

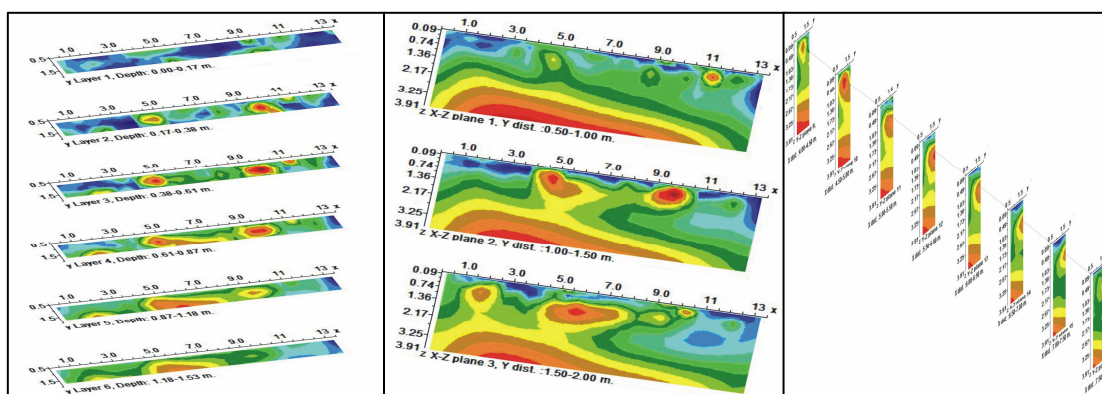


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΤΟΝ
ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΑΙΠΤΕΡΑΣ, ΧΑΝΙΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΥΓΙΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Εξεταστική επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ. (επιβλέπων)

Περδικάτης Βασίλειος, Καθηγητής Π.Κ.

Σουπιός Παντελής, Επίκουρος Καθηγητής Τ.Κ.

ΧΑΝΙΑ

Δεκέμβριος 2007

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων στην αρχαιολογική έρευνα. Ειδικότερα, εξετάζεται η συμβολή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας στην προσπάθεια απεικόνισης θαμμένων αρχαιοτήτων.

Το Σεπτέμβριο του 2005 πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα, στον αρχαιολογικό χώρο της Άπτερας, Χανίων, υπό την αιγίδα της 25^{ης} Εφορείας Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων. Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την επεξεργασία και ερμηνεία της γεωφυσικής διασκόπησης.

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον κ. Αντώνιο Βαφείδη, επιβλέποντα Καθηγητή και Πρόεδρο του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ανάθεση της εργασίας, τη διαρκή καθοδήγησή του καθ' όλα τα στάδια της εκπόνησής της και τη συνεχή υποστήριξη.

Τα μέλη της επιτροπής, κ. Περδικάτση Βασίλειο, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, και κ. Σουπιό Παντελή, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή καθώς και για τις επισημάνσεις και παρατηρήσεις τους με τις οποίες συνέβαλαν στην τελική μορφή της εργασίας αυτής.

Τον υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Hamdan Hamdan για το χρόνο, την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την οικονομική και ηθική υποστήριξη που προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια, όπως επίσης και στους αγαπημένους μου φίλους που ήταν πάντα στο πλάι μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γεωφυσική μέθοδος της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας απεικονίζει με καλύτερη ακρίβεια τις γεωλογικές δομές οι οποίες είναι συνήθως τρισδιάστατες. Οι τρισδιάστατες έρευνες αποτελούν ένα αντικείμενο της ενεργούς έρευνας. Αλλά αυτή η μέθοδος απαιτεί την συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων με αποτέλεσμα να μην τυγχάνει ευρείας εφαρμογής.

Στην παρούσα διπλωματική διερευνάται η δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης του υπεδάφους με τη χρήση δεδομένων τα οποία συγκεντρώθηκαν με την κλασική μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας (δισδιάστατη).

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε δεδομένα από τον αρχαιολογικό χώρο της Άπτερας, Χανίων, όπου απεικονίστηκαν υπολείμματα θαμμένων τοίχων στα Ρωμαϊκά Λουτρά, οι οποίοι οριοθετούν δύο δωμάτια και πιθανόν πετρόκτιστου διαδρόμου που τα συνδέει με διπλανό οίκημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xvi
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Εξέλιξη γεωφυσικών διασκοπήσεων στην αρχαιολογική έρευνα.....	1
1.2. Σκοπός και παράμετροι μιας γεωφυσικής διασκόπησης.....	3
1.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της γεωφυσικής διασκόπησης στην αρχαιολογία.....	5
1.4. Μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης.....	7
1.4.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης.....	8
1.4.1.1. Η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	8
1.4.2. Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι.....	9
1.4.2.1 Η Μέθοδος του Γεωραντάρ.....	9
1.4.3. Βαρυτικές και Μαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης.....	10
1.4.3.1 Μαγνητική Διασκόπηση.....	11
1.4.3.2. Βαρυτική Διασκόπηση.....	13
1.4.4. Σεισμικές μέθοδοι.....	14
1.4.4.1. Σεισμική Ανάκλαση.....	14
1.4.4.2. Σεισμική Διάθλαση.....	14
1.4.5. Γεωθερμική μέθοδος.....	15
1.4.6. Γεωχημική μέθοδος.....	15
1.4.7. Ραδιομετρική μέθοδος.....	15
1.5. Δομή διπλωματικής εργασίας.....	16
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	17
2.1. Εισαγωγή.....	17

2.2. Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	19
2.2.1. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη.....	23
2.2.2. Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	27
2.2.3. Διατάξεις των ηλεκτροδίων.....	28
2.2.4. Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.....	35
2.2.5. Μέθοδοι έρευνας.....	36
2.2.5.1. Βυθοσκοπήσεις.....	36
2.2.5.2. Οριζοντιογραφίες.....	37
2.3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	38
2.3.1. Βασική θεωρία αντιστροφής.....	40
2.3.2 Μέθοδοι δισδιάστατης έρευνας.....	44
2.3.3. ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ.....	48
2.4. Το πρόγραμμα RES2DINV.....	51
2.4.1. Γενικά.....	51
2.4.2. Εγκατάσταση και περιγραφή των βημάτων.....	57
2.5. Το πρόγραμμα RES3DINV.....	60
2.5.1 Εισαγωγή στις τρισδιάστατες έρευνες.....	60
2.5.2. Το λογισμικό πακέτο RES3DINV	62
2.5.3. Επεξεργασία δεδομένων.....	64
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	 68
3.1. Περιγραφή και ιστορία του αρχαιολογικού χώρου της Άπτερας.....	68
3.2. Περιοχή μελέτης.....	72
3.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	74
3.3.1. Διόρθωση συντεταγμένων.....	74
3.3.2. Αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων με το πρόγραμμα Res2dinv.....	77
3.3.2.1. KANNABOS B1.....	77
3.3.2.2. KANNABOS B2.....	78
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	 79
4.1. Εισαγωγή.....	79
4.2. Επεξεργασία μετρήσεων του καννάβου 1.....	80

4.3. Επεξεργασία μετρήσεων του καννάβου 2.....	88
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....104

5.1. Συμπεράσματα.....	104
------------------------	-----

5.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρικής τομογραφίας.....	107
--	-----

5.3. Προτάσεις.....	108
---------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....109

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ.....124

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DINV.....150

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DINV.....165

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

2.1: Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων, εδαφών και μεταλλευμάτων. (Loke,2004)	20
2.2: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου.....	23
2.3: Διάταξη των ηλεκτροδίων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN)	24
2.4: Ομοιόμορφη ροή ηλεκτρικών φορτίων προς όλες τις κατευθύνσεις σε ομογενές μέσο. (Γκανιάτσος, 2000)	25
2.5: Απεικόνιση του δυναμικού πεδίου με δυναμικές γραμμές (Reynolds, 1997)	27
2.6: Σχηματική παρουσίαση 10 διατάξεων ηλεκτροδίων (Torleif Dahlin and Bing Zhou, 2004)	29
2.7: Διατάξεις Wenner (α), Schlumberger (β), διπόλου-διπόλου (γ) (Παπαζάχος, 1986, σελ. 253).	30
2.8: Η διάταξη διπόλου-διπόλου.	33
2.9: Τετραγωνική διάταξη.....	34
2.10: Διάταξη διπλού ηλεκτροδίου (www.ims.forth.gr)	37
2.11: Η ρύθμιση των ηλεκτροδίων για μια δισδιάστατη ηλεκτρική έρευνα και η ακολουθία μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν μια ψευδοτομή (Loke,2004)	45
2.12: Μέθοδος της κυλιόμενης μεταφοράς. (Loke,2004)	47
2.13: Η διάταξη διπόλου-διπόλου, (Τσόκας,2007)	48
2.14: Δισδιάστατα τμήματα ευαισθησίας της διάταξης διπόλου-διπόλου με (α) $n=1$, (β) $n=2$, (γ) $n=4$ και (δ) $n=6$. (Loke,2004)	49
2.15. Δύο πιθανές διαφορετικές ρυθμίσεις για μια μέτρηση με την διάταξη διπόλου-διπόλου. (Loke,2004)	50
2.16. Ένα παράδειγμα δεδομένων με σημαντικό σφάλμα. Προφανώς, το σημείο αυτό βρίσκεται κάτω από 300 μέτρα και 470 μέτρα στην οριζόντια διάσταση. (α) τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με μορφή ψευδοτομής και με (β) μορφή σχεδιαγράμματος. (Loke,1999)	55

2.17: 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.....	56
2.18: Παράδειγμα αντιστροφής δεδομένων γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας. Η 1 ^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2 ^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3 ^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.	59
2.19: Τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη έρευνα. (α) Σταθερό πρότυπο όπου τα πλάτη των ορθογώνιων κελιών είναι ίσα με το διάστημα ηλεκτροδίων στην X και Y διεύθυνση. (β) Ένα πρότυπο όπου μερικά από τα άνω στρώματα είναι διαιρεμένα στο μισό τόσο στην κάθετη όσο και στην οριζόντια διεύθυνση, ώστε να παρέχεται καλύτερη ανάλυση. (γ) Ένα πρότυπο όπου τα πρότυπα κελιά είναι διαιρεμένα στην οριζόντια διεύθυνση, αλλά όχι στην κάθετη.	62
2.20: Σχηματικό διάγραμμα μιας τρισδιάστατης έρευνας. (Geotomo Software, 2006)	63
2.21: Το βασικό μενού του προγράμματος RES3DINV.....	64
2.22: Η εντολή display model options.....	65
2.23: Η εντολή “ Select Type of Contour Intervals”	65
2.24: Η εντολή “Logarithmic Contour Intervals.....	66
2.25 : Οριζόντιες τομές που προέκυψαν από το πρόγραμμα RES3DINV.....	67
3.1 : Γενική άποψη του αρχαιολογικού χώρου της Άπτερας (www.crete.tournet.gr)	68
3.2 : Βυζαντινή Μονή του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου (www.crete.tournet.gr)	69
3.3: Το Τουρκικό κάστρο στην Απτέρα (www.crete.tournet.gr)	70
3.4: Ρωμαϊκές δεξαμενές (www.crete.tournet.gr)	70
3.5: Το "διμερές ιερό" (www.crete.tournet.gr)	71
3.6: Τοπογραφικός χάρτης της Άπτερας με τα αρχαιολογικά ευρήματα (www.just-crete.co.uk)	72

3.7: Τοπογραφικός χάρτης του αρχαιολογικού χώρου των Απτέρων (ισοϋψείς ανά 1 μέτρο). Με κόκκινο περίγραμμα οριοθετείται η περιοχή Β που αποτελείται από τους επιμέρους καννάβους Β1, Β2, όπου αναγράφονται οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν. (Βαφείδης, 2007)	73
3.8: Ο μετρητής αντίστασης STING R1 (Advanced Geosciences, Inc, 1999)	74
3.9: Γεωηλεκτρική τομή για την πέμπτη γραμμή της περιοχής Β1.	77
3.10: Γεωηλεκτρική τομή για την όγδοη γραμμή της περιοχής Β2.....	78
4.1: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	81
4.2: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	81
4.3: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	82
4.4: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	83
4.5: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	83
4.6: Γεωηλεκτρική τομή της τέταρτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	84
4.7: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή	84
4.8: Γεωηλεκτρική τομή της πέμπτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή. Εδώ εμφανίζεται και πάλι η ηλεκτρική ανωμαλία ($\alpha 1$) και διακρίνεται η ανωμαλία ($\alpha 2$).....	85
4.9: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου Β1.....	86
4.9: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου Β1 (συνέχεια).....	87
4.10: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου Β1.....	88
4.11: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	89
4.12: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	89
4.13: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	90
4.14: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	91
4.15: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	91
4.16: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	92
4.17: Γεωηλεκτρική τομή της τέταρτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	92
4.18: Γεωηλεκτρική τομή της τέταρτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	93
4.19: Γεωηλεκτρική τομή της πέμπτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	93
4.20: Γεωηλεκτρική τομή της πέμπτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	94
4.21: Γεωηλεκτρική τομή της έκτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.	94

4.22: Γεωηλεκτρική τομή της έκτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	95
4.23: Γεωηλεκτρική τομή της έβδομης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	95
4.24: Γεωηλεκτρική τομή της έβδομης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	95
4.25: Γεωηλεκτρική τομή της όγδοης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	96
4.26: Γεωηλεκτρική τομή της όγδοης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	96
4.27: Γεωηλεκτρική τομή της ένατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	96
4.28: Γεωηλεκτρική τομή της ένατης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	97
4.29: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	97
4.30: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	97
4.31: Γεωηλεκτρική τομή της ενδέκατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	98
4.32: Γεωηλεκτρική τομή της ενδέκατης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	98
4.33: Γεωηλεκτρική τομή της δωδέκατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	98
4.34: Γεωηλεκτρική τομή της δωδέκατης γραμμής από τρिसδιάστατη αντιστροφή.....	99
4.35: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης-τρίτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	99
4.36: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης-τρίτης γραμμής από τρिसδιάστατη αντιστροφή.	100
4.37: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης-τέταρτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.	100
4.38: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης τέταρτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.....	101
4.39: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης πέμπτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.....	101
4.40: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου B2.	102
4.40: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου B2 (συνέχεια)	103
5.1: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές του καννάβου B2 σε διεύθυνση X-Y.....	106
A.1: Γεωηλεκτρική τομή για την πρώτη γραμμή της περιοχής B1. Παρατηρούμε ότι η γραμμή αυτή έχει μεγάλο σφάλμα.....	124
A.2: Γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη γραμμή της περιοχής B1.....	125
A.3: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής B1.....	125

A.4: Γεωηλεκτρική τομή για την τέταρτη γραμμή της περιοχής B1.....	126
A.5: Γεωηλεκτρική τομή για την πέμπτη γραμμή της περιοχής B1.....	126
A.6: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής B1 με κλίμακα 1, όπου παρατηρούμε ότι δεν έχει τόσο ευκρινής ανάλυση.	127
A.7: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής B1 με κλίμακα 2, όπου παρατηρούμε ότι κι αυτή δεν παρέχει αξιόπιστα συμπεράσματα.....	127
A.8: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση Ψ-Z του καννάβου B1 με κλίμακα 3.....	129
A.9: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο 1 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση X-Y.	130
A.10: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο 1 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση X-Z.	130
A.11: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο 1 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση Y-Z.	131
A.12: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο 1 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση X-Y.	132
A.13: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο 1 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση X-Z.	132
A.14: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο 1 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση Y-Z.	133
A.15: Γεωηλεκτρική τομή για την πρώτη γραμμή της περιοχής B2.....	134
A.16: Γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη γραμμή της περιοχής B2.....	134
A.17: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής B2.	135
A.18: Γεωηλεκτρική τομή για την τέταρτη γραμμή της περιοχής B2.	135
A.19: Γεωηλεκτρική τομή για την πέμπτη γραμμή της περιοχής B2.....	136
A.20: Γεωηλεκτρική τομή για την έκτη γραμμή της περιοχής B2.....	136
A.21: Γεωηλεκτρική τομή για την έβδομη γραμμή της περιοχής B2.	137
A.22: Γεωηλεκτρική τομή για την όγδοη γραμμή της περιοχής B2.	137
A.23: Γεωηλεκτρική τομή για την ένατη γραμμή της περιοχής B2.	138
A.24: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη γραμμή της περιοχής B2.	138
A.25: Γεωηλεκτρική τομή για την ενδέκατη γραμμή της περιοχής B2.	139
A.26: Γεωηλεκτρική τομή για τη δωδέκατη γραμμή της περιοχής B2.	139
A.27: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη-τρίτη γραμμή της περιοχής B2.....	140
A.28: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη-τέταρτη γραμμή της περιοχής B2.	140

A.29: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη-πέμπτη γραμμή της περιοχής B2.	141
A.30: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής B2 με κλίμακα 1, όπου παρατηρούμε ότι η ανάλυση είναι αναξιόπιστη.	141
A.31: Γεωηλεκτρική τομή για την τελευταία γραμμή της περιοχής B2 με κλίμακα 2. Παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από την κλίμακα 1, αλλά όχι από την τρίτη κλίμακα που επιλέχθηκε.....	142
A.32: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση Y-Z του καννάβου 2 με κλίμακα 3.....	145
A.33: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο 2 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση X-Y.	146
A.34: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο 2 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση X-Z.	146
A.35: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο 2 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση Y-Z.	147
A.36: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο 2 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση X-Y.	148
A.37: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο 2 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση X-Z.	148
A.38: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο 2 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση Y-Z.	149
B.1: Το μενού File	150
B.2: Το μενού Edit.	152
B.3: Το μενού Change settings.	153
B.4: Το μενού Inversion.	155
B.5: Το μενού Display.	158
B.6: Το υπομενού File.	158
B.7: Το υπομενού Display.	159
B.8: Το υπομενού Change display sections.	160
B.9: Το υπομενού Edit data.	162
B.10: Το υπομενού Print.	162
B.11: Το μενού Topography options.	162
B.12: Το μενού Print.	163
B.13: Το μενού Help.	163
B.14: Το μενού Quit.	164

Γ.1: Το μενού File.....	165
Γ.2: Το μενού Change settings.	167
Γ.3: Το μενού Inversion.	168
Γ.4: Το μενού Display.	169
Γ.5: Το υπομενού File.	169
Γ.6: Το υπομενού Display.	170
Γ.7: Το υπομενού Change display sections.....	171
Γ.8: Το υπομενού Edit data.	172
Γ.9: Το υπομενού Print.....	173
Γ.10: Το μενού Help.	173
Γ.11: Το μενού Quit.	173

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Παράδειγμα μετρήσεων.....	75
Πίνακας 3.2: Διορθωμένες μετρήσεις.....	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εξέλιξη γεωφυσικών διασκοπήσεων στην αρχαιολογική έρευνα.

Η εφαρμογή των θετικών επιστημών στην αρχαιολογία είναι πλέον καθιερωμένη. Η γεωφυσική διασκόπηση εμπλουτίζει την αρχαιολογική έρευνα προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες τόσο στην αρχαιολογική κοινότητα όσο και σε άλλους ενδιαφερόμενους φορείς.

Οι τεχνικές των γεωφυσικών διασκοπήσεων αποβλέπουν στην αποτύπωση του επιφανειακού και του υπεδάφειου περιβάλλοντος. Η περιβαλλοντική αρχαιολογία, μέσω της ανάλυσης βιο-αρχαιολογικών καταλοίπων στοχεύει στην διερεύνηση προβλημάτων που σχετίζονται με την αρχαία οικονομία, κοινωνία και την διαχείριση του αρχαίου περιβάλλοντος. Οι παραπάνω μέθοδοι, συνδυάζοντας τον αρχαιολογικό προβληματισμό με σύγχρονες τεχνικές και μεθοδολογίες επιτρέπουν την διερεύνηση θεμάτων απρόσιτων με τις παραδοσιακές αρχαιολογικές μεθόδους και την ουσιαστική ένταξη των αρχαιολογικών χώρων με το άμεσο και ευρύτερο περιβάλλον τους.

Η ραγδαία εξέλιξη των τεχνικών αυτών όσον αφορά τη ταχύτητα επιφανειακής κάλυψης, τη ποιότητα και ακρίβεια των μετρήσεων, τη διαδικασία επεξεργασίας και αποτύπωσης των δεδομένων και τον τρόπο αξιολόγησης και διαχείρισης των πληροφοριών έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην εφαρμογή τους σε σχέση με τον εντοπισμό, μελέτη και προστασία των πολιτισμικών και φυσικών πόρων. Έχουν καταστεί απαραίτητες η παρακολούθηση κι αφομοίωση της εξελικτικής πορείας της τεχνολογίας καθώς και ο προσανατολισμός της συγκεκριμένης τεχνογνωσίας στους θεωρητικούς και πρακτικούς προβληματισμούς που απασχολούν την αρχαιολογική κοινότητα.

Η σύγχρονη τεχνολογία (βελτιωμένες γεωφυσικές διατάξεις εντοπισμού και ανίχνευσης του υπεδάφους, όργανα μικροσκοπικής ανάλυσης σχεδιασμού και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών) προσδίδει νέες διαστάσεις στην αρχαιολογία και η αξιοποίησή της επέρχεται μόνο εφόσον υπάρχει συνεργασία ανάμεσα στους φορείς σε όλη την διάρκεια της αρχαιολογικής έρευνας, η οποία λόγω των παραπάνω μετονο-

μάζεται σε Αρχαιομετρία. Η συντονισμένη προσπάθεια διαφορετικών μέσων προσέγγισης των αρχαιολογικών δεδομένων και του περιβάλλοντος αποτελεί ίσως την μοναδική λύση για μία ολοκληρωμένη μελέτη, ανάδειξη και προβολή των αρχαιολογικών και ιστορικών μνημείων μέσα στον περιβάλλοντα χώρο τους.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1940, οι γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης εφαρμόζονται στον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων. Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται στην εξερεύνηση αρχαιολογικών χώρων σε παγκόσμια κλίμακα και αναφέρονται σ' όλα τα βιβλία εισαγωγής στην αρχαιολογική επιστήμη. Στηρίζονται στο γεγονός ότι οι αρχαιότητες αποτελούν διαταράξεις στην ομοιογένεια των ανώτερων στρωμάτων της γης, και επομένως προκαλούν ανωμαλίες σε φυσικά ή τεχνητά πεδία. Οι ανωμαλίες αυτές καταγράφονται με τη βοήθεια κατάλληλων οργάνων, επεξεργάζονται βάσει διεθνώς παραδεκτών μεθόδων και τελικά παρουσιάζεται κυρίως μια χαρτογράφηση των υπεδάφίων αρχιτεκτονικών λειψάνων.

Η εισαγωγή των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην αρχαιολογική έρευνα στον διεθνή χώρο έγινε με το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου. Οι πρώτες δοκιμές έγιναν στην Αγγλία, τόσο της ηλεκτρικής μεθόδου το 1946 όσο και της μαγνητικής το 1958 (Aitken, 1974) .

Στις μέρες μας, η βασική έρευνα στις μεθόδους αυτές είναι προσανατολισμένη σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Όσον αφορά τη μαγνητική μέθοδο διασκόπησης, έχει εισαχθεί η λεγόμενη τεχνολογία των picoTesla, δηλαδή όργανα που είναι ικανά να μετρήσουν το μαγνητικό πεδίο με πολύ μεγάλη ακρίβεια και να πραγματοποιούν συνεχή καταγραφή. Τα όργανα αυτά είναι τοποθετημένα σε κινούμενα συστήματα έτσι, ώστε να μπορούν να εξερευνούν μεγάλες εκτάσεις σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα. Ταυτόχρονα, η μεγάλη ευαισθησία τους τα καθιστά ικανά να διακρίνουν σήματα που προέρχονται από πολύ ασθενείς πηγές, αυξάνοντας έτσι το ποσό της πληροφορίας που λαμβάνεται για το υπέδαφος. Μελετώνται επίσης οι κατάλληλες μέθοδοι επεξεργασίας και ερμηνείας.

Γίνεται έρευνα στη θεωρία του μαγνητικού σήματος, κυρίως ως προς τους τρόπους ανόρθωσης και την αντιστροφή του. Τα αποτελέσματα οδηγούν σε μορφές απεικόνισης της κατανομής του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες προσομοιάζουν την κάτοψη των ερειπίων που είναι θαμμένα στο υπέδαφος. Η έρευνα στοχεύει επίσης στην δημιουργία νέων και πιο αποτελεσματικών μεθόδων αποθορυβοποίησης. Κινούμενα συστήματα αναπτύσσονται και για την κλασική μέθοδο της ηλεκτρικής χαρτογράφησης. Μερικά από αυτά είναι ικανά και για τη συλλογή τομογραφικών δεδομένων.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας αναπτύχθηκε έτσι, ώστε κατέστη δυνατή η χρήση της μέσα σε σωζόμενα μνημεία ή για εξερεύνηση του εσωτερικού των τοίχων τους. Επίσης, έγινε εφικτή η χρήση της σε δομημένα περιβάλλοντα, κάτι το οποίο ήταν αδιανόητο πριν από μια δεκαετία.

Η ανάπτυξη αλγορίθμων για τρισδιάστατη αντιστροφή δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελεί επίσης μια σημαντική κατεύθυνση της σύγχρονης έρευνας. Η έρευνα στον τομέα αυτό διευρύνει τις δυνατότητες της μεθόδου, εφόσον αυξάνει σημαντικά τις δυνατότητες και την ακρίβεια της στην απεικόνιση θαμμένων αρχαιοτήτων. Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων που συλλέγονται σε τρισδιάστατες διασκοπήσεις, διερευνώνται τρόποι μείωσης του όγκου της συνολικής δουλειάς και ιδιαίτερα των αριθμητικών πράξεων που υπεισέρχονται.

Αποτέλεσμα της έρευνας είναι επίσης οι νέες δυνατότητες της τομογραφίας για χρήση της μέσα σε γεωτρήσεις. Η δυνατότητα αυτή δίνει στη μέθοδο ιδιαίτερο βάρος για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. (Τσόκας Γ.Ν. , 2007)

1.2. Σκοπός και παράμετροι μιας γεωφυσικής διασκόπησης

Η γεωφυσική διασκόπηση έχει ως κύριο σκοπό το να δημιουργήσει μια ακριβή (την πιθανότερη με βάση τις μετρήσεις που έγιναν) αποτύπωση των θαμμένων «αντικειμένων» στο εσωτερικό των μαζών σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Για να γίνει αυτό χρειάζεται να γίνει η ακριβής τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής πάνω στην οποία ως υπόβαθρο γίνεται η χωροθέτηση των συγκεκριμένων σημείων στα οποία θα γίνουν οι γεωφυσικές μετρήσεις. Οι γεωφυσικές μετρήσεις μπορούν να γίνουν κατόπιν από ένα καλό χειριστή του γεωφυσικού οργάνου.

Στη γενική περίπτωση μια καλή γεωφυσική αποτύπωση πρέπει να ξεκινήσει με την ένταξη της θέσης που βρίσκεται ένας πιθανός αρχαιολογικός χώρος μέσα στο γεωγραφικό πλαίσιο μιας μεγαλύτερης σε έκταση περιοχής που τον περιβάλλει. Η σημερινή τάση που επικρατεί, είναι να γίνεται μια αναγνωριστική αποτύπωση σε μεγάλη έκταση, τουλάχιστον σε 5 στρέμματα με πυκνές μετρήσεις και με ταχύτητα. Ο λόγος για την ανάγκη ταχύτητας έχει φέρει στο προσκήνιο των πολλών γεωφυσικών εφαρμογών τις μαγνητικές και τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτές δεν απαιτούν ηλεκτρική επαφή με το έδαφος και τα σημερινά όργανα μπορούν να παρέχουν συνεχείς ή σχεδόν συνεχείς αναγνώσεις. Έτσι ο μηχανικός ή ο ειδικός γεω-

επιστήμονας πρέπει να γνωρίζει ότι, όταν η παροχή των δεδομένων πεδίου είναι απλή διαδικασία ή γίνεται με αυτόματη καταγραφή, ή όταν τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν από τη μνήμη ενός οργάνου στον υπολογιστή για επεξεργασία, το κόστος μιας διασκόπησης περιορίζεται κατά πολύ. Και η συμπίεση του κόστους ενός έργου χωρίς μείωση της ποιότητας είναι σημαντικό στοιχείο κάθε τεχνικού έργου.

Η πυκνότητα των δεδομένων είναι ο αριθμός αναγνώσεων του οργάνου ανά μονάδα εμβαδού. Οι γεωφυσικές μετρήσεις που επικαλύπτονται και έχουν υψηλή πυκνότητα, ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη τεχνολογία που εφαρμόζεται, παρέχουν δεδομένα που είναι εύκολα κατανοητά. Εάν μάλιστα η καταγραφή των δεδομένων της μέτρησης είναι αυτόματη, κάτι που αποτελεί ιδιότητα που έχουν τα σημερινά όργανα, η πυκνότητα των δεδομένων εξαρτάται από το πόσο γρήγορα το όργανο καταγράφει. Σήμερα, σε αντίθεση με ό,τι συνέβαινε πριν λίγα χρόνια, οι ταχύτητες είναι μεγάλες χάρη στην αύξηση μνήμης των υπολογιστών.

Εάν το γεωφυσικό όργανο παρέχει τη δυνατότητα πυκνής καταγραφής δεδομένων, τότε αυτές είναι καλό να λαμβάνονται ακόμη και όταν αυτό δεν είναι απαραίτητο στα αναγνωριστικά στάδια μιας διασκόπησης. Είναι η ανάγκη να διατηρείται η μετρητική διάταξη σε σταθερό επίπεδο επάνω από το έδαφος. Εάν η απαίτηση αυτή δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθεί στην πράξη (π.χ. υψηλά χόρτα, δένδρα, βλάστηση κ.α.), τότε οι πυκνές μετρήσεις εισάγουν ένα είδος θορύβου ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

Ακόμα, η χωροθέτηση των σημείων που θα γίνουν οι γεωφυσικές μετρήσεις απαιτεί να γίνεται μία ακριβής διάταξη καννάβου στο έδαφος. Η πυκνότητα των γραμμών του καννάβου πρέπει να επιλέγεται με προσοχή διότι αυτή είναι που καθορίζει και τη διακριτική ικανότητα (resolution) που θα έχει η γεωφυσική αποτύπωση. Εάν η διάταξη των γραμμών δεν είναι αρκετά πυκνή, τότε και το πιο ακριβές από άποψη μέτρησης όργανο ακόμη και το πιο ακριβό δεν αξιοποιείται ανάλογα.

Η ποιότητα και η ακρίβεια του καννάβου όπως και το αν ή όχι είναι ενταγμένος στο περιφερειακό ή και το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς είναι ένας σημαντικός παράγοντας που προσδιορίζει τον εύκολο και αξιόπιστο εντοπισμό των θέσεων όπου υπάρχει γεωφυσικό σήμα.

Συνήθως στην ίδια περιοχή επιδιώκεται να γίνονται περισσότερες από μία γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης (τουλάχιστον 2). Είναι φανερό ότι η εφαρμογή περισσότερων μεθόδων με τις οποίες αναλύεται διαφορετικό γεωφυσικό σήμα, παρέχει επιβεβαίωση των ενδείξεων σχετικά με την ύπαρξη σήματος και εξασφαλίζει ποιότη-

τα στα αποτελέσματα. Ένας τυπικός συνδυασμός είναι αποτυπώσεις (μετρήσεις) αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας. Η ανάλυση τους δίνει διαφορετικές συνιστώσες του εδάφους και επομένως αυξάνεται η ερμηνευτική ικανότητα της αναγνώρισης.

Ο συνδυασμός των προηγούμενων απαιτήσεων για μια αναγνωριστική γεωφυσική αποτύπωση ορίζει τελικά σαν τυπική γεωφυσική αναγνωριστική διασκόπηση τη μέτρηση μαγνητικού ή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με όργανα συνεχούς καταγραφής. Η διασκόπηση στοχεύει στην απόκτηση δεδομένων ανά αποστάσεις 0.50m σε διατομές που απέχουν κατά 1 m. Παρόλο που αυτά τα δεδομένα είναι «ασύμμετρα», δηλαδή ο νοητός κάνναβος μετρήσεων που σχηματίζεται δεν έχει ίσες πλευρές, η ταχύτητα της επίγειας κάλυψης είναι ελκυστική από την άποψη κόστους. (Δουφεξοπούλου, 2007)

1.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της γεωφυσικής διασκόπησης στην αρχαιολογία

Οι γεωφυσικές μέθοδοι είναι πολύ σημαντικές στην αρχαιολογία κι αυτό επισημαίνεται από τους παρακάτω λόγους:

- ❖ Η αρχαιολογία είναι καταστρεπτική. Καθώς μια περιοχή σκάβεται, καταστρέφεται συστηματικά. Ως εκ τούτου κάθε βήμα της ανασκαφής πρέπει να είναι προσεκτικά αργό. Η γεωφυσική εξέταση αφ' ενός είναι γρήγορη, μη καταστρεπτική και δεν ενοχλεί την περιοχή.

- ❖ Δεν μπορούν όλες οι αρχαιολογικές περιοχές να ανασκαφθούν. Τα παραδείγματα είναι ιστορικά κτήρια, εκκλησίες, μουσουλμανικά τεμένη, οι πυραμίδες, τα πάρκα, και οι περιοχές που κρύβονται κάτω από τη σύγχρονη αστική ανάπτυξη. Πάλι, οι γεωφυσικές μέθοδοι είναι μη καταστρεπτικές και πολύ γρήγορες, ως εκ τούτου συχνά οικονομικώς αποδοτικές μακροπρόθεσμα. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτές οι μέθοδοι μπορούν να είναι οι μόνες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μερικές περιοχές.

- ❖ Οι αρχαιολόγοι μπορούν να ενισχυθούν πολύ στον καθορισμό των προτεραιοτήτων σκαψίματός τους, όταν οι γεωφυσικές μέθοδοι χρησιμοποιηθούν αρχικά. Η γεωφυσική έρευνα μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να αποκαλύψει αντικείμενα

στη γη σε άγονο έδαφος και να αποκαλύψει τα σημαντικά υπόγεια χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως θαμμένοι τοίχοι, κενά, σήραγγες, αρχαίες οδοί, κ.λπ.

❖ Πολλές δεκαετίες μπορούν να απαιτηθούν για να εξερευνηθεί μια δεδομένη περιοχή. Στην πραγματικότητα η συνολική ανασκαφή μιας περιοχής μπορεί να μην είναι πρακτική. Η γεωφυσική έρευνα σε δεδομένες περιοχές μπορεί συνήθως να γίνει σε μερικές ημέρες ή εβδομάδες, τα αποτελέσματα των οποίων είναι χρήσιμα για πολλά έτη επόμενης εργασίας ανασκαφής.

❖ Η αρχαιολογία διάσωσης έχει γίνει σημαντική καθώς οι αστικές περιοχές καταπατούν τις αρχαιολογικές περιοχές σε πολλά μέρη του κόσμου. Χάρη στη σύγχρονη νομοθεσία, η ουσιαστική χρηματοδότηση για την αρχαιολογική έρευνα πριν από το καθάρισμα μιας περιοχής και η οικοδόμηση των νέων κτηρίων μπορούν να είναι διαθέσιμες. Σε πολλές τέτοιες περιπτώσεις, εντούτοις, ο διαθέσιμος χρόνος για την αρχαιολογική προσπάθεια μπορεί να είναι πολύ περιορισμένος. Οι γεωφυσικές μέθοδοι έχουν σημαντική σημασία δεδομένου ότι η περιοχή συχνά καταστρέφεται συνολικά από τη νέα κατασκευή.

Επομένως, τα βασικότερα πλεονεκτήματα που παρέχει μια γεωφυσική αποτύπωση είναι: το χαμηλό κόστος της σε σχέση με πιθανά εμπόδια αν δεν είχε γίνει, π.χ. εντοπισμός αρχαιοτήτων, σαθρών πετρωμάτων κ.α., το ότι οι μέθοδοι είναι γρήγορες και δεν είναι καταστροφικές, καθώς και η δυνατότητα να αποκτηθεί ακριβής αποτύπωση της περιοχής μαζί με τη χωροθέτηση των θέσεων για τις οποίες από την ερμηνεία των μετρήσεων προέκυψε ύπαρξη αντικειμένου. Οι διασκοπικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση σωλήνων, στον εντοπισμό υπογείων τηλεφωνικών και ηλεκτρικών γραμμών, στην ύπαρξη υπογείων στοών κ.α.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, ωστόσο, παρά τη δυνατότητα που έχουν να παρέχουν δεδομένα με ταχύτητα στην υπό διερεύνηση αρχαιολογική περιοχή, εν τούτοις δεν έχουν ικανότητα παροχής δεδομένων υψηλής ποιότητας. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να δώσουν μόνο την αρχική ανταπόκριση, αν μια περιοχή έχει αρχαιολογικό ενδιαφέρον, αλλά δεν μπορούν να δώσουν συγκεκριμένη περιγραφή της περιοχής από την άποψη των αρχαιολογικών ευρημάτων που μπορεί να αναμένει ο αρχαιολόγος.

Αυτό το στοιχείο είναι σημαντικό διότι παρατηρείται αφενός μια δυσπιστία σχετικά με την αποτελεσματικότητα που έχουν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις και από την άλλη πλευρά παρατηρείται μια πολύ αισιόδοξη προβολή των μεθόδων αυτών από τα ΜΜΕ, ειδικότερα στην Ελλάδα όπου δεν υπάρχει μακροχρόνια ή και ολοκληρω-

μένη εμπειρία. Ο γεωφυσικός πεδίου και ο μηχανικός ή αναλυτής των δεδομένων γνωρίζουν όμως από τις σπουδές τους ότι η ερμηνεία των δεδομένων του πεδίου που παρατηρήθηκε βασίζεται στη λύση ενός αντίστροφου προβλήματος και συγκεκριμένα από το αποτέλεσμα της μέτρησης του συγκεκριμένου γεωφυσικού πεδίου επιχειρείται ο προσδιορισμός του αιτίου παραμέτρου που είναι κατά κανόνα άγνωστο.

Συνεπώς η γεωφυσική διασκόπηση δεν μπορεί να θεωρείται ως αυτοτελής μέθοδος για να χρησιμοποιηθεί στην ανίχνευση ή την πλήρη αξιολόγηση των αρχαιολογικών χώρων. Αποτελεί όμως μια συμπληρωματική μεθοδολογία η οποία πάντοτε πρέπει να θεωρείται ότι πρέπει να συνυπάρχει με άλλες. Ειδικότερα το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι παρέχει πληροφοριακές ενδείξεις δύο ειδών για :

- τις πιθανές θέσεις αρχαιολογικών ευρημάτων και
- αν χρειάζεται να γίνουν λεπτομερέστερες έρευνες και με άλλες μεθόδους με συγκεκριμένους στόχους.

(Δουφεξοπούλου, 2007)

1.4. Μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Οι γεωφυσικές έρευνες αρχαιολογικών χώρων περιλαμβάνουν, ηλεκτρικές, σεισμικές, μαγνητικές και βαρυτικές τεχνικές. Το γεωραντάρ (G.P.R.) και η ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις για την ανάλυση της στρωματογραφίας του υπεδάφους. Άλλες τεχνικές όπως η μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους, η περιεκτικότητα φωσφόρου, χημικές αναλύσεις κ.α. εφαρμόζονται για τον διαχωρισμό και οριοθέτηση των περιοχών με εργαστηριακή και κτηνοτροφική δραστηριότητα. Η εφαρμογή των ανωτέρω τεχνικών αποσκοπεί στην χαρτογράφηση του υπεδάφους (σε μικρό βάθος, 2-4m από την επιφάνεια του εδάφους κατά περίπτωση και μέθοδο, ενώ άλλες τεχνικές επιτρέπουν την έρευνα σε μεγαλύτερα βάθη).

Θα πρέπει να σημειωθεί, βέβαια, ότι σκοπός της παρούσας αναφοράς δεν είναι η εκτενής παρουσίαση των γεωφυσικών μεθόδων, αλλά μία συνοπτική περιγραφή τους προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει τις βασικές αρχές λειτουργίας τους, αν και η περιγραφή κάποιων από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνότερα στις γεωφυσικές διασκοπήσεις αρχαιολογικών χώρων είναι εκτενέστερη.

1.4.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής διασκόπησης βασίζονται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια. Χρησιμοποιούν μετρήσεις διαφόρων μεγεθών σε ηλεκτρικά ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία τα οποία είτε υπάρχουν στη φύση είτε δημιουργούνται τεχνητά τη στιγμή που γίνεται η διασκόπηση. Στο γεγονός αυτό οφείλεται και η μεγάλη ποικιλία των μεθόδων ηλεκτρικής διασκόπησης.

Γενικά οι ηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να καταταγούν σε δυο κατηγορίες : στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν φυσικά πεδία και στη δεύτερη εκείνες που προϋποθέτουν τη δημιουργία τεχνητών πεδίων.

Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται:

- ❖ η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και
- ❖ η μέθοδος των γήινων ηλεκτρικών ρευμάτων.

Στη δεύτερη κατηγορία υπάγονται:

- ❖ η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης
- ❖ η μέθοδος των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών και
- ❖ η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης.

(Αράμπελος, 1991)

1.4.1.1. Η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους. Το μέγεθος που μετράται είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η κατανομή των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης (γεωηλεκτρική δομή). Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διαβιβάζεται στο υπέδαφος μέσω ηλεκτροδίων και στη συνέχεια μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ αυτών. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους και επομένως από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της δομής. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ηλεκτροδίων είναι αυτές των ‘διπόλου-διπόλου’, ‘Schlumberger’ και ‘Wenner’.

1.4.2. Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

Η αρχή των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης βασίζεται στον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής (κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης με βάση τις ιδιότητες του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που παράγεται μέσα στα στρώματα αυτά, σε σχέση με τις ιδιότητες του αρχικού (πρωτογενούς) πεδίου.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι συνήθως διακρίνονται στις μεθόδους συνεχών κυμάτων, στις μεθόδους ασυνεχών κυμάτων (παλμοκυμάτων) και στις μαγνητοτελλουρικές μεθόδους. Οι μέθοδοι συνεχών κυμάτων διακρίνονται στις μεθόδους μέτρησης της γωνίας κλίσης (μέθοδος του τοπικού πομπού, VLF, AFMAG) και στις μεθόδους μέτρησης φάσης (μέθοδος αντιστάθμισης, Turam, κινούμενου πομπού-δέκτη). (Βαφείδης, 2001).

1.4.2.1 Η Μέθοδος του Γεωραντάρ

Η λέξη RADAR προέρχεται από τα αρχικά RAdio Detecting And Ranging. Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας.

Η μέθοδος του Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar - G.P.R.) παρουσιάζει την ίδια αρχή λειτουργίας με την μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Πρόκειται για μία ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική τεχνική που βρίσκει εφαρμογή στην χαρτογράφηση των στρωμάτων σε εδάφη και πετρώματα και στον εντοπισμό υπόγειων δομών, στηριζόμενη στις διαφορές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών.

Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία σειρά από εφαρμογές όπως είναι η χαρτογράφηση του υποβάθρου, ο καθορισμός του πάχους των στρωμάτων και το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ο εντοπισμός φυσικών και τεχνητών εγκοίλων στο υπέδαφος, η ανίχνευση των αλλαγών της σύστασης των πετρωμάτων και ο εντοπισμός ρωγμών του υποβάθρου. Ιδιαίτερη εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται στην Αρχαιομετρία για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων και αρχαιολογικών λειψάνων.

Η βασική αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, υψηλής συχνότητας, στο υπέδαφος και στην καταγραφή των επιστρεφο-

μένων κυμάτων. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που διαδίδεται στο υπέδαφος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του, δηλαδή την διηλεκτρική σταθερά και την αγωγιμότητα. Βασικά, η μέθοδος στηρίζεται κυρίως στην καταγραφή των ανακλωμένων κυμάτων.

Όπως αναφέρθηκε η αρχή λειτουργίας της μεθόδου G.P.R. (γεωραντάρ) παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης. Ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός υψηλής συχνότητας και μικρής διάρκειας παράγεται και διοχετεύεται στο έδαφος. Ο παλμός (το σήμα) διαδίδεται και διαχέεται στα υλικά που συνιστούν το υπέδαφος και η πορεία του εξαρτάται από τις ιδιότητες των περιβαλλόντων υλικών. Ένα μέρος της ενέργειας του παλμού ανακλάται στην διαχωριστική επιφάνεια υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες και καταγράφεται σε έναν δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διοχετεύεται σε βαθύτερα επίπεδα.

Το μέγιστο βάθος για το οποίο μπορεί να δώσει πληροφορίες η μέθοδος του Γεωραντάρ εξαρτάται κυρίως από την απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών (ΗΜ) κυμάτων. Η απορρόφηση αυξάνει με την συχνότητα και κατά συνέπεια όσο χαμηλότερη συχνότητα χρησιμοποιείται τόσο βαθύτερα "βλέπει" η μέθοδος. Πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψιν ότι η διακριτική ικανότητα μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Για παράδειγμα συστήματα G.P.R. που λειτουργούν σε εύρος 25-50 MHz μπορεί να διερευνήσουν βάθη που υπερβαίνουν τα 50 μέτρα.

Οι καταγραφές Radar τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη κατ' αναλογία με τις σεισμικές αναγραφές. Δημιουργείται έτσι μία τομή η οποία προσομοιάζει την αληθινή ηλεκτρική τομή του υπεδάφους, δηλαδή της αποτύπωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του με το βάθος. (www.ims.forth.gr)

1.4.3. Βαρυτικές και Μαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης

Οι βαρυτικές και μαγνητικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης αποτελούν από τις πρώτες χρησιμοποιούμενες μεθόδους στον εντοπισμό γεωλογικών δομών. Η σχετικά εύκολη διαδικασία και ταχύτητα λήψης των δεδομένων σε συνδυασμό με το μικρό κόστος που παρουσιάζουν σε σχέση με άλλες μεθόδους (π.χ. σεισμική ανάκλαση) τις καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλείς γεωφυσικές μεθόδους.

Όπως αναφέρει και το όνομά τους, κάνοντας χρήση αυτών των μεθόδων, γίνεται προσπάθεια να μετρηθούν δύο δυναμικά πεδία, το βαρυτικό και το μαγνητικό. Για το λόγο αυτό οι μέθοδοι αυτές είναι κυρίως γνωστές ως "μέθοδοι πεδίων δυναμικού". Υπάρχουν περιπτώσεις που αυτές οι δύο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα, καθώς η μετάβαση από το ένα πεδίο στο άλλο μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της σχέσης Poisson. Η σχέση Poisson συνδέει το βαρυτικό και το μαγνητικό δυναμικό που προκαλεί ένα σώμα εφόσον θεωρηθεί ότι η κατανομή της πυκνότητας και της μαγνήτισης κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο του. Επίσης πολλές από τις εφαρμοζόμενες τεχνικές επεξεργασίας των συλλεχθέντων δεδομένων είναι κοινές και στις δύο μεθόδους. (www.ims.forth.gr)

1.4.3.1 Μαγνητική Διασκόπηση

Η μαγνητική διασκόπηση έχει στόχο την ανίχνευση της αλλαγής των μαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους λόγω της παρουσίας δομών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά την διεξαγωγή μιας μαγνητικής διασκόπησης μετρίεται το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης. Το ύψος που μπορεί να πραγματοποιηθεί μία μαγνητική διασκόπηση κυμαίνεται από 0.5 μέτρο, στην περίπτωση εντοπισμού θαμμένων αρχαιοτήτων, έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα πάνω από το τοπογραφικό ανάγλυφο μιας περιοχής, στην περίπτωση εντοπισμού ανωμαλιών που σχετίζονται με την γεωλογία της περιοχής.

Για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται συνήθως μαγνητόμετρα μέτρησης της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου (πρωτονιακά μαγνητόμετρα) ή διαφορικά μαγνητόμετρα (πρωτονιακά ή ροής), τα οποία μετρούν την κατακόρυφη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου. Η ακρίβεια που παρουσιάζουν αυτά τα όργανα είναι της τάξης του 0.1 - 1 nT. Στην περίπτωση εντοπισμού αρχαιολογικών λειψάνων οι μετρήσεις λαμβάνονται με σταθερό βήμα δειγματοληψίας σε καννάβους, μικρών σχετικά διαστάσεων (10x10 ή 20x20), τοποθετώντας τον αισθητήρα (ή μετρητή) σε μία σταθερή και μικρή απόσταση από την επιφάνεια της γης.

Υπεδάφειοι στόχοι με μαγνητικές ιδιότητες διαφορετικές από αυτές του περιβάλλοντος αλλάζουν κατά μικρό ή μεγάλο βαθμό το τοπικό μαγνητικό πεδίο. Η παραμόρφωση αυτή του μαγνητικού πεδίου παρατηρείται σαν "ανωμαλία" στις μετρήσεις. Οι ανωμαλίες αυτές μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικά αίτια και διαφοροποι-

ούνται βάση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και του γεωμετρικού σχήματος αυτών. Τάφροι, εστίες καύσης, φούρνοι, αρχιτεκτονικές δομές ή συγκεντρώσεις οργανικού υλικού μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρές μαγνητικές ανωμαλίες. Οι μαγνητικές ανωμαλίες εξαρτώνται τόσο από την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης όσο και από την διεύθυνση της μαγνήτισης. Για τον λόγο αυτό οι μαγνητικές ανωμαλίες είναι κυρίως διπολικού χαρακτήρα.

Οι μαγνητικές ανωμαλίες σχετίζονται άμεσα με την μαγνητική επιδεκτικότητα του εδάφους. Περιοχές με αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα (πάντα σε σχέση με το περιβάλλον) εμφανίζονται ως θετικές μαγνητικές ανωμαλίες, ενώ αντίθετα περιοχές με μειωμένη μαγνητική επιδεκτικότητα παρουσιάζονται ως αρνητικές ανωμαλίες. Και τα δύο αυτά είδη μαγνητικών ανωμαλιών παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην διαδικασία ερμηνείας των μαγνητικών δεδομένων.

Γενικά η ύπαρξη αρχαιολογικών ερειπίων στο υπέδαφος συνοδευόμενη συνήθως από μία αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας στο υπέδαφος, προκαλεί ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλει το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης. Τα πυρηνικά μαγνητόμετρα μετρούν την συνισταμένη του ασθενούς τοπικού μαγνητικού πεδίου και του πιο ισχυρού γήινου μαγνητικού πεδίου. Τα διαφορικά μαγνητόμετρα (μαγνητόμετρα ροής) μετρούν την κάθετη ή την οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Τα δύο αυτά είδη μαγνητομέτρων αποτελούν τα πιο αποτελεσματικά όργανα μέτρησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου και των μεταβολών αυτού λόγω παρουσίας ανθρωπογενών λειψάνων.

Γενικά η μεταβολή του τοπικού μαγνητικού πεδίου λόγω της ύπαρξης υπεδάφειων αρχαιολογικών λειψάνων είναι σχετικά μικρή, εξαιτίας της ασθενούς παραμένουσας μαγνήτισης. Η μεταβολή αυτή αυξάνεται με την αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας των αρχαιολογικών στόχων (φαινόμενα καύσης, πυκνότητα σε σιδηρούχα συστατικά κ.α.) Τα όργανα τα οποία απαιτούνται για τον εντοπισμό αρχαιολογικών ερειπίων πρέπει να έχουν υψηλή ακρίβεια, μεγάλη ευαισθησία και αξιοπιστία μετρήσεων. Τα όργανα αυτά μετρούν το μαγνητικό πεδίο με μία ακρίβεια της τάξεως των 0.1 - 1 nT (δηλαδή 0.1 - 1 x 10⁻⁹ T). Ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, της τάξεως του pT (0.001 - 0.01 nT) είναι εφικτή με τα μαγνητόμετρα Καισίου, αλλά υπάρχει ο κίνδυνος εισαγωγής αυξημένων επιπέδων εξωτερικού θορύβου. (www.ims.forth.gr)

1.4.3.2. Βαρυτική Διασκόπηση

Αντικειμενικός σκοπός των μεθόδων βαρυτικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των μεταβολών της πυκνότητας του υπεδάφους πραγματοποιώντας μετρήσεις της έντασης του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της γης. Δηλαδή στη βαρυτομετρία γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν δομές που παρουσιάζουν αντίθεση πυκνότητας (είτε θετική είτε αρνητική) με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Οι μέθοδοι αυτές στηρίζονται στο νόμο της παγκόσμιας έλξης (βαρύτητας) του Νεύτωνα, ο οποίος καθορίζει την ελκτική δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο σωμάτων ορισμένης μάζας, που βρίσκονται σε κάποια απόσταση μεταξύ τους.

Τα σύγχρονα όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του πεδίου βαρύτητας ονομάζονται βαρυτόμετρα. Η αρχή λειτουργίας των βαρυτομέτρων στηρίζεται στην ύπαρξη ενός ελατηρίου, στην άκρη του οποίου βρίσκεται κρεμασμένο ένα σώμα ορισμένης μάζας. Στα σημερινά βαρυτόμετρα γίνεται χρήση των λεγόμενων ελατηρίων «μηδενικού μήκους», στα οποία μία αρχική δύναμη συγκρατεί τις σπείρες του ελατηρίου σε επαφή.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων βαρύτητας σε μία περιοχή, πρέπει πρώτα να οριστεί ένας σταθμός βάσης και ένα δίκτυο άλλων σημείων που αποτελούν ένα κανονικό κάρναβο ή ισαπέχουν σε μία τομή. Στη συνέχεια οι μετρούμενες τιμές του πεδίου βαρύτητας, πριν υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία και ερμηνευτούν, θα πρέπει να υποστούν τις κατάλληλες αναγωγές και διορθώσεις (αναγωγή στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος, αναγωγή στο ίδιο υψόμετρο, αναγωγή Bouguer και τοπογραφική αναγωγή).

Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν αυτές οι μέθοδοι, ως προς την ερμηνεία τους, σε σχέση πάντα με τις μαγνητικές μεθόδους, αποτελεί το γεγονός ότι οι παρατηρούμενες ανωμαλίες είναι μονοπολικές, δηλαδή μεγιστοποιούνται ή ελαχιστοποιούνται ακριβώς πάνω από την υπεδάφια δομή που προκαλεί το ανώμαλο βαρυτικό πεδίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι βαρυτικές ανωμαλίες εξαρτώνται μόνο από την κατανομή της πυκνότητας της δομής. Αντίθετα οι μαγνητικές ανωμαλίες εξαρτώνται εκτός από την κατανομή της μαγνήτισης και γι' αυτό εμφανίζονται πολλές φορές με διπολική μορφή. (www.ims.forth.gr)

1.4.4. Σεισμικές μέθοδοι

Οι σεισμικές μέθοδοι είναι οι πιο ακριβείς μέθοδοι καθορισμού της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Διακρίνονται κυρίως στις μεθόδους ανάκλασης και διάθλασης, οι οποίες περιγράφονται περιληπτικά παρακάτω.

1.4.4.1. Σεισμική Ανάκλαση

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, τα οποία παράγονται τεχνητά στην επιφάνεια της γης. Τα κύματα κατά τη διαδρομή τους μέσα στο υπέδαφος ανακλώνται πάνω σε ασυνέχειες που βρίσκονται μέσα στο φλοιό της γης και κυρίως στα επιφανειακά στρώματά του. Τα απευθείας και τα ανακλώμενα κύματα καταγράφονται από γεώφωνα που τοποθετούνται σε σχετικά μικρές αποστάσεις από το σημείο παραγωγής των ελαστικών κυμάτων. Η μέθοδος της Σεισμικής Ανάκλασης συμβάλλει στη χαρτογράφηση δομών που βρίσκονται σε σημαντικά βάθη, με την ίδια σχεδόν ακρίβεια με την οποία χαρτογραφούνται επιφανειακές δομές (Κρητικάκης, 2001).

1.4.4.2. Σεισμική Διάθλαση

Η αρχή της Σεισμικής Διάθλασης βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας κυμάτων και των κυμάτων διάθλασης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται καμπύλες που προκύπτουν από τους χρόνους διαδρομής των κυμάτων, προκειμένου να καθοριστούν με θεωρητικές σχέσεις οι ταχύτητές τους στα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους. Η μέθοδος της διάθλασης δεν είναι τόσο ακριβής όσο αυτή της ανάκλασης και παρουσιάζει μεγαλύτερες δυσκολίες κατά την ερμηνεία των μετρήσεων. Παρόλα αυτά, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σε περιοχές μορφολογικών ανωμαλιών, όπου δεν εφαρμόζονται εύκολα άλλες μέθοδοι (Κρητικάκης, 2001).

1.4.5. Γεωθερμική μέθοδος

Η γεωθερμική μέθοδος ασχολείται με τον εντοπισμό γεωλογικών σχηματισμών που έχουν οικονομικό ενδιαφέρον, με μετρήσεις της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης και σε βαθύτερα στρώματα (πηγάδια, γεωτρήσεις, στοές, κ.λ.π.). Βασίζεται στην αρχή σύμφωνα με την οποία μεταξύ δύο γειτονικών σημείων P_1 με θερμοκρασία T_1 και P_2 με θερμοκρασία T_2 , όπου $T_1 \neq T_2$, συμβαίνει ροή θερμότητας από το σημείο με τη μεγαλύτερη προς το σημείο με τη μικρότερη θερμοκρασία (Αράμπελος, 1991).

1.4.6. Γεωχημική μέθοδος

Η γεωχημική μέθοδος ασχολείται με την αναζήτηση ενδείξεων πετρελαίου, μεταλλευμάτων και άλλων ορυκτών, αναλύοντας δείγματα σε στερεά, υγρή ή αέρια μορφή. Οι αναλύσεις αερίων που περνούν αργά στην επιφάνεια της γης προερχόμενα από μεγάλα βάθη, χρησιμοποιούνται στην έρευνα του πετρελαίου, ενώ για τον εντοπισμό μεταλλευμάτων καθορίζεται η περιεκτικότητα μεταλλικών συστατικών σε διάφορες θέσεις (Αράμπελος, 1991).

1.4.7. Ραδιομετρική μέθοδος

Η ραδιομετρική μέθοδος στηρίζεται στην ανίχνευση και τη μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα ραδιενεργά στοιχεία (ουράνιο, θόριο, κάλιο), που περιέχονται σε διάφορα πετρώματα. Ραδιενεργά στοιχεία περιέχει ένας μεγάλος αριθμός ορυκτών, τα κυριότερα από τα οποία είναι: ουρανίτης, τορβερνίτης, καρνοτίτης, θορίτης, θοριανίτης, μοναζίτης, μοσχοβίτης, βιοτίτης και διάφορα ορυκτά του καλίου. (Αράμπελος, 1991).

1.5 Δομή διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1: Το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται τις εφαρμογές των γεωφυσικών μεθόδων στην αρχαιολογική έρευνα. Γίνεται μια αναφορά στις γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης, δίνοντας έμφαση σε αυτές που χρησιμοποιούνται στην αρχαιολογική έρευνα.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στην ηλεκτρική τομογραφία και συγκεκριμένα στην αρχή λειτουργίας της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, καθώς και τα προγράμματα RES2DINV και RES3DINV.

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, αντιπαραβάλλοντας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δύο προγράμματα και η αξιολόγησή τους..

Κεφάλαιο 5: Το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τα συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή της τεχνικής της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας στην αρχαιολογική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ****2.1. Εισαγωγή**

Η ηλεκτρική τομογραφία ειδικής αντίστασης (ERT) θεωρείται σχετικά νέα γεωφυσική μέθοδος, η οποία έχει εξελιχθεί γρήγορα κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 10 ετών. Η ηλεκτρική μέθοδος ειδικής αντίστασης χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα και την ανίχνευση των στόχων ρηχού βάθους. Η μέθοδος στοχεύει στον καθορισμό της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής αυτού, πραγματοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνεια της γης.. Η ηλεκτρική μέθοδος έχει εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία στην επίλυση υδρογεωλογικών (Flathe 1955, Dahlin και Owen 1998), γεωλογικών (Caglar και Duvarci 2001, Atzemoglou και συνεργάτες, 2003), εφαρμοσμένης μηχανικής (Dahlin και συνεργάτες, 1994) και περιβαλλοντικών προβλημάτων (Rogers και Kean 1980, Van και συνεργάτες, 1991 Ramirez και συνεργάτες, 1996).

Η ανάπτυξη των αυτοκινούμενων συστημάτων μέτρησης της αντίστασης συνέβαλλαν σημαντικά στην διασκόπηση μεγάλων εκτάσεων, μειώνοντας δραματικά το χρόνο συλλογής των δεδομένων και αυξάνοντας παράλληλα την χωρική τους ανάλυση. Περαιτέρω, η εμφάνιση των γρήγορων υπολογιστών επέτρεψε την ανάπτυξη των πλήρως αυτοματοποιημένων αλγορίθμων αντιστροφής, τα οποία στοχεύουν να επιτύχουν μια καλή εκτίμηση της υπόγειας κατανομής της ειδικής αντίστασης που είναι σύμφωνη με τα πειραματικά στοιχεία. Μεταξύ των άλλων, η εισαγωγή περιορισμών εξομάλυνσης (Constable και συνεργάτες, 1987) έχει γίνει μια δημοφιλής τεχνική για τα στοιχεία της ηλεκτρικής τομογραφίας, επειδή παράγει ένα απλουστευμένο πρότυπο ειδικής αντίστασης που αποτελεί μια απλοποιημένη και λογική αναπαράσταση της πραγματικότητας του υπεδάφους και εγγυάται συγχρόνως τη σταθερότητα αντιστροφής. Διάφοροι δισδιάστατοι αλγόριθμοι εξομαλυσμένης αντιστροφής για τα στοιχεία HT έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία (Sasaki 1992, Xu και Noel 1993, Ellis και Oldenburg 1994, Loke και Barker 1995, Tsourlos 1995). Περαιτέρω, καθώς πολλά από τα προβλήματα που συνδέονται με τη γεωφυσική έρευνα είναι τρισδιάστατης

φύσης, έχουν παρουσιαστεί διάφοροι αλγόριθμοι για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα HT σε τρεις διαστάσεις (π.χ., 1991 Loke και Barker 1996, Tsourlos και Ogilvy 1999). Παρά την ανάπτυξη της προηγμένης συστηματοποίησης και των τρισδιάστατων τεχνικών ερμηνείας, η κοινή γεωφυσική πρακτική στηρίζεται ακόμα κυρίως στις δισδιάστατες προσεγγίσεις (Chambers, 2001).

Η τεχνική ειδικής αντίστασης είναι πολύ δημοφιλής στην έρευνα για τη χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων. Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από τις διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ των πιθανών αρχαιολογικών στόχων (τοιχοί, δρόμοι, κτήρια, τάφροι) και του περιβάλλοντος. Διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων, όπως η Wenner και η Schlumberger, χρησιμοποιούνται στην έρευνα ειδικής αντίστασης για τις αρχαιολογικές περιοχές. Οι Aspinall και Gaffney (2001) μελέτησαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διάταξης Schlumberger στην αρχαιολογική έρευνα. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την επιλεκτικότητα της απόκρισης της διάταξης στην κατεύθυνση των υπεδάφινων στόχων, καθώς οι δομές οι οποίες ήταν παράλληλα προσανατολισμένες με τον άξονα της διάταξης δεν ήταν δυνατόν να εντοπιστούν.

Σήμερα η διάταξη «Δίδυμων ηλεκτροδίων» είναι η δημοφιλέστερη και χρησιμοποιείται συνήθως στη γεωφυσική χαρτογράφηση των αρχαιολογικών περιοχών (Clark, 1990). Η εφαρμογή της συγκεκριμένης διάταξης είναι πολύ εύκολη δεδομένου ότι μόνο δύο ηλεκτρόδια (ένα ρεύματος κι ένα δυναμικού) πρέπει να κινηθούν σε κάθε σταθμό, ενώ δύο άλλα (ένα ρεύματος κι ένα δυναμικού) παραμένουν καθορισμένα και το ένα κοντά στο άλλο, σε μια μεγάλη απόσταση από την εξεταζόμενη περιοχή. Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ταχύτητα συλλογής των δεδομένων και η απλοποιημένη φύση της απόκρισης του σήματος πάνω από αρχαιολογικές δομές. Η χαρτογράφηση ειδικής αντίστασης των συγκεκριμένων περιοχών με αυτήν την ιδιαίτερη διάταξη έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία για να σκιαγραφηθεί θαμμένες αρχαιολογικές δομές σε διάφορες περιπτώσεις (Sarris, 1992 Tsokas και συνεργάτες, 1994 Sarris και συνεργάτες., 2002).

Η ανάπτυξη των κινητών διατάξεων έχει αυξήσει την περιοχή κάλυψης, μειώνοντας εντυπωσιακά το χρόνο που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί μια έρευνα (Panissod και συνεργάτες., 1998 Dabas και συνεργάτες., 2000). Επιπλέον η χρήση των αυτόματων πολυπλεκτών έχει βοηθήσει στον προσδιορισμό της κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε τρεις-διαστάσεις (Walker, 2000).

Η ηλεκτρική τομογραφία ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την απεικόνιση αρχαιολογικών δομών σε μια δοκιμαστική έρευνα στο Verulamium, ST Albans (Noel, 1991). Στην αρχαιολογική έρευνα η ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιείται κυρίως ως συμπληρωματικό εργαλείο για να ενισχύσει το πλαίσιο πληροφοριών που κερδίζεται από άλλες γεωφυσικές μεθόδους. Διάφορες περιπτώσιολογικές μελέτες της μεθόδου έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία (Neighbour και συνεργάτες, 2001, Dogan και Papamarinopoulos 2003, Rizzo και συνεργάτες, 2005). Επιπλέον, οι πλήρεις τρισδιάστατες ηλεκτρικές μετρήσεις ειδικής αντίστασης έχουν εφαρμοστεί επίσης πειραματικά στην έρευνα για τον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου στο Λασίθι, Ελλάδα από τον Βαφείδη και τους συνεργάτες του το 1999 (Papadopoulos συνεργάτες, 2006).

2.2. Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η ηλεκτρική τομογραφία, όπως αναφέρθηκε, ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, η πιο σημαντική από τις οποίες είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι να μετρηθεί στην επιφάνεια της Γης η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε αυτή. Για τον σκοπό αυτό εισάγεται στο υπέδαφος ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων και μετριέται η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπέδαφος ρεύμα, σε δύο άλλα ηλεκτρόδια. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μία ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Υδρογεωλογία, για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων, στην Τεχνική Γεωλογία για την εύρεση του μητρικού πετρώματος και εγκοίλων και τον καθορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους κ.λ.π., για περιβαλλοντικούς σκοπούς στον προσδιορισμό της ζώνης ρύπανσης σε υδροφόρα στρώματα, στην αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων και μεταλλευμάτων, καθώς και στην αρχαιομετρία.

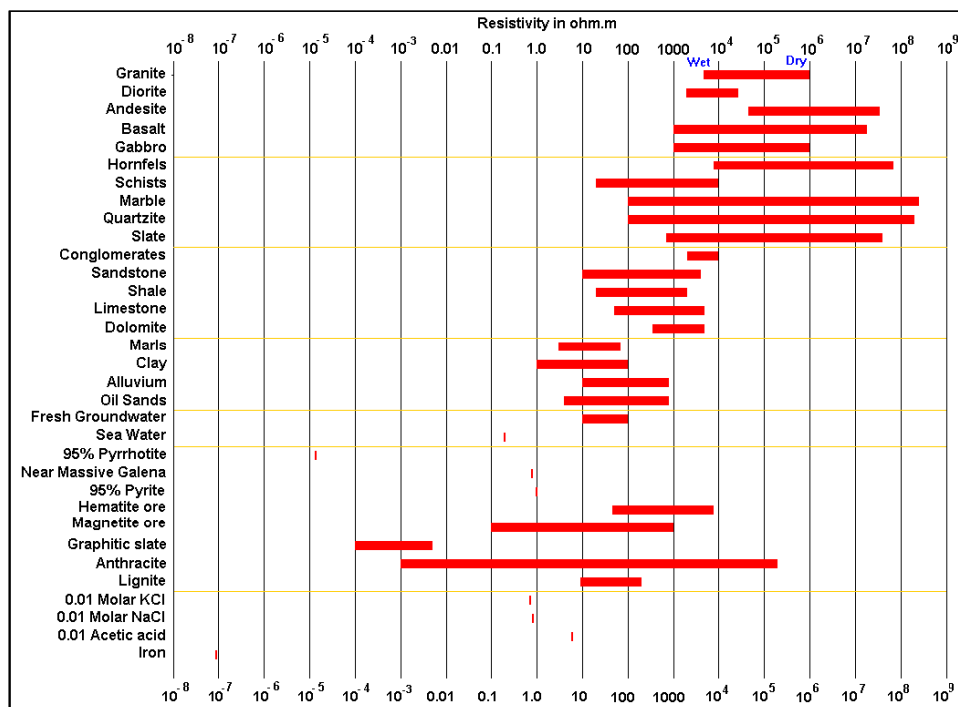
Συγκεκριμένα, στην αρχαιομετρία, υπεδάφειες δομές παλαιότερων ανθρώπινων κατασκευών, καθώς και έγκοιλα αναμένεται να παρουσιάζουν έντονη αντίθεση με το περιβάλλον υλικό σε ότι αφορά τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες, δεδομένου ότι η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τέτοιων κατασκευών είναι πολύ υψηλή (κυρίως

ασβεστολιθικές κατά την αρχαιότητα ή θεμελιώσεις από τσιμέντο κατά τα νεώτερα χρόνια).

Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει σε ρηχά βάθη στη Γη με τους εξής τρόπους:

- ❖ ηλεκτρονική αγωγιμότητα
- ❖ ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα και
- ❖ διηλεκτρική αγωγή

Στην ηλεκτρονική αγωγιμότητα, το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην κρυσταλλική δομή πετρωμάτων και ορυκτών (κυρίως μεταλλικών). Στην ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσω των ιόντων αλάτων και ορυκτών που είναι διαλυμένα μέσα στο νερό που γεμίζει τους πόρους των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς και των ιόντων στα υπόγεια νερά. Η διηλεκτρική αγωγή προκαλείται από την επίδραση ενός εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου το οποίο μπορεί να προκαλέσει μια ελαφριά μετατόπιση στην θέση των φορτίων μέσα στη δομή μονωτικών υλικών. Για την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ο πιο σημαντικός τρόπος ροής του ρεύματος είναι η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων, των υλικών και χημικών ενώσεων (Keller και Frischknecht 1966, Daniels και Alberty 1966, Telford και συνεργάτες, 1990) παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων, εδαφών και μεταλλευμάτων.

(Loke, 2004)

Τα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν χαρακτηριστικά υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αυτών εξαρτάται πολύ από το βαθμό κατακερματισμού τους, και το ποσοστό των πόρων γεμισμένων με το υπόγειο νερό. Κατά συνέπεια ένας δεδομένος τύπος πετρώματος μπορεί να χαρακτηρίζεται από μια ποικιλία τιμών της ειδικής αντίστασης, από περίπου 1000 έως 10 εκατομμύρια Ωm , ανάλογα με εάν είναι υγρό ή ξηρό. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι χρήσιμο στην ανίχνευση των ζωνών κατακερματισμού του πετρώματος και άλλων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων διάβρωσης.

Ιζηματογενή πετρώματα, που είναι συνήθως πιο πορώδη και έχουν την υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, κανονικά έχουν τις χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης έναντι των πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Οι τιμές ειδικής αντίστασης κυμαίνονται από 10 σε περίπου 10000 Ωm , με τις περισσότερες τιμές κάτω από 1000 Ωm . Οι τιμές ειδικής αντίστασης εξαρτώνται κατά ένα μεγάλο μέρος από το πορώδες των πετρωμάτων, και την αλατότητα του εμπεριέχοντος νερού. Τα ιζήματα έχουν γενικά χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης από τα ιζηματογενή πετρώματα, με τις τιμές που κυμαίνονται από περίπου 10 ως λιγότερο από 1000 Ωm .

Η τιμή της ειδικής αντίστασης εξαρτάται από το πορώδες καθώς επίσης και το περιεχόμενο σε άργιλο. Τα αργιλώδη εδάφη έχουν κανονικά χαμηλότερη τιμή ειδικής αντίστασης από τα αμμώδη εδάφη. Η ειδική αντίσταση των υπόγειων νερών ποικίλλει από 10 έως 100 Ωm , ανάλογα με συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων. Σημειώστε τη χαμηλή ειδική αντίσταση (περίπου 0.2 Ωm) του νερού της θάλασσας λόγω του σχετικά υψηλού αλατισμένου περιεχόμενου. Αυτό κάνει τη μέθοδο ειδικής αντίστασης μια ιδανική τεχνική για χαρτογράφηση του ορίου μεταξύ αλατούχου και γλυκού νερού στις παράκτιες περιοχές.

Μεταλλικά σουλφίδια (όπως pyrrhotite, galena και ο πυρίτης) έχουν χαρακτηριστικά χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης, λιγότερο από 1 Ωm . Ακόμη, η τιμή της ειδικής αντίστασης ενός ιδιαίτερου τύπου μεταλλεύματος μπορεί να διαφέρει πολύ από την ειδική αντίσταση μεμονωμένων κρυσταλλών. Τα περισσότεροι οξείδια, όπως ο αιματίτης, δεν έχουν σημαντικά χαμηλή τιμή ειδικής αντίστασης. Μια από τις εξαιρέσεις είναι ο μαγνητίτης.

Οι τιμές ειδικής αντίστασης διάφορων βιομηχανικών παραγόντων ρύπανσης δίνονται επίσης στο σχήμα 2.1. Τα μέταλλα, όπως ο σίδηρος, έχουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Χημικές ουσίες που είναι ισχυροί ηλεκτρολύτες, όπως το χλωριούχο νάτριο, μπορούν να μειώσουν πολύ την ειδική αντίσταση του υπόγειου

νερού σε λιγότερο από 1 Ωcm ακόμη και σε αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις. Υδρογονάνθρακες, όπως το ξυλόλιο (6.998x10¹⁶ Ωcm), έχουν χαρακτηριστικά πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Εντούτοις, στην πράξη το ποσοστό των υδρογονανθράκων σε έναν πέτρωμα ή ένα έδαφος είναι συνήθως αρκετά μικρό, και δεν έχουν σημαντική επίδραση στη μαζική ειδική αντίσταση. (Loke, 2004)

2.2.1. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη

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

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

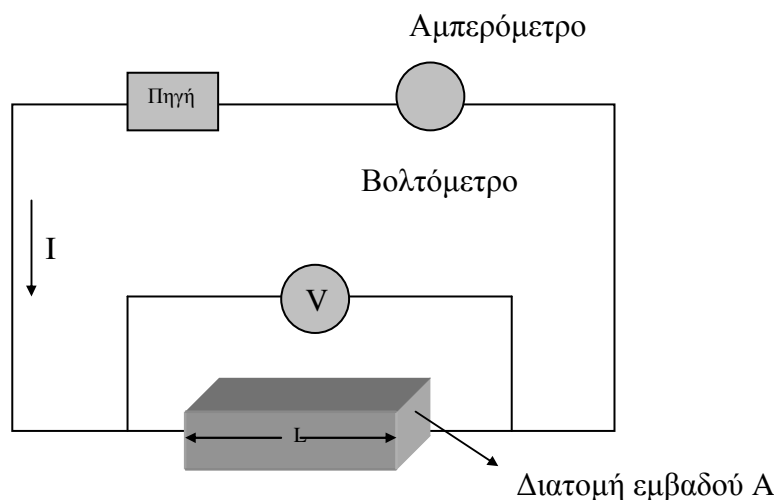
Ωστόσο, η έννοια της ηλεκτρικής αντίστασης περιγράφει την ιδιότητα του υλικού χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις διαστάσεις του. Γι' αυτό το λόγο εισάγεται ο όρος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κι έτσι ο νόμος παίρνει την παρακάτω μορφή, από την οποία διαπιστώνεται ότι η αντίσταση ενός ομογενούς αγωγού είναι ανάλογη με το μήκος L του αγωγού, αντιστρόφως ανάλογη με το εμβαδόν A της τομής του αγωγού και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία του.

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

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

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) μονάδα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το 1 Ωm. Πολλές φορές όμως χρησιμοποιείται και η μονάδα 1Ωcm και είναι 1 Ωm = 100 Ωcm. Το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης λέγεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα κι έχει μονάδα μέτρησης το Siemens/m.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad 2.3$$



Σχήμα 2.2: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου.

Η ειδική αντίσταση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι μεταβάλλονται εύκολα. Δεν αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα συγκεκριμένων λιθολογικών τύπων, καθώς η διακύμανση αυτής μπορεί να παρουσιάζει μεγάλο εύρος στον ίδιο λιθολογικό τύπο. Επίσης δύο τελείως διαφορετικοί σχηματισμοί μπορεί να έχουν παρόμοιες ειδικές αντιστάσεις. Οι τιμές της κυμαίνονται από $10^{-6} \Omega\text{m}$ σε ορισμένα ορυκτά όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι $10^{15} \Omega\text{m}$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1} \Omega\text{m}$ χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15} \Omega\text{m}$.

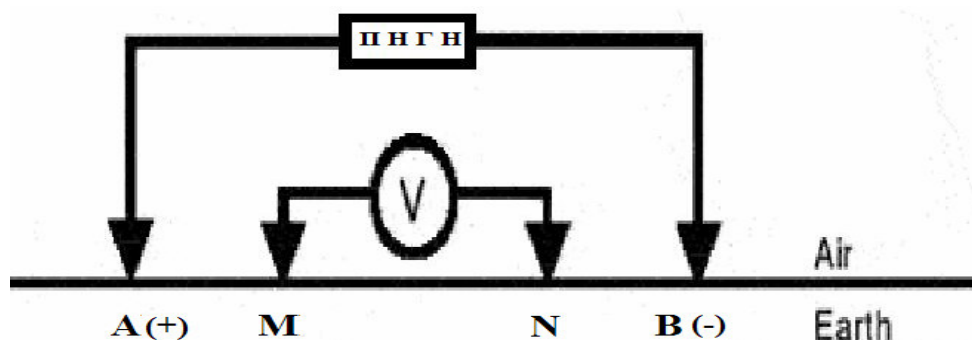
Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι: α) το πορώδες των πετρωμάτων και την περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα. Συγκεκριμένα, όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος, η ειδική αντίσταση αυξάνει. β) η λιθολογία των πετρωμάτων και η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων. 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.

(Βαφείδης, 2001)

Τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους συνδεδεμένα με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος δημιουργείται κλειστό κύκλωμα, στο οποίο η γη αποτελεί τον αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή ο αέρας της ατμόσφαιρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, όλο το ρεύμα από το ηλεκτρόδιο μπαίνει στη γη. Για την κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται ότι η γη είναι ομοιογενής και ισότροπη ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ . Επιπλέον τα ηλεκτρόδια θεωρούνται σημειακά, δηλαδή οι εξισώσεις που προκύπτουν, ισχύουν για σημειακή πηγή.



Σχήμα 2.3: Διάταξη των ηλεκτροδίων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN)

Αρχικά η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων θεωρείται πολύ μεγάλη, ώστε να μπορεί να μελετηθεί το κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Στο θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο η κίνηση των θετικών φορτίων είναι από το ηλεκτρόδιο προς τη γη. Επειδή η γη θεωρείται ομοιογενής το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και οι γραμμές που απεικονίζουν τη ροή (γραμμές ρεύματος) μπορούν να θεωρηθούν ως ακτίνες ημισφαιρικών επιφανειών που έχουν κέντρο την πηγή.



Σχήμα 2.4: Ομοιόμορφη ροή ηλεκτρικών φορτίων προς όλες τις κατευθύνσεις σε ομογενές μέσο. (Γκανιάτσος, 2000)

Η αντίσταση R στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που παρουσιάζει μία ημισφαιρική δομή ακτίνας d , δίνεται σύμφωνα με τη σχέση (2.4) από το γινόμενο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ με τον λόγο της ακτίνας d προς το εμβαδόν $2\pi d^2$ της ημισφαιρικής επιφάνειας.

$$R = \rho \frac{d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi d} \quad 2.4$$

Η διαφορά ΔV_d του δυναμικού V_0 της πηγής από το δυναμικό V_d όλων των σημείων που απέχουν απόσταση d από την πηγή που προκαλείται από τη ροή ρεύματος, έντασης I , μέσα από την ημισφαιρική δομή είναι:

$$\Delta V_d = V_d - V_0 = IR = \frac{I\rho}{2\pi d} \quad 2.5$$

Η επιφάνεια που περιλαμβάνει όλα τα σημεία με το ίδιο δυναμικό ονομάζεται ισοδυναμική επιφάνεια.

Το δυναμικό στο απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής είναι $-V_0$. Το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο έλκει τα θετικά ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα οι γραμμές ρεύματος να συγκλίνουν προς αυτό από όλες τις διευθύνσεις. Μία ημισφαιρική δομή ακτίνας d με κέντρο αυτό το

ηλεκτρόδιο θα παρουσιάζει αντίσταση R στη ροή του ρεύματος σύμφωνα με τη σχέση (2.5). Η διαφορά μεταξύ του δυναμικού $-V_d$ όλων των σημείων που απέχουν απόσταση d από το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και του δυναμικού του V_0 θα είναι:

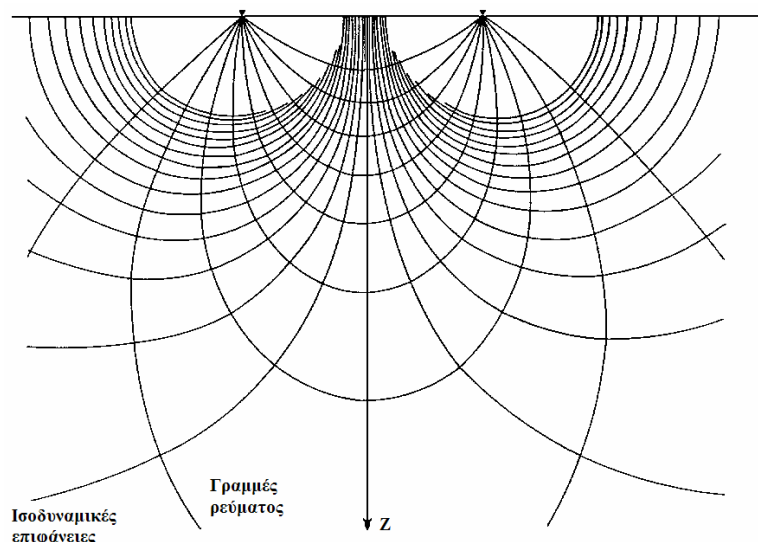
$$-\Delta V_d = -V_d - (-V_0) = V_0 - V_d = -IR = -\frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad 2.6$$

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

Όταν η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων θεωρηθεί μικρή, το ηλεκτρικό πεδίο του ενός ηλεκτροδίου αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο του άλλου ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα το δυναμικό σε ένα σημείο του υπεδάφους να ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών των ηλεκτρικών πεδίων των δύο ηλεκτροδίων. Το συνολικό δυναμικό V σε ένα σημείο του υπεδάφους που απέχει αποστάσεις d_1 και d_2 από την πηγή και τη γείωση αντίστοιχα, ισούται με το άθροισμα του δυναμικού V_{d1} που οφείλεται στην πηγή, με το δυναμικό V_{d2} που οφείλεται στη γείωση:

$$V = V_{d1} + V_{d2} = V_{d1} - V_0 + V_0 + V_{d2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad 2.7$$

Με βάση τη σχέση (2.7) υπολογίζεται το δυναμικό σε όλα τα σημεία του υπεδάφους και γίνεται η σχεδίαση των ισοδυναμικών επιφανειών. Οι γραμμές ρεύματος σχεδιάζονται κάθετα στις ισοδυναμικές επιφάνειες. Τόσο οι γραμμές ρεύματος όσο και οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι συμμετρικές ως προς την ευθεία που τέμνει κάθετα και στο μέσο το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα δύο ηλεκτρόδια.



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση του δυναμικού πεδίου με δυναμικές γραμμές (Reynolds, 1997)

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

2.2.2. Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Επειδή η $\Gamma\eta$ είναι ανομοιογενής και ανισότροπη η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και της γεωμετρικής διάταξης των ηλεκτροδίων. Για τον λόγο αυτό εισάγεται ο όρος της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η αντίσταση αυτή εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Για δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων αποδεικνύεται ότι σημασία για τη διαμόρφωση της τιμής ρ_a έχει η κατανομή της ειδικής αντίστασης των στρωμάτων μέχρι βάθους ίσου κατά προσέγγιση με την απόσταση των ηλεκτροδίων του ρεύματος. Επομένως από τις μεταβολές του ρ_a

που προκύπτουν από τις μετρήσεις με μια συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων μπορούν να διαπιστωθούν μεταβολές στην κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος..

2.2.3. Διατάξεις των ηλεκτροδίων

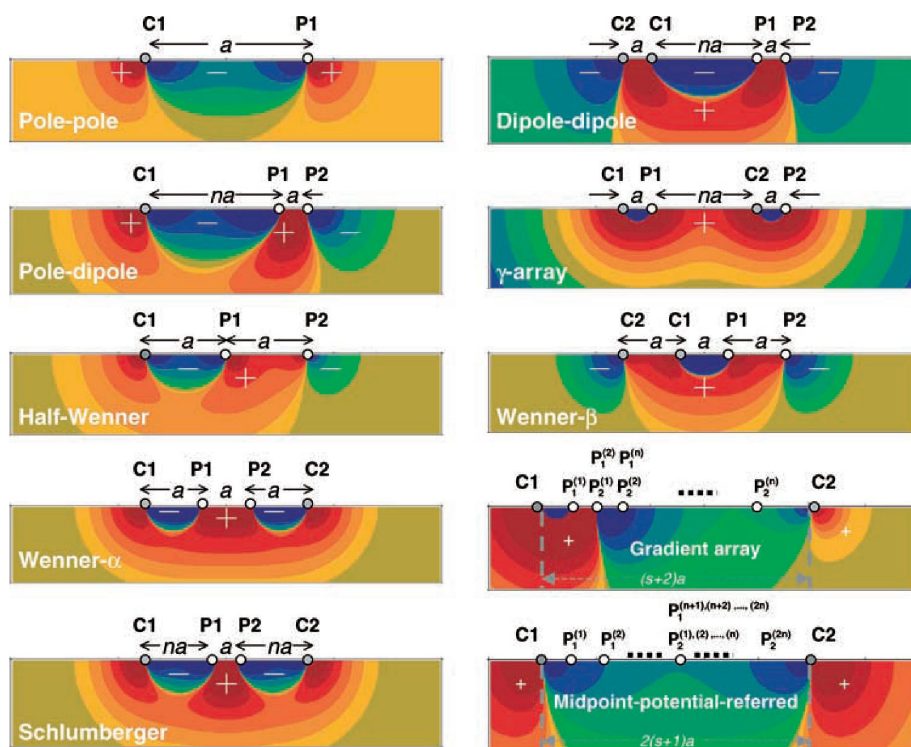
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ηλεκτρόδια ρεύματος και τα ηλεκτρόδια δυναμικού τοποθετούνται στην ίδια ευθεία γραμμή. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος συνήθως τοποθετούνται εξωτερικά των ηλεκτροδίων δυναμικού.

Από τη δεκαετία του '50, πολλές διαφορετικές σειρές ηλεκτροδίων έχουν χρησιμοποιηθεί στις ηλεκτρικές τεχνικές εξερεύνησης, όπως η διάταξη πόλου-πόλου (PP), πόλου-δίπολου (PD), μισή-Wenner (HW), η Wenner-α (WN), η Wenner-Schlumberger (Sc), η δίπολου-δίπολου (DD), η Wenner-β (WB) και η διάταξη γ (GM) (σχήμα 2.6). Η μισή-Wenner (HW) είναι μια πρόσθετη περίπτωση πόλου-δίπολου (PD) με τον παράγοντα n ίσο με ένα. Ομοίως, η διάταξη Wenner-β (WB) είναι μια πρόσθετη περίπτωση διάταξης δίπολου-δίπολου (DD) και η διάταξη Wenner-α (WN) είναι μια πρόσθετη περίπτωση της διάταξης Wenner-Schlumberger (Sc). Επιπλέον, οι δύο διατάξεις ηλεκτροδίων οι οποίες αναφέρονται ως (GD) πιθανώς αναφέρονται σε σημεία μετρήσεις (MPR) (σχήμα 2.6) είναι κατάλληλες για ένα πολυδιαυλικό καταγραφικό σύστημα. Οι σειρές επιτρέπουν πολλές ταυτόχρονες μετρήσεις για κάθε τρέχον σημείο, μειώνοντας κατά συνέπεια σημαντικά το χρόνο εργασίας στην υπαίθρο. Κάθε μια από τις 10 διατάξεις ηλεκτροδίων έχει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της στην εργασία υπαίθρου.

Παρέχουν χρήσιμες πρακτικές επιλογές για έρευνες σε διαφορετικές καταστάσεις. Μερικές απ' αυτές υιοθετούνται τώρα συχνά στις δισδιάστατες ή τρισδιάστατες εφαρμογές απεικόνισης ειδικής αντίστασης, δηλαδή PP, WN, Sc, PD και DD (Dahlin 1996 Chambers και συνεργάτες, 1999, Storz, Storz και Jacobs 2000). Σε γενικές γραμμές, το σύνολο των δεδομένων της διάταξης διπόλου-διπόλου (PP) είναι το πιο βασικό σύνολο δεδομένων, επειδή τα στοιχεία από άλλες σειρές μπορούν να ληφθούν από τους γραμμικούς συνδυασμούς των στοιχείων PP. Δυστυχώς, είναι συχνά δύσκολο να αποκτηθούν δεδομένα PP χωρίς σφάλμα λόγω της περιορισμένης πρό-

σβασης για τα μακρινά ηλεκτρόδια (Park and Van 1991, Van, Park and Hamilton 1991) καθώς επίσης τα δεδομένα αυτά είναι επιρρεπή στο θόρυβο.

Για την απεικόνιση ειδικής αντίστασης, ή την τομογραφία, μπορούν να υπάρχουν διαφορές στις δυνατότητες απεικόνισης των 10 διατάξεων ηλεκτροδίων όταν εφαρμόζονται σε ένα γεωλογικό πρότυπο, δηλ. διαφορές στη χωρική ανάλυση, στην παραγωγή των εικόνων, στην απόκλιση από την αληθινή πρότυπη ειδική αντίσταση και σε μέγιστο βάθος. Οι πίνακες ευαισθησίας διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην αναλυτική ικανότητα μιας διάταξης στην αντιστροφή των στοιχείων. Σημαντικές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την αξία χρήσης μερικών από τις διατάξεις για την απεικόνιση ειδικής αντίστασης. Παραδείγματος χάριν, ο Sasaki (1992) σύγκρινε συνθετικά την ανάλυση της τομογραφίας ειδικής αντίστασης χρησιμοποιώντας τις διατάξεις PP, PD και DD. Πρότεινε ότι η διάταξη διπόλου-διπόλου (DD), όταν η ακρίβεια οργάνων είναι υψηλή, είναι καταλληλότερη για τις σύνθετες δομές από τη διάταξη πόλου-πόλου (PP), και ότι η διάταξη πόλου-διπόλου (PD) μπορεί να παρουσιάσει έναν καλό συνδυασμό ανάλυσης και δύναμης σημάτων. Πρόσφατα, οι Oldenburg and Li (1999) αναλύοντας το βάθος της έρευνας, επιβεβαίωσαν τα διαφορετικά βάθη της διείσδυσης που επιτεύχθηκαν από τις σειρές PP, PD και DD.

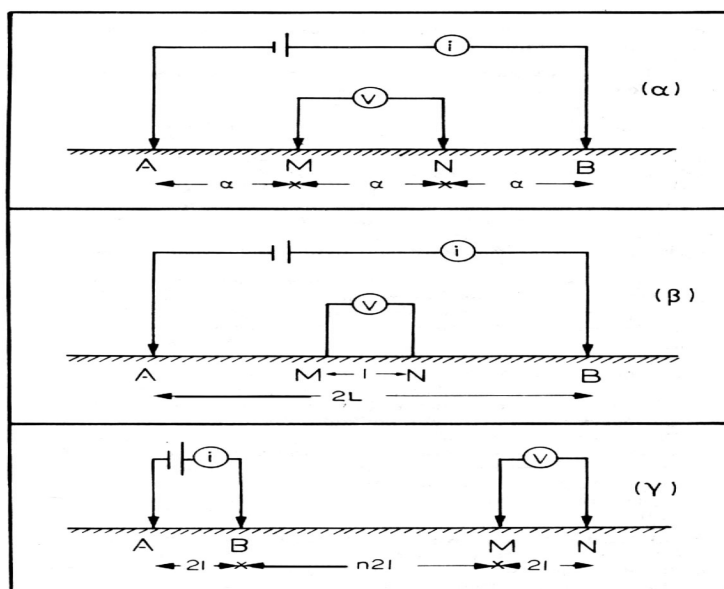


Σχήμα 2.6: Σχηματική παρουσίαση 10 διατάξεων ηλεκτροδίων (Dahlin and Zhou, 2004)

Το σχήμα 2.6 παρουσιάζει σχηματικά τις 10 διατάξεις ηλεκτροδίων. Από το σχήμα αυτό διακρίνεται ότι, εκτός από τα PP, HW, WN και WB, οι διατάξεις έχουν πολλούς συνδυασμούς των παραμέτρων a και n , τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν εξαρτώμενα από την χωρική ανάλυση, το βάθος διείσδυσης και τον θόρυβο. Γενικά, μεγαλύτερα a και n δίνει σχετικά περισσότερες πληροφορίες για τη γήινη δομή, ενώ ένα μικρό διάστημα a ή μικρό n μπορεί να προσφέρει μια σχετικά καλή οριζόντια ανάλυση για τα κατώτερα τμήματα του εδάφους.

Οι Dahlin και Loke (1998) και οι Olayinka και Yaramanci (2000), αντίστοιχα, εξέτασαν την ανάλυση της απεικόνισης και της αξιοπιστίας της διάταξης Wenner- α (WN). Επισήμαναν ότι η πυκνότητα δεδομένων WN είναι σημαντική για την ικανότητα ανάλυσης που διαθέτει και ότι το πρότυπο παρέχει μόνο έναν κατά προσέγγιση οδηγό στην αληθινή γεωμετρία και την αληθινή ειδική αντίσταση του εδάφους. (Dahlin and Zhou, 2004)

Στην πράξη, συχνότερα, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω διατάξεις, οι τρεις από τις σημαντικότερες φαίνονται στο σχήμα:



Σχήμα 2.7: Διατάξεις Wenner (α), Schlumberger (β), διπόλου-διπόλου (γ)

(Παπαζάχος, 1986, σελ. 253)

α) Διάταξη Wenner

Η διάταξη Wenner κατά την οποία τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού τοποθετούνται στην ίδια ευθεία γραμμή, συμμετρικά σε σχέση με το κέντρο της διάταξης που είναι το μέσο της απόστασης AM. Κάθε ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχει από το παρακείμενο ηλεκτρόδιο ρεύματος απόσταση a , ίση με το $1/3$ της μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος απόστασης. Η μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού απόσταση είναι επίσης a .

Επομένως, $AM = MN = NB = a$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.α, έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho_a = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I} \quad 2.8$$

Η ποσότητα

$$2\pi \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = 2\pi a \quad 2.9$$

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

Η διάταξη Wenner χρησιμοποιείται συχνά και έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Η διάταξη Wenner δίνει την πιο έντονη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης. Με τη χρήση ενός πέμπτου ηλεκτροδίου και ενός διακόπτη το τελευταίο ηλεκτρόδιο μπορεί να ενεργοποιηθεί και τοποθετηθεί στην αρχή της διάταξης, ενώ ο χειριστής παίρνει τη μέτρηση με τα άλλα τέσσερα ηλεκτρόδια. Μ' αυτόν τον τρόπο κάθε επιπλέον μέτρηση παίρνεται με την μετακίνηση μόνο ενός ηλεκτροδίου.

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το πρόβλημα ερμηνείας εξαιτίας του χαρακτηριστικού σήματος διπλής κορυφής, όταν η διάταξη διασχίζει κάθετα γραμμική δομή. Δηλαδή μεγάλη τιμή πριν και μετά τη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα, ενώ δίνει μικρή τιμή ακριβώς πάνω από τη δομή. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που η δομή έχει μικρότερη αντίσταση.

Ένα ακόμη μειονέκτημα αποτελεί η δυσκολία στο διαχωρισμό γειτονικών δομών. (Βαφείδης, 2001),

β) Διάταξη Schlumberger

Στη διάταξη Schlumberger, τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N είναι ανάμεσα στα A και B και σε απόσταση b από το κέντρο της διάταξης. Έτσι είναι $AB = 2L$ και $MN = 2b = \ell$ (σχήμα 2.7.b), η απόσταση 2b μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση 2L μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Έτσι ο γεωμετρικός συντελεστής K θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$K=2\pi \left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} + \frac{1}{L-b} \right)^{-1} = (L^2 - b^2) \frac{\pi}{2b} \quad 2.10$$

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

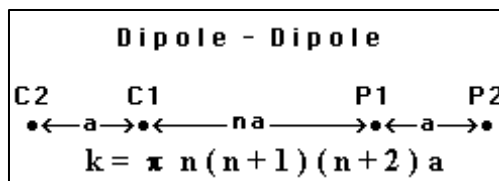
$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i} \quad 2.11$$

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο εύχρηστη, επειδή αντίθετα με τις άλλες διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει επίσης στον περιορισμό των ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές γεωλογικές ασυνέχειες. Ωστόσο, κι εδώ παρουσιάζεται πρόβλημα ερμηνείας, όπως και στη διάταξη Wenner.

γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Η διάταξη του διπόλου κατά την οποία το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος απέχει από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων δυναμικών πολύ

μεγαλύτερη απόσταση από την απόσταση a μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ή την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού.



Σχήμα 2.8: Η διάταξη διπόλου-διπόλου.

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

$$K = \pi n a (n+1) (n+2) \quad 2.12$$

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από την σχέση:

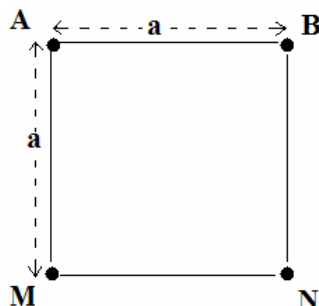
$$\rho_a = \pi n a (n+1) (n+2) \frac{\Delta V}{i} \quad 2.13$$

Η διάταξη διπόλου – διπόλου δίνει καθαρά τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι, επειδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι μικρή περιορίζεται το βάθος διεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως και η ευαισθησία της μεθόδου με την αύξηση του βάθους.

δ) Τετραγωνική διάταξη

Η τετραγωνική διάταξη (Clark, 1968) αποτελείται από τέσσερα ηλεκτρόδια που σχηματίζουν τετράγωνο και βρίσκεται πάνω σε βάση μαζί με τον υπόλοιπο εξοπλισμό. Το πλεονέκτημά της, επομένως, αποτελεί η ευκολία μετακίνησής της, ενώ το μειονέκτημά της στηρίζεται στο γεγονός ότι η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια

είναι συγκεκριμένη, συνήθως 1m, με αποτέλεσμα αυτό είναι και το μέγιστο βάθος διασκόπησης. (Βαφείδης, 2001)



Σχήμα 2.9: Τετραγωνική διάταξη

ε) Διάταξη διδύμου ζεύγους ηλεκτροδίων

Μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από τη Wenner, αν τα ηλεκτρόδια N και B τοποθετηθούν σε απόσταση από τα άλλα δύο. Το ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων, τα A και M, παραμένει σταθερό και το άλλο, τα N και B, μετακινείται στην περιοχή μελέτης. Θεωρώντας σταθερό το ηλεκτρικό πεδίο μεγάλες μεταβολές στη μετρούμενη τάση οφείλονται σε δομές που παρουσιάζουν αντίθεση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τα περιβάλλοντα πετρώματα, βρίσκονται κοντά στο κινούμενο ζευγάρι και ο εντοπισμός τους αποτελεί τον στόχο της μεθόδου.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- ❖ η ελάχιστη απαιτούμενη μετακίνηση
- ❖ η δυνατότητα παραγωγής ανωμαλιών μιας κορυφής και
- ❖ η ελάχιστη επίδραση της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ ηλεκτροδίων

και εδάφους που παρουσιάζει.

Το κύριο μειονέκτημά της διάταξης είναι η χαμηλή ευαισθησία.

2.2.4 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τις γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις. Η διάταξη των ηλεκτροδίων επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι παράγοντες-κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις είναι οι παρακάτω:

❖ Λόγος σήματος προς θόρυβο

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

❖ Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες

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

❖ Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος

Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος δίνει λεπτομερή ανάλυση της ειδικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

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

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

❖ Βάθος διασκόπησης

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

❖ Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου

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

❖ Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

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

(Μποτωνάκης-Αντωνοπούλου 2006, Χορευτάκη 2003)

2.2.5. Μέθοδοι έρευνας

Οι συνηθέστερες μέθοδοι έρευνας των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι:

- ❖ οι βυθοσκοπήσεις
- ❖ οι οριζοντιογραφίες και
- ❖ οι τομογραφίες.

Παρακάτω αναφέρονται οι δύο πρώτες, ενώ η τελευταία αναλύεται διεξοδικότερα σε ξεχωριστή ενότητα.

2.2.5.1. Βυθοσκοπήσεις

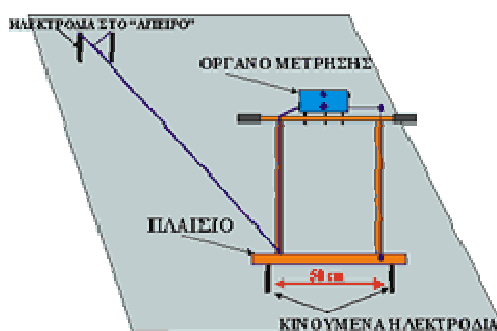
Με την εφαρμογή των βυθοσκοπήσεων γίνεται προσπάθεια να ερευνηθεί η κατανομή της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Η όλη διαδικασία στηρίζεται στο γεγονός ότι το υπέδαφος θεωρείται ότι έχει οριζόντια στρωματογραφία, δηλαδή αποτελείται από διακριτά, οριζόντια, ομογενή και ισότροπα στρώματα. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η μέθοδος Schlumberger. Κλασσικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα των υδροφόρων στρωμάτων.

Λαμβάνονται μία σειρά μετρήσεων με συνεχώς αυξανόμενες τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος (τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά). Με την συνεχή αύξηση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό μετριέται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής αντίστασης σε μια στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης.

2.2.5.2. Οριζοντιογραφίες

Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τις βυθοσκοπήσεις, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και οι μετρήσεις λαμβάνονται μετακινώντας πλευρικά την διάταξη των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα. Με τον τρόπο αυτό χαρτογραφούνται μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος. Κυρίως χρησιμοποιούνται οι διατάξεις Wenner, Διπόλου - Διπόλου και Πόλου - Διπόλου. Οι οριζοντιογραφίες αποτελούν κλασσικές μεθόδους χαρτογράφησης των αρχαιολογικών θέσεων.

Ειδικότερα στην αρχαιομετρία χρησιμοποιείται η διάταξη του Διπλού Ηλεκτροδίου (Twin Probe Array) λόγω της εύκολης ερμηνείας των δεδομένων, της ταχύτητας κάλυψης του χώρου και της σχετικά καλής χωρικής διακριτικότητας της μεθόδου.



Σχήμα 2.10: Διάταξη διπλού ηλεκτροδίου (www.ims.forth.gr)

Η μέθοδος της διπλής διάταξης χρησιμοποιεί δύο ακίνητα απομακρυσμένα ηλεκτρόδια (ένα για το ρεύμα και ένα για το δυναμικό), που βρίσκονται σε απόσταση ίση με 30 φορές την απόσταση των κινητών ηλεκτροδίων, από την εκάστοτε περιοχή έρευνας (π.χ. σε απόσταση 15 μέτρων για απόσταση κινητών ηλεκτροδίων ίση με 0.5 μέτρο). Τα κινητά ηλεκτρόδια (ένα για το ρεύμα και ένα για το δυναμικό) κινούνται ταυτόχρονα και με σταθερό βήμα δειγματοληψίας εντός της υπό εξέτασης περιοχής. Η χωρική διακριτική ικανότητα της διάταξης είναι της τάξης του α , ενώ το βάθος ανίχνευσης δύναται να φθάσει το $1 - 2\alpha$, όπου α είναι το άνοιγμα των κινητών ηλεκτροδίων. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης των $1 - 0.1 \Omega$. Στο σχήμα 2.10 φαίνεται η διάταξη του Διπλού Ηλεκτροδίου όπως αυτή χρησιμοποιείται κατά τις υπαίθριες μετρήσεις (www.ims.forth.gr).

2.3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η δισδιάστατη διάταξη μέτρησης επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων τα οποία εμπεριέχουν πληροφορίες τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης. Αυτού του τύπου οι μετρήσεις είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτική ερμηνεία θαμμένων δομών (προσδιορισμός βάθους, μεγέθους, σχήματος της δομής) και έχουν χρησιμοποιηθεί στην αρχαιολογική έρευνα.

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.

Παραδοσιακά τα δισδιάστατα γεωηλεκτρικά δεδομένα που συλλέγονται με αυτό τον τρόπο παρουσιάζονται και ερμηνεύονται με τη μέθοδο της ψευδοτομής. Αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα των ηλεκτροδίων τόσο περισσότερο οι μετρούμενες αντιστάσεις αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάθη. Έτσι κάθε μέτρηση προβάλλεται κάτω από το κέντρο της ηλεκτροδιακής διάταξης κάθε μέτρησης σε βάθος ανάλογο με το άνοιγμα των ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται μια δισδιάστατη ψευδοτομή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων 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” και η όλη διαδικασία που μπορεί να παράγει υψηλής ποιότητας τομογραφικές εικόνες του υπεδάφους λέγεται “ηλεκτρική τομογραφία”.

Επομένως, ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (HT) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο “παραδοσιακών” τεχνικών μέτρησης: της όδευσης (χαρτογράφησης) και της βυθοσκοπήσης. 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 ει-

κής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη “εικόνα” του υπεδάφους.

Η πρόδρομος μέθοδος της HT, δηλαδή η μέθοδος της “ψευδοτομής”, έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards 1977) αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές (π.χ. υδρογεωλογικές, Griffiths συνεργάτες. 1990). Στην διαδικασία της “ψευδοτομής” μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου και γενικότερα όλες σχεδόν οι διατάξεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία). Η HT όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις (π.χ. Shima 1992).

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). Στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιείται η διάταξη διπόλου – διπόλου. 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, η χρήση των οποίων αυξάνει αναπόφευκτα το κόστος εφαρμογής της μεθόδου. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι οι τομές αυτού του τύπου, λόγω του μεγάλου φόρτου εργασιών υπαίθρου που παρουσιάζουν, μετρούνται συνήθως επιλεκτικά σε περιοχές που παρουσιάζουν αυξημένο ενδιαφέρον.

Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι ερμηνείας των γεωηλεκτρικών δεδομένων, π.χ. ψευδοτομή, δεν μπορούν να ανταποκριθούν στην πολυπλοκότητα των μετρήσεων της HT. Για αυτόν τον λόγο έχουν προταθεί νέες τεχνικές ερμηνείας και επεξεργασίας. Οι τεχνικές αυτές επιδιώκουν την επίλυση του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Zhody-Barker, (Barker 1992), μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos συνεργάτες. 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής (π.χ. Tripp συνεργάτες. 1984) που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της HT (Shima 1990, Tsourlos συνεργάτες. 1995) (Τσόκας, 2007).

2.3.1. Βασική θεωρία αντιστροφής

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. Η πρότυπη ανταπόκριση είναι τα δεδομένα τα οποία μπορούν να υπολογιστούν από μαθηματικές σχέσεις καθορίζοντας το σύνολο των παραμέτρων. Όλες οι μέθοδοι αντιστροφής προσπαθούν ουσιαστικά να καθορίσουν ένα πρότυπο για το υπέδαφος η ανταπόκριση του οποίου συμφωνεί με τα μετρημένα στοιχεία που υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς. Στην μέθοδο που χρησιμοποιείται από τα RES2DINV και RES3DINV προγράμματα, οι πρότυπες παράμετροι είναι οι τιμές ειδικής αντίστασης των πρότυπων στοιχείων, ενώ τα δεδομένα είναι οι μετρημένες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η μαθηματική σύνδεση μεταξύ των παραμέτρων και της ανταπόκρισης για τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα πρότυπα ειδικής αντίστασης δίνεται από τη μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών (Dey και Morrison 1979a, 1979b) ή τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Silvester και Ferrari 1990).

Σε όλες τις μεθόδους βελτιστοποίησης, ένα αρχικό πρότυπο τροποποιείται κατά τρόπο επαναληπτικό έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ της πρότυπης ανταπόκρισης και των στοιχείων που παρατηρούνται να μειώνεται. Το σύνολο από τα παρατηρηθέντα δεδομένα μπορεί να γραφτεί ως ένα διάνυσμα y που δίνεται από (Loke 2004):

$$y = \text{col}(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m) \quad 2.14$$

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

$$f = \text{col}(f_1, f_2, f_3, \dots, f_m) \quad 2.15$$

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 :

$$\mathbf{q} = \text{col}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \dots, \mathbf{q}_n) \quad 2.16$$

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):

$$\mathbf{g} = \mathbf{y} - \mathbf{f} \quad 2.17$$

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):

$$E = \mathbf{g}^T \mathbf{g} = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad 2.18$$

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):

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \Delta \mathbf{q}_i = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad 2.19$$

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

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad 2.20$$

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):

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \Delta \mathbf{q}_k \quad 2.21$$

Στην πράξη, η απλή εξίσωση ελαχίστων τετραγώνων (2.19) 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. Η υπολογισμένο διάνυσμα από την εξίσωση (2.19) μπορεί να έχει πάρα πολύ μεγάλες παραμέτρους έτσι ώστε το νέο πρότυπο που υπολογίζεται από την (2.21) 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:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_i = J^T g \quad 2.22$$

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 (2.19) 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. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην αντιστροφή γεωλογικού προβλήματος όπου το πρότυπο αποτελείται από μικρό αριθμό στρωμάτων. Εντούτοις όταν ο αριθμός πρότυπων παραμέτρων είναι μεγάλος, όπως στο δισδιάστατο και τρισδιάστατο πρότυπο αντιστροφής, το πρότυπο που παράγεται από αυτή τη μέθοδο μπορεί να έχει μια ακανόνιστη κατανομή ειδικής αντίστασης με υψηλές ή χαμηλές ζώνες ειδικής αντίστασης που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (Constable και συνεργάτες, 1987). Για να υπερνικηθεί αυτό το πρόβλημα, η εξίσωση ελαχίστων τετραγώνων Gauss-Newton τροποποιείται περαιτέρω ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι χωρικές συντεταγμένες στις πρότυπες παραμέτρους (δηλ. η πρότυπη αλλαγή τιμών ειδικής αντίστασης κατά τρόπο ομαλό ή βαθμιαίο).

Αυτή, λοιπόν η μέθοδος (Ellis και Oldenburg 1994a) έχει την ακόλουθο μαθηματική μορφή:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_i = J^T g - \lambda F q_k \quad 2.23$$

όπου

$$F = a_x C_x^T C_x + a_y C_y^T C_y + a_z C_z^T C_z \quad 2.24$$

όπου C_x, C_y, C_z είναι οι μήτρες ομαλότητας στη X, το Y και τις Z διεύθυνση, ενώ τα a_x, a_y, a_z είναι τα σχετικά βάρη που δίνονται στα φίλτρα ομαλότητας στη X, Y και τις Z διεύθυνση. Μια κοινή μορφή της πίνακας ομαλότητας είναι η διαφορική πρώτης τάξης (deGroot-Hedlin και Constable και συνεργάτες, 1990) η οποία δίνεται από:

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ & & & \dots & & & & \\ & & & & \dots & & & \\ & & & & & \dots & & \\ & & & & & & \dots & \\ & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

Η εξίσωση 2.23 επίσης προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το τετράγωνο των χωρικών αλλαγών, ή την τραχύτητα, από τις πρότυπες τιμές ειδικής αντίστασης. Είναι στην πραγματικότητα μια l_2 νόρμα περιορισμένης ομαλότητας για την βελτιστοποίηση της μεθόδου. Αυτό τείνει να παράγει ένα πρότυπο με ομαλή παραλλαγή των τιμών ειδικής αντίστασης. Αυτή η προσέγγιση είναι αποδεκτή εάν η πραγματική υπεδάφεια ειδική αντίσταση ποικίλλει με ομαλό και κλιμακούμενο τρόπο. Σε μερικές περιπτώσεις, η γεωλογία του υπεδάφους αποτελείται από διάφορες περιοχές που είναι εσωτερικά σχεδόν ομοιογενές αλλά με ασαφή όρια μεταξύ των διαφορετικών περιοχών. Για τέτοιες περιπτώσεις, η διατύπωση αντιστροφής της (2.23) μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απόλυτες αλλαγές στις πρότυπες τιμές ειδικής αντίστασης (Claerbout και Muir 1973). Αυτό μπορεί μερικές φορές να δώσει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα. Τεχνικά αυτό αναφέρεται ως μια l_1 νόρμα της μεθόδου βελτιστοποίησης, ή συχνότερα γνωστός ως κανονικοποιημένη μέθοδος αντιστροφής. Ένας

αριθμός τεχνικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια τέτοια τροποποίηση. Μια απλή μέθοδος που εφαρμόζει μια I_1 νόρμα βασισμένη στη μέθοδο βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. (Wolke και Schwetlick, 1988). Η βελτιστοποίηση της εξίσωσης (2.23) τροποποιείται ως εξής (Loke 2004):

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta q_i = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad 2.25$$

όπου

$$F_R = a_x C_x^T R_m C_x + a_y C_y^T R_m C_y + a_z C_z^T R_m C_z \quad 2.26$$

όπου R_d και R_m είναι οι μήτρες βαρύτητας οι οποίες εισήχθησαν έτσι ώστε διαφορετικά στοιχεία των δεδομένων και τα πρότυπα διανύσματα τραχύτητας να έχουν ίση βαρύτητα στη διαδικασία αντιστροφής.

Η εξίσωση (2.25) παρέχει μια γενική μέθοδο που μπορεί να τροποποιηθεί περαιτέρω εάν είναι απαραίτητο να περιληφθούν γεωλογικές πληροφορίες. Για παράδειγμα, εάν είναι γνωστό ότι οι παραλλαγές της υπεδάφειας ειδικής αντίστασης μπορούν να περιοριστούν σε μια ζώνη, οι τιμές του παράγοντα απόσβεσης λ μπορούν να τροποποιηθούν (Ellis και Oldenburg 1994a) έτσι ώστε μεγαλύτερος αλλαγές να επιτραπούν σε εκείνη την ζώνη. (Loke, 2004)

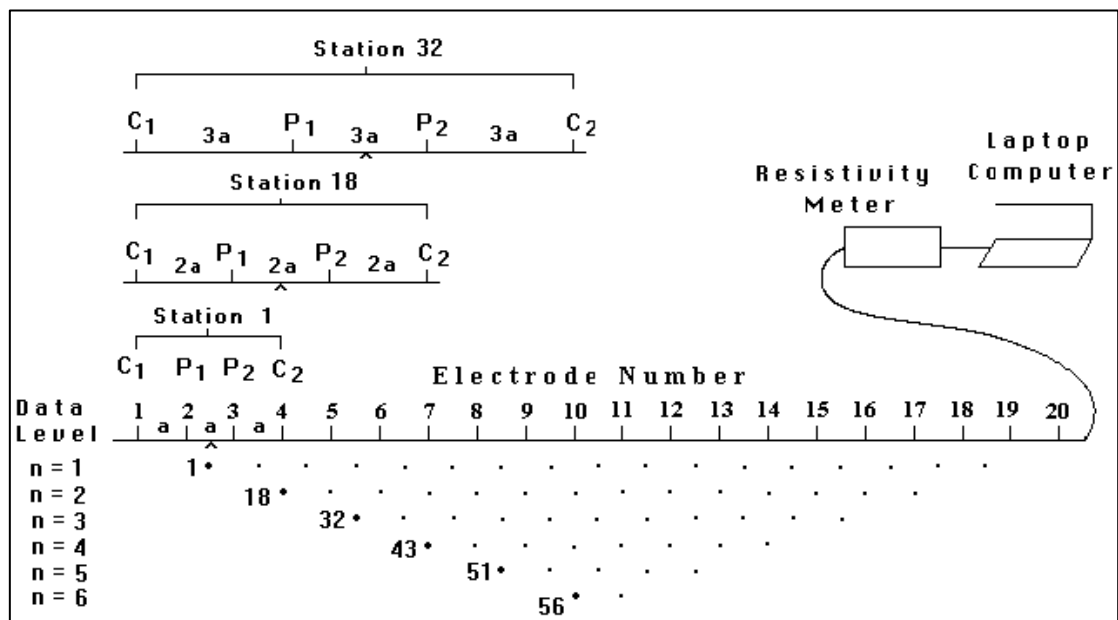
2.3.2 Μέθοδοι δισδιάστατης έρευνας

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 2.11).

Το σχήμα 2.11 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική οργάνωση σε δισδιάστατη έρευνα με διάφορα ηλεκτρόδια κατά μήκος ευθείας γραμμής συνδεδεμένα με πολλαπλό 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.



Σχήμα 2.11: 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 2.11 παρουσιάζει πιθανή ακολουθία μετρήσεων για τη διάταξη ηλεκτροδίων Wenner για σύστημα με 20 ηλεκτρόδια. Σε αυτό το παράδειγμα, το διάστημα μεταξύ των παρακείμενων

ηλεκτροδίων είναι «a». Το πρώτο βήμα είναι να γίνουν όλες οι πιθανές μετρήσεις με τη διάταξη Wenner με ένα διάστημα ηλεκτροδίων «1a». Για την πρώτη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια με τον αριθμό 1, 2, 3 και 4. Παρατηρείται ότι το ηλεκτρόδιο 1 χρησιμοποιείται ως πρώτο ρεύματος ηλεκτροδίου C1, το ηλεκτρόδιο 2 ως πρώτο ηλεκτρόδιο δυναμικού P1, το ηλεκτρόδιο 3 ως δεύτερο ηλεκτρόδιο δυναμικού P2 και το ηλεκτρόδιο 4 ως δεύτερο ηλεκτρόδιο ρεύματος C2. Για τη δεύτερη μέτρηση, τα ηλεκτρόδια 2, 3, 4 και 5 χρησιμοποιούνται για C1, P1, P2 και C2 αντίστοιχα. Αυτό επαναλαμβάνεται κατά μήκος της γραμμής ηλεκτροδίων έως ότου χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρόδια 17, 18, 19 και 20 για τελευταία μέτρηση με διάστημα «1a». Για σύστημα με 20 ηλεκτρόδια, υπάρχουν 17 ($20 - 3$) μετρήσεις με διάστημα «1a» για τη διάταξη Wenner.

Μετά την ολοκλήρωση της ακολουθίας μετρήσεων με διάστημα «1a», γίνεται η επόμενη ακολουθία μετρήσεων με διάστημα ηλεκτροδίων «2a». Τα ηλεκτρόδια 1, 3, 5 και 7 χρησιμοποιούνται για την πρώτη μέτρηση. Τα ηλεκτρόδια επιλέγονται έτσι ώστε το διάστημα μεταξύ παρακείμενων τα ηλεκτρόδια είναι «2a». Για τη δεύτερη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 2, 4, 6 και 8. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρόδια 14, 16, 18 και 20 για την τελευταία μέτρηση με διάστημα «2a». Για ένα σύστημα με 20 ηλεκτρόδια, υπάρχουν 14 ($20 - 2 \times 3$) μετρήσεις με «2a».

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις μετρήσεις με διάστημα «3a», «4a», «5a» και «6a». Για καλύτερα αποτελέσματα, οι μετρήσεις σε μια έρευνα πρέπει να πραγματοποιηθούν με συστηματικό τρόπο έτσι ώστε, όσο είναι δυνατόν να γίνουν όλες οι πιθανές μετρήσεις. Αυτό θα έχει επιπτώσεις στην ποιότητα του προτύπου ερμηνείας που λαμβάνεται από την αντιστροφή των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (Dahlin και Loke 1998).

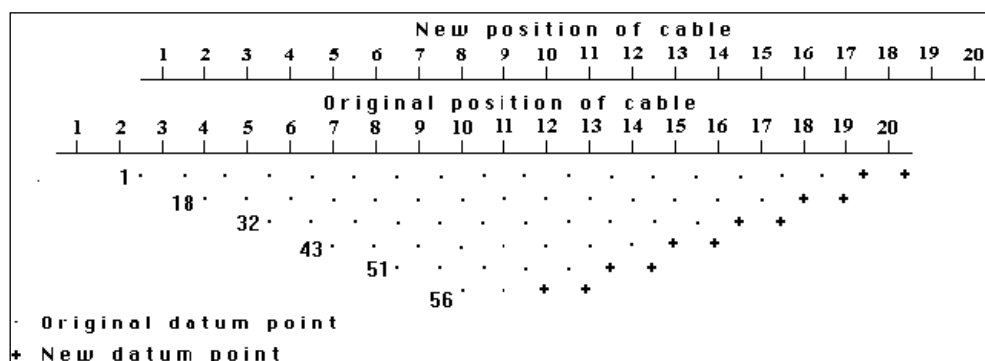
Πρέπει να αναφερθεί ότι καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων αυξάνεται, ο αριθμός μετρήσεων μειώνεται. Ο αριθμός μετρήσεων που μπορεί να ληφθεί για κάθε διάστημα ηλεκτροδίων, για συγκεκριμένο αριθμό ηλεκτροδίων κατά μήκος της γραμμής έρευνας, εξαρτάται από τον τύπο της διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί. Η διάταξη Wenner δίνει το μικρότερο αριθμό πιθανών μετρήσεων έναντι άλλων διατάξεων που χρησιμοποιούνται στις δισδιάστατες έρευνες.

Η διαδικασία ερευνών με τη διάταξη πόλου-πόλου είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται για την διάταξη Wenner. Για ένα σύστημα με 20 ηλεκτρόδια,

αρχικά γίνονται 19 μετρήσεις με διάστημα «1a», ακολουθούμενες από 18 μετρήσεις με διάστημα «2a», που ακολουθείται από 17 μετρήσεις με διάστημα «3a» κ.τ.λ..

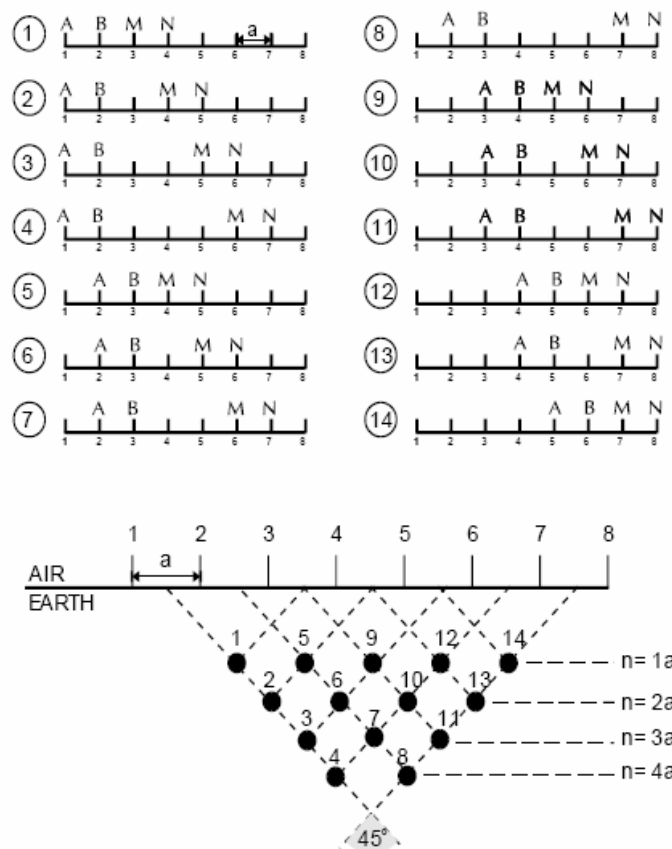
Για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, Wenner-Schlumberger και πόλου-διπόλου, η διαδικασία ερευνών είναι ελαφρώς διαφορετική. Για παράδειγμα, για τη διάταξη διπόλου-διπόλου, η οποία χρησιμοποιείται και σε αυτή την εργασία, η μέτρηση αρχίζει συνήθως με ένα διάστημα «1a» μεταξύ των C1-C2 (και επίσης του P1-P2)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

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να επεκταθεί η οριζόντια κάλυψη της έρευνας, ιδιαίτερα για σύστημα με περιορισμένο αριθμό ηλεκτροδίων, είναι η τεχνική κυλιόμενης μεταφοράς. Μετά την ολοκλήρωση της ακολουθίας μετρήσεων, το καλώδιο κινείται μέχρι το τέλος της γραμμής και με διάφορα διαστήματα ηλεκτροδίων. Όλες οι μετρήσεις που περιλαμβάνουν τα ηλεκτρόδια σε μέρος του καλωδίου που δεν επικαλύπτουν την αρχική γραμμή ερευνών, επαναλαμβάνονται.



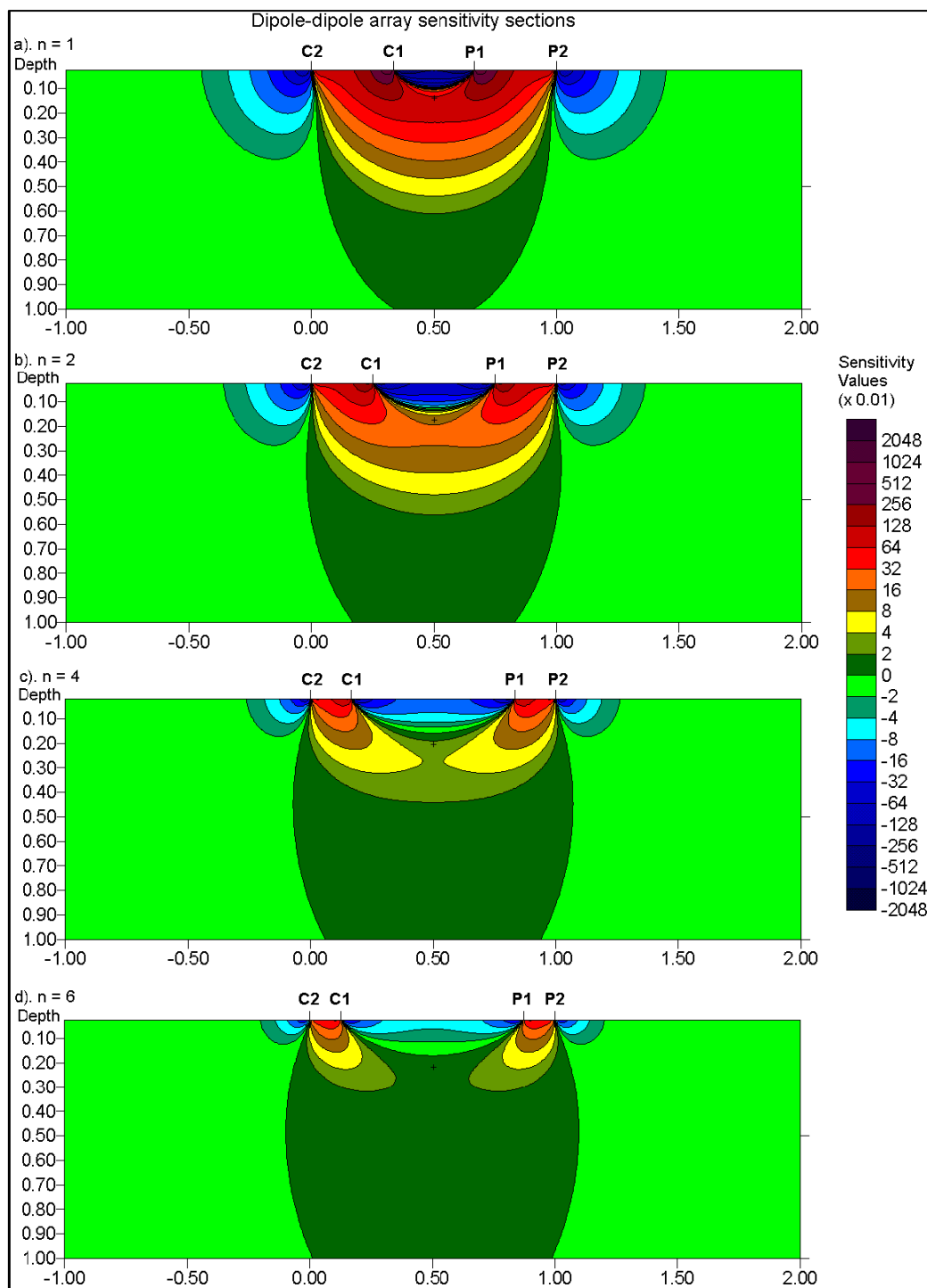
Σχήμα 2.12: τεχνική κυλιόμενης μεταφοράς (Loke, 2004).

2.3.3. ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ



Σχήμα 2.13: Η διάταξη διπόλου-διπόλου, (Τσόκας, 2007)

Το σχήμα 2.14 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 » μεγαλύτερου από 2, οι τιμές ευαισθησίας για την χάραξη ψευδοτομών γίνονται αμελητέες.

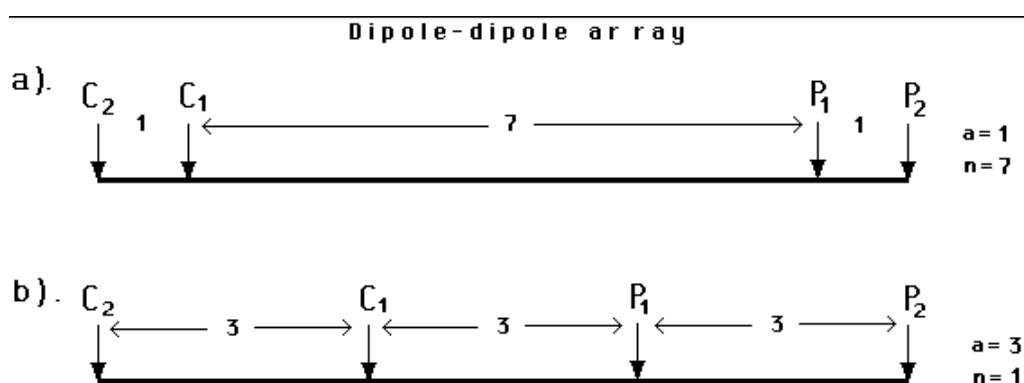


Σχήμα 2.14: Δισδιάστατα τμήματα ευαισθησίας της διάταξης διπόλου-διπόλου με (α) $n=1$, (β) $n=2$, (γ) $n=4$ και (δ) $n=6$. (Loke, 2004)

Κατά συνέπεια η διάταξη διπόλου-διπόλου είναι πολύ ευαίσθητη στις οριζόντιες αλλαγές της ειδικής αντίστασης, αλλά σχετικά ανεπηρέαστη στις κάθετες αλλαγές της ειδικής αντίστασης. Αυτό σημαίνει ότι είναι καλή στη χαρτογράφηση όπου οι δομές είναι κάθετες, 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 2.15 παρουσιάζει δύο διαφορετικές ρυθμίσεις για τη διάταξη διπόλου-διπόλου με το ίδιο μήκος διάταξης αλλά με διαφορετικούς παράγοντες «a» και «n».



Σχήμα 2.15. 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.

Οι Loke και Barker (1996a) χρησιμοποίησαν πρότυπο αντιστροφής το οποίο ακολουθεί άμεσα τα σημεία χάραξης της ψευδοτομής. Το RES2DINV καθορίζει αυτόματα 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 ληφθεί θετική τιμή της ειδικής αντίστασης ρυθμίζεται η διάταξη έτσι ώστε η σειρά να είναι C2-C1-P1-P2. (Loke, 2004)

2.4. Το πρόγραμμα RES2DINV

2.4.1. Γενικά

Ο σκοπός αυτού του προγράμματος είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε ορθογώνια παραλληλόγραμμα 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. Υπάρχει η δυνατότητα να μην ληφθούν υπόψη μετρήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο σφάλμα. Επίσης, ρυθμίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής. Οι γεωηλεκτρικές τομές για τις έξι γραμμές της περιοχής μελέτης περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Χρησιμοποιείται η τεχνική ελαχίστων τετραγώνων για την αντιστροφή των δεδομένων (deGroot-Hedlin and Constable, 1990, Loke and Barker, 1996a) 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.

Το πρόβλημα της μη-μοναδικότητας είναι γνωστό στην αντιστροφή της ειδικής αντίστασης και άλλων γεωφυσικών δεδομένων. Για το ίδιο σύνολο μετρήσεων, υπάρχει ευρύ φάσμα των προτύπων για τις ίδιες υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Για να περιοριστούν τα πιθανά πρότυπα, γίνονται μερικές υποθέσεις σχετικές με τη φύση του υπεδάφους οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν στην υπορουτίνα αντιστροφής.

Σχεδόν σε όλες τις έρευνες, κάποια δεδομένα είναι γνωστά για τη γεωλογία του υπεδάφους. Σε μερικές περιπτώσεις είναι γνωστό εάν τα όρια της περιοχής που μας ενδιαφέρουν είναι κλιμακωτά, όπως τα όρια ρύπανσης ή πέτρωμα με παχύ μεταβατικό οριακό στρώμα. Τέτοιες περιπτώσεις, η συμβατική μέθοδος εξομαλυσμένης αντιστροφής (deGroot-Hedlin και Constable, το 1990) δίνει πρότυπο που αντιστοιχεί περισσότερο στην πραγματικότητα. Αυτή είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος στο πρόγραμμα RES2DINV. Σε άλλες περιπτώσεις, το υπέδαφος αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς που είναι εσωτερικά σχεδόν ομοιογενείς με ασαφή όρια μεταξύ διαφορετικών σχηματισμών. Για τέτοιες περιπτώσεις, μια περιορισμένη πρότυπη αντιστροφή είναι καταλληλότερη.

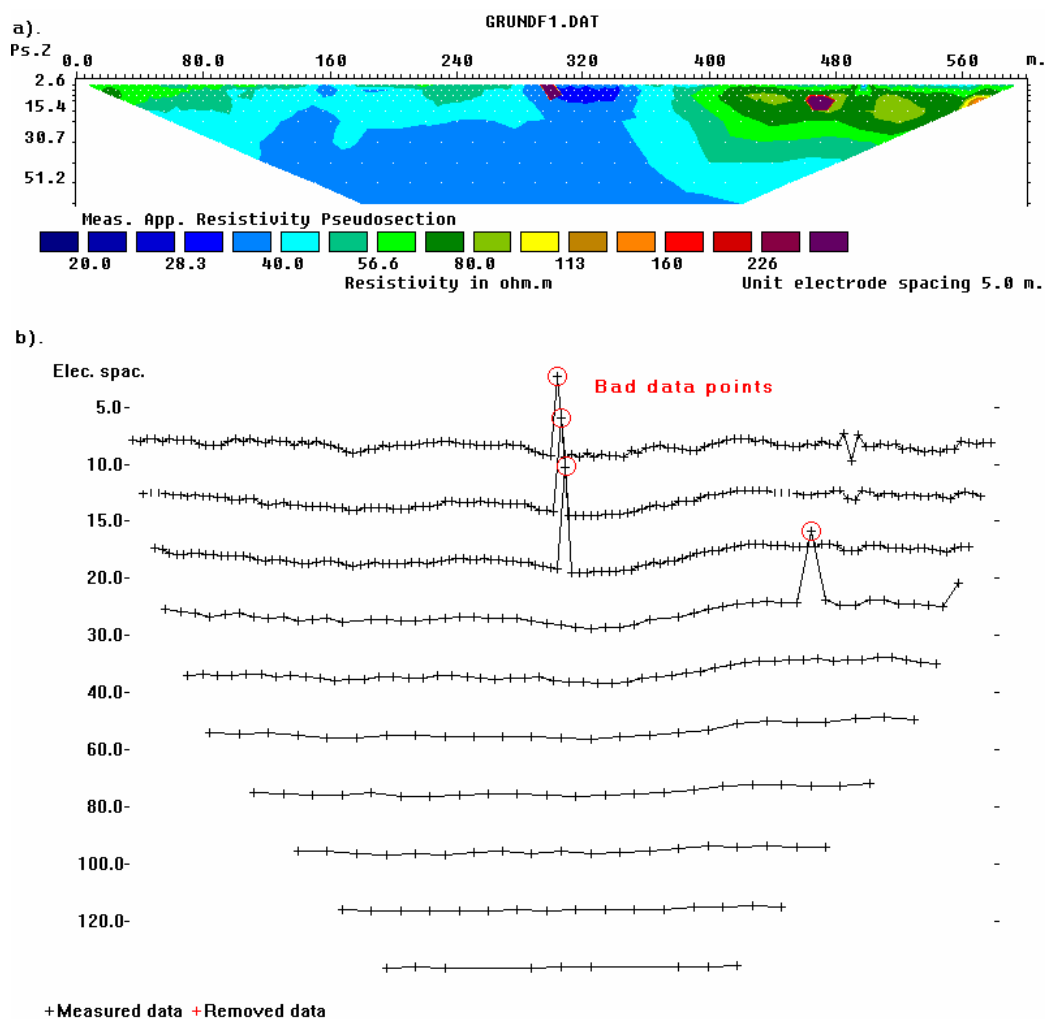
Τα περισσότερα σύνολα δεδομένων μιας έρευνας βρίσκονται πιθανώς μεταξύ των δύο άκρων μιας ομαλής ποικιλίας τιμών της ειδικής αντίστασης και ιδιαίτερων γεωλογικών σχηματισμών με αιχμηρά όρια. Εάν υπάρχει ένας αρκετά γρήγορος υπολογιστής (Pentium II και πάνω), και ένα σχετικά μικρό σύνολο στοιχείων (2000 δεδομένα ή λιγότερο), μια καλή ιδέα είναι να αναστραφούν τα δεδομένα δύο φορές. Αυτό θα δώσει δύο άκρα στα πιθανά πρότυπα που μπορούν να ληφθούν για το ίδιο σύνολο στοιχείων. Χαρακτηριστικά γνωρίσματα που είναι κοινά και για τα δύο τα πρότυπα είναι πιθανότερο να είναι πραγματικά.

Μερικοί γεωλογικοί σχηματισμοί επεκτείνονται κυρίως κατά την οριζόντια διάσταση (παραδείγματος χάριν ιζηματογενή στρώματα και στρωματοειδείς φλέβες) ενώ άλλοι κατά την κάθετη διάσταση (όπως τα αναχώματα). Αυτές οι πληροφορίες

μπορούν να ενσωματωθούν στη διαδικασία αντιστροφής με τη ρύθμιση της σχετικής αναλογίας που δίνονται στα οριζόντια και κάθετα φίλτρα ομαλότητας. Εάν παραδείγματος χάριν η δομή επεκτείνεται κατά την κάθετη διεύθυνση, όπως σ' ένα ανάχωμα, το κάθετο φίλτρο ομαλότητας έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από το οριζόντιο φίλτρο.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η ποιότητα των δεδομένων. Δεδομένα καλής ποιότητας συνήθως παρουσιάζουν ομαλή κατανομή των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στην ψευδοτομή. Για να ληφθεί ένα καλό πρότυπο, τα δεδομένα πρέπει να είναι εξίσου καλής ποιότητας. Εάν τα δεδομένα είναι χειρότερης ποιότητας, με κατ' ασυνήθιστο τρόπο υψηλές ή χαμηλές τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, υπάρχουν διάφορα πράγματα που θα μπορούσαν να γίνουν. Το πρώτο βήμα είναι να εξεταστεί η ψευδοτομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Εάν υπάρχουν σημεία με σχετικά χαμηλές ή υψηλές τιμές, είναι πιθανό να είναι δεδομένα με σημαντικό σφάλμα. Με το πρόγραμμα RES2DINV, μπορεί επίσης να σχεδιαστούν τα δεδομένα με μορφή σχεδιαγράμματος το οποίο να δίνει έμφαση στα δεδομένα με μεγάλο σφάλμα έτσι ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν άμεσα. Εάν τα αναξιόπιστα δεδομένα έχουν μεγαλύτερη έκταση και τυχαία κατανομή στη φύση, υπάρχουν δύο παράμετροι με τις οποίες μπορούν να τροποποιηθούν. Αρχικά, μπορεί ν' αυξηθεί ο παράγοντας απόσβεσης. Ένας μεγαλύτερος παράγοντας απόσβεσης θα έτεινε να παράγει ομαλότερα πρότυπα με χαμηλότερη ανάλυση, αλλά και λιγότερο ευαίσθητα στο θόρυβο. Η δεύτερη ρύθμιση είναι η επιλογή της εύρωστης αντιστροφής δεδομένων όπου η υπορουτίνα αντιστροφής κανονικά προσπαθεί να μειώσει το τετράγωνο της διαφοράς μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Σε δεδομένα με μια μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τιμών δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα. Αυτό δίνει κανονικά αποδεκτά αποτελέσματα εάν ο θόρυβος είναι τυχαίος. Εντούτοις, σε μερικές περιπτώσεις, μερικά δεδομένα που έχουν κατ' ασυνήθιστο τρόπο χαμηλές ή υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (outliers) θα μπορούσαν να διαστρεβλώσουν τ' αποτελέσματα.

Για να μειωθεί η επίδραση τέτοιων δεδομένων, τα εύρωστα περιορισμένα δεδομένα έχουν ως αποτέλεσμα το πρόγραμμα να μειώσει την απόλυτη διαφορά μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στα δεδομένα με μεγάλο σφάλμα δίνεται η ίδια βαρύτητα με τα άλλα δεδομένα, ωστόσο η επίδρασή τους στα αποτελέσματα αντιστροφής μειώνεται αρκετά.

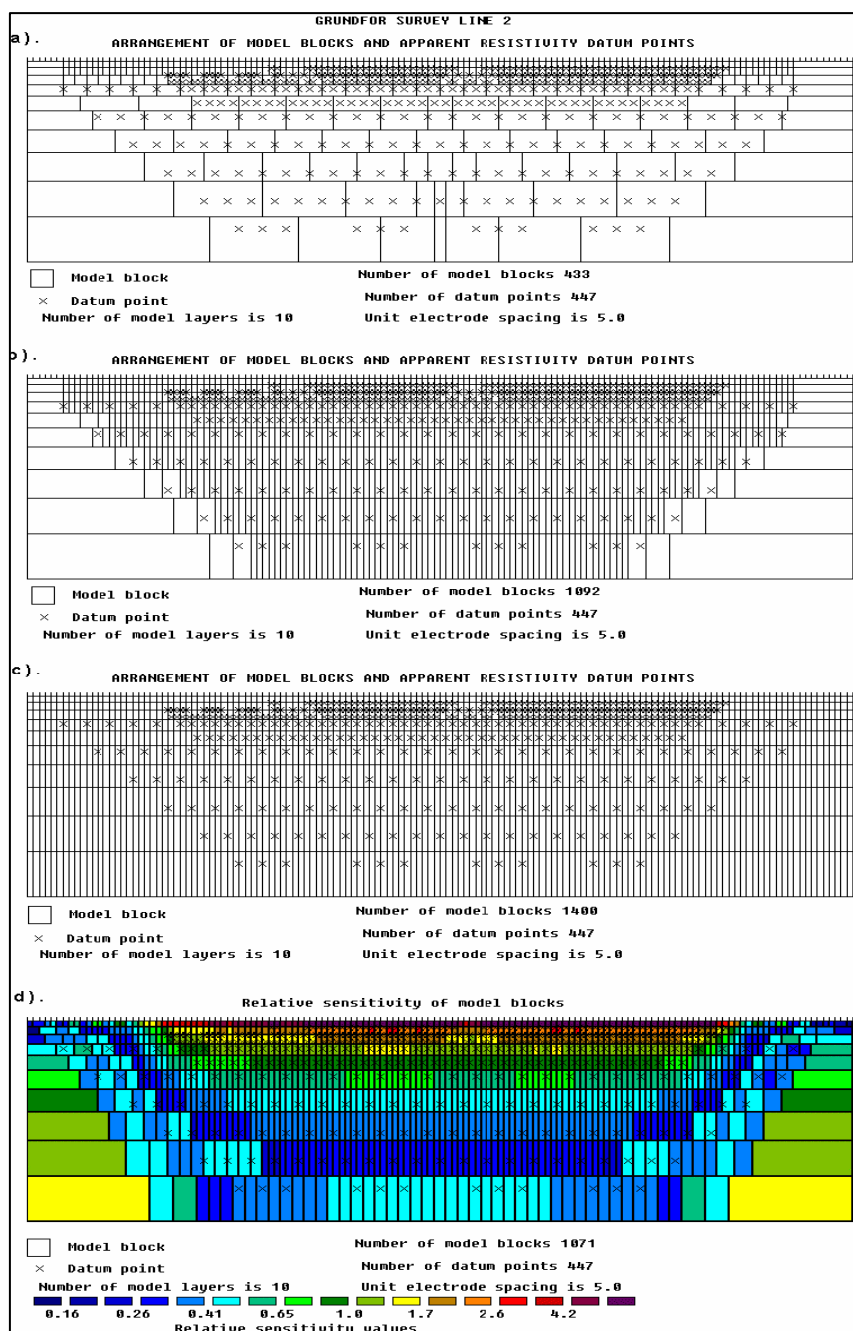


Σχήμα 2.16. Ένα παράδειγμα δεδομένων με σημαντικό σφάλμα. Προφανώς, το σημείο αυτό βρίσκονται κάτω από 300 μέτρα και 470 μέτρα στην οριζόντια διάσταση. (α) τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με μορφή ψευδοτομής και με (β) μορφή σχεδιαγράμματος (Loke, 1999).

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 2.17). 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 δεδομέ-

νων 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 2.17: 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. Εγκατάσταση και περιγραφή των βημάτων

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. 1^η 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 σύ-

γκλισης 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. 2^η αντιστροφή: Αφού αποθηκευτεί το παραπάνω διορθωμένο αρχείο με επέκταση ονόματος dat, ξεκινάει η 2^η αντιστροφή κατά τον ίδιο τρόπο με το βήμα 3.

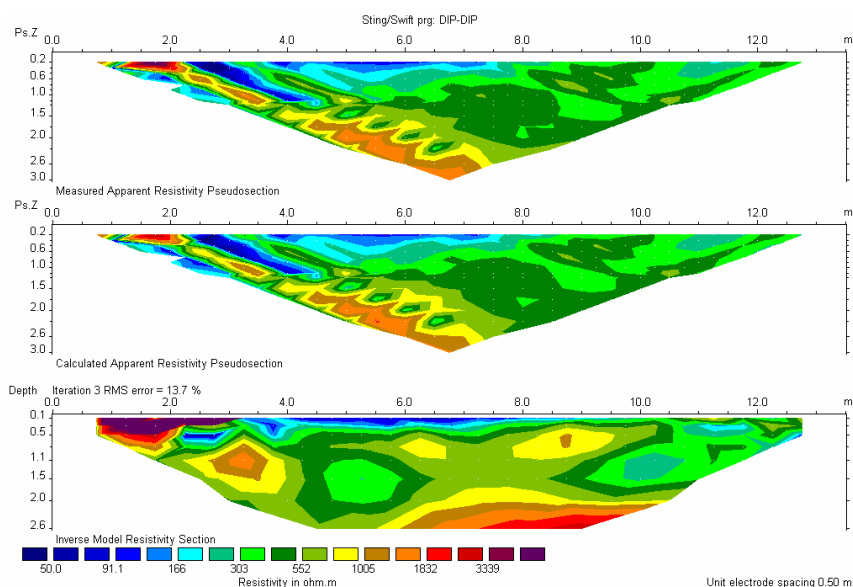
8. Τα τελικά αποτελέσματα που είναι της μορφής του Σχήματος 2.18 αποθηκεύονται ως BMP files.

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 επανα-

λήψεων. 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 2.18: Παράδειγμα αντιστροφής δεδομένων γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

2.5. Το πρόγραμμα RES3DINV

2.5.1 Εισαγωγή στις τρισδιάστατες έρευνες

Δεδομένου ότι όλες οι γεωλογικές δομές είναι τρισδιάστατης φύσης, μια πλήρως τρισδιάστατη έρευνα ειδικής αντίστασης που χρησιμοποιεί το τρισδιάστατο πρότυπο ερμηνείας πρέπει θεωρητικά να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα. Οι τρισδιάστατες έρευνες δεν έχουν φθάσει στο επίπεδο να χρησιμοποιούνται τόσο συχνά όσο οι δισδιάστατες έρευνες. Ο κύριος λόγος είναι ότι το κόστος ερευνών είναι συγκριτικά υψηλότερο για τρισδιάστατη έρευνα σε αρκετά μεγάλη περιοχή. Υπάρχουν δύο τρέχουσες εξελίξεις οι οποίες συμβάλλουν ώστε οι τρισδιάστατες έρευνες να αποτελούν μια πιο οικονομικά αποδοτική επιλογή στον κοντινό μέλλον. Η μια είναι η ανάπτυξη των πολυδιαυλικών μετρητών ειδικής αντίστασης που επιτρέπει περισσότερες από μια αναγνώσεις των μετρήσεων που λαμβάνεται σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό είναι σημαντικό για τη μείωση του χρόνου ερευνών. Η άλλη είναι η ανάπτυξη γρηγορότερων μικροϋπολογιστών η οποία επιτρέπει την αντιστροφή πολύ μεγάλων συνόλων δεδομένων (με περισσότερα από 8.000 δεδομένα και πλέγματα ερευνών μεγαλύτερα από 30x30) σε έναν λογικό χρόνο.

Οι διατάξεις πόλου-πόλου, πόλου-διπόλου και δίπολου-διπόλου χρησιμοποιούνται συχνά για την πραγματοποίηση τρισδιάστατων ερευνών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι άλλες διατάξεις έχουν μια φτωχότερη κάλυψη δεδομένων κοντά στις άκρες του πλέγματος της έρευνας. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διατάξεων πόλου-πόλου, πόλου-διπόλου και δίπολου-διπόλου τα οποία συζητήθηκαν παραπάνω σε σχέση με τις δισδιάστατες έρευνες ισχύουν επίσης και στις τρισδιάστατες έρευνες.

Περίληπτικά, για σχετικά μικρές έρευνες με λιγότερα από 12x12 ηλεκτρόδια, η διάταξη πόλου-πόλου έχει σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό των ανεξάρτητων μετρήσεων σε σύγκριση με άλλες διατάξεις. Η απώλεια δεδομένων κοντά στις όρια των μετρήσεων είναι ελάχιστη και παρέχει καλύτερη οριζόντια κάλυψη σε σχέση με άλλες διατάξεις. Χρησιμοποιείται συνήθως σε μικρής έκτασης έρευνες με σχετικά μικρό διάστημα ηλεκτροδίων (μικρότερο από 5m). Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι απαιτούνται δύο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τα οποία πρέπει να τοποθετηθούν σε αρκετά μεγάλη απόσταση από τα όρια της έρευνας. Λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ

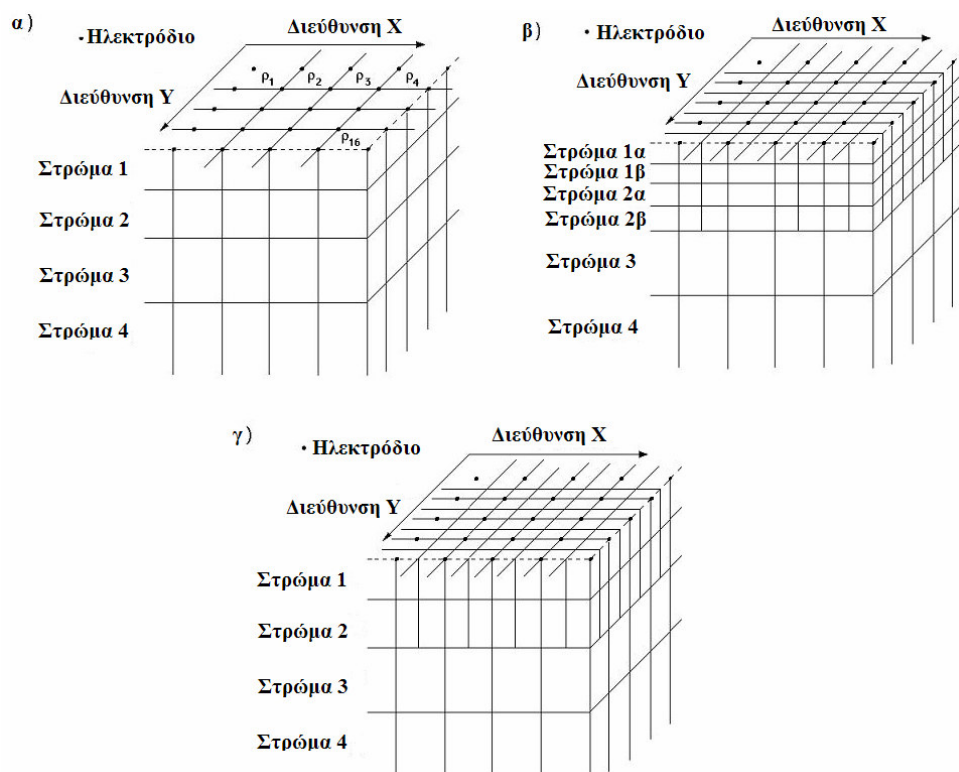
των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού, η διάταξη αυτή είναι πιο ευαίσθητη στον τελλουρικό θόρυβο. Η διάταξη πόλου – διπόλου είναι μια καλή επιλογή για μεσαίου μεγέθους έκτασης έρευνες. Έχει καλύτερη ανάλυση από την διάταξη πόλου-πόλου, απαιτεί μόνο ένα απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο και είναι λιγότερη ευαίσθητη στον τελλουρικό θόρυβο. Για μεγαλύτερης έκτασης έρευνες, ιδιαιτέρως όταν δεν υπάρχει κατάλληλη τοποθεσία για απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο, χρησιμοποιείται η διάταξη διπόλου-διπόλου.

Για τις τρισδιάστατες έρευνες τα ηλεκτρόδια κανονικά τοποθετούνται σε ορθογώνιο κάρναβο με συγκεκριμένο διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ωστόσο, το πρόγραμμα αντιστροφής RES3DINV μπορεί να χειριστεί ακόμα και καννάβους με ανομοιόμορφο διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Τρισδιάστατη αντιστροφή ενός συνόλου δεδομένων μπορεί να γίνει με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων που χρησιμοποιήθηκε στην δισδιάστατη μέθοδο αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων με περιορισμούς εξομάλυνσης. Ένα πρότυπο που χρησιμοποιείται για να ερμηνευθεί το τρισδιάστατο σύνολο δεδομένων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.19α.

Το υπέδαφος διαιρείται σε διάφορα στρώματα και κάθε στρώμα υποδιαιρείται περαιτέρω σε ορθογώνια κελιά. Το τρισδιάστατο πρόγραμμα αντιστροφής ειδικής αντίστασης RES3DINV χρησιμοποιείται για να ερμηνεύσει τα δεδομένα στις τρισδιάστατες έρευνες. Αυτό το πρόγραμμα προσπαθεί να καθορίσει την ειδική αντίσταση των κελιών στο πρότυπο της αντιστροφής ώστε ν' αναπαράγει όσο αξιόπιστα γίνεται τις μετρημένες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στα πλαίσια του προγράμματος RES3DINV, το πάχος των στρωμάτων μπορεί να τροποποιηθεί από τον χρήστη.

Δύο άλλα εναλλακτικά πρότυπα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το πρόγραμμα RES3DINV παρουσιάζονται στα σχήματα 2.19β και 2.19γ. Το δεύτερο πρότυπο αντιστροφής υποδιαιρεί μερικά από τα ρηχά στρώματα στο μισό και στις δύο διευθύνσεις. Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι να υποδιαιρεθούν τα ρηχά στρώματα στο μισό μόνο στην οριζόντια κατεύθυνση (σχήμα 2.19γ). Αφού η ανάλυση της μεθόδου της ειδικής αντίστασης μειώνεται με το βάθος, έχει διαπιστωθεί ότι η υποδιαίρεση αυτή είναι ευεργετική μόνο για τα πρώτα δύο στρώματα. Σε πολλές περιπτώσεις, η υποδιαίρεση μόνο του πρώτου στρώματος είναι αρκετή. Με την υποδιαίρεση των κελιών, ο αριθμός των παραμέτρων κι επομένως ο χρόνος που απαιτείται για την αντιστροφή δεδομένων αυξάνονται εντυπωσιακά.

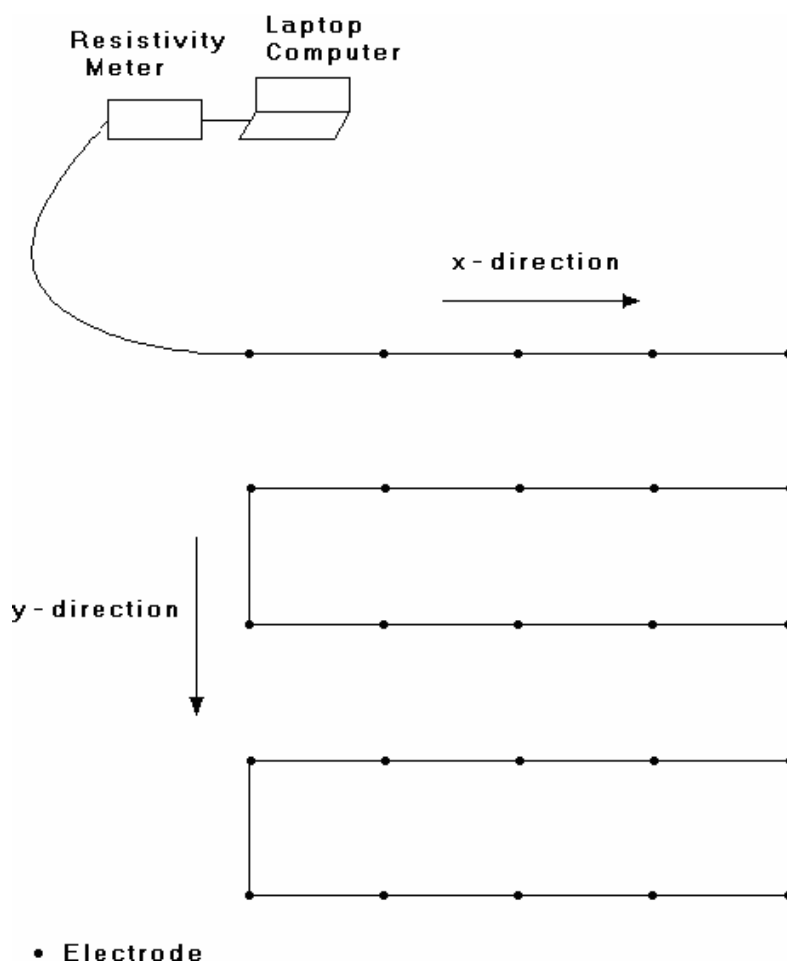


Σχήμα 2.19: Τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη έρευνα. (α) Πρότυπο όπου τα πλάτη των ορθογώνιων κελιών είναι ίσα με το διάστημα ηλεκτροδίων στην X και Y διεύθυνση. (β) Πρότυπο όπου μερικά από τα ρηχά στρώματα είναι διαιρεμένα στο μισό τόσο στην κατακόρυφη όσο και στην οριζόντια διεύθυνση, ώστε να παρέχεται καλύτερη ανάλυση. (γ) Πρότυπο όπου τα πρότυπα κελιά είναι διαιρεμένα στην οριζόντια διεύθυνση, αλλά όχι στην κατακόρυφη.

2.5.2. Το λογισμικό πακέτο RES3DINV

Το RES3DINV καθορίζει ένα τρισδιάστατο πρότυπο ειδικής αντίστασης για το υπέδαφος χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που αποκτήθηκαν κατά την τρισδιάστατη έρευνα ηλεκτρικής απεικόνισης (Li and Oldenburg 1992, White και συνεργάτες, 2001). Κανονικά τα ηλεκτρόδια για μια τέτοια έρευνα τοποθετούνται σε ορθογώνιο κάμμαβο (σχήμα 2.20). Ωστόσο στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων, από τις οποίες οι πιο συνηθισμένες στην τρισδιάστατη έρευνα είναι οι διατάξεις πόλου-πόλου, πόλου-διπόλου και δίπολου-διπόλου. Σε υπολογιστή με 1.5

GB RAM, το πρόγραμμα είναι ικανό να χειριστεί έρευνες με περίπου 6000 ηλεκτρόδια. Σε μικροϋπολογιστή Pentium 4, η αντιστροφή των δεδομένων γίνεται σε λιγότερο από ένα λεπτό για μικρές έρευνες με 100 ηλεκτρόδια σε μια επίπεδη περιοχή, μέχρι μια μέρα για υπερβολικά μεγάλες έρευνες με 6000 ηλεκτρόδια σε ανώμαλο έδαφος.



Σχήμα 2.20: Σχηματικό διάγραμμα μιας τρισδιάστατης έρευνας.

(Geotomo Software, 2006)

Το πρόγραμμα RES3DINV χρησιμοποιεί τεχνική αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων για να παράγει ένα τρισδιάστατο πρότυπο του υπεδάφους από τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα τις βέλτιστες παραμέτρους αντιστροφής για ένα σύνολο δεδομένων. Εντούτοις, οι παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στη διαδικασία αντιστροφής μπορούν τροποποιηθούν από το χρή-

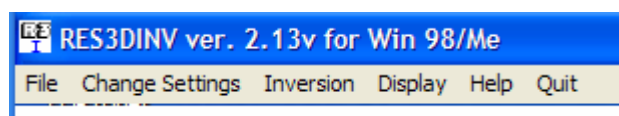
στη. Παρέχονται τρεις διαφορετικές παραλλαγές της μεθόδου αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων, η πολύ γρήγορη μέθοδος quasi-Newton, η πιο αργή αλλά ακριβέστερη μέθοδος Gauss-Newton, και μια γρήγορη υβριδική τεχνική η οποία ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα των μεθόδων quasi-Newton και Gauss-Newton. Παρέχονται επίσης δύο διαφορετικές παραλλαγές της μεθόδου αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων με περιορισμούς εξομάλυνσης. Η μια, κατάλληλη για τις περιοχές όπου η ειδική αντίσταση του υπεδάφους ποικίλλει ομαλά, όπως στα υδρογεωλογικά προβλήματα, και η άλλη κατάλληλη για τις περιοχές με ασαφή όρια. Τοπογραφικά δεδομένα μπορούν να ενσωματωθούν στο πρότυπο με τη χρησιμοποίηση του πλέγματος πεπερασμένων-στοιχείων έτσι ώστε η επιφάνεια να ταιριάζει με την τοπογραφία (Sasaki 1994). Για να χειριστούν μεγάλα σύνολα δεδομένων, το πρόγραμμα υποστηρίζει επίσης και μια βελτιωμένη μέθοδο της Gauss-Newton. Όταν χρησιμοποιείται παράλληλα με μέθοδο συμπίεσης των δεδομένων, δίνεται η δυνατότητα αντιστροφής μεγάλης ποσότητας δεδομένων με πάνω από 20000 σημεία δεδομένων και πρότυπα κελιά. (Geotomo Software, 2006)

2.5.3. Επεξεργασία δεδομένων

Μετά από την εγκατάσταση του προγράμματος RES3DINV.EXE, ανοίγεται το πρόγραμμα πατώντας πάνω στο εικονίδιο:



Το πρόγραμμα θα φανερώσει την ακόλουθη βασική μπάρα του μενού.

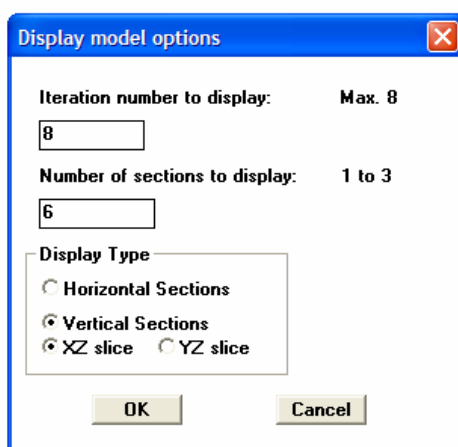


Σχήμα 2.21: Το βασικό μενού του προγράμματος RES3DINV

❖ Εισάγονται τα δεδομένα μορφής *.dat, με την εντολή read in data file. (File > Read in data file > *.dat).

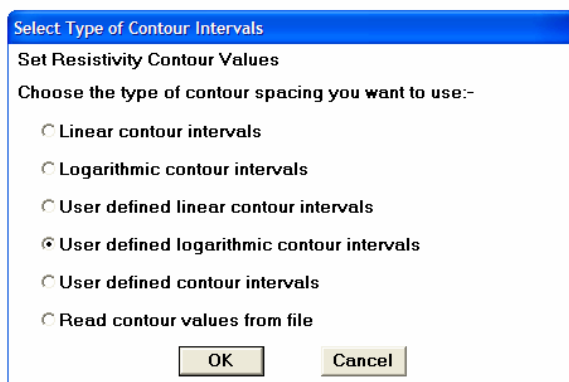
❖ Έπειτα, από την επιλογή “Inversion” του μενού επιλέγεται την εντολή “Carry out inversion”. Η αντιστροφή θα πάρει κάποια λεπτά. Το πρόγραμμα θα εκτελέσει 6 επαναλήψεις, οι οποίες μπορούν να αυξηθούν αν είναι επιθυμητό. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής αποθηκεύονται σε INV αρχεία.

❖ Μόλις η διαδικασία της αντιστροφής ολοκληρωθεί, πατάμε την υποεπιλογή “Display inversion model” από την επιλογή “Display” του βασικού μενού. 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 προηγουμένως



Σχήμα 2.22: Η εντολή display model options.

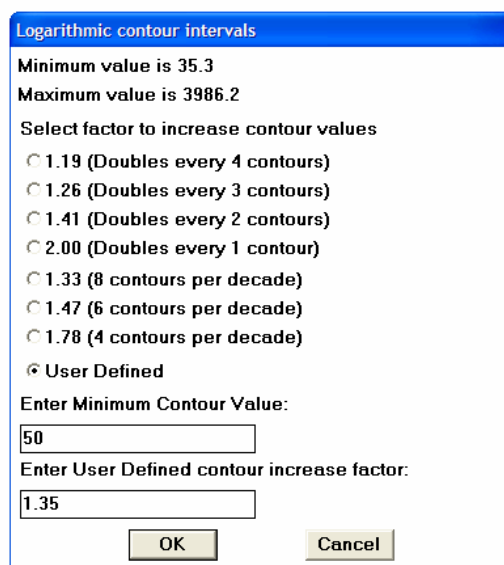
Εδώ ερωτάται ο χρήστης για τον αριθμό των επαναλήψεων (iteration number), τον τύπο των τομών του μοντέλου (type of model slice) και κάποια δεδομένα για την ειδική αντίσταση (contour intervals). Συγκεκριμένα εμφανίζονται τα παρακάτω «κουτάκια» που αντιστοιχούν στις εντολές “Select Type of Contour Intervals”, όπου η επιλογή σε αυτήν την εργασία είναι “User defined logarithmic contour intervals”.



Σχήμα 2.23: Η εντολή “Select Type of Contour Intervals”

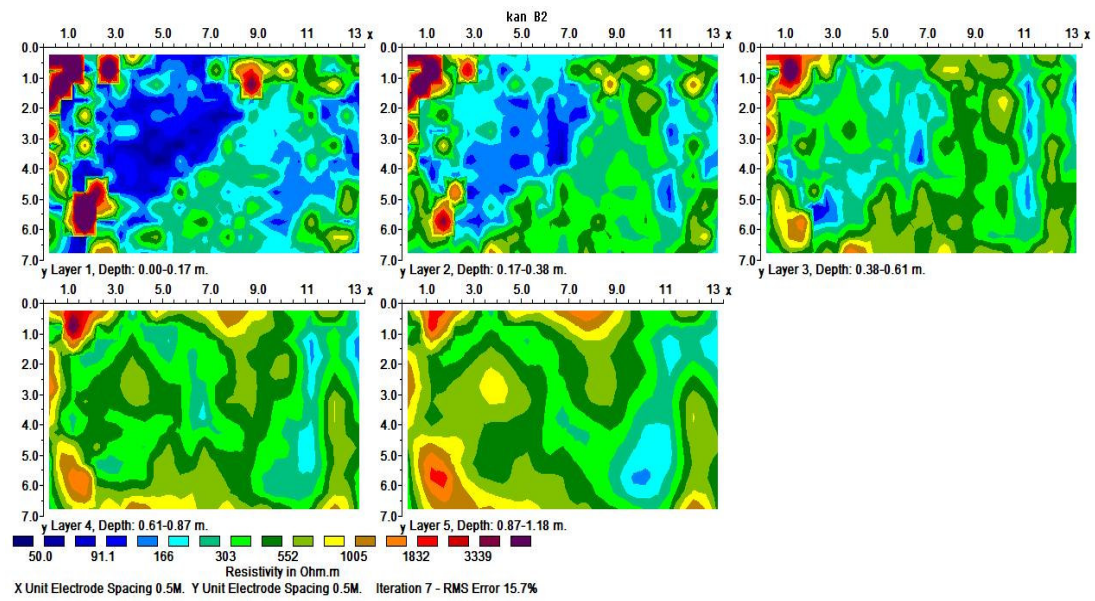
❖ Στην εντολή “Logarithmic Contour Intervals”, στη θέση “Enter minimum contour value” επιλέγεται έναν αριθμό που αντιστοιχεί στις μικρότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που περιέχονται στο τελικό μοντέλο και στη θέση “User Defined Increase Contour Factor” εισάγεται το βήμα αλλαγής χρωμάτων. Αφού έχουν γίνει οι κατάλληλες επιλογές, εμφανίζονται στην οθόνη οι τομές του μοντέλου.

❖ Το τελικό μοντέλο αποθηκεύεται χρησιμοποιώντας την εντολή “save screen as BMP file” από την επιλογή “Print”. Τα τελικά αποτελέσματα που είναι της μορφής του Σχήματος 2.25 αποθηκεύονται ως BMP files.



Σχήμα 2.24: Η εντολή “Logarithmic Contour Intervals”

Για την επιλογή της κατάλληλης χρωματικής κλίμακας έγιναν τρεις 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. Στην τρίτη η κατώτερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίστηκε στα 50 ohm.m και το βήμα ίσο με 1,35. Τελικά, επιλέχθηκε η τρίτη χρωματική κλίμακα η οποία είναι αντίστοιχη με την καλύτερη κλίμακα που διαλέχτηκε στο πρόγραμμα RES2DINV, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.



Σχήμα.2.25 : Οριζόντιες τομές που προέκυψαν από το πρόγραμμα RES3DINV.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1. Περιγραφή και ιστορία του αρχαιολογικού χώρου της Άπτερας



*Σχήμα 3.1 : Γενική άποψη του αρχαιολογικού χώρου της Άπτερας
(www.crete.tournet.gr)*

Χτισμένη στην κορυφή ενός λόφου με απεριόριστη θέα προς τον κόλπο της Σούδας, η αρχαία Απτέρα ή Άπτερα αποτέλεσε μία από τις σπουδαιότερες πόλεις - κράτη και το μεγαλύτερο εμπορικό κέντρο της Κρήτης. Σημαντικό ρόλο στην άνθησή της έπαιξε και η ναυτική βάση γεγονός που επιβεβαιώνει τη στρατηγική σημασία της περιοχής. Διέθετε δικό της στόλο, δύο λιμάνια, τη Μινώα και τον Κίσσαμο, στον κόλπο της Σούδας και στα χρόνια της ακμής της έκοψε μερικές δεκάδες διαφορετικά νομίσματα. Πινακίδες Γραμμικής Β΄ γραφής φανερώουν την ύπαρξή της από τα μινωικά χρόνια, ωστόσο εκείνη την περίοδο η θέση της ήταν μάλλον νοτιότερα, κοντά στο χωριό Στύλος. Το περίεργο όνομά της προέρχεται, σύμφωνα με την παράδοση, από τις Σειρήνες οι οποίες ηττήθηκαν σε διαγωνισμό τραγουδιού από τις Μούσες και από την απελπισία τους έβγαλαν τα φτερά τους – αποπτερώθηκαν δηλαδή- και έπεσαν στη θάλασσα. Σύμφωνα με μια άλλη εκδοχή, η πόλη πήρε το όνομα της από τη θεά Άρτεμη, στην οποία ήταν αφιερωμένη η κύρια λατρεία της πόλης, ενώ σύμφωνα με μια άλλη ο επώνυμος ήρωας των Δελφών Pteras ή Apteris έδωσε το όνομά του στην πόλη.

Τα Άπτερα υπήρχαν από τα Μινωικά Χρόνια, αφού το όνομά τους συναντιέται στις πλάκες της Κνωσού. Σύμφωνα με γραπτές πηγές και αποτελέσματα των μέχρι τώρα ανασκαφικών ερευνών δείχνουν ότι η περίοδος της μεγαλύτερης ακμής της πόλης ήταν οι πρώιμοι ελληνιστικοί χρόνοι (τέλος 4ου - 3ος αι. π.Χ.), οπότε ισχυροποιήθηκε οικονομικά και πολιτικά και άρχισε να κόβει δικό της νόμισμα. Η ρωμαϊκή περίοδος, με την επιβολή της "ρωμαϊκής ειρήνης" (pax romana), σήμανε τη συρρίκνωση της πόλης σε οικονομικοπολιτικό επίπεδο αλλά συγχρόνως και την ανάπτυξή της στην αγροτική παραγωγή σύμφωνα με το πρόγραμμα της ρωμαϊκής εξουσίας. Ακόμα σε αυτή την περίοδο χτίζονται μερικά από τα εντυπωσιακότερα οικοδομήματα, όπως οι τεράστιες δεξαμενές. Η κατοίκηση της συνεχίστηκε στα βυζαντινά χρόνια χωρίς ιδιαίτερη ακμή, ενώ λίγο πριν από τον ισχυρό σεισμό του 7ου αιώνα μ.Χ. χτίζεται το μοναστήρι του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου σε κεντρικό σημείο της αρχαίας πόλης που αναφέρεται ήδη σε Χρονικό του 1181 μ.Χ. Ανήκε στη Μονή Πάτμου και λειτουργούσε μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Κατά την περίοδο 1866-69 ανεγέρθηκε από τους Τούρκους κατακτητές κάστρο με στόχο τη καταστολή της Κρητικής Επανάστασης.



Σχήμα 3.2 : *Βυζαντινή Μονή του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου*

(www.crete.tournet.gr)

Η καταστροφή ήρθε τον 7^ο αιώνα μ.Χ. όταν η πόλη χτυπήθηκε από τον Εγκέλαδο και περίπου εκατό χρόνια μετά οι Σαρακηνοί έβαλαν οριστικό τέλος στη μακραίωνη ιστορία της. Παρ' όλο που η αρχαία πόλη ήταν πολύ μεγάλη και το αρχαιολογικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει ακόμη μεγαλύτερο, δεν έχουν γίνει παρά ελάχιστες ανασκαφές, ενώ τα τελευταία χρόνια αρκετά από τα μνημεία έχουν υποστεί ανεπανόρθωτες βλάβες.

Στον δρόμο που ανηφορίζει από το χωριό Μεγάλα Χωράφια διακρίνονται ερείπια των εξωτερικών τειχών που είχαν μήκος 4 χιλιόμετρα. Στο εσωτερικό του αρχαιολογικού χώρου της Άπτερας σώζονται, μεταξύ άλλων, θολωτές δεξαμενές της ρωμαϊκής εποχής, τα θεμέλια ενός ναού της κλασικής εποχής, τα λείψανα δύο ιερών της ελληνιστικής περιόδου από τα οποία το ένα ήταν αφιερωμένο στη θεά Δήμητρα καθώς και δημόσια κτίρια που εικάζεται ότι ήταν λουτρά και πρυτανείο. Στη βόρεια πλευρά της πόλης υπάρχει ένα εντυπωσιακό τουρκικό Κουλέ (πύργο).



Σχήμα 3.3: Το Τουρκικό κάστρο στην Άπτερα (www.crete.tournet.gr)

Οι ανασκαφικές εργασίες ξεκίνησαν το 1942, όταν οι Γερμανοί κατακτητές ανέσκαψαν το "διμερές ιερό". Το 1958 ο Στ. Αλεξίου ανέσκαψε τμήματα κτηρίων της πόλης και τάφους. Τέλος, το 1986-87 και 1992-95 η ΚΕ΄ Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων συνέχισε τις εργασίες με συστηματικές και σωστικές ανασκαφές στην περιοχή. Τα τελευταία χρόνια οι εργασίες για την ανάδειξη του αρχαιολογικού χώρου, έχουν ενταχθεί στα ευρωπαϊκά προγράμματα του Β΄ και Γ΄ Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης.

Αναλυτικά, ο αρχαιολογικός χώρος της Άπτερας περιλαμβάνει τα συγκροτήματα των ρωμαϊκών δεξαμενών, που μαζί με τα πολυάριθμα πηγάδια και τις στέρνες εξυπηρετούσαν τις ανάγκες της πόλης. Αυτές πρέπει να τροφοδοτούσαν και τις εγκαταστάσεις των δημόσιων και ιδιωτικών λουτρών που βρίσκονται προς τα δυτικά τους.



Σχήμα 3.4: Ρωμαϊκές δεξαμενές (www.crete.tournet.gr)

Τμήμα μεγάλης ιδιωτικής οικίας με περίστυλη αυλή (5 x 7 κίονες) που περιβάλλεται από στοά στεγασμένη με κεραμίδια, έχει αποκαλυφθεί στη νοτιοδυτική περιοχή της πόλης. Στο εσωτερικό της αυλής είναι πεσμένοι οι περισσότεροι από τους κίονες και μερικά κιονόκρανα.



Σχήμα 3.5: Το "διμερές ιερό" (www.crete.tournet.gr)

Το λεγόμενο "διμερές ιερό" είναι ένας μικρός ναός που χρονολογήθηκε στον 5ο αι. π.Χ. Η πόλη διέθετε θέατρο, το οποίο δεν έχει ακόμα αποκαλυφθεί πλήρως. Η Απτέρα περιβαλλόταν από τείχος, το οποίο σώζεται σήμερα σε μήκος 4 χιλιομέτρων περίπου. Το είδος της δόμησης χρονολογεί την κύρια περίοδο κατασκευής του στον 4ο αι. π.Χ. Η κεντρική είσοδος της πόλης βρισκόταν στα δυτικά, ενώ υπήρχαν και άλλες δευτερεύουσες στα ανατολικά και στα βόρεια.

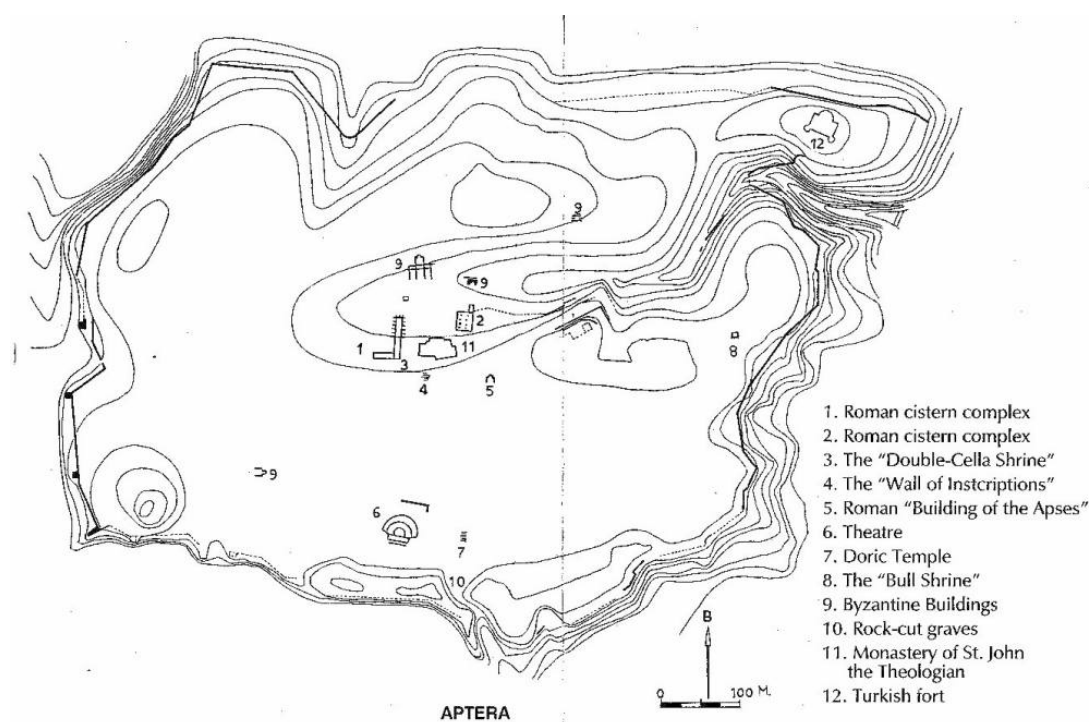
Η νεκρόπολη βρισκόταν εκτός των τειχών, στα δυτικά και στα ανατολικά της πόλης. Τα τελευταία χρόνια έχουν ανασκαφεί τάφοι διαφόρων τύπων των γεωμετρικών και πρώιμων αρχαϊκών χρόνων (8ου και 7ου αι. π.Χ.), των ελληνοιστικών (κυρίως του 4ου και 3ου αι. π.Χ.) και της ρωμαϊκής περιόδου. Κοντά στη δυτική είσοδο της πόλης, αποκαλύφθηκε ηρώο με ενεπίγραφους πεσσούς του 1ου - 2ου αι. μ.Χ. Ανάμεσα στους τάφους εντοπίστηκαν υπολείμματα τελετουργιών της ελληνοιστικής και της ρωμαϊκής περιόδου.

Η Μονή του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου, που έχει εν μέρει αποκατασταθεί, λειτουργεί σήμερα ως χώρος υποδομής των εργασιών που πραγματοποιούνται στον αρχαιολογικό χώρο. Εργασίες ανάδειξης έχουν ξεκινήσει και στο τούρκικο κάστρο,

που βρίσκεται στο βορειοδυτικό άκρο του χώρου και στο οποίο διοργανώνονται εκδηλώσεις κατά τη θερινή περίοδο.

3.2. Περιοχή μελέτης

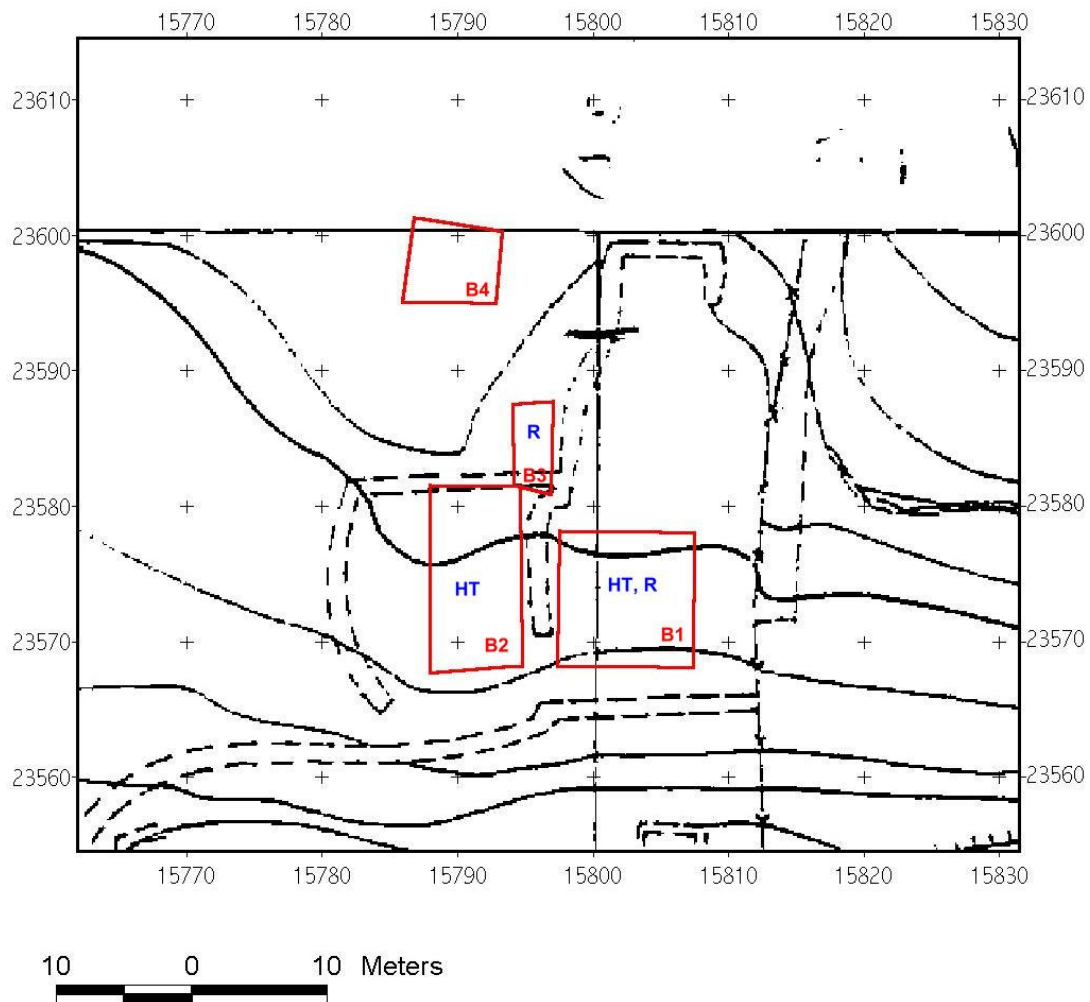
Η γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Άπτερας περιελάμβανε μαγνητική, ηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση, ηλεκτρική τομογραφία και γεωραντάρ σε επιλεγμένες περιοχές. Η περιοχή αυτή γεωλογικά αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθο.



Σχήμα 3.6: Τοπογραφικός χάρτης της Άπτερας με τα αρχαιολογικά ευρήματα
(www.just-crete.co.uk)

Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι τα αποτελέσματα της διασκόπησης των καννάβων B1 και B2. Οι κάνναβοι αυτοί βρίσκονται στα λουτρά και διασκοπήθηκαν με τη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχήμα 3.7) και τη διάταξη Διπόλου-Διπόλου με ισαπόσταση $a=0.5\text{m}$ και ισαπόσταση γραμμών μελέτης 0.5 μέτρο . Ο

B1 περιλάμβανε 5 γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας μήκους 13.5 μέτρων και διεύθυνσης περίπου Δ-Α. Στον κήναβο B2 πραγματοποιήθηκαν 15 γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας ίδιου μήκους. (Βαφείδης, 2007)



H/M: Ηλεκτρομαγνητικά

H: Ηλεκτρική χαρτογράφηση

M: Μαγνητικά

R: Γεωραντάρ

HT: Ηλεκτρική Τομογραφία

Σχήμα 3.7: Τοπογραφικός χάρτης του αρχαιολογικού χώρου των Απτέρων (ισοϋψείς ανά 1 μέτρο). Με κόκκινο περίγραμμα οριοθετείται η περιοχή B που αποτελείται από τους επιμέρους κήναβους B1, B2, όπου αναγράφονται οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν. (Βαφείδης, 2007)

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν με το μετρητή αντίστασης STING R1 ο οποίος μετράει κατά μήκος παραλλήλων γραμμών για τη διάταξη ηλεκτροδίων δίπολου-διπόλου με απόσταση διπόλων ίσο με 0.5. 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 3.8: Ο μετρητής αντίστασης STING R1 (Advanced Geosciences, Inc, 1999)

3.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.3.1. Διόρθωση συντεταγμένων

Ο προσανατολισμός των μετρήσεων σε κάθε καννάβο έπαιξε σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία των μετρήσεων. Στους καννάβους B1 και B2, η κάθε γραμμή μελέτης ξεκινά από νότο προς βορρά. Η πρώτη γραμμή βρίσκεται στο πιο δυτικό τμήμα του καννάβου, ενώ η τελευταία βρίσκεται στο πιο ανατολικό. Έτσι, το σημείο (0,0) του καννάβου βρίσκεται νοτιοδυτικά. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία ορισμού των συντεταγμένων των μετρήσεων.

Η διόρθωση αυτή λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού για τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Για το πρόγραμμα Res2dinv, αποθηκεύτηκαν τα δεδομένα ξεχωριστά για κάθε τομή, ενώ για το πρόγραμμα Res3dinv σε ένα αρχείο για τον κάνναβο B1 και σε άλλο για τον κάνναβο B2. Παραδείγματος χάριν, παρακάτω παρουσιάζονται οι πρώτες 20 μετρήσεις της πρώτης γραμμής του καννάβου B2, όπως αποθηκεύονται στο όργανο. Σύμφωνα με το a και n που έχουμε κάθε φορά κάνουμε τις παρακάτω μετατροπές.

	1st electrode	a (m)	n	$R(\Omega)$
1	0.0	0.5	1	218
2	0.5	0.5	1	479
3	1.0	0.5	1	682
4	1.5	0.5	1	971
5	2.0	0.5	1	148
6	2.5	0.5	1	753
7	3.0	0.5	1	97
8	3.5	0.5	1	152
9	4.0	0.5	1	138
10	4.5	0.5	1	121
11	5.0	0.5	1	127
12	5.5	0.5	1	112
13	6.0	0.5	1	136
14	6.5	0.5	1	151
15	7.0	0.5	1	154
16	7.5	0.5	1	259
17	8.0	0.5	1	254
18	8.5	0.5	1	355
19	9.0	0.5	1	269
20	9.5	0.5	1	386

Πίνακας 3.1: Παράδειγμα μετρήσεων.

	1st electrode		C 1 + a		C 2 + n*a		P 1 + a	
	C 1		C 2		P 1		P 2	
n * a	x	y	x	y	x	y	x	y
0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	1.0	0.0	1.5	0.0
0.5	0.5	0.0	1.0	0.0	1.5	0.0	2.0	0.0
0.5	1.0	0.0	1.5	0.0	2.0	0.0	2.5	0.0
0.5	1.5	0.0	2.0	0.0	2.5	0.0	3.0	0.0
0.5	2.0	0.0	2.5	0.0	3.0	0.0	3.5	0.0
0.5	2.5	0.0	3.0	0.0	3.5	0.0	4.0	0.0
0.5	3.0	0.0	3.5	0.0	4.0	0.0	4.5	0.0
0.5	3.5	0.0	4.0	0.0	4.5	0.0	5.0	0.0
0.5	4.0	0.0	4.5	0.0	5.0	0.0	5.5	0.0
0.5	4.5	0.0	5.0	0.0	5.5	0.0	6.0	0.0
0.5	5.0	0.0	5.5	0.0	6.0	0.0	6.5	0.0
0.5	5.5	0.0	6.0	0.0	6.5	0.0	7.0	0.0
0.5	6.0	0.0	6.5	0.0	7.0	0.0	7.5	0.0
0.5	6.5	0.0	7.0	0.0	7.5	0.0	8.0	0.0
0.5	7.0	0.0	7.5	0.0	8.0	0.0	8.5	0.0
0.5	7.5	0.0	8.0	0.0	8.5	0.0	9.0	0.0
0.5	8.0	0.0	8.5	0.0	9.0	0.0	9.5	0.0
0.5	8.5	0.0	9.0	0.0	9.5	0.0	10.0	0.0
0.5	9.0	0.0	9.5	0.0	10.0	0.0	10.5	0.0
0.5	9.5	0.0	10.0	0.0	10.5	0.0	11.0	0.0

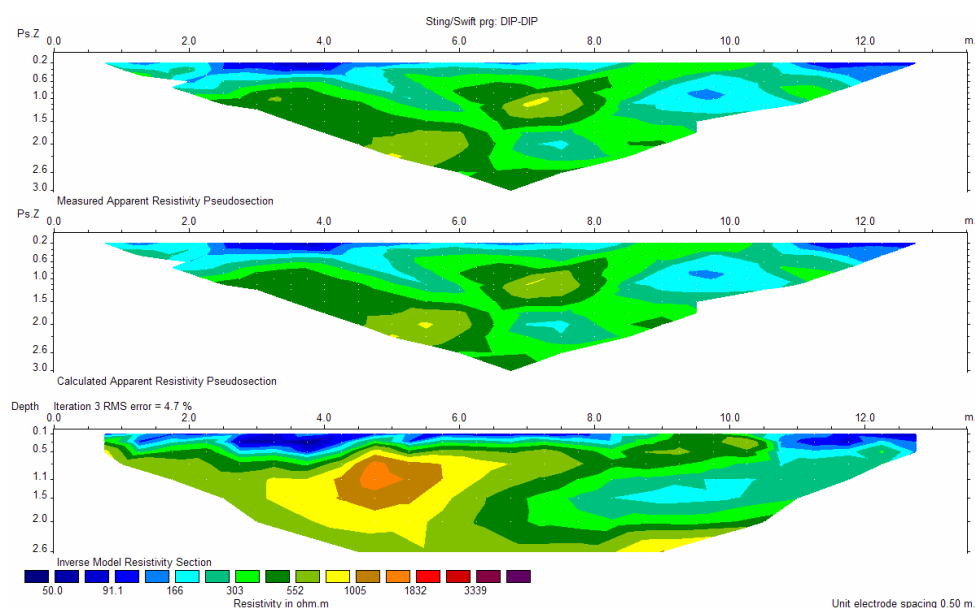
Πίνακας 3.2: Διορθωμένες μετρήσεις.

3.3.2. Αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων με το πρόγραμμα Res2dinv

Κατόπιν της διόρθωσης των μετρήσεων, ακολουθεί η επεξεργασία τους με τα προγράμματα Res2dinv και Res3dinv όπως περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών τομών που προέκυψαν από το πρόγραμμα Res2dinv για τους δύο καννάβους. Συγκεκριμένα μια γεωηλεκτρική τομή για τον κάνναβο B1 και μια για τον B2, ενώ οι υπόλοιπες τομές παρατίθενται στο παράρτημα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αντιστροφής δεδομένων των γραμμών ηλεκτρικής τομογραφίας από το πρόγραμμα αυτό, η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

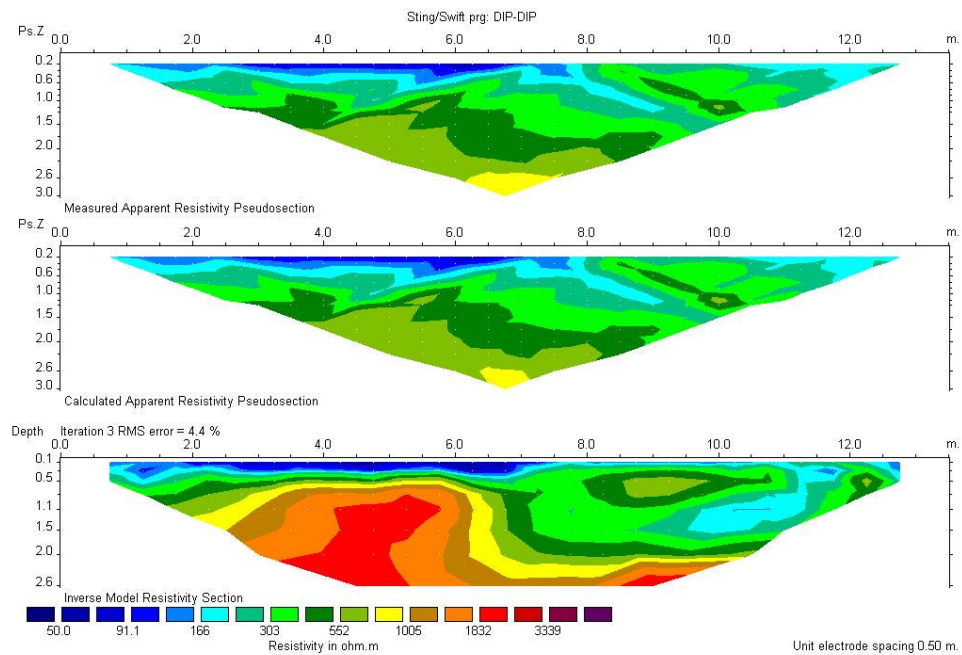
3.3.2.1. KANNABOS B1

ΚΛΙΜΑΚΑ 3



Σχήμα 3.9: Γεωηλεκτρική τομή για την πέμπτη γραμμή της περιοχής B1.

3.3.2.2. ΚΑΝΝΑΒΟΣ B2

ΚΛΙΜΑΚΑ 3

Σχήμα 3.10: Γεωηλεκτρική τομή για την όγδοη γραμμή της περιοχής B2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

4.1. Εισαγωγή

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την διαδικασία της αντιστροφής με τη χρήση των λογισμικών πακέτων RES2DINV και RES3DINV για τις 4 γεωλεκτρικές τομές του καννάβου B1 και τις 15 του καννάβου B2 στην περιοχή των λουτρών στα Άπτερα, παρουσιάζονται παρακάτω, συγκρίνοντας τις τομές από τα δύο προγράμματα και συγκεκριμένα τις δισδιάστατες τομές από το πακέτο RES2DINV με τις τομές κατά διεύθυνση X-Z από το RES3DINV, ώστε να γίνουν αντιληπτές οι ομοιότητες και οι διαφορές τους. Πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι μια γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από το πρόγραμμα RES3DINV αποτελεί το συνδυασμό δύο συνεχόμενων γραμμών του προγράμματος RES2DINV.

Το σφάλμα που παρατηρήθηκε κατά την επεξεργασία των μετρήσεων με το πρόγραμμα RES3DINV για τον κάνναβο B1 είναι της τάξεως του 7,5% και για τον B2 της τάξης του 15,7%. Τα σφάλματα στις μετρήσεις υποδεικνύουν ότι τα δεδομένα διακατέχονται από θόρυβο. Οι κυριότεροι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν θόρυβο στα δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης είναι οι παρακάτω:

❖ **Σφάλματα λόγω της τοποθέτησης ηλεκτροδίων.** Η εσφαλμένη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων που προκαλείται είτε από λάθος μέτρηση των αποστάσεων είτε από απροσεξία κατά την εισαγωγή τους στο έδαφος. Το ποσοστό που τα σφάλματα αυτά επηρεάζουν τις μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης εξαρτάται κυρίως από την χρησιμοποιούμενη διάταξη των ηλεκτροδίων σε κάθε περίπτωση. Η διάταξη διπόλου-διπόλου επηρεάζεται περισσότερο από λανθασμένες τοποθετήσεις των ηλεκτροδίων κατά μήκος μιας ηλεκτρικής τομογραφίας.

❖ **Σφάλματα στις μετρήσεις του δυναμικού.** Τα σφάλματα αυτά μπορούν να προκληθούν από πολλούς παράγοντες, όπως κακή επαφή ή/και υψηλές αντιστάσεις επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος, καταστροφή των καλωδίων, εξωγενή

περιβαλλοντικό θόρυβο (τελουρικά ρεύματα και ηλεκτροφόρα καλώδια), δυσλειτουργία ή ακατάλληλη χρήση του οργάνου.

❖ **Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη.** Όποτε ένας πομπός ρεύματος αλλάξει ή διακοπεί το ρεύμα, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής ζεύξης μεταξύ των καλωδίων που εκπέμπουν και λαμβάνουν σήμα. Η σύζευξη αυξάνεται με την συχνότητα, την διάταξη ηλεκτροδίων, το μήκος των καλωδίων και την αγωγιμότητα του εδάφους. Διατάξεις που χρησιμοποιούν διαφορετικά καλώδια για την εκπομπή και λήψη του σήματος, όπως η διάταξη διπόλου-διπόλου, επηρεάζονται λιγότερο από το φαινόμενο.

❖ **Επίδραση της τοπογραφίας.** Οι έντονες τοπογραφικές μεταβολές μπορούν να επηρεάσουν τα δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης τα οποία συλλέγονται με κάθε διάταξη ηλεκτροδίων. Σε γενικές γραμμές, η τοπογραφία μπορεί να προκαλέσει διασπορά και συγκέντρωση των γραμμών ρεύματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τεχνητές περιοχές χαμηλής και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα.

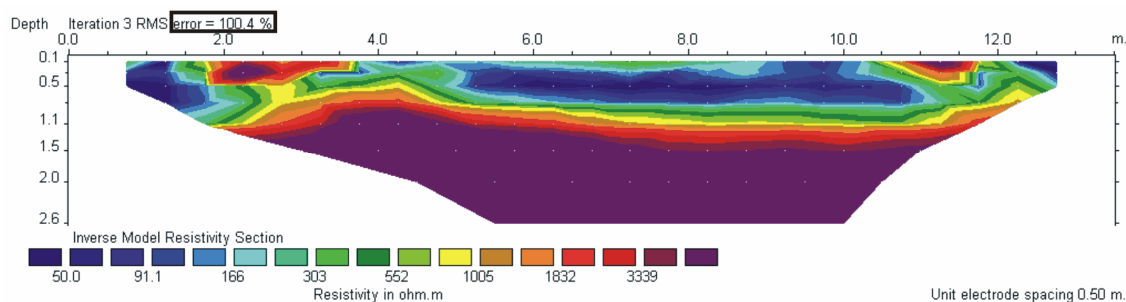
❖ **Πόλωση ηλεκτροδίων.** Η πόλωση που παρατηρείται στα ηλεκτρόδια ρεύματος σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλεί μια ανώμαλη μέτρηση δυναμικού, όταν τα ίδια ηλεκτρόδια χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά ως ηλεκτρόδια δυναμικού. Το φαινόμενο αυτό εντοπίζεται κυρίως στις μετρήσεις της αντίστασης που πραγματοποιούνται με ένα αυτόματο σύστημα καταγραφής, όπως στις τρισδιάστατες ηλεκτρικές τομογραφίες, και η επίδραση αυτή μπορεί να είναι μερικές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από το σήμα (Παπαδόπουλος Ν., 2007).

Στις τομές οι ανωμαλίες χαρακτηρίζονται με μικρά ελληνικά γράμματα για το RES2DINV, ενώ με κεφαλαία για το RES3DINV. Το τελευταίο στρώμα που φαίνεται στις γεωηλεκτρικές τομές σε μεγάλο βάθος με έντονο κόκκινο χρώμα είναι το υπόβαθρο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

4.2. Επεξεργασία μετρήσεων του καννάβου B1.

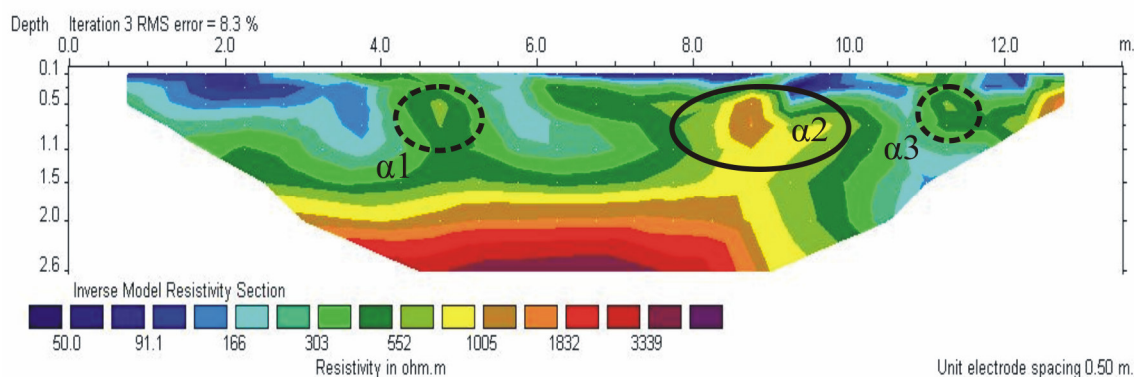
Η ερμηνεία των τομών για τον κάνναβο B1 χρησιμοποιώντας το πακέτο RES2DINV έδειξε τρεις κύριες ανωμαλίες, ενώ σύμφωνα με το λογισμικό πακέτο RES3DINV υπάρχουν τέσσερις ηλεκτρικές ανωμαλίες. Πιο αναλυτικά πρόέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Στον κάνναβο B1, η πρώτη γραμμή μελέτης παρουσίασε σημαντικό σφάλμα (100,4) κατά την επεξεργασία της με το πακέτο RES2DINV, και γι αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε επεξεργασία της με το πρόγραμμα RES3DINV, καθώς θα αλλοίωνε τα αποτελέσματα. Το σφάλμα αυτό πιθανόν να οφείλεται σε κάποιο θόρυβο ή σε ανθρώπινο παράγοντα κατά τη λήψη των μετρήσεων.



Σχήμα 4.1: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην ψευδοτομή της δεύτερης γραμμής, όπως διαπιστώνεται υπάρχουν 3 ανωμαλίες (α_1 , α_2 , α_3). Η πρώτη (α_1) βρίσκεται σε βάθος 30cm - 60cm και οριζόντια εκτείνεται από 4,5m-5m. Η δεύτερη (α_2) περίπου σε βάθος 50cm-1m, η οποία σε οριζόντια διάσταση εκτείνεται από 8,5m έως τα 9,5m. Η τρίτη ανωμαλία (α_3) βρίσκεται σε βάθος περίπου 30 - 70cm και οριζόντια εκτείνεται για μισό περίπου μέτρο από 11m-11,5m. Η πρώτη και η τρίτη ανωμαλία χαρακτηρίζονται από διακεκομμένη γραμμή, καθώς δεν φαίνονται καθαρά απλώς διακρίνονται.

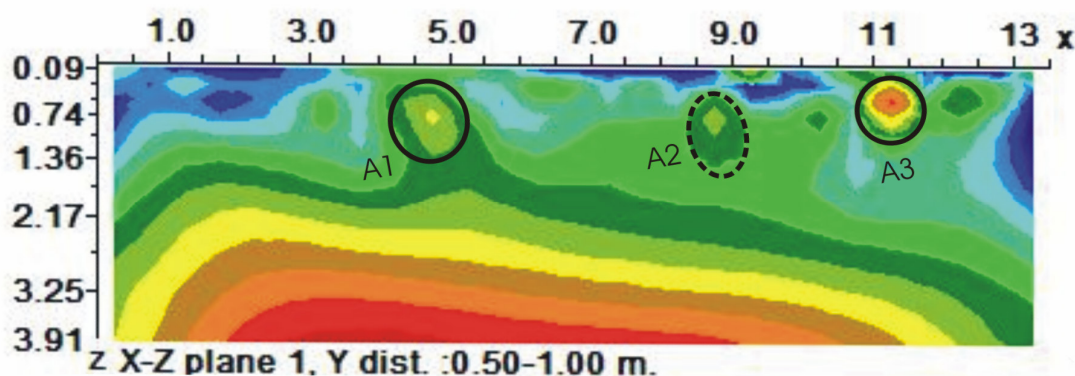


Σχήμα 4.2: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην πρώτη γραμμή μελέτης για το πρόγραμμα RES3DINV παρατηρούνται τρεις ανωμαλίες. Η πρώτη (A1) βρίσκεται σε βάθος περίπου 50cm - 1m, ενώ στην οριζόντια διάσταση εκτείνεται από 4,5m - 5m. Η ηλεκτρική αυτή ανωμαλία παρατηρείται και στη δεύτερη και τρίτη γραμμή μελέτης της δισδιάστατης απεικόνισης στο ίδιο περίπου βάθος και οριζόντια διάσταση (α1), με τη διαφορά ότι στην δεύτερη γραμμή απλά διακρίνεται ενώ στην τρίτη, όπως θα δούμε παρακάτω φαίνεται καθαρά.

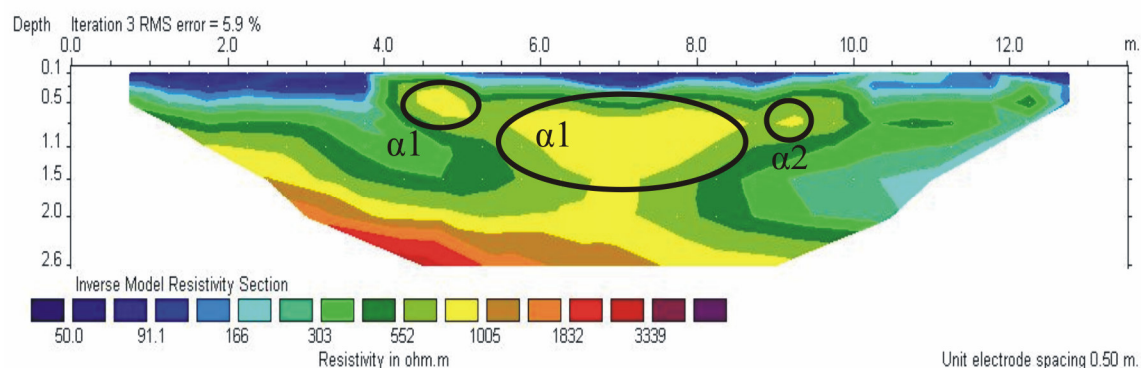
Η δεύτερη ανωμαλία (A2) επειδή απλώς διακρίνεται είναι με διακεκομμένες και εμφανίζεται σε βάθος περίπου 50cm - 1m, ενώ στην οριζόντια διάσταση εκτείνεται από 8m - 9m. Η ανωμαλία αυτή (α2) είναι εμφανής και στη δεύτερη και τρίτη γραμμή μελέτης του προγράμματος RES2DINV, ωστόσο εδώ απλώς εντοπίζεται.

Η τρίτη ανωμαλία (A3) συναντάται σε βάθος περίπου 10cm - 80cm, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 11m - 11,5m. Η ανωμαλία αυτή ενώ διακρίνεται μόνο στην δεύτερη γραμμή του πακέτου RES2DINV (α3), στην τρίτη τομή της δισδιάστατης απεικόνισης απουσιάζει.



Σχήμα 4.3: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή..

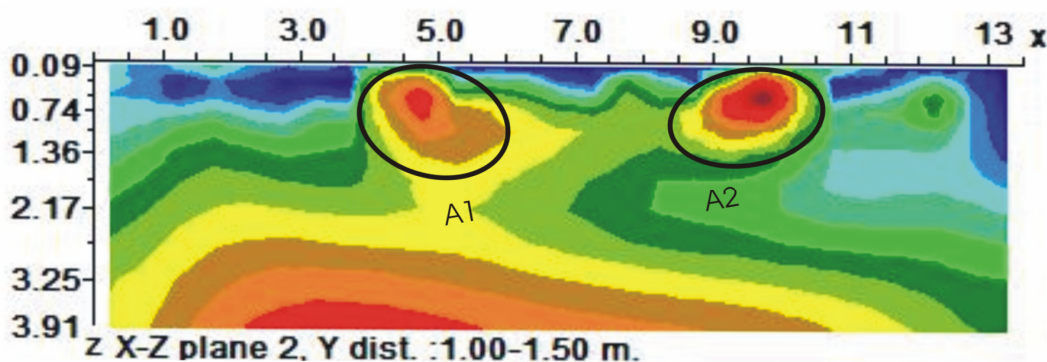
Στην γεωηλεκτρική τομή της τρίτης δισδιάστατης γραμμής εμφανίζονται στην ουσία δύο ηλεκτρικές ανωμαλίες. Συγκεκριμένα, ενώ αρχικά περίπου σε βάθος 50cm-1m παρατηρούνται 2 ανωμαλίες - η μια είναι η ανωμαλία (α1) που εκτείνεται από 4m -5m και εμφανίζεται και μια άλλη ευρύτερης περιοχής από τα 5,5m έως τα 8,5m – με προσεκτική εξέταση στις επόμενες γραμμές φαίνεται ξεκάθαρα να είναι μια ανωμαλία, η (α1), η οποία επεκτείνεται. Η δεύτερη (α2) ηλεκτρική ανωμαλία, την οποία έχουμε ξανασυναντήσει, βρίσκεται περίπου σε βάθος 50cm-1m και σε οριζόντια διάσταση εκτείνεται από 8,5m έως τα 9,5m.



Σχήμα 4.4: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στη δεύτερη γραμμή μελέτης παρουσιάζονται δύο ηλεκτρικές ανωμαλίες. Η πρώτη συναντάται από την επιφάνεια έως βάθος 1,5m και οριζόντια εκτείνεται από 4m - 6m. Η ανωμαλία αυτή φαίνεται και στις δύο δισδιάστατες τομές (α1).

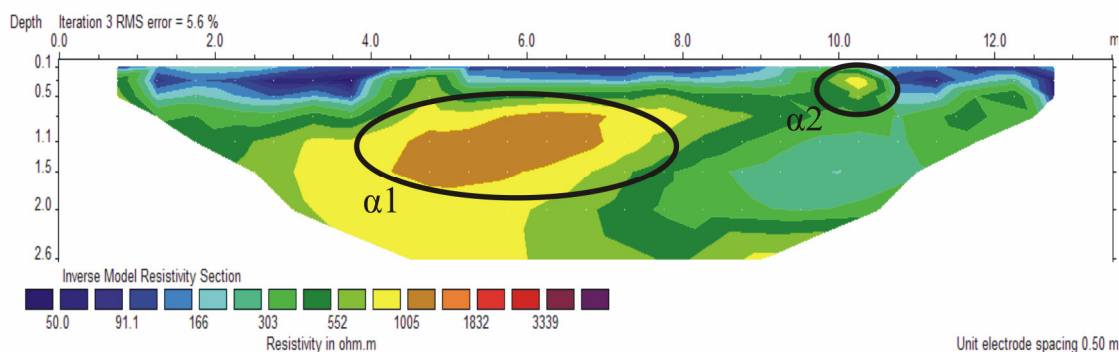
Η δεύτερη ανωμαλία βρίσκεται σε βάθος περίπου 10cm - 80cm, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 9m - 10,5m. Η ανωμαλία αυτή χαρακτηρίστηκε ως A2 καθώς υπάρχει η υπόνοια ότι αυτή η ηλεκτρική ανωμαλία είναι η ίδια με αυτή της τρίτης γραμμής (α2) η οποία οριζόντια εκτείνεται από 8,5m - 9,5m και της τέταρτης γραμμής (α2) η οποία ωστόσο εκτείνεται από 10m - 10,5m.



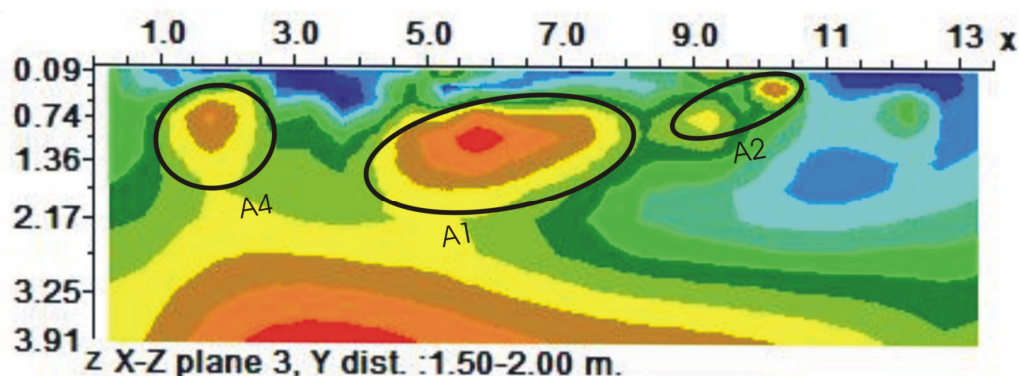
Σχήμα 4.5: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

Στην γεωηλεκτρική τομή της τέταρτης γραμμής παρατηρείται εμφανώς η ηλεκτρική ανωμαλία α1, η οποία εκτείνεται σε βάθος 50cm έως περίπου 1,5 m και οριζό-

ντια περίπου από 4m -7m. Η άλλη ανωμαλία (α2) η οποία εκτείνεται για μισό περίπου μέτρο από 10m-10,5m, πιστεύεται ότι είναι συνέχεια της τρίτης γραμμής και συγκεκριμένα αυτής που στην οριζόντια διάστασή της εκτείνεται από 8,5m - 9,5m.



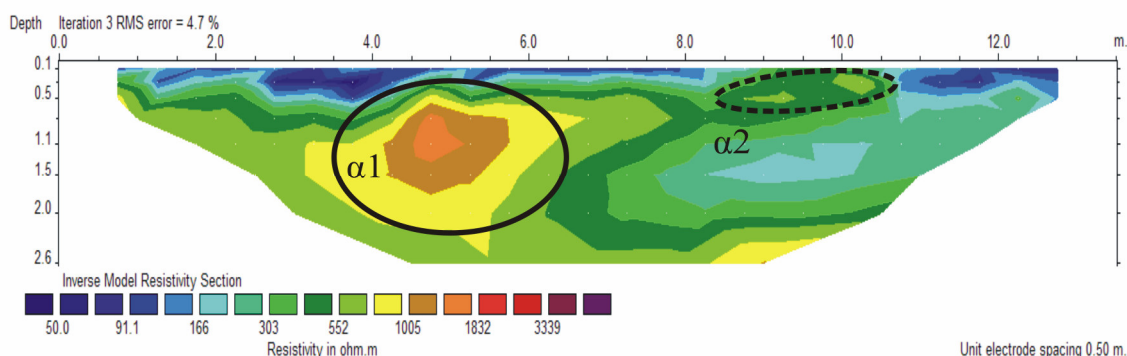
Σχήμα 4.6: Γεωηλεκτρική τομή της τέταρτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.



Σχήμα 4.7: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

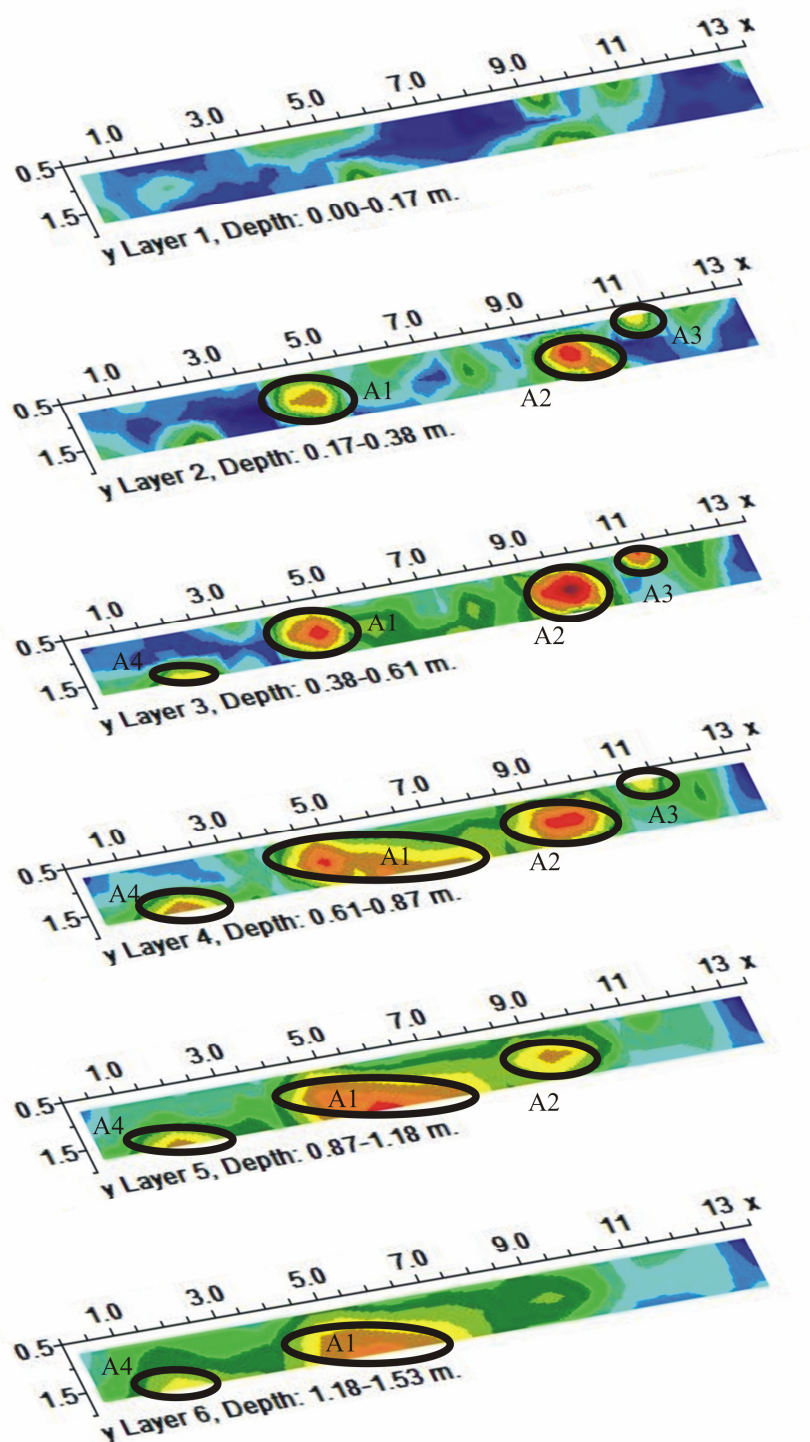
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τρίτη τρισδιάστατη γραμμή μελέτης, καθώς εντοπίζεται μια τέταρτη ανωμαλία η οποία δεν συναντάται πουθενά στις δύο τελευταίες γραμμές της δισδιάστατης απεικόνισης. Η ανωμαλία αυτή (A4) εντοπίζεται σε βάθος περίπου 20cm – 1,5m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 1m – 2,5m. Η δεύτερη (A1) έχει περιγραφεί και παραπάνω καλύπτοντας οριζόντια 3m, από 4,5m – 7,5m και σε βάθος 50cm – 1,5m. Η τρίτη ανωμαλία, (A2), η οποία όπως είπαμε, πιστεύουμε ότι

καλύπτεται από δύο θέσεις, βρίσκεται σε βάθος περίπου 0cm - 70cm, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 9m –10,5m.

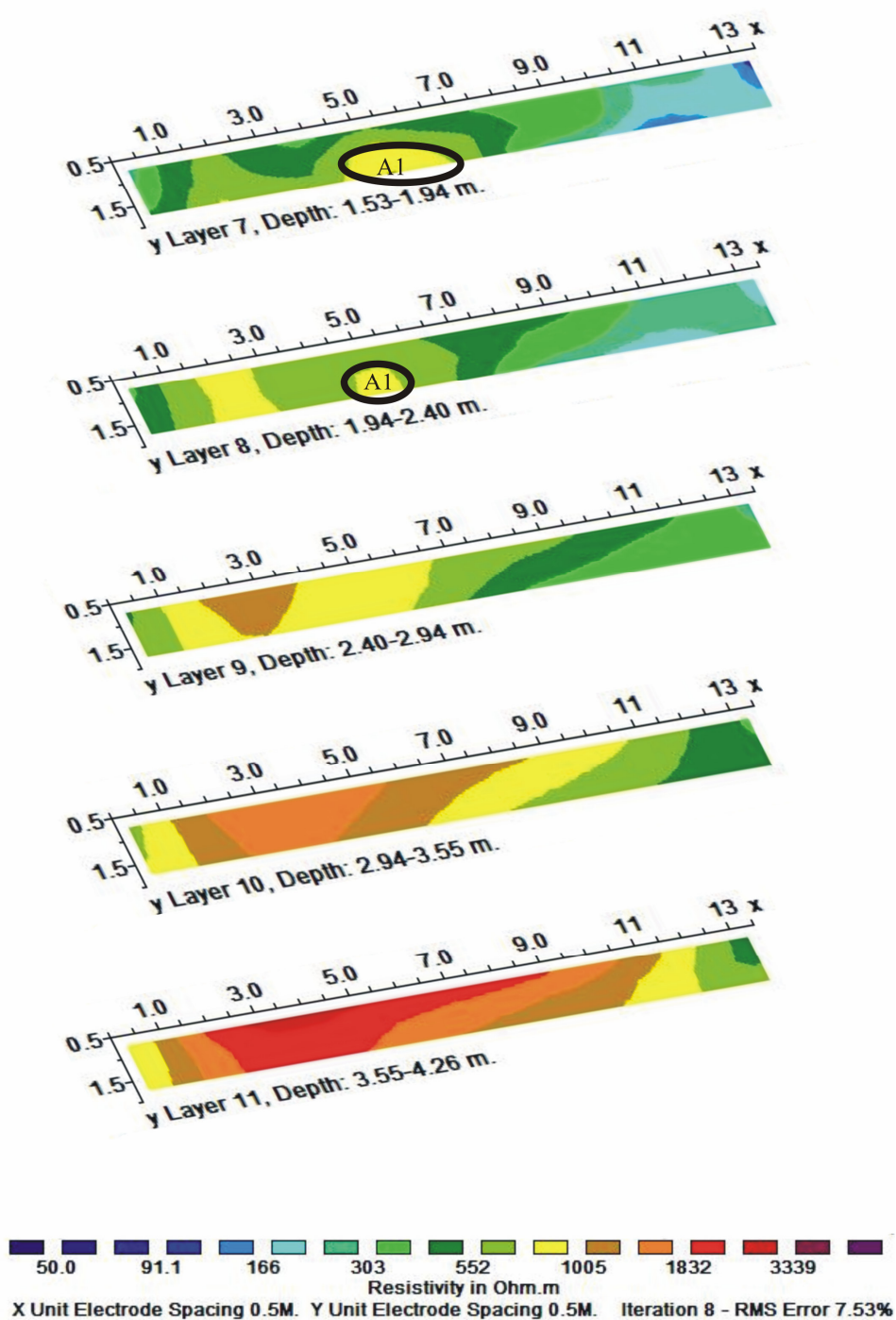


Σχήμα 4.8: Γεωηλεκτρική τομή της πέμπτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή. Εδώ εμφανίζεται και πάλι η ηλεκτρική ανωμαλία (α1) και διακρίνεται η ανωμαλία (α2).

Με την επεξεργασία των ψευδοτομών χρησιμοποιώντας το πακέτο RES3DINV, είχαμε τη δυνατότητα να αντιστρέψουμε τα δεδομένα και ταυτόχρονα να τα εμφανίσουμε σε τομές X-Y, X-Z και Y-Z, παρατηρώντας τα έτσι από περισσότερες οπτικές γωνίες. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον κάνναβο B1 σε διεύθυνση X-Y και X-Z, ενώ αυτά που προέκυψαν για την διεύθυνση Y-Z παρατίθενται στο παράρτημα καθώς δεν μας παρέχουν καμία πληροφορία.

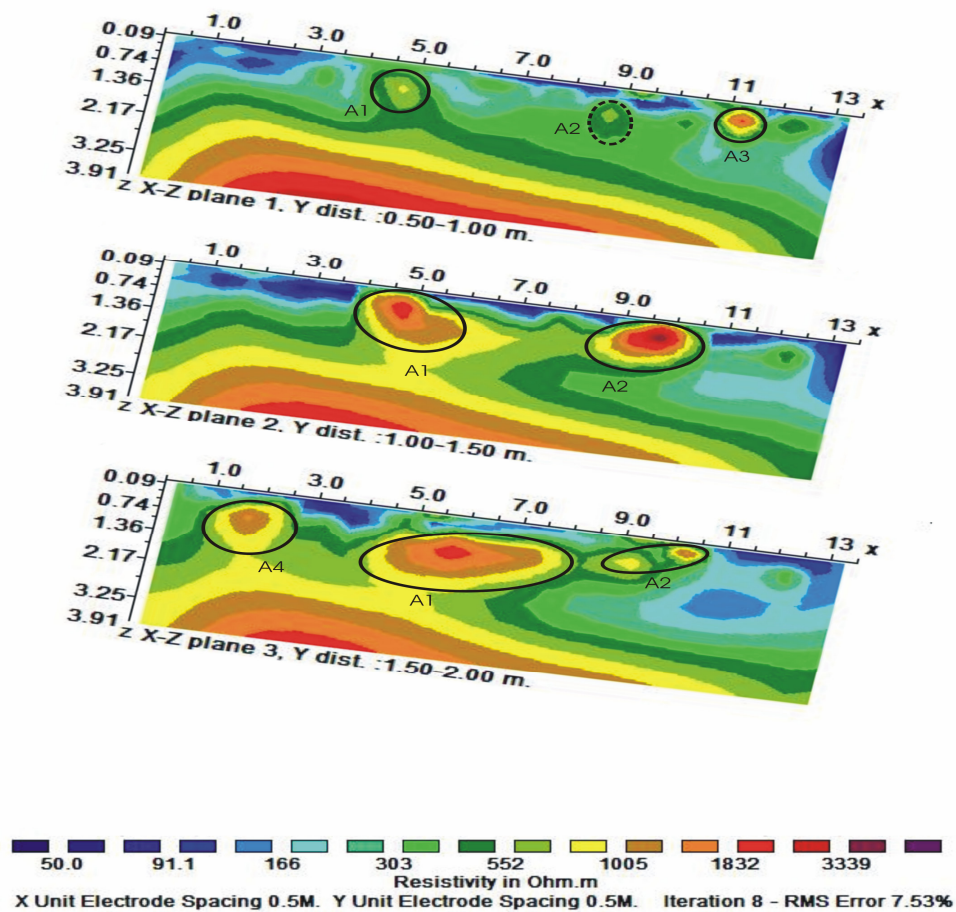
ΤΟΜΕΣ X-Y

Σχήμα 4.9: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου B1.



Σχήμα 4.9: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου B1 (συνέχεια)

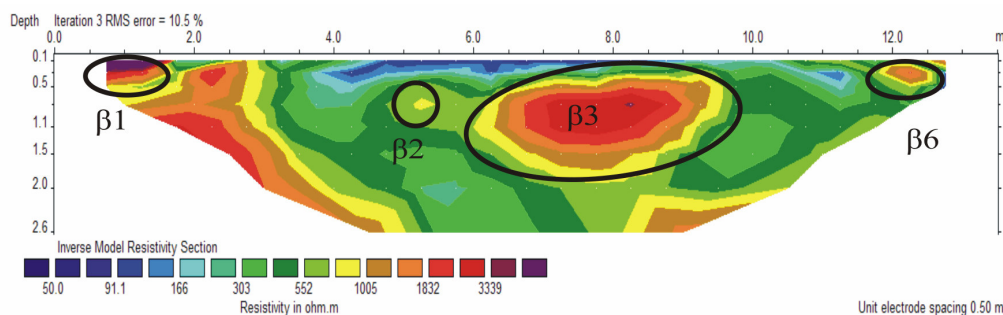
Παρακάτω παραθέτονται και τις τρεις τομές κατά διεύθυνση X-Z, οι οποίες έχουν αναλυθεί παραπάνω.



Σχήμα 4.10: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Z του καννάβου B1.

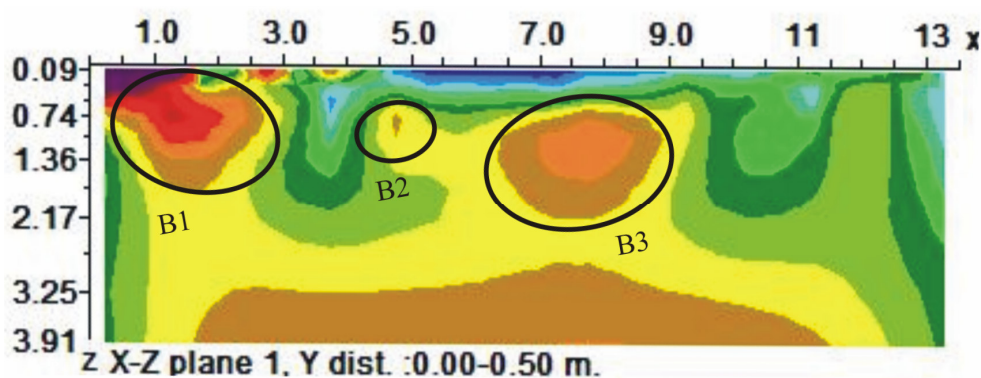
4.3. Επεξεργασία μετρήσεων του καννάβου 2

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την επεξεργασία του καννάβου B2 με τα λογισμικά πακέτα RES2DINV και RES3DINV παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 4.11: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην πρώτη γραμμή μελέτης της δισδιάστατης απεικόνισης παρατηρούμε 4 ανωμαλίες. Η πρώτη ανωμαλία (β1) είναι επιφανειακή ενώ εκτείνεται οριζόντια έως 2m. Η δεύτερη ανωμαλία (β2) βρίσκεται σε βάθος 10cm - 50cm ενώ η οριζόντια διάστασή της καλύπτει σχεδόν ένα μέτρο, από 4,5m – 5,5m. Η τρίτη ανωμαλία (β3) εμφανίζεται σε βάθος περίπου 30cm – 1,7m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 6 m – 9,5m. Η τέταρτη ανωμαλία (β6) εμφανίζεται σε 30cm - 60cm βάθος ενώ οριζόντια εκτείνεται από 12m-13m.

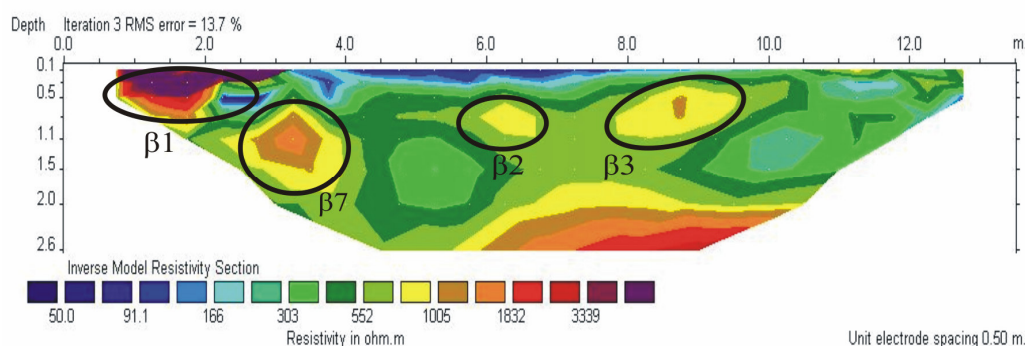


Σχήμα 4.12: Γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

Στην πρώτη γραμμή μελέτης του καννάβου αυτού παρουσιάζονται τρεις ανωμαλίες. Η πρώτη (B1) εντοπίζεται από την επιφάνεια μέχρι τα 1,7m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 0m – 3m. Είναι η ίδια ανωμαλία που παρατηρείται και στις δυο πρώτες γραμμές της δισδιάστατης απεικόνισης και χαρακτηρίζεται ως (β1).

Η δεύτερη ανωμαλία (B2) βρίσκεται σε βάθος περίπου 50cm – 1,5m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 4,5m – 5m. Και αυτή η ανωμαλία ταυτίζεται με την ανωμαλία (β2) που υπάρχει στις δύο πρώτες γραμμές μελέτης της δισδιάστατης απεικόνισης.

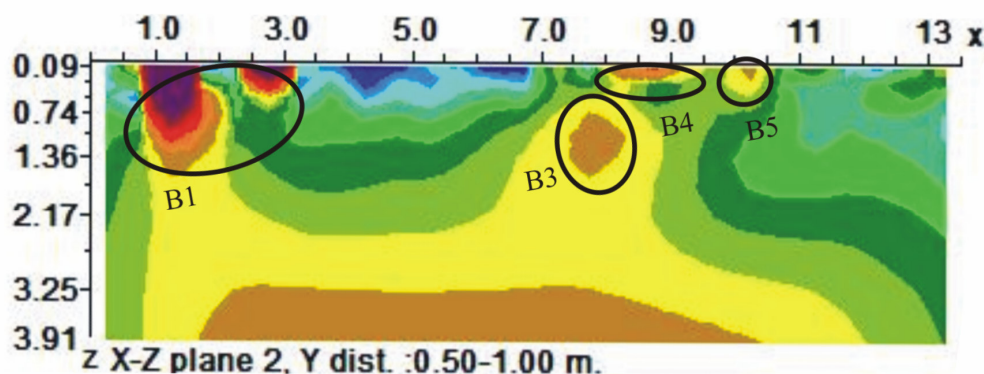
Η τρίτη ανωμαλία (B3) εμφανίζεται σε βάθος περίπου 50cm – 2m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 6,5m – 9m και αντιστοιχεί με την ανωμαλία (β3) της πρώτης γραμμής.



Σχήμα 4.13: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

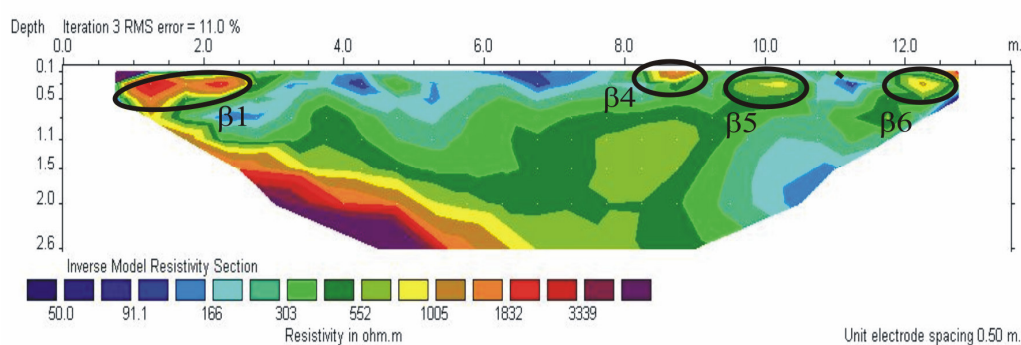
Στη δεύτερη γραμμή μελέτης του πακέτου RES2DINV έχουμε 4 ανωμαλίες. Οι ηλεκτρικές ανωμαλίες (β1) και (β2) απαντήθηκαν ξανά στην πρώτη γραμμή της δισδιάστατης απεικόνισης, όπως και στην πρώτη γραμμή της τρισδιάστατης απεικόνισης.

Η άλλη ηλεκτρική ανωμαλία που παρατηρείται (β7) εμφανίζεται μόνο σε αυτή τη γραμμή του συγκεκριμένου προγράμματος, ενώ απουσιάζει τελείως από τις γραμμές του προγράμματος RES3DINV. Βρίσκεται σε βάθος 50cm– 1.5m και οριζόντια εκτείνεται από 2,5m - 4m. Η τελευταία ανωμαλία της γραμμής αυτής (β3) εμφανίζεται σε 50cm – 1m και οριζόντια από 8m- 9,5m και αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ανωμαλία (B3) των γεωηλεκτρικών τρισδιάστατων τομών, όπως εξάλλου παρατηρείται στις δύο πρώτες γραμμές του πακέτου αυτού.



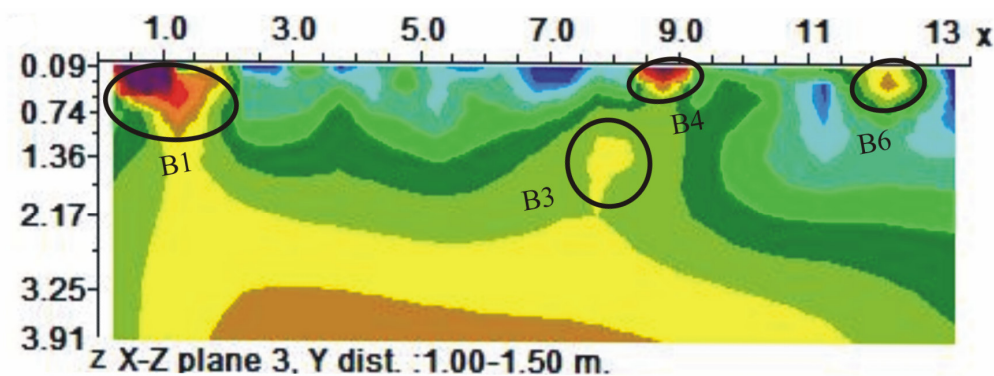
Σχήμα 4.14: Γεωηλεκτρική τομή της δεύτερης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

Στη δεύτερη γραμμή μελέτης της τρισδιάστατης απεικόνισης παρατηρούνται τέσσερις ηλεκτρικές ανωμαλίες. Οι ηλεκτρικές ανωμαλίες (B1) και (B3) απαντήθηκαν και παραπάνω, ενώ διαπιστώνουμε την ύπαρξη επιπλέον ανωμαλιών. Η μια εκ των οποίων είναι η (B4), η οποία εμφανίζεται επιφανειακά και οριζόντια εκτείνεται από 8m - 9m. Η άλλη (B5) βρίσκεται επιφανειακά και οριζόντια στα 10m – 10,5m. Και οι δύο ανωμαλίες αυτές απαντώνται στην τρίτη γραμμή της δισδιάστατης απεικόνισης με την αντίστοιχη ονομασία.



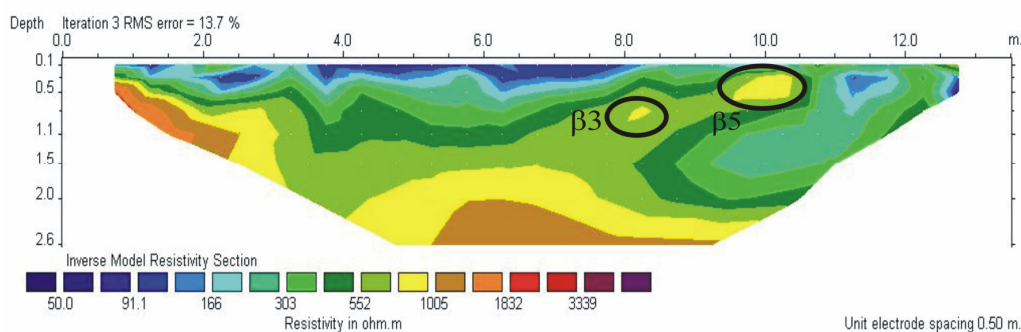
Σχήμα 4.15: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην ψευδοτομή της τρίτης γραμμής υπάρχουν πάλι 4 ανωμαλίες. Η πρώτη (β1) που παρατηρείται και στις προηγούμενες γραμμές βρίσκεται σε βάθος από την επιφάνεια έως 50cm και οριζόντια εκτείνεται έως 2,5m. Οι άλλες τρεις ανωμαλίες είναι επιφανειακές και οριζόντια εκτείνονται από 8,5m-9m η πρώτη (β4), 10m-10,5m η δεύτερη (β5) και 12m-12,5m η τρίτη (β6).



Σχήμα 4.16: Γεωηλεκτρική τομή της τρίτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

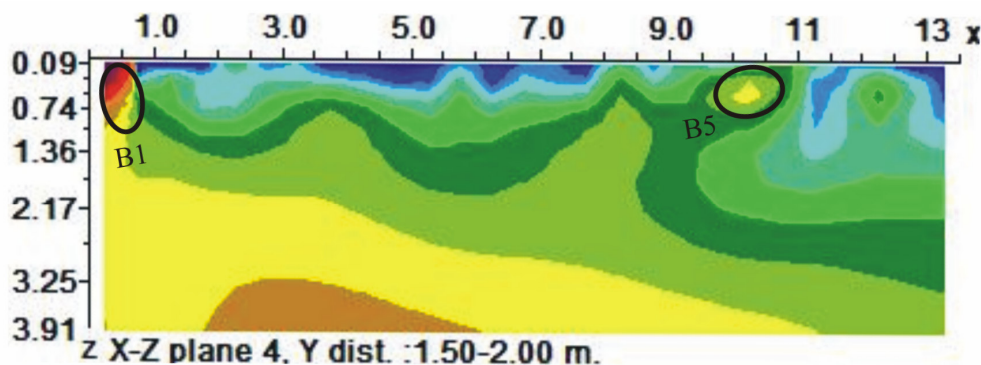
Σε αυτή τη γραμμή, βρίσκονται τρεις ίδιες ανωμαλίες (B1, B3, B4) με την δεύτερη γραμμή της τρισδιάστατης απεικόνισης και μια επιπρόσθετη (β6). Οι ανωμαλίες (B1) και (B4) είναι ίδιες, όπως και η ανωμαλία (B3) είναι ίδια με τη διαφορά ότι έχει μειωθεί η ένταση της και συγκεκριμένα βρίσκεται σε βάθος 50cm - 1m και οριζόντια 7,5m – 8,5m. Η τελευταία ανωμαλία (B6) ανωμαλία είναι επιφανειακή και οριζόντια εκτείνεται από 11,5m-12,5m και αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ανωμαλία (β6) στις γραμμές της δισδιάστατης απεικόνισης.



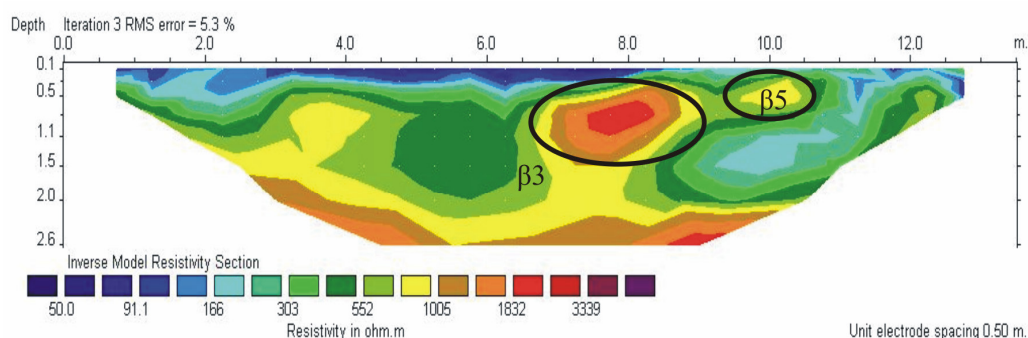
Σχήμα 4.17: Γεωηλεκτρική τομή της τέταρτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην τέταρτη γραμμή μελέτης παρατηρούνται δύο ανωμαλίες που έχουν απαντηθεί ξανά. Η πρώτη (β3) εκτείνεται οριζόντια για μισό περίπου μέτρο από 8m-8,5m και σε βάθος 70cm-1m και η δεύτερη (β5), βρίσκεται σε βάθος 10cm έως 50cm και οριζόντια εκτείνεται από 9,5 έως 10,5m.

Στην τέταρτη γραμμή, διακρίνονται μόνο 2 ανωμαλίες αυτή σε βάθος 0cm - 1m (B1) και οριζόντια 0,5m – 1m και αυτή (B5) που βρίσκεται επιφανειακά και οριζόντια στα 10m – 10,5m.

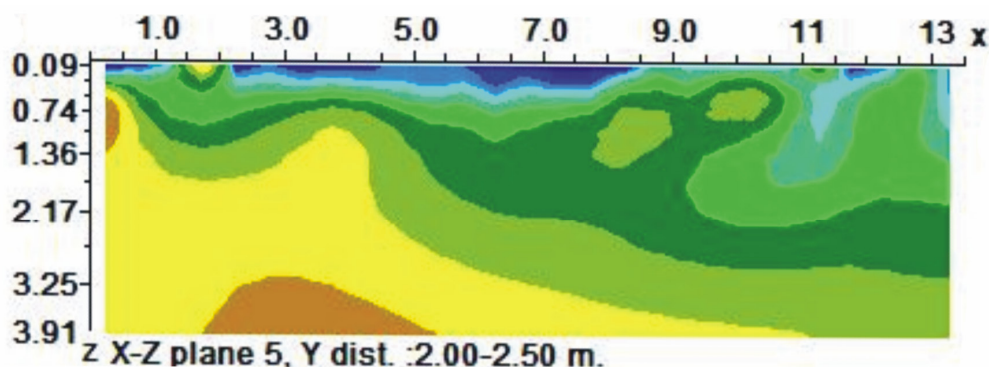


Σχήμα 4.18: Γεωηλεκτρική τομή της τέταρτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.



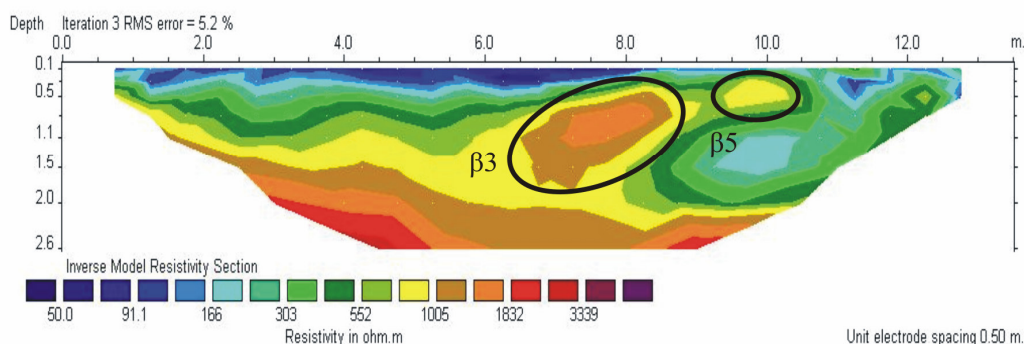
Σχήμα 4.19: Γεωηλεκτρική τομή της πέμπτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Σε αυτή τη γραμμή μελέτης απαντώνται και πάλι οι ανωμαλίες (β3) και (β5), σε αντίθεση με την πέμπτη γραμμή μελέτης τρισδιάστατης απεικόνισης του προγράμματος RES3DINV όπου απλώς διαφαίνονται οι ανωμαλίες (B3) και (B5).



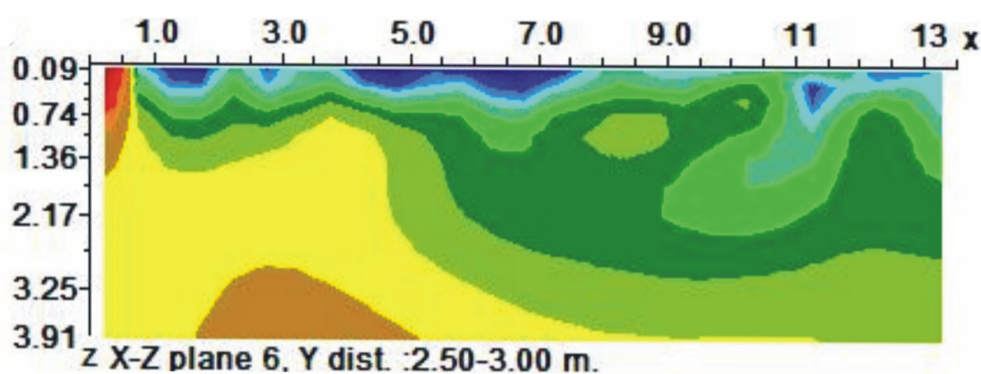
Σχήμα 4.20: Γεωηλεκτρική τομή της πέμπτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η γραμμή αυτή καθώς παρατηρείται μια διαφορά ανάμεσα στα δυο πακέτα: ενώ στην πέμπτη και έκτη γραμμή της δισδιάστατης απεικόνισης παρατηρούνται εμφανώς οι ηλεκτρικές ανωμαλίες (β3) και (β5), οι ίδιες ανωμαλίες απλά διαφαίνονται στην πέμπτη γραμμή της τρισδιάστατης απεικόνισης, κάτι που είναι αξιοσημείωτο καθώς υποτίθεται ότι ο συνδυασμός των δυο δισδιάστατων γραμμών μας δίνει την απεικόνιση της τρισδιάστατης γραμμής.



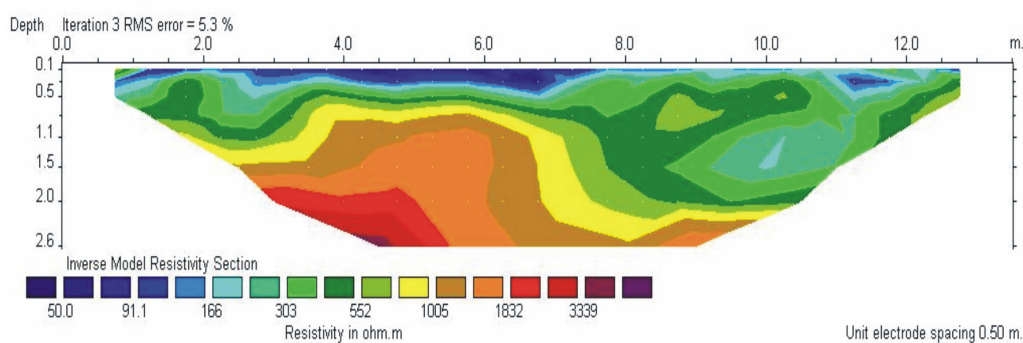
Σχήμα 4.21: Γεωηλεκτρική τομή της έκτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Οι ίδιες ηλεκτρικές ανωμαλίες παρατηρούνται εμφανώς και σε αυτή γραμμή. Η ηλεκτρική ανωμαλία β5, ωστόσο, επεκτείνεται τόσο στο βάθος κατά μισό μέτρο από την προηγούμενη γραμμή όσο και στην οριζόντια διάστασή της η οποία τώρα καλύπτει μισό μέτρο παραπάνω από 6,5m-9m. Η δεύτερη ανωμαλία βρίσκεται στη ίδια οριζόντια θέση και βάθος.

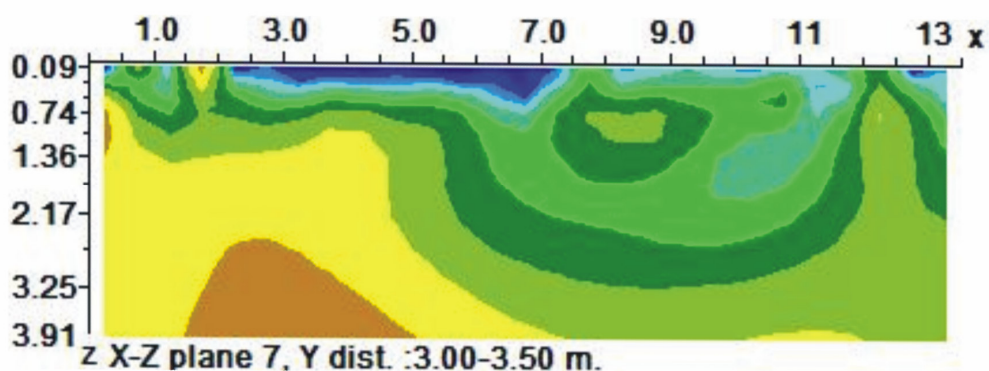


Σχήμα 4.22: Γεωηλεκτρική τομή της έκτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

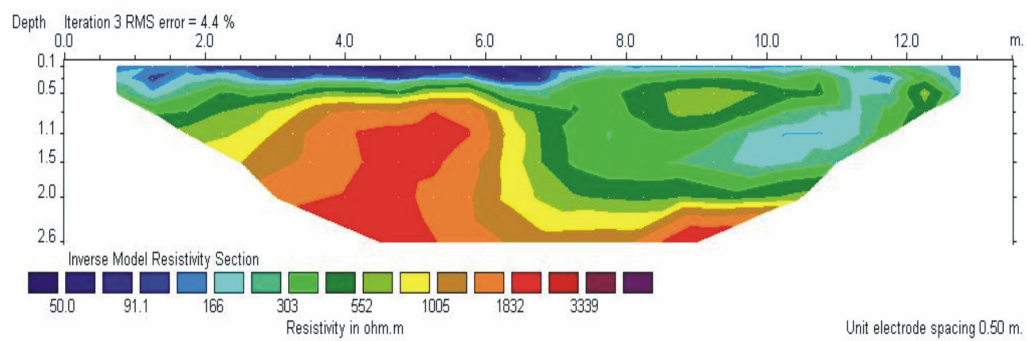
Από την έβδομη ως και την ένατη γραμμή μελέτης του πακέτου RES2DINV δεν διαπιστώνεται κάποια ανωμαλία. Αυτό το γεγονός συμφωνεί και με τις επόμενες γραμμές του λογισμικού πακέτου RES3DINV.



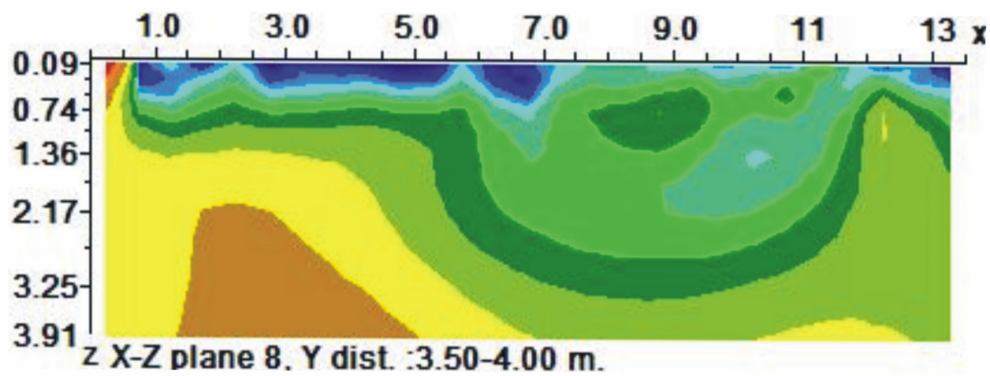
Σχήμα 4.23: Γεωηλεκτρική τομή της έβδομης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή..



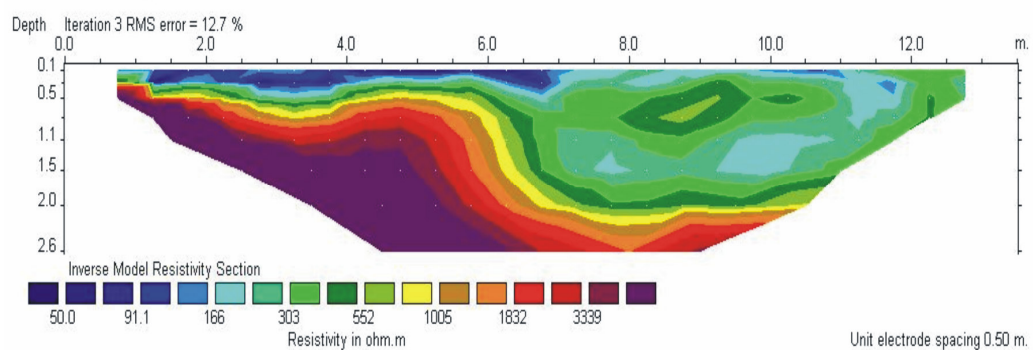
Σχήμα 4.24: Γεωηλεκτρική τομή της έβδομης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.



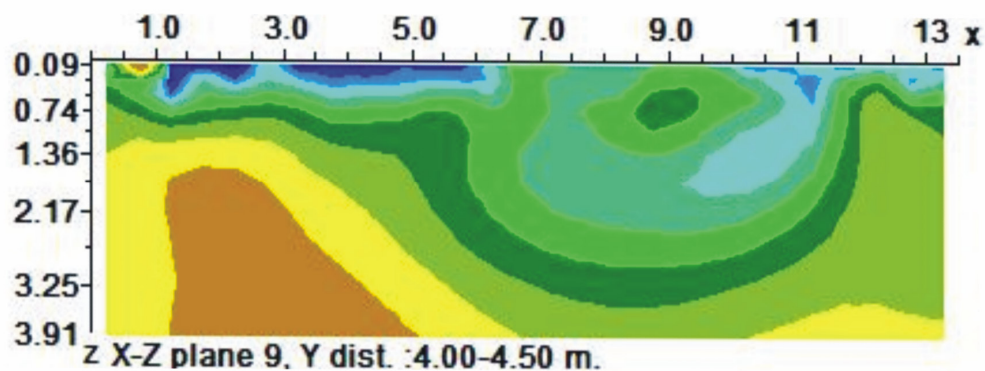
Σχήμα 4.25: Γεωηλεκτρική τομή της όγδοης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.



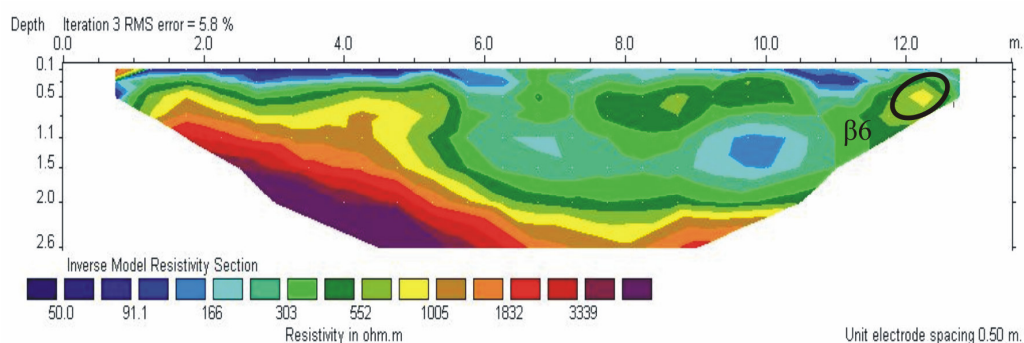
Σχήμα 4.26: Γεωηλεκτρική τομή της όγδοης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.



Σχήμα 4.27: Γεωηλεκτρική τομή της ένατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

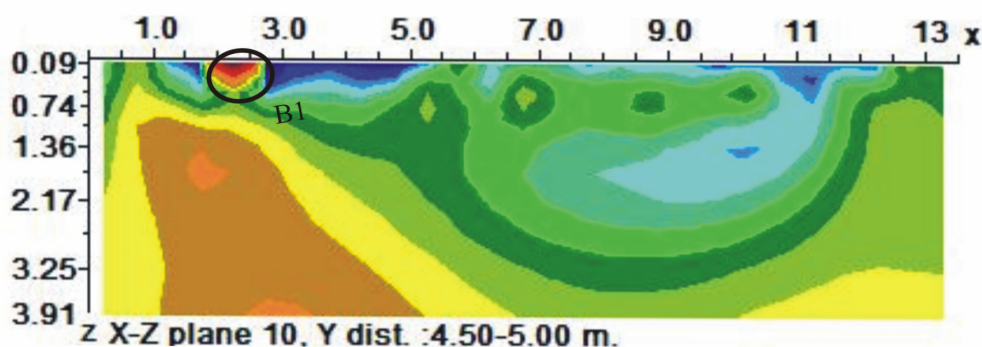


Σχήμα 4.28: Γεωηλεκτρική τομή της ένατης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή



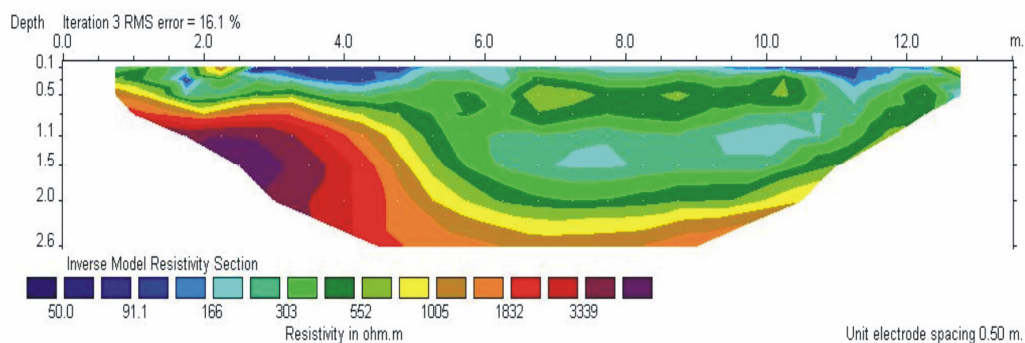
Σχήμα 4.29: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην δέκατη γραμμή μελέτης παρουσιάζεται η ανωμαλία (β6), η οποία βρίσκεται σε βάθος 30cm - 50cm, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 12m-12,5m, η οποία όμως δεν διακρίνεται στην ενδέκατη γραμμή της δισδιάστατης απεικόνισης, όπως επίσης δεν φαίνεται και στη δέκατη γραμμή της τρισδιάστατης απεικόνισης.

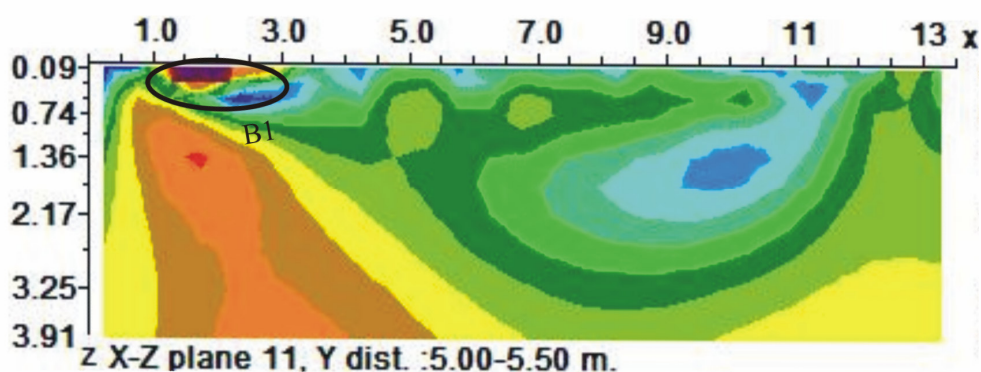


Σχήμα 4.30: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

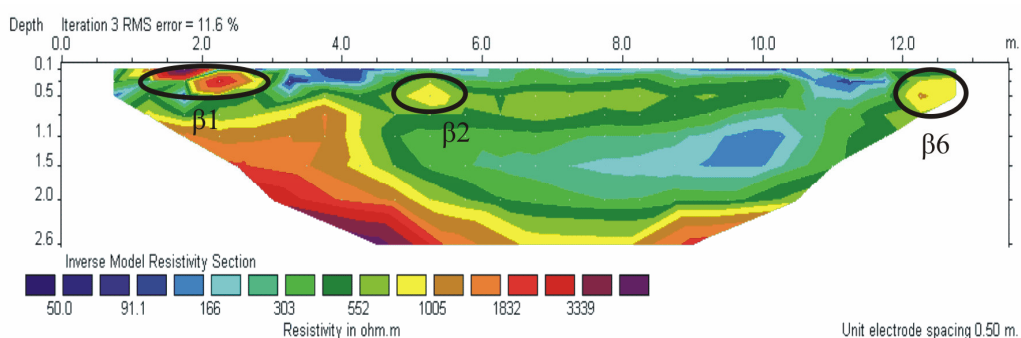
Ενώ στην γραμμή αυτή, όπως αναφέρθηκε, δεν φαίνεται η ανωμαλία (β6) που φαίνεται στη δισδιάστατη απεικόνιση, ωστόσο επανεμφανίζεται η ηλεκτρική ανωμαλία (B1), ανωμαλία η οποία και αυτή δεν φαίνεται στα δισδιάστατα.



Σχήμα 4.31: Γεωηλεκτρική τομή της ενδέκατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.



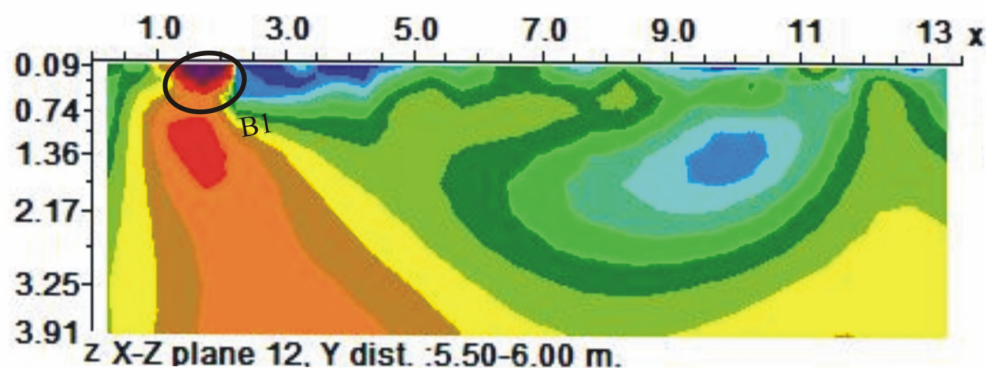
Σχήμα 4.32: Γεωηλεκτρική τομή της ενδέκατης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.



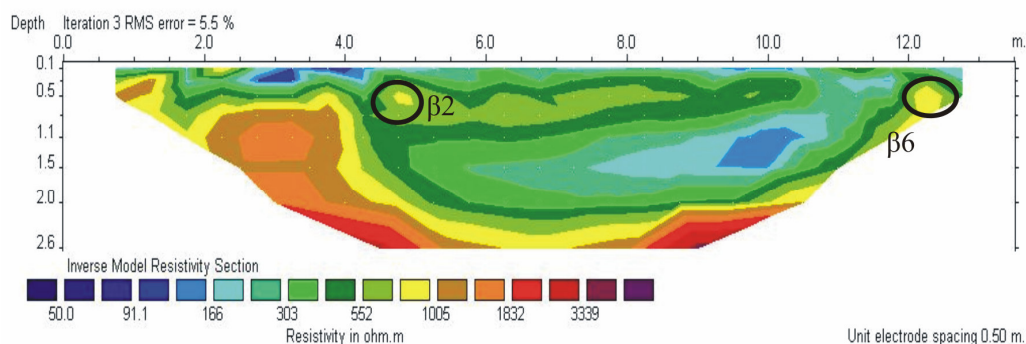
Σχήμα 4.33: Γεωηλεκτρική τομή της δωδέκατης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην ψευδοτομή αυτή έχουμε την επανεμφάνιση των ηλεκτρικών ανωμαλιών (β1), (β2) και (β6). Ωστόσο, στην παρακάτω ψευδοτομή της τρισδιάστατης απεικόνισης φαίνεται μόνο η αντίστοιχη ηλεκτρική ανωμαλία της (β1), η (B1).

Σ

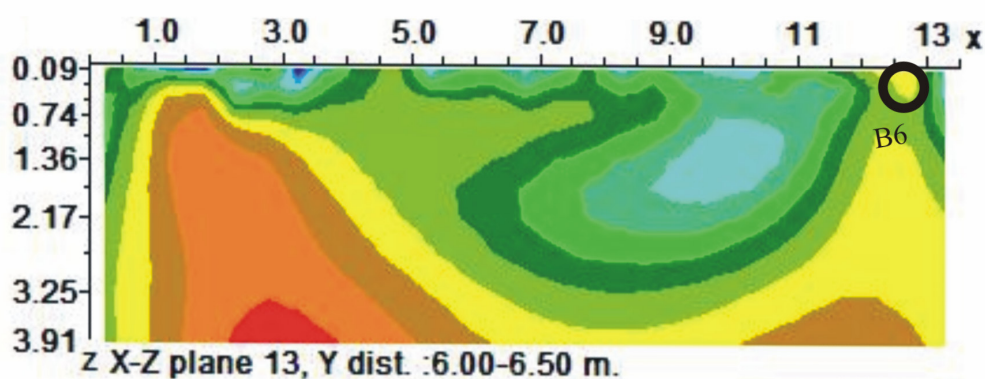


Σχήμα 4.34: Γεωηλεκτρική τομή δωδέκατης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.



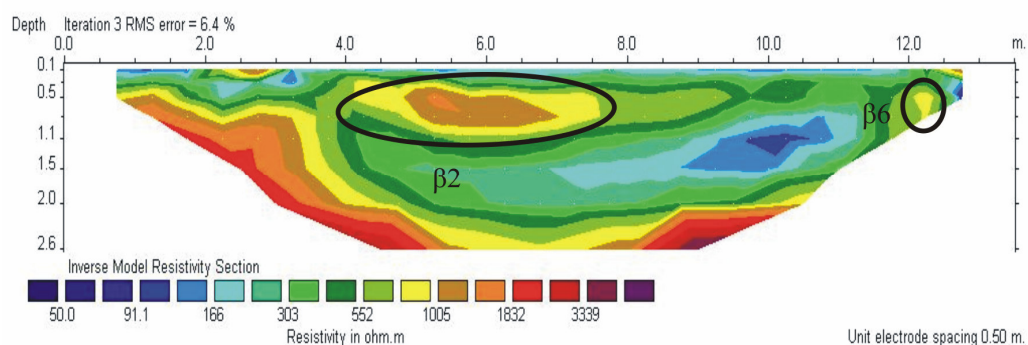
Σχήμα 4.35: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης-τρίτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Σε αυτή τη γραμμή μελέτης εμφανίζονται και πάλι οι δύο προηγούμενες ανωμαλίες, με τη διαφορά ότι η πρώτη (β2) εμφανίζεται μικρότερη σε βάθος περίπου 50cm και στην οριζόντια διάστασή της να καλύπτει μόνο 0,5m από 4,5m-5m. Η δεύτερη (β6) παραμένει ίδια.



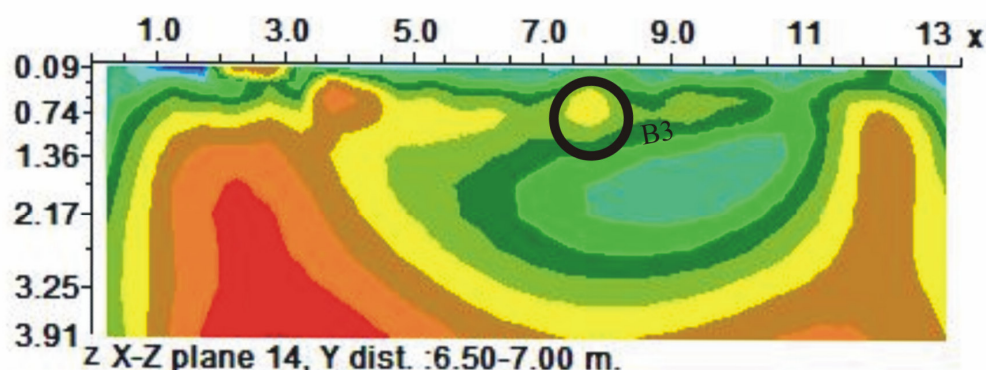
Σχήμα 4.36: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης-τρίτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή.

Η τρισδιάστατη αυτή γραμμή έρχεται σε αντίθεση με την προηγούμενη γραμμή της δισδιάστατης γραμμής καθώς η μόνη ανωμαλία που εμφανίζεται είναι η ανωμαλία (B6), η οποία ωστόσο εμφανίζεται και στη δέκατη-τρίτη και δέκατη τέταρτη γραμμή της δισδιάστατης απεικόνισης.



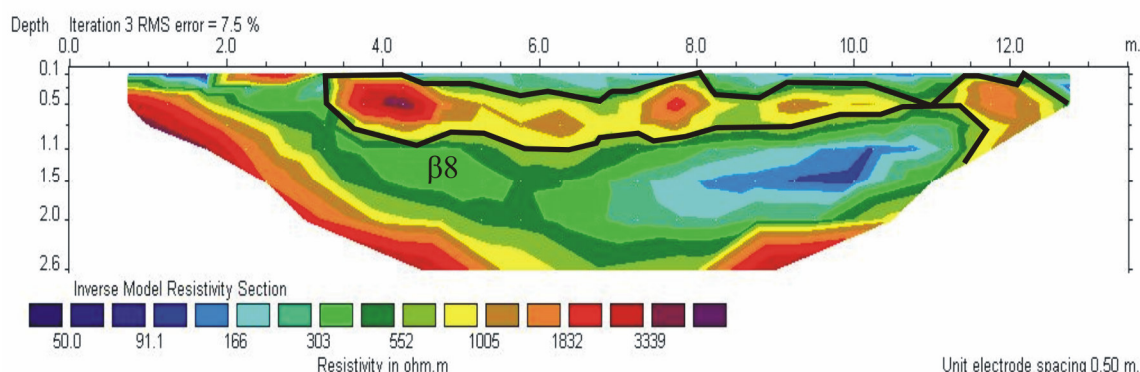
Σχήμα 4.37: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης-τέταρτης γραμμής από δισδιάστατη αντιστροφή.

Στη δέκατη-τέταρτη εμφανίζεται ξανά η ηλεκτρική ανωμαλία (β2) και μάλιστα σε μεγάλη έκταση. Βρίσκεται σε βάθος περίπου 30cm - 70cm ενώ οριζόντια καλύπτει μια ευρεία περιοχή από 4m- 7,5m. Διακρίνεται ακόμα και η μικρή προαναφερθείσα ανωμαλία (β6).



Σχήμα 4.38: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης τέταρτης γραμμής από τρισδιάστατη αντιστροφή

Η τελευταία γραμμή της τρισδιάστατης απεικόνισης έχει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον καθώς σε αυτήν παρατηρείται μόνο η ανωμαλία (B3) η οποία αντιστοιχεί μεν στην ανωμαλία που βρίσκεται στην δέκατη-τέταρτη γραμμή της διςδιάστατης απεικόνισης αλλά σε μικρότερο μέγεθος, αλλά στην παρακάτω τελευταία διςδιάστατη ψευδοτομή παρουσιάζονται διάφορες ανωμαλίες, οι οποίες δεν φαίνονται πουθενά στην τρισδιάστατη αυτή γραμμή.

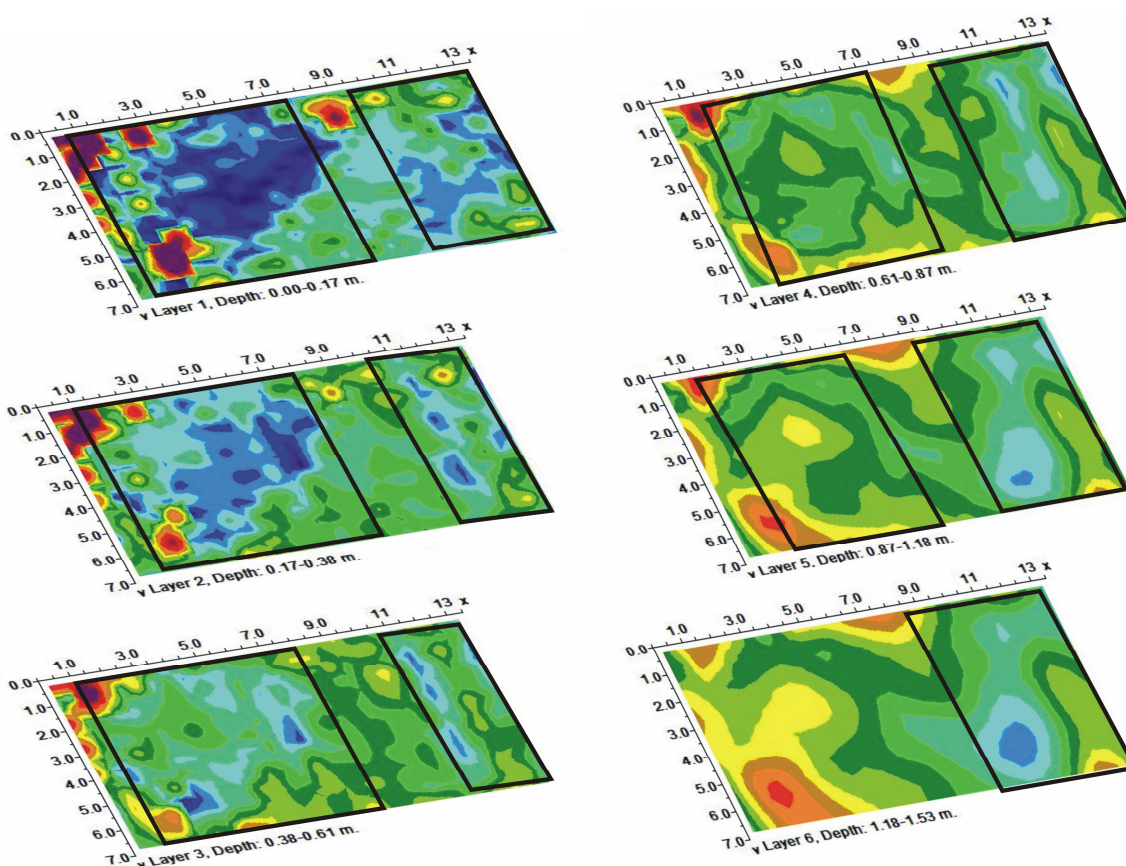


Σχήμα 4.39: Γεωηλεκτρική τομή της δέκατης πέμπτης γραμμής από διςδιάστατη αντιστροφή.

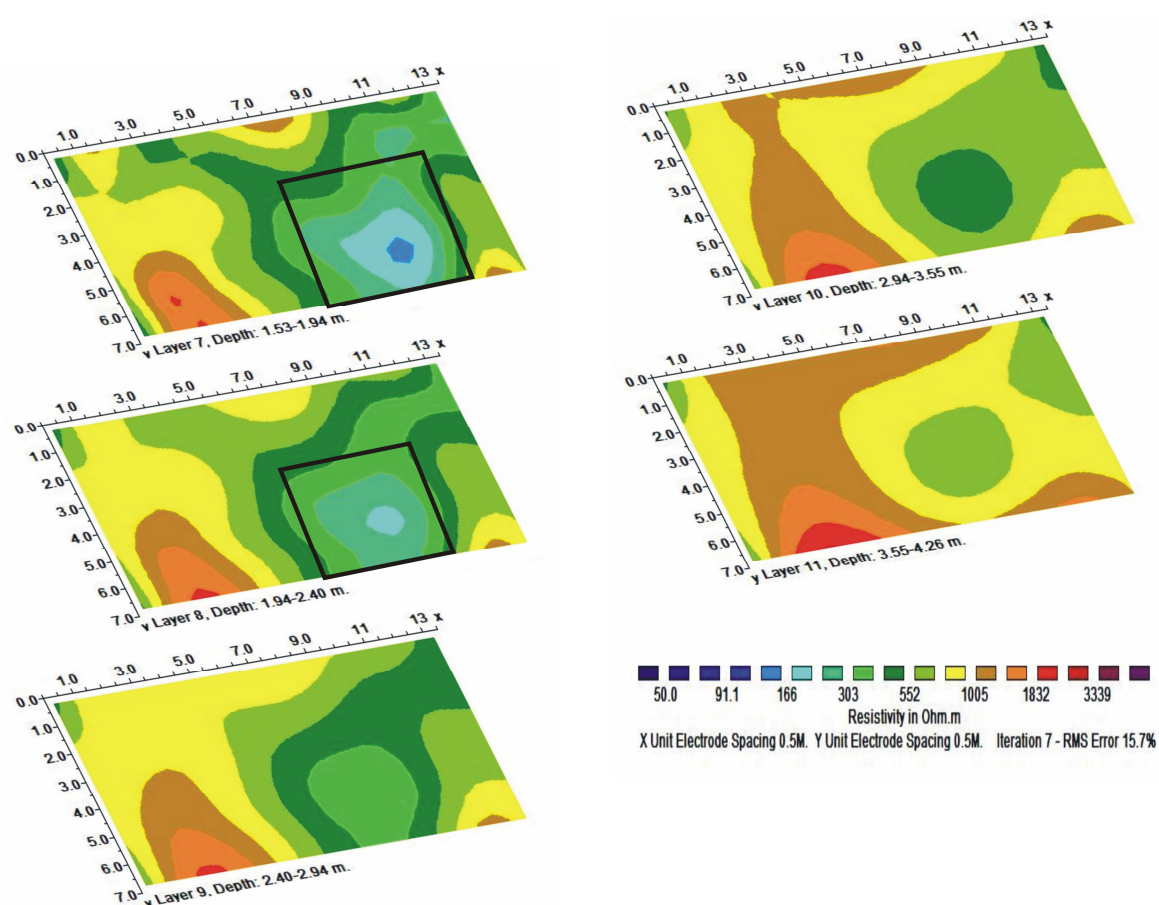
Η γραμμή αυτή δεν παρουσιάζει σημαντικό σφάλμα. Επομένως, η ηλεκτρική ανωμαλία αυτή (β8) που βρίσκεται σε βάθος από την επιφάνεια έως 50cm και οριζόντια εκτείνεται από 3m-13m, πιθανόν να συμπεριλαμβάνει όλες τις προαναφερθείσες ανωμαλίες, πιθανόν και να επισημαίνει τι ακριβώς υπάρχει κάτω από την επιφάνεια στην συγκεκριμένη γραμμή, δηλ. την ύπαρξη κάποιου τοίχου.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την επεξεργασία των ψευδοτομών του καννάβου 2 για την εμφάνιση τομών X-Y, χρησιμοποιώντας το πακέτο RES3DINV, παρατίθενται παρακάτω.

TOMEΣ X-Y



Σχήμα 4.40: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου B2 .



Σχήμα 4.40: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση X-Y του καννάβου B2 συνέχεια)

Στις παραπάνω τομές επισημαίνονται με συνεχόμενη γραμμή οι περιοχές χαμηλής ειδικής αντίστασης, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να γίνει ορατή μια περιοχή όπου ενδεχομένως να υπάρχει τοίχος ή ακόμα και αρχαίο λουτρό.

Συγκεκριμένα, από την επιφάνεια μέχρι και βάθος ίσο με 1,18m και σε οριζόντια διάσταση από περίπου 1m - 8m παρατηρείται μια περιοχή η οποία παίρνει ένα σχήμα στρογγυλό, σαν να υπάρχει λουτρό. Επιπλέον, καθ' όλο το βάθος και σε οριζόντια διάσταση περίπου στα 9m - 11m, υπάρχει άλλη μια περιοχή η οποία θα μπορούσε να σηματοδοτεί την ύπαρξη κάποιου τοίχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.2. Συμπεράσματα

Η έρευνα και η χαρτογράφηση των αρχαιολογικών περιοχών διεξάγοντας πλήρεις τρισδιάστατες μετρήσεις ειδικής αντίστασης είναι μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία καθώς πρέπει να συγκεντρωθεί ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων του εδάφους. Στις μέρες μας, έχουν αναπτυχθεί σύγχρονοι και πλήρως αυτοματοποιημένοι μετρητές ειδικής αντίστασης μειώνοντας το χρόνο έρευνας, γεγονός, ωστόσο, το οποίο δεν έχει οδηγήσει στο να χρησιμοποιούνται τέτοιες έρευνες σε μια τυπική βάση μέχρι τώρα.

Προκειμένου να καταγραφεί η κατανομή της ειδικής αντίστασης στις αρχαιολογικές περιοχές σε τρεις διαστάσεις, πρέπει να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικοί τρόποι μέτρησης. Αυτοί οι τρόποι πρέπει να συνδυάσουν την ταχύτητα, το χαμηλό κόστος και την επαρκή κάθετη και οριζόντια ανάλυση. Η συγκέντρωση των στοιχείων ειδικής αντίστασης στις παράλληλες γραμμές μελέτης αποτελεί την πιο κοινή πρακτική ερευνών σήμερα.

Η πρώτη ερώτηση που προκύπτει σε αυτήν την περίπτωση αφορά τον προσανατολισμό των γραμμών μελέτης. Οι μετρήσεις πρέπει να διεξαχθούν κατά μήκος του άξονα X, κατά μήκος του άξονα Y ή και κατά μήκος και των δύο αξόνων; Και έπειτα, πώς θα έπρεπε αυτά τα στοιχεία να ερμηνευθούν; Είναι οι δισδιάστατοι ή οι τρισδιάστατοι αλγόριθμοι αντιστροφής ικανοί να περιγράψουν την κατανομή της ειδικής αντίστασης και ποιες είναι οι κύριες διαφορές μεταξύ τους;

Τα αποτελέσματα στη συγκεκριμένη εργασία έδειξαν ότι η δισδιάστατη επεξεργασία των δεδομένων δεν ανταπεξέρχεται στην απεικόνιση της πραγματικής αντίστασης καθώς τα τρισδιάστατα αρχαιολογικά χαρακτηριστικά προσεγγίζονται σαν να μεταβάλλονται μόνο σε δύο διαστάσεις. Αντίθετα, οι τρισδιάστατοι αλγόριθμοι αντιστροφής κατόρθωσαν να μας δώσουν μια σωστή απεικόνιση των δομών του υπεδάφους και προφανώς ήταν ανώτεροι σε σχέση με τους δισδιάστατους. Επιπλέον ο

τρισδιάστατος αλγόριθμος φαίνεται να λειτουργεί εξίσου καλά ακόμη και παρουσία υψηλού θορύβου.

Αναλυτικά, η επεξεργασία των δεδομένων του καννάβου B1 με την τρισδιάστατη αντιστροφή έδωσε τέσσερις ηλεκτρικές ανωμαλίες:

- ❖ η (A1) η οποία βρίσκεται σε βάθος περίπου 50cm - 1m, ενώ στην οριζόντια διάσταση εκτείνεται από 4,5m - 5m,

- ❖ η δεύτερη ανωμαλία (A2) εμφανίζεται σε βάθος περίπου 50cm - 1m, ενώ στην οριζόντια διάσταση εκτείνεται από 8m - 9m,

- ❖ η τρίτη ανωμαλία (A3) συναντάται σε βάθος περίπου 10cm - 80cm, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 11m - 11,5m και

- ❖ η ανωμαλία, (A4), η οποία εντοπίζεται σε βάθος περίπου 20cm - 1,5m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 1m - 2,5m. Η ανωμαλία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δεν συναντάται πουθενά στη δισδιάστατη απεικόνιση.

Μια ακόμη αξιόλογη διαφορά ανάμεσα στις δύο απεικονίσεις αποτελεί το γεγονός ότι στην τελευταία γεωηλεκτρική τομή αυτού του καννάβου της τρισδιάστατης απεικόνισης φαίνονται ολοκάθαρα οι περισσότερες ανωμαλίες σε αντίθεση με τη δισδιάστατη απεικόνιση που παρουσιάζεται έντονα μόνο μια.

Η επεξεργασία των δεδομένων του καννάβου B2 με την τρισδιάστατη αντιστροφή έδωσε έξι ηλεκτρικές ανωμαλίες:

- ❖ η πρώτη (B1) εντοπίζεται από την επιφάνεια μέχρι τα 1,7m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 0m - 3m,

- ❖ η δεύτερη ανωμαλία (B2) βρίσκεται σε βάθος περίπου 50cm - 1,5m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 4,5m - 5m,

- ❖ η τρίτη ανωμαλία (B3) εμφανίζεται σε βάθος περίπου 50cm - 2m, ενώ οριζόντια εκτείνεται από 6,5m - 9m,

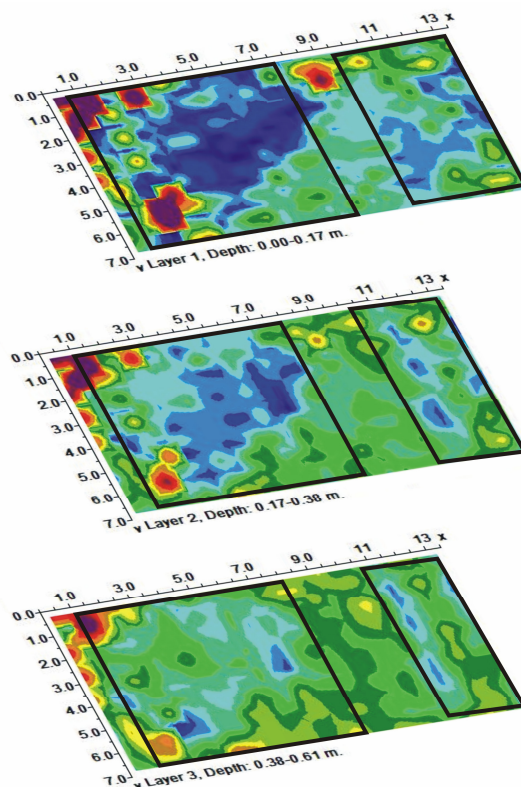
- ❖ η (B4), εμφανίζεται επιφανειακά και οριζόντια εκτείνεται από 8m - 9m,

- ❖ η άλλη (B5) βρίσκεται επιφανειακά και οριζόντια στα 10m - 10,5m και

- ❖ η τελευταία ανωμαλία (B6) ανωμαλία είναι επιφανειακή και οριζόντια εκτείνεται από 11,5m-12,5m.

Η δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση για τον κάνναβο αυτό σε γενικές γραμμές δεν έχουν σημαντική διαφορά. Πολύ σημαντική διαφορά παρατηρείται στην τε-

λευταία δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή, όπου παρουσιάζονται πολλές ανωμαλίες, και την αντίστοιχη τρισδιάστατη όπου απλά διακρίνεται μια.



Σχήμα 5.1: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές του καννάβου B2 σε διεύθυνση X-Y.

Τέλος, από την παρατήρηση των τριών πρώτων γεωηλεκτρικών τομών του καννάβου B2 και κυρίως από την δεύτερη διαπιστώνεται μια πιθανή ύπαρξη ανθρωπογενών υπολειμμάτων. Πιο συγκεκριμένα μοιάζουν όρια δωματίων τα οποία φαίνονται καθαρά κατά τις κατευθύνσεις προς Βορρά και Ανατολή. Οι διαστάσεις των δωματίων αυτών φαίνεται να είναι (7m x 7m) το ένα και (2m x 7m) το άλλο. Στη μέση των ορίων αυτών, όπου οι ειδικές αντιστάσεις είναι υψηλότερες, είναι πιθανή η ύπαρξη ενός πετρόκτιστου διαδρόμου.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας φαίνεται πως αποδίδει στον εντοπισμό των αρχαιοτήτων ιδιαίτερα μάλιστα όταν προηγηθεί σωστός σχεδιασμός και προσεκτική λήψη μετρήσεων.

5.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρικής τομογραφίας

Συχνά διάφορες γεωφυσικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται μαζί, έτσι ώστε το προτέρημα της μιας να καλύπτει το μειονέκτημα της άλλης. Πιστεύεται ότι η ηλεκτρική τομογραφία αντίστασης θα χρησιμοποιηθεί όλο και περισσότερο με αυτόν τον τρόπο επειδή προσφέρει μερικές μοναδικές ικανότητες. Απαριθμούνται εδώ μερικά από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρικής τομογραφίας, τα οποία συμβάλλουν στην καλύτερη ένταξη της σε έρευνες ρουτίνας αρχαιολογικών χώρων καθώς έχουν αποδείξει την αξιοπιστία τους σε αυτόν τον τομέα σε συνδυασμό όμως και με άλλες γεωφυσικές μεθόδους.

Τα προτερήματα, λοιπόν, που παρουσιάζει είναι:

- ❖ Επειδή δεν είναι απαραίτητο να κινηθούν τα ηλεκτρόδια, μπορεί να είναι εύκολα αυτοματοποιημένα.
- ❖ Οι έρευνες HT μπορούν να πραγματοποιηθούν από μακριά. Ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί δορυφορικές επικοινωνίες για να ελέγξει από μακριά ένα σύστημα μέτρησης. Αυτό το σύστημα μειώνει στο ελάχιστο την ανάγκη για τις επισκέψεις επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τις συχνές, πολυέξοδες έρευνες.
- ❖ Πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία υπολογιστών καθώς επίσης και οι αλγόριθμοι αντιστροφής έχουν οδηγήσει στην γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων της HT.
- ❖ Τα συστήματα συλλογής είναι τώρα διαθέσιμα με λογικές δαπάνες που κάνουν την HT προσιτή στα πανεπιστήμια και στις μικρές επιχειρήσεις γεωφυσικών υπηρεσιών.

Η ηλεκτρική τομογραφία ωστόσο έχει και περιορισμούς:

- ❖ Απαιτείται η φυσική επαφή μεταξύ του εδάφους και των ηλεκτροδίων.
- ❖ Πιθανώς η πιο απογοητευτική ιδιότητα ERT είναι η χαμηλή χωρική ανάλυση.

Η HT είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία. Το σωστό λογισμικό διατίθεται αλλά απαιτείται σημαντική εμπειρία χρηστών για τα επιτυχή αποτελέσματα. Εντούτοις, πολλές ομάδες, και με την ιδιωτική και δημόσια υποστήριξη, εργάζονται για να καταστήσουν την HT φιλικότερη προς το χρήστη και περισσότερο ευρέως διαθέσιμη.

Εν περιλήψει, ο συνδυασμός συγκέντρωσης των τομογραφικών στοιχείων σε παράλληλες γραμμές σε μια κατεύθυνση και η επεξεργασία τους μέσω των τρισδιάστατης απεικόνισης μπορεί να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στις γεωφυσικές έρευνες

για τις αρχαιολογικές περιοχές, καθώς το βάθος και η θέση των θαμμένων αρχιτεκτονικών υπολειμμάτων μπορούν να καταγραφούν ακριβώς. Αυτή η προσέγγιση του συνδυασμού των πυκνών δισδιάστατων μετρήσεων με την τρισδιάστατη αντιστροφή θεωρείται πρακτική για μια τυπική επεξεργασία στοιχείων, επειδή ο πρόσθετος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται από τα τρισδιάστατα πρότυπα αντιστροφής αντισταθμίζεται από το μειωμένο όγκο (50% λιγότερο) των στοιχείων που απαιτούνται σε σύγκριση με τη δισδιάστατη προσέγγιση.

5.4. Προτάσεις

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής προκύπτει ότι οι κάνναβοι αυτοί, οι οποίοι βρίσκονται στα αρχαία λουτρά, και ίσως και ολόκληρη η περιοχή γύρω από αυτούς, χρήζουν περαιτέρω μετρήσεων ώστε να γίνει δυνατή η αποτύπωση όλων των αρχιτεκτονικών καταλοίπων της αρχαιότητας. Για καλύτερα αποτελέσματα θα ήταν προτιμότερο οι μετρήσεις να γίνουν σε συνδυασμό και με άλλες γεωφυσικές μεθόδους. Με αυτό τον τρόπο θα αποκτηθεί καλύτερη τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους και θα υπάρξει δυνατότητα ακριβέστερου εντοπισμού των αρχαιοτήτων, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται δίνοντας έμφαση στη θέση και τον χρόνο μέτρησης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Acworth, R. I. (1987).** The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Quarterly Journal Engineering Geology*, 20, 265-272.
2. **AGI Advanced Geosciences, Inc. (2007).** STING R1 Earth Resistivity Meter. Τελευταία ενημέρωση: Σεπτέμβριος 2006.
3. **Aitken, M. (1974).** *Physics and archaeology*. Clarendon Press, Oxford.
4. **Alder, M.J. (1988).** Locating archaeological features in magnetic data by cross-correlation. *Archaeometry*, 30, 145-154.
5. **Aldred, G.C. (1964).** A fluxgate gradiometer for archaeological surveying. *Archaeometry*, 7, 14-19.
6. **Alumbaugh, D.L. and Newman, G.A., (2000).** Image appraisal for 2-D and 3-D electromagnetic inversion. *Geophysics*, 65, 1455-1467.
7. **Andreadaki-Vlazaki, M. (1988)** Kretiki Hestia, 2, *Archaeological News*, 280-282.
8. **Aspinall A, Gaffney CF. (2001).** The Schlumberger array-potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 8: 199–209.
9. **Aspinall, A., and Lynam, J.T. (1970).** An induced polarization instrument for the detection of near surface features. *Prospezzioni Archaeologiche*, 5, 67-75.
10. **Atzemoglou A, Tsourlos P, Pavlides S. (2003).** Investigation of the tectonic structure of the NW part of the Amynteon Basin (NW Greece) by means of a vertical electrical sounding (VES) survey. *Journal of the Balkan Geophysical Society* 6(4): 188–201.
11. **Auken, E., and Christiansen, AV. (2004).** Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics*, 69, 752-761.
12. **Barker R.D. (1992).** A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break* 10, 53-62.
13. **Barker R.D. (1996).** The application of electrical tomography in groundwater contamination studies. *EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts*, P082.

14. **Barker, R. and Moore, J. (1998).** The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *The Leading Edge*, 17, 1454-1458.
15. **Barker, R.D. (1978).** The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. *Geophysical Prospecting*, 29, 128-143.
16. **Barker, R.D. (1991).** Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, 1031-1037.
17. **Bernstone C. and Dahlin T. (1996).** Electromagnetic and DC resistivity mapping of waste deposits and industrial sites - experiences from southern Sweden. *58th EAGE conference*, Amsterdam, The Netherlands, Extended Abstracts M014.
18. **Bernstone, C. and Dahlin, T. (1999).** Assessment of two automated electrical resistivity data acquisition systems for landfill location surveys : Two case histories. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, 113-122.
19. **Binley A., Daily W., Labrecque D., Ramirez A., (2004).** Electrical resistance tomography. *THE LEADING EDGE*, MAY 2004, 442 .
20. **Brizzolari. Orlando. L, Piro, S., Samir, A (1986).** A frequency analysis and filtering of resistivity profiling of different resistivity arrays. *Paper presented at the 48th E.A.E.G. meeting Ostend*, 3-6 June, 1986.
21. **Brizzolari. E, Ermoli. F, Orlando. L, Piro, S. (1992).** Integrated methods in archaeological surveys. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 1, 47-55.
22. **Carpenter, E.W. and Habberjam, G.M. (1956).** A tri-potential method of resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*, 29, 128-143.
23. **Chambers J., Ogilvy R., Meldrum P. and Nissen J. (1999).** 3D resistivity imaging of buried oil- and tar-contaminated waste deposits. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 4, 3-15.
24. **Chambers JE.(2001).** The application of 3D electrical tomography to the investigations of brownfield sites. PhD thesis, University of Sheffield.
25. **Chouker F. (2001).** Archaeological site investigation by geoelectrical measurements in Tel-Halawi (northern Syria). *Archaeological Prospection* 8: 257–263.
26. **Christensen N.B. and Sorensen K.I. (1994).** Integrated use of electromagnetic methods for hydrogeological investigations. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, March 1994, Boston, Massachusetts, 163-176.
27. **Claerbout, J.F. and Muir, F. (1973).** Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, 38, 826-844.

28. **Clark A. (1990).** Seeing Beneath the Soil-Prospecting Methods in Archaeology. B.T. Batsford: London.
29. **Clark, A. (1986).** Archaeological Geophysics in Britain. *Geophysics*, 51: 1404-1413.
30. **Coggon JH. (1971).** Electromagnetic and electrical modelling by the finite element method. *Geophysics* 36(1): 132–155.
31. **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.
32. **Coppack P., Emerick K., Wilson K., Dittmer J, Szymanski J., Tsourlos P. Giannopoulos, A.(1992).** Recent archaeological discoveries at the medieval site of Fountains abbey. *Proceedings of MEDIEVAL EUROPE 1992*, York, U.K. 21-24, September 1992, York, UK, 201-206.
33. **Dabas M, Hesse A, Tabbagh J. (2000).** Experimental resistivity survey at Wroxeter archaeological site with a fast and light recording device. *Archaeological Prospection* 7: 107–118.
34. **Dahlin T, Johansson S, Landlin O. (1994).** Resistivity surveying for planning of Infrastructure. *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems* 27–31 March, Boston, Massachusetts; 509–528.
35. **Dahlin T. (1993).** *On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications.* PhD thesis, Lund University.
36. **Dahlin T. (1996).** 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break* 14, 275-283.
37. **Dahlin T, Loke MH. (1997).** Quasi-3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques. *Proceedings of the 3rd Meeting of the Environmental and Engineering Geophysics*; 8–11 September 1997, Aarhus, Denmark; 143–146.
38. **Dahlin, T. and Bernstone, C., (1997).** A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Reno, Nevada, March 23- 26 1997, vol 2, 927-935.

39. **Dahlin T. and Loke M.H. (1998).** Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modeling. *Journal of Applied Geophysics* 38, 237-249.
40. **Dahlin, T. and Owen, R., (1998).** Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe. *Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society* (European Section), Sept. 1998, Barcelona, Spain, 151-154.
41. **Dahlin, T., (2000).** Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 48, 181-187.
42. **Dahlin, T and Zhou, B., (2004),** A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays, *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.
43. **Dahlin, T. and Zhou, B., (2006),** Gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging, *Near Surface Geophysics*, 4, 113-123.
44. **Dahlin, T., Wisén R. , Zhang D. (2007).** 3D Effects on 2D Resistivity Imaging – Modelling and Field Surveying Results. *Near Surface Geophysic. 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Istanbul, Turkey, 3–5 September.
45. **Daily W. and Owen E. (1991).** Crosshole resistivity tomography. *Geophysics* 56,1228-1235.
46. **Daniels F. and Albery R.A., (1966).** Physical Chemistry. John Wiley and Sons, Inc. deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models form magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
47. **David, A. (1993).** Some current applications of geophysical survey for the evaluation of archaeological sites in Britain. *Arcaheologia Pologna*, 31, 33-50.
48. **De groot-Hedlin C, Constable S. (1990).** Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics* 55: 1613–1624.
49. **Dey A. and Morrison H.F. (1979a).** Resistivity modelling for arbitrary shaped two dimensional structures. *Geophysical Prospecting* 27, 1020-1036.
50. **Dey A. and Morrison H.F. (1979b).** Resistivity modeling for arbitrarily shaped three dimensional shaped structures. *Geophysics* 44, 753-780.

51. **Diamanti N, Tsokas G, Tsourlos P, Vafidis A. (2005).** Integrated interpretation of geophysical data in the archaeological site of Europos (northern Greece). *Archaeological Prospection* 12: 79–91.
52. **Dittmer, J. and Szymanski, J. (1994).** The Stochastic inversion of magnetic data using the simulated annealing algorithm. *Geophysical Prospecting*.
53. **Dogan M, Papamarinopoulos S. (2003).** Geoelectric prospection of a city wall by multi-electrode resistivity image survey at the prehistoric site of Asea (southern Greece). *Archaeological Prospection* 10: 241–248.
54. **Dolphin Lambert (2007).** How geophysical methods can help the archaeologist. *International Radar Consultants, Inc.*
55. **Edwards L.S., (1977).** A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
56. **Ellis R, Oldenburg DW. (1994), (1994a).** Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International* 116: 5–11.
57. **Ellis, R.G. and Oldenburg, D.W., (1994b).** The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem : a conjugate gradient approach. *Geophysical J. Int.*, 119, 187-194.
58. **Flathe H. (1955).** Possibilities and limitations in applying geoelectrical methods to hydro-geological problems in the coastal areas of Northwest Germany. *Geophysical Prospecting* 3: 95–110.
59. **Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack, T.J. and Rijo, L. (1980).** Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. *Geophysics*, 45, 75-93.
60. **Gaber S, El-Fiky AA, Abou Shagar A, Mohamaden M. (1999).** Electrical resistivity exploration of the Royal Ptolemaic Necropolis in the Royal Quarter of Ancient Alexandria, Egypt. *Archaeological Prospection* 6: 1–10.
61. **GEOTOMO SOFTWARE,** Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method, RES2DINV ver. 3.55, Ιανουάριος 2006
62. **GEOTOMO SOFTWARE,** Rapid 3-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method, RES3DINV ver. 2.15, Απρίλιος 2006
63. **Griffiths, D.H. and Turnbull, J. (1985).** A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break* 3 (No. 7), 16-20.
64. **Griffiths D., Turnbull, J., and Olayinka, A. (1990).** Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled Array. *First Break*, 8 (4), 121-129.

65. **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.
66. **Hansen, R. O., and Simmonds M. (1993).** Multiple source Werner deconvolution. *Geophysics*, 58, 1972-1800, 1993.
67. **Heimer,D.H. (1994).** Near surface high resolution geophysical methods for cultural resource management and archaeological investigations. *Plains Anthropologist*, 39, 110-111.
68. **Hesse, A., Jolivet, A., and Tabbagh, A. (1986).** New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological Applications. *Geophysics*, 51, 585-594.
69. **Holcombe, J. and Jirack, G., (1984).** 3-D terrain corrections in resistivity surveys. *Geophysics*, 49, 439-452.
70. **Inman, J.R., (1975).** Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40, 788-817.
71. **Johansson, S. and Dahlin, T. (1996).** Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements. *European Journal of Engineering and Geophysics*, 1, 229-247.
72. **Keller G.V. and Frischknecht F.C. (1966).** *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford.
73. **Koefoed O. (1979).** *Geosounding Principles 1 : Resistivity sounding measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.
74. **LaBrecque, D.J., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A. and Owen, E., (1996).** The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data. *Geophysics*, 61, 538-548.
75. **Lekenbush, J., (1989).** Geoelectric methods and image processing in archaeological sites. A report for "Kantonsarchaogie, Zurich".
76. **Li Y. and Oldenburg D.W. (1992).** Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International* 109, 343-362.
77. **Li, Y. and Oldenburg, D.W. (1997).** 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61, 394-408.
78. **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.

79. **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.
80. **Loke M.H. (1996-2004).** Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys . Τελευταία ενημέρωση: 26 Ιουλίου 2004.
81. **Loke M.H. and Barker R.D. (1995).** Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* 60, 1682–1690.
82. **Loke MH, Barker RD. 1996.** Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44: 499–523.
83. **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.
84. **Loke M.H. and Barker R.D. (1996b).** Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
85. **Loke, M.H., (1999).** Time-lapse resistivity imaging inversion. *Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section*, Em1.
86. **Loke, M.H., (2000).** Topographic modelling in resistivity imaging inversion. *62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts*, D-2.
87. **Loke M.H. and Dahlin T. (2002).** A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics* 49, 149–162.
88. **Loke M.H., Acworth I. and Dahlin T. (2003).** A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics* 34, 182–187.
89. **McGillivray, P.R. and Oldenburg, D.W. (1990).** Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem : A comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 499-524.
90. **Menke, W. (1984).** *Geophysical data analysis : Discrete inverse theory*. Academic Press Inc.
91. **Merrick, N.P., (1997).** A new resolution index for resistivity electrode arrays. *Exploration Geophysics*, 28, 106-109.

92. **Militer H., Rosler R. and Losch W. (1979).** Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods. *Geophysical Prospecting* 27, 640–652.
93. **Neighbour T, Strachan R, Hobbs BA. (2001).** Resistivity imaging of the linear earthworks at the Mull of Galloway, Dumfries and Galloway. *Archaeological Prospection* 8: 157–162.
94. **Niniou-Kindeli, V. (1990)** *Archaeologikon Deltion* 45 (1990), B2, 443. *Archaeologikon Deltion* 47 (1992), B2, 577-578, fig. 5 and *Kritiki Estia*, vol. 7 (1999), *Archaeological News*, 173-175.
95. **Niniou-Kindeli, V., and Christodoulakos, I. (2000)** Ρωμαϊκή Απτέρα – Μια πρώτη προσέγγιση. *Atti del Convegno Internazionale, Creta Romana e Protobizantina, Iraklion*, 23-30 September. Padova, I, 313-334.
96. **Noble, R. (1991).** Fluxgate magnetometry. *Electronics World and Wireless World*, Sept. issue, 726-732.
97. **Noel M. (1991).** *Multielectrode Resistivity Tomography for Imaging Archaeology*. British Archaeological Reports: Oxford.
98. **Noel, M., and Walker R., (1991).** Imaging archaeology by electrical resistivity tomography: a preliminary study. in *Archaeological sciences* 89, Budd, P., Chapman,
99. **Olayinka A. and Yaramanci U. (2000).** Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. *Geophysical Prospecting* 48, 293–316.
100. **Olayinka, A.I. and Yaramanci, U., (2000).** Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion: *Journal of Applied Geophysics*, 45, 63-82.
101. **Oldenburg D.W. and Li Y.G. (1999).** Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64, 403–416.
102. **Paige C, Saunders M. (1982).** LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software* 8: 43–71.
103. **Panissod C, Dabas M, Hesse A, Jolivet A, Tabbagh J, Tabbagh A. (1998).** Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics* 63(5): 1542–1550.

104. **Papadopoulos N. G., Tsourlos P., Tsokas G.N. , Sarris A. (2006).** Two-dimensional and Three-dimensional Resistivity Imaging in Archaeological Site Investigation. *Archaeological Prospection*.
105. **Papamarinopoulos S. P., Tsokas G.N., Lakaki M., Savopoulou T.(1993).** Advanced Geophysical prospecting processing of field data and practical results. "Theory and Practice of Applied Geophysics" , 7, *Geophysical Exploration of Archaeological sites*, 149-160.
106. **Parasnis, D.S. (1997).** *Principles of Applied Geophysics*. Chapman and Hall, London.
107. **Park S.K. and Van G.P. (1991).** Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics* 56, 951–960.
108. **Pelton, W., Rijo, L., and Swift, J., (1978).** Inversion of two-dimensional resistivity and induced polarization Data. *Geophysics*, 43:788-803.
109. **Ramirez A, Daily W, Binley A, Labrecque D. (1996).** Tank leak detection using electrical resistance methods. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environment*, Keystone, CO; 28 April–1 May.
110. **Reynolds, M. J., (1997).** *An introduction to applied and environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
111. **Reynolds J. (1998).** "An introduction to applied and environmental geophysics". *John Willey and Sons*.
112. **Richards, J.A, John Alan (1993).** "Remote sensing digital analysis: an introduction".
113. **Ritz, M., Parisot, J.-C., Diouf, S., Beauvais, A. and Dione, F. (1999).** Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of eastern Senegal, West Africa. *Journal of Applied Geophysics*, 41, 335-344.
114. **Rizzo E, Chianese D, Lapenna V. (2005).** Magnetic, GPR and geoelectrical measurements for studying the archaeological site of "Masseria Nirgo" (Vigiano, southern Italy). *Near Surface Geophysics* 3(1): 13–19.
115. **Robinson, E. S. & Coruh, C., (1988),** *Basic Exploration Geophysics*, New York: Johny Wily.
116. **Roy, A. and Apparao, A, (1971).** Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 943-959.

117. **Sarris A, Topouzi S, Adrimi-Sismani V. (2002).** Mycenaean Dimini: integration of geophysical surveying and GIS. *CAA2002 International Conference: Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology*. The Digital Heritage of Archaeology. Herakleion, Crete, 2–6 April.
118. **Sarris A. (1992).** *Shallow depth geophysical investigation through the application of magnetic and electric resistance techniques: an evaluation study of the responses*. PhD thesis, University of Nebraska: Lincoln.
119. **Sarris A. (2004).** Preliminary Report of the Geophysical Investigations in the Archaeological Site of Sikyon. Institute for Mediterranean Studies: Rethimno, Crete, 29 pp. (In Greek).
120. **Sasaki Y. (1992).** Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting* 40, 453–464.
121. **Sasaki Y. (1994).** 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics* 59, 1839–1848.
122. **Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A, Herzog, I. (1990).** *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge University Press.
123. **Scollar, I., Weidner, B., and Segeth, K. (1986)** Display of archaeological magnetic data. *Geophysics*, 38, 349-358.
124. **Sharma, P.V. (1997),** *Environmental and engineering geophysics*, Cambridge University Press, UK.
125. **Sheriff, R. E., Geldart, L. P. (1995),** *Exploration Seismology*, 2nd Edition, Cambridge University Press.
126. **Shima H. (1992).** 2-D and 3-D resistivity imaging reconstruction using cross-hole data. *Geophysics* 55, 682–694.
127. **Shima, H., Sakashita, S. and Kobayashi, T. (1996).** Developments of non-contact data acquisition techniques in electrical and electromagnetic explorations. *Journal of Applied Geophysics*, 35, 167-173.
128. **Silvester P.P. and Ferrari R.L., (1990).** *Finite elements for electrical engineers* (2nd. ed.). Cambridge University Press.
129. **Spanoudakis S. N., Vafidis A. and Papavasiliou A. (2004).** Delineating a doline system using 3D Ground Penetrating Radar (GPR) data, complex trace attributes and neural networks: a case study in Omalos Highlands, Chania, Crete. *1st International Conference, AMIREG*, 7 – 9 June, Chania, Greece, Proceedings, 107-112.

130. **Strecker U., and Uden R. (2002).** Data mining of 3D poststack seismic attribute volume using Kohonen self-organizing maps. *The Leading Edge*, 10, 1032-1037.
131. **Storz H., Storz W. and Jacobs F. 2000.** Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophysical Prospecting* 48, 455-471.
132. **Sugimoto, Y. (1999).** Shallow high-resolution 2-D and 3-D electrical cross-hole imaging. *The Leading Edge*, 18, 1425-1428.
133. **Summer, J.S., (1976),** Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Scientific Publishing Company.
134. **Szymanski J. and Tsourlos P. (1993)** The resistive tomography technique for archaeology: an introduction and review. *Archaeologia Polona* 31, 5-31.
135. **Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., and Keys, D. (1991).** *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
136. **Theocaris, P., Liritzis, I., Lagios, E., Sampson., A. (1996).** Geophysical prospection, archaeological excavation and dating in 2 Hellenic pyramids. *Survey in Geophysics*, 1996, 17,5,593-618.
137. **Tong, L. and Yang, C. (1990).** Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 55, 354-361.
138. **Tripp, A., Hohmann, G., and Swift, C. (1984).** Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 49, 1708-1717.
139. **Tsokas G.N., Papazachos C. B., Loucoyannakis M. Z. and Kavousova O. (1991).** Geophysical data from archaeological sites: Inversion filters based on the vertical sided finite prism model. *Archaeometry*, 33, 2, 215-230.
140. **Tsokas G.N. and Papazachos C.B. (1992).** Two-dimensional inversion filters in magnetic prospecting: Application to the exploration for buried antiquities. *Geophysics*, 57, 8, 1004-1013.
141. **Tsokas G.N., Giannopoulos A., Tsourlos P., Vargemezis G., Tealby J.M., Sarris A., Papazachos C.B., Savopoulou T. (1994).** A large scale geophysical survey in the archaeological site of Europos (northern Greece). *Journal of Applied Geophysics*, 32, 85-98.
142. **Tsokas G.N. and Tsourlos P. (1997).** Transformation of the resistivity anomalies from archaeological sites by inversion filtering. *Geophysics*, 62, 36-44.

143. **Tsokas G.N., Sarris A., Papa M., Bessios M., Papazachos C.B., Tsourlos P., Giannopoulos. A. (1997).** Large scale magnetic survey in Makrygialos (Pieria), Greece. *Archaeological Prospection*, 4, 123-137, 1997.
144. **Tsokas G.N., Vargemezis G., Soulios, G., Mertzanides, I. and Tsourlos P. (2001).** Geophysical prospecting for buried antiquities by means of the GPR. method in a parking construction area in lamia. *Paper submitted to the Bulletin of the Geological*
145. **Tsourlos P. (1995).** Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. *Unpublished PhD thesis*, University of York.
146. **Tsourlos P., and Szymanski J. (1995).** Self-correcting approaches to the inversion of resistive tomography field survey data. Poster presented at the Archaeological Prospection Conference, University of Bradford, U.K., 12-13 September, 1995. *Society of Greece*.
147. **Tsourlos P, Ogilvy R. (1999).** An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarization data: preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society* 2(2): 30–45.
148. **Tsourlos P, Szymanski J, Tsokas G. (1999).** The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, 64: 1357–1363.
149. **Vafidis, A., Sarris, A., Oikonomou, N., Kaipaxis, A., (1996).** Geophysical survey in the archaeological site of Itanos, Lasithi, Greece. *Expanded Abstracts of the First Congress of the Balkan Geophysical Society*, Athens, 23-27, 1996, 54-55.
150. **Vafidis A, Sarris A, Sourlas G, Ganiatsos Y. (1999).** Two and three dimensional electrical tomography investigations in the archaeological site of Itanos, Crete, Greece. *Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition*, Istanbul, 5–9 July.
151. **Vafidis, A., Economou, N., and Sarris, A. (2003).** Geophysical Data Presentation Using GIS. *CAA2002 International Conference: Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology*. The Digital Heritage of Archaeology, Herakleion, Crete, April, 2002, Archive of Monuments and Publications, Hellenic Ministry of Culture, Proceedings of the 30th Conference, 195-200.

152. **Vafidis, A., Economou, N., Ganiatsos, Y., Manakou, M., Poulioudis, G., Sourlas, G., Vrontaki, E., Sarris, A, Guy, M, and Kalpaxis Th. (2005).** Integrated geophysical studies at ancient Itanos (Greece). *Journal of Archaeological Sciences*, 32, 1023-1036.
153. **Van G.P., Park S.K. and Hamilton P. (1991).** Monitoring leaks from storage ponds using resistivity methods. *Geophysics* 56, 1267–1270.
154. **Walker AR. (2000).** Multiplexed resistivity survey at the roman town of Wroxeter. *Archaeological Prospection* 7: 119–132.
155. **Weymouth, J. (1986).** Geophysical methods in archaeological site surveying. *Advances in Archaeological Method and Theory*, 9, 311-395.
156. **White, R.M.S., Collins, S., Denne, R., Hee, R. and Brown, P. (2001).** A new survey design for 3D IP modelling at Copper hill. *Exploration Geophysics*, 32, 152-155.
157. **Wolke, R. and Schwetlick, H., (1988),** Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons: *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, 9, 907-921.
158. **Xu, B. (1993).** Development of electrical resistivity imaging methods for geological and archaeological prospecting. *Ph.D. Thesis*, University of Durham.
159. **Xu, B., and Noel, M. (1993).** On the completeness of data sets with multielectrode systems. *Geophysical Prospecting*, 41, 791-801.
160. **Zhou B. and Greenhalgh S.A. (2000).** Crosshole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical Prospecting* 48, 887–912.
161. **Zhou B. and Dahlin T. (2003).** Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics* 1, 105– 117.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Αντωνοπούλου Κ. , Μποτωνάκης Δ., 2006.** Γεωφυσική διασκόπηση με τις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφία και του γεωραντάρ σε περιοχή ρυπασμένη από χλωριωμένους υδρογονάνθρακες, Διπλωματική εργασία, *Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*

2. **Αράμπελος Δ. (1991).** *Στοιχεία γεωφυσικών διασκοπήσεων*. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη.
3. **Βαφείδης, Α. και Αμολοχίτης, Γ., (1992),** *Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές και σεισμικές διασκοπήσεις στον οικισμό Άνω Μέρους, Ν. Ρεθύμνης*, Έκθεση, Νομαρχιακό Ταμείο Ρεθύμνης, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ. 9.
4. **Βαφείδης Α. (1994).** “Αξιολόγηση σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους”. *Σημειώσεις μαθήματος*. Χανιά.
5. **Βαφείδης Α. (2001).** *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II. Σημειώσεις μαθήματος*. Χανιά.
6. **Βαφείδης Α. (2007).** Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο των Απτέρων Χανίων. *Έκθεση Γεωφυσικής Έρευνας*. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
7. **Γεωργιακάκης Α. (2007).** Δείτε οπωσδήποτε στα Βόρεια του Νομού. Πηγή: «Βόρεια Κρήτη». *Τα Νέα*. Τελευταία ενημέρωση: Μάιος 2007. <http://clubs.pathfinder.gr/scriptwriters/804735>.
8. **Γκανιάτσος Ι. (1995).** “Γεωηλεκτρική τομογραφία με τη διάταξη Wenner”, *Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης*.
9. **Δουφεξοπούλου Μ (2007).** Παράλληλο κείμενο. Τελευταία ενημέρωση: Οκτώβριος 2007.
<http://www.survey.ntua.gr/main/labs/hgeod/varitimetria/geophysical%20survey.html>
10. **Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκοπικής και Αρχαιοπεριβάλλοντος.** Γεωφυσικές διασκοπήσεις. Τελευταία ενημέρωση: 1 Ιουνίου 2007, <http://www.ims.forth.gr/rg-geophysics-gr.html>.
11. **Hamdan H. (2003).** Ψευδοτριδιάστατη απεικόνιση των θαμμένων αρχαιοτήτων στην περιοχή Ιτάνου του νομού Λασιθίου. *Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Ερευνητική Μεθοδολογία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά*.
12. **Κρητικάκης Γ. (2001).** “Συμβολή των σεισμικών μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης σε γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές μελέτες”. *Εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού μαθήματος ‘Ειδικά Κεφάλαια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας’*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
13. **Ντρενόγιαννης Γ. (2001).** Από την Ενετοκρατία έως το Μύθο. *ΤΑ ΝΕΑ*, 11-05-2001, <http://clubs.pathfinder.gr/scriptwriters/232689>.

14. **Παπαδόπουλος Ν. (2007).** Ανάπτυξη αλγορίθμων για την τρισδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων που προέρχονται από αρχαιολογικούς χώρους. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Σχολή Θετικών επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωφυσικής.
15. **Παπαζάχος, Β. (1986).** “Εισαγωγή Στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική”, Εκδόσεις “Ζήτη”, Θεσσαλονίκη.
16. **Πουλιούδης Γ. (1999).** “Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
17. **Σούρλας Γ. (2000).** Συμβολή της γεωφυσικής διασκόπησης στην αναζήτηση θαμμένων αρχαιοτήτων στην Ίτανο, Λασιθίου. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
18. **Τσόκας Γ. (2007).** Εκτίμηση της δυνατότητας των γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης στην εξερεύνηση του εσωτερικού μεσαιωνικών μνημείων.
19. **Τσόκας Γ.Ν. (2007).** Μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας. *Τετράδια Αρχαιομετρίας. Τμήμα Γεωλογίας.*
20. **Χορευτάκη Γεωργία (2003).** “Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και του υπεδάφειου ραντάρ στο λατομείο Ζωφόρων του Ν.Ηρακλείου”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

1. <http://www.ims.forth.gr>
2. <http://www.geoelectrical.com>
3. <http://www.geovision.com/methods.htm>
4. <http://www.just-crete.co.uk>
5. <http://www.crete.tournet.gr>
6. <http://archaeometrygr.blogspot.com>
7. <http://lemnos.geo.auth.gr>
8. <http://www.interscience.wiley.com>

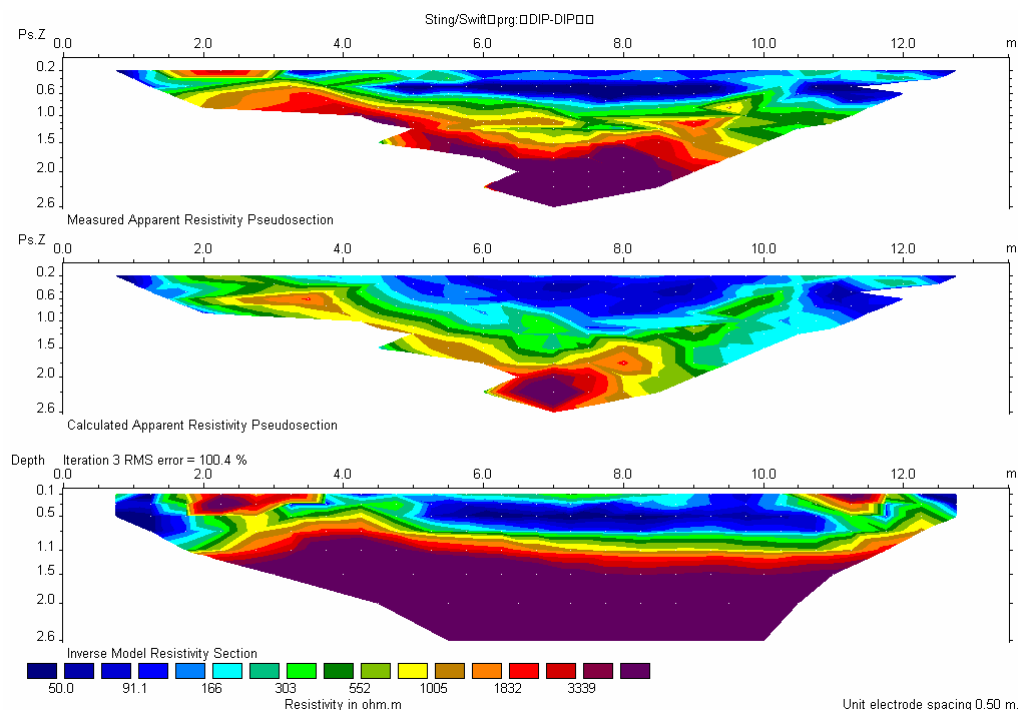
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ

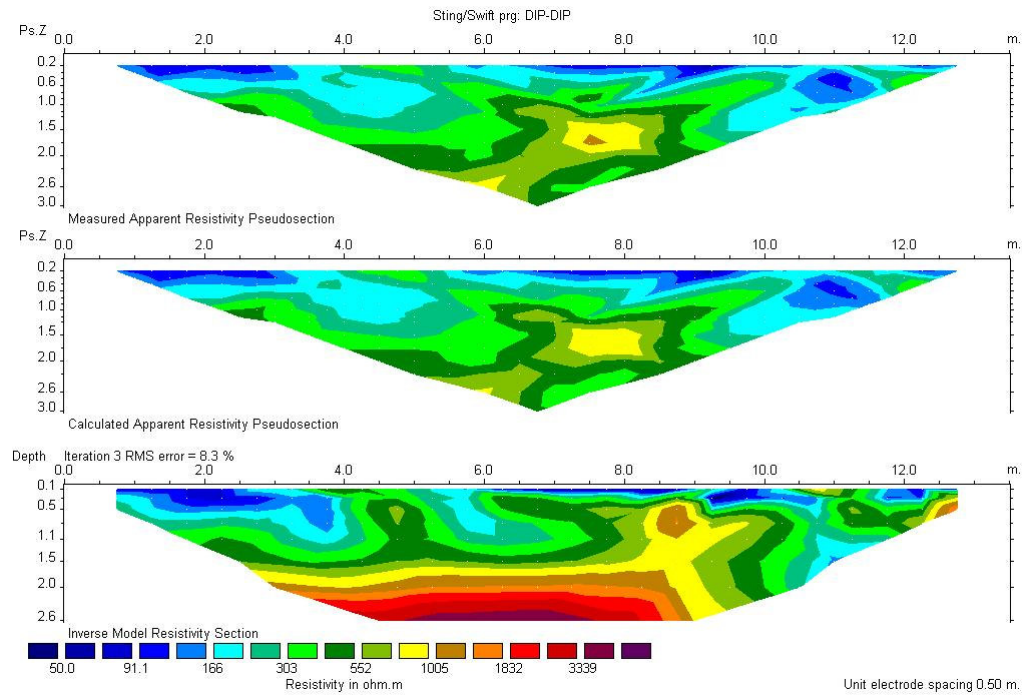
Α.1. Εισαγωγή

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γεωηλεκτρικές τομές που προέκυψαν από τα προγράμματα RES2DINV και RES3DINV για τους δύο καννάβους που δεν παρουσιάζονται στο κυρίως μέρος της εργασίας. Εκτός από την κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε, εξετάστηκαν και άλλες δύο. Στην πρώτη κλίμακα, η μικρότερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίστηκε στα 5 ohm.m και το βήμα αλλαγής χρώματος ίσο με 1,5, ενώ στη δεύτερη, η μικρότερη τιμή ορίστηκε στα 10 ohm.m και το βήμα αλλαγής χρώματος ίσο με 1,6.

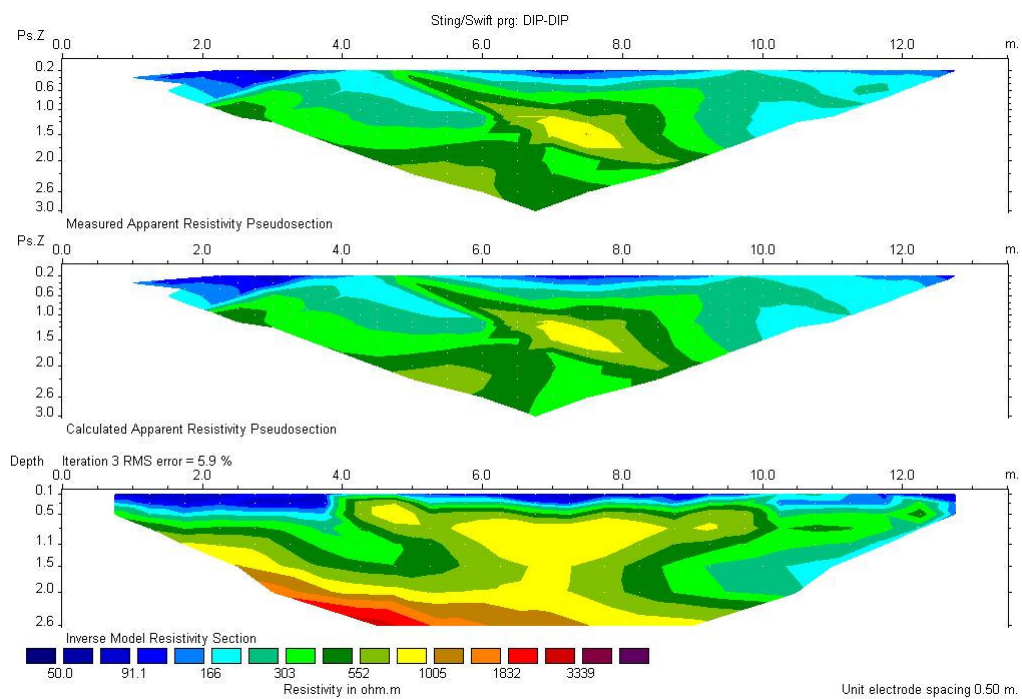
Α.2. Γεωηλεκτρικές τομές για το πρόγραμμα RES2DINV του καννάβου B1



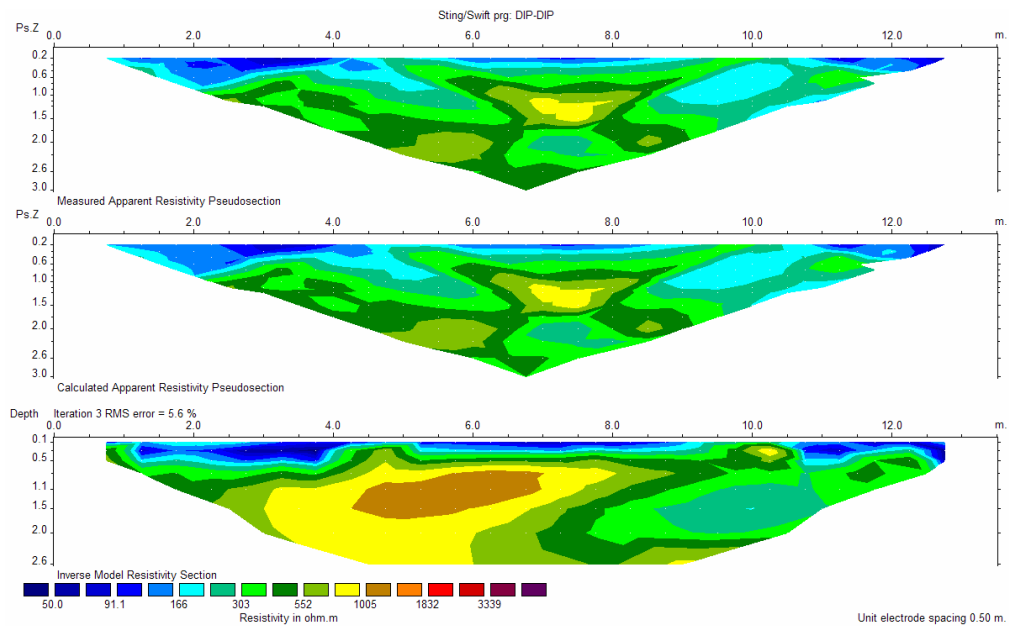
Σχήμα Α.1: Γεωηλεκτρική τομή για την πρώτη γραμμή της περιοχής B1. Παρατηρείται ότι η γραμμή αυτή έχει μεγάλο σφάλμα.



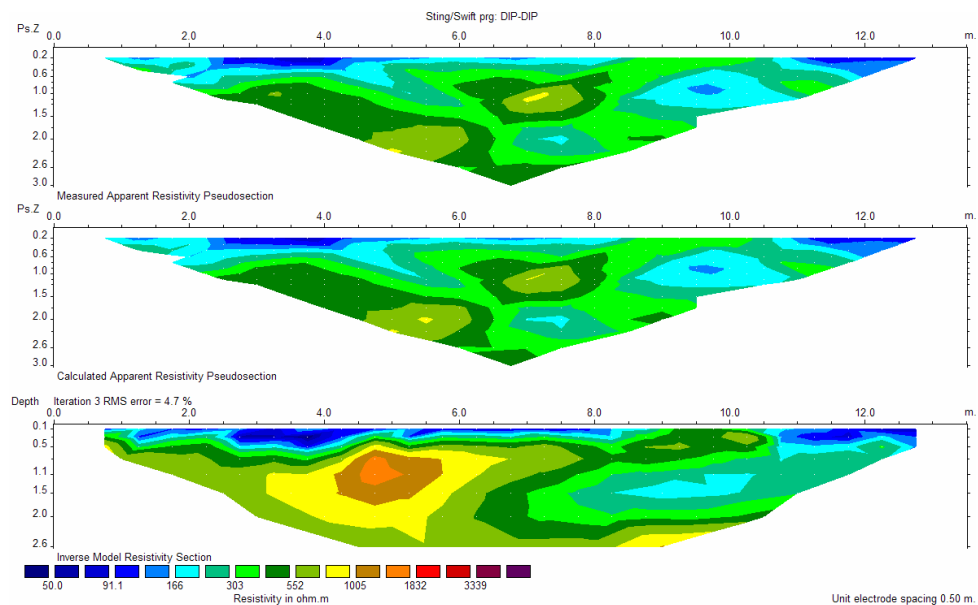
Σχήμα Α.2: Γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη γραμμή της περιοχής Β1.



Σχήμα Α.3: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής Β1.

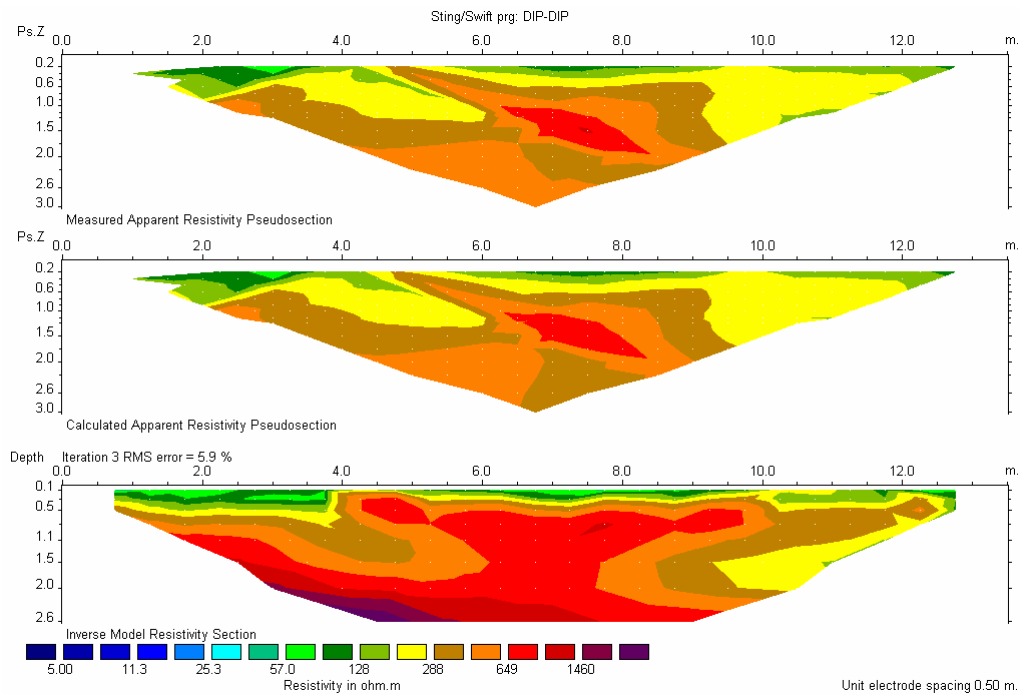


Σχήμα Α.4: Γεωηλεκτρική τομή για την τέταρτη γραμμή της περιοχής Β1.

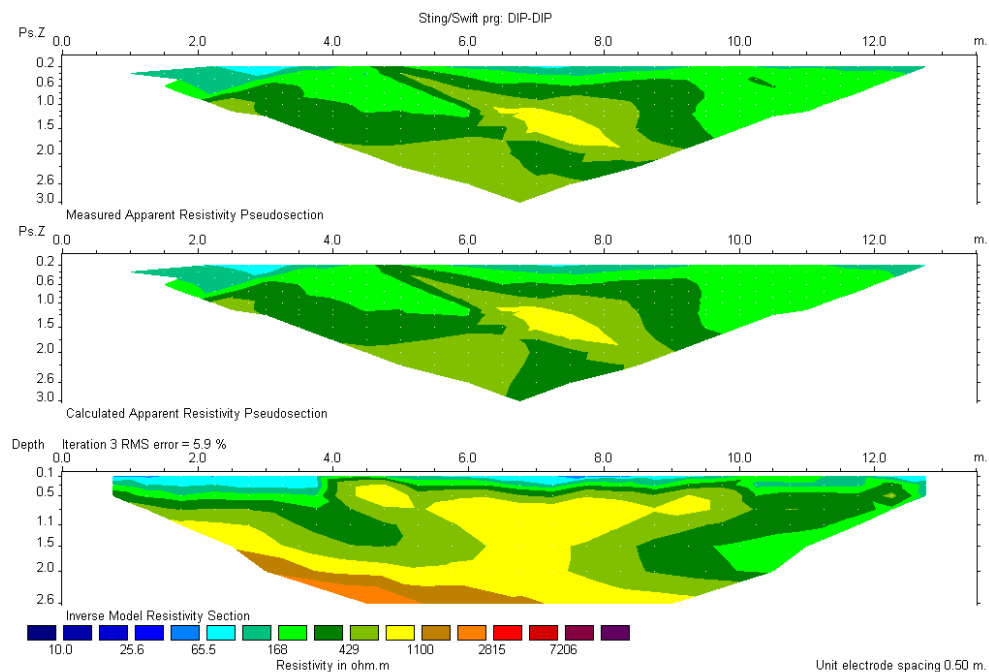


Σχήμα Α.5: Γεωηλεκτρική τομή για την πέμπτη γραμμή της περιοχής Β1

Παρακάτω παραθέεται η τρίτη γραμμή σε διαφορετικές κλίμακες.

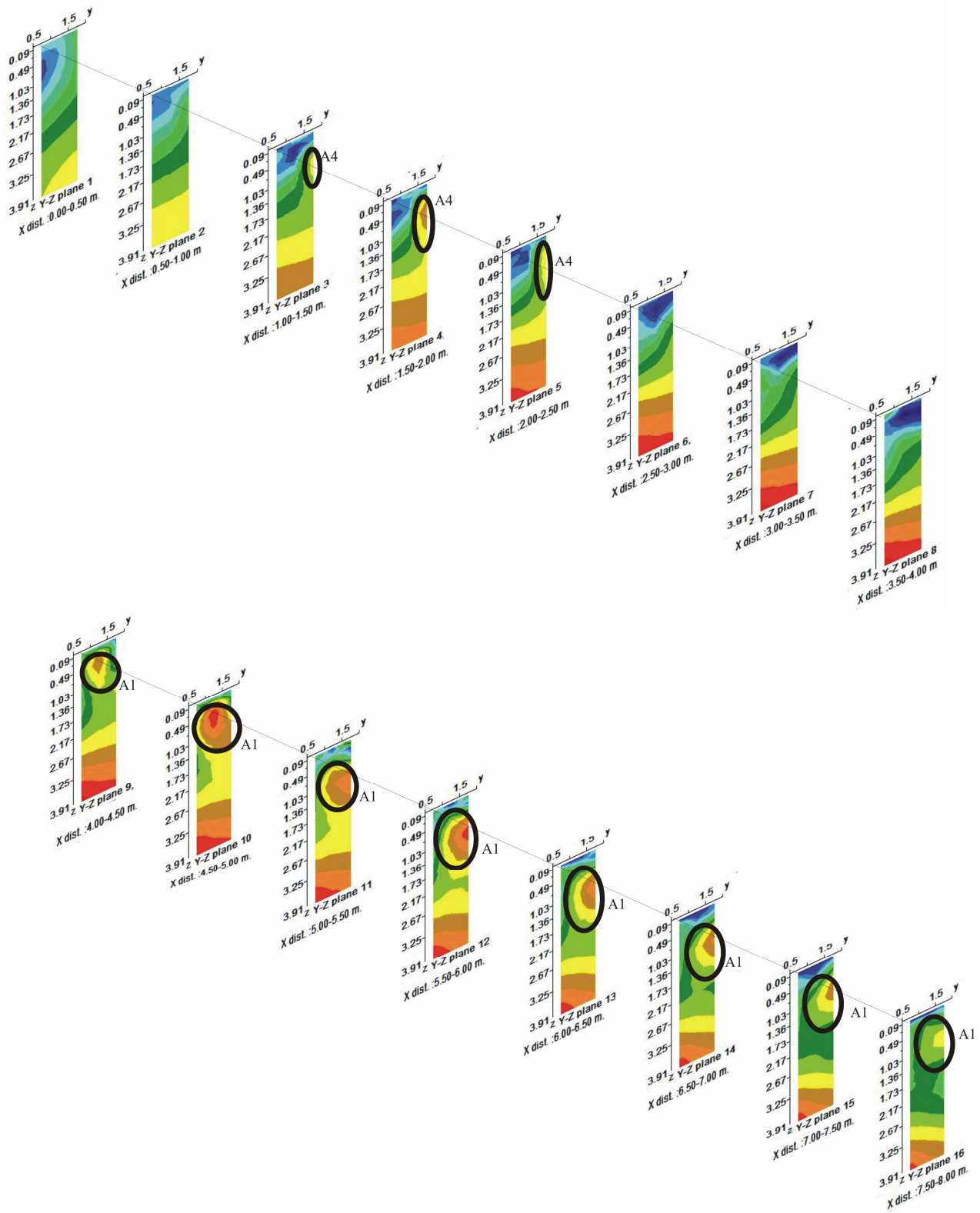


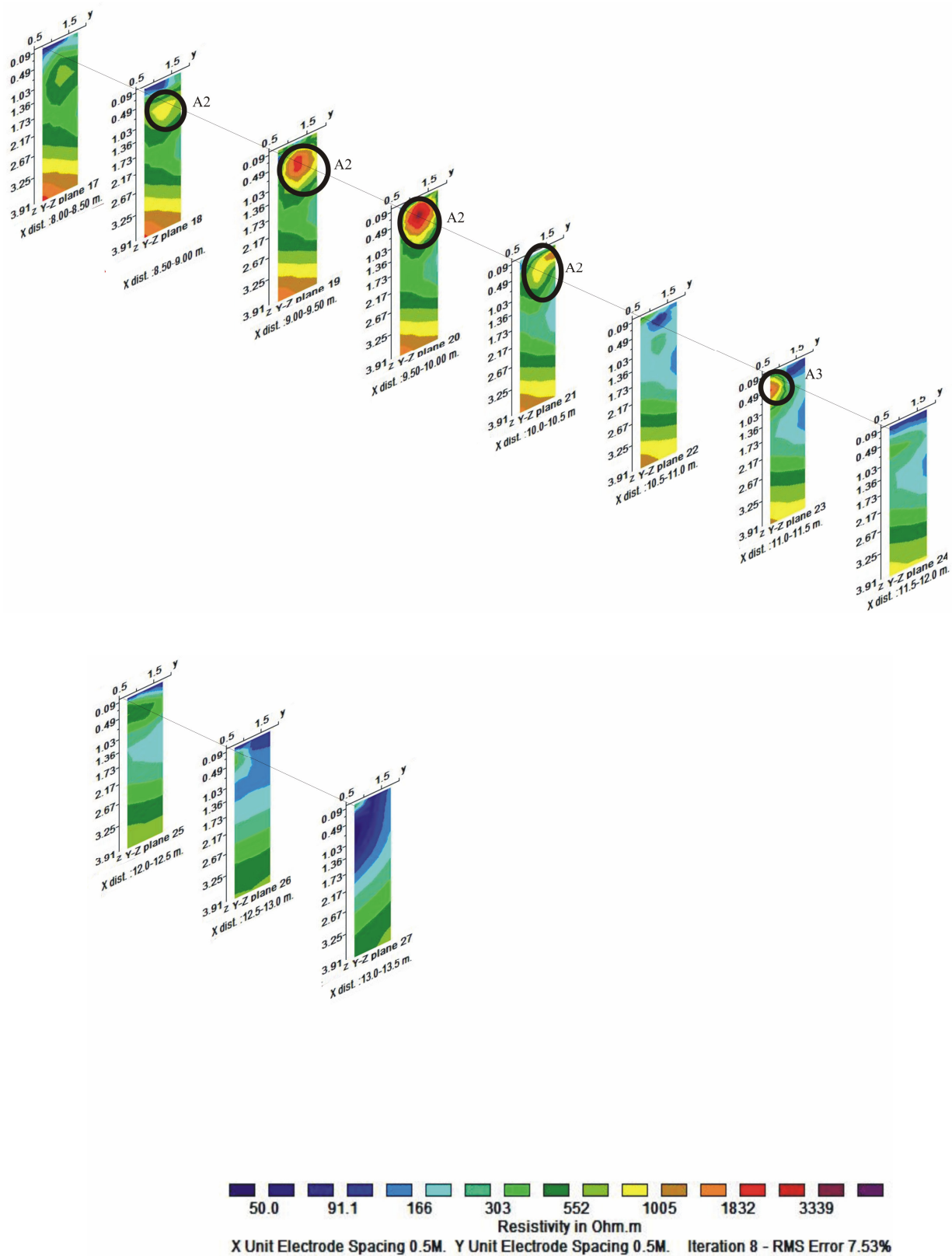
Σχήμα Α.6: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής B1 με κλίμακα 1, όπου παρατηρείται ότι δεν έχει υπάρξει ευκρινής ανάλυση.



Σχήμα Α.7: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής B1 με κλίμακα 2, όπου παρατηρείται ότι κι αυτή η κλίμακα δεν παρέχει αξιόπιστα συμπεράσματα.

Α.2.3. Γεωηλεκτρικές τομές για το πρόγραμμα RES3DINV του καννάβου Β1.

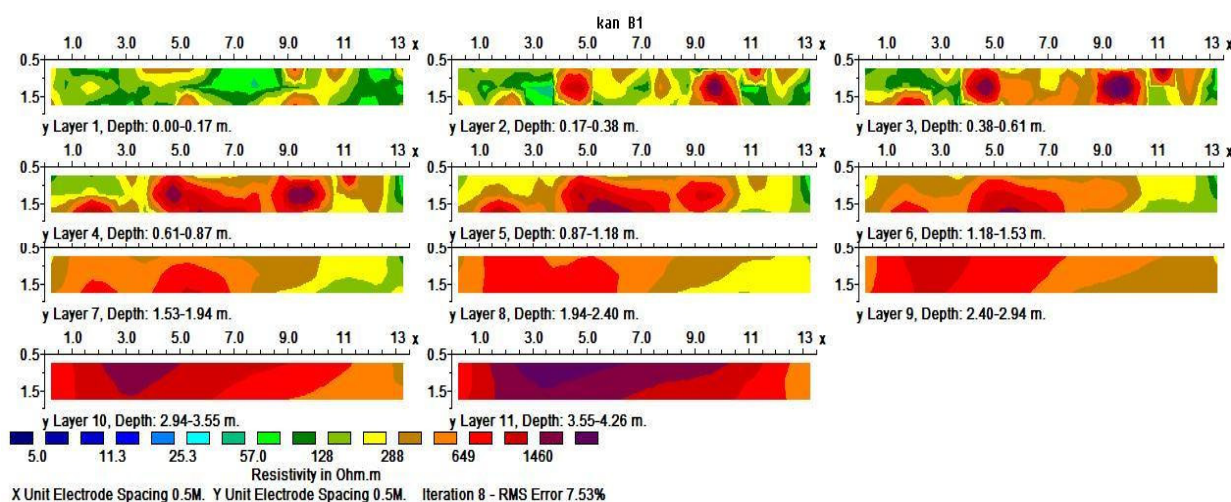




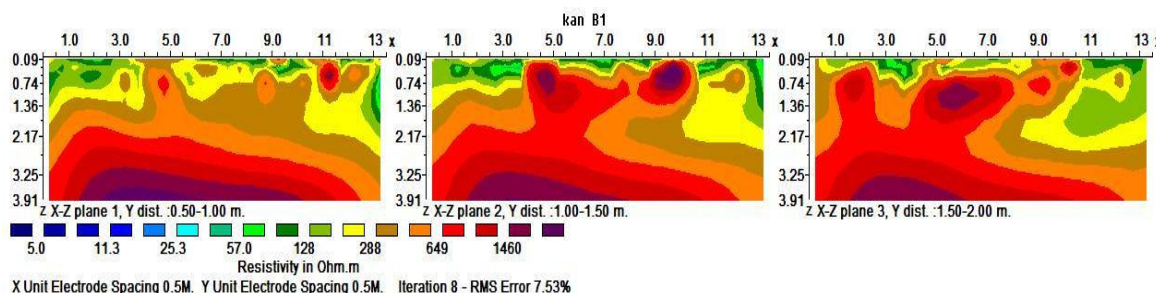
Σχήμα Α.8: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση Ψ-Z του καννάβου Β1 με κλίμακα 3.

Ερμηνεύοντας αυτές τις τομές, εντοπίζονται οι ίδιες (4) ηλεκτρικές ανωμαλίες που συναντήσαμε παραπάνω.

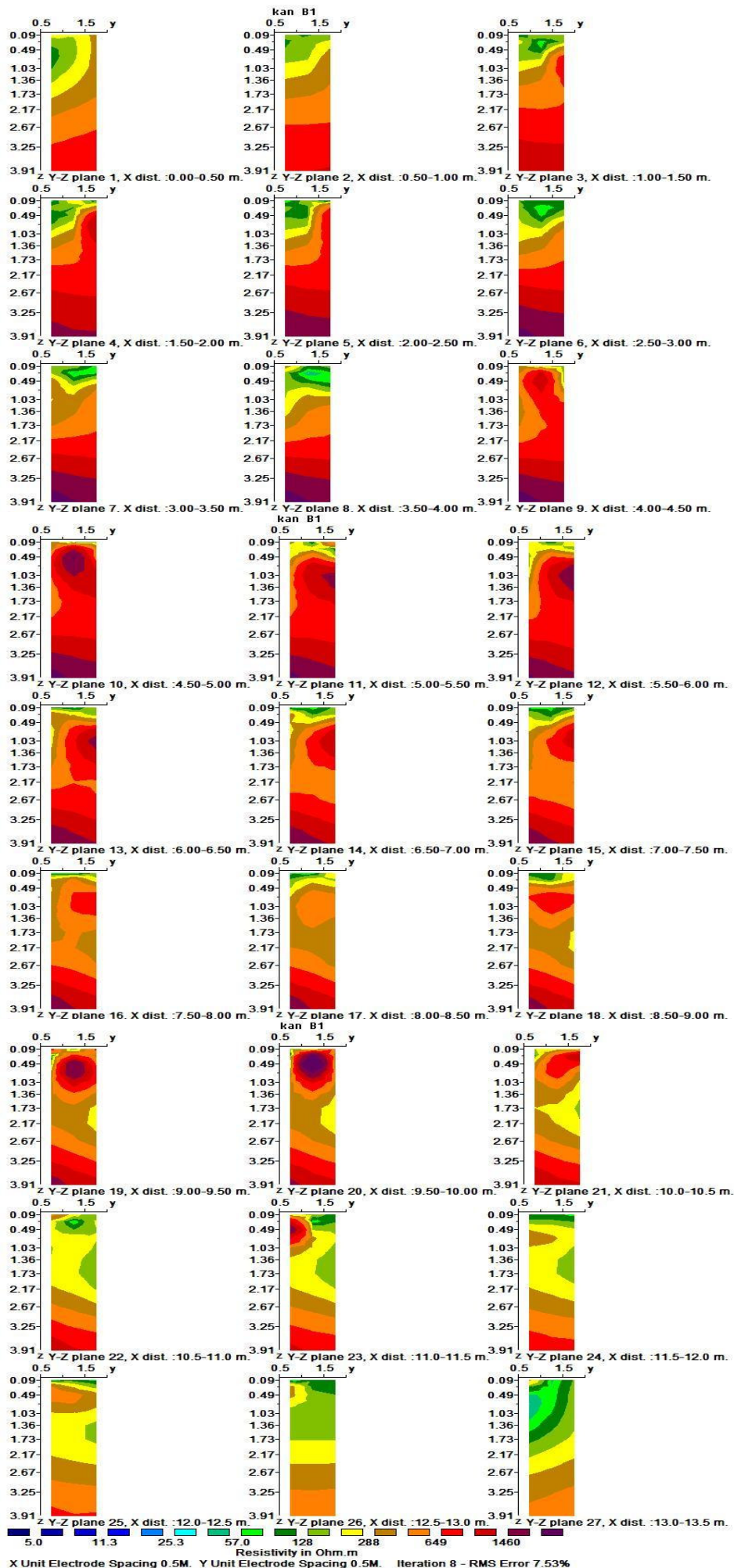
Η πρώτη ηλεκτρική ανωμαλία που απαντήθηκε και η οποία αντιστοιχεί στην ανωμαλία (Α4) βρίσκεται κατά την οριζόντια διάσταση στα 1m-3m και σε βάθος περίπου 10cm-80cm. Η δεύτερη ανωμαλία η οποία αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ανωμαλία (Α1) οριζόντια καλύπτει μια ευρεία περιοχή από 4m - 8m, σε βάθος περίπου 50cm – 1m. Η τρίτη ανωμαλία απαντάται σε βάθος 10cm έως και το βάθος 70cm και στην οριζόντια διάσταση της εκτείνεται από 8,5m – 10,5m. Πρόκειται επομένως για την ανωμαλία (Α2). Τέλος, η τέταρτη, η οποία αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ανωμαλία (Α3), βρίσκεται σε βάθος περίπου 10cm - 50cm, ενώ οριζόντια καλύπτει μισό μέτρο από 11m – 11,5m.



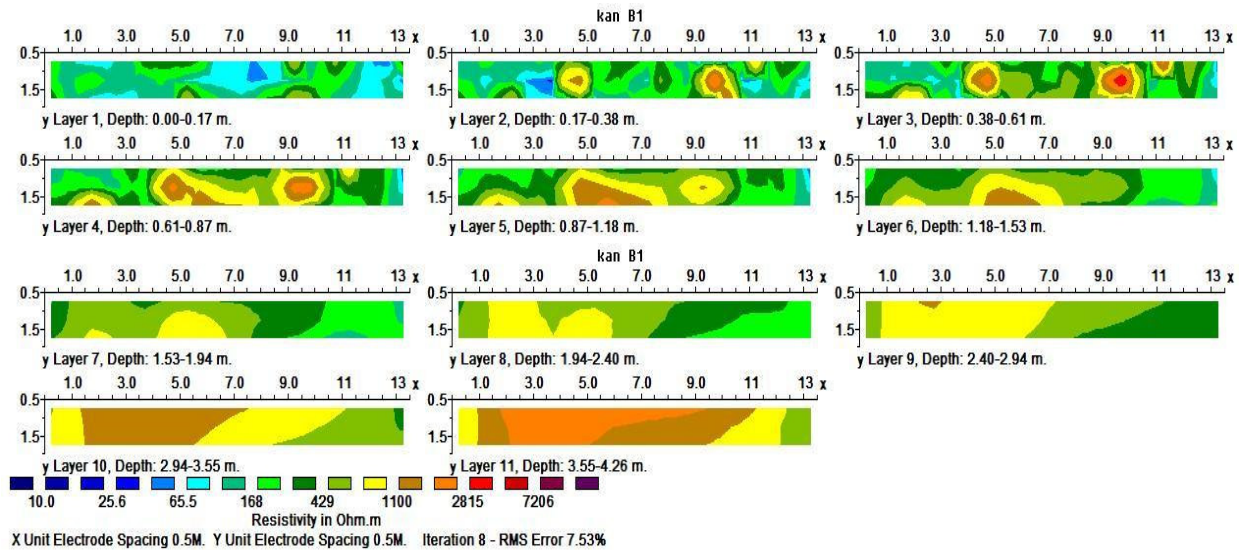
Σχήμα Α.9: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο 1 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση X-Y.



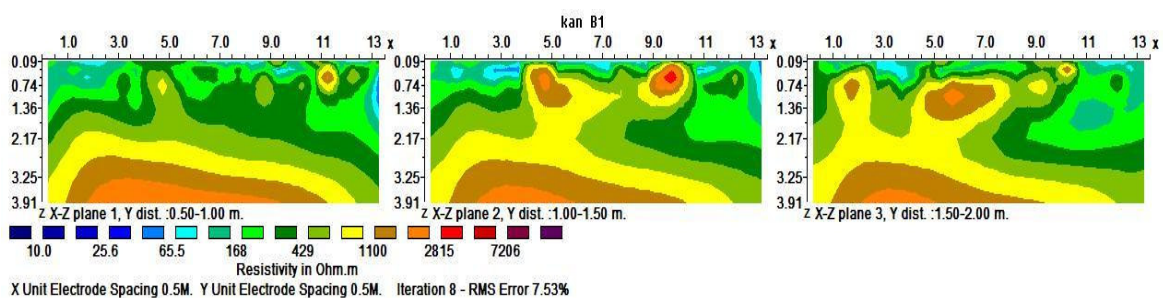
Σχήμα Α.10: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο Β1 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση



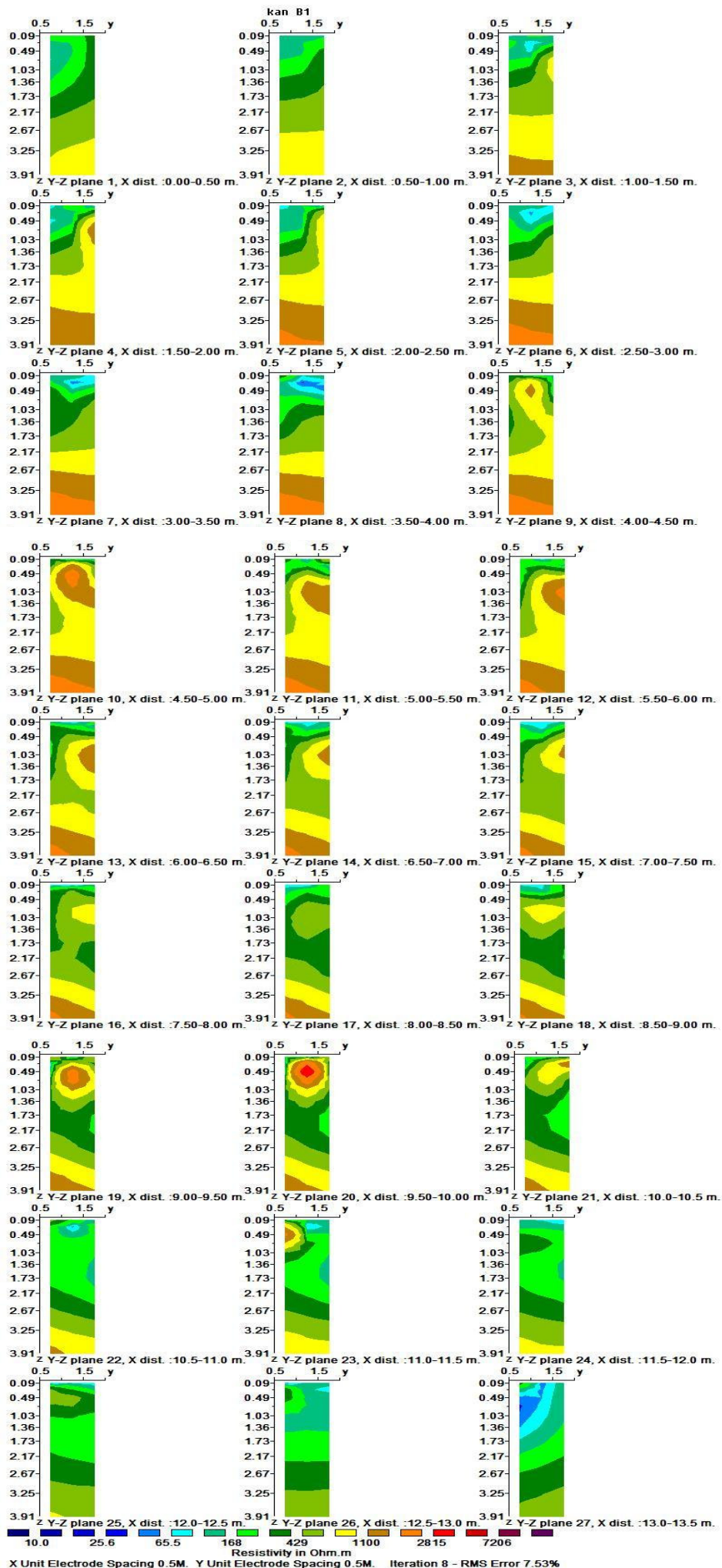
Σχήμα Α.11: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο Β1 με κλίμακα 1
σε διεύθυνση Y-Z.



Σχήμα Α.12: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο Β1 με κλίμακα 2
σε διεύθυνση X-Y.

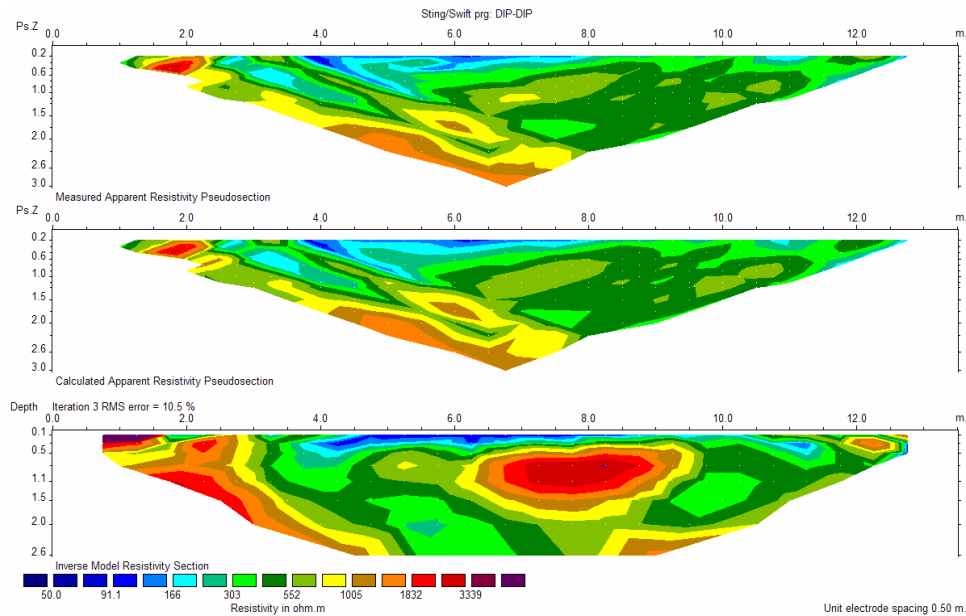


Σχήμα Α.13: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο Β1 με κλίμακα 2
σε διεύθυνση X-Z.

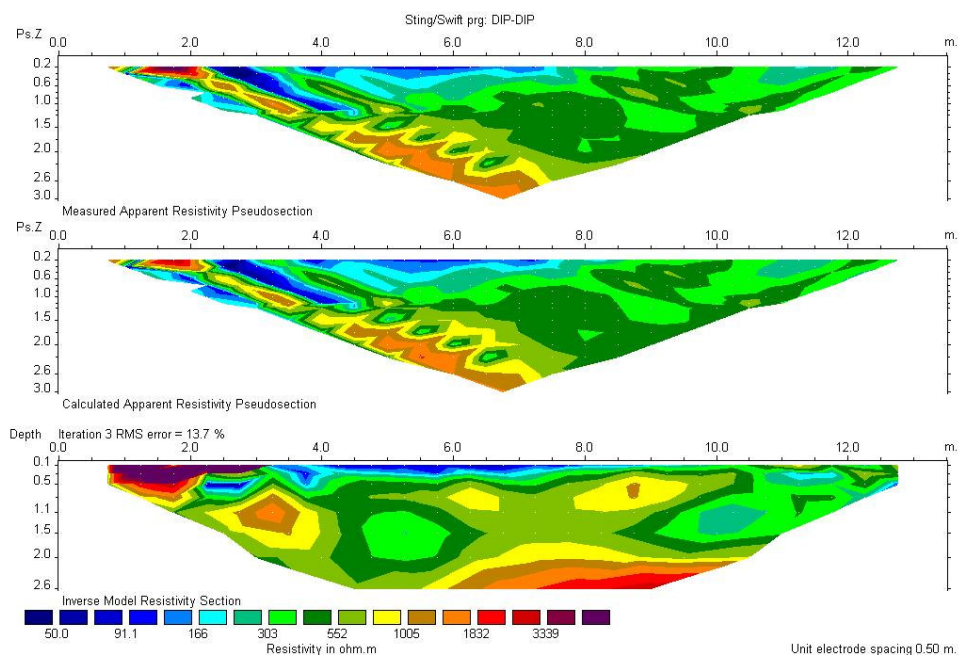


Σχήμα Α.14: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο Β1 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση Υ-Ζ.

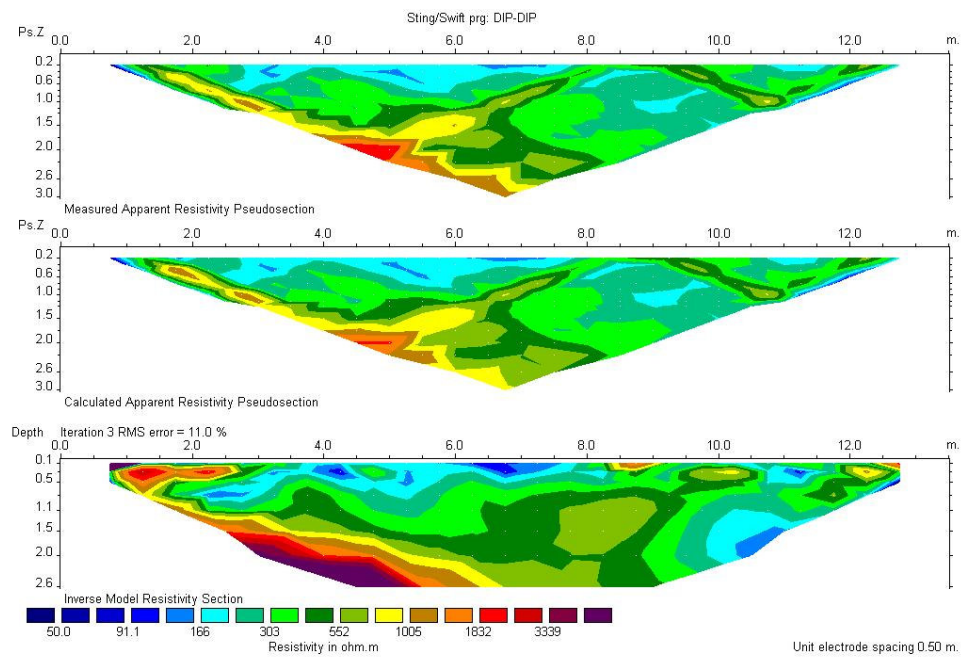
Α.2.4. Γεωηλεκτρικές τομές για το πρόγραμμα RES2DINV του καννάβου Β2.



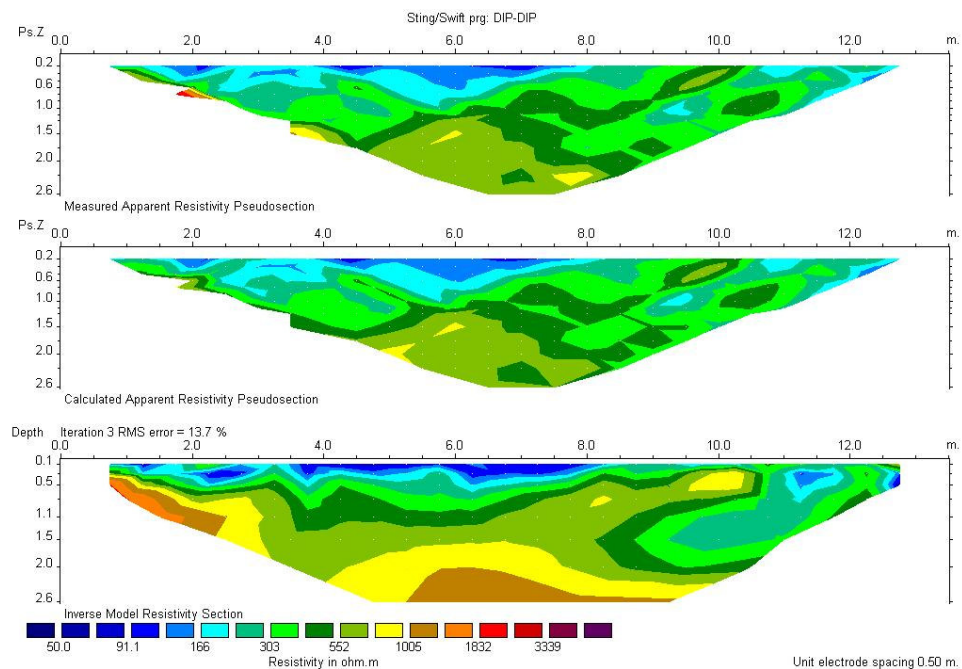
Σχήμα Α.15: Γεωηλεκτρική τομή για την πρώτη γραμμή της περιοχής Β2.



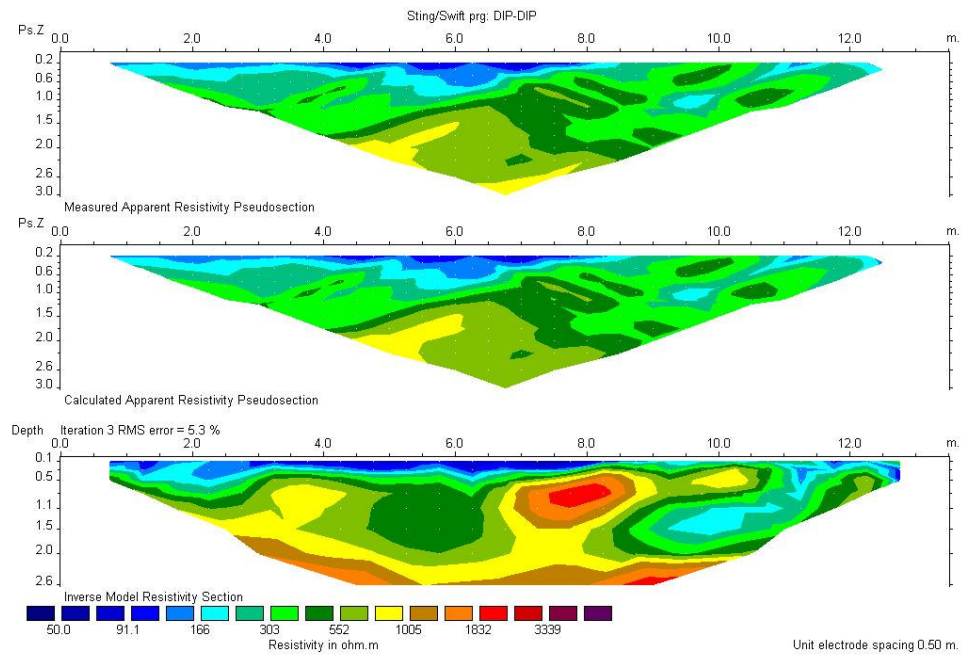
Σχήμα Α.16: Γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη γραμμή της περιοχής Β2.



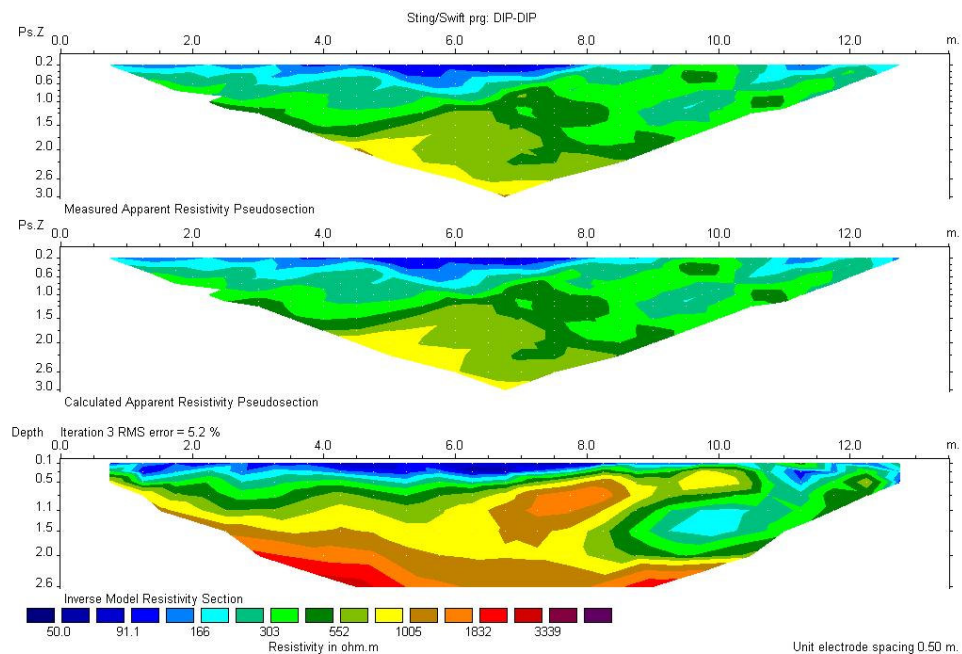
Σχήμα Α.17: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής Β2.



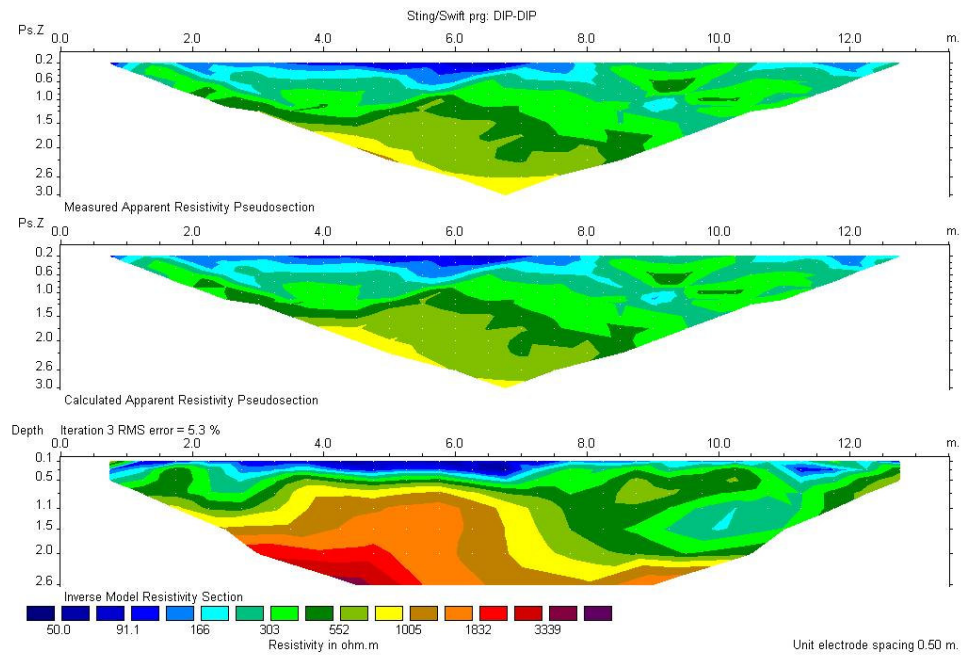
Σχήμα Α.18: Γεωηλεκτρική τομή για την τέταρτη γραμμή της περιοχής Β2.



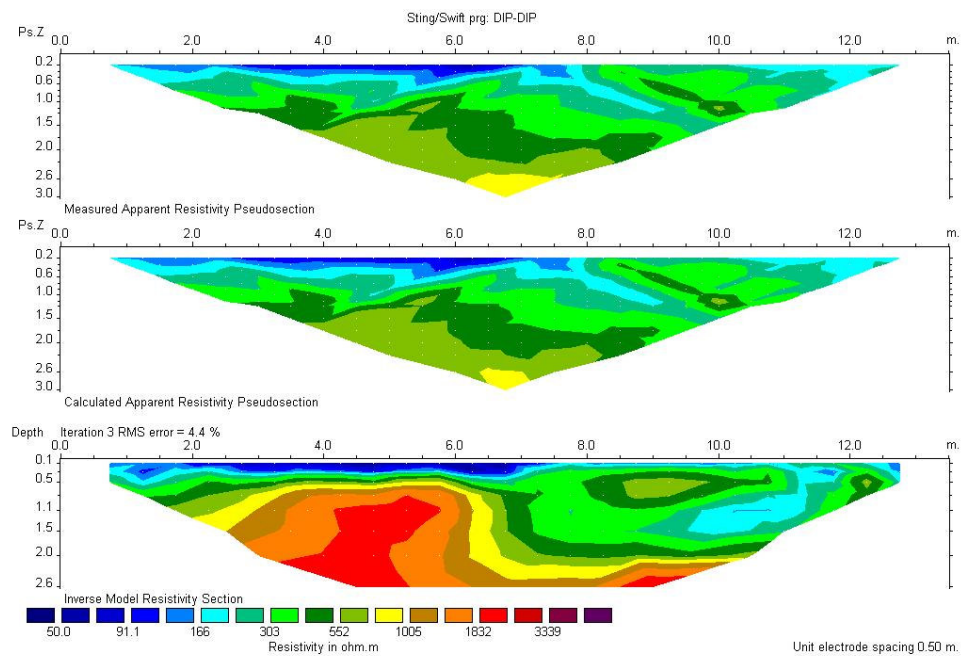
Σχήμα Α.19: Γεωηλεκτρική τομή για την πέμπτη γραμμή της περιοχής Β2



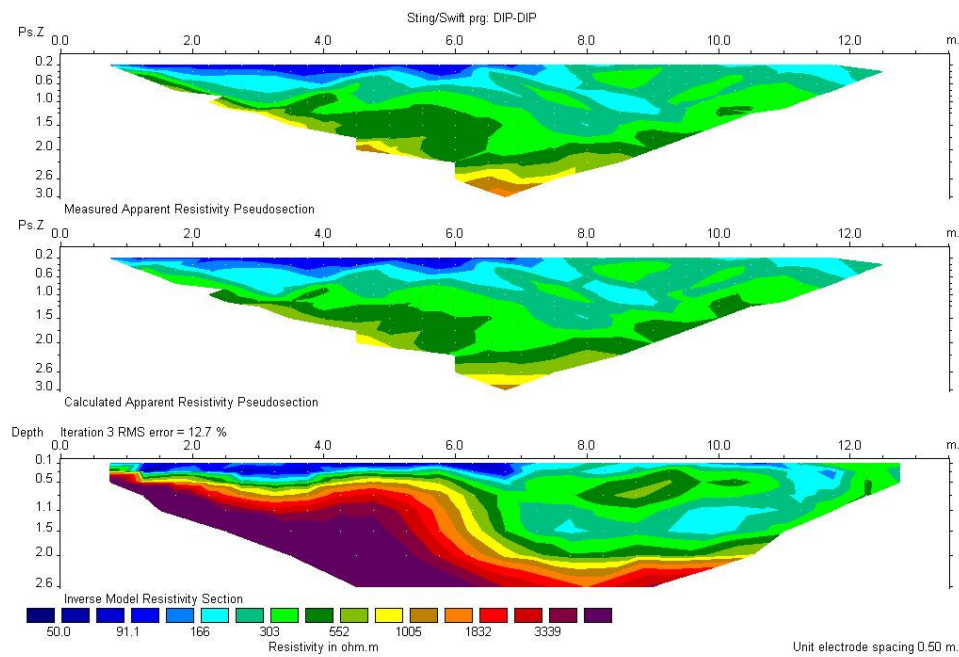
Σχήμα Α.20: Γεωηλεκτρική τομή για την έκτη γραμμή της περιοχής Β2.



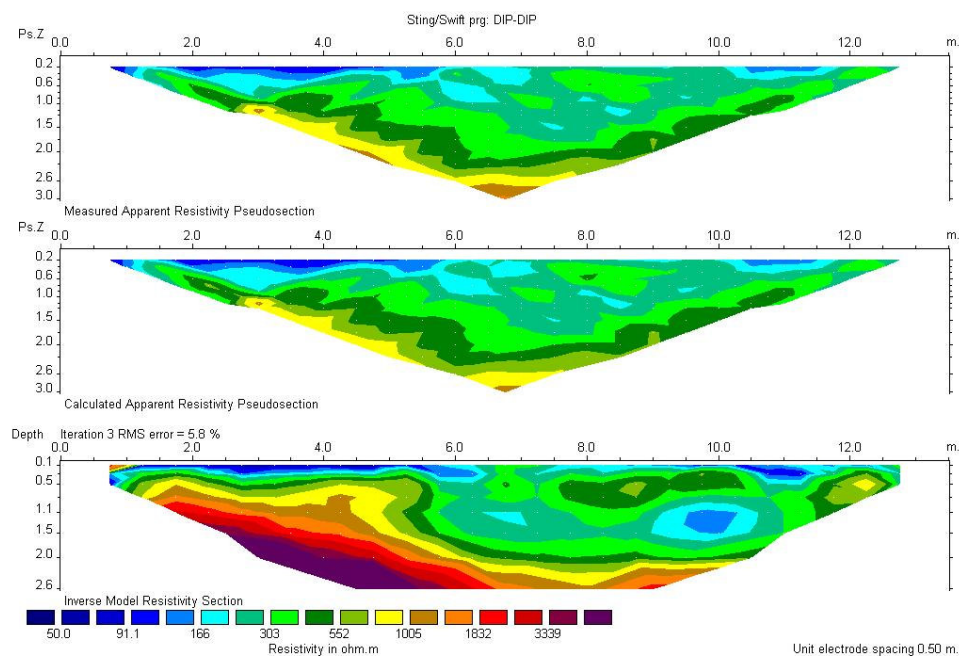
Σχήμα A.21: Γεωηλεκτρική τομή για την έβδομη γραμμή της περιοχής B2.



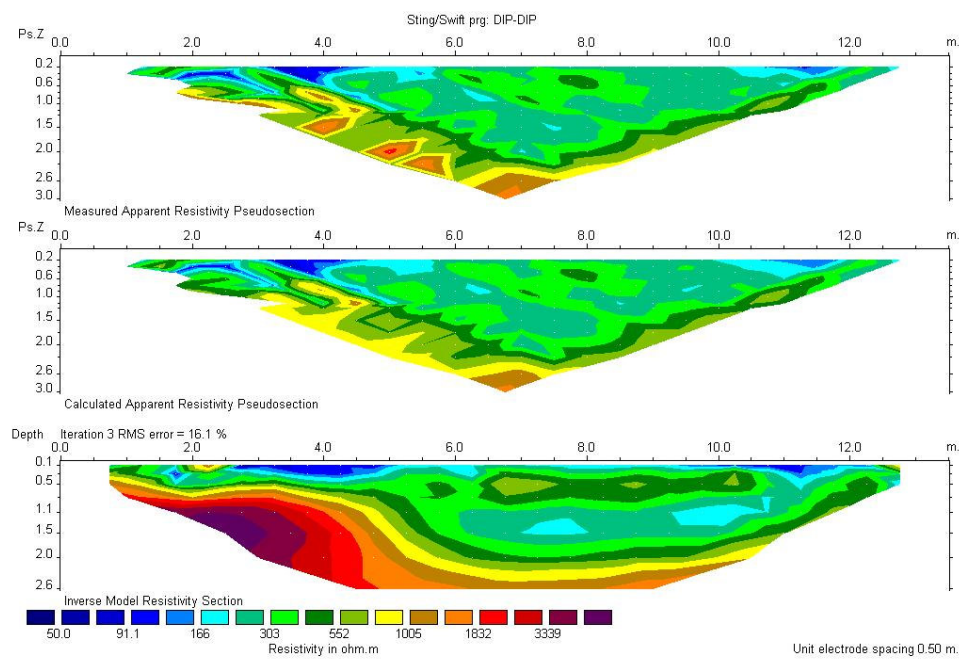
Σχήμα A.22: Γεωηλεκτρική τομή για την όγδοη γραμμή της περιοχής B2.



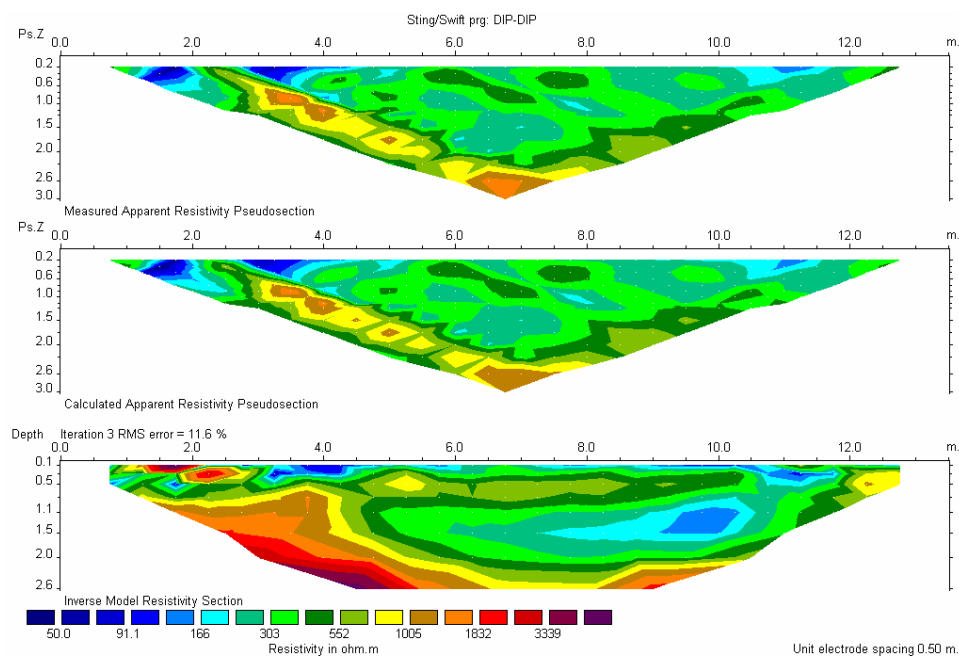
Σχήμα A.23: Γεωηλεκτρική τομή για την ένατη γραμμή της περιοχής B2.



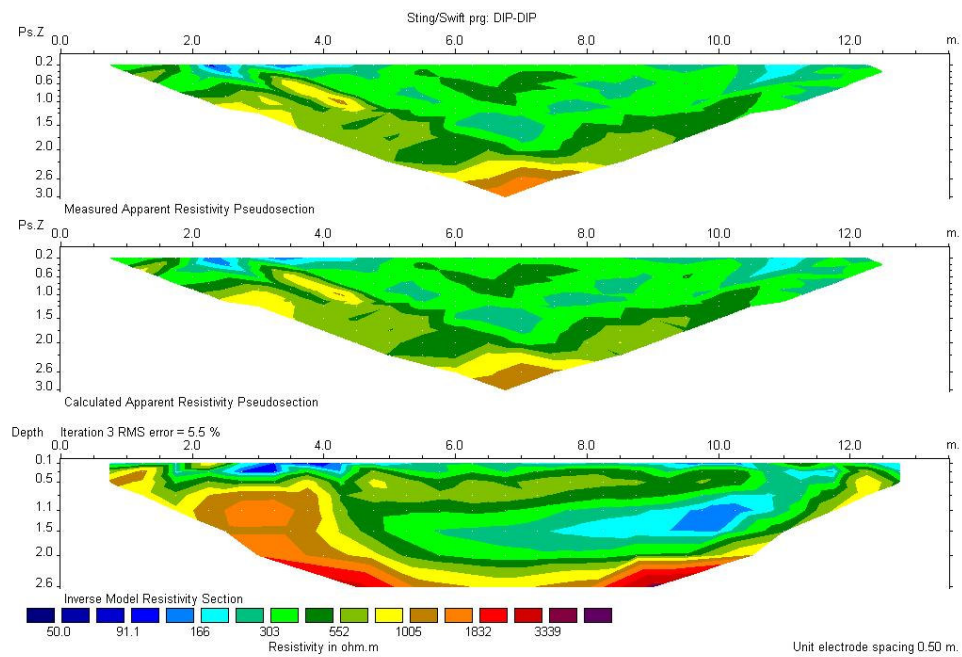
Σχήμα A.24: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη γραμμή της περιοχής B2.



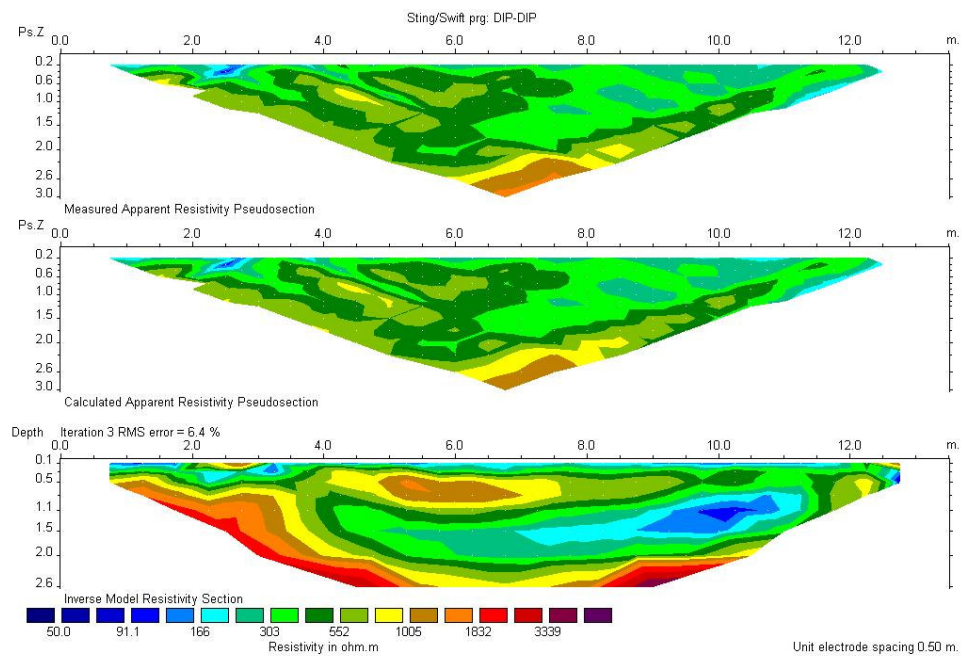
Σχήμα A.25: Γεωηλεκτρική τομή για την ενδέκατη γραμμή της περιοχής B2.



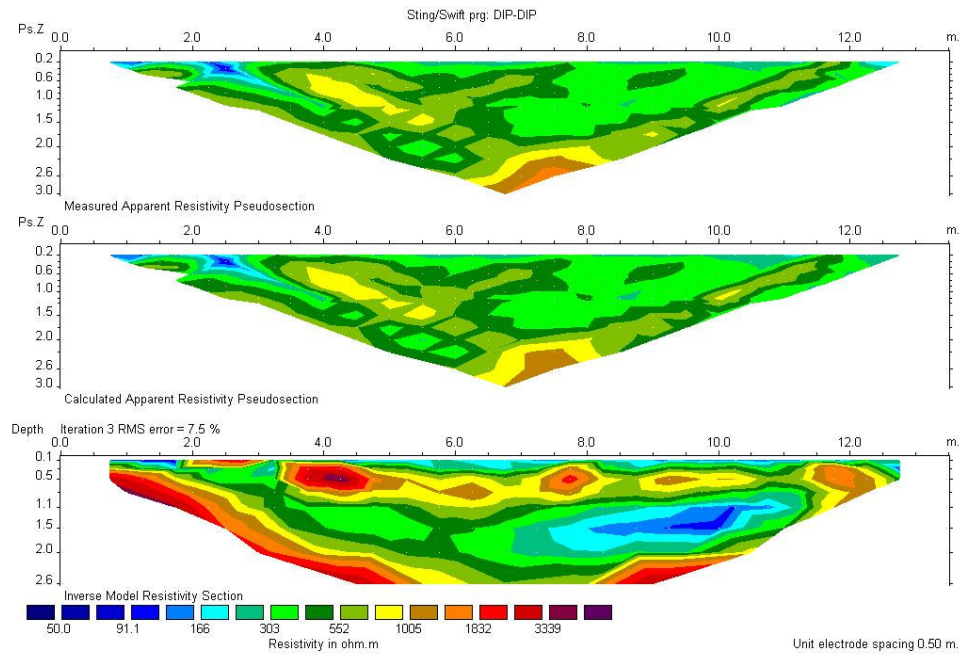
Σχήμα A.26: Γεωηλεκτρική τομή για τη δωδέκατη γραμμή της περιοχής B2.



Σχήμα Α.27: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη-τρίτη γραμμή της περιοχής Β2.

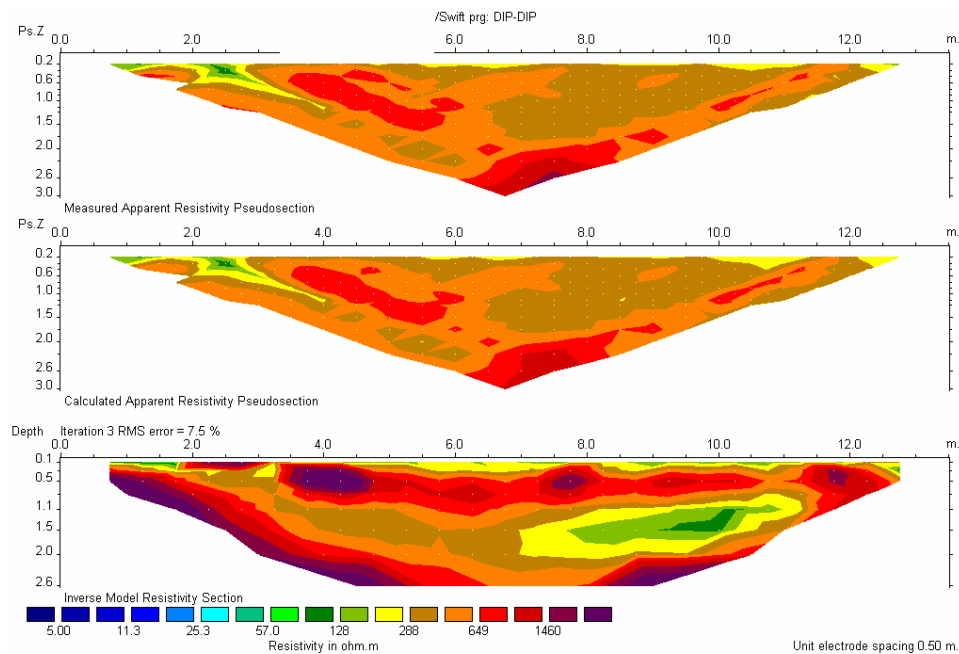


Σχήμα Α.28: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη-τέταρτη γραμμή της περιοχής Β2.

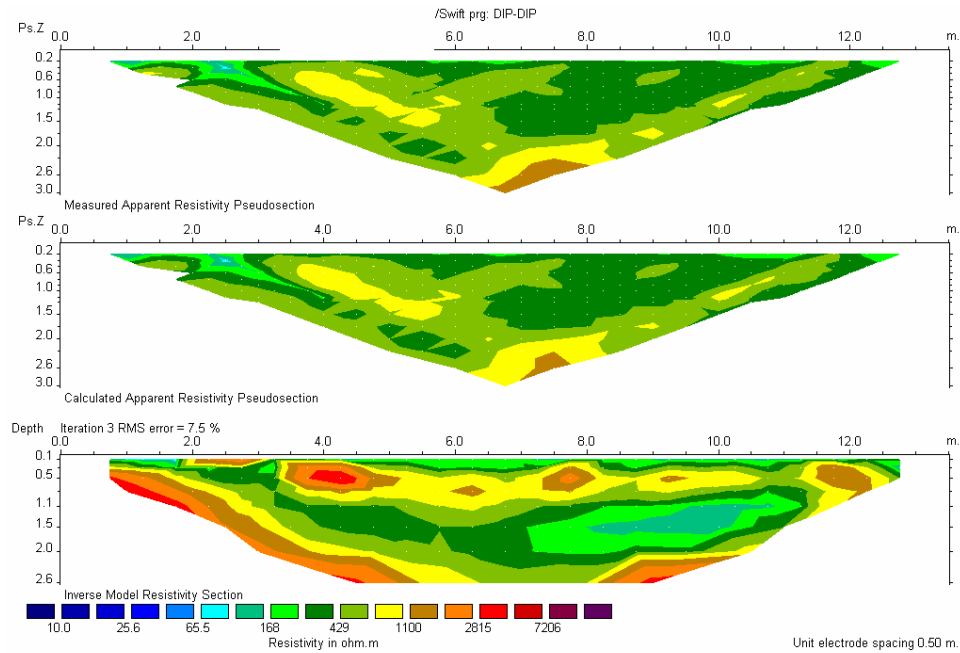


Σχήμα Α.29: Γεωηλεκτρική τομή για τη δέκατη-πέμπτη γραμμή της περιοχής Β2.

Παρακάτω παραθέτεται η τελευταία γραμμή σε διαφορετικές κλίμακες.

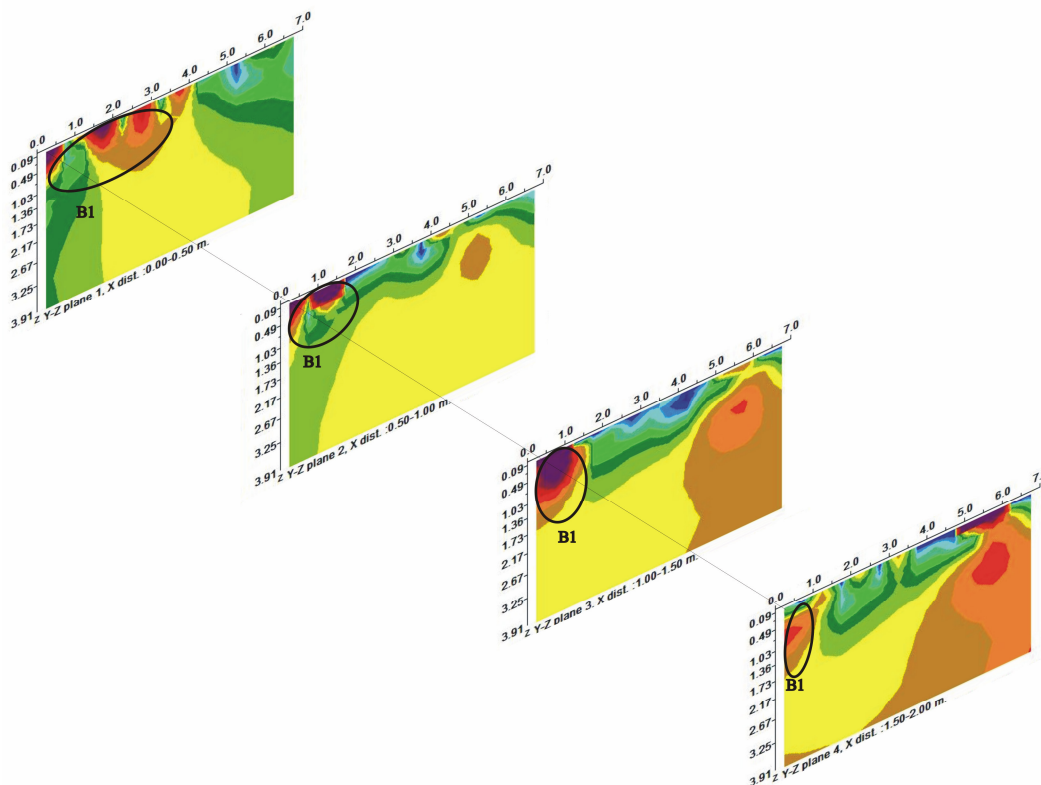


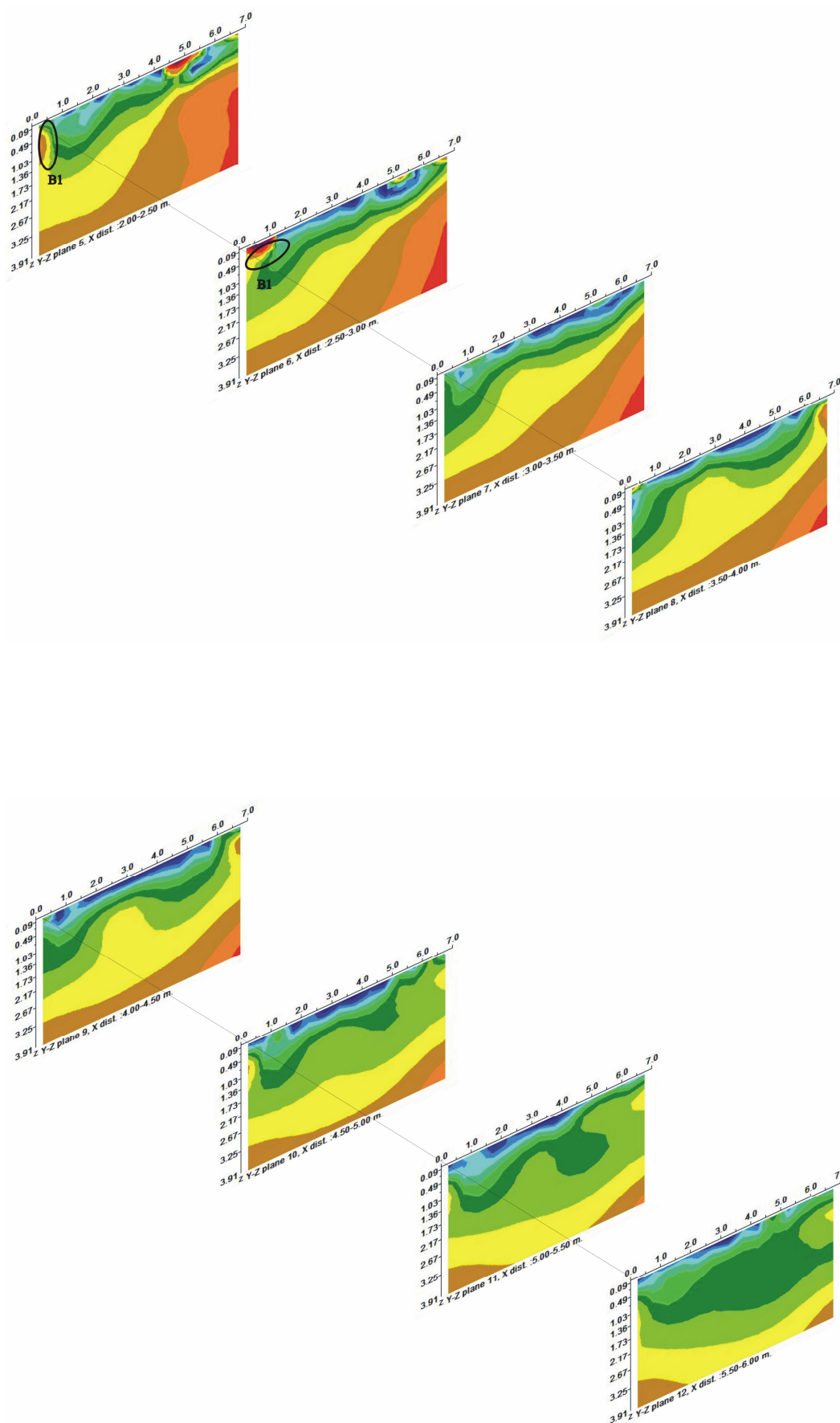
Σχήμα Α.30: Γεωηλεκτρική τομή για την τρίτη γραμμή της περιοχής Β2 με κλίμακα 1, όπου παρατηρείται ότι η ανάλυση είναι αναξιόπιστη.

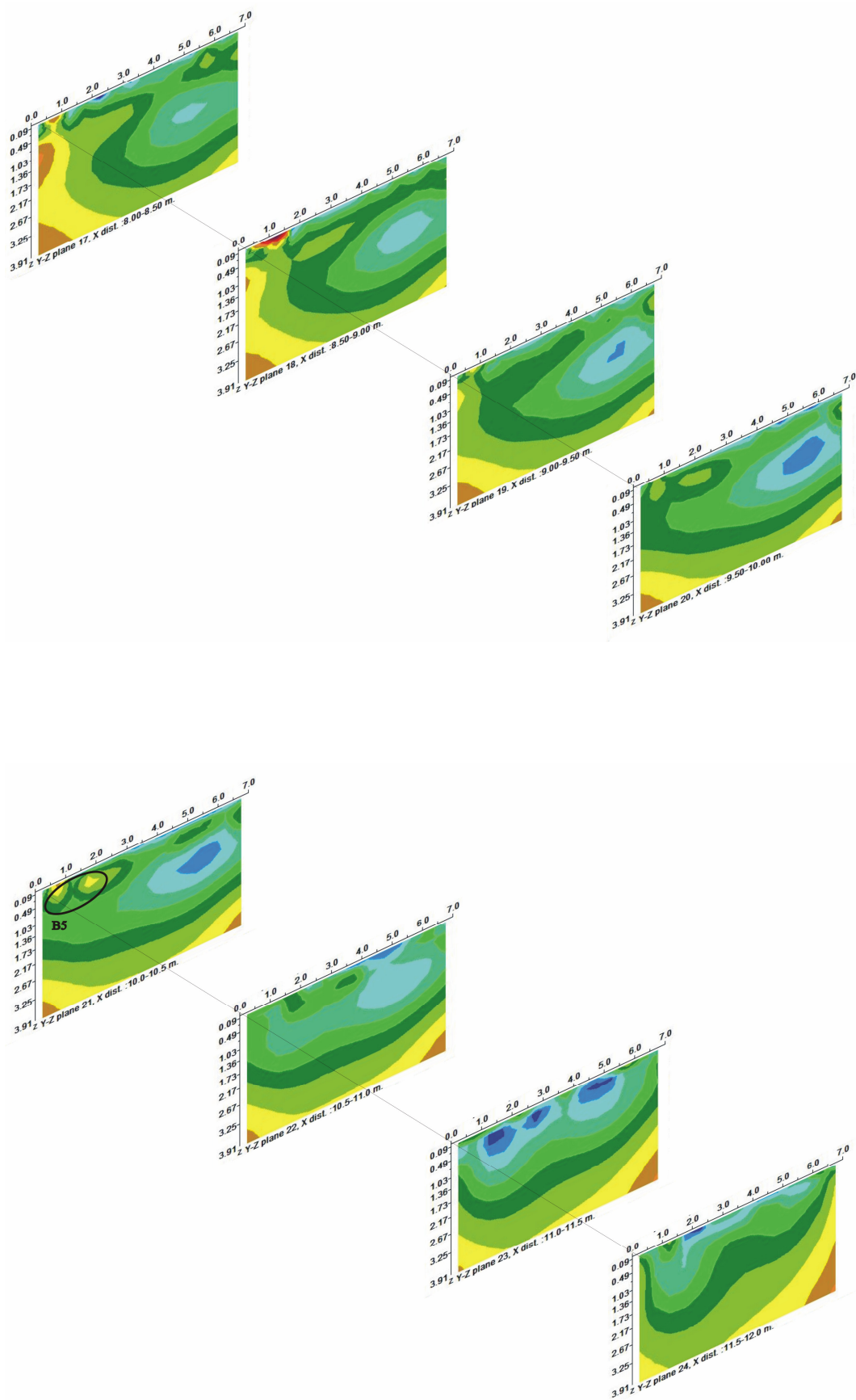


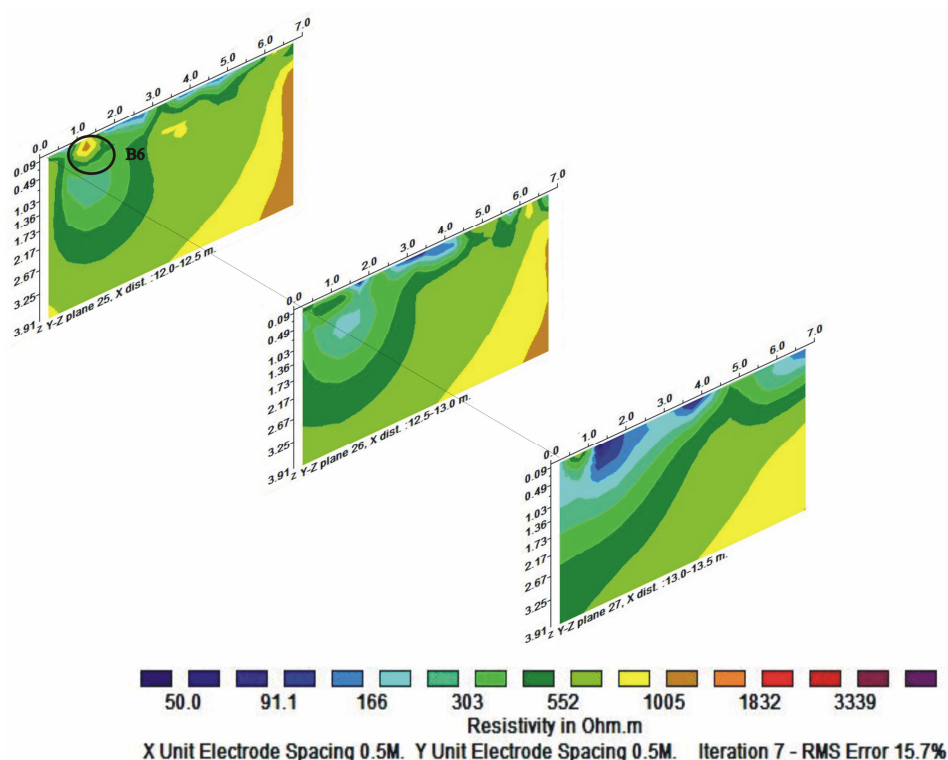
Σχήμα Α.31: Γεωηλεκτρική τομή για την τελευταία γραμμή της περιοχής B2 με κλίμακα 2. Παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από την κλίμακα 1, αλλά όχι από την τρίτη κλίμακα που επιλέχθηκε.

Α.2.5. Γεωηλεκτρικές τομές για το πρόγραμμα RES3DINV του καννάβου B2.



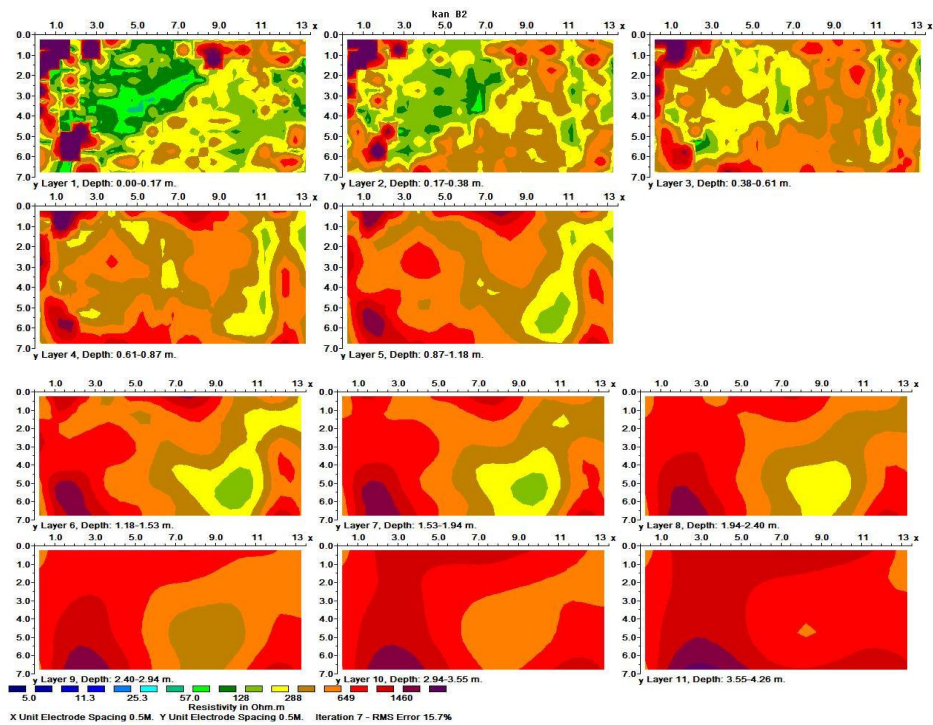




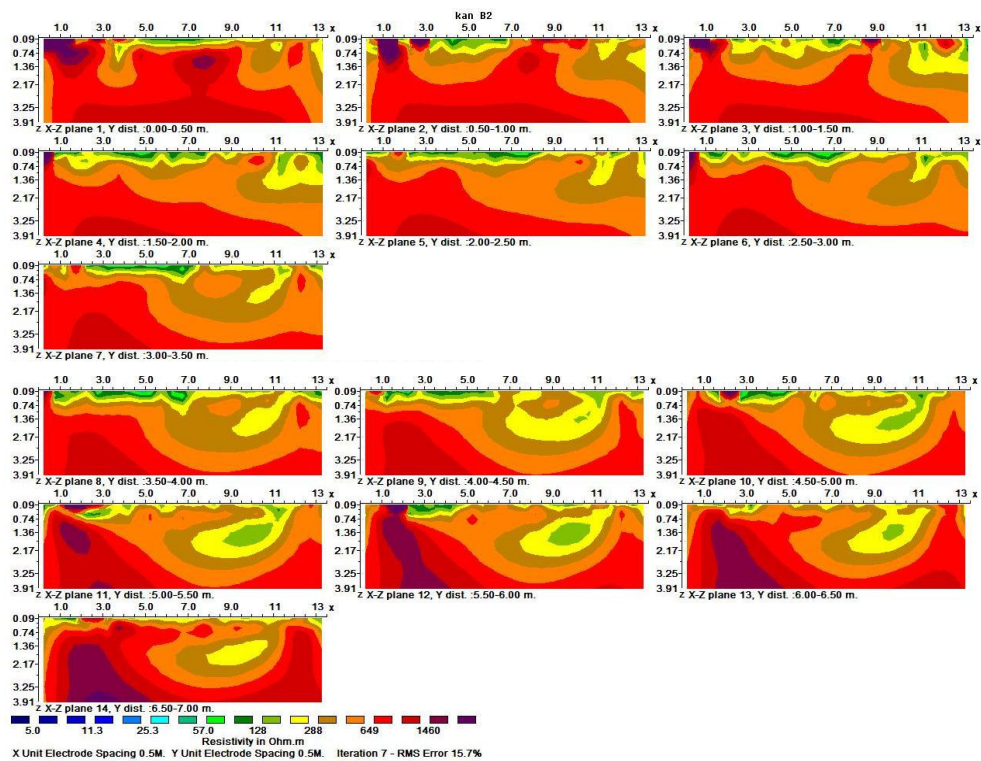


Σχήμα Α.32: Γεωηλεκτρικές τρισδιάστατες τομές σε διεύθυνση Y-Z του καννάβου 2 με κλίμακα 3.

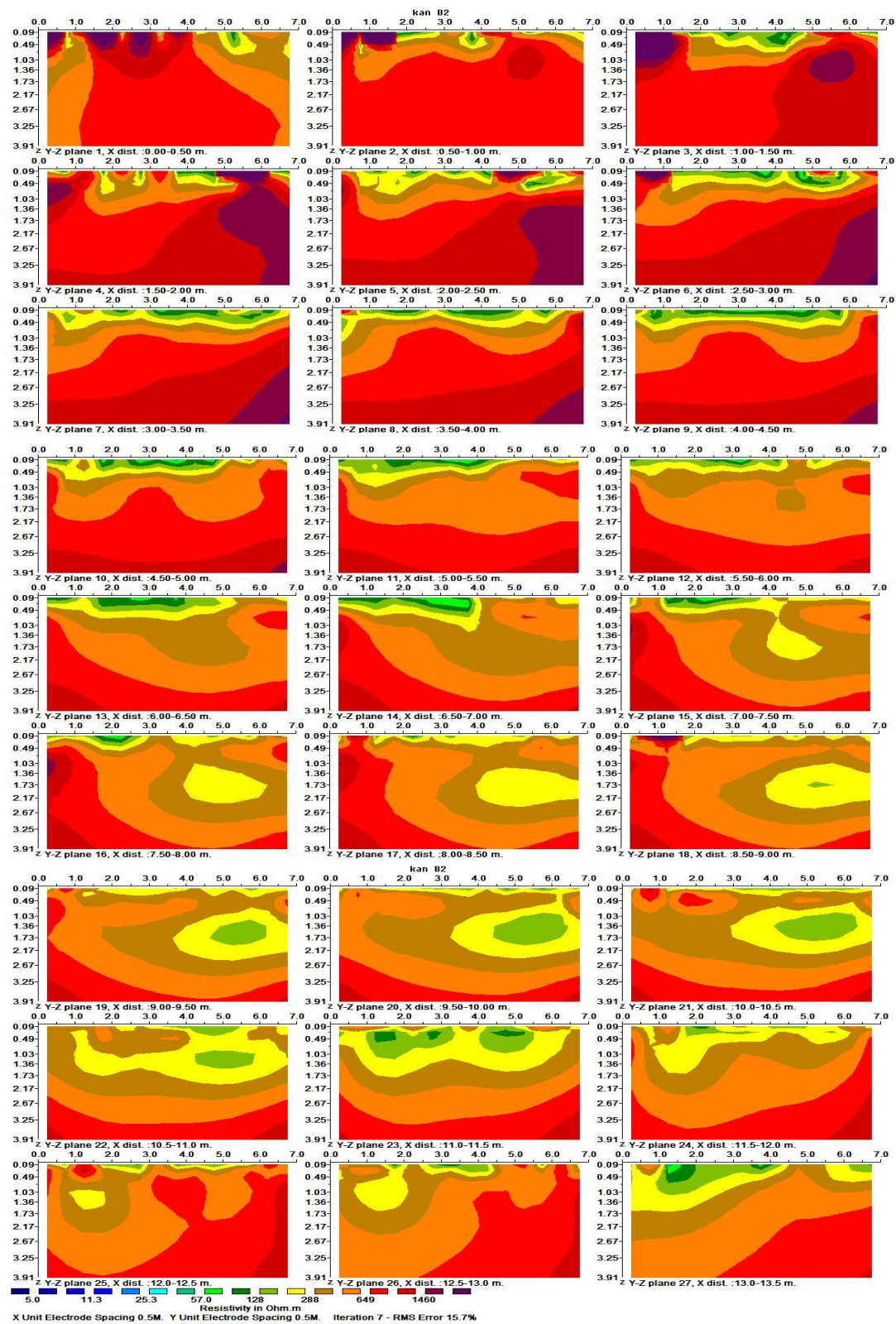
Παρατηρώντας τις 6 πρώτες τομές, οι οποίες σε οριζόντια διάσταση εκτείνονται από 0 έως και 3m, απαντάται η ηλεκτρική ανωμαλία (B1), η οποία ξεκινώντας στις δύο πρώτες τομές σε βάθος έως 50cm φτάνει στην τέταρτη το 1,5m και συρρικνώνεται αργότερα στις άλλες δύο. Στην εικοστή-πρώτη τομή κατά αυτή τη διεύθυνση παρατηρείται μια ηλεκτρική ανωμαλία η οποία οριζόντια εκτείνονται από 10m – 10,5m, σε βάθος ως περίπου 0,5m και αντιστοιχεί στην ανωμαλία (B5) της τρισδιάστατης απεικόνισης. Τέλος, στην εικοστή-πέμπτη τομή εντοπίζεται η ηλεκτρική ανωμαλία (B6) οριζόντια σε βάθος ως περίπου 0,5m και οριζόντια εκτείνονται από 12m – 12,5m.



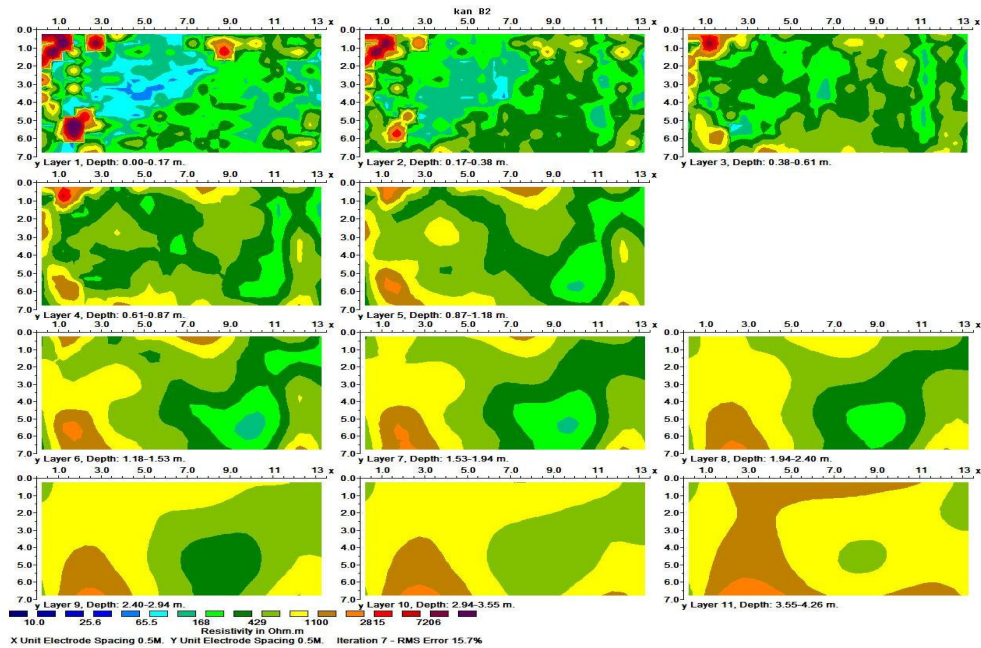
Σχήμα Α.33: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο Β2 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση Χ-Υ.



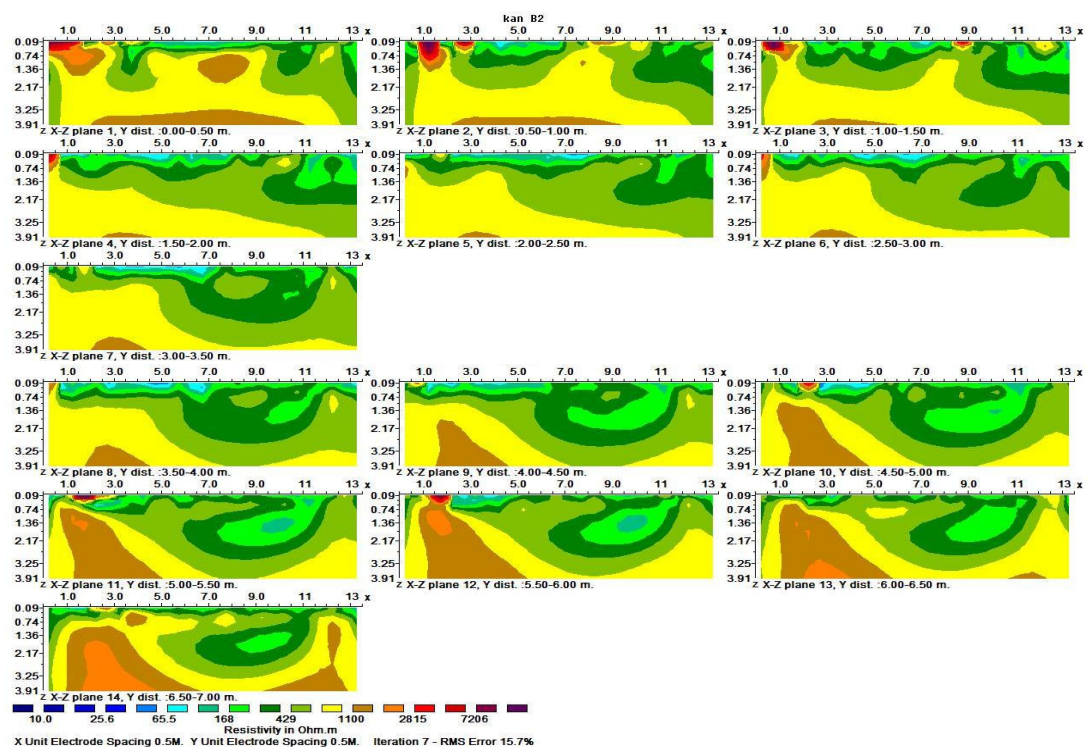
Σχήμα Α.34: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάνναβο Β2 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση Χ-Ζ.



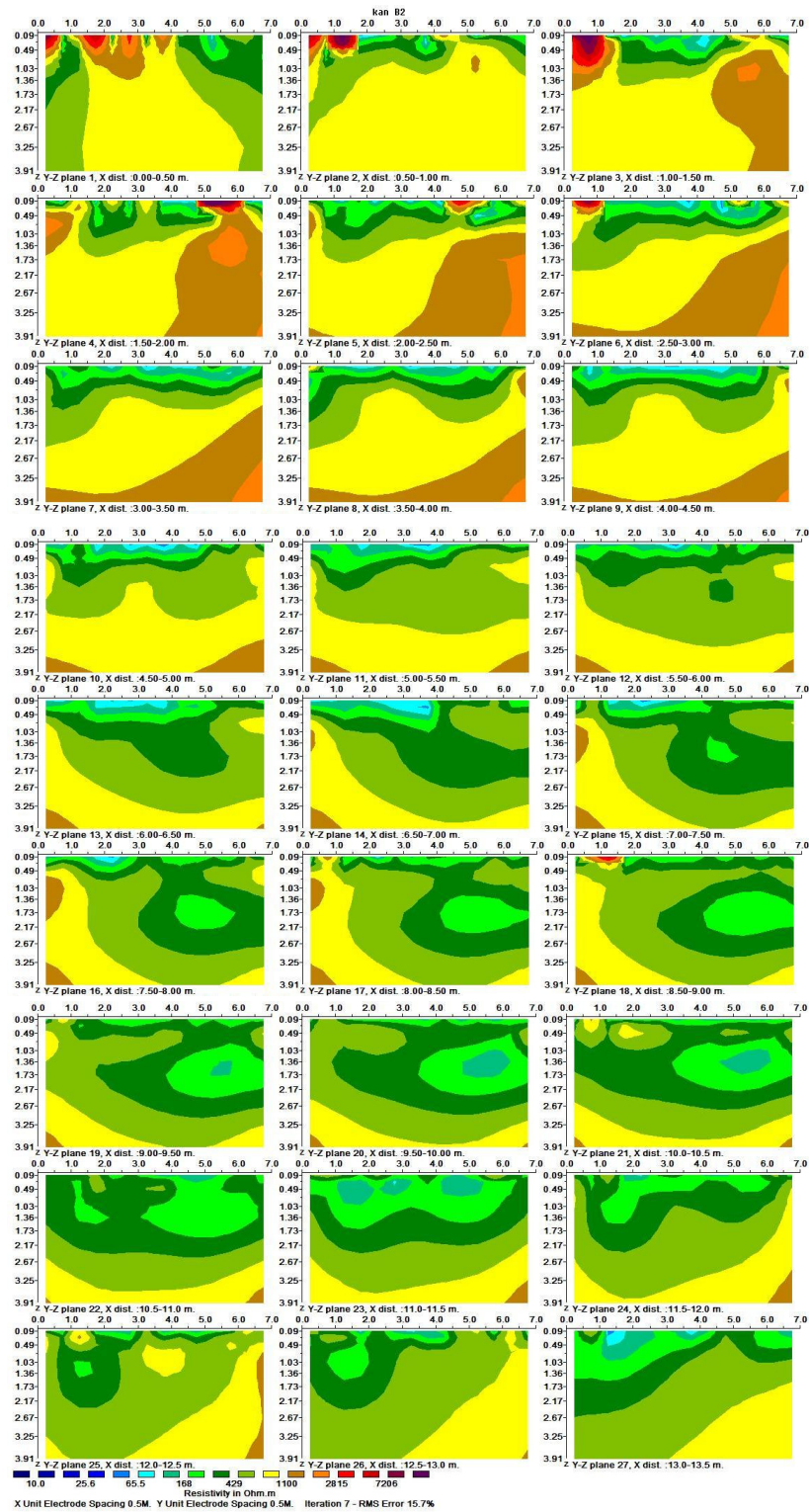
Σχήμα Α.35: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κώνναβο Β2 με κλίμακα 1 σε διεύθυνση Y-Z.



Σχήμα Α.36: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο Β2 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση Χ-Υ.



Σχήμα Α.37: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κάρναβο Β2 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση Χ-Ζ.



Σχήμα Α.38: Γεωηλεκτρικές τομές για τον κώνναβο Β2 με κλίμακα 2 σε διεύθυνση Y-Z.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DINV

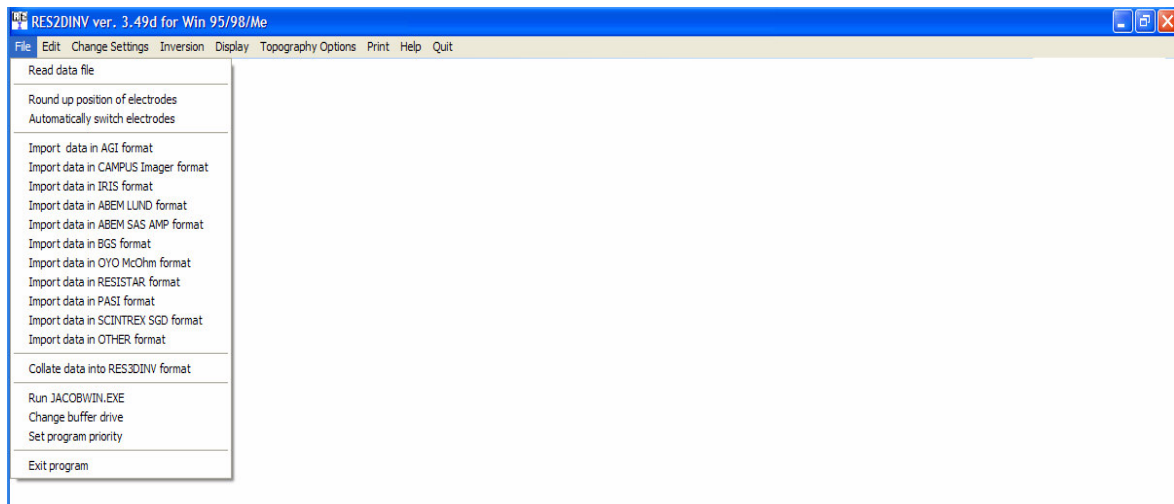
B.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν παράρτημα θα αναφερθεί η χρήση του προγράμματος RES2DINV στην έκδοση 3.4 για λειτουργικό σύστημα Windows. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να εκτελέσει αντιστροφή δισδιάστατων δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, τα οποία μπορούν να προκύψουν από πλήθος διατάξεων.

B.2. Επιλογές του προγράμματος

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν οι επιλογές του προγράμματος.

B.2.1. Το μενού File

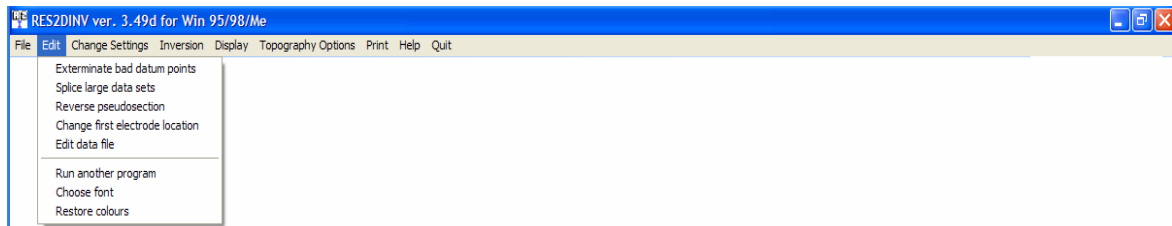


Σχήμα B.1: Το μενού File

Το μενού αυτό έχει τις παρακάτω επιλογές:

- Read data file. Εδώ εισάγεται το αρχείο με τα δεδομένα, τα οποία έχουν προέκταση dat.
- Round up position of electrodes. Από εδώ διορθώνεται η θέση των ηλεκτροδίων.
- Automatically switch electrodes. Αυτή η επιλογή δίνει τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να αλλάζει αυτόματα τις θέσεις των ηλεκτροδίων όταν αυτό αντιμετωπίζει αρνητικό γεωμετρικό παράγοντα και επομένως αρνητική ειδική αντίσταση.
- Import data in AGI , CAMPUS Imager, IRIS, ABEM LUND, ABEM SAS AMP , BGS , OYO McOhm, RESISTAR , PASI SCINTREX SGD , OTHER format. Εισάγονται δεδομένα από αρχεία με διαφορετική μορφοποίηση.
- Collate data into RES3DINV format. Αντιπαραβάλλονται τα δεδομένα σε μορφή χρησιμοποιήσιμη από το πρόγραμμα RES3DINV.
- Run JACOBWIN.EXE. Από εδώ υπολογίζεται η Ιακωβιανή αμέσως μετά την έναρξη του προγράμματος.
- Change buffer drive. Αυτή η επιλογή επιτρέπει την αλλαγή του δίσκου που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την αποθήκευση προσωρινών δεδομένων αντιστροφής.
- Set program priority. Με αυτήν την επιλογή ορίζεται ως προτεραιότητα της υποροϋτίνας της αντιστροφής των δεδομένων, τα οποία αποτελούνται από πολύ πάρα πολλά σημεία, έτσι ώστε να μην μπορεί η αντιστροφή να διακοπεί.
- Exit program. Από εδώ τερματίζεται το πρόγραμμα.

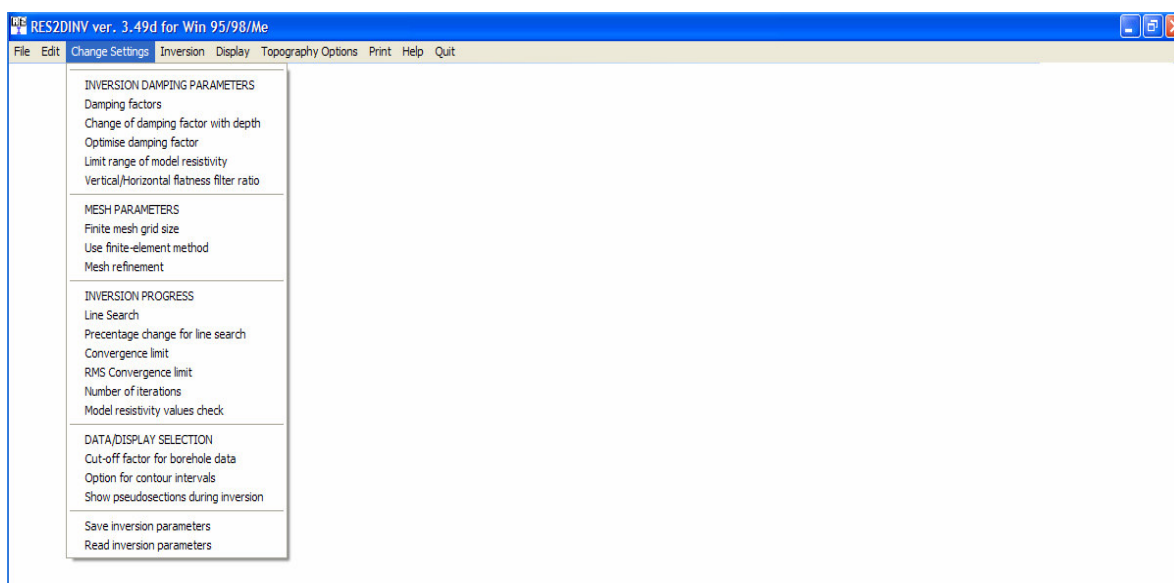
B.2.2. Το μενού Edit



Σχήμα B.2: Το μενού Edit.

Το μενού αυτό αποτελείται από τι κάτωθι επιλογές:

- Exterminate bad datum points. Η επιλογή αυτή χρησιμεύει στην αφαίρεση σημείων με σημαντικό σφάλμα, τα οποία επηρεάζουν την επεξεργασία των δεδομένων.
- Splice large data sets. Η επιλογή αυτή χωρίζει τα δεδομένα σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, όταν ο όγκος τους είναι υπερβολικός για τον υπολογιστή.
- Reverse pseudosections. Με αυτήν την επιλογή αλλάζει τη δεξιά με την αριστερή μεριά της τομής κατά την εμφάνιση στην οθόνη. Χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις παράλληλων γραμμών με διαφορετικό σημείο αναφοράς.
- Change first electrode location. Αυτό χρησιμεύει στην αλλαγή της θέσης του πρώτου ηλεκτροδίου.
- Edit data file. Αυτή η επιλογή μας δίνει τη δυνατότητα της χρησιμοποίησης του Notepad.
- Run another program. Υπάρχει η δυνατότητα προσπέλασης άλλου προγράμματος.
- Choose font. Επιλογή γραμματοσειράς.
- Restore colours. Η επιλογή αυτή χρησιμεύει στην αυτόματη διόρθωση των χρωμάτων.

B.2.3. Το μενού Change settings.*Σχήμα B.3: Το μενού Change settings.*

INVERSION DAMPING PARAMETRES. Με τις παρακάτω επιλογές επιλέγεται η παράμετρος λ.

- Damping factors. Γίνεται εισαγωγή της τιμής του λ.
- Change of damping factor with depth. Με την αύξηση του βάθους μειώνεται η διακριτική ικανότητα κι έτσι είναι απαραίτητη η αύξηση του λ.
- Optimise damping factor. Το πρόγραμμα επιλέγει την καλύτερη τιμή του παράγοντα λ, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα.
- Limit range of model resistivity. Εδώ περιορίζονται οι χαμηλές ή οι υψηλές τιμές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται για την αντιστροφή.
- Vertical/Horizontal flatness filter ratio. Εδώ αλλάζει η αναλογία του βάρους του φίλτρου ομαλότητας σε οριζόντια ή κατακόρυφη διεύθυνση.

MESH PARAMETERS. Με τις παρακάτω επιλογές εισάγονται οι παράμετροι του πλέγματος.

- Finite difference grid size. Εδώ επιλέγεται αν στο ευθύ πρόβλημα θα χρησιμοποιείται ένας κανονικός ή ένας πυκνότερος κάνναβος.
- Use finite-element method. Εδώ επιλέγεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.
- Mesh refinement. Εδώ επιλέγεται ο τύπος του καννάβου για μεγαλύτερη ακρίβεια.

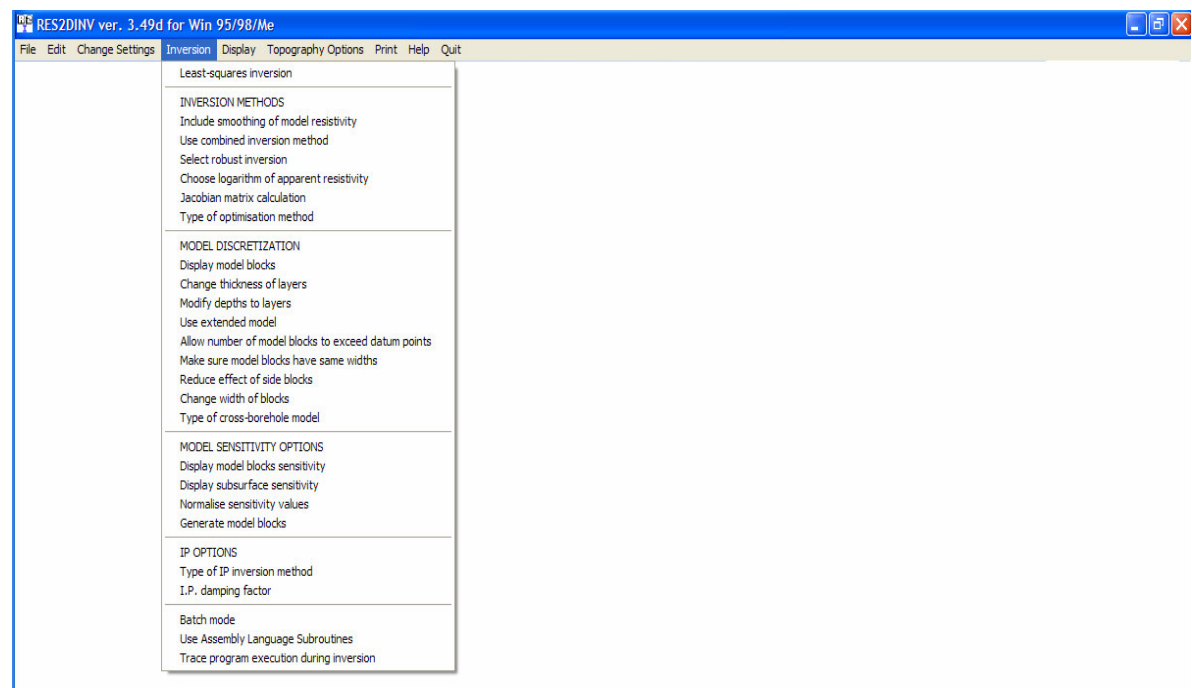
INVERSION PROGRESS. Οι κάτωθι επιλογές χρησιμεύουν στην αλλαγή παραμέτρων κατά την αντιστροφή.

- Line search. Μετά από κάθε επανάληψη τα αντιστροφής η τιμή λάθους (RMS) μειώνεται. Όταν όμως αυξάνεται, η επιλογή αυτή βοηθάει να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα.
- Presentage change for line search. Εδώ εκτιμάται το ποσοστό λάθους (RMS).
- Convergence limit. Εδώ εισάγεται το κατώτερο όριο λάθους (RMS) μεταξύ δύο επαναλήψεων.
- RMS Convergence limit. Εδώ εισάγεται το όριο λάθους (RMS) που θα χρησιμοποιηθεί στην αντιστροφή.
- Number of iterations. Επιλογή του επιθυμητού αριθμού επαναλήψεων κατά την αντιστροφή.
- Model resistivity values check. Το πρόγραμμα ελέγχει αν υπάρχουν υπερβολικά μικρές ή μεγάλες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε σχέση με τις υπόλοιπες.

DATA DISPLAY/SECTION. Με τις παρακάτω επιλογές αλλάζουν οι παράμετροι απεικόνισης των δεδομένων.

- Cut-off factor for borehole data. Για να αποφευχθούν πολύ θορυβώδη δεδομένα, το πρόγραμμα μειώνει αυτόματα την προσπέλαση των δεδομένων αυτών.
- Option for contour intervals. Το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα τις κατάλληλες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που περιέχονται στο τελικό μοντέλο.
- Show pseudosections during inversion. Η επιλογή αυτή δίνει τη δυνατότητα να απεικονίζονται οι ψευδοτομές κατά την διάρκεια της αντιστροφής.
- Save inversion parameters. Από εδώ αποθηκεύονται οι αλλαγές των παραμέτρων που εφαρμόσαμε.
- Read inversion parameters. Εδώ παρουσιάζονται οι υπάρχουσες αλλαγές.

B.2.4. Το μενού Inversion.



Σχήμα Β.4: Το μενού Inversion.

- Least squares inversion. Έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας αντιστροφής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

INVERSION METHODS. Μέθοδοι αντιστροφής.

- Include smoothing of model resistivity. Με αυτήν την επιλογή λαμβάνεται υπόψη η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής. Χρησιμοποιείται συνήθως για πολύ θορυβώδη δεδομένα.
- Use combined inversion model. Στην περίπτωση όπου υπάρχουν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα, χρησιμοποιούνται δύο άλλες τεχνικές επίλυσης, είτε τη ridge regression είτε την occam.
- Select robust inversion. Επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου, η οποία όμως δεν είναι τόσο ευαίσθητη στα δεδομένα με θόρυβο.
- Choose logarithm of apparent resistivity. Η δυνατότητα επιλογής των λογαριθμικών τιμών της αντίστασης κατά την αντιστροφή ή όχι.
- Jacobian matrix calculation. Επιλογή της μεθόδου υπολογισμού της Ιακωβιανής.
- Type of optimisation method. Επιλογή της τυπικής ή της ανολοκλήρωτης μεθόδου Gauss- Newton.

MODEL DISCRETIZATION

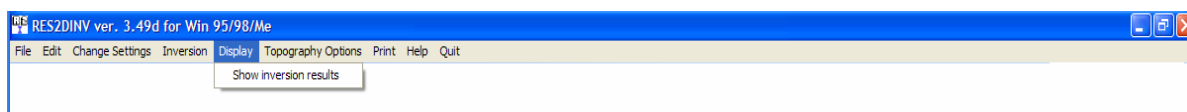
- Display model blocks. Εμφανίζεται στην οθόνη η μορφή του επιλεγμένου καννάβου.
- Change thickness of model layers. Επιλογή μοντέλου όπου το πάχος των στρωμάτων αυξάνεται κατά 10% ή 25% σε κάθε κατώτερο στρώμα.
- Modify depths to layers. Αλλαγή του βάθους του στρώματος κατά την αντιστροφή.

- Use extended model. Με την επιλογή αυτή γίνεται επέκταση του καννάβου για την εξάλειψη της επίδρασης των ορίων.
- Allow number of model blocks to exceed datum points. Επιτρέπει την αλλαγή της θέσης και του μεγέθους των κυψελίδων, έτσι ώστε, αν χρειαστεί, να ξεπεράσουν τα δεδομένα.
- Make sure model blocks have some widths. Η επιλογή αυτή χρησιμεύει στην επιβεβαίωση ή αλλαγή της αναλογίας του αριθμού των κυψελίδων σε μια γραμμή και του αριθμού των ηλεκτροδίων για καλύτερη ακρίβεια.
- Reduce effect of side blocks. Η επιλογή αυτή χρησιμεύει στην μείωση της επιρροής των πλάγιων και κάτω κυψελίδων στην αντιστροφή.
- Change width of blocks. Επιτρέπει την αλλαγή διαστήματος μεταξύ των γειτονικών ηλεκτροδίων.
- Type of cross-borehole model. Επιλογή της μεθόδου για το συγκεκριμένο μοντέλο.

MODEL SENSITIVITY OPTIONS

- Display model blocks sensitivity. Εμφανίζεται στην οθόνη η ευαισθησία του καννάβου κατά την αντιστροφή.
- Display subsurface sensitivity. Εμφανίζεται στην οθόνη η ευαισθησία κατά την αντιστροφή.
- Normalise sensitivity values. Ομαλοποίηση των τιμών ευαισθησίας κατά την αντιστροφή.
- Generate model blocks. Εμφάνιση όλων των κυψελίδων σε μια οθόνη.

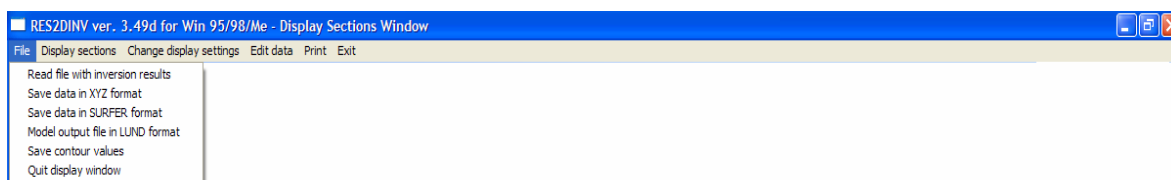
B.2.5. Το μενού Display.



Σχήμα B.5: Το μενού Display.

- Show inversion results. Με το μενού αυτό εμφανίζονται στην οθόνη τα αποτελέσματα της αντιστροφής. Με την επιλογή αυτή, προβάλλονται τα παρακάτω υπομενού.

B.2.5.1. Το υπομενού File.



Σχήμα B.6: Το υπομενού File.

- Read file with inversion results. Εισάγονται παλαιότερα επεξεργασμένα αποτελέσματα σε μορφή αρχείων INV και εμφανίζονται στην οθόνη.

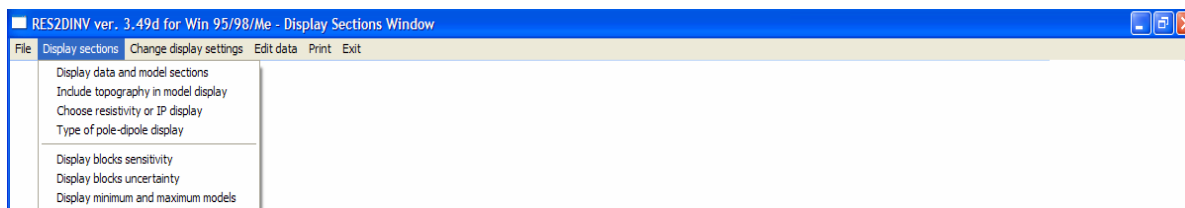
- Save data in XYZ format. Με την επιλογή αυτή αποθηκεύονται τα δεδομένα σε κατάλληλη μορφή προσπελάσιμη από άλλα προγράμματα, όπως τα Geosoft και Transform.

- Save data in SURFER format. Με την επιλογή αυτή αποθηκεύονται τα δεδομένα σε κατάλληλη μορφή προσπελάσιμη από το πρόγραμμα Surfer.

- Model output file in LUND format. Με την επιλογή αυτή αποθηκεύονται τα δεδομένα σε κατάλληλη μορφή προσπελάσιμη από το πρόγραμμα LUND Imaging system το οποίο έχει παραχθεί από την ABEM.

- Save contour values. Εδώ αποθηκεύονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό των ψευδοτομών και καννάβων.

B.2.5.2. Το υπομενού Display.

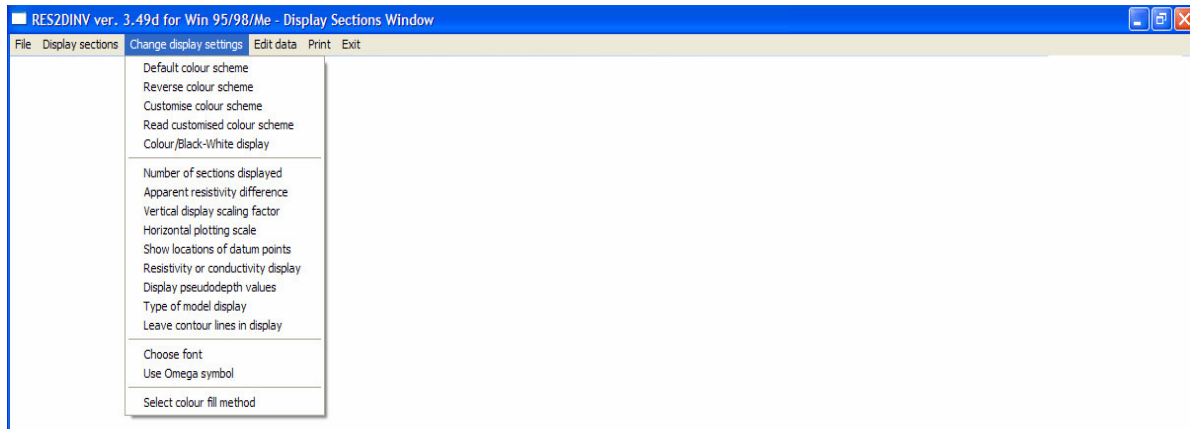


Σχήμα B.7: Το υπομενού Display.

- Display data and model sections. Από εδώ εμφανίζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.
- Include topography in model display. Περιλαμβάνονται στην απεικόνιση και στοιχεία της τοπογραφίας.
- Choose resistivity or IP display. Επιλογή εμφάνισης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ή των δεδομένων IP.
- Type of pole-dipole display. Επιλογή του τύπου απεικόνισης μόνο για την διάταξη πόλου-διπόλου.
- Display blocks sensitivity. Εμφανίζεται στην οθόνη η ευαισθησία του καννάβου κατά την αντιστροφή.
- Display blocks uncertainty. Απεικονίζεται στην οθόνη το ποσοστό αβεβαιότητας για κάθε υπολογισμένη τιμή ειδικής αντίστασης.
- Display minimum and maximum models. Με την επιλογή αυτή εμφανίζονται στην οθόνη δύο τομές, όπου η μία αντιστοιχεί στις μικρότερες και η άλλη στις μεγαλύτερες

τιμές της ειδικής αντίστασης, όπως αυτές υπολογίζονται από το ποσοστό αβεβαιότητας.

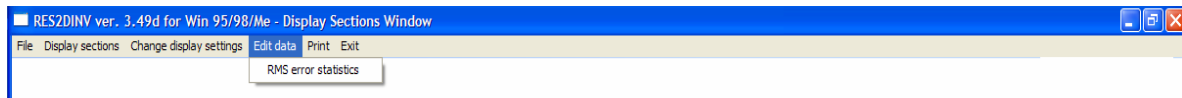
B.2.5.3. Το υπομενού Change display sections.



Σχήμα B.8: Το υπομενού Change display sections.

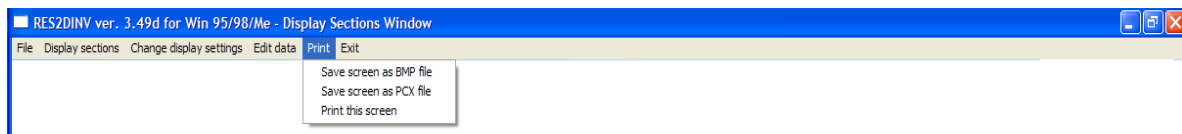
- Default colour scheme. Επιλογή των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- Reverse colour scheme. Αντιστροφή των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- Customise colour scheme. Αλλαγή των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- Read customised colour scheme. Εισαγωγή των παλαιότερων αποθηκευμένων χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- Colour/Black-White display. Αλλαγή της απεικόνισης των αποτελεσμάτων από έγχρωμη σε ασπρόμαυρη.

- Number of sections displayed. Επιλογή του αριθμού τομών που θα εμφανιστούν στην οθόνη.
- Apparent resistivity difference. Επιλογή εμφάνισης της ψευδοτομής της υπολογισμένης ειδικής αντίστασης ή τη διαφορά της φαινόμενης με την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση.
- Vertical display scalling factor. Με αυτήν την επιλογή καθορίζεται η αναλογία της κατακόρυφης κλίμακας σε σχέση με την οριζόντια.
- Horizontal plotting scale. Αλλαγή της οριζόντιας κλίμακας.
- Show locations of datum points. Αλλαγή του τρόπου ένδειξης των θέσεων των δεδομένων.
- Resistivity or conductivity display. Επιλέγεται η απεικόνιση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- Type of model display. Επιλογή του τύπου απεικόνισης των μοντέλων.
- Leave contour lines in display. Απεικόνιση ισότιμων καμύλων.
- Choose font. Επιλογή γραμματοσειράς.
- Use Omega symbol. Επιλογή του τρόπου απεικόνισης της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης ως Ohm ή ως Ω .
- Select colour fill method. Επιλογή του τρόπου γέμισης χρωμάτων των διαστημάτων κατά την απεικόνιση.

B.2.5.4. Το υπομενού Edit data.

Σχήμα B.9: Το υπομενού Edit data.

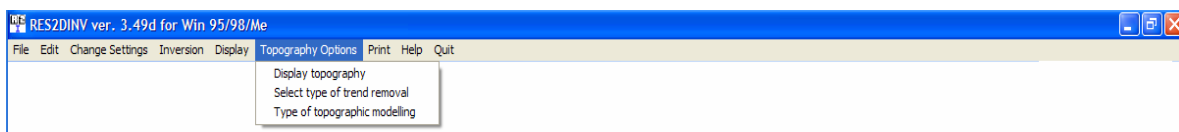
- RMS error statistics. Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται στην οθόνη η κατανομή το σφάλματος των αποτελεσμάτων υπό μορφή ιστογράμματος. Τιμές με μεγάλο σφάλμα πρέπει να απορριφθούν.

B.2.5.5. Το υπομενού Print.

Σχήμα B.10: Το υπομενού Print.

- Save screen as BMP file. Αποθηκεύονται τα αποτελέσματα σε αρχείο BMP.

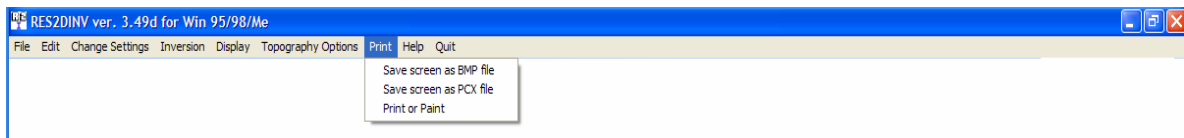
- Save screen as PCX file. Αποθηκεύονται τα αποτελέσματα σε αρχείο PCX.

B.2.6. Το μενού Topography options.

Σχήμα B.11: Το μενού Topography options.

- Display topography. Με αυτήν την επιλογή απεικονίζεται η τοπογραφία.
- Type of topographic modeling. Επιλογή μια εκ των τεσσάρων μεθόδων για να ληφθεί υπόψη η τοπογραφία στην αντιστροφή.

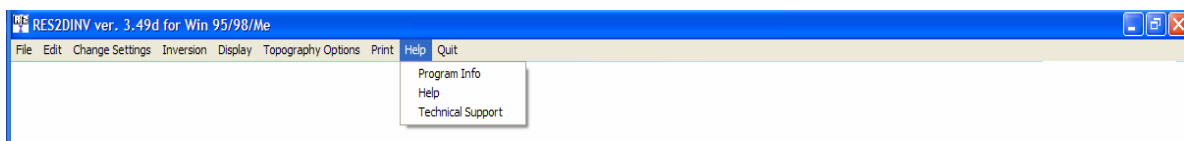
B.2.7. Το μενού Print.



Σχήμα B.12: Το μενού Print.

- Save screen as BMP file. Αποθηκεύονται τα αποτελέσματα σε αρχείο BMP.
- Save screen as PCX file. Αποθηκεύονται τα αποτελέσματα σε αρχείο PCX.

B.2.8. Το μενού Help.

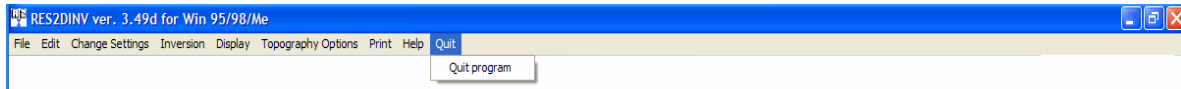


Σχήμα B.13: Το μενού Help.

- Program info. Εδώ παρέχονται πληροφορίες για το πρόγραμμα.
- Help. Με την επιλογή αυτή παρέχεται στο χρήστη όποια βοήθεια χρειάζεται κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

- Technical support. Παρέχονται πληροφορίες για τεχνική υποστήριξη.

B.2.9. Το μενού Quit.



***Σχήμα B.14:** Το μενού Quit.*

- Quit program. Με την επιλογή αυτή τερματίζεται το πρόγραμμα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES3DINV

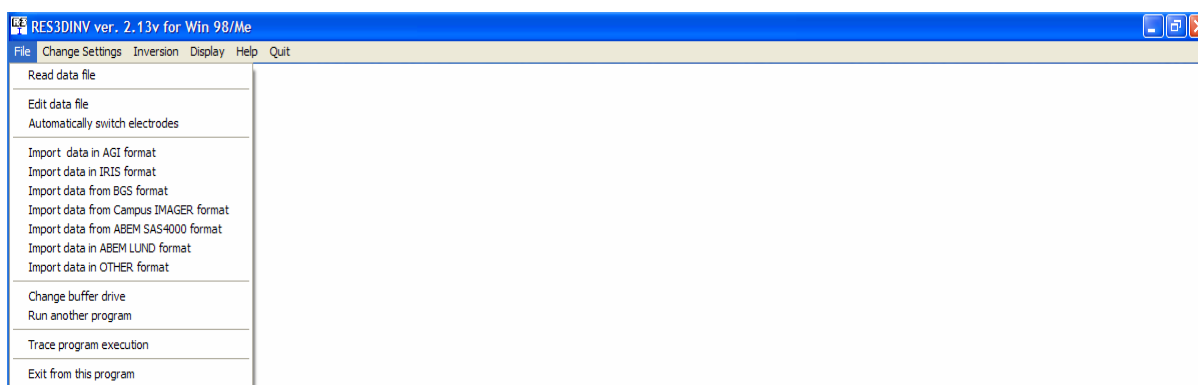
Γ.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν παράρτημα θα αναφερθεί η χρήση του προγράμματος RES3DINV στην έκδοση 2.0 για λειτουργικό σύστημα Windows. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να εκτελέσει αντιστροφή τρισδιάστατων δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, τα οποία μπορούν να προκύψουν από διασκοπήσεις με τις διατάξεις πόλου-πόλου, πόλου-διπόλου και διπόλου-διπόλου.

Γ.2. Επιλογές του προγράμματος.

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν οι επιλογές του προγράμματος.

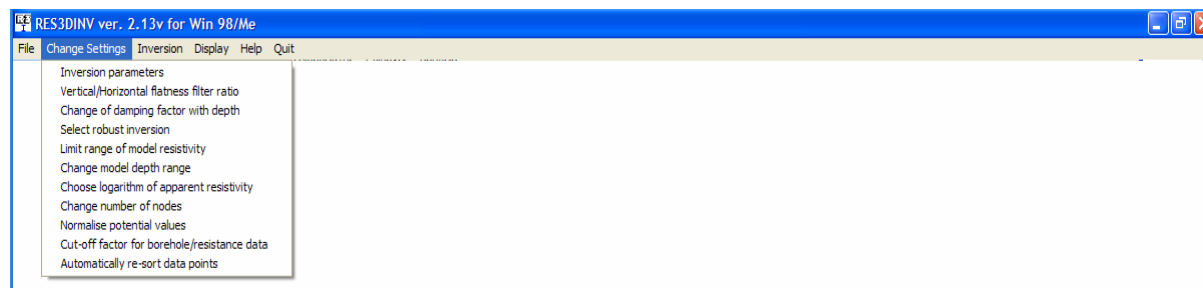
Γ.2.1. Το μενού File



Σχήμα Γ.1: Το μενού File

Το μενού αυτό έχει τις παρακάτω επιλογές:

- Read data file. Εδώ εισάγεται το αρχείο με τα δεδομένα, τα οποία έχουν προέκταση dat.
- Edit data file. Με αυτή την επιλογή δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης του Notepad.
- Automatically switch electrodes. Αυτή η επιλογή δίνει τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να αλλάζει αυτόματα τις θέσεις των ηλεκτροδίων όταν αυτό αντιμετωπίζει αρνητικό γεωμετρικό παράγοντα και επομένως αρνητική ειδική αντίσταση.
- Import data in AGI , IRIS, BGS, CAMPUS Imager, ABEM SAS 4000, ABEM LUND AMP , OTHER format. Εδώ μετατρέπονται τα αρχεία στην αναγκαία από το πρόγραμμα μορφή τα οποία προήλθαν από διασκόπηση με συσκευές, όπως το Sting της Advanced, το LUND της ABEM, κ.α.
- Change buffer drive. Αυτή η επιλογή επιτρέπει την αλλαγή του δίσκου που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την αποθήκευση προσωρινών δεδομένων αντιστοφής.
- Run another program. Μπορούμε να τρέξουμε άλλο πρόγραμμα.
- Trace program execution. Με αυτήν την επιλογή σώζεται μέρος της επεξεργασίας του προγράμματος.
- Exit from this program. Από εδώ τερματίζεται το πρόγραμμα.

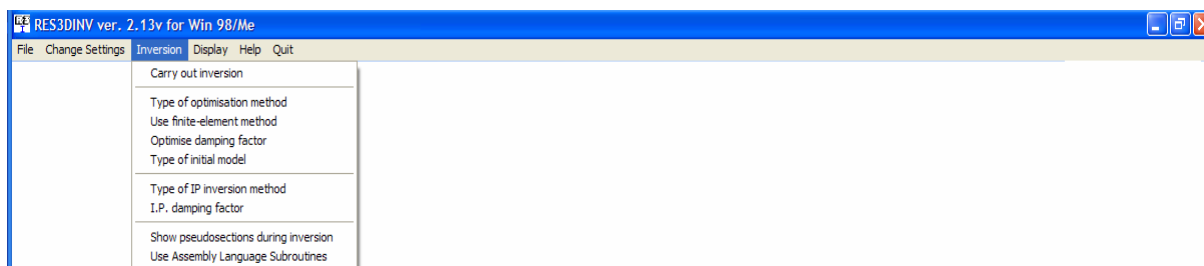
Γ.2.2. Το μενού Change settings.

Σχήμα Γ.2: Το μενού Change settings.

- Inversion parameters. Με την επιλογή αυτή μεταβάλλονται οι αρχικές ρυθμίσεις των μεταβλητών του προγράμματος, όπως ο συντελεστής απόσβεσης λ , η ελάχιστη τιμή του λ σε κάθε επανάληψη, το πάχος του πρώτου στρώματος, κ.α.
- Vertical/Horizontal flatness filter ratio. Εδώ επιλέγεται η αναλογία του βάρους του φίλτρου ομαλότητας σε οριζόντια ή κατακόρυφη διεύθυνση.
- Change of damping factor with depth. Με την αύξηση του βάθους μειώνεται η διακριτική ικανότητα κι έτσι είναι απαραίτητη η αύξηση του λ .
- Select robust inversion. Επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου, η οποία όμως δεν είναι τόσο ευαίσθητη στα δεδομένα με θόρυβο.
- Limit range of model resistivity. Εδώ περιορίζονται οι χαμηλές ή οι υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται για την αντιστροφή.
- Change model depth range. Επιτρέπει την μείωση ή αύξηση το βάθος των στρωμάτων στο μοντέλο αντιστροφής που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.
- Choose logarithm of apparent resistivity. Επιτρέπει την επιλογή της χρήσης των λογαριθμικών τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

- Change number of nodes. Επιτρέπει την αλλαγή του διαστήματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων του πλέγματος
- Normalise potential values. Με αυτήν την επιλογή κανονικοποιούνται οι υπολογισμένες τιμές του δυναμικού.
- Cut-off factor for borehole/resistance data. Για να αποφευχθούν πολύ θορυβώδη δεδομένα, το πρόγραμμα μειώνει αυτόματα την προσπέλαση των δεδομένων αυτών.
- Automatically re-sort data points. Επιτρέπει την αναταξινόμηση των δεδομένων, έτσι ώστε να μην παίρνει η αντιστροφή πολλή ώρα.

Γ.2.3. Το μενού Inversion.

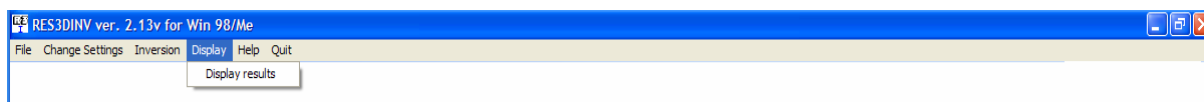


Σχήμα Γ.3: Το μενού Inversion.

- Carry out inversion. Με την επιλογή αυτή ξεκινάει η αντιστροφή
- Type of optimisation method. Επιλογή της τυπικής ή παραλλαγής της μεθόδου Gauss- Newton.
- Use finite-element method. Εδώ επιλέγεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.
- Optimise damping factor. Με αυτήν την επιλογή το πρόγραμμα επιλέγει την καλύτερη τιμή του παράγοντα λ, έτσι ώστε να μειωθεί το σφάλμα.

- Type of initial model. Επιλογή του αρχικού μοντέλου ειδικής αντίστασης κατά την αντιστροφή.
- Type of IP inversion method. Επιλογή της αντιστροφής της συνδυασμένης αντίστασης ταυτόχρονα να με τα δεδομένα IP ή μετά την αντιστροφή.
- IP damping factor. Επιλογή της τιμής του παράγοντα λ για τα τοπογραφικά δεδομένα.
- Show pseudosections during inversion. Η επιλογή αυτή δίνει τη δυνατότητα εμφάνισης των ψευδοτομών κατά την διάρκεια της αντιστροφής.

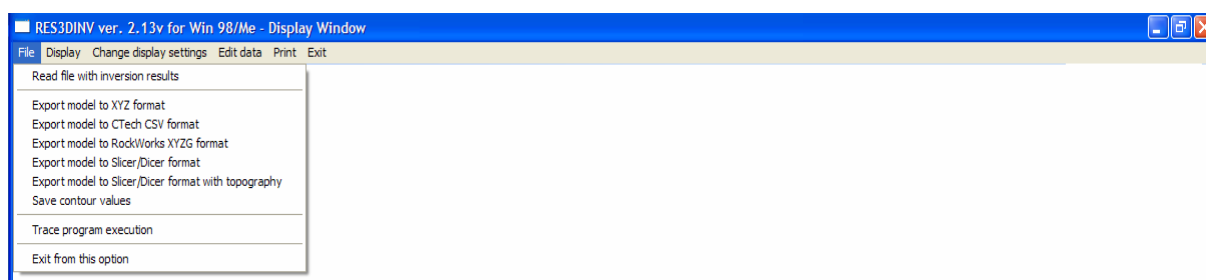
Γ.2.4. Το μενού Display.



Σχήμα Γ.4: Το μενού Display.

- Display results. Με το μενού αυτό προβάλλονται στην οθόνη τα αποτελέσματα της αντιστροφής, εμφανίζοντας τα παρακάτω υπομενού.

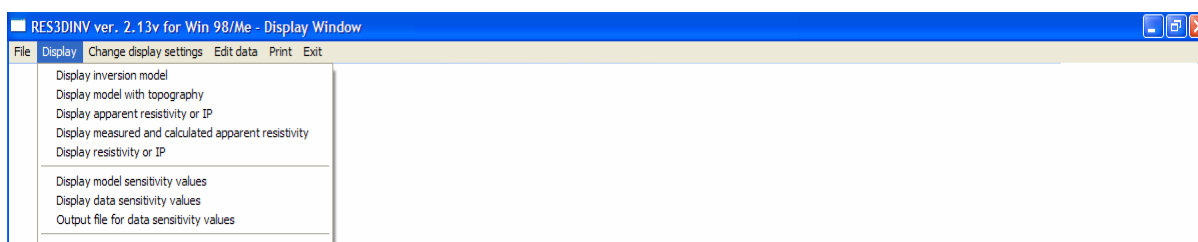
Γ.2.4.1. Το υπομενού File.



Σχήμα Γ.5: Το υπομενού File.

- Read file with inversion results. Εισάγονται παλαιότερα επεξεργασμένα αποτελέσματα σε μορφή αρχείων INV και εμφανίζονται στην οθόνη.
- Export model to XYZ , RockWorks XYZG, Slicer/Dicer format. Με την επιλογή αυτή αποθηκεύονται τα δεδομένα σε κατάλληλη μορφή προσπελάσιμη από άλλα προγράμματα, όπως το Geosoft.
- Save contour values. Εδώ αποθηκεύονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό των ψευδοτομών και καννάβων.

Γ.2.4.2. Το υπομενού Display.

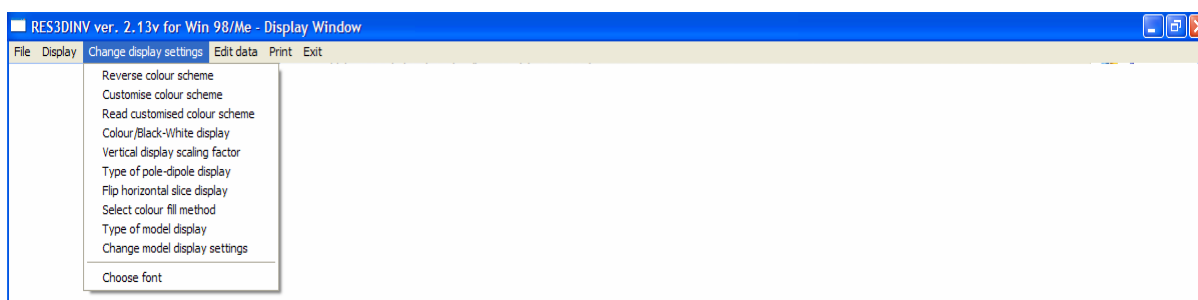


Σχήμα Γ.6: Το υπομενού Display.

- Display inversion model. Με την επιλογή αυτή σχεδιάζονται τα μοντέλα σε κατακόρυφες ή οριζόντιες τομές.
- Display model with topography. Εμφανίζονται τα αποτελέσματα συνδυασμένα με τα τοπογραφικά δεδομένα.
- Display apparent resistivity or IP. Προβάλλονται στην οθόνη οι ψευδοτομές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε X ή Y διεύθυνση .
- Display measured and calculated apparent resistivity. Προβάλλονται στην οθόνη οι ψευδοτομές της υπολογισμένης ειδικής αντίστασης σε X ή Y διεύθυνση .

- Display resistivity or IP. Εμφανίζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής σε συνδυασμό με τα τοπογραφικά δεδομένα.
- Display model sensitivity values. Εμφανίζεται στην οθόνη η ευαισθησία του μοντέλου κατά την αντιστροφή.
- Display data sensitivity values. Εμφανίζεται στην οθόνη η ευαισθησία των δεδομένων κατά την αντιστροφή.
- Output file for data sensitivity values. Εδώ αποθηκεύονται οι τιμές ευαισθησίας των δεδομένων σε Slicer/Dicer format.

Γ.2.4.3. Το υπομενού Change display sections.

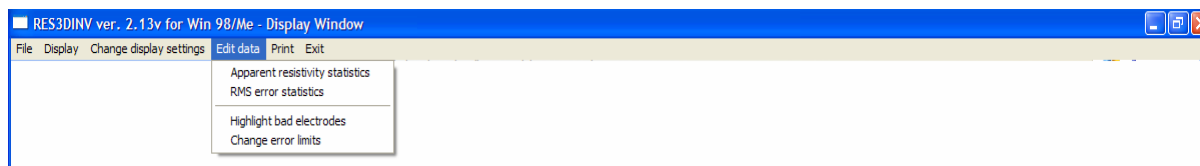


Σχήμα Γ.7: Το υπομενού Change display sections.

- Reverse colour scheme. Αντιστροφή των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- Customise colour scheme. Αλλαγή των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- Read customised colour scheme. Επανεισαγωγή των παλαιότερων αποθηκευμένων χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

- Colour/Black-White display. Αλλαγή της απεικόνισης των αποτελεσμάτων από έγχρωμη σε ασπρόμαυρη.
- Vertical display scalling factor. Με αυτήν την επιλογή καθορίζεται η αναλογία της κατακόρυφης κλίμακας σε σχέση με την οριζόντια.
- Type of pole-dipole. Επιλογή του τύπου απεικόνισης μόνο για την διάταξη πόλου-διπόλου.
- Flip horizontal slice display. Αλλαγή της οριζόντιας απεικόνισης των αποτελεσμάτων.
- Select colour fill method. Επιλογή του τρόπου γέμισης χρωμάτων των διαστημάτων κατά την απεικόνιση.
- Type of model display. Επιλογή του τύπου απεικόνισης των μοντέλων.
- Change model display sections. Αλλαγή του διαστήματος ηλεκτροδίων κατά την απεικόνιση στη Χ διεύθυνση.
- Choose font. Επιλογή γραμματοσειράς.

Γ.2.4.4. Το υπομενού Edit data.

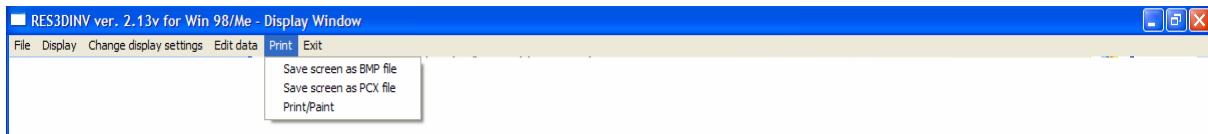


Σχήμα Γ.8: Το υπομενού Edit data.

- Apparent resistivity statistics. Απεικονίζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης.

- RMS error statistics. Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται στην οθόνη η κατανομή του σφάλματος υπό μορφή ιστογράμματος.
- Change error limits. Αλλαγή των ορίων σφάλματος.

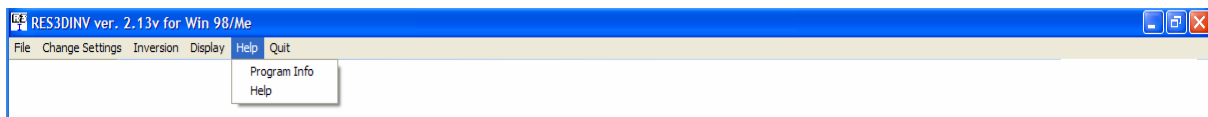
Γ.2.4.5. Το υπομενού Print.



Σχήμα Γ.9: Το υπομενού Print.

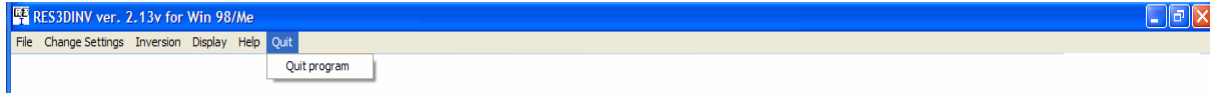
- Save screen as BMP file. Εδώ αποθηκεύονται τα αποτελέσματα σε αρχείο BMP.
- Save screen as PCX file Εδώ αποθηκεύονται τα αποτελέσματα σε αρχείο PCX.

Γ.2.5. Το μενού Help.



Σχήμα Γ.10: Το μενού Help.

- Program info. Εδώ παρέχονται πληροφορίες για το πρόγραμμα.
- Help. Με την επιλογή αυτή παρέχεται στο χρήστη όποια βοήθεια χρειάζεται κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Γ.2.6. Το μενού Quit.

Σχήμα Γ.11: Το μενού Quit.

- Quit program. Με την επιλογή αυτή τερματίζεται το πρόγραμμα.