. Η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού), dV , μεταξύ δύο ισοδυναμικών επιφανειών που απέχουν απόσταση dr θα είναι σύμφωνα με τη σχέση (2.3) ίση με :

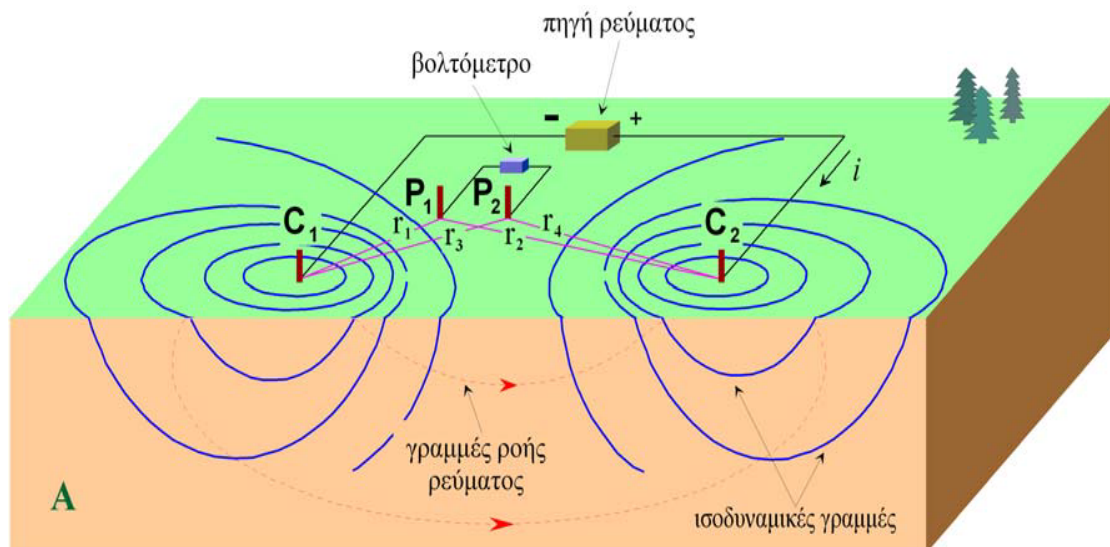
$$\frac{dV}{dr} = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \Rightarrow dV = \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr, \quad (2.4)$$

όπου $A = 2\pi r^2$. Με ολοκλήρωση της σχέσης προκύπτει ότι το δυναμικό, V , σε σημείο, P_1 , του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος, C_1 , θα δίδεται από τη σχέση:

$$V = \frac{\rho I}{2 \pi r}, \quad (2.5)$$

όπου r είναι η απόσταση του σημείου P_1 από τη σημειακή πηγή.

Στην περίπτωση που τοποθετηθούν δύο σημειακές πηγές ρεύματος (ηλεκτρόδια ρεύματος) κοντά μεταξύ τους η κατανομή του ρεύματος και οι ισοδυναμικές γραμμές που παράγονται μέσα στην ομογενή γη γίνονται πιο πολύπλοκες. Αντί το ρεύμα να ρέει ακτινικά από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, ρέει κατά μήκος καμπύλων διαδρομών που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος. Στα σχήματα 2.4 και 2.5 δείχνονται τέτοιες διαδρομές του ρεύματος (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές). Στη περίπτωση αυτή όπου το δεύτερο ηλεκτρόδιο ρεύματος C_2 βρίσκεται κοντά στη σημειακή πηγή C_1 (σχήμα 2.4) τότε το δυναμικό στο σημείο P_1 (ηλεκτρόδιο P_1) θα είναι διαφορετικό διότι τώρα επηρεάζεται και από την πηγή ρεύματος C_2 . Το διαμορφούμενο δυναμικό στο σημείο P_1 θα είναι το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V_1 λόγω της πηγής C_1 και του δυναμικού V_2 λόγω της πηγής C_2 (αρχή της υπέρθεσης).



Σχήμα 2.4 : Τρισδιάστατη απεικόνιση των ισοδυναμικών γραμμών (Λούης, 2004).

$$V_{P_1} = V_1 + V_2 = \frac{\rho(+I)}{2\pi r_1} + \frac{\rho(-I)}{2\pi r_2}$$

$$V_{P_1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (2.6)$$

όπου r_1 και r_2 είναι οι αποστάσεις του σημείου P_1 από τις πηγές.

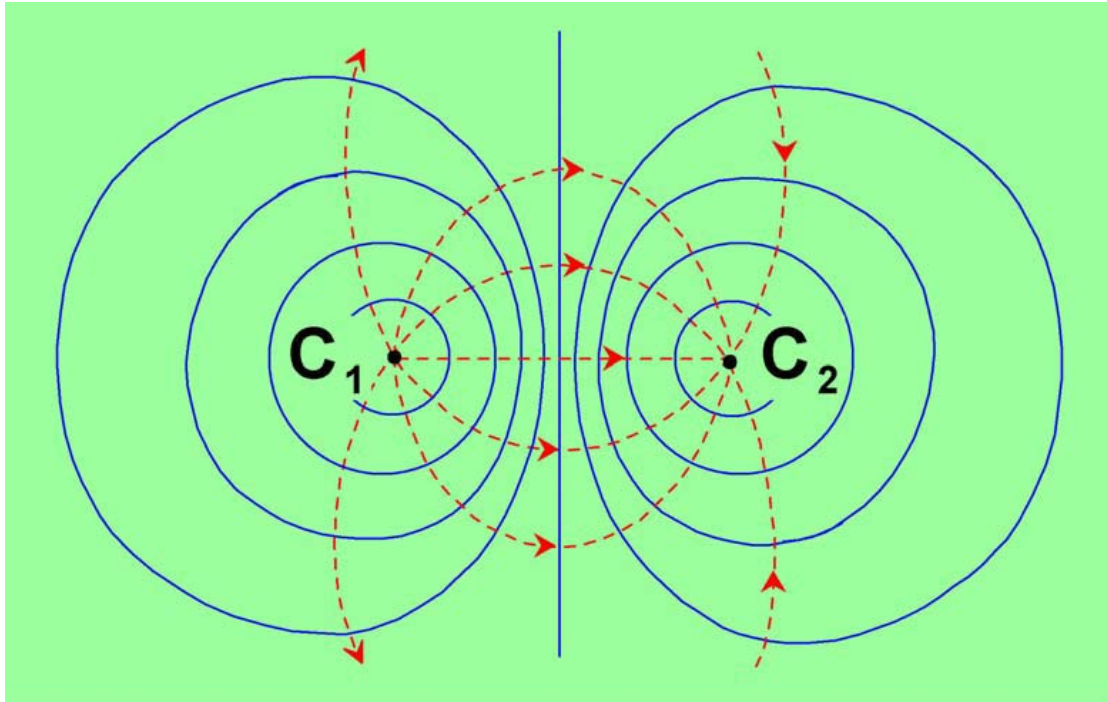
Σε ένα δεύτερο σημείο (ηλεκτρόδιο P_2) της επιφάνειας του ημιχώρου (σχήμα 2.4) το δυναμικό V_{p_2} λόγω της παρουσίας των πηγών C_1 και C_2 θα δίδεται αντίστοιχα από τη σχέση:

$$V_{p_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.7)$$

όπου r_3 και r_4 είναι οι αποστάσεις του σημείου P_2 από τις πηγές. Η διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης), ΔV , μεταξύ των σημείων P_1 και P_2 θα είναι:

$$\Delta V = V_{p_1} - V_{p_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right), \quad (2.8)$$

Οι σημειακές πηγές ρεύματος C_1 και C_2 υλοποιούνται στη πράξη με τη τοποθέτηση δύο μεταλλικών πασάλων (ηλεκτροδίων) στο έδαφος και τη σύνδεση τους μέσω καλωδίων με μια ηλεκτρική πηγή, πχ. ένα συσσωρευτή (σχήμα 2.4). Τα σημεία P_1 , P_2 μέτρησης της διαφοράς δυναμικού ΔV υλοποιούνται με τη τοποθέτηση δύο άλλων μεταλλικών ηλεκτροδίων στο έδαφος και τη σύνδεση τους με ένα βολτόμετρο. Το σχήμα 2.5 παρουσιάζει μία κάτοψη του σχήματος 2.4 με τις γραμμές ροής ρεύματος και τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν οι σημειακές πηγές ρεύματος C_1 και C_2 στην επιφάνεια του ημιχώρου (Λούης, 2004).

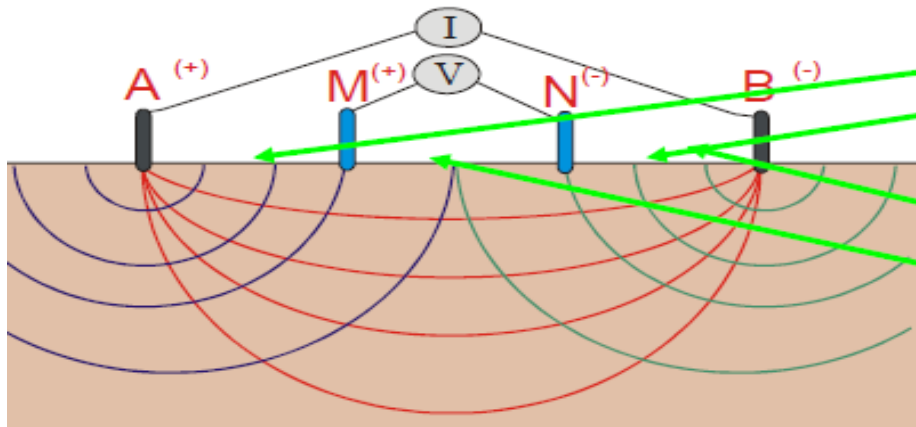


Σχήμα 2.5 : Μια πανοραμική φωτογραφία όπου φαίνονται οι ισοδυναμικές επιφάνειες με μπλε χρώμα και οι γραμμές ροής του ρεύματος με κόκκινο χρώμα (Λούης, 2004).

2.2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Κατά τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διαβιβάζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος. Για την βασική διαδικασία μέτρησης χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια (συνήθως μεταλλικοί πάσσαλοι) τα οποία εισάγονται στο έδαφος σε ένα βάθος μερικών εκατοστών (~10cm) και σε αποστάσεις μεταξύ τους που ποικίλουν από μερικά μέτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιείται, συνδέεται με τα ηλεκτρόδια μέσω καλωδίων. Έτσι διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, έντασης I (ποικίλλει από μερικά milli- Ampere έως μερικά Ampere) μέσα στη γη από δυο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B. Σε δύο άλλα ηλεκτρόδια M, N (ηλεκτρόδια δυναμικού) μετράται στις διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού V_{MN} (βλ. Σχήμα 2.6). Βρίσκεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση R .

$$R = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (2.9)$$



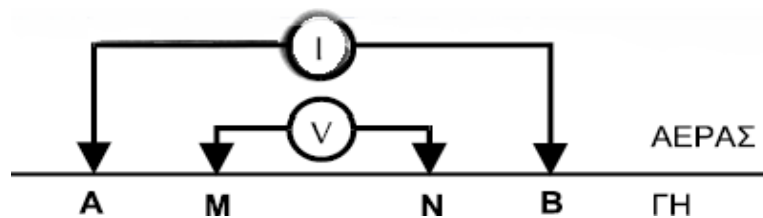
Σχήμα 2.6 : Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων

$$V_M = V_{AM} + V_{BM} = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM}, \quad (2.10)$$

$$V_N = V_{AN} + V_{BN} = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN} \quad (2.11)$$

$$\text{Άρα } V_{MN} = V_M + V_N = \left(\frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM} \right) - \left(\frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN} \right) \Rightarrow$$

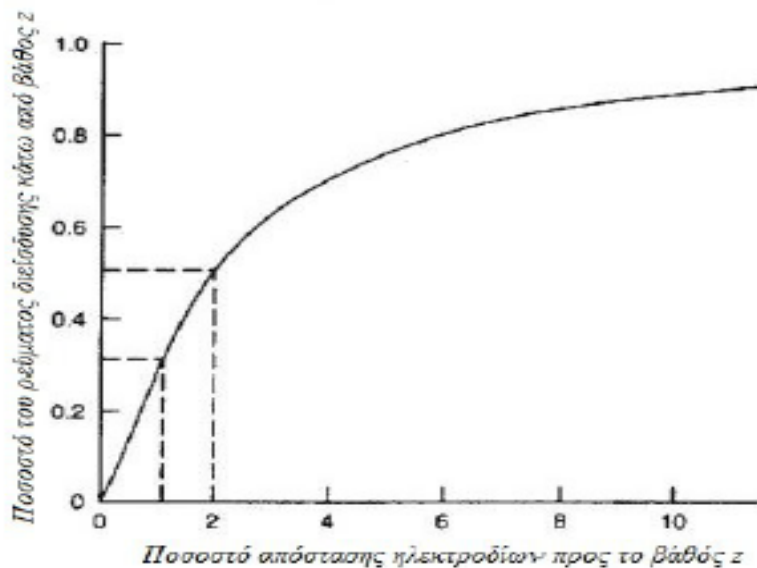
$$\Rightarrow V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.7 : Διάταξη των ηλεκτροδίων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN)

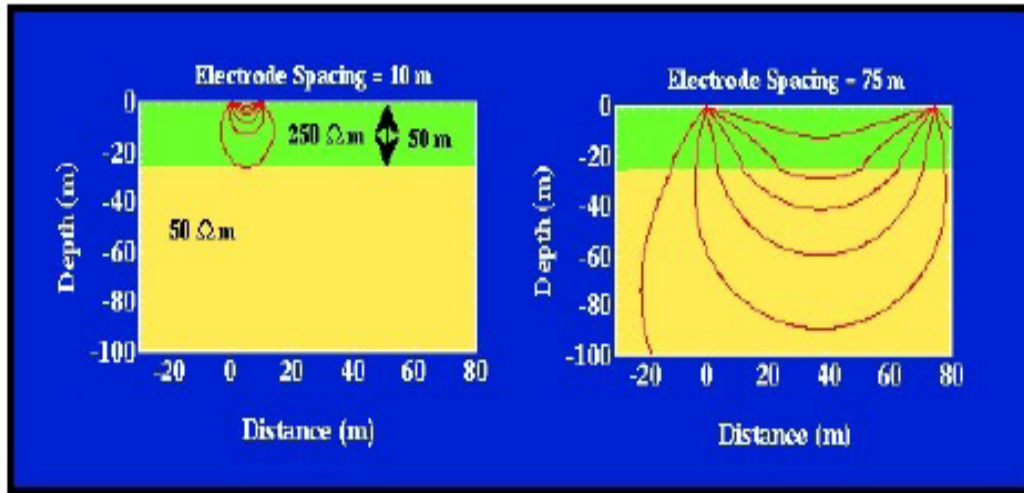
Το βάθος διείσδυσης του ρεύματος (άρα και το βάθος της διασκόπησης) είναι ανάλογο με την απόσταση των ηλεκτροδίων.

Σε μη ομοιογενή γη, στόχος είναι να προσδιοριστεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια η ειδική αντίσταση των στρωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης για να αυξάνεται έτσι και το βάθος διείσδυσης του. Στο Σχήμα 2.8 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων, ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος διείσδυσης μειώνεται αρκετά. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη συνολική αντίσταση που συναντά το ρεύμα κατά τη διαδρομή του μέσα στη γη.



Σχήμα 2.8 : Η εξάρτηση του βάθους διείσδυσης του ρεύματος από την απόσταση των ηλεκτροδίων μέτρησης (Αλεξόπουλος, 2008).

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται ότι αν αυξηθεί πολύ η απόσταση ηλεκτροδίων, τότε η ροή ρεύματος θα διέρχεται, σχεδόν εξ ολοκλήρου, από το κάτω στρώμα, ενώ αν αυτή η απόσταση είναι πολύ μικρή τότε η ροή ρεύματος θα διέρχεται από το πάνω. (Σχήμα 2.9)



Σχήμα 2.9 : Ροή ρεύματος σε σχέση με την απόσταση των ηλεκτροδίων μέτρησης (Byod, 1999).

Επομένως, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση:

- ✓ της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους.
- ✓ της γεωμετρίας διάταξης των ηλεκτροδίων (Θέσεις A, B, M, N).

Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας εισάγεται ο όρος της **φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ_a** .

$$\rho_a = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} K, \quad (2.13)$$

όπου K είναι ένας γεωμετρικός παράγοντας που εξαρτάται από τις

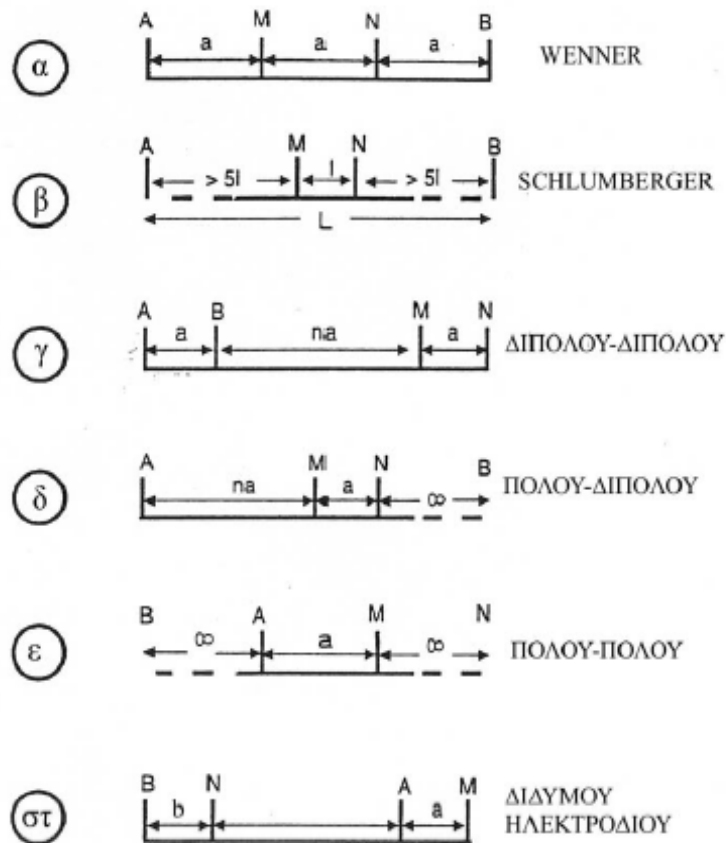
αποστάσεις AM, BM, AN, BN και ισούται με: $\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}$, (2.14).

Επομένως, η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική 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 (Τσούρλος κ.ά., 2011).

2.2.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

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



Σχήμα 2.10 : Διατάξεις ηλεκτροδίων

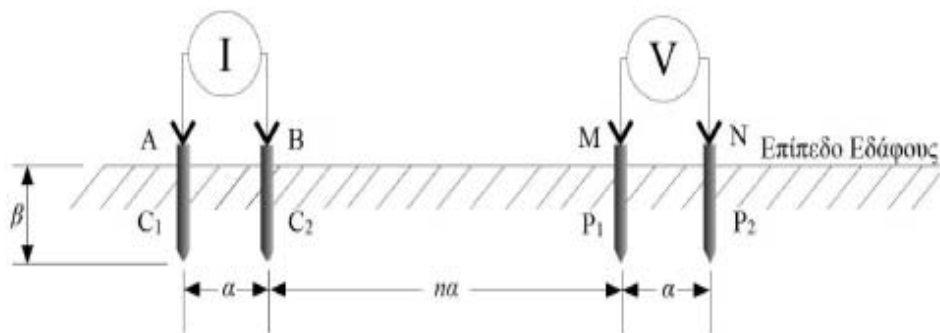
Η διάταξη Διπόλου-Διπόλου είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος τόσο στην έρευνα της ηλεκτρικής αντίστασης όσο και της επαγόμενης πόλωσης, λόγω του χαμηλού ηλεκτρομαγνητικού κύματος των κυκλωμάτων. Η διάταξη

των ηλεκτροδίων φαίνεται στο σχήμα 2.11. Η απόσταση μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων C1–C2 είναι «a» και η οποία είναι ίδια με την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού P1-P2. Η απόσταση των διπόλων είναι na (ακέραιο πολλαπλάσιο του α) και ισχύει ότι

$$\rho_{\alpha} = \pi n(n+1)(n+2)\alpha \frac{\Delta V}{I} \quad (2.15)$$

Ο όρος $\pi n(n+1)(n+2)\alpha$ είναι ο γεωμετρικός συντελεστής K.

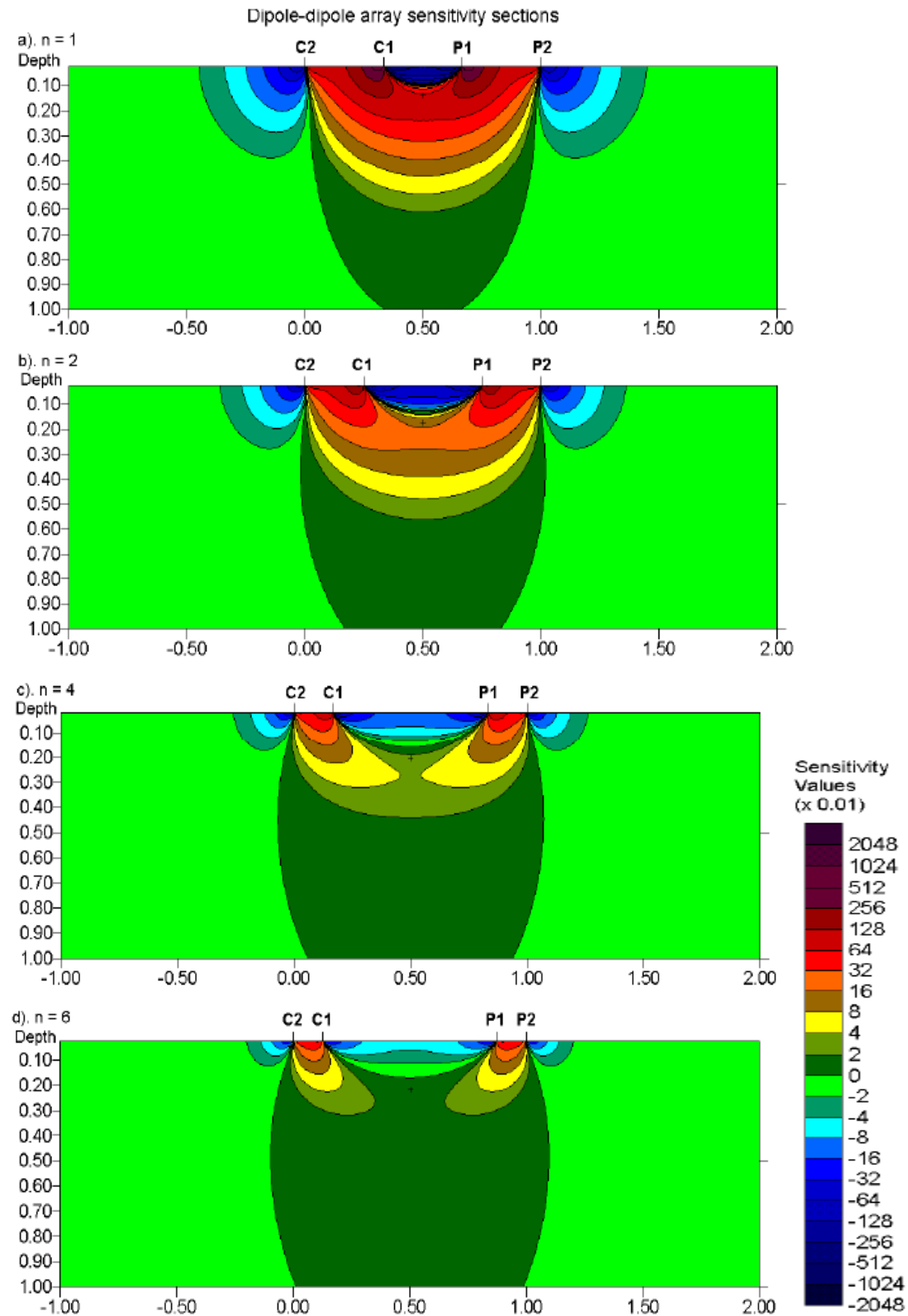
Αυτός είναι ο λόγος της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων C1 και P1 προς το C1-C2 (ή P1-P2) δίπολο, μήκους «a». Για έρευνες με αυτή τη διάταξη, το διάστημα «a» διατηρείται σταθερό στην μικρότερη μονάδα της απόστασης των ηλεκτροδίων, ενώ ο παράγοντας «n» αυξάνει από το 1 έως και το 6, προκειμένου να αυξηθεί το βάθος της έρευνας.



Σχήμα 2.11 : Διάταξη διπόλου – διπόλου

Το σχήμα 2.12 παρουσιάζει τμήματα ευαισθησίας αυτής της διάταξης για τις τιμές «n» που κυμαίνονται από 1 σε 6. Οι θετικές τιμές ευαισθησίας αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές της, ενώ οι αρνητικές τιμές της ευαισθησίας σε πολύ χαμηλές της. Οι μεγαλύτερες τιμές ευαισθησίας βρίσκονται γενικά μεταξύ του ζεύγους διπόλων C2-C1, όπως επίσης και μεταξύ του ζεύγους P1-P2. Αυτό σημαίνει ότι αυτή η διάταξη είναι η πιο ευαίσθητη στις αλλαγές της ειδικής αντίστασης κάτω από τα ηλεκτρόδια σε κάθε ζεύγος διπόλων. Καθώς ο παράγοντας «n» αυξάνεται, οι υψηλές τιμές ευαισθησίας συγκεντρώνονται όλο και περισσότερο κάτω από τα C1-C2 και P1-P2 δίπολα, ενώ οι τιμές ευαισθησίας κάτω από το κέντρο της διάταξης μεταξύ του C1-P1 ζεύγους

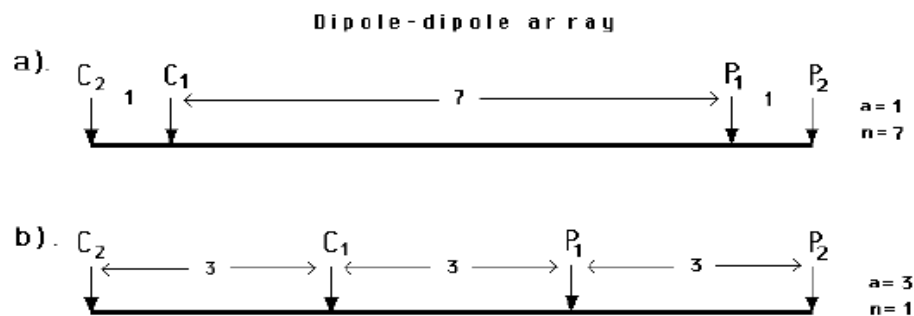
ηλεκτροδίων μειώνεται. Για τις τιμές «n» μεγαλύτερες από 2, οι τιμές ευαισθησίας για την χάραξη ψευδοτομών γίνονται αμελητέες.



Σχήμα 2.12 : Δισδιάστατα τμήματα ευαισθησίας της διάταξης διπόλου-διπόλου με (α) $n=1$, (β) $n=2$, (γ) $n=4$ και (δ) $n=6$. (Loke, 2004)

Κατά συνέπεια η διάταξη διπόλου-διπόλου είναι πολύ ευαίσθητη στις οριζόντιες αλλαγές της ειδικής αντίστασης, αλλά σχετικά ανεπηρέαστη στις κατακόρυφες αλλαγές της ειδικής αντίστασης. Αυτό σημαίνει ότι είναι καλή στη χαρτογράφηση όπου οι δομές είναι κατακόρυφες, όπως τα αναχώματα και οι κοιλότητες, αλλά σχετικά φτωχή στη χαρτογράφηση των οριζόντιων δομών όπως οι στρωματοειδείς φλέβες ή τα ιζηματογενή στρώματα. Το μεσαίο βάθος της έρευνας για αυτήν την διάταξη εξαρτάται και από το διάστημα «a» και από τον παράγοντα «n».

Ένα πιθανό μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι η πολύ μικρή δύναμη σημάτων για μεγάλες τιμές του παράγοντα «n». Η διαφορά δυναμικού είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον κύβο του παράγοντα «n». Για το ίδιο ρεύμα, η διαφορά δυναμικού μειώνεται περίπου 56 φορές όταν το «n» αυξάνεται από 1 σε 6. Μια μέθοδος για να υπερνικηθεί αυτό το πρόβλημα είναι η αύξηση του διαστήματος «a» μεταξύ του ζεύγους διπόλων C1-C2 (και P1-P2) για να μειωθεί η πτώση στο δυναμικό, όταν το μήκος της διάταξης αυξάνεται για να αυξηθεί το βάθος έρευνας. Το σχήμα 2.13 παρουσιάζει δύο διαφορετικές ρυθμίσεις για τη διάταξη διπόλου-διπόλου με το ίδιο μήκος διάταξης αλλά με διαφορετικούς παράγοντες «a» και «n» (Loke, 2004).



Σχήμα 2.13 : Δύο πιθανές διαφορετικές ρυθμίσεις για μια μέτρηση με την διάταξη διπόλου-διπόλου (Loke, 2004).

Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η διάταξη αποτελεσματικά, ο μετρητής ειδικής αντίστασης πρέπει να έχει συγκριτικά υψηλή ευαισθησία και πολύ καλά στοιχεία κυκλώματος απόρριψης θορύβου, και πρέπει να υπάρξει καλή επαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων και του εδάφους. Αυτή η διάταξη έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πολλές περιοχές για να ανιχνεύσει τις δομές, όπως οι κοιλότητες

όπου η καλή οριζόντια ανάλυση αυτής της διάταξης είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα.

2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η ηλεκτρική τομογραφία (sounding & profiling), η βυθοσκόπηση (sounding) και η όδευση (profiling) είναι οι συνηθέστερες μέθοδοι των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. 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.

Οι δισδιάστατες γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις έχουν εξελιχθεί για τις απαιτήσεις ερευνών μεγάλης κλίμακας: μια σειρά από ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους και μέσω ενός πολυκάναλου καλωδίου και ενός συστήματος πολυπλεξίας λαμβάνονται αυτόματα μετρήσεις οδεύσεως πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος με συνεχώς αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων.

Ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (ΗΤ) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο "παραδοσιακών" τεχνικών μέτρησης: της όδευσης και της βυθοσκόπησης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη "εικόνα" του υπεδάφους.

Η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών επέτρεψε την ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένων μαθηματικών αλγορίθμων ερμηνείας που μπορούν να παράγουν "ακριβείς" εικόνες των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους δοθέντων των μετρήσεων. Αυτοί οι αλγόριθμοι ονομάζονται

“αλγόριθμοι αντιστροφής” με τους οποίους γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων (Loke, 2000, 2002). Ο αλγόριθμος αυτός είναι δυσδιάστατης 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. 1987).

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της HT είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων (άρα και χρήσιμης πληροφορίας). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις δεν μπορούν να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων αλλά μόνο με συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών. Τέτοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί από το 1990 και μετά, γεγονός ενδεικτικό της ανάπτυξης της HT αλλά και του αναπόφευκτου κόστους εφαρμογής της μεθοδολογίας.

Με στόχο την αξιόπιστη ερμηνεία και επεξεργασία των ηλεκτρικών μετρήσεων, νέες τεχνικές έχουν προταθεί. Οι τεχνικές αυτές επιδιώκουν την επίλυση του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Zhody-Barker, μέθοδος οπισθοπροβολής, είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της HT (Tsourlos, 1995).

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης.

2.3.1 ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

Στη γεωφυσική αντιστροφή, επιδιώκεται η εύρεση ενός προτύπου τα οποίο να ανταποκρίνεται στις πραγματικές μετρημένες τιμές. Το πρότυπο είναι μια εξιδανικευμένη μαθηματική αντιπροσώπευση τμήματος της γης. Το πρότυπο έχει ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες είναι οι φυσικές ποσότητες που χρειάζεται να υπολογιστούν από τα παρατηρηθέντα στοιχεία. Το σύνολο από τα παρατηρηθέντα δεδομένα μπορεί να γραφτεί ως ένα διάνυσμα y που δίνεται από τον Loke (2004):

$$y = \text{col}(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m) \quad (2.16)$$

όπου το m είναι ο αριθμός μετρήσεων (Loke 2004). Η πρότυπη ανταπόκριση f μπορεί να γραφτεί με παρόμοια μορφή (Loke 2004):

$$f = \text{col}(f_1, f_2, f_3, \dots, f_m) \quad (2.17)$$

Για τα προβλήματα ειδικής αντίστασης, είναι κοινή πρακτική να χρησιμοποιηθεί ο λογάριθμος των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για τα παρατηρηθέντα δεδομένα και την πρότυπη ανταπόκριση, καθώς και ο λογάριθμος των προτύπων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τις πρότυπες παραμέτρους. Οι παράμετροι μπορούν να αντιπροσωπευθούν από το ακόλουθο διάνυσμα :

$$q = \text{col}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) \quad (2.18)$$

όπου το n είναι ο αριθμός των παραμέτρων (Loke 2004). Η διαφορά μεταξύ των παρατηρηθέντων στοιχείων και της πρότυπης ανταπόκρισης δίνεται από την σχέση (Loke 2004):

$$g = y - f \quad (2.19)$$

Στη μέθοδο βελτιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων, το αρχικό πρότυπο τροποποιείται έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς μεταξύ

της πρότυπης ανταπόκρισης και των δεδομένων να ελαχιστοποιείται (Loke 2004):

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (2.20)$$

Για να μειωθεί το E, η ακόλουθη εξίσωση Gauss-Newton χρησιμοποιείται στον καθορισμό των πρότυπων παραμέτρων οι οποίες πρέπει να μειώσουν το ώστε το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος (Lines και Treitel 1984):

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (2.21)$$

όπου Δq είναι το i-οστό πρότυπο διάνυσμα αλλαγής παραμέτρου, και το J είναι ο πίνακας Jacobian (από m ως n) από τις μερικές παραγώγους. Τα στοιχεία του πίνακα Jacobian δίνονται από (Loke 2004):

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (2.22)$$

αυτή είναι η αλλαγή στην i-οστή πρότυπη ανταπόκριση λόγω μιας αλλαγής στην πρότυπη παράμετρο j. Αφού υπολογιστεί το διάνυσμα αλλαγής παραμέτρου, ένα νέο πρότυπο λαμβάνεται από τη σχέση (Loke 2004):

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (2.23)$$

Στην πράξη, η απλή εξίσωση ελαχίστων τετραγώνων (2.21) σπάνια χρησιμοποιείται μόνη της στη γεωφυσική αντιστροφή. Σε μερικές καταστάσεις ο μητρικός παράγοντας $J^T J$ μπορεί να είναι μοναδιαίος, και έτσι η εξίσωση των ελαχίστων τετραγώνων δεν έχει μια λύση για το Δq . Ένα άλλο κοινό πρόβλημα είναι ότι ο μητρικός παράγοντας $J^T J$ να είναι σχεδόν μοναδιαίος. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί εάν χρησιμοποιείται ένα φτωχό αρχικό πρότυπο που είναι πολύ διαφορετικό από το βέλτιστο πρότυπο. Το υπολογισμένο διάνυσμα από την εξίσωση (2.21) μπορεί να έχει πάρα πολύ μεγάλες παραμέτρους έτσι ώστε το νέο πρότυπο που υπολογίζεται από την (2.23) να

έχει μη ρεαλιστικές τιμές. Μια κοινή μέθοδος για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό είναι η τροποποίηση Marquardt-Levenberg (Lines και Treitel 1984) στην εξίσωση Gauss-Newton που δίνεται από:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_i = J^T g \quad (2.24)$$

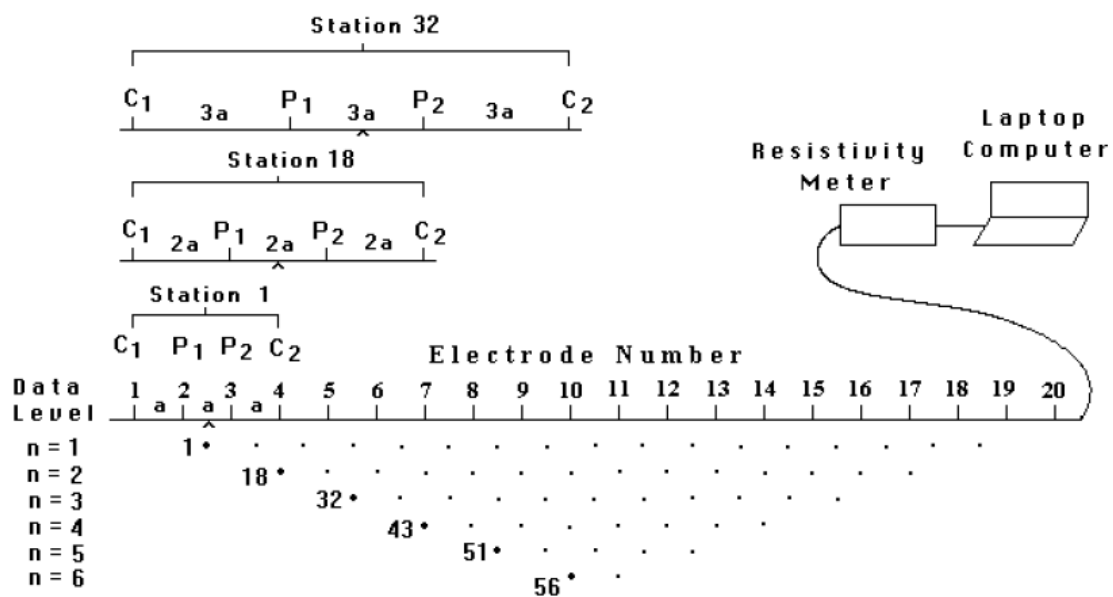
όπου το I είναι ο μοναδιαίος πίνακας. Ο παράγοντας λ είναι γνωστός ως παράγοντας Marquardt ή απόσβεσης, και αυτή η μέθοδος είναι επίσης γνωστή ως μέθοδος οπισθοπροβολής (Inman 1975). Ο παράγοντας απόσβεσης αποτελεσματικά περιορίζει τις τιμές στις οποίες παράμετροι του διανύσματος μπορούν να πάρουν Δq . Ενώ η μέθοδος Gauss-Newton στην εξίσωση (2.21) προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το άθροισμα των τετραγώνων διανύσματος απόκλισης μόνο, η μετατροπή Marquardt-Levenberg επίσης ελαχιστοποιεί το συνδυασμό του διανύσματος απόκλισης και της αλλαγής των παραμέτρων του διανύσματος.

2.3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Οι δισδιάστατες ηλεκτρικές έρευνες απεικόνισης/τομογραφίας συνήθως πραγματοποιούνται με τη χρησιμοποίηση ένας μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων, 25 ή περισσότερων, που συνδέονται με ένα πολλαπλό καλώδιο (Griffiths και Barker, 1993). Ένας μικροϋπολογιστής μαζί με μια μονάδα ηλεκτρονικής μετατροπής χρησιμοποιείται για την αυτόματη επιλογή των τεσσάρων ηλεκτροδίων για κάθε μέτρηση (σχήμα 2.14).

Το σχήμα 2.14 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική οργάνωση σε δισδιάστατη έρευνα με διάφορα ηλεκτρόδια κατά μήκος ευθείας γραμμής συνδεδεμένα με πολυκάναλο καλώδιο. Κανονικά χρησιμοποιείται σταθερό διάστημα μεταξύ παρακείμενων ηλεκτροδίων. Το καλώδιο είναι συνδεδεμένο με μονάδα ηλεκτρονικής μετατροπής η οποία είναι συνδεδεμένη με μικροϋπολογιστή. Η ακολουθία μετρήσεων, ο τύπος διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί και άλλες παράμετροι της έρευνας (όπως τα ηλεκτρόδια ρεύματος) εισάγονται κανονικά σε αρχείο. Μετά από την προσπέλαση του αρχείου ελέγχου, το πρόγραμμα

αυτόματα επιλέγει τα ηλεκτρόδια για κάθε μέτρηση. Μερικά συστήματα έχουν ενσωματωμένο σύστημα μικροεπεξεργαστών έτσι ώστε δεν απαιτείται lap-top. Σε τυπική έρευνα, το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας υπαίθρου είναι στην ετοιμασία του καλωδίου και των ηλεκτροδίων. Μετά από αυτό, οι μετρήσεις λαμβάνονται αυτόματα και αποθηκεύονται στον υπολογιστή. Το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου ερευνών ξοδεύεται περιμένοντας το μετρητή ειδικής αντίστασης να ολοκληρώσει το σύνολο μετρήσεων.



Sequence of measurements to build up a pseudosection

Σχήμα 2.14 : Η ρύθμιση των ηλεκτροδίων για μια δισδιάστατη ηλεκτρική έρευνα και η ακολουθία μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν μια ψευδοτομή (Loke, 2004).

Για να ληφθεί καλή δισδιάστατη εικόνα του υπεδάφους, η κάλυψη των μετρήσεων πρέπει να είναι δισδιάστατη επίσης. Για παράδειγμα, το σχήμα 2.14 παρουσιάζει πιθανή ακολουθία μετρήσεων για τη διάταξη ηλεκτροδίων Wenner για σύστημα με 20 ηλεκτρόδια.

Για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, Wenner-Schlumberger και πόλου-διπόλου, η διαδικασία ερευνών είναι ελαφρώς διαφορετική. Για παράδειγμα, για τη διάταξη διπόλου-διπόλου, η οποία χρησιμοποιείται και σε αυτή την εργασία, η μέτρηση αρχίζει συνήθως με ένα διάστημα «1a» μεταξύ των C1-C2 (και επίσης του P1-P2) ηλεκτροδίων. Η πρώτη ακολουθία μετρήσεων γίνεται

με τιμή 1 για τον παράγοντα «n», ακολουθούμενη από το «n» να είναι ίσο με 2 κρατώντας το διάστημα ζεύγους διπόλων C1-C2 σταθερό ίσο με «1a». Όταν το «n» είναι ίσο με 2, η απόσταση του C1 ηλεκτροδίου από το P1 ηλεκτρόδιο είναι δύο φορές το μήκος διπόλων C1-C2. Για τις επόμενες μετρήσεις, ο παράγοντας διαστήματος «n» αυξάνεται συνήθως μέχρι τη μέγιστη τιμή που είναι περίπου 6, μετά από την οποία οι ακριβείς μετρήσεις του δυναμικού είναι δύσκολες λόγω των πολύ χαμηλών τιμών του. Για να αυξηθεί το βάθος της έρευνας, το διάστημα μεταξύ του ζεύγους διπόλων C1-C2 αυξάνεται σε «2a», και γίνεται μια άλλη σειρά μετρήσεων με διαφορετικές τιμές του «n». Εάν είναι απαραίτητο, αυτό μπορεί να επαναληφθεί με μεγαλύτερες τιμές του διαστήματος του ζεύγους διπόλων C1-C2 (και P1-P2). Μια παρόμοια τεχνική ερευνών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις διατάξεις Wenner-Schlumberger και πόλου-διπόλου όπου διαφορετικοί συνδυασμοί του διαστήματος «a» και του παράγοντα «n» μπορούν να χρησιμοποιηθούν (Loke, 2004).

2.4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ RES2DINV

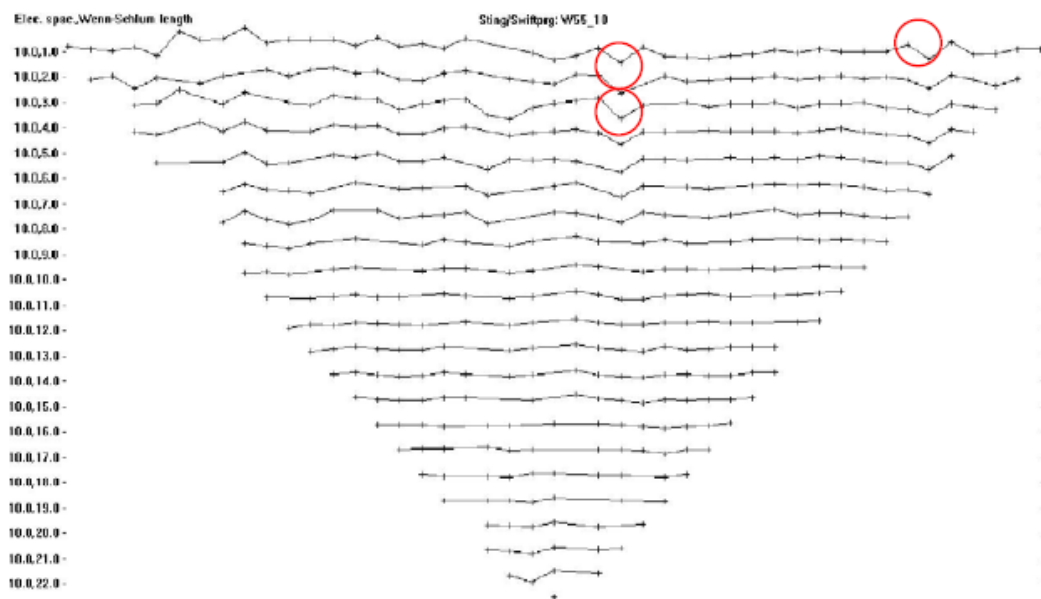
2.4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το RES2DINV είναι πρόγραμμα το οποίο καθορίζει αυτόματα ένα δισδιάστατο (2-D) μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Griffiths and Barker 1993). Αυτό το πρόγραμμα αντιστρέφει δεδομένα (από 100 έως 5000) τα οποία συλλέχθηκαν με τη χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων (από 25 έως 650 ηλεκτρόδια περίπου). Μια σημαντική σημείωση για την διάταξη διπόλου-διπόλου είναι ότι στα περισσότερα εγχειρίδια, τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε σειρά C1-C2-P1-P2 που θα δώσει στην πραγματικότητα μια αρνητική φαινόμενη ειδική αντίσταση. Επομένως για να ληφθεί θετική τιμή της ειδικής αντίστασης ρυθμίζεται η διάταξη έτσι ώστε η σειρά να είναι C2-C1-P1-P2 (Loke, 2004).

Ο σκοπός αυτού του προγράμματος είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε ορθογώνια παραλληλόγραμμο του δισδιάστατου μοντέλου.

Σύμφωνα, λοιπόν, με το πρόγραμμα εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο dat. Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται

στην οθόνη τρεις τομές. Η πρώτη τομή είναι η ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η δεύτερη τομή είναι η ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή. Για τη μείωση του σφάλματος μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων τιμών των φαινόμενων αντιστάσεων ρα, αφαιρούνται τιμές με μεγάλη διακύμανση. Επίσης, ρυθμίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής.



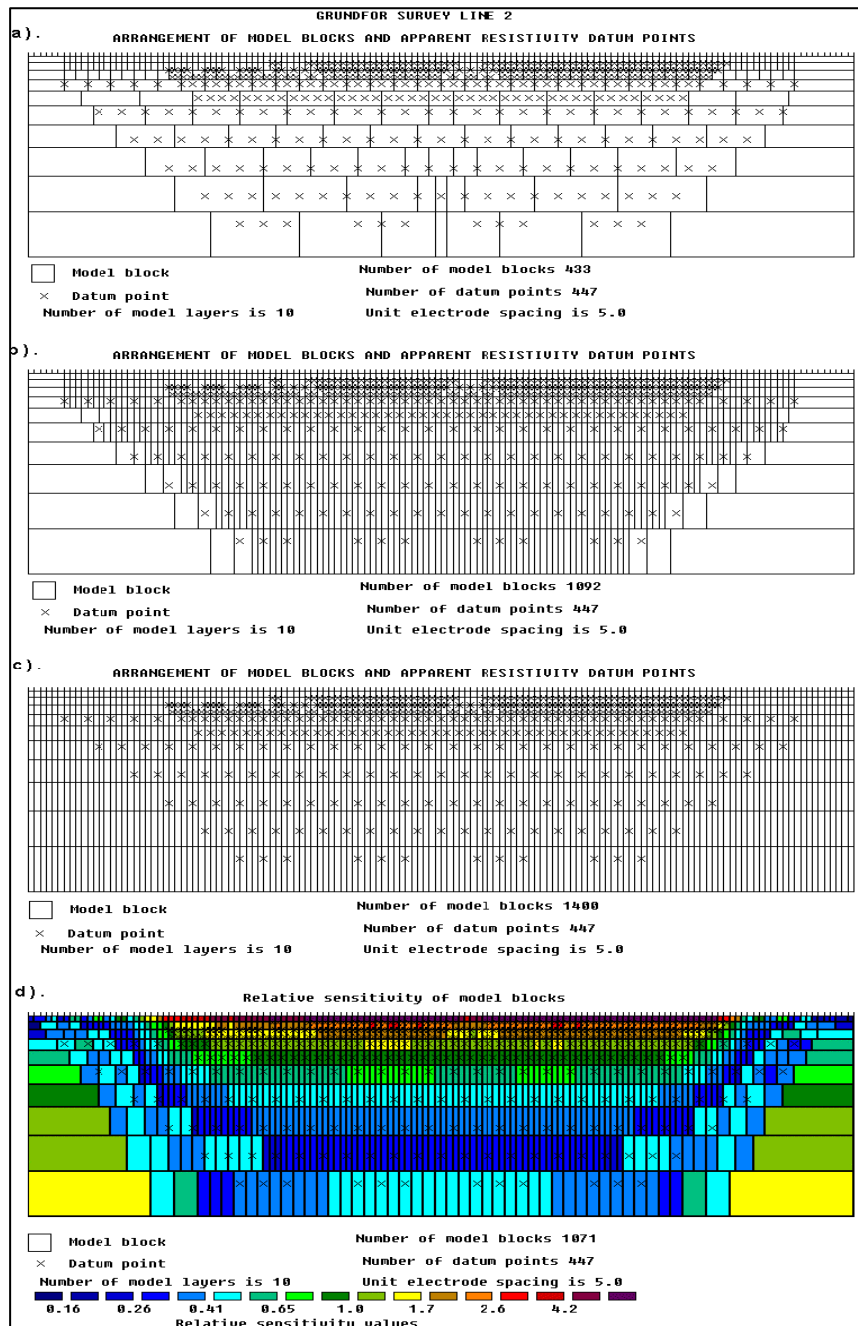
Σχήμα 2.15 : Δεδομένα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με μορφή σχεδιαγράμματος (με κόκκινο κύκλο σημειώνονται τα σημεία τα οποία επιλέγονται να αφαιρεθούν)

Για την αντιστροφή των δεδομένων χρησιμοποιείται η τεχνική ελαχίστων τετραγώνων (deGroot-Hedlin and Constable, 1990, Loke and Barker, 1996) και τα οποία μπορούν να συλλεχθούν με οποιαδήποτε από τις παρακάτω διατάξεις: Wenner, πόλου-πόλου, διπόλου-διπόλου, πόλου-δίπολου, Schlumberger, Wenner - Schlumberger και τις ορθογώνιες διατάξεις. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί ψευδοτομές με έως και 650 ηλεκτρόδια και 6500 σημεία δεδομένων.

Το πρόγραμμα RES2DINV έχει ως σκοπό να λειτουργήσει, όσο το δυνατόν περισσότερο, με αυτόματο τρόπο. Έχει ένα σύνολο παραμέτρων προεπιλογής που καθοδηγεί τη διαδικασία αντιστροφής. Αυτό το τμήμα περιγράφει μερικές από τις παραμέτρους που ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει για να καθορίσει με ακρίβεια την διαδικασία αντιστροφής.

Ένας άλλος παράγοντας που ο χρήστης μπορεί να ελέγξει είναι το μέγεθος και η κατανομή των ορθογώνιων πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται από το πρότυπο αντιστροφής (σχήμα 2.16). Εξ ορισμού, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο, βασισμένος εν μέρει στη θέση των δεδομένων, να παράγει το μέγεθος και τη θέση των πλεγμάτων. Τίθεται ως στόχος το βάθος του βαθύτερου στρώματος στο πρότυπο να είναι σχεδόν ίδιο με το μεγαλύτερο βάθος της έρευνας για τα δεδομένα, καθώς επίσης και το γεγονός ότι ο αριθμός των πλεγμάτων να μην υπερβεί τον αριθμό των δεδομένων με μεγάλο σφάλμα. Γενικά, αυτό παράγει ένα πρότυπο όπου το πάχος του στρώματος αυξάνεται με το βάθος, και με τα μεγαλύτερα πλέγματα στις πλευρές και στα βαθύτερα στρώματα. Δυστυχώς πολλές φορές το πρότυπο δεν ακολουθεί απόλυτα την ψευδοτομή. Για να παραχθεί ένα πρότυπο με ομοιόμορφα πλάτη πλεγμάτων, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα πρότυπο όπου ο αριθμός των πλεγμάτων μπορεί να υπερβεί τον αριθμό δεδομένων. Μια άλλη πιθανή διαμόρφωση είναι τα πλέγματα να έχουν ομοιόμορφο πάχος μέχρι τις άκρες της γραμμής ερευνών. Αυτό είναι πιθανώς μια ακραία περίπτωση. Καθώς ο αριθμός των πλεγμάτων αυξάνεται, ο χρόνος αντιστροφής που απαιτείται αυξάνεται επίσης.

Το πάχος των στρωμάτων μπορεί επίσης να τροποποιηθεί από το χρήστη. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε το μέγιστο βάθος του προτύπου να υπερβαίνει το βάθος της έρευνας. Αυτό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου μια σημαντική δομή βρίσκεται ακριβώς κάτω από το μέγιστο βάθος έρευνας.



Σχήμα 2.16: Υποδιαίρεση του υπεδάφους σε ορθογώνια πλέγματα σε δισδιάστατη έρευνα απεικόνισης η οποία χρησιμοποιεί διαφορετικούς αλγορίθμους. Τα πρότυπα ελήφθησαν με (α) τον αλγόριθμο προεπιλογής, (β) επιτρέποντας στον αριθμό των πλεγμάτων να υπερβούν τα δεδομένα με μεγάλο σφάλμα, (γ) ένα πρότυπο που επεκτείνεται στις άκρες της γραμμής ερευνών και (δ) χρησιμοποιώντας τις τιμές ευαισθησίας για ένα ομοιογενές γήινο πρότυπο (Loke, 1999)

2.4.2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ

Μετά από την εγκατάσταση του προγράμματος RES2DINV.EXE, ο χρήστης πρέπει να τρέξει το πρόγραμμα JACOBWIN.EXE για να δημιουργήσει διάφορα αρχεία υποστήριξης.

Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με το πρόγραμμα εγκατάστασης SETUP.EXE, και το JACOBWIN. EXE. Το κύριο πρόγραμμα RES2DINV. EXE και τα αρχεία υποστήριξης (GRADWEN, GRADTWO και GRADDIP) πρέπει να είναι στον ίδιο υποκατάλογο στο σκληρό δίσκο.

Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας, ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:



1. Αρχικά ανοίγεται το πρόγραμμα « Res2dinv.exe ».
2. Εισάγονται τα δεδομένα μορφής *.dat, με την εντολή read data file. Επειδή τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας δεν ήταν στην μορφή αυτή, έγιναν ορισμένες μετατροπές με τη βοήθεια του Microsoft Office Excel έτσι ώστε να μπορέσουν να υποστούν επεξεργασία. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίστηκε ένα αρχείο με τις μετρήσεις στην σωστή μορφή (File > Read data file > *.dat)
3. 1η αντιστροφή: Επιλέγεται από το μενού Inversion η εντολή Least-squares inversion (Inversion > Least-squares inversion) και γίνεται η αντιστροφή. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής αποθηκεύονται σε INV αρχεία. Εδώ πρέπει να καθοριστούν 2 παραμέτροι του προγράμματος:
 - α) Αριθμός επαναλήψεων: Επιτρέπει στο χρήστη να θέσει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων της ρουτίνας της αντιστροφής. Εξ' ορισμού ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων όπως αυτός έχει οριστεί από το πρόγραμμα είναι το 5. Αυτό συνήθως κρίνεται ικανοποιητικό. Όταν οι επαναλήψεις φτάσουν το μέγιστο όριο, ο χρήστης θα ερωτηθεί αν επιθυμεί να συνεχίσει τη διαδικασία της αντιστροφής. Συνήθως δε χρειάζεται να γίνουν παραπάνω από δέκα επαναλήψεις.
 - β) Όριο σύγκλισης: Θέτει το όριο για τη σχετική αλλαγή (μείωση) στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων. Εξ'

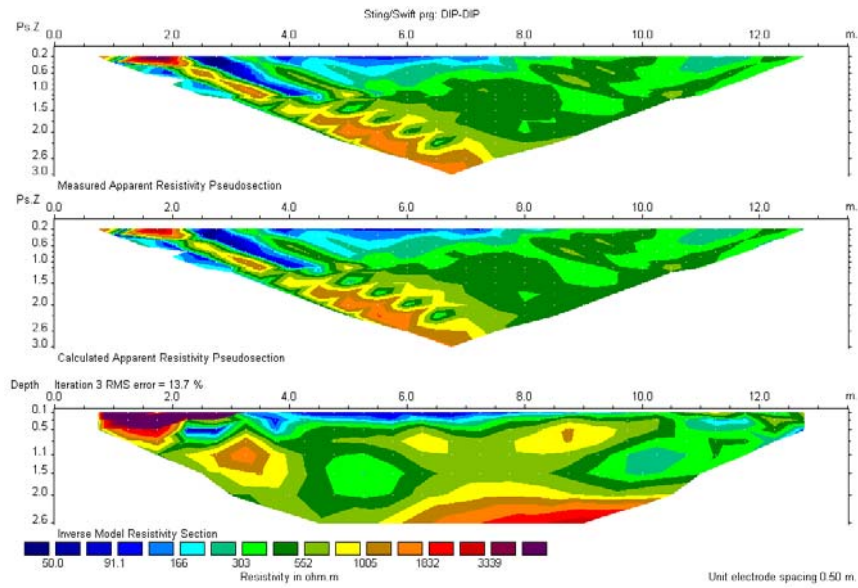
ορισμού χρησιμοποιείται η τιμή 5%. Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μείωση σαν κριτήριο σύγκλισης στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων αντί της τιμής RMS.

4. Πιθανόν να εμφανιστεί μήνυμα πως η μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMS στις 2 τελευταίες επαναλήψεις ήταν μικρότερη του 5%. Ο χρήστης ρωτάται αν θα συνεχίσει την αντιστροφή και αν ναι, τότε αυτός πρέπει να θέσει νέο όριο.
5. Προκύπτει η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους που παρουσιάζει την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
6. Από το μενού Edit > Exterminate bad datum points. Σε αυτήν την επιλογή, ο χρήστης μπορεί να αφαιρέσει από τα δεδομένα τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με μεγάλο σφάλμα στη μέτρηση. Ο κύριος σκοπός αυτής της επιλογής είναι να αφαιρεθούν δεδομένα με μη αποδεκτές τιμές ειδικής αντίστασης. Μεγάλο σφάλμα οφείλεται στην αποτυχημένη λειτουργία των έξυπνων ηλεκτροδίων, στη φτωχή επαφή ηλεκτροδίων με το έδαφος ή στα καλώδια λόγω των συνθηκών υψηλής υγρασίας του υπεδάφους. Για αυτά τα δεδομένα συνήθως η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει πάρα πολύ μεγάλες ή πάρα πολύ μικρές τιμές έναντι των γειτονικών δεδομένων. Για να αφαιρεθεί μια μη αποδεκτή τιμή, αρκεί αριστερό κλικ με το ποντίκι στο αντίστοιχο σημείο. Το χρώμα του σημείου αλλάζει από μαύρο σε κόκκινο. Η επιλογή του πλήκτρου q διακόπτει την παραπάνω διαδικασία. Τα νέα «φιλτραρισμένα» δεδομένα αποθηκεύονται σε νέο αρχείο.
7. 2η αντιστροφή: Αφού αποθηκευτεί το παραπάνω διορθωμένο αρχείο με επέκταση ονόματος dat, ξεκινάει η 2η αντιστροφή κατά τον ίδιο τρόπο με το βήμα 3.
8. Τα τελικά αποτελέσματα που είναι της μορφής του Σχήματος 2.18 αποθηκεύονται ως BMP files.
9. Για την καλύτερη σύγκριση μεταξύ γραμμών ηλεκτρικής τομογραφίας, προτιμάται η χρήση ίδιας χρωματικής κλίμακας για όλες τις γραμμές μελέτης. Η χρωματική κλίμακα για γεωηλεκτρική τομή ορίζεται χρησιμοποιώντας αρχικά την εντολή «Show inversion results – display» με την οποία εμφανίζεται το παράθυρο της απεικόνισης

(display window). Μετά χρησιμοποιώντας την εντολή «read file with inversion results – file» καταχωρούνται τα αποτελέσματα της αντιστροφής της επιθυμητής γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας, δηλ. τα INV αρχεία που αποθηκεύτηκαν στο βήμα 3. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται η εντολή «Display data and model sections – Display sections» και επιλέγεται ο επιθυμητός αριθμός επαναλήψεων. Κατόπιν, επιλέγεται η εντολή «User defined logarithmic contour intervals» και αμέσως μετά «Enter minimum contour value» όπου επιλέγεται ένας αριθμός που αντιστοιχεί στις μικρότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που περιέχονται στο τελικό μοντέλο. Με την εντολή « User Defined Increase Contour Factor» εισάγεται το βήμα αλλαγής χρωμάτων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την εύρεση μιας ικανοποιητικής κλίμακας. Το τελικό μοντέλο στο ποίο καταλήγουμε αποθηκεύεται χρησιμοποιώντας την εντολή «save screen as BMP file – Print»

Για την επιλογή της κατάλληλης χρωματικής κλίμακας η οποία εκφράζει το λογάριθμο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έγιναν τέσσερις προσπάθειες. Στην πρώτη η κατώτερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίστηκε στα 5 ohm.m και το βήμα ίσο με 1,5. Στην δεύτερη η κατώτερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίστηκε στα 10 ohm.m και το βήμα είναι 1,6 και στην τελευταία η κατώτερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίστηκε στα 50 ohm.m και το βήμα ίσο με 1,35

Τελικά επιλέχθηκαν οι εικόνες της τρίτης κλίμακας γιατί ήταν πιο αντιπροσωπευτικό το εύρος τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης, αφού η κλίμακα αυτή παρείχε περισσότερες λεπτομέρειες για τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους στις τιμές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.



Σχήμα 2.17: Παράδειγμα αντιστροφής δεδομένων γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας. Η 1η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αρχικά μία παρουσίαση της περιοχής όπου έλαβαν χώρα οι μετρήσεις, θα αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν, θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων.

3.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το Πολυτεχνείο Κρήτης βρίσκεται στο Ακρωτήριο Χανίων, στο νομό Χανίων, 7 χλμ. Βορειοανατολικά της πόλης. Η Πολυτεχνειούπολη καταλαμβάνει έκταση 2900 στρεμμάτων. Η περιοχή μελέτης μας βρίσκεται μεταξύ των τμημάτων Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και Μηχανικών Περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.1 : Αποψη του Πολυτεχνείου Κρήτης από ψηλά.
(<http://www.tuc.gr/xartis/megala/TUCCampsmall.jpg>)

Η παρούσα διπλωματική εργασία στηρίχτηκε πάνω στη μελέτη μιας έκτασης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή οι μετρήσεις που θα παρθούν θα δώσουν χαρακτηριστικά για τα επιφανειακά στρώματα της περιοχής. Στη συνέχεια, από τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών θα

δοθούν τα ανάλογα συμπεράσματα για την καταλληλότητα ή όχι της περιοχής αυτής για την ανέγερση των κτιρίων του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.2 : α) Το ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης όπου στο βάθος βγαίνει στο δρόμο της Πολυτεχνειούπολης, β) Το τμήμα της περιοχής μετά την εκσκαφή.



γ)



δ)



Σχήμα 3.3 : α) Το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης όπου στο βάθος διακρίνεται ένα μέρος του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, β), γ), δ) Το τμήμα της περιοχής μετά την εκσκαφή.



Σχήμα 3.4 : α) Το δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης με το νέο κτίριο του Γενικού τμήματος να φαίνεται στο βάθος, β), γ) Το τμήμα της περιοχής μετά την εκσκαφή.

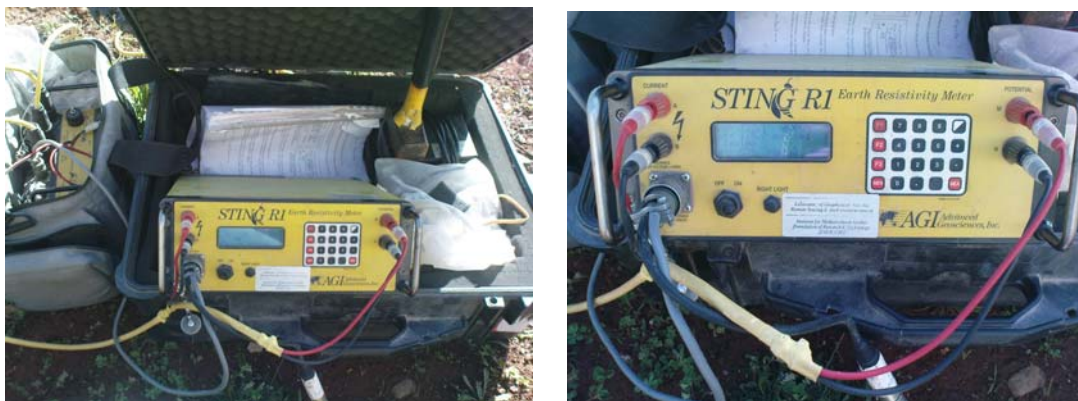
3.2.1. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Στην ευρύτερη περιοχή της Πολυτεχνειούπολης συναντάται μαργαϊκός ασβεστόλιθος, κατά θέσεις συμπαγής λευκοκίτρινος έως λευκότεφρος που περικλείει θαλάσσια απολιθώματα: Έλασματοβράχια, εχινόδερμα, γαστερόποδα, βρυόζωα, θραύσματα αχινών, οστρακόδερμων και

ακανονίστως κατανεμημένα σωληνόμορφα ασβεστολιθικά όστρακα που προσομοιάζουν με σκώλικες, στο σύνολο του βιοερματικής προέλευσης, με βιοκλαστικό υλικό από σκωλικοειδείς υφάλους (vermetid reefs) του Μειοκαίνου. Ο μαργαϊκός αυτός ασβεστόλιθος και αρχικά αλλά και επιπρόσθετα λόγω καρστικοποίησης εμφανίζει κατά θέσεις διαφορετικές πορώδεις. Η καρστική δραστηριότητα έχει δράσει και σε οριζόντια και σε κατακόρυφη διεύθυνση. Σε διάφορα βάθη παρατηρούνται επιφάνειες (πιθανώς πρωτογενείς επιφάνειες ρηγμάτωσης) όπου λόγω βαρύτητας έχει κινηθεί το μετεωρικό νερό. Οι επιφάνειες αυτές ξεχωρίζουν στους πυρήνες των γεωτρήσεων από τον έντονο χρωματισμό τους. Στην οριζόντια διεύθυνση η καρστικοποίηση επιλεκτικά χρησιμοποίησε «δρόμους» σε περιοχές με μεγάλο ενεργό πορώδες, που κατά θέσεις δημιουργείται από την συσσώρευση απολιθωμάτων, τείνοντας εκεί να χαρακτηριστεί παρόμοιο του «κογχυλιάτη λίθου». Η συνεχής όμως δράση της, οδήγησε δευτερογενώς στην μερική πλήρωση των διακένων που και η ίδια δημιούργησε με terra rossa και στην οριζόντια διεύθυνση.

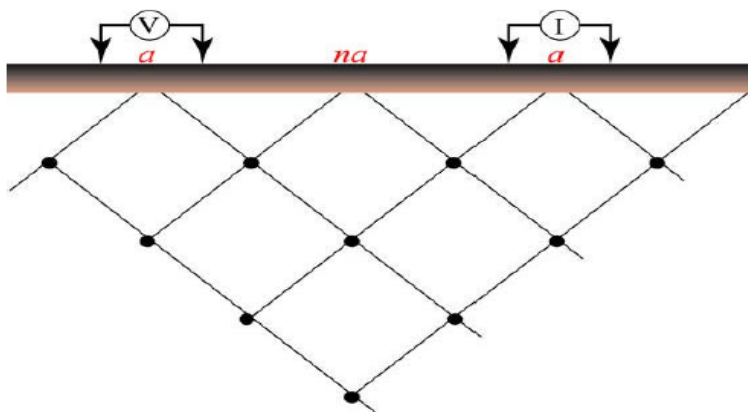
3.3. ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν με το μετρητή αντίστασης STING R1 ο οποίος μετράει κατά μήκος παραλλήλων γραμμών για τη διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου. Είναι ένας φορητός μετρητής με μεγάλη μνήμη αποθήκευσης των μετρήσεων και καθορισμένους κύκλους μέτρησης. Είναι το πιο ακριβές και το λιγότερο ευαίσθητο στο θόρυβο όργανο στη βιομηχανία. Χρησιμοποιείται ακόμα και σε ανώμαλο έδαφος, ενώ ο οδηγός χρήσης είναι πολύ εύκολος. Ελέγχει άμεσα το σύστημα πολύπλεκτων ηλεκτροδίων και δεν χρειάζεται υπολογιστής στην έρευνα υπαίθρου. Τέλος, χρησιμοποιείται για όλες τις διατάξεις ηλεκτροδίων και μετράει την φαινόμενη ειδική αντίσταση, την αντίσταση και τη τάση του ρεύματος.

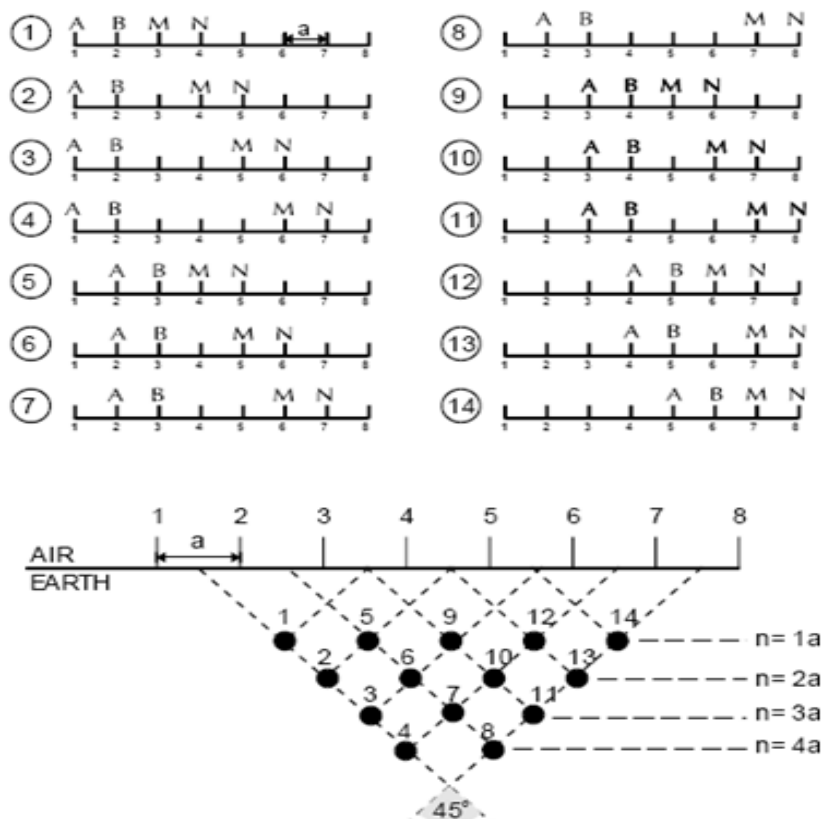


Σχήμα 3.5 : Μετρητής αντίστασης STING R1

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των δεδομένων είναι η διάταξη διπόλου- διπόλου (Dipole- Dipole). Αρχικά οριοθετήθηκαν οι γραμμές μελέτης και τοποθετήθηκαν κατά μήκος της γραμμής τα ηλεκτρόδια σε ισαπόσταση 54 m. Η απόσταση μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων ρεύματος (C1, C2) είναι σταθερή και ίδια με την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού (P1, P2). Αυτή η διάταξη όπως είδαμε πιο αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο, έχει έναν άλλο παράγοντα « n », ο οποίος είναι ο λόγος της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων C1 και P1 προς το C1-C2 (ή P1-P2) δίπολο, μήκους « a ». Το διάστημα « a » διατηρείται σταθερό στην μικρότερη μονάδα της απόστασης των ηλεκτροδίων, ενώ ο παράγοντας « n » αυξάνει από το 1 έως και το 6, προκειμένου να αυξηθεί το βάθος της έρευνας. Το κύκλωμα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα μέχρι 500 mA περίπου και εν συνεχεία λαμβάνονται οι μετρήσεις. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων.

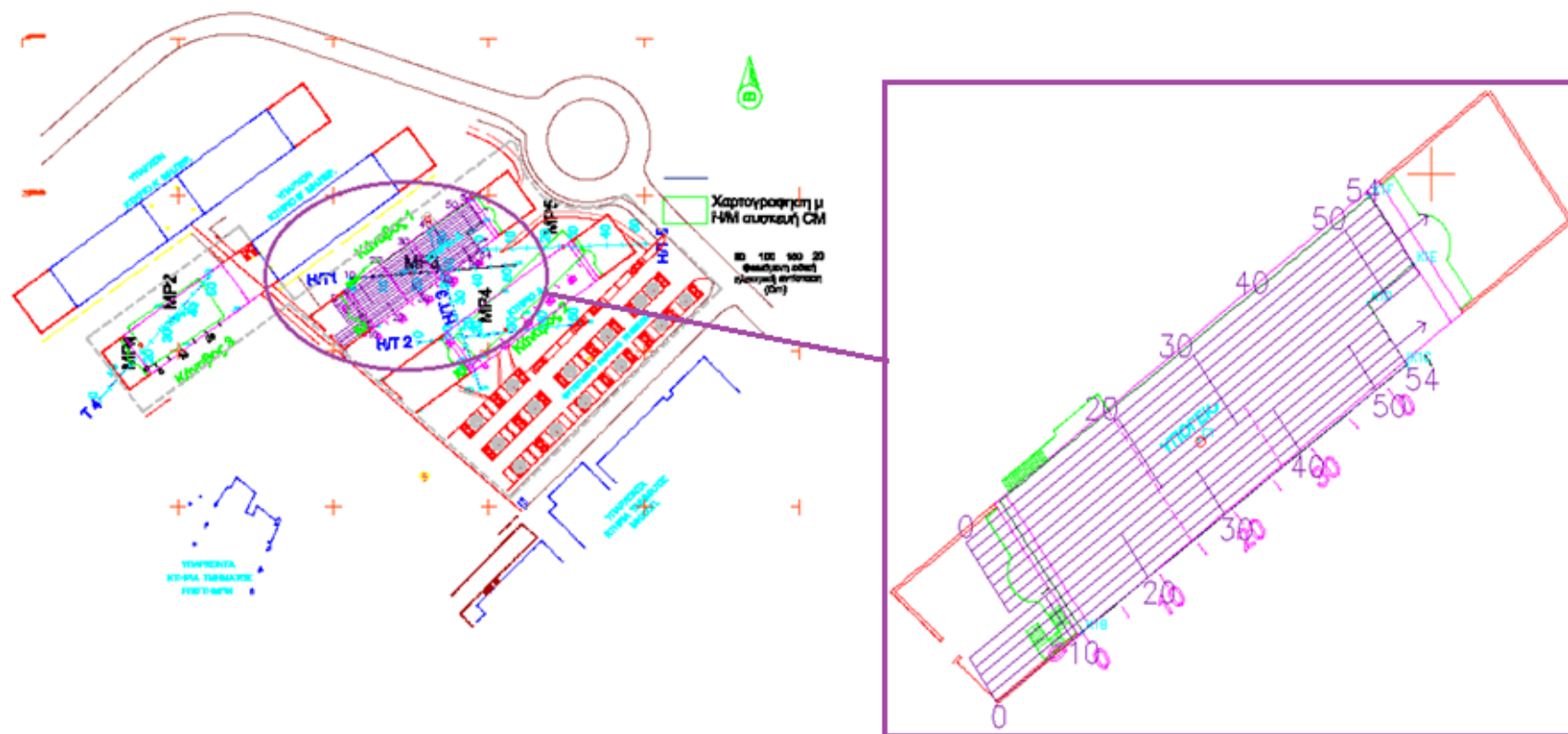


Σχήμα 3.6 : Διάταξη διπόλου – διπόλου



Σχήμα 3.7 : Κάνναβοι της διάταξης διπόλου - διπόλου

Στο σχήμα 3.7 σημειώνονται οι κάνναβοι σύμφωνα με τους οποίους τοποθετήθηκαν οι γραμμές μελέτης των οποίων η επεξεργασία έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Σχήμα 3.8 : Σκαρίφημα περιοχής του Πολυτεχνείου Κρήτης και απεικόνιση των γραμμών μελέτης πάνω στην περιοχή έρευνας.

Οι γραμμές μελέτης στο σύνολό τους είναι 15 και το μήκος της κάθε γραμμής είναι 54 m. Οι πρώτες 9 γραμμές ξεκινάν από την αρχή του κάνναβου 1, ενώ οι γραμμές 10 έως 15 ξεκινάν 6 μέτρα πιο πριν λόγω δυσκολίας κατά τη λήψη των μετρήσεων στην ανατολική πλευρά της περιοχής.

3.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

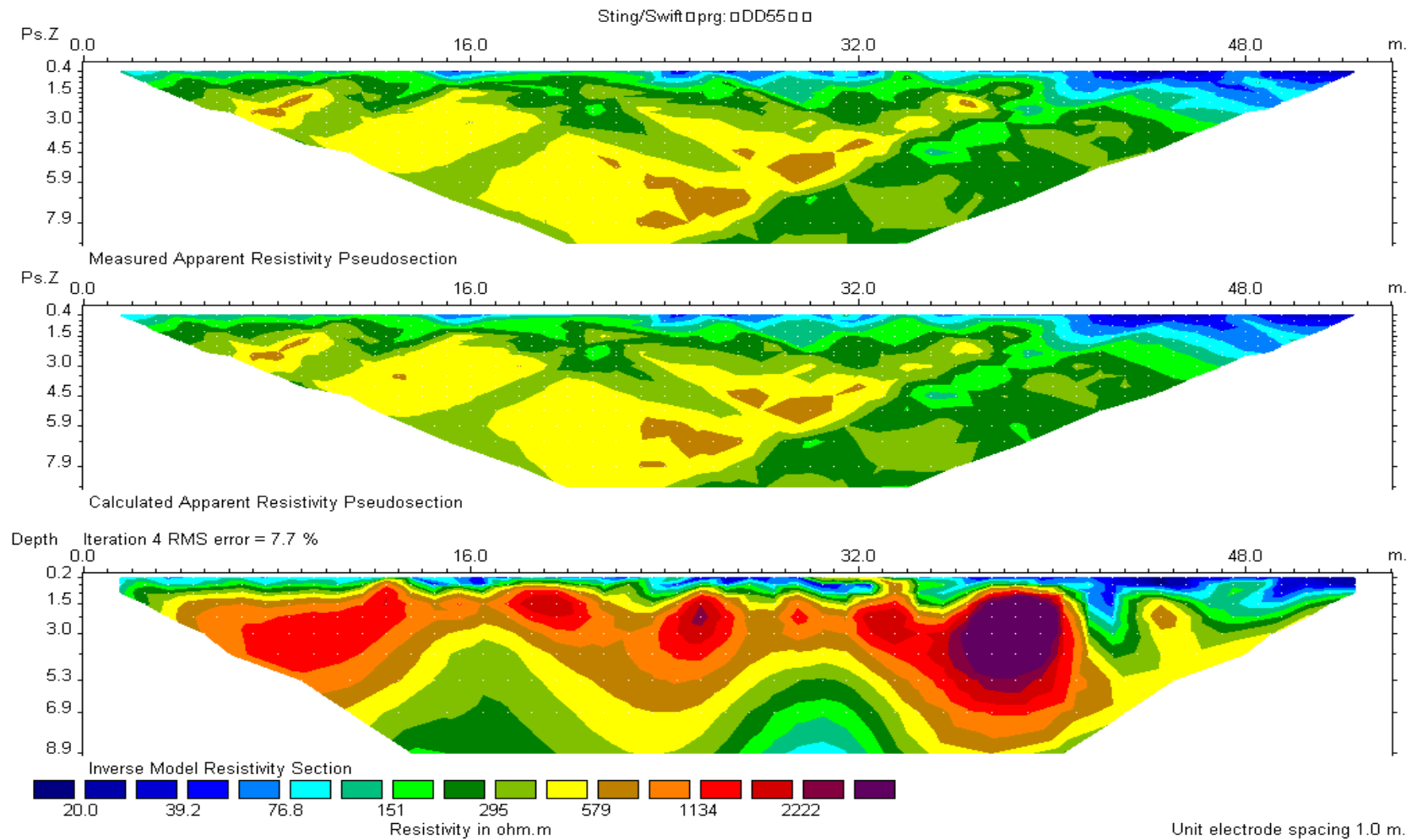
Η επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας έγινε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου RES2DINV. Το πρόγραμμα RES2DINV χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που του δίνονται καταλήγει στην τομή της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, μέσω της μεθόδου της δισδιάστατης αντιστροφής δεδομένων.

Οι μετρήσεις των γραμμών έρευνας της περιοχής πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις πέντε γραμμών οι οποίες βρίσκονται μέσα στην περιοχή οικοδόμησης και οι οποίες επιλέχθηκαν ώστε να καλύψουν την περιοχή αυτή με όσο το δυνατόν λιγότερο αριθμό μετρήσεων. Η συλλογή δεδομένων των γραμμών αυτών πραγματοποιήθηκε κατά την θερινή περίοδο και η παρουσίαση των γεωηλεκτρικών τους τομών θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των 15 γραμμών που παρουσιάζονται αναλυτικά σε αυτό το κεφάλαιο και οι οποίες συλλέχτηκαν σε διαφορετική περίοδο από τις προηγούμενες. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Ο χρόνος πραγματοποίησης τους παίζει σημαντικό ρόλο για το λόγο ότι θα προκύψουν διαφορετικές κλίμακες ηλεκτρικών αντιστάσεων για τις δύο φάσεις των μετρήσεων.

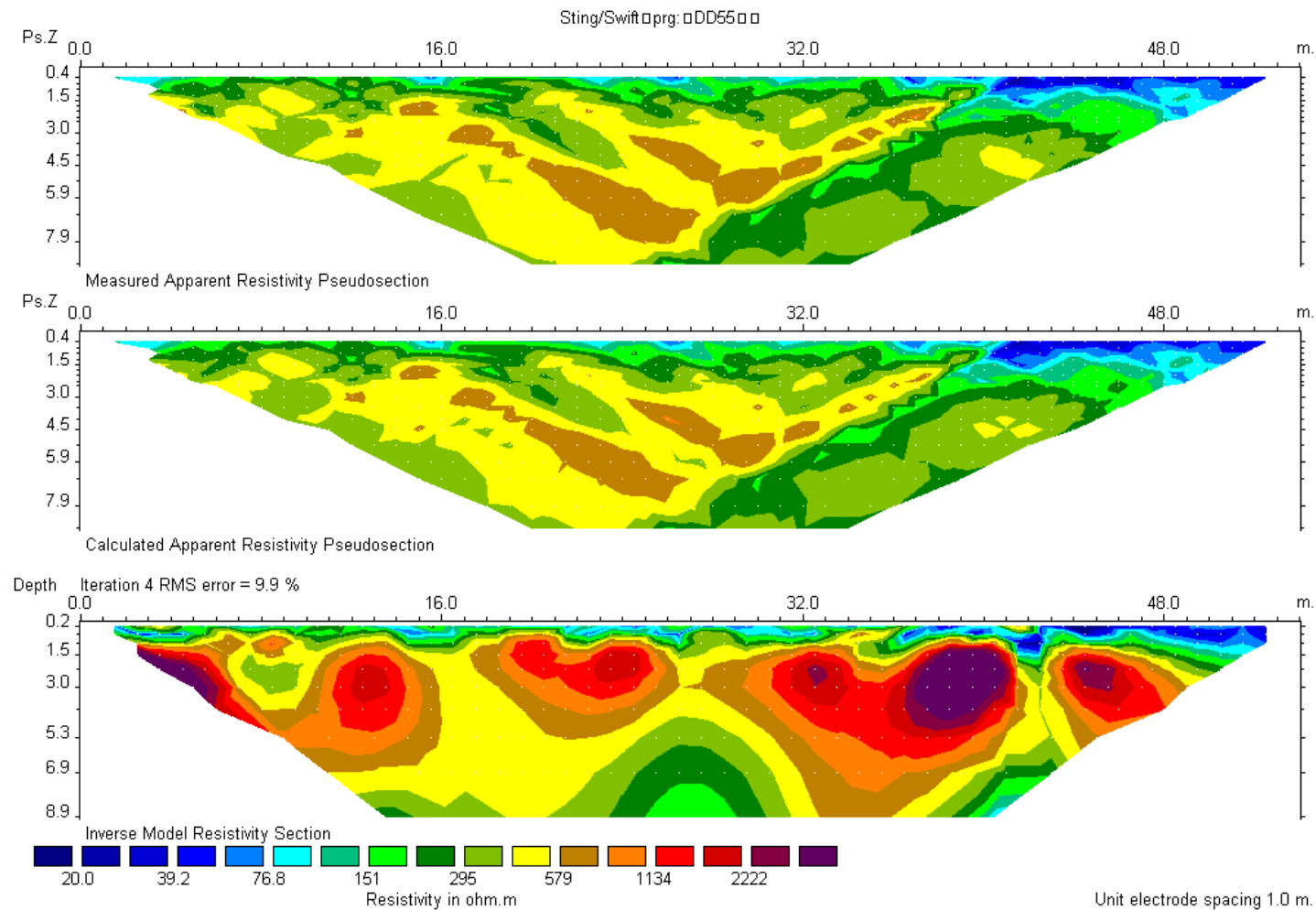
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γεωηλεκτρικές τομές των γραμμών μελέτης της περιοχής που προκύπτουν από την αντιστροφή (Σχήμα 3.9).

Σχήμα 3.9 : Γεωηλεκτρικές τομές 1-15 από το πακέτο Res2dinv A) ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, B) ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

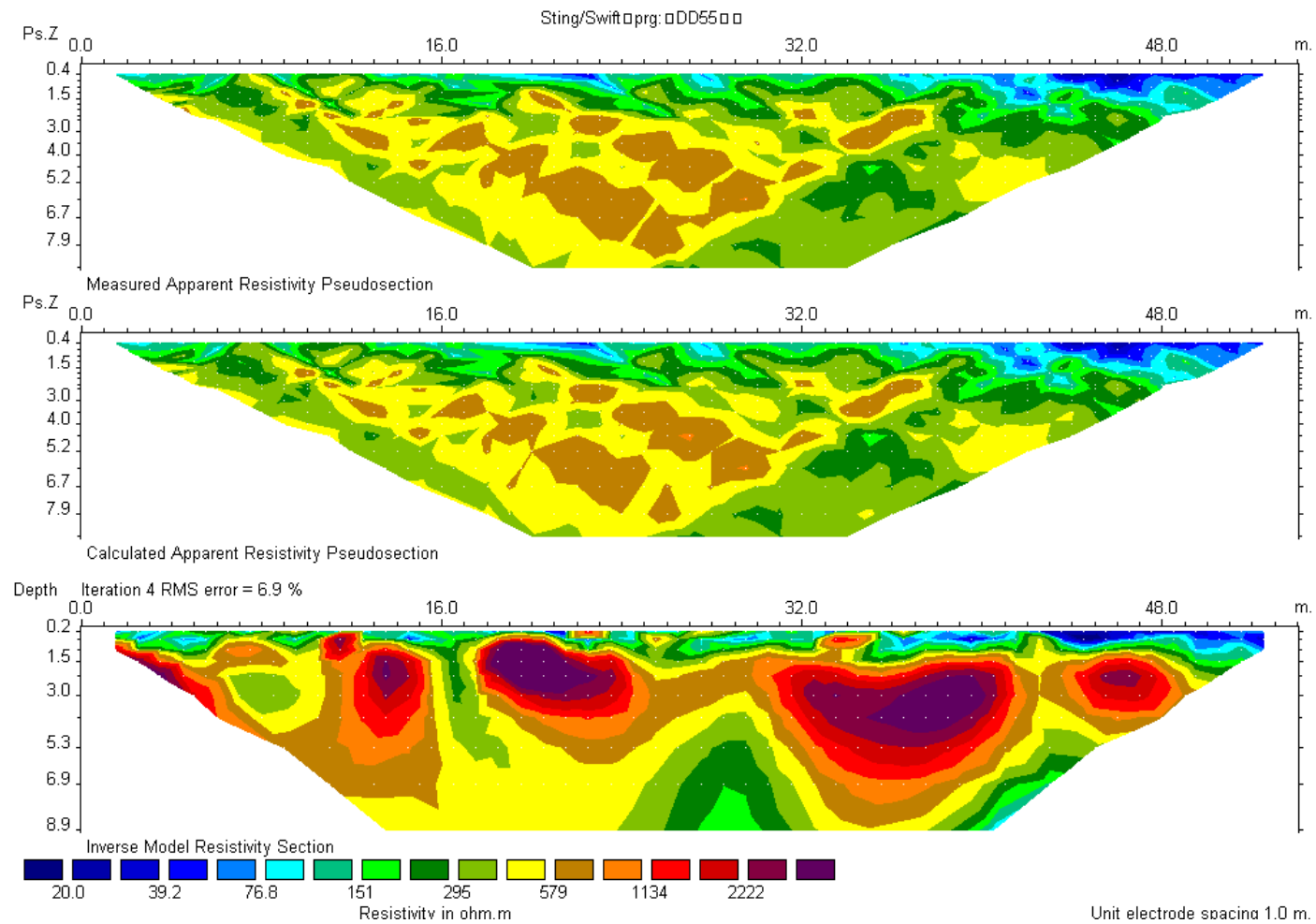
Γραμμή 1



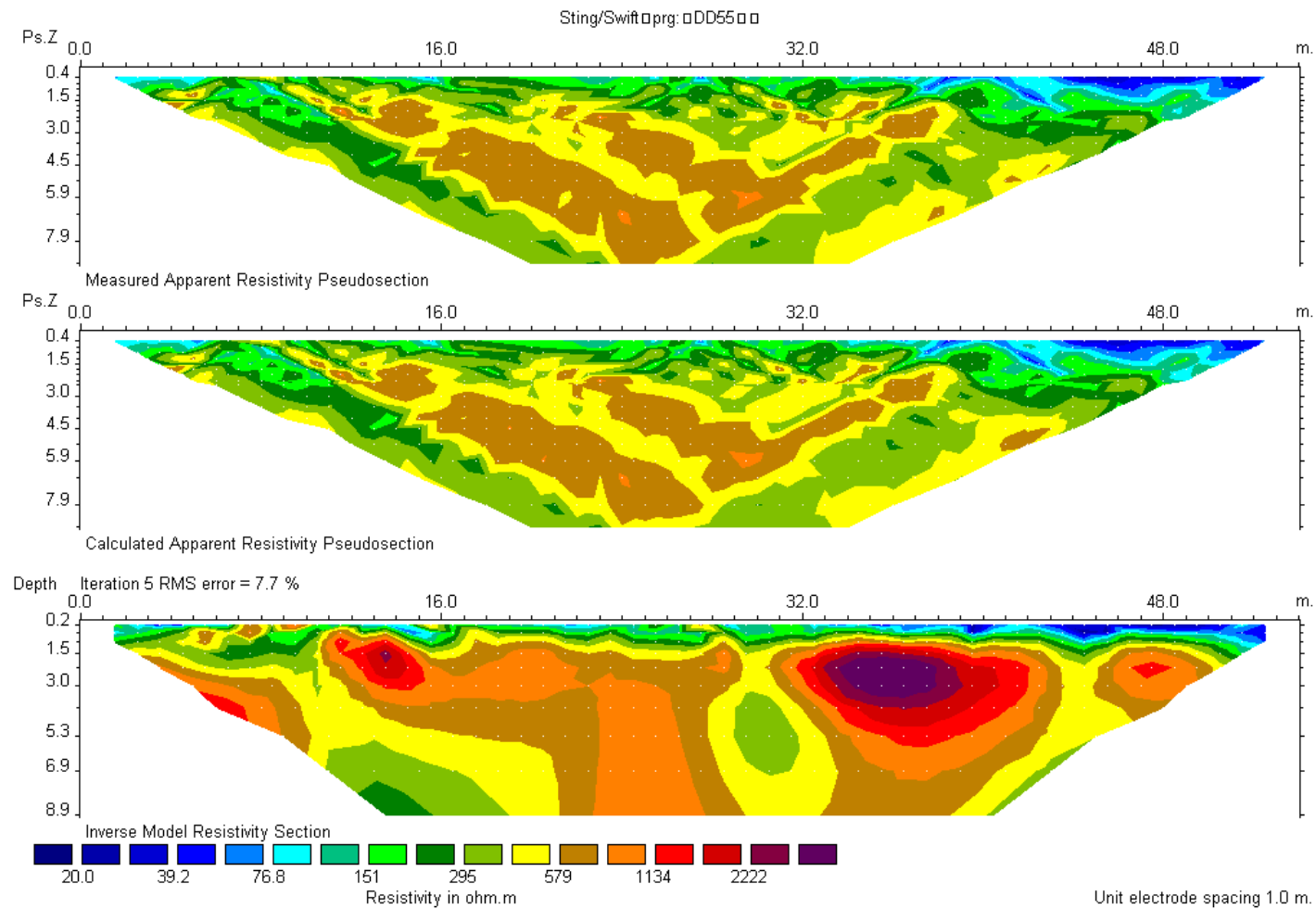
Γραμμή 2



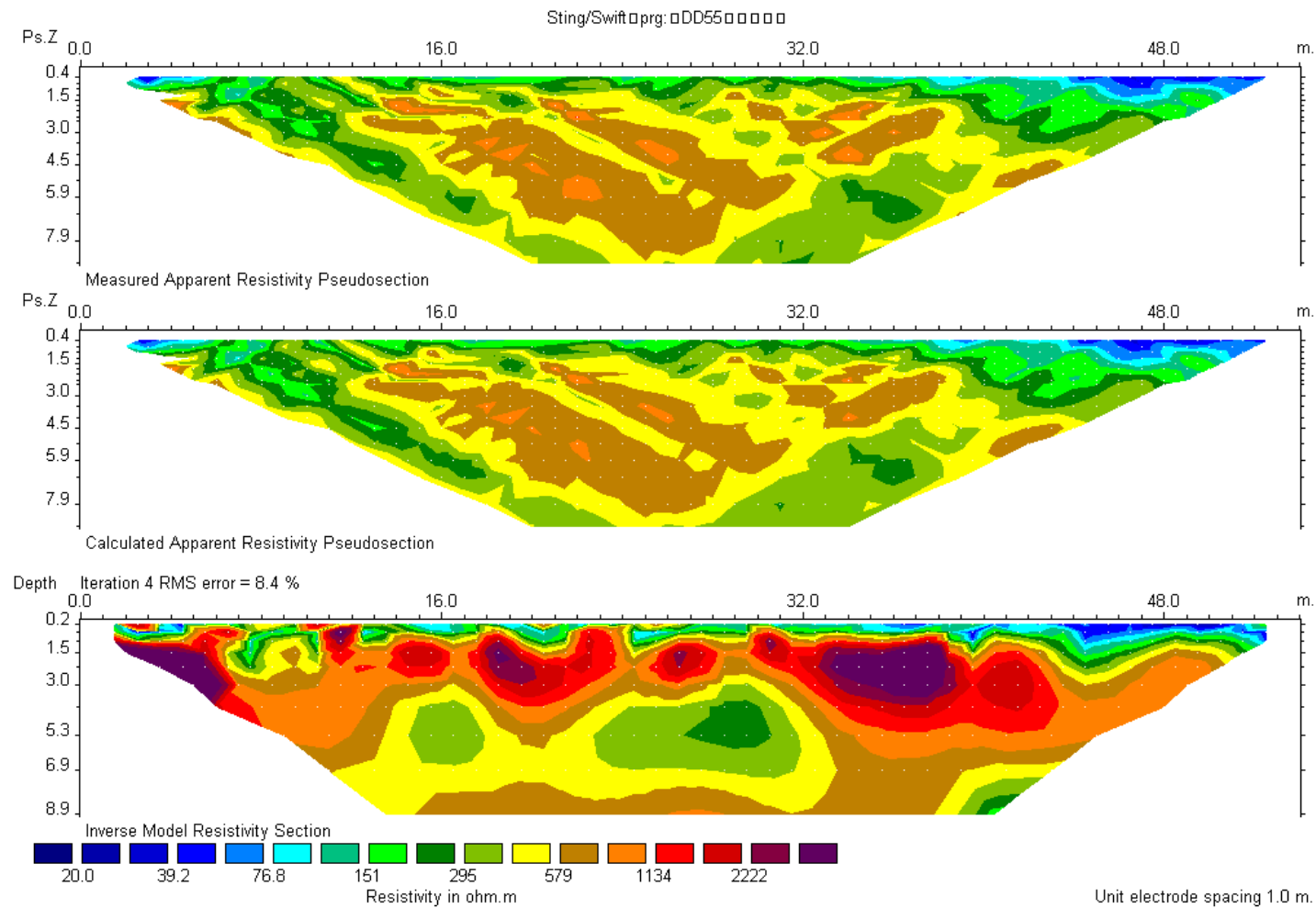
Γραμμή 3



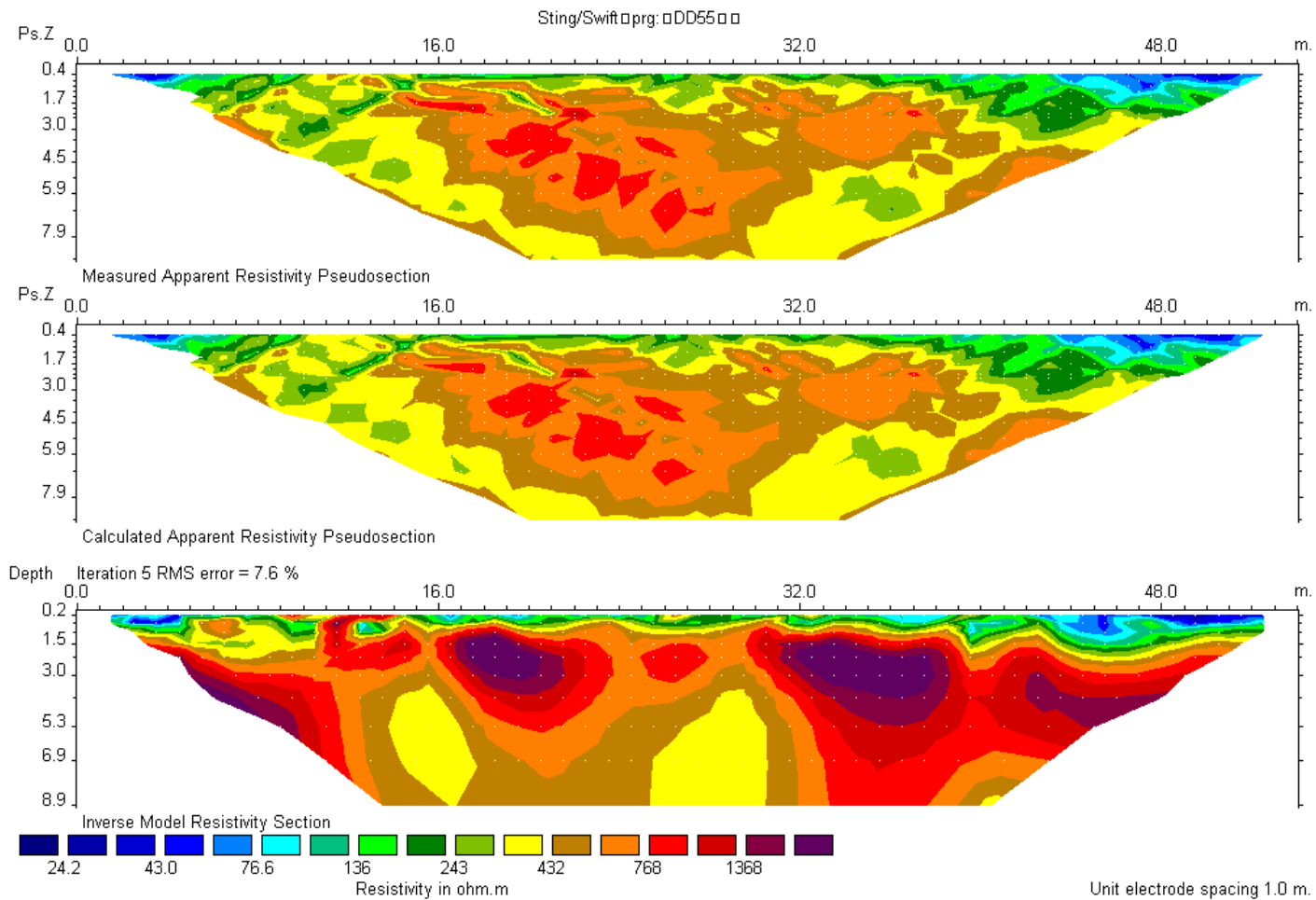
Γραμμή 4



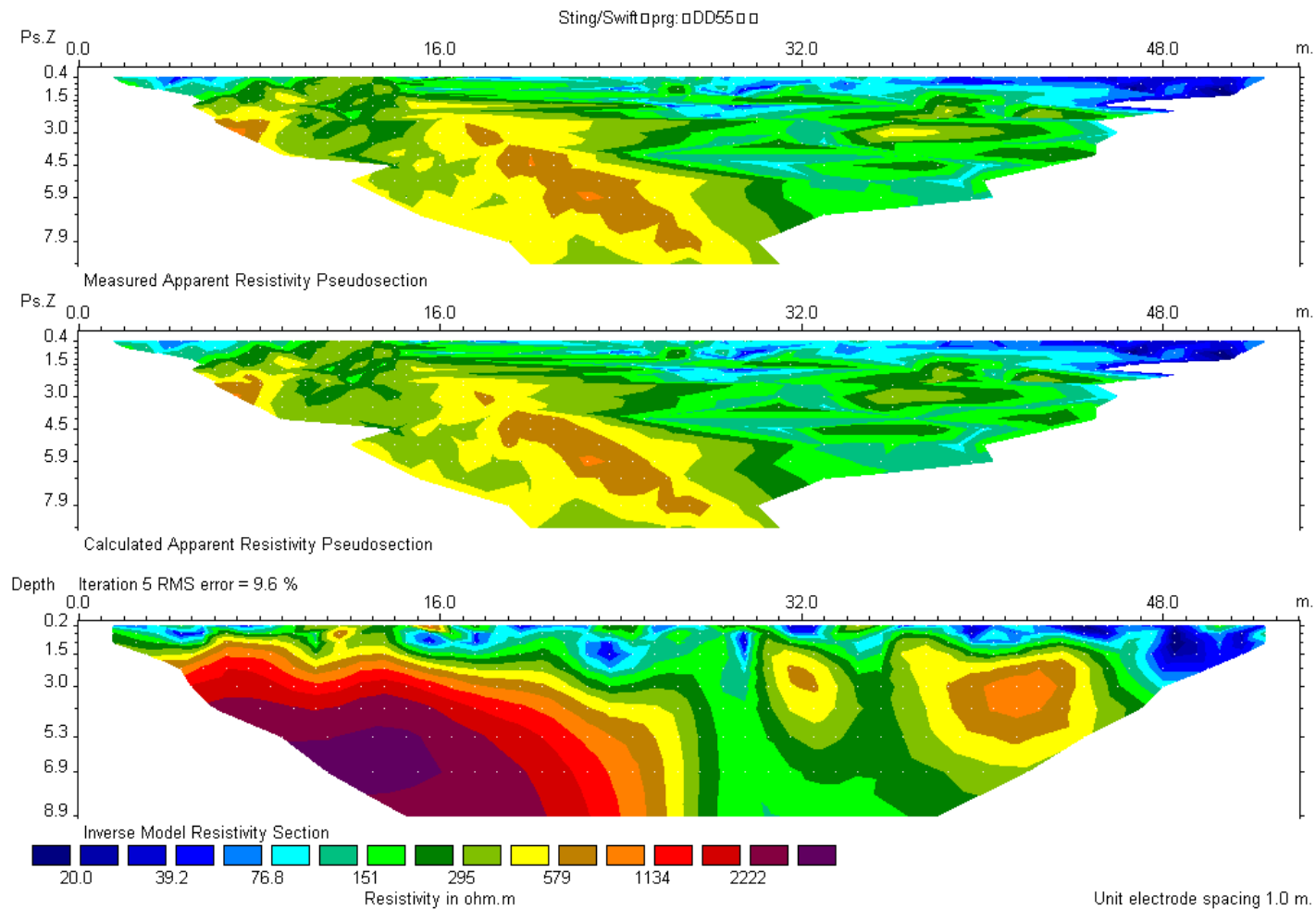
Γραμμή 5



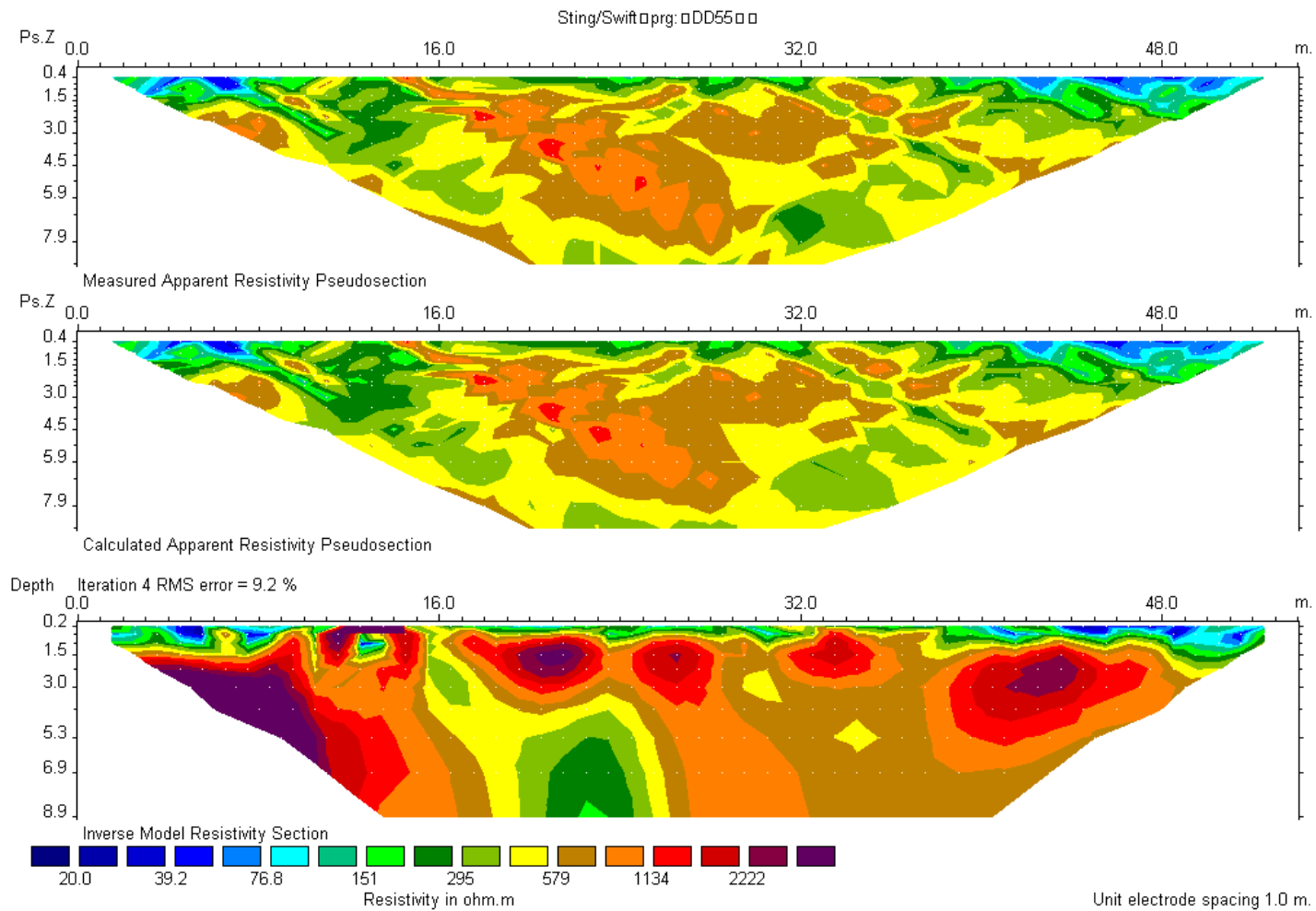
Γραμμή 6



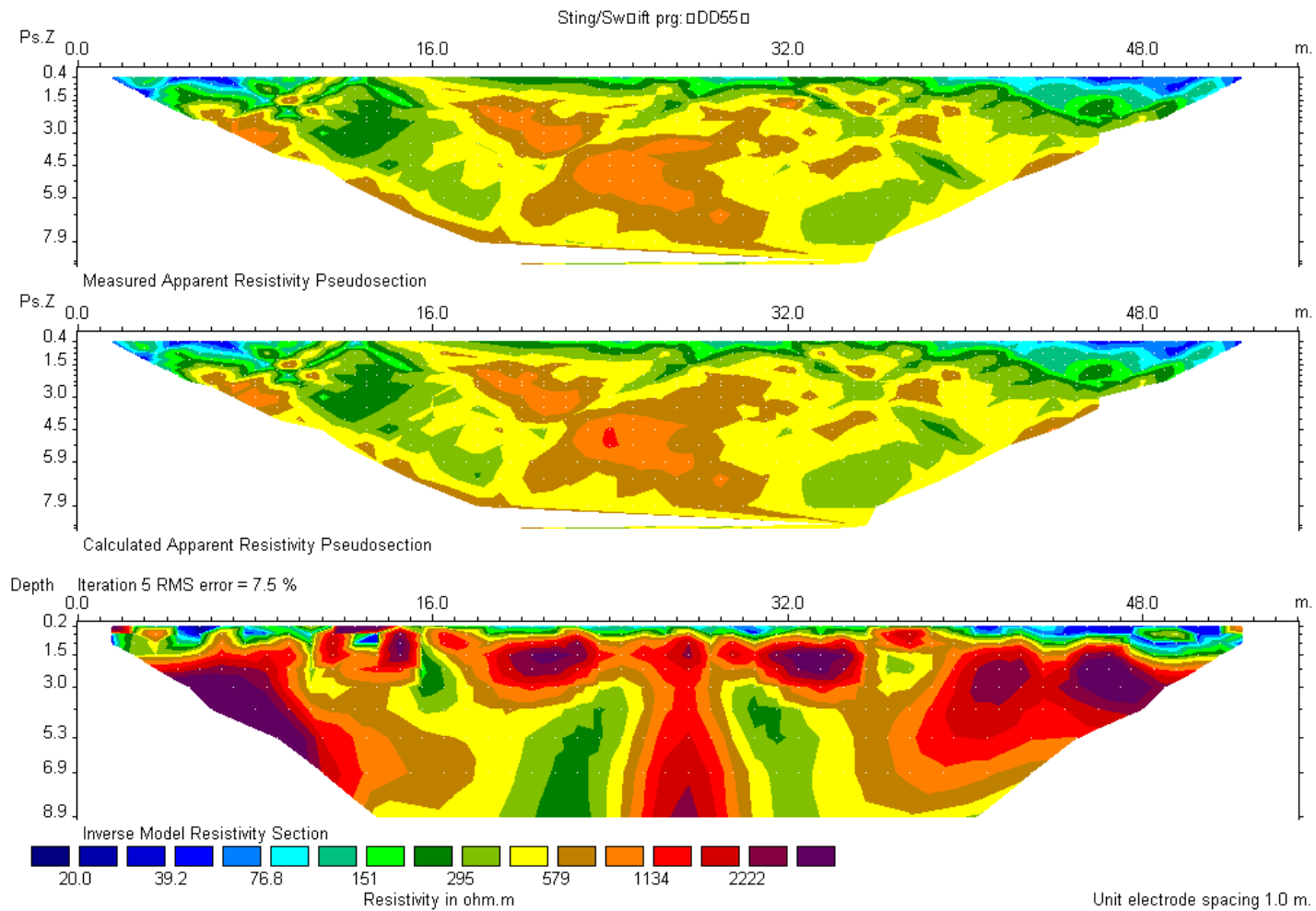
Γραμμή 7



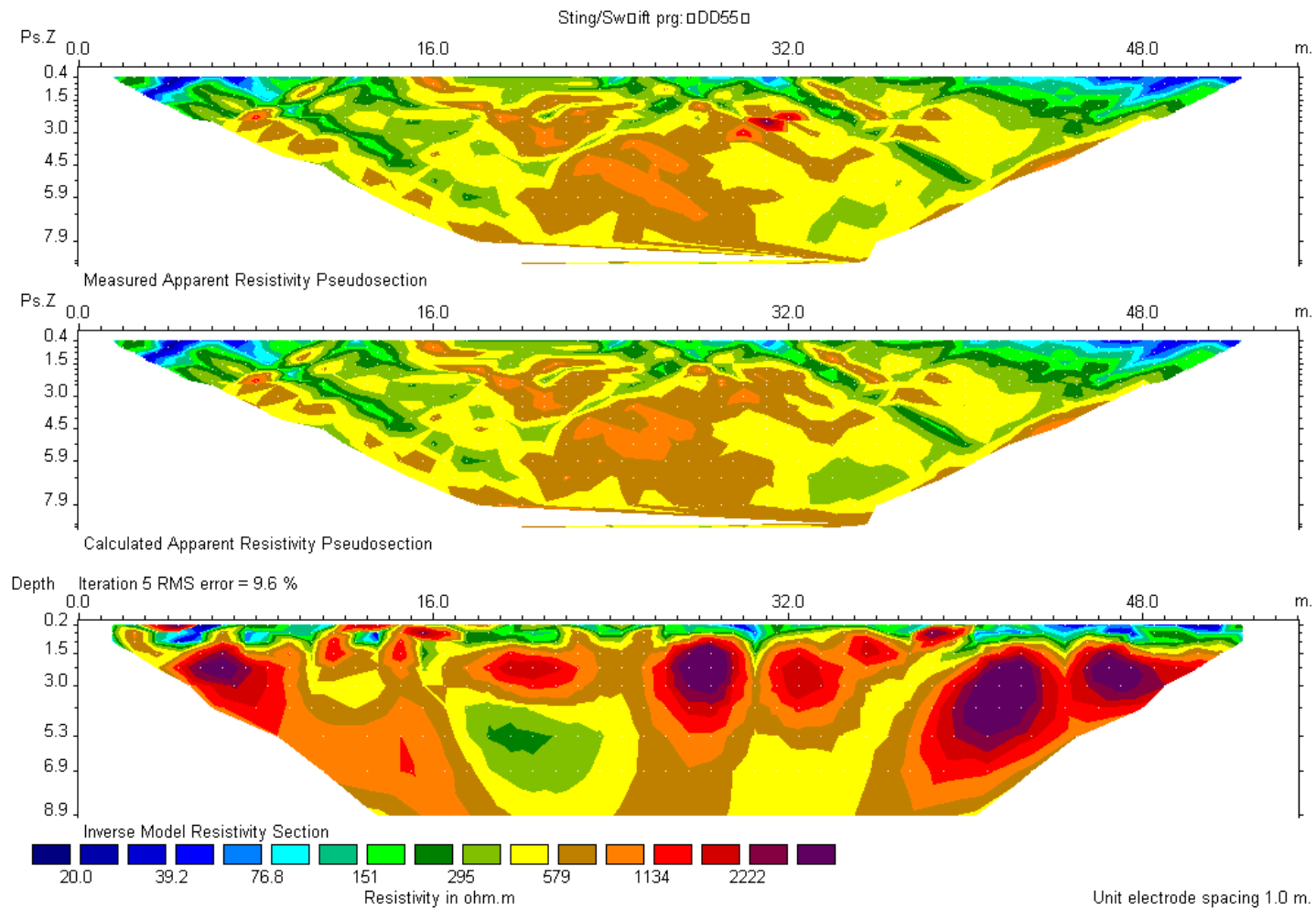
Γραμμή 8



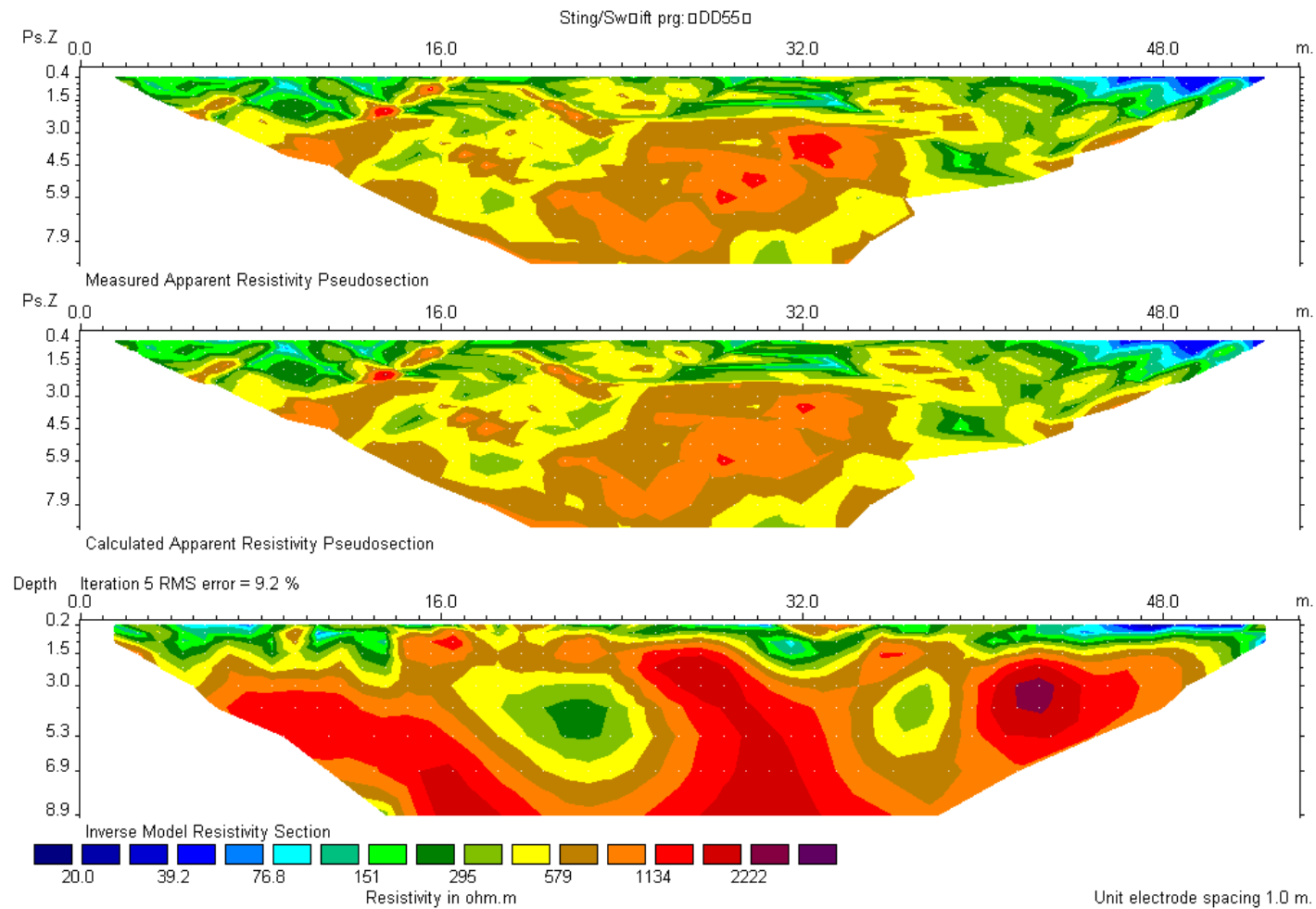
Γραμμή 9



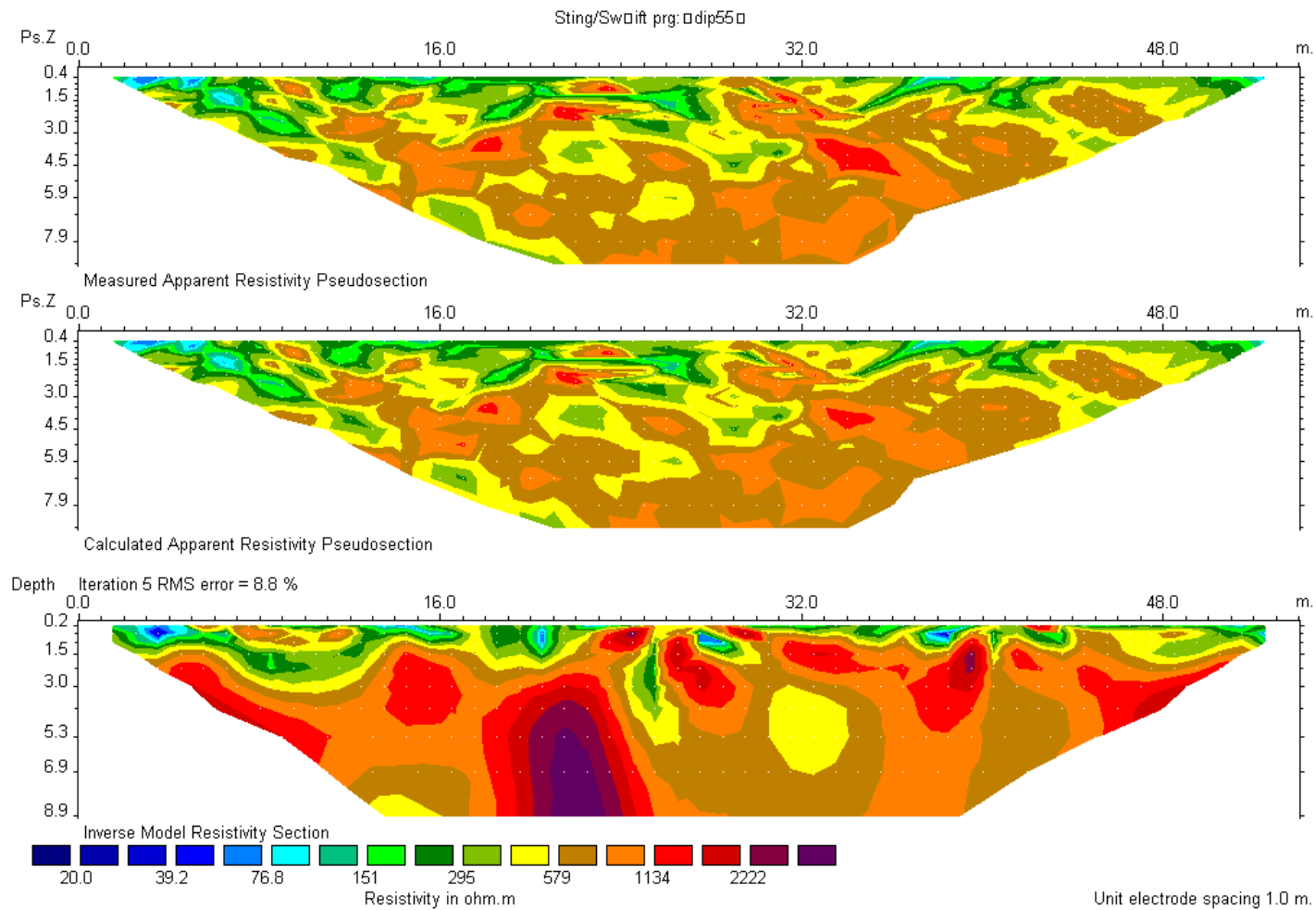
Γραμμή 10



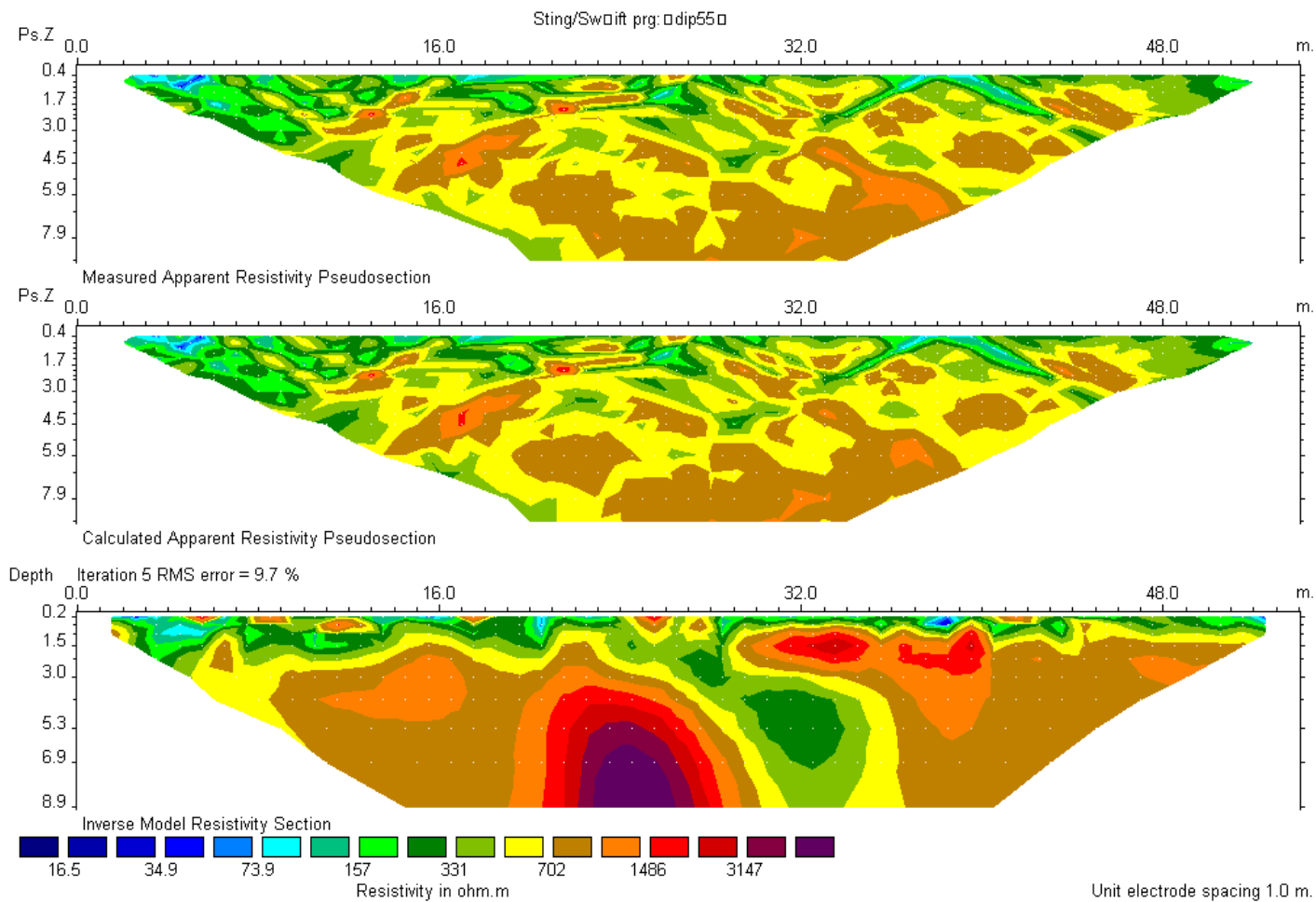
Γραμμή 11



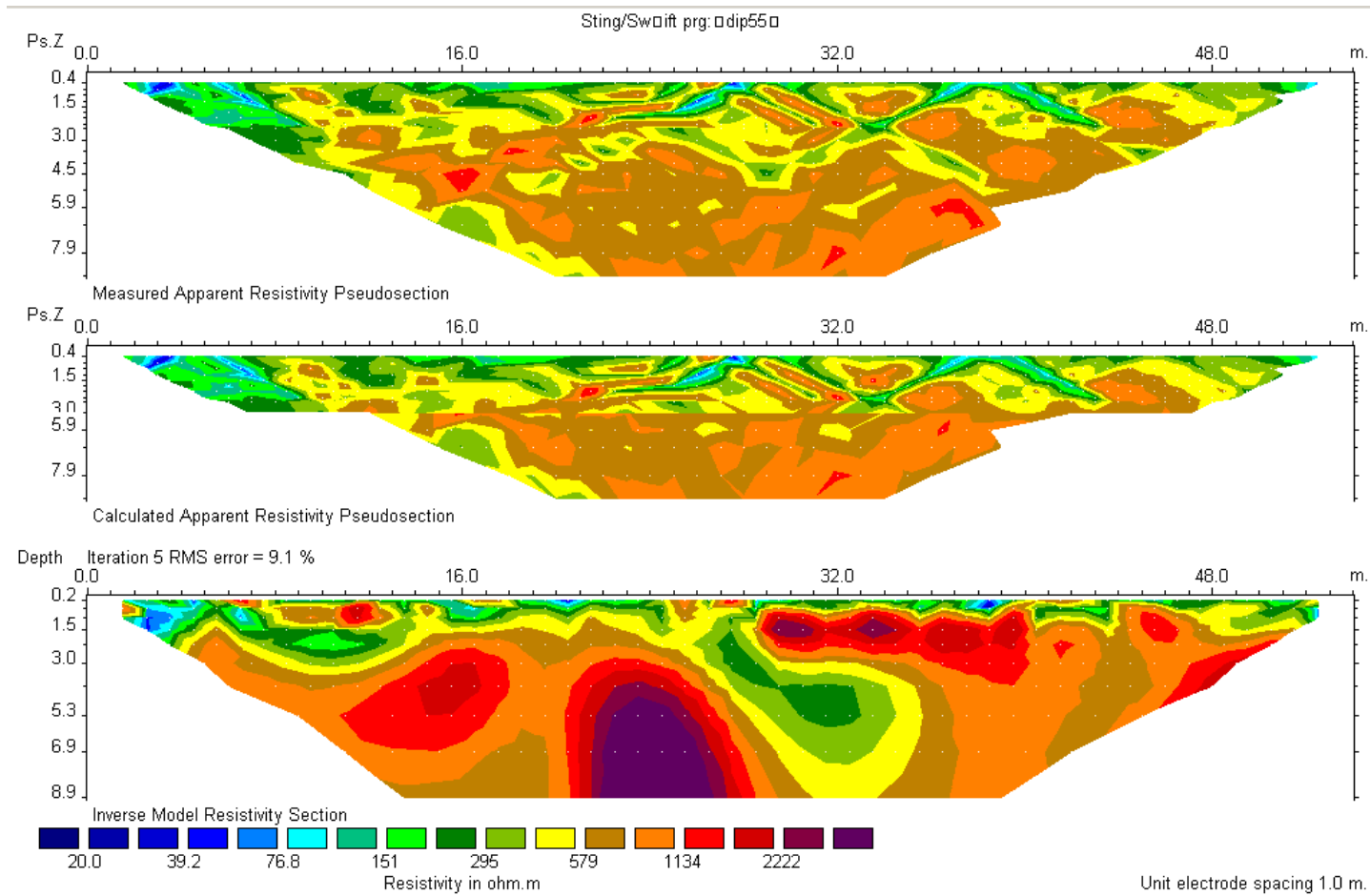
Γραμμή 12



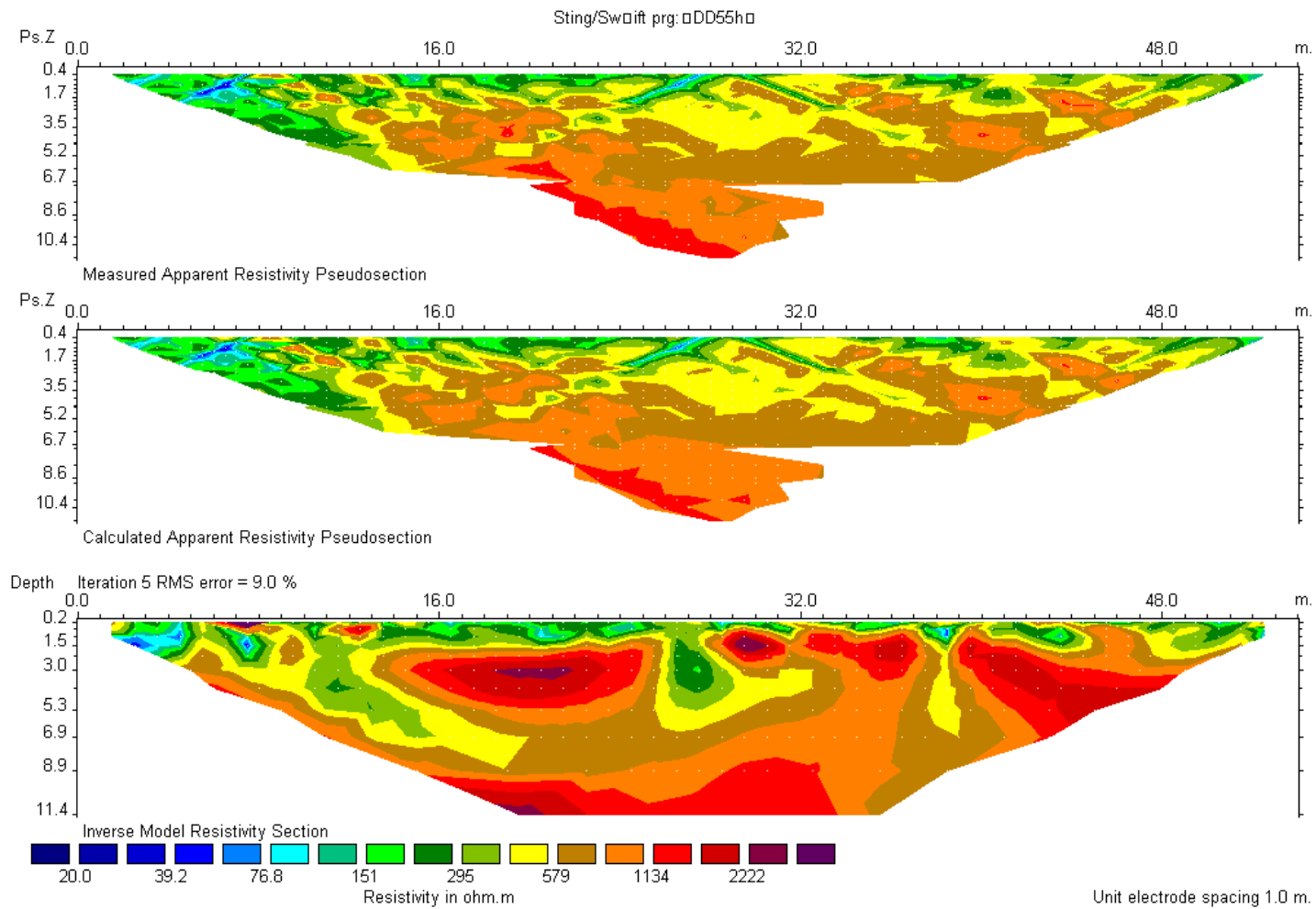
Γραμμή 13



Γραμμή 14



Γραμμή 15



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

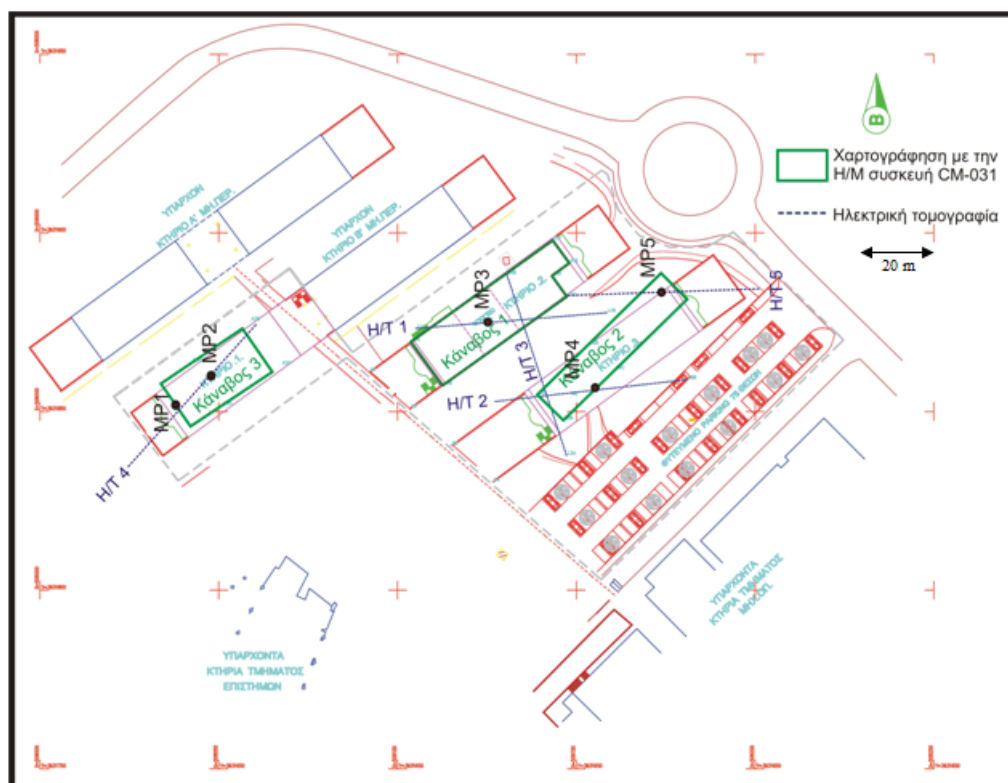
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά των γεωλογικών χαρακτηριστικών των επιφανειακών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης για την επιλογή της θέσης γεωτρήσεων δειγματοληψίας. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από την ύπαρξης καρστικοποιημένων ανθρακικών πετρωμάτων, επομένως η γεωφυσική έρευνα εστιάστηκε στον εντοπισμό περιοχών οι οποίες είναι δυνητικές θέσεις αστοχίας της θεμελίωσης.

Αρχικά παρουσιάζονται οι πέντε γραμμές μελέτης που πραγματοποιήθηκαν κατά την πρώτη φάση της γεωφυσικής διασκόπησης με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας σε συνδυασμό με τις πέντε γεωτρήσεις. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι δύο κάνναβοι με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο στην εν λόγω περιοχή.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η γεωφυσική διασκόπηση της περιοχής περιελάμβανε την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας των πέντε γραμμών μελέτης και την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο σε τρεις μικρότερες περιοχές. Οι γραμμές μελέτης και οι κάνναβοι των ηλεκτρομαγνητικών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Πάνω στις γραμμές μελέτης τις οποίες επεξεργαστήκαμε έγιναν πέντε γεωτρήσεις με σκοπό των χαρακτηρισμό των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών τη περιοχής.

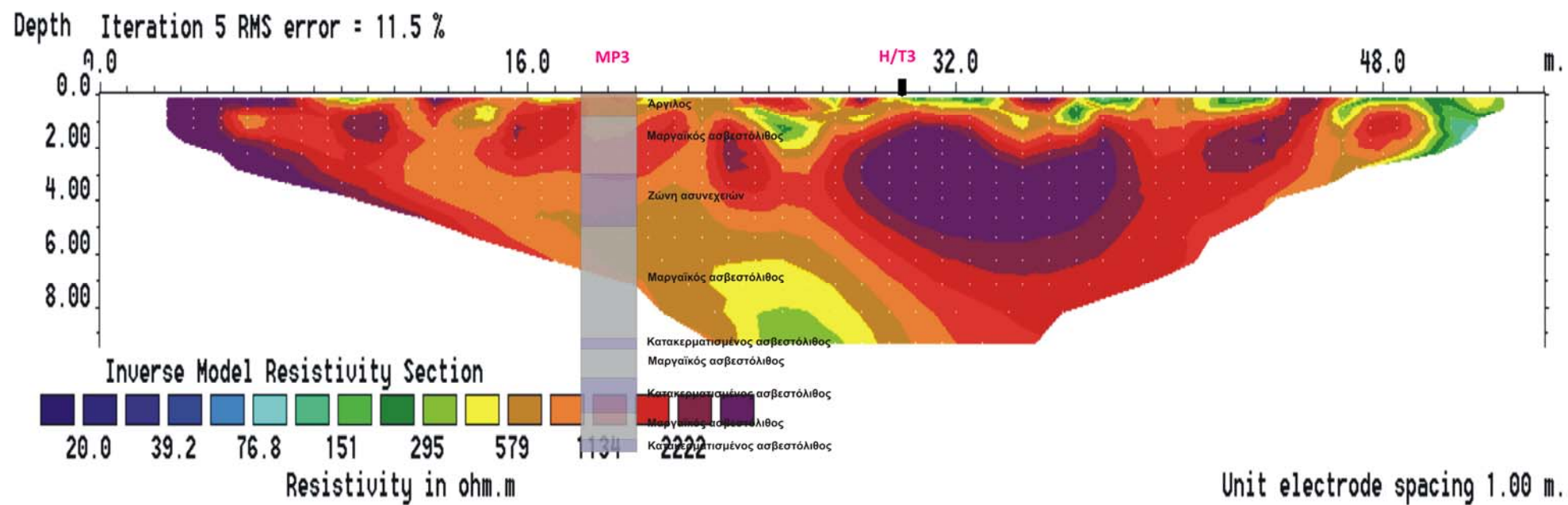


Σχήμα 4.1: Τοπογραφική αποτύπωση του οικοπέδου όπου απεικονίζονται οι θέσεις των γεωφυσικών μετρήσεων.

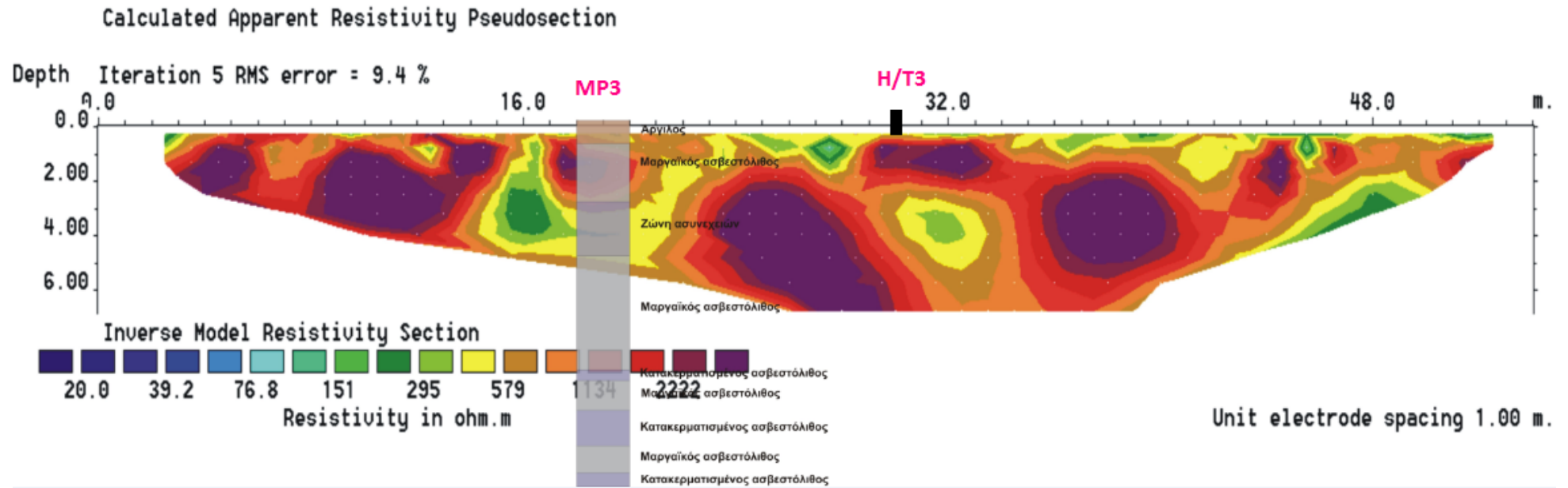
4.2.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η επεξεργασία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας έγινε με το πρόγραμμα Res2dinv όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των μετρήσεων είναι η διάταξη Διπόλου-Διπόλου (Dipole-Dipole) και η διάταξη Wenner-Schlumberger. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών τομών και των δύο διατάξεων και η ταύτιση τους με τις γεωτρήσεις. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το βάθος από την επιφάνεια διασκόπησης, στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η οριζόντια απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης, ενώ η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στις τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (σε Ωm) του υπεδάφους. Στην γραμμή 1 (H/T 1) έγινε η γεώτρηση **MP3**, 19 μέτρα από την αρχή της. Η γραμμή 1 μελετήθηκε με δύο διατάξεις (Διπόλου-Διπόλου και Wenner-Schlumberger). Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η γεωηλεκτρική τομή της γραμμής 1 για καθεμία από τις δύο διατάξεις.

α) Διάταξη Διπόλου- Διπόλου

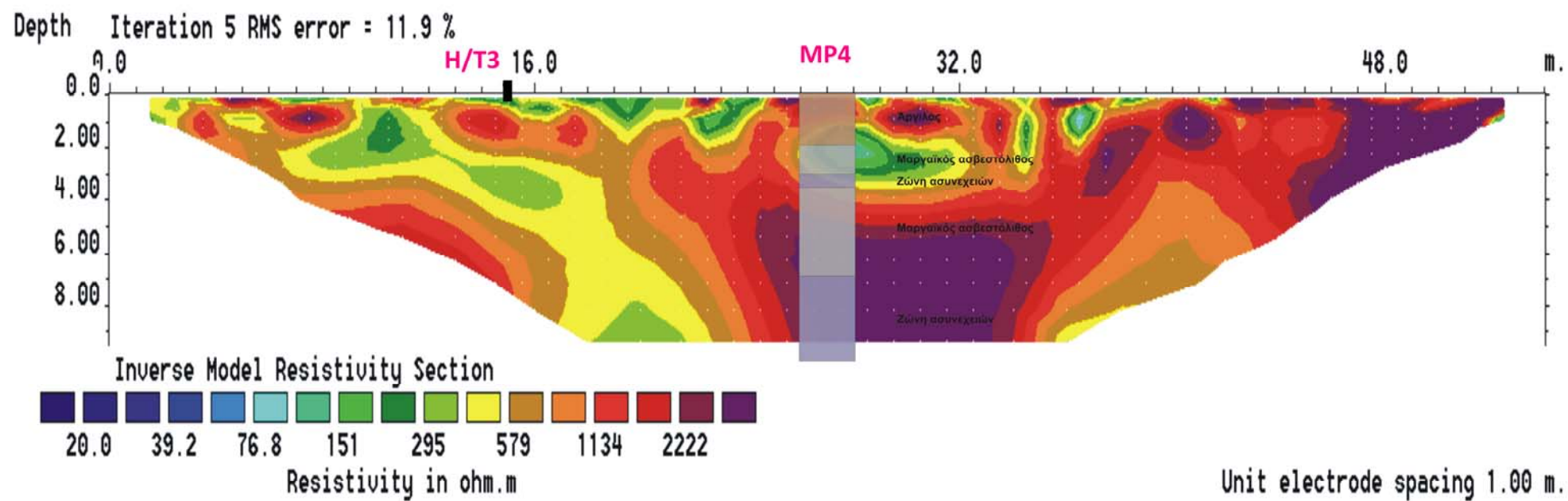


β) Διάταξη Wenner-Schlumberger

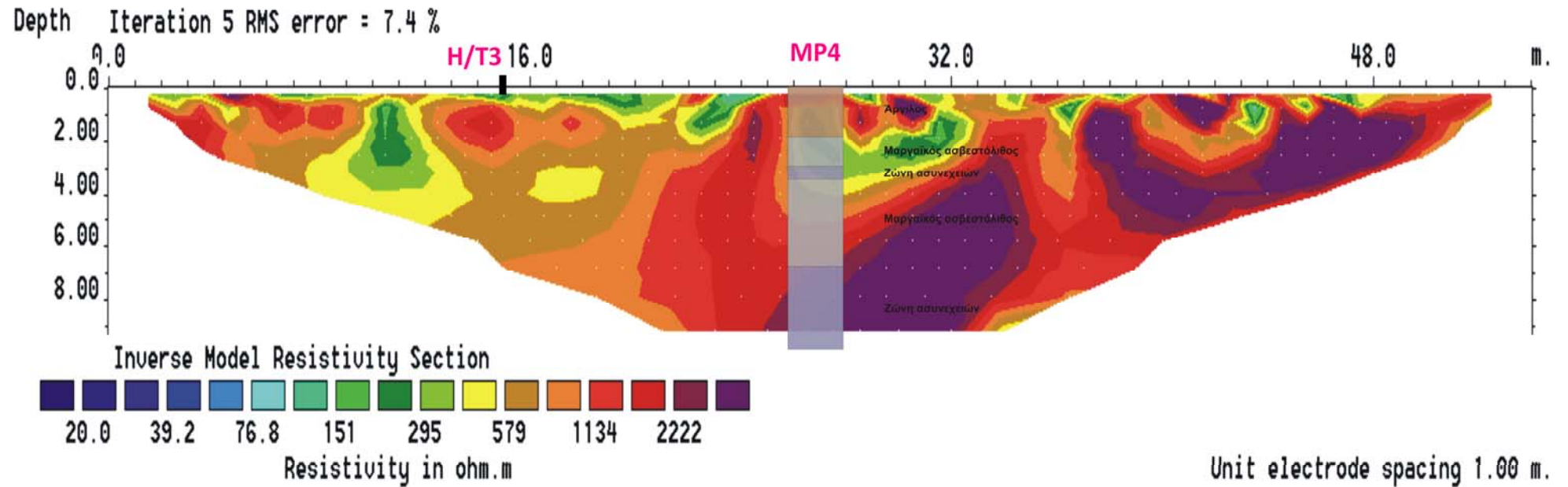


Σχήμα 4.2 : Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T1 και η γεωλογική στήλη της γεώτρησης MP3. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7. α) Σύμφωνα με την διάταξη διπόλου - διπόλου, β) Σύμφωνα με την διάταξη Wenner – Schlumberger.

α) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου (Dipole-Dipole)

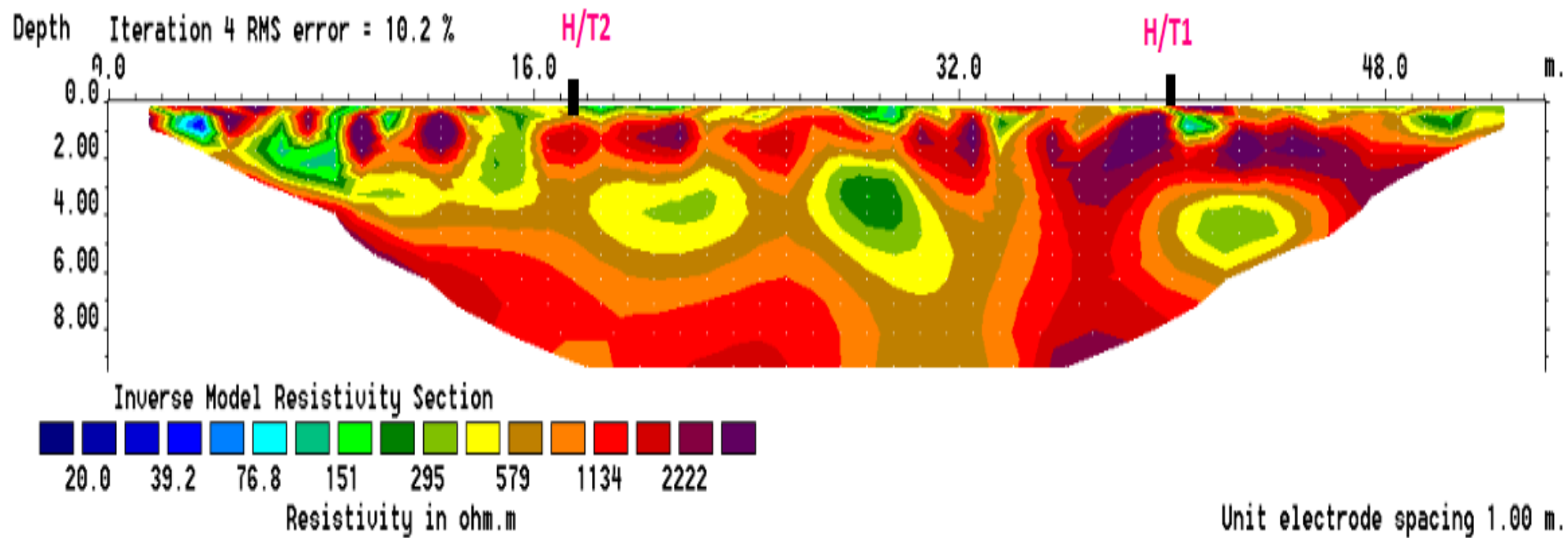


β) Διάταξη Wenner-Schlumberger

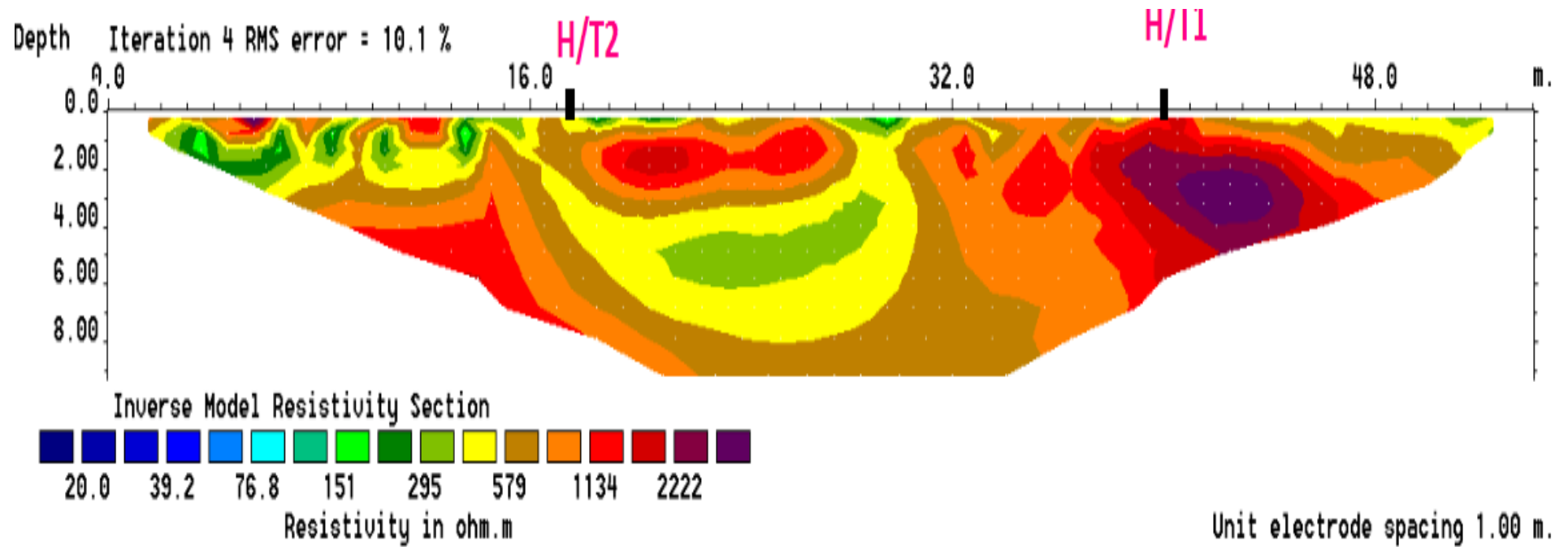


Σχήμα 4.3 : Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T2 και η γεωλογική στήλη της γεώτρησης MP4. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7. α) Σύμφωνα με την διάταξη διπόλου - διπόλου, β) Σύμφωνα με την διάταξη Wenner – Schlumberger.

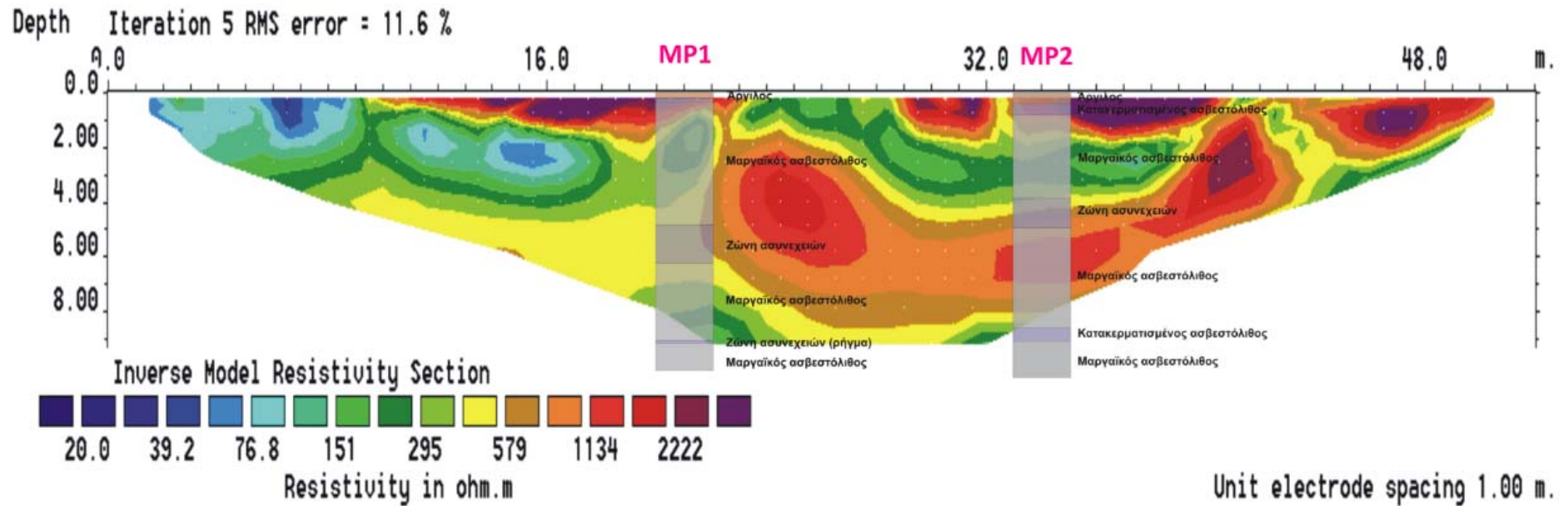
α) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου (Dipole-Dipole)



β) Διάταξη Wenner-Schlumberger

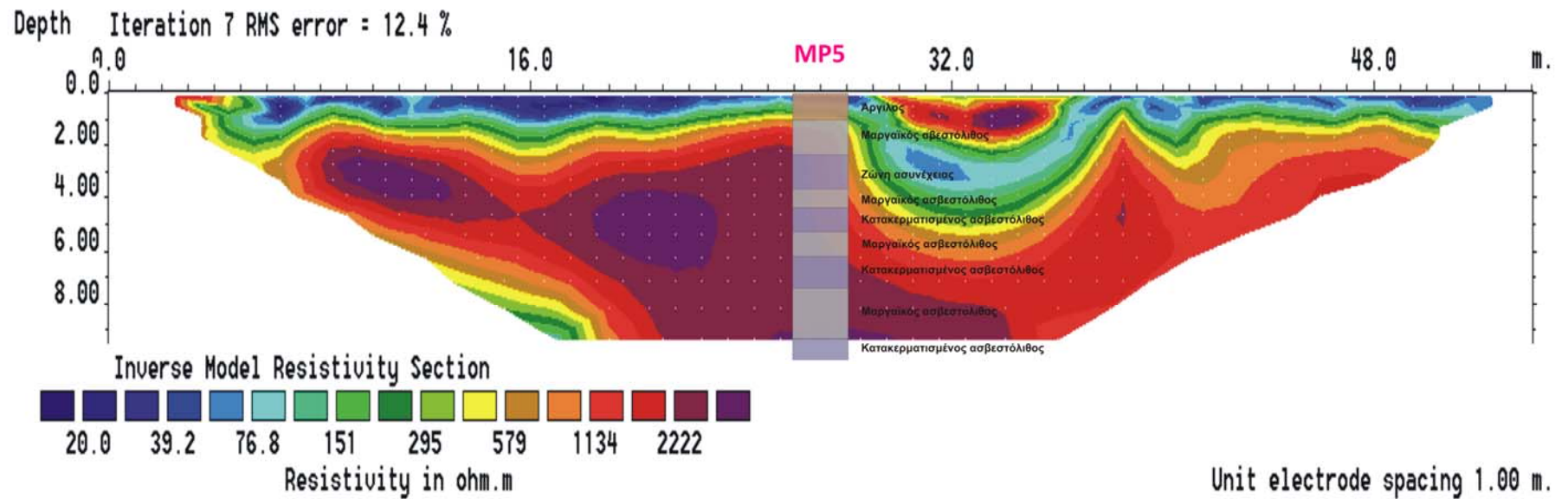


Σχήμα 4.4 : Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T3. α) Σύμφωνα με την διάταξη διπόλου - διπόλου, β) Σύμφωνα με την διάταξη Wenner – Schlumberger.



Σχήμα 4.5 : Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T4 και η γεωλογική στήλη των γεωτρήσεων MP1 και MP2. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7. Η γεώτρηση MP1 δεν βρίσκεται επάνω στην γραμμή μελέτης και απέχει 2 μέτρα.

Διάταξη Wenner-Schlumberger



Σχήμα 4.6 : Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή μελέτης H/T5 και η γεωλογική στήλη της γεώτρησης MP5. Τα σύμβολα στην γεωλογική στήλη παρατίθενται στο Σχήμα 4.7.

	Ιλυώδης Άμμος
	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος
	Ζώνη Ασυνεχειών
	Κατακερματισμένος Ασβεστόλιθος

Σχήμα 4.7 : Υπόμνημα γεωλογικών σχηματισμών των γεωτρήσεων.

Πάνω στην γραμμή 2 (H/T 2) πραγματοποιήθηκε η γεώτρηση **MP4** σε απόσταση 27 μέτρων από την αρχή της γραμμής μελέτης. Πάνω στην γραμμή 3 (H/T3) δεν υπάρχει κάποια γεώτρηση. Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι τομές με τις δύο διατάξεις και τα σημεία που τέμνονται με τις γραμμές H/T1 και H/T2. Πάνω στην τέταρτη γραμμή μελέτης (H/T 4) έγιναν οι γεωτρήσεις **MP1** και **MP2** σε απόσταση 21 και 34 μέτρα αντίστοιχα από την αρχή της γραμμής. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι η Wenner-Schlumberger. Το βάθος της γεώτρησης φτάνει τα 10 μέτρα. Τέλος, πάνω στην γραμμή μελέτης 5 (H/T 5) έγινε η γεώτρηση **MP5** σε απόσταση 27 μέτρων από την αρχή της γραμμής με την χρήση της διάταξης Wenner-Schlumberger.

Σύμφωνα με τις πληροφορίες από τις γεωτρήσεις οι ζώνες χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (<200 Ωm) αποδίδονται σε αργιλικούς σχηματισμούς ή σε ζώνη ασυνεχειών μέσα σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο πληρωμένη με αργιλικό υλικό. Εκτός από τις ζώνες χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρατηρούνται και ζώνες που ο άργιλος εμφανίζεται με υψηλότερες τιμές αντιστάσεως (580-1200). Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη χαλίκων με συνδυασμό την καλοκαιρινή περίοδο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Οι ζώνες πολύ υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (>900 Ωm) αποδίδονται σε ζώνη ασυνεχειών μέσα σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο χωρίς αργιλικό υλικό ή σε κατακερματισμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο (>2300 Ωm). Τέλος, οι ζώνες με ενδιάμεσες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (300-700 Ωm) αποδίδονται σε υγιή μαργαϊκό ασβεστόλιθο. Επιπλέον, σε ορισμένα σημεία παρατηρείται μαργαϊκός ασβεστόλιθος με ειδική ηλεκτρική αντίσταση γύρω στο 2300 Ωm το

οποίο μπορεί να οφείλεται στην παρουσία απολιθωμάτων και του μεγάλου πορώδους.

4.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του κινούμενου πομπού – δέκτη, προκειμένου να προσδιοριστούν μεταβολές στην τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων στα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά γρήγορη και προσφέρει άμεσα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής, συσχετίζονται με τις υπόλοιπες γεωφυσικές μεθόδους, ώστε να προκύψουν τελικά οι θέσεις που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής για την κατασκευή της οικοδομής. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο ηλεκτρομαγνητικό CM – 031. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με το χρήσιμα του προγράμματος Transform ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία σε καθένα από τους δύο καννάβους .

Ο κάνναβος 1 είναι χωρισμένος σε δυο μικρότερους καννάβους, a,b . Ο κανναβος a είναι από τη θέση 0 (m) έως τη θέση 6 (m) κατακόρυφα ενώ ο κανναβος b είναι από τη θέση 7 (m) έως τη θέση 15 (m). Και τους δυο κανναβους τους έχουμε χωρίσει σε 99 στήλες με απόσταση 0.5 m μεταξύ τους επομένως το πλάτος τους φτάνει τα 49 m. Ο κανναβος a όμως έχει τιμές μέχρι και τη στήλη 87 επομένως ο αρχικός μας κανναβος 1 θα περιοριστεί στα 43 m.

Για την απεικόνιση του χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης απαιτείται η ένωση των δυο μικρότερων κανναβων a,b.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Αρχικά επιλέγεται η τελευταία γραμμή του κανναβου a, δηλαδή τη γραμμή που αντιστοιχεί στα 6 m και την πρώτη γραμμή του κανναβιού b, δηλαδή τη γραμμή που αντιστοιχεί στα 7 m, και υπολογίζεται ο μέσος όρος κάθε γραμμής.
- Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάφορα των δυο αυτών μέσων όρων.

- Στον κανναβο με το μικρότερο μέσο όρο προστίθεται αυτή τη διαφορά. Στην προκειμένη περίπτωση στον κανναβο b.
- Τέλος, γίνεται συγχώνευση των δυο καννάβων μετά τις διορθώσεις.

Ο κανναβος 2 είναι χωρισμένος σε δυο μικρότερους καννάβους, A, B . Ο κανναβος A είναι χωρισμένος σε στήλες ανά 0,5 (m) και φτάνει τα 20 (m). Ο κανναβος B είναι και αυτός χωρισμένος ανά 0,5 (m) και φτάνει τα 30 (m). Οι δύο αυτοί καννάβοι A, B είναι διατεταγμένοι ο ένας διπλά στον άλλο.

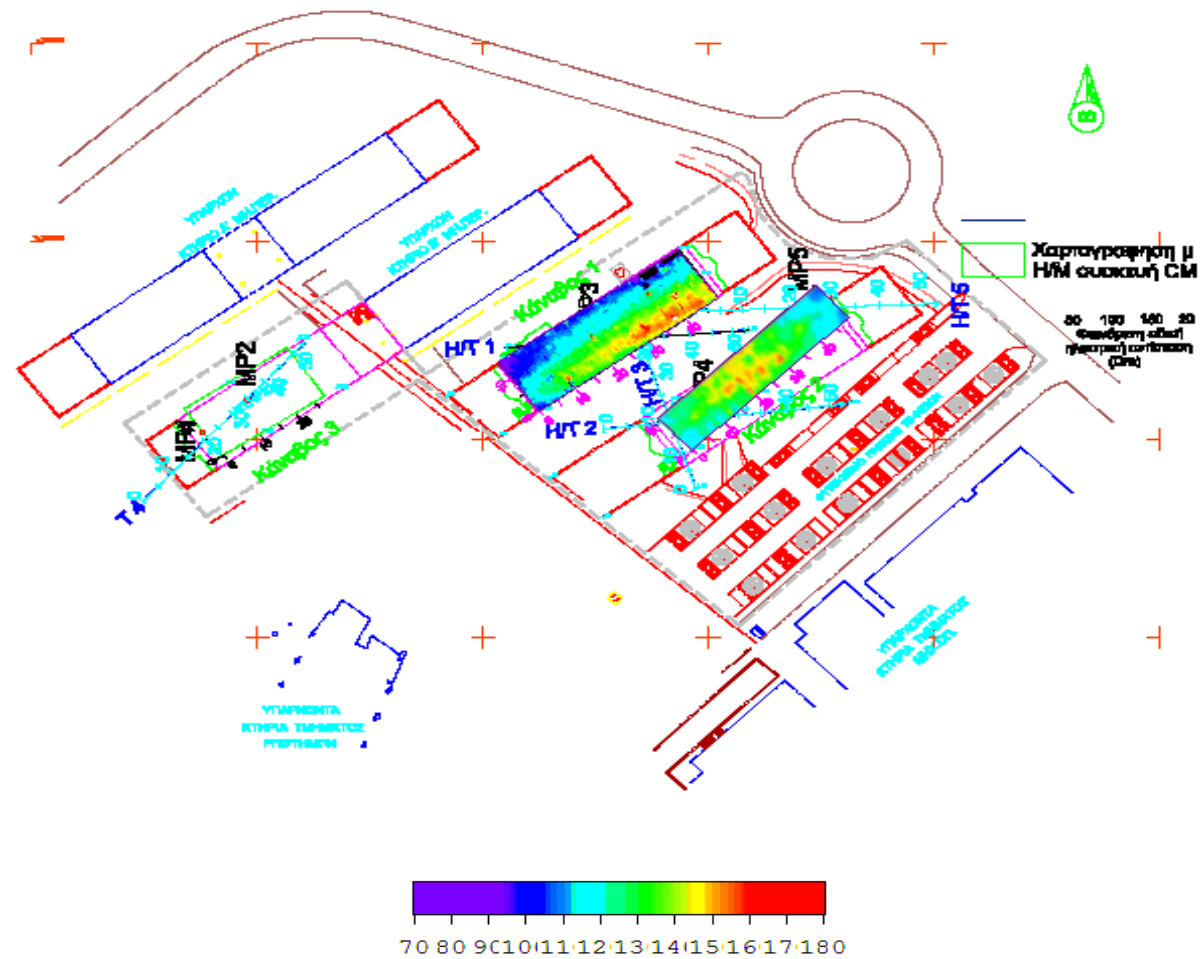
Επομένως οι διαστάσεις του τελικού μας καννάβου 2 είναι 10 μέτρα πλάτος και 50 μέτρα μήκος. Η διόρθωση θα γίνει με βάση την κοινή τους στήλη, δηλαδή στα 20 μέτρα. Για την απεικόνιση του χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης απαιτείται η ένωση των δυο καννάβων A, B.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Υπολογίζεται ο μέσος όρος της στήλης του καννάβου A που αντιστοιχεί στα 20 m και τον μέσο όρο της στήλης του καννάβου B που αντιστοιχεί στα 0 m.
- Στην συνέχεια αφαιρούνται οι δύο μέσοι όροι για να βρεθεί η διαφορά τους.
- Στον κανναβο με τον μικρότερο μέσο όρο προστίθεται η διαφορά τους. Στην προκειμένη περίπτωση ο κανναβος αυτός είναι ο κανναβος B.
- Τέλος, γίνεται συγχώνευση των δυο καννάβων μετά τις διορθώσεις.

Οι διορθώσεις αυτές γίνονται γιατί για κάποιους λογούς δεν ήταν δυνατή η συνεχής μέτρηση των καννάβων, επομένως χρειάστηκε να χωριστούν σε δυο μικρότερους όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επομένως ακολουθούμε τη συγκεκριμένη διαδικασία διόρθωσης για να μειωθεί το σφάλμα των δυο καννάβων μεταξύ τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο καννάβοι για τους οποίους πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8 : Χάρτης κλίμακας χρωμάτων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψε από την χαρτογράφηση με την Η/Μ συσκευή CM-031.

Στον παραπάνω χάρτη της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψε από την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο κινούμενου πομπού-δέκτη οι περιοχές των υψηλών τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχούν σε επιφανειακή εμφάνιση του κατακερματισμένου μαργαϊκού ασβεστόλιθου ($>150 \Omega\text{m}$), ενώ οι περιοχές με χαμηλές τιμές αντιστοιχούν σε αργίλους καστανοκόκκινου χρώματος ή/και σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο πληρωμένο με αργιλικό υλικό ($<120 \Omega\text{m}$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

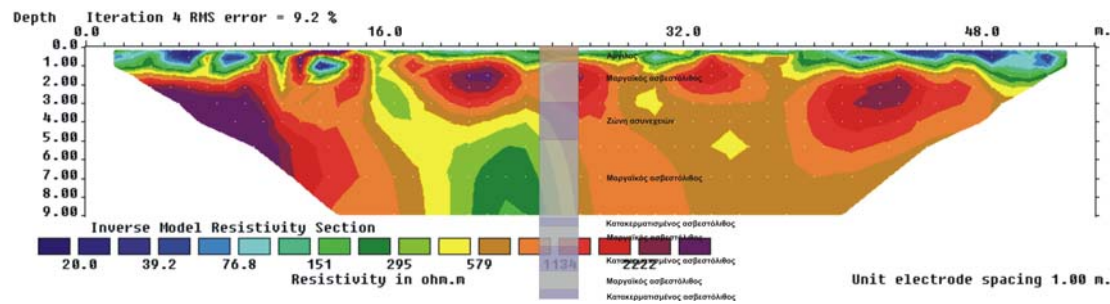
Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοθεί εκτενέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων με το πρόγραμμα Res2Dinv. Επίσης, με σκοπό τον καλύτερο προσδιορισμό της στρωματογραφίας και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της μεθόδου, θα γίνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της γραμμής μελέτης Line 4 σε συνδυασμό με την γεώτρηση MP3 που πραγματοποιήθηκε κατά την πρώτη φάση της έρευνας και της γραμμής μελέτης πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκε η γεώτρηση MP3 κατά τη δεύτερη φάση της έρευνας.

5.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΓΕΩΤΡΗΣΗ

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η βαθμονόμηση της ηλεκτρικής τομογραφίας όπως αυτή προέκυψε από τον συνδυασμό των γεωηλεκτρικής τομής Γραμμή 8 και της γεώτρησης MP3.

Γραμμή 8

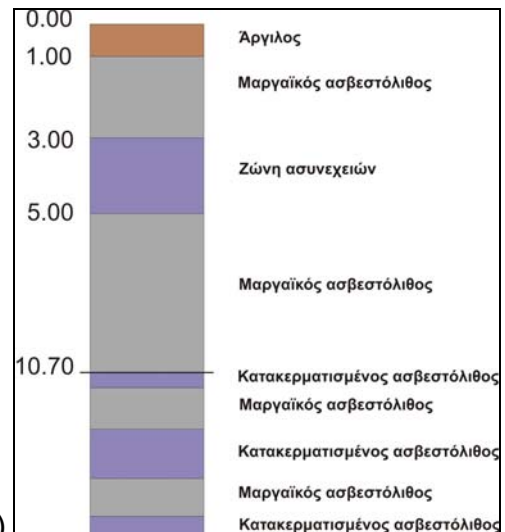
α)



β)

	Ιλυώδης Άμμος
	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος
	Ζώνη Ασυνεχειών
	Κατακερματισμένος Ασβεστόλιθος

γ)



Σχήμα 5.1 : α) Γεωηλεκτρική τομή (Γραμμή 8), β) υπόμνημα γεωλογικών σχηματισμών της γεώτρησης, γ) γεωλογική στήλη της γεώτρησης,



Στην γεωηλεκτρική τομή και στο σημείο που έγινε η γεώτρηση παρατηρείται ότι σε βάθος 1 μέτρο περίπου, οι τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων είναι μικρότερες από 200 Ωm. Όσο το βάθος μεγαλώνει υπάρχει μία αύξηση στις τιμές των αντιστάσεων (μεγαλύτερες από 900 Ωm), ενώ σε μεγαλύτερο βάθος παρατηρείται πάλι μία μείωση των τιμών που κυμαίνονται από 300 έως 700 Ωm.

Σύμφωνα με την γεώτρηση στο επιφανειακό στρώμα υπάρχει άργιλος. Στην συνέχεια, μέχρι το βάθος των τριών μέτρων εμφανίζεται υγιής μαργαϊκός ασβεστόλιθος. Από το βάθος των τριών έως και το βάθος των πέντε μέτρων υπάρχει μία ζώνη ασυνεχειών μέσα στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο, ενώ από τα

5 μέτρα μέχρι και τα 10.70 εμφανίζεται και πάλι υγιής μαργαϊκός ασβεστόλιθος.

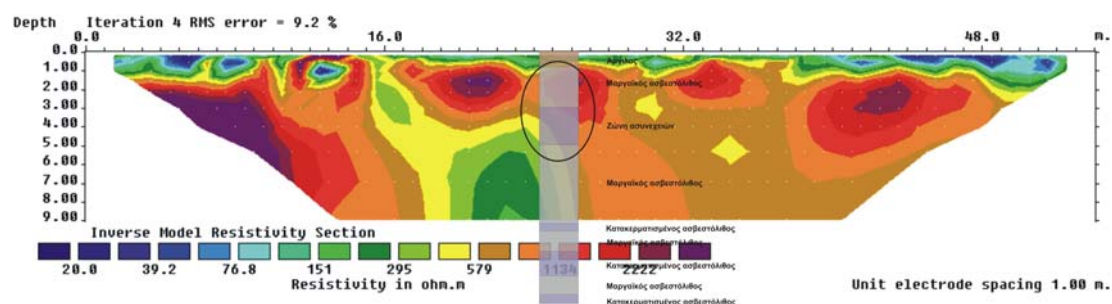
Σχετίζοντας τα στοιχεία της γεώτρησης με αυτά της ηλεκτρικής τομογραφίας και τοποθετώντας την απεικόνιση της γεώτρησης πάνω στην τομή έγινε η βαθμονόμηση της γεωηλεκτρικής τομογραφίας.

Πιο αναλυτικά το επιφανειακό στρώμα της τομής αποτελεί αργιλικό στρώμα με ηλεκτρικές αντιστάσεις που οι τιμές τους είναι μικρότερες από 200 Ωm. Στην συνέχεια παρατηρείται στην τομή μία ζώνη που οι αντιστάσεις είναι μεγαλύτερες από 900 Ωm. Οι τιμές των αντιστάσεων αυτών αντιστοιχούν σε ζώνη ασυνεχειών με κατακερματισμένο ασβεστόλιθο. Τέλος, από τα 5 μέτρα έως και τα 10 μέτρα που φτάνει το βάθος της τομογραφίας, εμφανίζεται πιο υγιής μαργαϊκός ασβεστόλιθος με ηλεκτρικές αντιστάσεις που κυμαίνονται από 300 έως 700 Ωm.

	Ιλυώδης Άμμος	< 200 Ωm
	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος	300 - 700 Ωm
	Ζώνη Ασυνεχειών & Κατακερματισμένος Ασβεστόλιθος	> 900 Ωm

Σχήμα 5.2: Βαθμονόμηση ηλεκτρικής τομογραφίας όπως αυτή προέκυψε από τον συνδυασμό των γεωηλεκτρικών τομών και γεωτρήσεων.

Παρατήρηση:



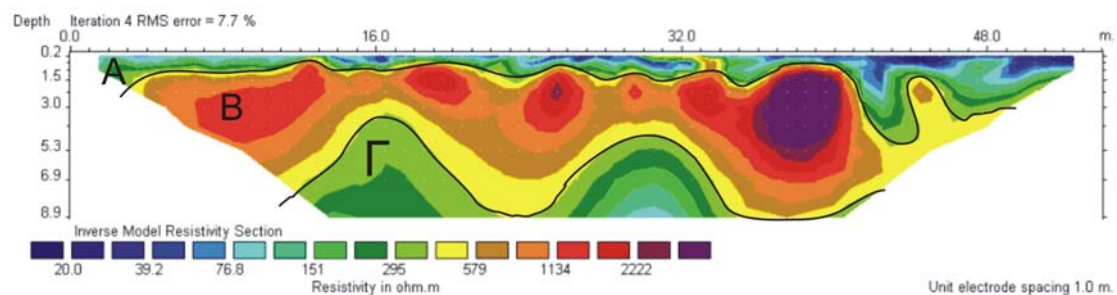
Κάτω από το επιφανειακό στρώμα της αργίλου και ανάμεσα στα στρώματα πιο υγιούς μαργαϊκού ασβεστόλιθου υπάρχει άλλο ένα στρώμα ζώνης ασυνεχειών με αντιστάσεις κοντά στα 1000 Ωm. Η διαφοροποίηση μεταξύ του υγιούς ασβεστόλιθου και της ζώνης ασυνεχειών δεν είναι έντονη με αποτέλεσμα να φαίνεται σαν ένα στρώμα υψηλών αντιστάσεων επηρεασμένο από την ζώνη ασυνεχειών.

5.3 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΟΜΩΝ

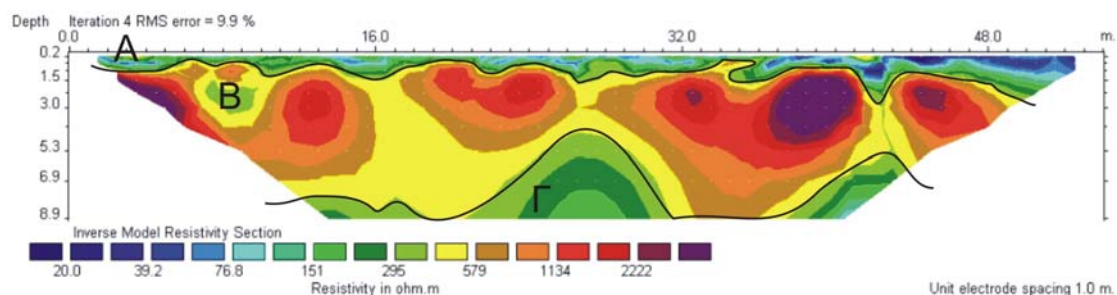
Με βάση την βαθμονόμηση της ηλεκτρικής τομογραφίας ερμηνεύθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομές που έχει να κάνει με την ύπαρξη τριών γεωηλεκτρικών ζωνών.

Παρακάτω παρατίθενται οι 15 γεωηλεκτρικές τομές πάνω στις οποίες έχει γίνει διαχωρισμός των γεωηλεκτρικών ζωνών. Με «Α» συμβολίζεται το αργιλικό στρώμα όπου οι τιμές των αντιστάσεων είναι μικρότερες από 200 Ωm. Με «Β» συμβολίζεται η ζώνη ασυνεχειών και του κατακερματισμένου ασβεστόλιθου με αντιστάσεις μεγαλύτερες από 900 Ωm, ενώ με «Γ» συμβολίζεται η ζώνη του υγιούς μαργαϊκού ασβεστόλιθου με αντιστάσεις από 300 έως 700 Ωm.

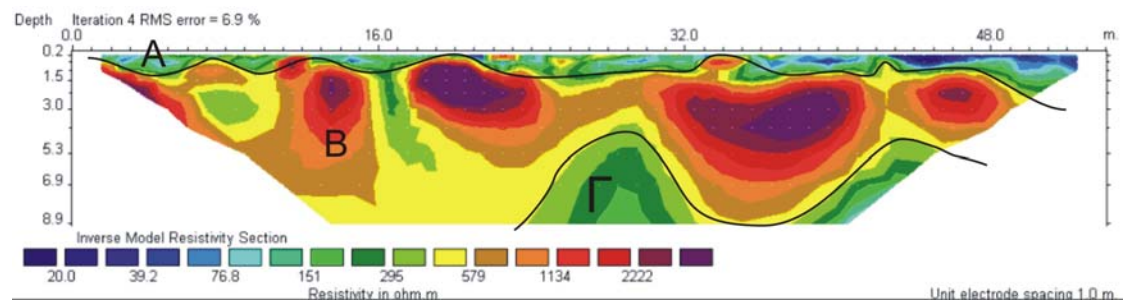
1)



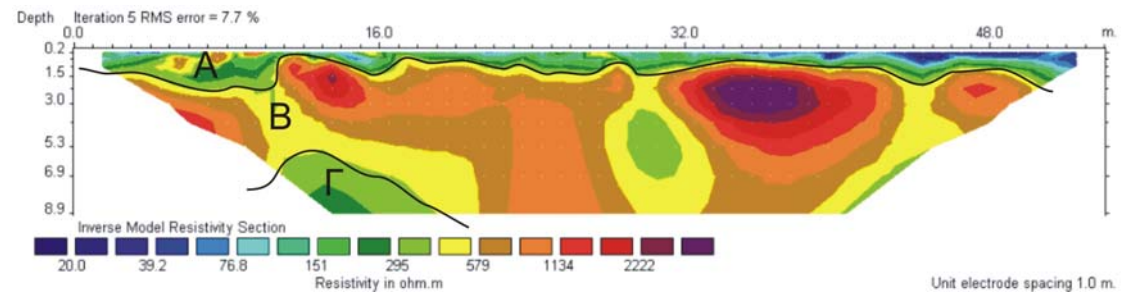
2)



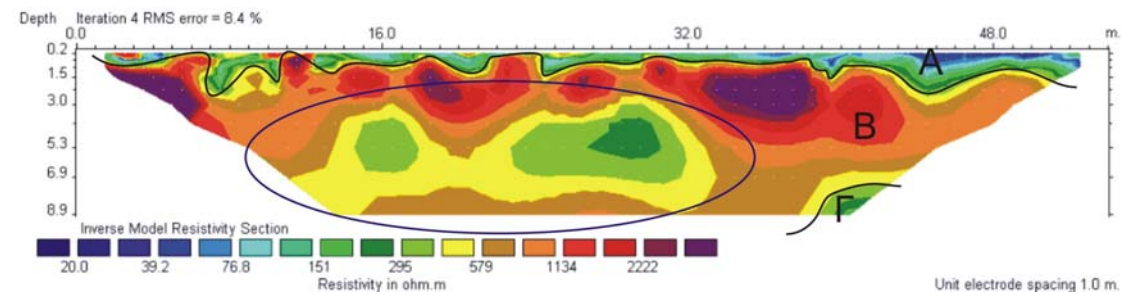
3)



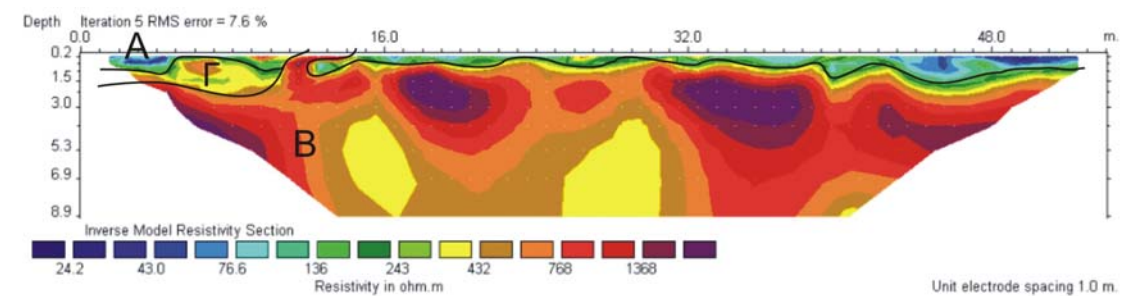
4)



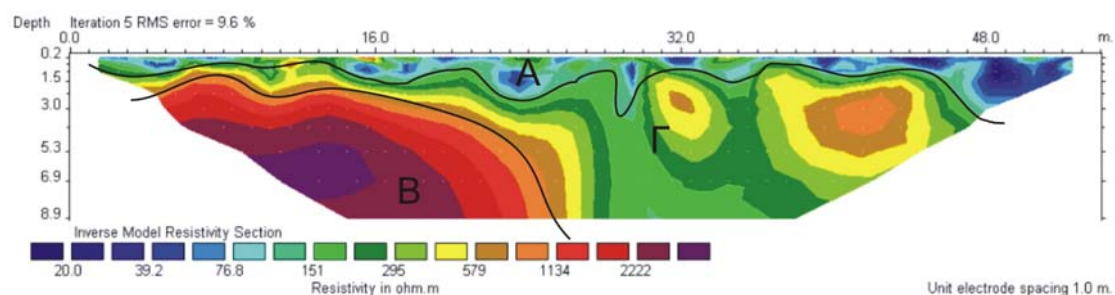
5)



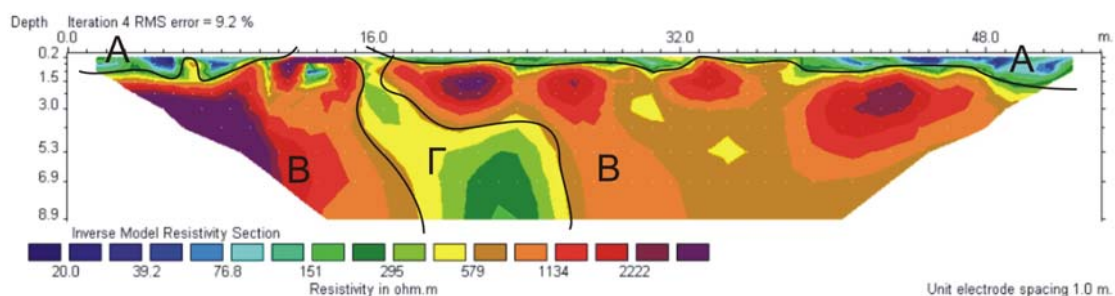
6)



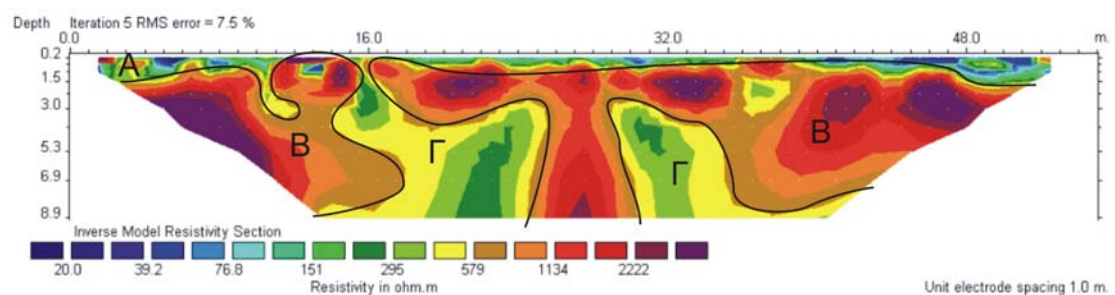
7)



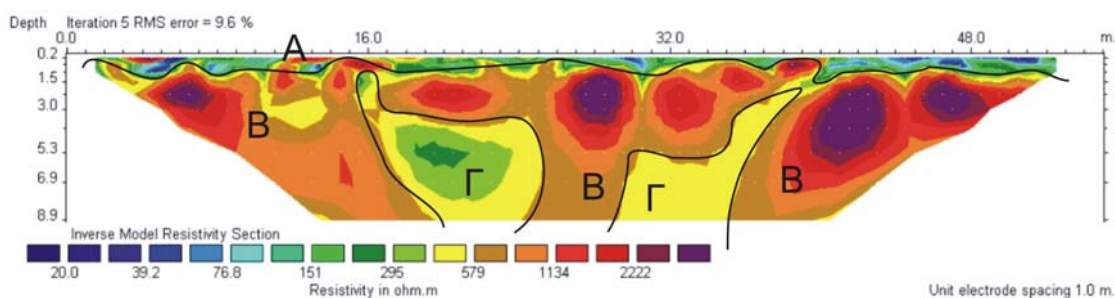
8)



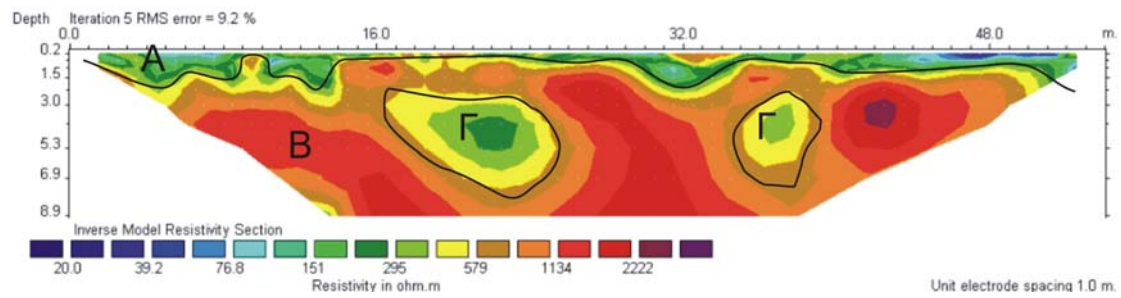
9)



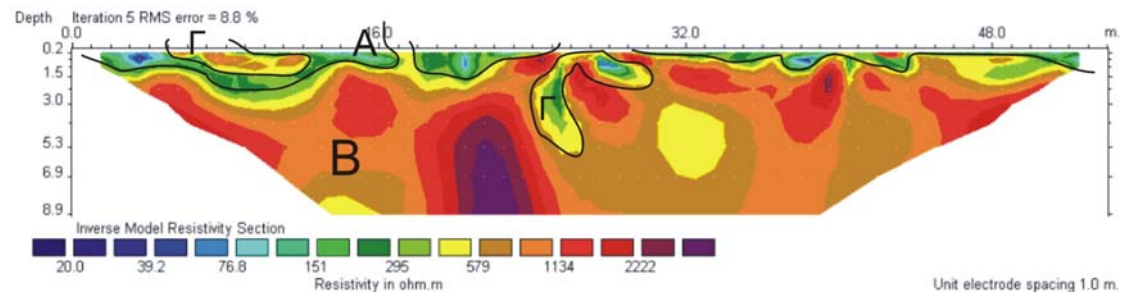
10)



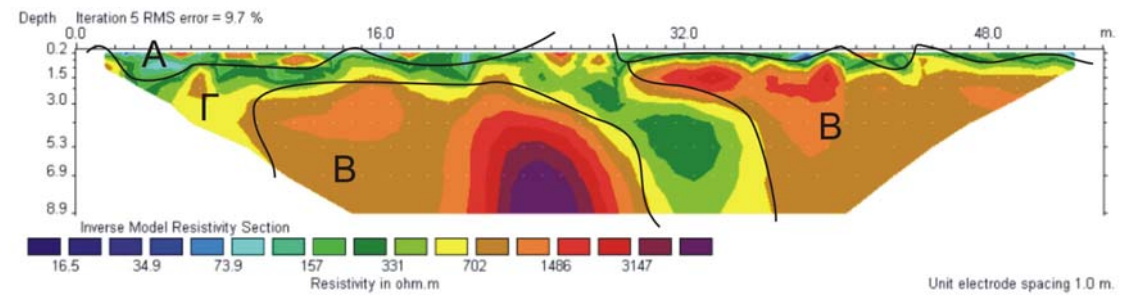
11)



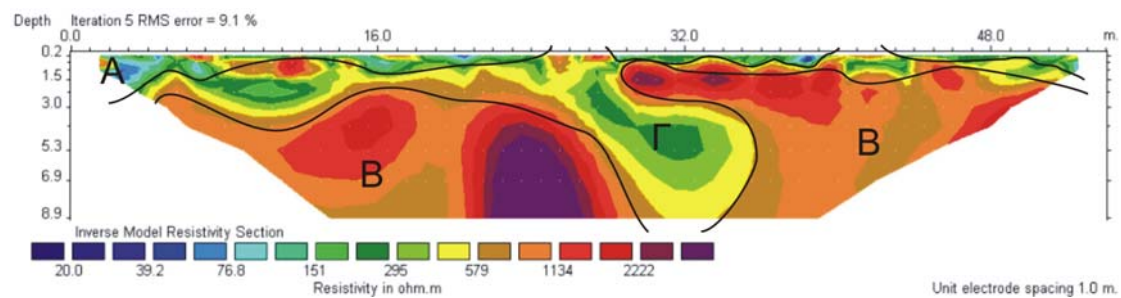
12)



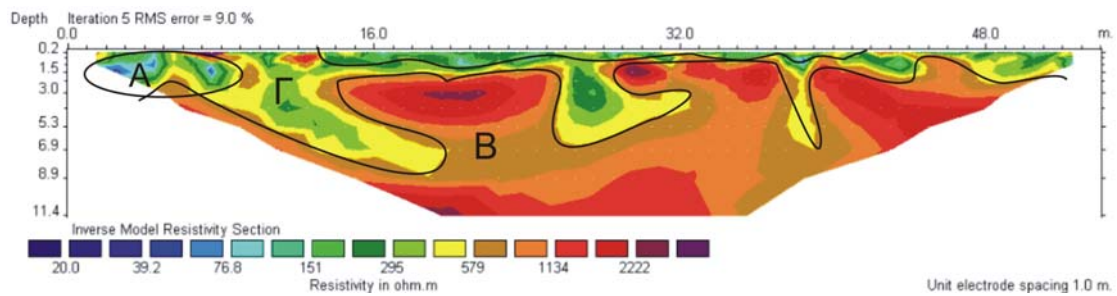
13)



14)



15)



Σχήμα 5.3 : Οι γεωηλεκτρικές τομές 1-15 χωρισμένες στις τρεις γεωηλεκτρικές ζώνες.

Η ζώνη «Α» που όπως αναφέρθηκε παραπάνω αντιστοιχεί στο αργιλικό στρώμα, εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους. Στις γεωηλεκτρικές τομές υπάρχουν σημεία με μικρές τιμές αντιστάσεων αλλά και σημεία με υψηλότερες τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται πιθανότατα στην περιεκτικότητα της αργίλου στα σημεία αυτά. Η άργιλος είναι γνωστό ότι έχει πολύ χαμηλές τιμές αντιστάσεων, επομένως σημεία με χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι αποτέλεσμα μεγάλης περιεκτικότητας σε άργιλο. Επιπλέον, εξαιτίας της χειμερινής περιόδου που πάρθηκαν οι μετρήσεις, οι μικρές τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων μπορεί να οφείλονται και στην παρουσία νερού λόγω βροχής. Το νερό, ως καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, αφήνει το ρεύμα να περάσει με μεγαλύτερη ευκολία.

Η ζώνη «Β» αντιστοιχεί στην ζώνη ασυνεχειών και κατακερματισμένου ασβεστόλιθου. Η ζώνη αυτή αποτελεί ζώνη μαργαϊκού ασβεστόλιθου, με την παρουσία όμως εγκοίλων και ασυνεχειών διαφοροποιείται από τον υγιή μαργαϊκό ασβεστόλιθο. Στην προκειμένη περίπτωση η διαφοροποίηση των ηλεκτρικών αντιστάσεων οφείλεται κυρίως στις ασυνέχειες αλλά και σε μικρά έγκοιλα που υπάρχουν στο πέτρωμα. Τα έγκοιλα είναι υπόγειοι κενοί χώροι που δημιουργούνται από την διάβρωση του νερού στο πέτρωμα. Αυτά μπορεί να είναι πληρωμένα είτε με αέρα, είτε με νερό. Στην περίπτωση πλήρωσης τους με αέρα, όπως συμβαίνει στην προκειμένη περίπτωση, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις παρουσιάζουν μεγάλες τιμές εξαιτίας του ότι ο αέρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού και δεν αφήνει τον ρεύμα να περάσει εύκολα όπως συμβαίνει στην περίπτωση του νερού. Έτσι, τα σημεία όπου υπάρχουν

υψηλές τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων είναι σημεία με ασυνέχειες και αρκετά μεγάλο αριθμό εγκοίλων τα οποία είναι πληρωμένα με αέρα.

Η ζώνη «Γ» αντιστοιχεί στην ζώνη του υγιούς μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Οι τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο έχουν να κάνουν με την σύσταση του ασβεστόλιθου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ****6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Διασκοπήθηκαν 15 γραμμές μελέτης συνολικού μήκους 810 μέτρων. Οι γραμμές μελέτης οριοθετούνται πάνω στον κάνναβο 1 όπου θα ανεγερθεί το ένα από τα τρία νέα κτίρια.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η ηλεκτρική τομογραφία και οι μετρήσεις λήφθηκαν σύμφωνα με την διάταξη Διπόλου – Διπόλου. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με το πρόγραμμα Res2Dinv.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής διασκόπησης και των γεωτρητικών δεδομένων, προέκυψαν τα εξής:

- Ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος εμφανίζει κατά περιοχές ζώνες ασυνεχειών πληρωμένες ή μη με αργιλικό υλικό, οι οποίες απεικονίστηκαν στις γεωηλεκτρικές τομές..
- Το εδαφικό κάλυμμα αποτελείται από άργιλο καστανοκόκκινου χρώματος, του οποίου το μέγιστο πάχος σύμφωνα με τις γεωηλεκτρικές τομές είναι 2 m.
- Οι ζώνες χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($<200 \Omega m$) αποδίδονται σε αργιλικούς σχηματισμούς ή σε ζώνες ασυνεχειών μέσα σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο πληρωμένες με αργιλικό υλικό. Οι ζώνες πολύ υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($>900 \Omega m$) αποδίδονται σε ζώνες ασυνεχειών μέσα σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο χωρίς αργιλικό υλικό ή σε κατακερματισμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο. Τέλος, οι ζώνες με ενδιάμεσες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($300-700 \Omega m$) αποδίδονται σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα προαναφερθέντα συμπεράσματα της γεωφυσικής διασκόπησης προτείνεται η τρισδιάστατη επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας για την λεπτομερέστερη απεικόνιση του υπεδάφους. Επιπλέον, σε θέσεις που παρατηρούνται έγκοιλα προτείνεται η διασκόπηση και με άλλες γεωφυσικές μεθόδους, όπως γεωραντάρ, μετά την εκσκαφή και πριν την θεμελίωση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Anderson, N., Apel, B. and Ismail A. (2006).** Assessment of Karst Activity at Highway Construction Sites Using the Electrical Resistivity Method (Greene and Jefferson Counties, Missouri). *Missouri Transportation Institute and Missouri Department of Transportation*. Report No. OR 07-003.
2. **Anderson, N., Croxton, N., Hoover, N. and Sirles, P. (2008).** Geophysical Methods Commonly Employed for Geotechnical Site Characterization, *Transportation Research Board Exploration and Classification of Earth Materials Committee*, Number E-C130.
3. **Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A. and Di Filippo, A. (2009).** Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities, *Geophysical Prospecting*, Vol. 58, pp. 685- 695.
4. **Constable SC, Parker RL, Constable CG. (1987).** Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics* 52(3): 289–300
5. **De groot-Hedlin C, Constable S. (1990).** Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics* 55: 1613–1624.
6. **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.
7. **Inman, J.R., (1975).** Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40, 788-817.
8. **Lines L.R. and Treitel S. (1984).** Tutorial : A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
9. **Loke M.H (1999).** Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Τελευταία ενημέρωση: 10 Αυγούστου 2000.

10. **Loke M.H. (1996-2004).** Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Τελευταία ενημέρωση: 26 Ιουλίου 2004
11. **Loke MH, Barker RD. 1996.** Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44: 499–523.
12. **Loke M.H. and Barker R.D. (1996,1996a).** Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131–152.
13. **Loke, M.H., (1999).** Time-lapse resistivity imaging inversion. *Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Em1.*
14. **Loke, M.H., (2000).** Topographic modelling in resistivity imaging inversion. *62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.*
15. **Muchaidze, I. (2008).** Imaging in Karst terrain using electrical resistivity tomography. A thesis. Missouri University of Science and Technology.
16. **Myat, M., Wamweya, A., Kovin, O., Anderson, N. and Robison, J. (2008).** Application of electrical resistivity method in steeply dipping Karst terrane. *American Society of Civil Engineers.*
17. **Soltau, L.E. and Anderson, N. (2006).** An integrated geophysical survey of groundwater resources, Mamre Area, western Cape Province. *Geological Society of South Africa*, Vol. 109, pp. 433-438.
18. **Tsourlos, P. (1995).** Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. *Unpublished PhD thesis*, University of York.
19. **Stepisnik, U. (2008).** The Application of Electrical Resistivity Imaging in Collapse Doline Floors: Divaca Karst, Slovenia. *Studia Geomorphologica Carpatho- Balcanica*. Vol. XLII, 2008: 41–51.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Βαφειίδης, Α. (1993).** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι, Σεισμικές μέθοδοι. *Σημειώσεις μαθήματος*. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.
2. **Βαφειίδης, Α. (2001).** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική ΙΙ. *Σημειώσεις μαθήματος*. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.
3. **Βαφειίδης, Α. και Αγιουτάντης, Ζ. (2009).** Γεωφυσική Διασκόπηση για τον χαρακτηρισμό γεωλογικών σχηματισμών σε οικοπεδική έκταση μελλοντικής ανέγερσης των κτιριακών εγκαταστάσεων του τμήματος Μη.Περ. του Πολυτεχνείου Κρήτης. *Έκθεση. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείου Κρήτης*.
4. **Καβαδάς, Μ. (2007).** Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής. *Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου*. Αθήνα.
5. **Λούης, Ι. (2004).** Εισαγωγικά Μαθήματα στην Διερευνητική Γεωφυσική. *Σημειώσεις μαθήματος*. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστημίου Αθήνας.
6. **Μούγιου, Β. (2007).** “Τρισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία στον αρχαιολογικό χώρο Άπτερας, Χανίων”, *Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης*.
7. **Παπαδόπουλος, Τ. και Αλεξόπουλος, Ι. (2008).** Εισαγωγή στην Γεωφυσική. *Σημειώσεις μαθήματος*. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
8. **Παρίσης, Γ. (2010).** “Μελέτη της Πολυστρωματικής Δομής του Εδάφους και Τεχνικών Προσομοίωσής του”, *Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης*.
9. **Τσούρλος, Π., Βαργεμέζης, Γ., Σταμπολίδης, Α. και Η. Φίκος. (2011).** Γεωφυσικές μετρήσεις στην περιοχή του Δ.Δ Μαυροπηγής του Δ. Πτολεμαΐδας. *Εξαμηνιαία Έκθεση. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

1. http://www.civ.uth.gr/lessons/52%5Ckephalaio_1.pdf
2. <http://galitzin.mines.edu/INTROGP/index.jsp>
3. www.geo.auth.gr/762/
4. www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e_lab/PDF/LAB_1_theory.pdf
5. <http://geophysics.ou.edu/enviro/electric/index.html>
6. www.geoservice.gr
7. <http://emeric.ims.forth.gr/>
8. www.ims.forth.gr
9. <http://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY113/exams/200709/resistivity.pdf>