

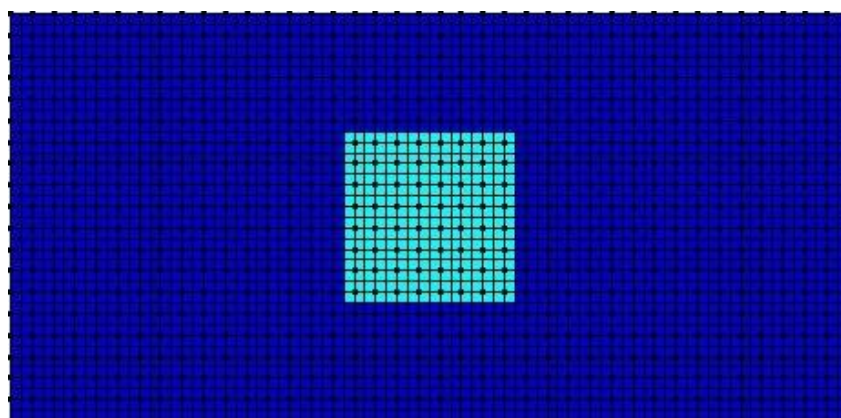


**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**«ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΗΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΠΗΛΑΙΩΣΕΩΝ»**

**ΜΑΡΙΟΣ ΜΑΥΡΗΣ**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Πολυτεχνίου Κρήτης (Επιβλέπων)  
Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής Πολυτεχνίου Κρήτης  
Κρητικάκης Γεώργιος, Ε.Δ.Ι.Π. Πολυτεχνίου Κρήτης

**ΧΑΝΙΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017**

Αφιερώνεται στους γονείς μου,  
Σταμάτη και Σταματία,  
Στην αδερφή μου Κατερίνα,  
για την υπομονή και επιμονή τους,  
για την στήριξη και την αγάπη τους.

## Πρόλογος

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στην Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνίου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Αντώνη Βαφείδη. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται την επεξεργασία και την ερμηνεία της ηλεκτρικής τομογραφίας για τον εντοπισμό καρστικών εσκώσεων κατά την εσκαφή της επέκτασης του Κρατικού Αερολιμένα Χανίων. Καθώς και συνδυάζοντας πραγματικά και συνθετικά δεδομένα, με σκοπό την δημιουργία πιο ολοκληρωμένων συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά καταρχάς τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βαφείδη Αντώνιο, για την συμβολή και τη συνεχή καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αλλά και για την υποστήριξη και την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας, μέχρι την τελική φάση της ολοκλήρωσής της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής, κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ, καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνίου Κρήτης και Δρ Γ. Κρητικάκη, ΕΔΙΠ, για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τον κ. Ανδρονικίδη Νικόλαο, ΕΤΕΠ, για την άψογη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθεια και διάθεση του χρόνου του, σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Ενα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, που με στήριξαν όλον αυτόν τον καιρό της φοίτησής μου.

Και τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους γονείς μου Σταμάτη και Σταματία, για τη συνεχή υποστήριξη που μου παρείχαν, είτε υλική είτε ηθική, και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, όπου χωρίς αυτά δεν θα είχα καταφέρει να τις ολοκληρώσω.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επεξεργασία και την ερμηνεία γεωηλεκτρικών δεδομένων για τον εντοπισμό καρστικών εγκοίλων στις θέσεις επέκτασης του κτιρίου του Κρατικού Αερολιμένα Χανίων. Η γεωφυσική έρευνα έγινε με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Για να γίνει καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα χρησιμοποιώντας τα λογισμικά πακέτα RES2DMOD και RES3DMOD. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των συνθετικών γεωηλεκτρικών δεδομένων στις δύο διαστάσεις με το λογισμικό RES2DINV και στις τρεις διαστάσεις με το RES3DINV. Επιλέχθηκαν οι διατάξεις των ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου, πόλου-διπόλου και Wenner-Schlumberger. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι αντιστροφής δεδομένων (Least-Squares Inversion, Robust Inversion).

Στην συνέχεια επιλέχθηκαν πραγματικά δεδομένα από τμήμα της περιοχής επέκτασης του κτιρίου του Κρατικού Αερολιμένα Χανίων. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με την χρήση κατάλληλων λογισμικών αλλά και μεθόδων αντιστροφής στις δύο και τρεις διαστάσεις. Δημιουργήθηκαν γεωηλεκτρικές τομές και έγινε σύγκριση των τομών με γεωτρητικά δεδομένα για την βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων.

Στις τομές εμφανίζονται δομές υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι οποίες σύμφωνα και με τα γεωτρητικά στοιχεία αποδίδονται σε μικρού μεγέθους έγκοιλα τα οποία ελήφθησαν υπόψη κατά τη θεμελίωση των νέων κτιρίων του Κρατικού Αερολιμένα Χανίων.



## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	3
Περίληψη .....	4
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	7
1.1 Σκοπός.....	7
1.2 Γενικά .....	7
1.3 Γεωφυσική διασκόπηση και παρουσίαση εφαρμογών.....	9
Κεφάλαιο 2. Ηλεκτρικές Μέθοδοι – Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη.....	11
2.3 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης .....	13
2.4 Το ευθύ πρόβλημα.....	13
2.5 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση .....	14
2.5 Διατάξεις των ηλεκτροδίων.....	14
2.7 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.....	15
Κεφάλαιο 3 : Ηλεκτρική Τομογραφία .....	17
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Θεωρία .....	17
3.3 Συλλογή δεδομένων .....	18
3.4 Αντιστροφή των Δεδομένων.....	18
3.5 Μέθοδοι αντιστροφής ηλεκτρικών δεδομένων.....	22
Κεφάλαιο 4 : Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων.....	23
4.1 Εισαγωγή.....	23
4.2 Επεξεργασία στις 2 διαστάσεις .....	23
4.2.1 Εισαγωγή.....	23
4.2.2 Μοντέλα και Συνθετικά Δεδομένα .....	24
4.2.3 Συνθετικά μοντέλα, διάταξη διπόλου-διπόλου.....	24
4.2.4 Μοντέλα, διάταξη Wenner-Schlumberger .....	32
4.3 Επεξεργασία στις 3 διαστάσεις .....	34
4.3.1 Εισαγωγή.....	34
4.3.2 Τρισδιάστατο μοντέλο .....	35
4.3.3 Συνθετικά για διάταξη διπόλου-διπόλου .....	35
Κεφάλαιο 5 : Εφαρμογή σε δεδομένα από την επέκταση του αεροδρομίου.....	44

5.1 Εισαγωγή.....	44
5.2 Στόχος της έρευνας.....	45
5.3 Παράμετροι της γεωφυσικής έρευνας .....	45
5.4 Περιοχή Διασκόπησης .....	46
5.5 Γεωλογία Περιοχής .....	47
5.5 Γεωτρητικά στοιχεία .....	48
5.6 Ηλεκτρική τομογραφία σε 2 άξονες .....	53
5.7 Ηλεκτρική τομογραφία σε 3 άξονες .....	57
Κεφάλαιο 6 : Συπεράσματα .....	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65
Παράρτημα Α.....	67
Παράρτημα Β .....	86
Παράρτημα Γ.....	91

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός

Η διπλωματική αυτή εργασία είχε σαν στόχο την μελέτη της δυνατότητας της ηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό σπηλαίων. Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε γεωφυσική διασκόπηση με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε σε 2 διαστάσεις και σε 3 διαστάσεις.

## 1.2 Γενικά

Γεωφυσική είναι η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της φυσικής για να μελετήσει τη Γη. Μελετάει τις φυσικές ιδιότητες της Γης από το κέντρο της μέχρι και την εξωτερική ατμόσφαιρα, δηλαδή περιλαμβάνει την μελέτη της «στερεάς» Γής, της θάλασσας, της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας.

Η γεωφυσική έρευνα έχει στόχο την αξιοποίηση των γεωφυσικών γνώσεων για πρακτικούς σκοπούς. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έρευνα έχει μεγάλη πρακτική σημασία διότι με τις γεωφυσικές μεθόδους :

- Μελετάται η δομή και οι γεωδυναμικές διαδικασίες στον φλοιό και στον πάνω μανδύα της Γης που καθορίζουν τις θέσεις πολλών δομών οικονομικής σημασίας.
- Εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης δομές που σχετίζονται με κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικών αερίων, με μεταλλεύματα, με πηγές γεωθερμικής ενέργειας, με ορυκτούς άνθρακες κλπ.
- Προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων της Γης που έχουν σχέση με την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων όπως θεμελιώσεις γεφυρών, φραγμάτων κλπ.

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

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

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικές μέθοδοι, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

Ο όρος γεωφυσική διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με εφαρμογή των νόμων της φυσικής. Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της. Η ποσότητα που μετράται είναι η ηλεκτρική τάση, ενώ η ποσότητα η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται συνήθως ο καθορισμός και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι εφαρμόζονται επιτυχώς όταν υπάρχει σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπο μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος. Πρόσφατες αναφορές έδειξαν ότι ο συνδυασμός γεωλογικών και γεωφυσικών δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους, την στρωματογραφία και τον εντοπισμό πιθανών ανωμαλιών στα πετρώματα. Πρωταρχικός ρόλος των γεωφυσικών μελετών είναι η μέτρηση και η απεικόνιση των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η αγωγιμότητα και ο όγκος, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν γεωλογικές ιδιότητες όπως η στρωματογραφία, η δομή, ο κορεσμός, το πορώδες, και η διαπερατότητα. Επίσης, στην ηλεκτρική τομογραφία, η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους της γεωφυσικής διασκόπησης τόσο από την λειτουργική πλευρά όσο και από την θεωρητική πλευρά. Έχει σκοπό τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, ή καλύτερα την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή.

### 1.3 Γεωφυσική διασκόπηση και παρουσίαση εφαρμογών

Ο Gad El-Qady και οι συνεργάτες του (2005) αναφέρουν ότι: στο Ν.Α. Κάιρο, στη Αίγυπτο η εμφάνιση σπηλαίων και οι καθιζήσεις αποτελούν αιτίες καταστροφών σε κατοικημένες περιοχές. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν κατά την έρευνα είναι η ηλεκτρική τομογραφία και το γεωραντάρ. Η έρευνα διεξάχθηκε πάνω από ένα σπήλαιο. Από το συνδυασμό των μεθόδων απεικονίστηκε το σπήλαιο σε βάθος 2μ και πλάτος 4μ. Η έρευνα αποκάλυψε ότι η περιοχή επηρεάζεται επίσης από τις κατακόρυφες ζώνες ρηγμάτωσης του ασβεστόλιθου.

Ο Matias και οι συνεργάτες του (2006) περιγράφουν την περίπτωση της εφαρμογής των γεωηλεκτρικών μεθόδων για την ανίχνευση ενός τάφου πιθανόν του Damiao de Goes, εξέχοντα Πορτογάλου ανθρωπιστή που έζησε τον XVI αιώνα. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε εντός της Εκκλησίας Varzea με τις διάταξεις διπόλου- διπόλου, και πόλου-πόλου. Τα αποτελέσματα από την αντιστροφή των δεδομένων έδειξαν ανωμαλίες υψηλής αντίστασης κοντά στα τοιχώματα του τάφου. Ανωμαλίες χαμηλής αντίστασης παρατηρήθηκαν όπου είχαν την υπόνοια παρουσίας του νερού που εμπλουτίζεται με ιόντα λόγω της αποσύνθεσης των ανθρώπινων οργάνων. Το αποτέλεσμα ενισχύεται από την απεικόνιση της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας. Από τις ανασκαφές, που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας των γεωηλεκτρικών, βρέθηκε με επιτυχία ένα τάφος  $2.7 \times 0.8 \times 1.7$  μ, όπου είχαν συγκεντρωθεί πολλά ανθρώπινα οστά. Ένα 3Δ μοντέλο ηλεκτρικής αντίστασης που ενσωματώνει τα κύρια χαρακτηριστικά του τάφου κατασκευάστηκε μετά την ανασκαφή.

Ο Leucci (2006) σε μια αρχαιολογική έρευνα για την αποκατάσταση της Εκκλησίας στο Botrugno της Ιταλίας που χρονολογείται από 1500-1600 π.Χ. χρησιμοποίησε τη 3Δ ηλεκτρική τομογραφία με σκοπό να προσδιορίσει την θεμελίωση της εκκλησίας και ειδικότερα η ύπαρξη κενών και ρωγμών στο υπόστρωμα. Η 3Δ ηλεκτρική τομογραφία κατάφερε να επιβεβαιώσει την παρουσία του νερού στο υπέδαφος και να εντοπίσει μια κοιλότητα σε περίπου 2 μέτρα σε βάθος.

Η Muchaidze (2008) στην έρευνα της που έγινε για το τμήμα Μεταφορών του Missouri (MODOT), σχεδίαζε να κατασκευάσει ένα νέο αυτοκινητόδρομο για την ανακούφιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά τις περιόδους αιχμής, το δρόμο 60/65. Το εργοτάξιο βρίσκεται στη νοτιοανατολική πλευρά του Springfield, Greene County, Missouri. Το υπόβαθρο της περιοχής που μελετήθηκε χαρακτηρίζεται από

καρστικές δομές, όπως υπόγεια ρέματα, υπόγειες σπηλιές και καθιζήσεις. Ο κύριος στόχος ήταν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως κενά γεμάτα αέρα, τα οποία θα μπορούσαν να δημιουργήσουν πιθανά προβλήματα. Για το έργο αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT). Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου - διπόλου διότι παρέχει γενικά την καλύτερη ανάλυση σε περιοχές με ιδιαίτερα μεταβλητό βάθος στο υπόστρωμα. Βάσει της ηλεκτρικής τομογραφίας τα κενές καρστικές δομές δεν εντοπίστηκαν στο δρόμο 60/65.

Ο Abu-Shariah (2009) χρησιμοποιεί την γεωηλεκτρική μέθοδο για τον εντοπισμό της θέσης και της έκτασης των υπογείων κοιλοτήτων. Έτσι, μια 2Δ γεωηλεκτρική τεχνική απεικόνισης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της γεωμετρίας μιας γνωστής υπόγειας κοιλότητας. Η χρήση της 2Δ γεωηλεκτρικής τεχνικής απεικόνισης έδειξε τις δυνατότητες της για την ανίχνευση κρυμμένων αντικείμενων.

Ο Martinez-Lopez (2011) ανέλυσε με την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης 3 κοιλότητες σχηματισμένες σε διαφορετικά γεωλογικά υπόβαθρα. Τα διαφορετικά υπόβαθρα είναι : γρανιτικά, φυλλιτικά και ψαμμιτικά. Σε κάθε περίπτωση εφαρμόστηκαν 3 διαφορετικές παρατάξεις (η διάταξη Wenner-Slumberger, η διάταξη Wenner και η διάταξη Διπόλου – Διπόλου). Κοιλότητες ακτίνας 1.5 μ εντοπίστηκαν και στην μέθοδο Wenner-Slumberger και στην μέθοδο Διπόλου – Διπόλου σε βάθος μεγαλύτερο των 4.6 μ.

Ο Carrière (2013) θέλησε να μελετήσει τη δομή καρστικής μη – κορεσμένης ζώνης σε ένα τυπικό μεσογειακό περιβάλλον όπου το έδαφος είναι λεπτό ή απέχει τελείως. Οι 2 μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη αυτή είναι : η μέθοδος του Γεωραντάρ (GPR) και η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT). Ο λόγος που εφαρμόστηκαν και οι μέθοδοι αυτές είναι γιατί καμία από τις μεθόδους από μόνη της δεν είναι αρκετή ώστε να παρέχει έναν ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό των γεωλογικών δεδομένων σε ένα καρστικό πεδίο.

Ο Martínez-Pagán (2013) με την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης εντόπισαν σε μικρά βάθη κοιλότητες λόγω εξόρυξης στην περιοχή της νοτιοανατολικής Ισπανίας. Η έρευνα έγινε σε μια περιοχή που είναι πρώην ορυχείο στο οποίο λόγω της έντονης εξορυκτικής δραστηριότητας έχουν δημιουργηθεί ανησυχίες γεωτεχνικού χαρακτήρα. Δηλαδή για το αν υπάρχουν προβλήματα θεμελίωσης σε κτήρια στην γύρω περιοχή. Στην περιοχή υπάρχει κατάρρευσης κοιλοτήτων λόγω του μηχανισμών αποσάθρωσης και διάβρωσης.

## Κεφάλαιο 2. Ηλεκτρικές Μέθοδοι – Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

### 2.1 Εισαγωγή

Η εμφάνιση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης χρονολογείται από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών επιτεύχθηκε ο εντοπισμός φυσικού αερίου στη Ρουμανία το 1923 και αλατούχων δόμων στη Γαλλία το 1926. Βασική επιδίωξη των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Μετρούμενο μέγεθος είναι η ηλεκτρική τάση. Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο καθορισμός της τιμής, καθώς και η μελέτη των μεταβολών αυτής στα επιφανειακά στρώματα, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

### 2.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη

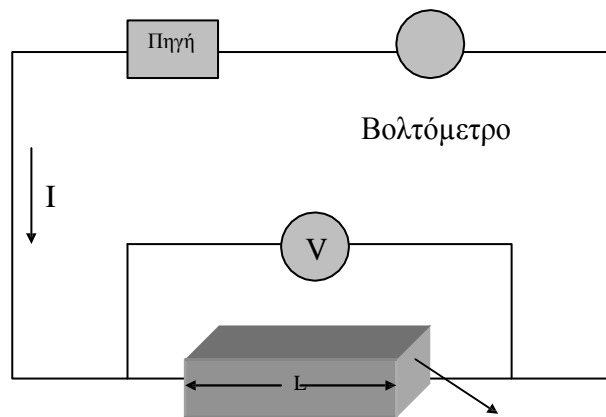
Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm, σύμφωνα με τον οποίο αντίσταση  $R$  (σε Ohm) ενός αγωγού ονομάζεται ο σταθερός λόγος της διαφοράς δυναμικού  $\Delta V$  (σε Volt) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση  $I$  (σε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

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

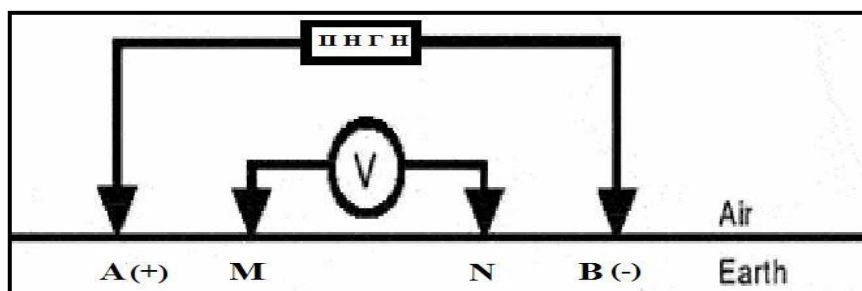
όπου  $\rho$  είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του αγωγού. Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) μονάδα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το 1  $\Omega\text{m}$ .



Διατομή εμβαδού A

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

Στην πράξη χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια για να γίνει μέτρηση της αντίστασης ενός ημιχώρου. Τα δύο από αυτά χρησιμεύουν για την εισαγωγή και κυκλοφορία του ρεύματος (A και B), ενώ με τη βοήθεια των άλλων μετράμε τη διαφορά δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία (M και N). Έστω ότι AM είναι η απόσταση του ηλεκτροδίου M από το ηλεκτρόδιο A, BM από το ηλεκτρόδιο B και AN και BN οι αντίστοιχες αποστάσεις του ηλεκτροδίου N από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος (Σχήμα 2.2).

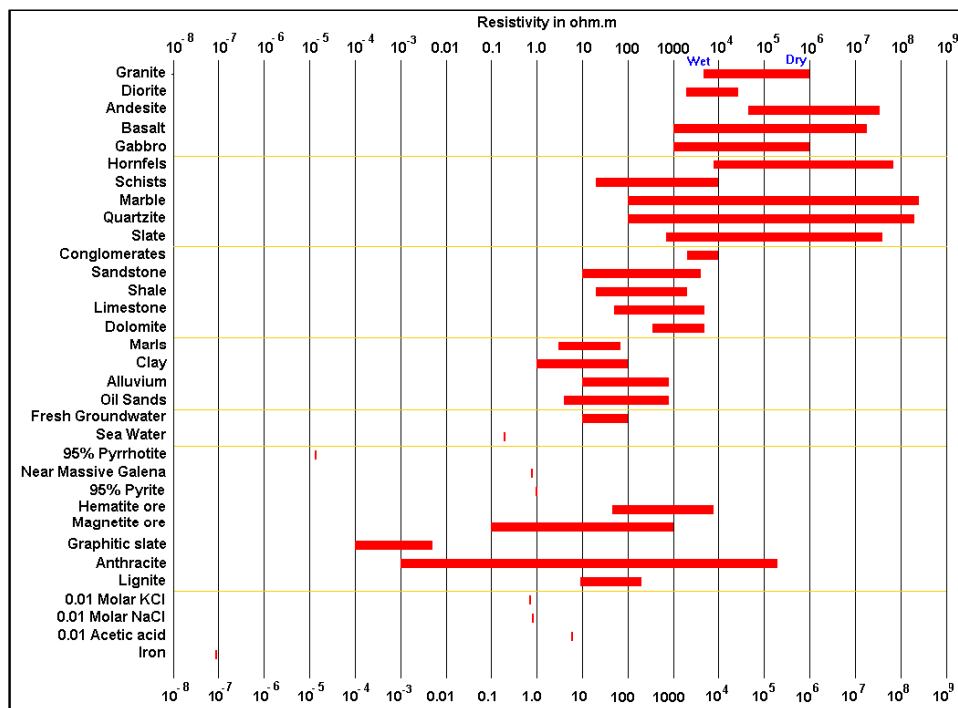


Σχήμα 2.2: Στην εικόνα αυτή φαίνεται μία τυπική διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων A, B (ηλεκτρόδια ρεύματος) και M, N (ηλεκτρόδια δυναμικού).



## 2.3 Μέθοδος 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 μετρίεται η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπέδαφος ρεύμα, σε δύο άλλα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 23: Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων, εδαφών και μεταλλευμάτων (Loke, 2004).

## 2.4 Το ευθύ πρόβλημα

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται κατά την ροή ρεύματος ηλεκτρικού περιγράφεται από την εξίσωση του Poisson:

$$(\partial/\partial x) [\sigma(x, z) (\partial V/\partial x)] + (\partial/\partial z) [\sigma(x, z) (\partial V/\partial z)] + q(x, z) = 0 \quad (2.3)$$

Όπου:  $q$  = πυκνότητα ρεύματος

$\sigma$  = ηλεκτρική αγωγιμότητα

$V = \text{το δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου}$

Η διαφορική εξίσωση (2.3) συνήθως επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

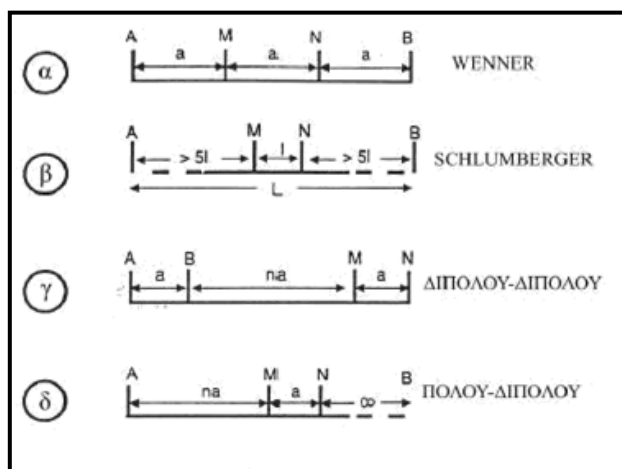
## 2.5 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

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 ( $\rho_a$ ).

## 2.5 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.

Στην πράξη, συχνότερα, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω διατάξεις που φαίνονται στο σχήμα:



Σχήμα 2.4: Διατάξεις ηλεκτροδίων.

## 2.7 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

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 γραμμών ρευματος. Άρα οι διατάξεις των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν διεύθυνση παράλληλη με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.

Πολλές φορές στην ύπαιθρο το επιτρεπόμενο ανάπτυγμα για την γραμμή διασκόπησης επιβάλλεται από τις συνθήκες της περιοχής και είναι συγκεκριμένο. Επίσης, το βάθος διασκόπησης δεν συμπίπτει με το βάθος στο οποίο είναι δυνατόν να εντοπιστεί ένα υπόγειο άνοιγμα. Για αυτό με τη βοήθεια των συνθετικών μοντέλων θα διερευνηθεί η επίδραση τριών βασικών παραγόντων στα μοντέλα ερμηνείας.

- Το μέγεθος του στόχου
- Το βάθος του στόχου
- Η επιλογή διάταξης ηλεκτροδίων

## Κεφάλαιο 3 : Ηλεκτρική Τομογραφία

### 3.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική τομογραφία 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).

Η γεωηλεκτρική διασκόπηση έχει εξελιχθεί για τις απαιτήσεις ερευνών μεγάλης κλίμακας: μια σειρά από ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους και μέσω πολυκάναλου καλωδίου λαμβάνονται αυτόματα μετρήσεις οδεύσεως πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος με συνεχώς αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων.

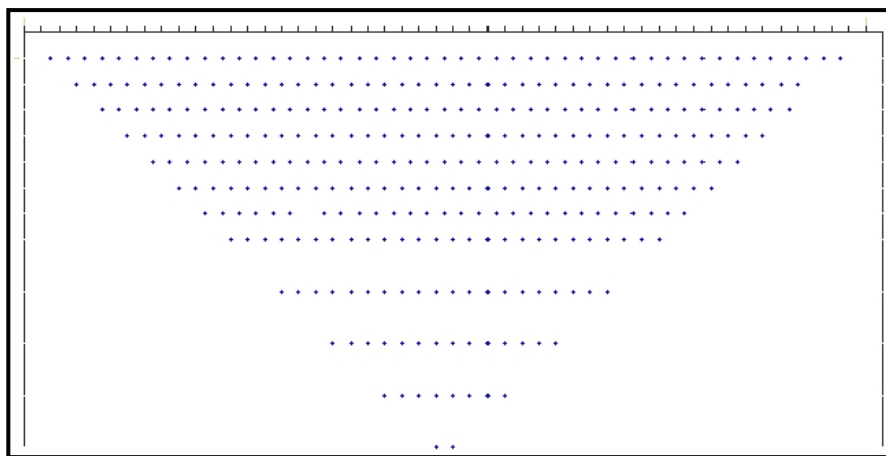
### 3.2 Θεωρία

Με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας επιτυγχάνεται η λεπτομερής απεικόνιση του υπεδάφους καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Ο όρος τομογραφία παράγεται από τη λέξη «τομή» και σημαίνει απεικόνιση τομής π.χ. του υπεδάφους. Στην ηλεκτρική τομογραφία απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση. Ευθύ πρόβλημα στη μέθοδο μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζουμε τον υπολογισμό της διαφοράς δυναμικού και εν συνεχεία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις ήδη γνωστές πραγματικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Αντίστροφο πρόβλημα ονομάζουμε τον υπολογισμό των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες (Γκανιάτσος,1995). Η εύρεση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυνατή με τους αλγόριθμους αντιστροφής. Αν και η αντιστροφή είναι ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss–Newton με εξομάλυνση αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

### 3.3 Συλλογή δεδομένων

Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι διάταξεις Wenner – Schlumberger, πόλου-διπόλου και διπόλου-διπόλου. Η πρώτη πρόκειται για ένα συνδυασμό των δύο διατάξεων, όπου η διάταξη των ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος για την πρώτη μέτρηση πραγματοποιείται σύμφωνα με τη διάταξη Wenner. Εν συνεχεία η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού παραμένει σταθερή από το κέντρο της διάταξης και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, πάντα συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης (τρόπος πραγματοποίησης μετρήσεων με τη διάταξη Schlumberger). Στη διάταξη Wenner η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερή και ίση με  $a$  και όλη η διάταξη μετακινείται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Στη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα βάθη, αυξάνεται σταδιακά η απόσταση σε  $2a$ ,  $3a$  κ.ο.κ.

Στη διάταξη Schlumberger η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, συμμετρικά πάντα με το κέντρο της όλης διάταξης. Για την επίτευξη διέλευσης ρεύματος σε μεγαλύτερα βάθη αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος.



Σχήμα 3.1: Διάταξη των δεδομένων στην ψευδοτομή του υπεδάφους (Σούρλας, 2000).

### 3.4 Αντιστροφή των Δεδομένων

Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις. Στα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα

που χρησιμοποιείται η αντιστροφή, τα δεδομένα συνδέονται με μηγραμμικές σχέσεις με τις παραμέτρους του μοντέλου. Έτσι και στην περίπτωση της αντιστροφής των φαινόμενων αντιστάσεων το πρόβλημα είναι μη γραμμικό. Επιπλέον το πρόβλημα είναι υπερπροσδιορισμένο, δηλαδή ο αριθμός των δεδομένων υπερβαίνει τον αριθμό των παραμέτρων του μοντέλου.

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

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

$$d_i=f_i(m_1, m_2, \dots, m_M)+e \quad (3.1)$$

όπου  $e$  το σφάλμα των μετρήσεων.

Για το αρχικό μοντέλο  $m^0 = (m^0_1, m^0_2, \dots, m^0_M)$  είναι:

$$D_i= f_i (m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0) + e \quad (3.2)$$

Προσεγγίζοντας τη συνάρτηση  $f_i$  με σειρά Taylor γύρω από το  $m_0$  προκύπτει:

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

Το σφάλμα από τη σχέση είναι:

$$e_i= d_i- f_i(m) \approx d_i - f_i(m^0) - \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \bigg|_{m_j=m_j^0} \delta m_j \right\} \quad (3.3)$$

Αν  $\Delta d = d_i - f_i(m^0)$  είναι ο πίνακας στήλη των διαφορών ανάμεσα στις πραγματικές μετρήσεις και στις θεωρητικές,  $A$  ο πίνακας των μερικών παραγώγων της συνάρτησης  $f$  ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου, και  $x$  ο πίνακας στήλη των διορθώσεων  $\delta m$  που πρέπει να προστεθούν στο  $m_0$  για να προκύψει το βελτιωμένο μοντέλο, η παραπάνω

σχέση γίνεται:

$$e_i \approx \Delta d - Ax \quad (3.4)$$

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

$$q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad (3.5)$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το  $q$  ως προς  $x$  και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων επιβάλλεται περιορισμός στον πίνακα  $x$  με στόχο να μην αυξάνονται απότομα οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διαδοχικών ορθογωνίων παραλληλογράμμων του μοντέλου. Η λύση  $x$  προστίθεται στο αρχικό μοντέλο  $m^0$  και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο  $m^1$ .

$$m^1 = m^0 + x \quad (3.6)$$

Λόγω όμως του ότι η λύση προκύπτει από προσέγγιση μη γραμμικού προβλήματος είναι απαραίτητο να εφαρμοσθεί επαναληπτικά η όλη διαδικασία χρησιμοποιώντας το  $m^1$  ως το νέο αρχικό μοντέλο. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS),

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad (3.7)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των μετρήσεων, δίνει ένα μέτρο του πόσο καλά ταιριάζουν οι θεωρητικές μετρήσεις με τις πραγματικές για κάθε μοντέλο. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της αντιστροφής δεν έχει μονοσήμαντη λύση. Το μοντέλο με το μικρότερο σφάλμα δεν σημαίνει ότι είναι γεωλογικά αποδεκτό. Από τη χρήση γεωλογικών πληροφοριών βελτιώνεται η αξιοπιστία του προκύπτοντος μοντέλου. Στην



όλη διαδικασία οι υπολογισμοί γίνονται με τους λογάριθμους των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φαινόμενης αντίστασης.

Από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν (Παπαδόπουλος, 2007) οι κανονικές εξισώσεις:

$$(A^T D^T D A)x = (A^T D^T D)\Delta d \quad (3.8)$$

όπου  $D$  είναι ο  $M \times M$  πίνακας στατιστικών βαρών, τα στοιχεία του οποίου είναι τα σχετικά βάρη που εξαρτώνται από την ακρίβεια κάθε μέτρησης.

Η επίλυση τους ως προς  $x$  προκύπτει η νέα εξίσωση:

$$x = (A^T D^T D A)^{-1} (A^T D^T D)\Delta d \quad (3.9)$$

όπου το  $(A^T D^T D A)^{-1}$  είναι ο ψευδοαντίστροφος του  $A$ .

Με βάση την παραπάνω εξίσωση μπορεί να καθοριστεί ένας επαναληπτικός αλγόριθμος επίλυσης του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος. Έστω ότι κατά την  $k$  επανάληψη η εκτίμηση του μοντέλου της αντίστασης είναι  $m_k$  τότε:

- Υπολογίζονται οι θεωρητικές φαινόμενες αντιστάσεις  $f(m_k)$  και ο Ιακωβιανός πίνακας  $A_k$  για την κατανομή της αντίστασης  $m_k$ , μέσω της επίλυσης του ευθέως προβλήματος.

- Υπολογίζεται το διάνυσμα διόρθωσης του μοντέλου των αντιστάσεων:

$$x_k = (A_k^T D^T D A_k)^{-1} (A_k^T D^T D)\Delta d_k \quad (3.10)$$

- Το βελτιωμένο μοντέλο των αντιστάσεων προκύπτει από την πρόσθεση της διόρθωσης στο προηγούμενο μοντέλο  $m_{k+1} = m_k + x_k$ . Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν κάποια προκαθορισμένα κριτήρια σύγκλισης καταρματισμού.

### 3.5 Μέθοδοι αντιστροφής ηλεκτρικών δεδομένων

Για την αντιστροφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε τα προγράμματα RES2DINV και RES3DINV. Το συγκεκριμένο λογισμικό περιέχει διάφορες μεθόδους για την αντιστροφή των δεδομένων. Από αυτές, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω:

- Κανονικοποίηση με Περιορισμούς Εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion)

Με τη μέθοδο αυτή ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων με χρήση της νόρμας L2. Αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

- Μέθοδος Αντιστροφής με τη Χρήση της Νόρμας L1 (Robust)

Με την παραπάνω μέθοδο, ελαχιστοποιείται η απόλυτη διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων της αντίστασης. Με αυτό τον τρόπο στο μοντέλο που παράγεται, διακρίνονται καλύτερα οι διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ των περιοχών που παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από σχεδόν σταθερή τιμή αντίστασης. Η μέθοδος Robust παρουσιάζει καλά αποτελέσματα όταν το υπέδαφος αποτελείται από διαφορετικά γεωλογικά στρώματα, π. χ εδαφικός σχηματισμός και βράχος.

## Κεφάλαιο 4 : Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων

### 4.1 Εισαγωγή

Αρχικά στις 2 διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2DMOD και γεωηλεκτρικό μοντέλο. Για το μοντέλο αυτό, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα (φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις) και στην συνέχεια χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RES2DINV εκτιμήθηκαν οι πραγματικές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης.

Αντίστοιχα και για τις 3 διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES3DMOD και τρισδιάστατο μοντέλο. Στην συνέχεια τα αποτελέσματα εισήχθησαν στο πρόγραμμα RES3DMOD με σκοπό να βρεθούν οι πραγματικές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιήθηκαν 3 διατάξεις ηλεκτροδίων, η Wenner – Schlumberger, η πόλου – διπόλου και η διπόλου – διπόλου. Στα συνθετικά δεδομένα κάθε διάταξης εφαρμόστηκαν 3 διαφορετικοί μέθοδοι αντιστροφής, η μέθοδος Κανονικοποίηση με Περιορισμούς Εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion) , η μέθοδος Αντιστροφής με τη Χρήση της Νόρμας L1 (Robust) και η μέθοδος Αντιστροφής 3D δεδομένων με την χρήση της 2D επεξεργασίας (RES2DINV).

### 4.2 Επεξεργασία στις 2 διαστάσεις

#### 4.2.1 Εισαγωγή

Με το πρόγραμμα RES2MOD γίνεται κατασκευή συνθετικών δεδομένων έτσι ώστε να γίνει ερμηνεία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο. Στο πρόγραμμα αυτό εισάγονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τον χρήστη. Κατασκευάζει δηλαδή συνθετικές τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια από το πρόγραμμα RES2DINV για την δημιουργία γεωηλεκτρικής τομής.

Χωρίζει την περιοχή σε μικρά ορθογώνια χωρία. Κάθε ορθογώνιο χωρίο μπορεί να δεχτεί ξεχωριστή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έτσι ώστε να κατασκευαστεί το εκάστοτε μοντέλο. Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης καθορίζονται τις

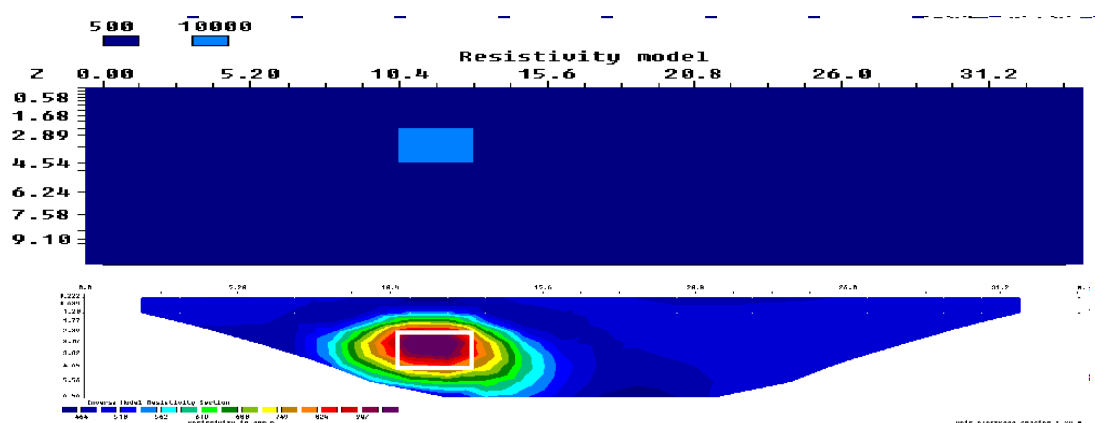
περισσότερες φορές σύμφωνα με την βιβλιογραφία, αφού το κάθε πέτρωμα έχει συγκεκριμένο εύρος τιμών. Το εν λόγω πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να προστεθεί και θόρυβος.

#### 4.2.2 Μοντέλα και Συνθετικά Δεδομένα

Δημιουργήθηκαν 8 μοντέλα. Σε όλα τα μοντέλα το περιβάλλον πέτρωμα έχει τιμή 500ohmm, η οποία αντιστοιχεί σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 27 ηλεκτρόδια με 1.3μ ισαπόσταση και οι διατάξεις: διπόλου – διπόλου και Wenner–Schlumberger.

#### 4.2.3 Συνθετικά μοντέλα, διάταξη διπόλου-διπόλου

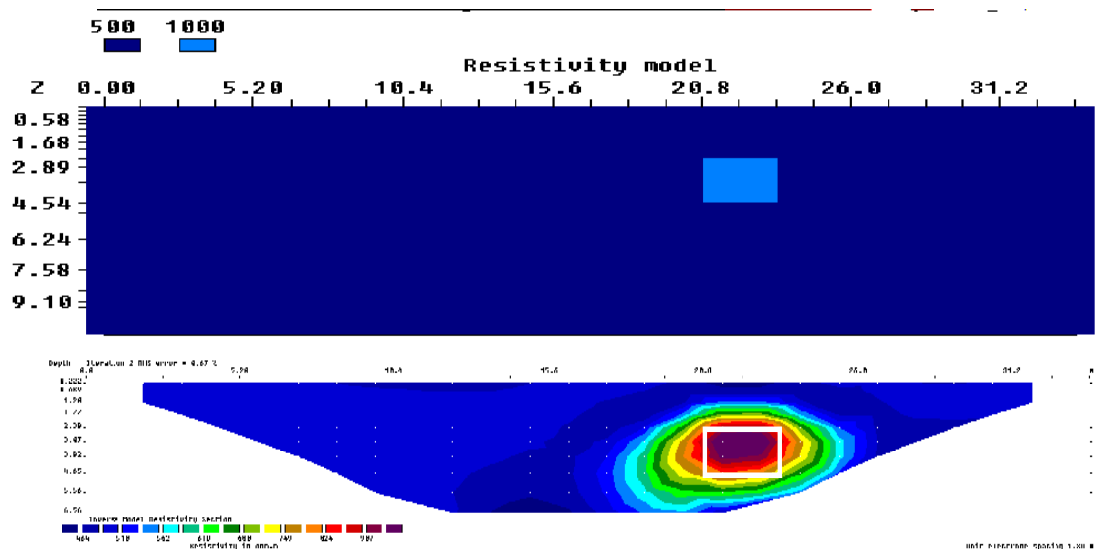
1<sup>ο</sup> Μοντέλο: Βόρειο τμήμα σπηλιάς



Σχήμα 4.1: 1<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Σε περιβάλλον πέτρωμα αντίστασης 500 ohmm τοποθετείται ορθογώνια δομή ύψους 2.5 μ και πλάτους 2 μ και αντίστασης 10000 ohmm που περιγράφει το βόρειο τμήμα της σπηλιάς στη θέση 11 έως 13 μ από την αρχή της γραμμής μελέτης και βάθος 2.5 έως 5 μ από την επιφάνεια. Η γεωηλεκτρική τομή από την αντιστροφή και μετά από 2 επαναλήψεις έχει σφάλμα 0.67%. Στο σχήμα 4.1 παρατηρείται το γεωηλεκτρικό μοντέλο.

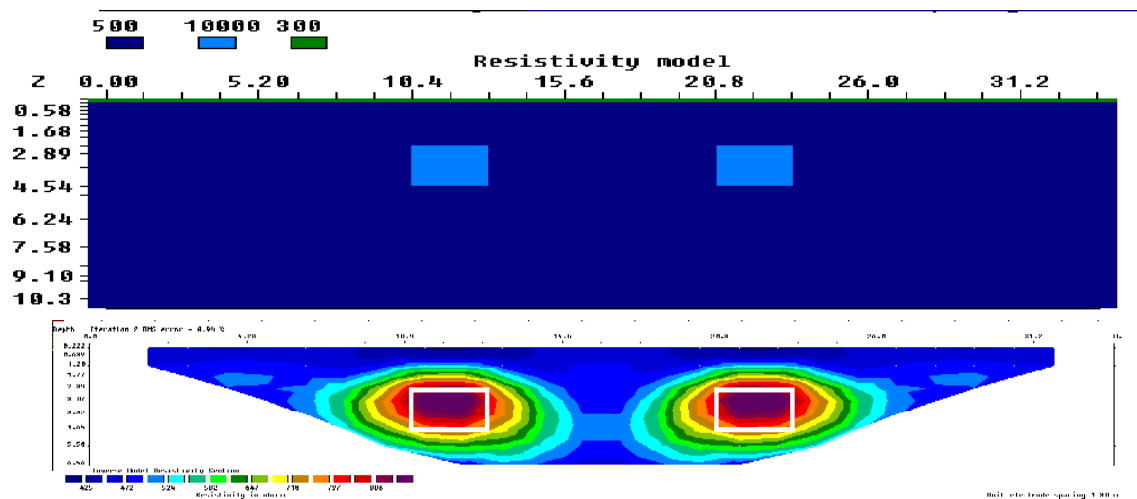
## 2<sup>ο</sup> Μοντέλο: Νότιο τμήμα σπηλιάς



Σχήμα 4.2: 2<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Σε αυτήν την περίπτωση η ανωμαλία βρίσκεται στη θέση 21-23 μ από την αρχή της γραμμής μελέτης και 2.5 με 5 μ βάθος και ο θόρυβος έχει επιλεγθεί να είναι μηδενικός. οι αντιστάσεις είναι ίδιες με το 1<sup>ο</sup> μοντέλο. Η γεωηλεκτρική τομή από την αντιστροφή και μετά από 2 επαναλήψεις έχει σφάλμα 0.67%.

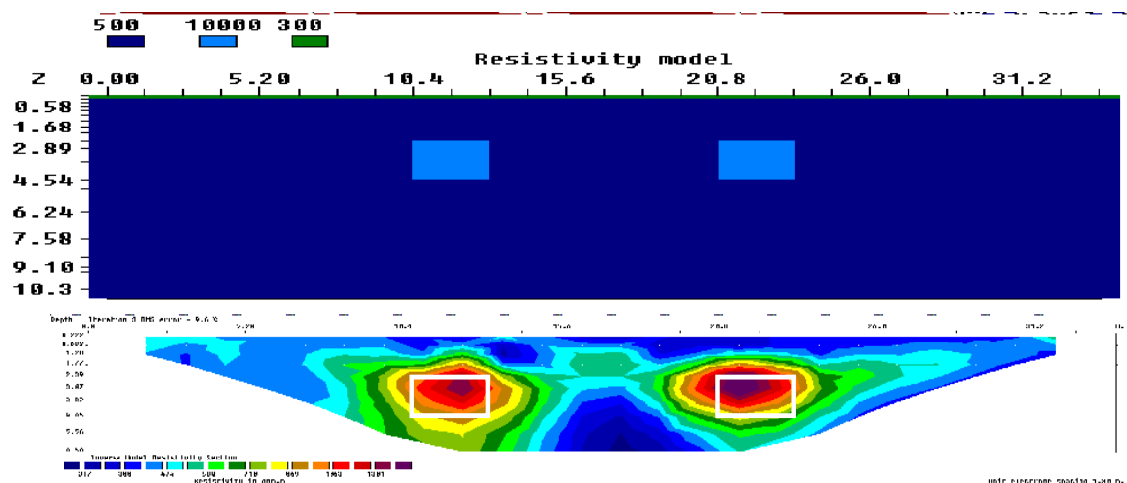
3<sup>ο</sup> Μοντέλο: Συνδυασμός βόρειου και νότιου τμήματος της σπηλιάς χωρίς χρήση θορύβου



Σχήμα 4.3: 3<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Το μοντέλο αυτό συνδυάζει τα δυο παραπάνω μοντέλα. Δηλαδή το βόρειο τμήμα στην θέση 11 έως 13 μ μήκος 2.5 με 5 μ βάθος και αντίσταση 10000 ohmm και το νότιο στη θέση 21 έως 23 μ μήκος 2.5 με 5 μ βάθος και αντίσταση επίσης 10000 ohmm σε περιβάλλον πέτρωμα αντίστασης 500 ohmm και με επιφανειακό στρώμα πάχους 0.2μ αντίστασης 300 ohmm. Η γεωηλεκτρική τομή από την αντιστροφή και μετά από 2 επαναλήψεις έχει σφάλμα 0.94%.

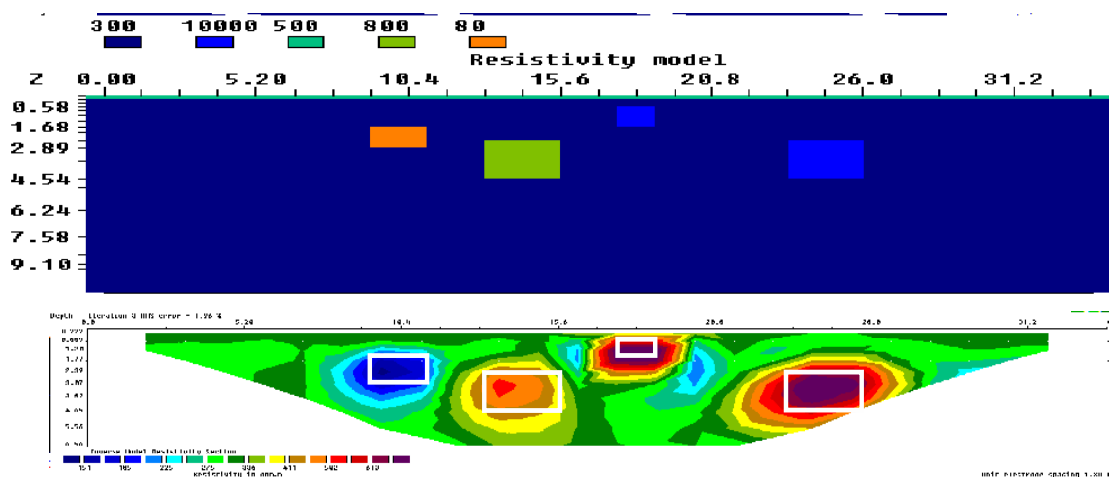
4<sup>ο</sup> Μοντέλο: Συνδυασμός βόρειου και νότιου τμήματος της σπηλιάς με χρήση θορύβου



Σχήμα 4.4: 4<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Χρησιμοποιείται η δυνατότητα που έχει το πρόγραμμα RES2MOD να προσθέτει θόρυβο στα συνθετικά δεδομένα. Η κλίμακα του θορύβου είναι 0 με 10 όπου 10% είναι το μέγιστο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ο μέγιστος θόρυβος (τιμή 10) γιατί η περιοχή μελέτης βρίσκεται μέσα σε κατοικημένη περιοχή. Η προσθήκη του θορύβου έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο περιβάλλον πέτρωμα.

## 5<sup>ο</sup> Μοντέλο



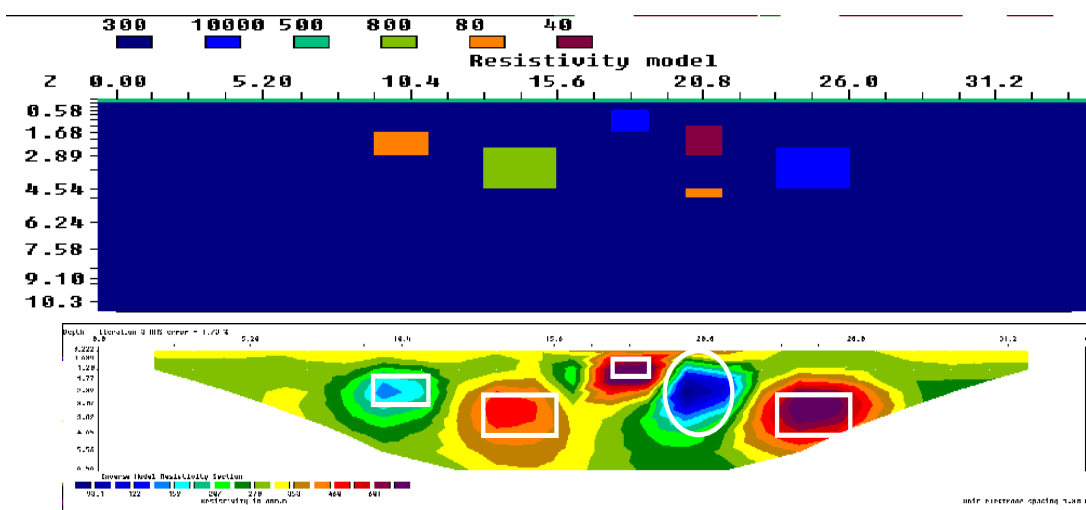
Σχήμα 4.5: 5<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Για την προσομοίωση των αποτελεσμάτων αντιστροφής στα πραγματικά δεδομένα μετακινήθηκαν οι 2 είσοδοι του σπηλαίου κατά 2.5 μ προς τα νότια μειώνοντας παράλληλα και την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του βορείου τμήματος της σπηλιάς από 10000 ohmm σε 800 ohmm.

Στη συνέχεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, στο ενδιάμεσο των τμημάτων της σπηλιάς τοποθετήθηκε περιοχή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 1000 ohmm, από 17.8 έως 18.5 μ μήκος και 0.5 έως 1.5 μ βάθος. Τέλος για τον εντοπισμό της περιοχής με χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση τοποθετήθηκε περιοχή αντίστασης 80 ohmm με μήκος από 8.45 έως 11.05 μ και βάθος από 1.3 έως 2.8 μ. Το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις έχει τιμή 1,96%.



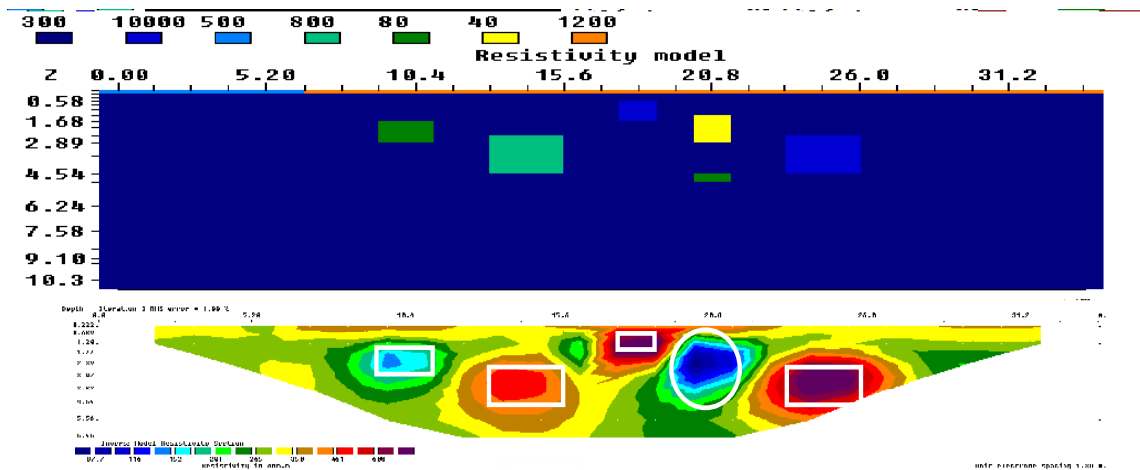
## 6<sup>ο</sup> Μοντέλο



Σχήμα 4.6: 6<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Επιπλέον σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο, έχουν τοποθετηθεί 2 περιοχές χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις θέσεις 20 έως 21.5 μ μήκος 1.3 έως 2.8 μ βάθος με τιμή 40 ohmm και 20 έως 21.5 μ μήκος , και βάθος 4.1 μ έως 5.9 μ με τιμή 80 ohmm. Το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις έχει τιμή 1,73%.

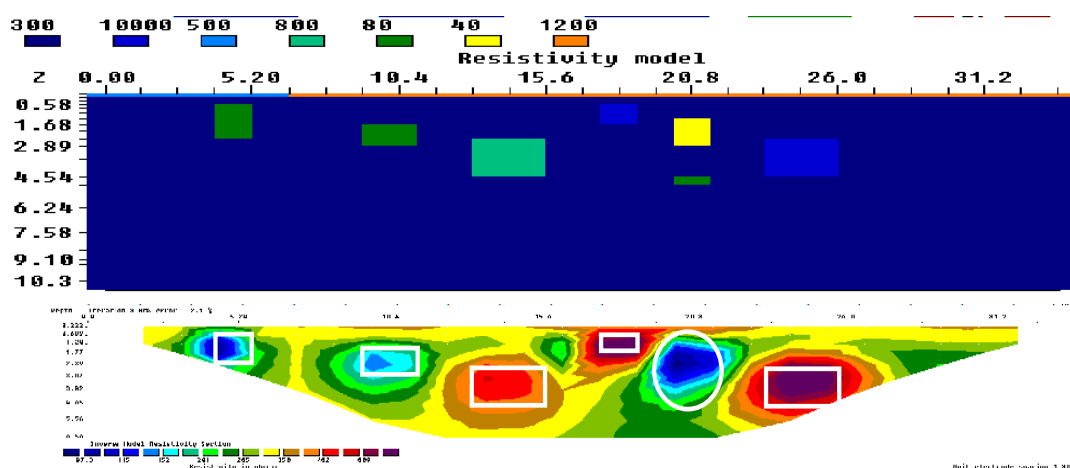
## 7<sup>ο</sup> Μοντέλο



Σχήμα 4.7: 7<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Στο μοντέλο 7 έγινε αλλαγή στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος από τα 500 ohmm στα 1200 ohmm, σε τμήμα από τα 6 έως τα 33 μ. Η αλλαγή αυτή έγινε βάση των γεωηλεκτρικών τομών αντιστροφής από πραγματικά δεδομένα μετά τα 6.5 μ από την αρχή της γραμμής μετρήσεων. Το πάχος του επιφανειακού στρώματος είναι 0,3 μ. Το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις έχει τιμή 1,98%.

## 8<sup>ο</sup> Μοντέλο

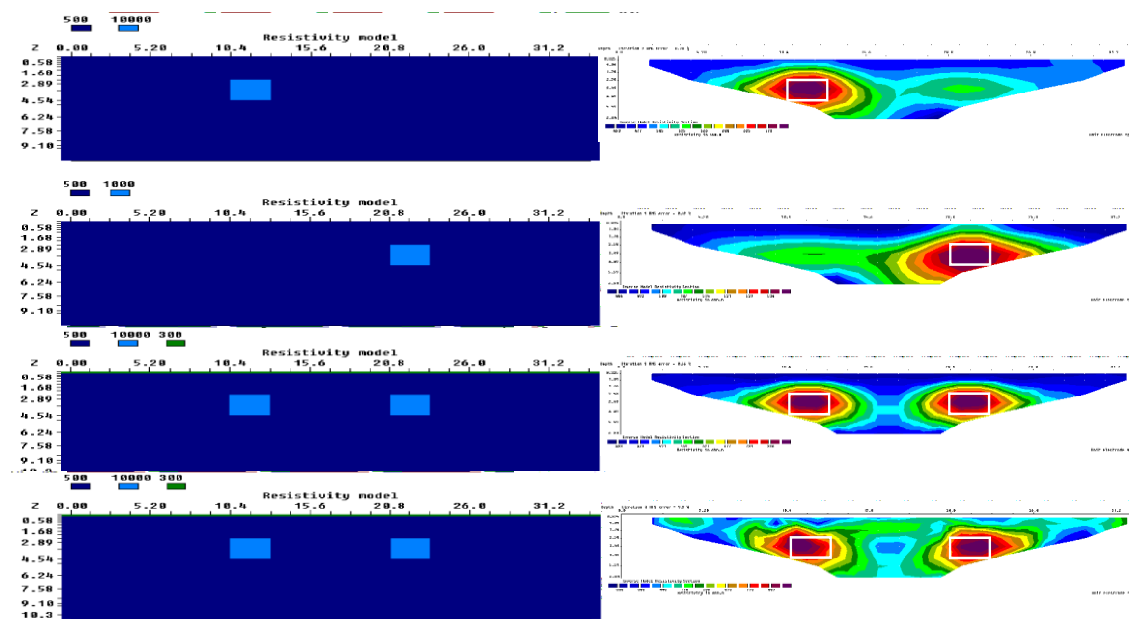


Σχήμα 4.8: 8<sup>ο</sup> μοντέλο. Κάτω διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Το τελευταίο μοντέλο των συνθετικών δεδομένων διαφέρει από το προηγούμενο στη θέση από 3.9 έως 6.5 μ μήκος και από 0.6 έως 2.3 μ βάθος με μια περιοχή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 80ohmm. Το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις είναι 2,1%.

#### 4.2.4 Μοντέλα, διάταξη Wenner-Schlumberger

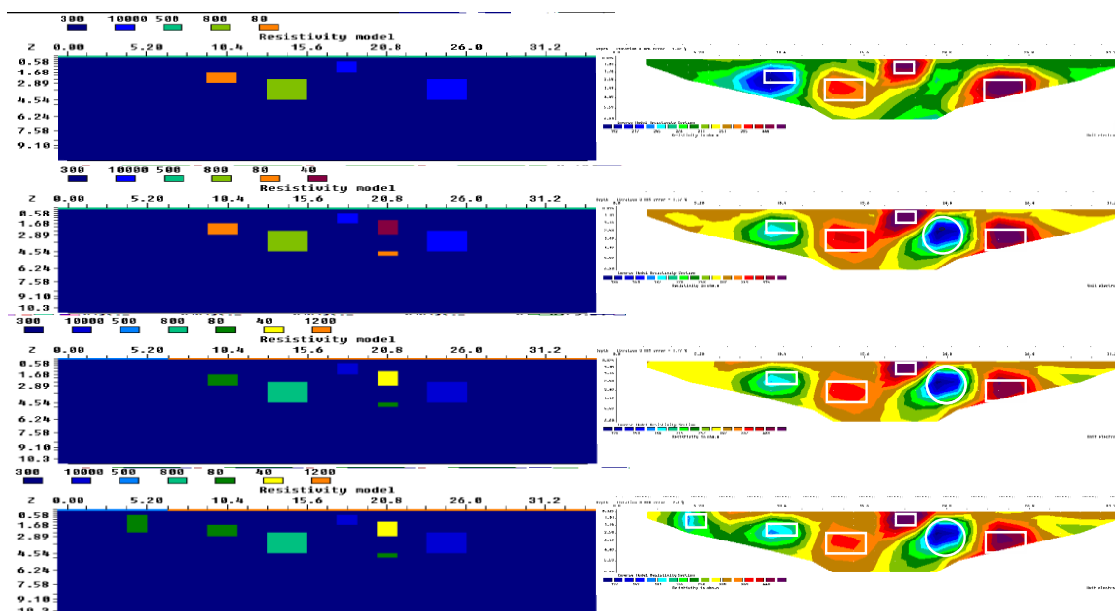
Στο παρακάτω σχήμα 4.9 διακρίνονται τα μοντέλα 1-4 και οι γεωηλεκτρικές τομές, τα οποία προκύπτουν από την διάταξη Wenner-Schlumberger.



Σχήμα 4.9: Αριστερά βρίσκονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και δεξιά οι γεωηλεκτρικές τομές μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Παραπάνω φαίνονται τα 4 μοντέλα. Στο πρώτο μοντέλο το σφάλμα μετά από 2 επαναλήψεις είναι 0,70%. Στο δεύτερο μοντέλο το σφάλμα μετά από μια επαναλήψη είναι 0,42%. Στο τρίτο μοντέλο το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις είναι 0,66%. Και στο τελευταίο μοντέλο το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις είναι 9,9%.

Στο παρακάτω σχήμα 4.10 διακρίνονται τα μοντέλα 5-8 και οι γεωηλεκτρικές τομές, τα οποία προκύπτουν από την διάταξη Wenner-Schlumberger.



Σχήμα 4.10: Αριστερά βρίσκονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και δεξιά οι γεωηλεκτρικές τομές οι γεωηλεκτρικές τομές μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης.

Παραπάνω απεικονίζονται τα μοντέλα μαζί με τις γεωηλεκτρικές τομές. Στο πέμπτο μοντέλο το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις είναι 1.32%. Στο έκτο μοντέλο το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις είναι 1.57%. Στο τρίτο μοντέλο το σφάλμα μετά από 3 επαναλήψεις είναι 1,77%. Και στο τελευταίο μοντέλο το σφάλμα μετα από 3 επαναλήψεις είναι 2.0%.

## 4.3 Επεξεργασία στις 3 διαστάσεις

### 4.3.1 Εισαγωγή

Για την ακριβέστερη προσομοίωση των συνθηκών στην υπό μελέτη περιοχή κρίθηκε απαραίτητη η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων. Στο πρόγραμμα RES3MOD εισάγονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και κατασκευάζει συνθετικές τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε και με τις 3 διατάξεις ηλεκτροδίων, την Wenner – Schlumberger, την πόλου – διπόλου και την διπόλου – διπόλου. Αντίστοιχα με πριν τα συνθετικά δεδομένα και το πρόγραμμα RES3DINV χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό να γίνει η αντιστροφή, αυτήν την φορά σε 3 διαστάσεις.

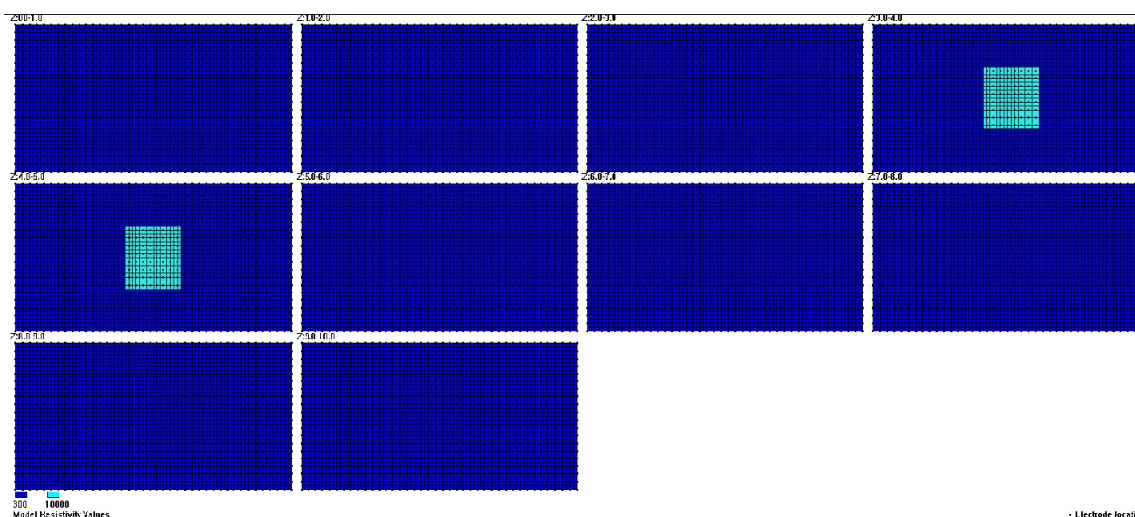
Εφαρμόστηκαν 3 μέθοδοι αντιστροφής: η μέθοδος Κανονικοποίησης με Περιορισμούς Εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion) , η μέθοδος Αντιστροφής με τη Χρήση της Νόρμας L1 (Robust) και η μέθοδος Αντιστροφής δεδομένων με την χρήση του προγράμματος RES2DINV). Για την τελευταία μέθοδο τα δεδομένα από το 3D-μοντέλο διαχωρίστηκαν σε ομάδες δεδομένων που αντιστοιχούν η κάθε μία σε μια γραμμή μελέτης. Ο σκοπός είναι να εξετασθεί ποιά μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

Η απεικόνιση του προκύπτοντος από την αντιστροφή γεωηλεκτρικού μοντέλου έγινε σε 2 επίπεδα: στο οριζόντιο (horizontal-slices) και στο κατακόρυφο (x-z). Και τέλος για καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων έχουνε ληφθεί υπόψιν και οι τιμές της ευαισθησίας (sensitivity). Η συνάρτηση της ευαισθησίας εκφράζει τον βαθμό που οποιαδήποτε μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενός τμήματος του υπεδάφους επηρεάζει το μετρούμενο δυναμικό. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της συνάρτησης της ευαισθησίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του τμήματος του υπεδάφους στην μέτρηση (Loke,2004).

### 4.3.2 Τρισδιάστατο μοντέλο

Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται το τρισδιάστατο μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό έχουμε 40 ηλεκτρόδια στον άξονα X και 20 ηλεκτρόδια στον άξονα Y. Η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων και στους 2 άξονες είναι 1μ.

Αποτελούνται από το περιβάλλον πέτρωμα με τιμή 300 ohmm καθώς και την σπηλιά με τιμή 10000 ohmm, η οποία βρίσκεται στο κέντρο του μοντέλου. Στο παρακάτω μοντέλο η θέση της σπηλιάς άξονα X είναι από τα 16μ έως 24μ, στον άξονα Y είναι από τα 6μ έως 14μ, ενώ στο βάθος η σπηλιά εμφανίζεται από τα 3μ έως τα 5μ.

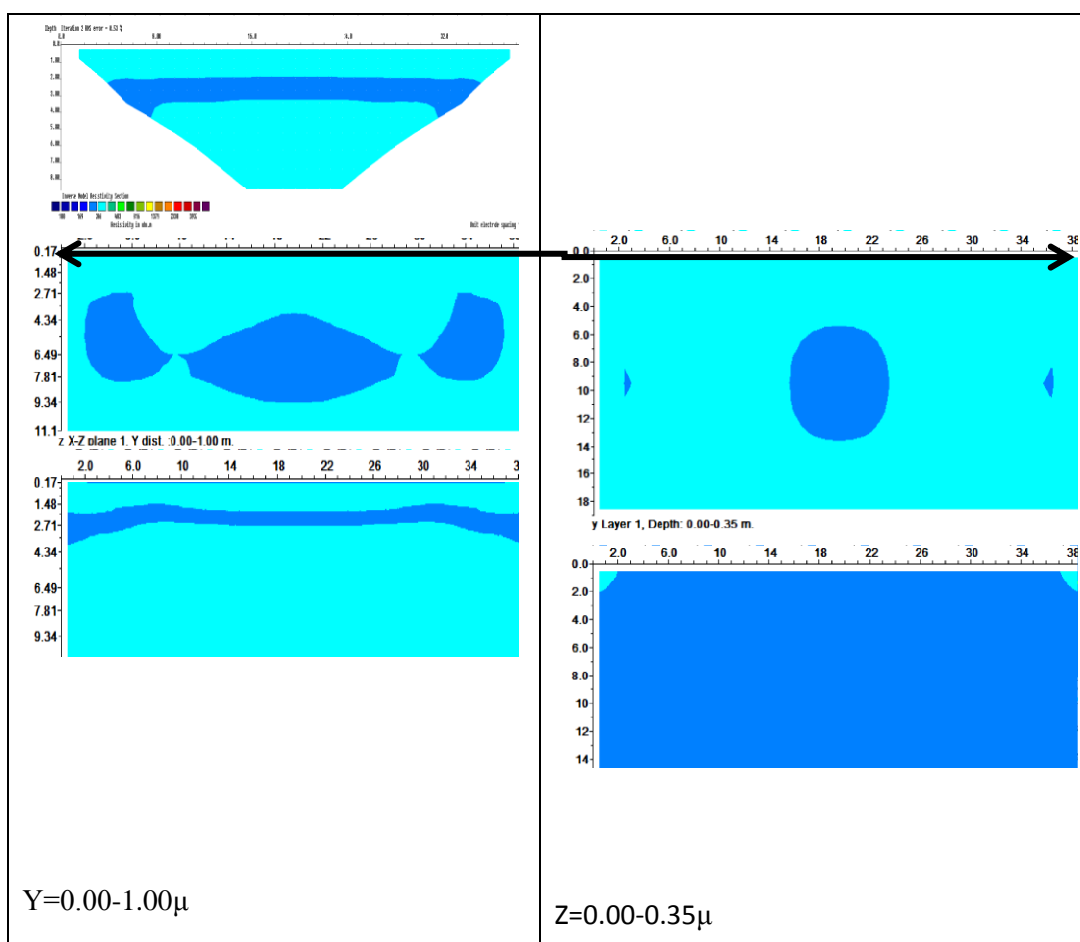


Σχήμα 4.11: Οριζόντιες τομές του 3D Μοντέλου.

### 4.3.3 Συνθετικά για διάταξη διπόλου-διπόλου

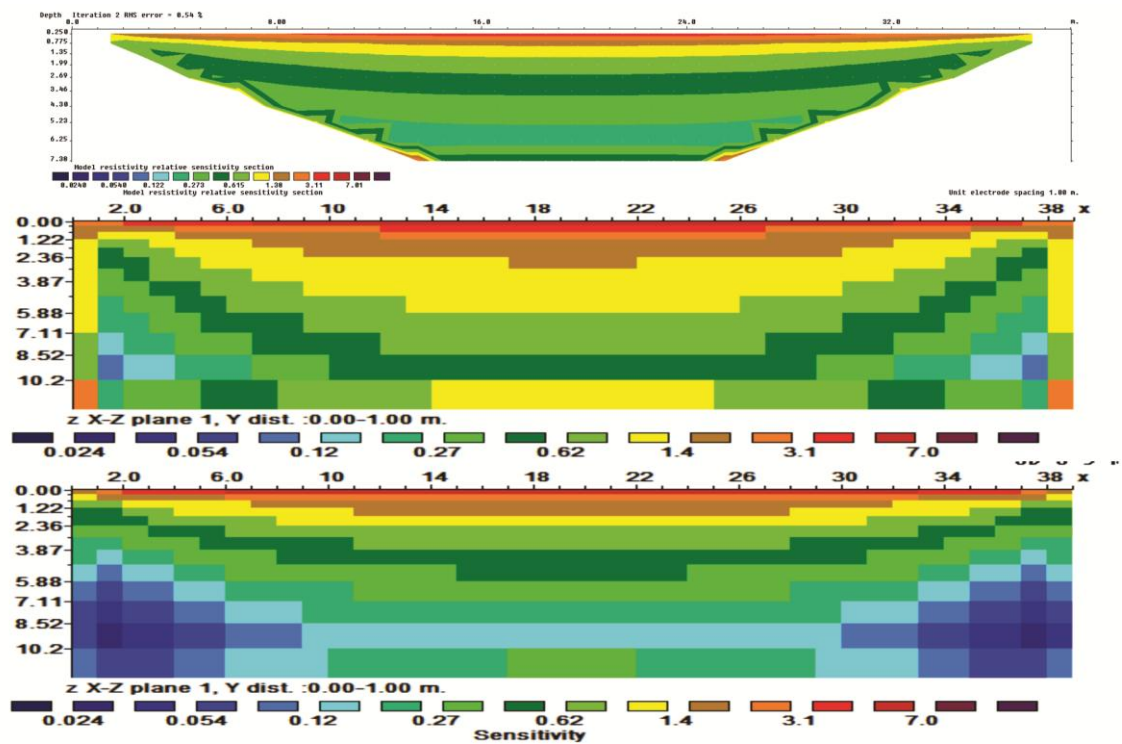
Στον άξονα xz έχει γίνει επεξεργασία με 3 διατάξεις ηλεκτροδίων. Χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι Κανονικοποίησης με Περιορισμούς Εξομάλυνσης, Αντιστροφής με τη Χρήση της Νόρμας L1 και Αντιστροφής 3D δεδομένων με την χρήση της 2D επεξεργασίας (RES2DINV).

Υπάρχουν 19 τομές σε κάθε μια από τις 3 επεξεργασίες. Στα σχήματα 4.12 - 4.18 επάνω εμφανίζεται η τομή από την επεξεργασία με το RES2DINV, στην μέση, από τη μέθοδο Κανονικοποίησης με Περιορισμούς Εξομάλυνσης και κάτω, από τη μέθοδο Robust. Στα ίδια σχήματα δεξιά εμφανίζονται οριζόντιες τομές από τις μεθόδους Κανονικοποίησης με Περιορισμούς Εξομάλυνσης (πάνω) και Robust (κάτω). Στην συνέχεια εμφανίζονται τα πιο σημαντικά αποτελέσματα της διάταξης διπόλου-διπόλου. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί σε τιμές 286-296 ohmm.



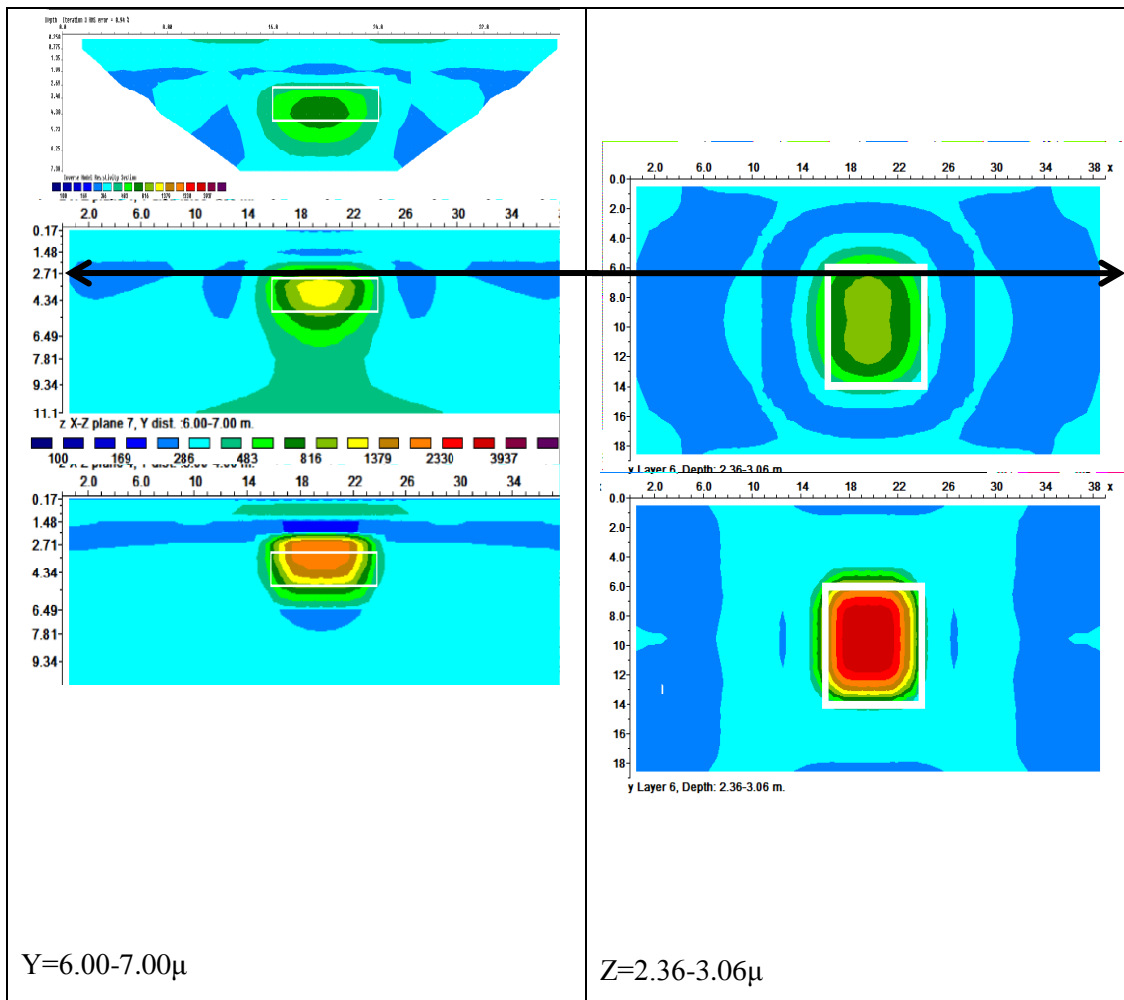
Σχήμα 4.12 : Γεωηλεκτρικές τομές για τη διάταξη διπόλου-διπόλου (Αριστερά) και οριζόντιες τομές για την ίδια διάταξη (Δεξιά).





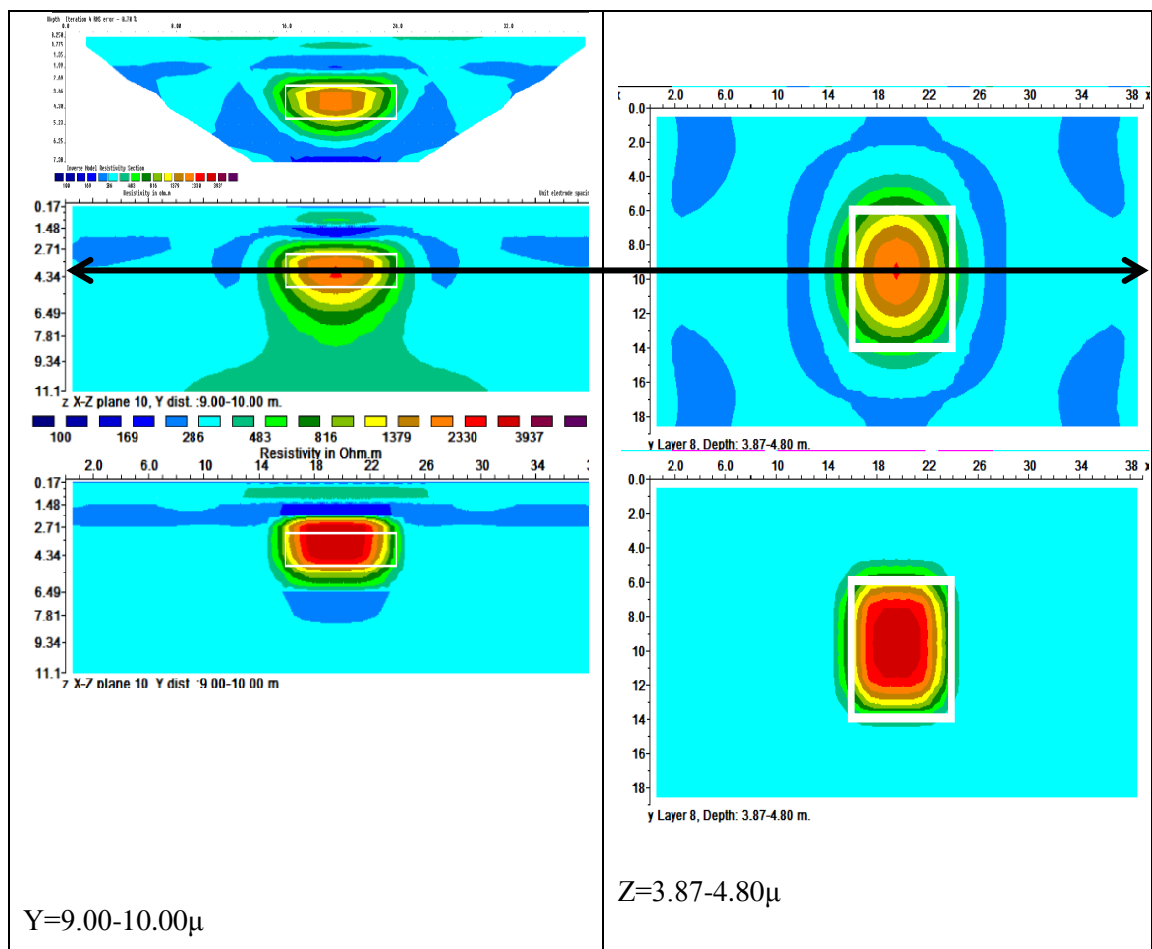
Σχήμα 4.13 : Απεικόνιση της ευαισθησίας για τις γεωηλεκτρικές τομές  $Y=0-1\mu$  που προκύπτουν από το τρισδιάστατο μοντέλο. Η επάνω εικόνα αντιστοιχεί στην επεξεργασία 2 διαστάσεων. Η μεσαία, στην μέθοδο smoothness constrained inversion και η κάτω, στην μέθοδο Robust.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται αυξημένη ευαισθησία στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε μικρά βάθη.



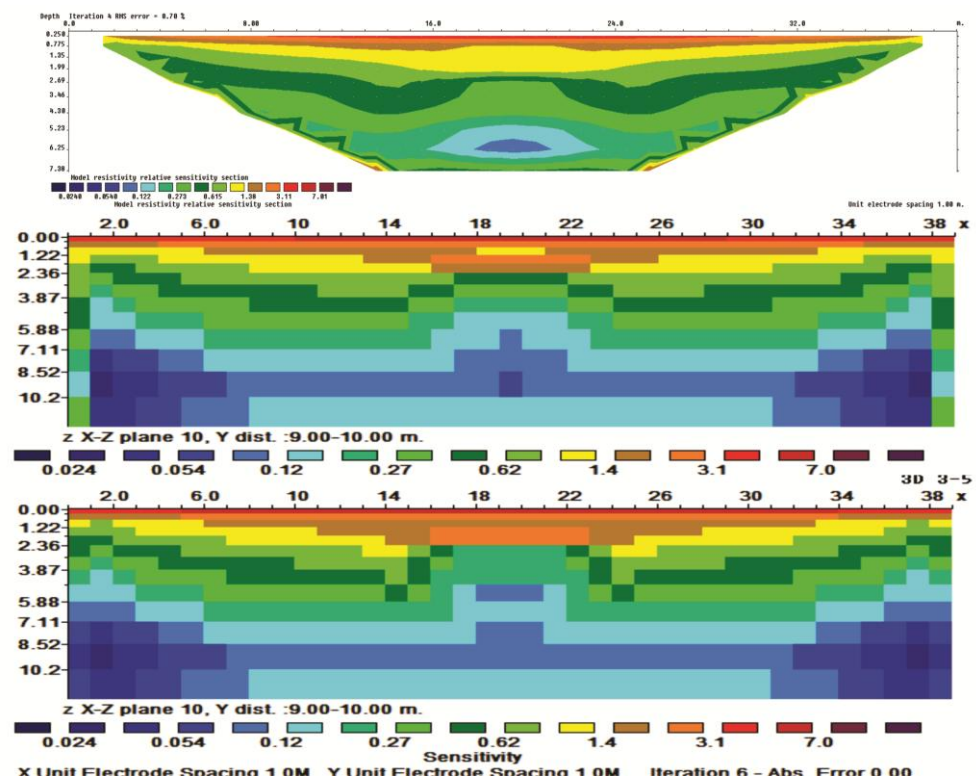
Σχήμα 4.14 : Γεωηλεκτρικές τομές για τη διάταξη διπόλου-διπόλου (Αριστερά) και οριζόντιες τομές για την ίδια διάταξη (Δεξιά).

Στις εικόνες είναι φανερές οι πιο υψηλές τιμές με πράσινο χρώμα (816 ohmm), με κίτρινο (1379 ohmm) και με πορτοκαλί χρώμα (2230 ohmm) που διακρίνεται στην κάτω τομή. Στο κέντρο της τελευταίας τομής (Robust) και σε σχήμα τετραγωνικό παρατηρείται, το πως διαγράφεται η σπηλιά ενώ στα 2D ακόμα οι τιμές είναι πιο χαμηλές. Στα δεξιά με την μέθοδο Robust οι τιμές είναι κόκκινες (4000 ohmm).



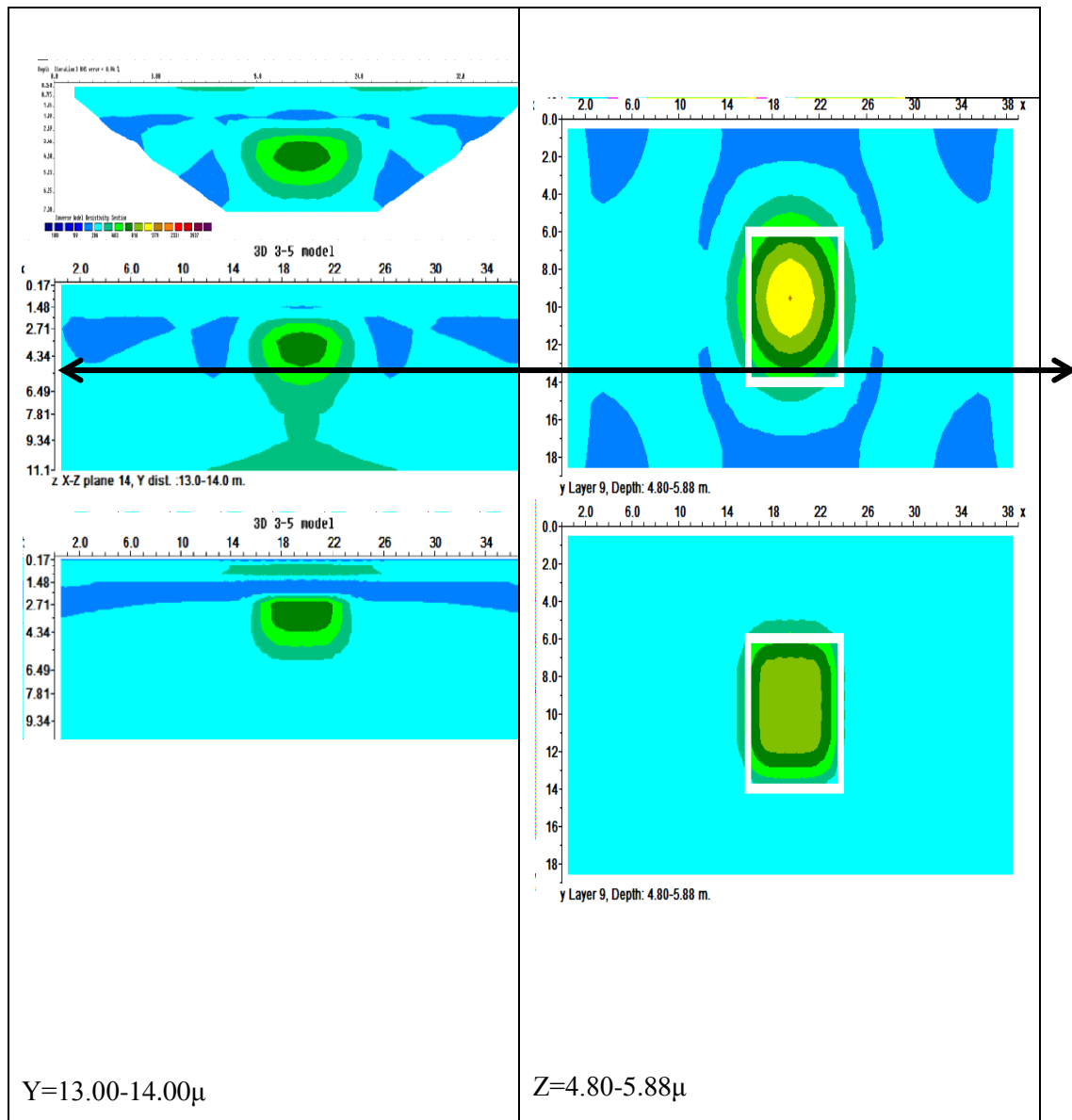
Σχήμα 4.15 : Γεωηλεκτρικές τομές για τη διάταξη διπόλου-διπόλου (Αριστερά) και οριζόντιες τομές για την ίδια διάταξη (Δεξιά).

Στα 2D πάνω για πρώτη φορά εμφανίζεται το πορτοκαλί χρώμα. Στην Robust κάτω διακρίνεται και το σκούρο κόκκινο χρώμα με τιμές κοντά στα 4000 ohmm. Αντίστοιχα με την smoothness constrained inversion στην μέση διακρίνεται το πορτοκαλί χρώμα .



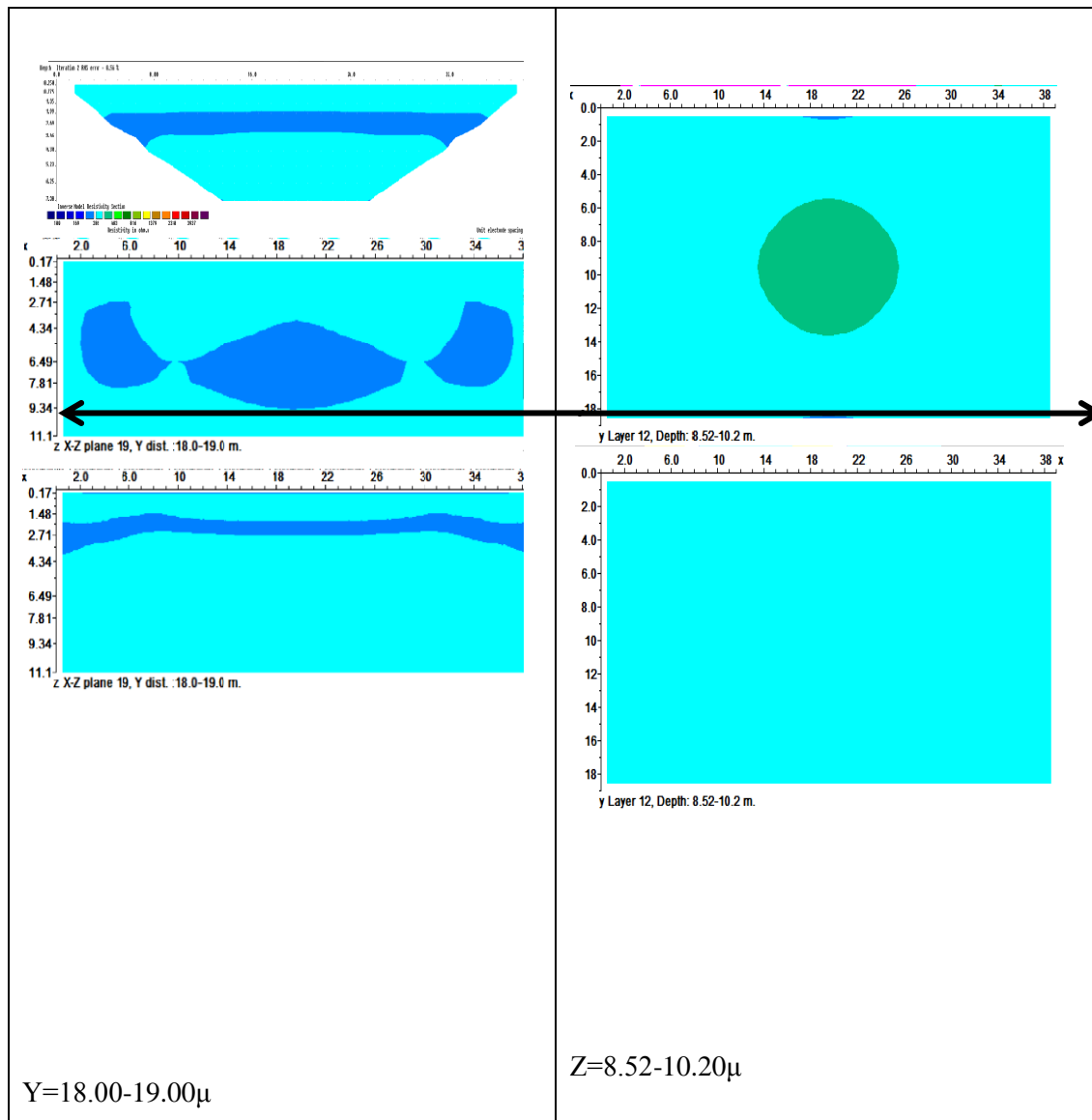
Σχήμα 4.16: Απεικόνιση της ευαισθησίας για τις γεωηλεκτρικές τομές  $Y=9-10\mu$  που προκύπτουν από το τρισδιάστατο μοντέλο. Η επάνω εικόνα αντιστοιχεί στην επεξεργασία 2 διαστάσεων. Η μεσαία, στην μέθοδο smoothness constrained inversion και η κάτω, στην μέθοδο Robust.

Στις 3D τομές είναι φανερό ότι στην περιοχή της σπηλιάς οι τιμές της ευαισθησίας είναι πιο χαμηλές (0.054, μπλε χρώμα).



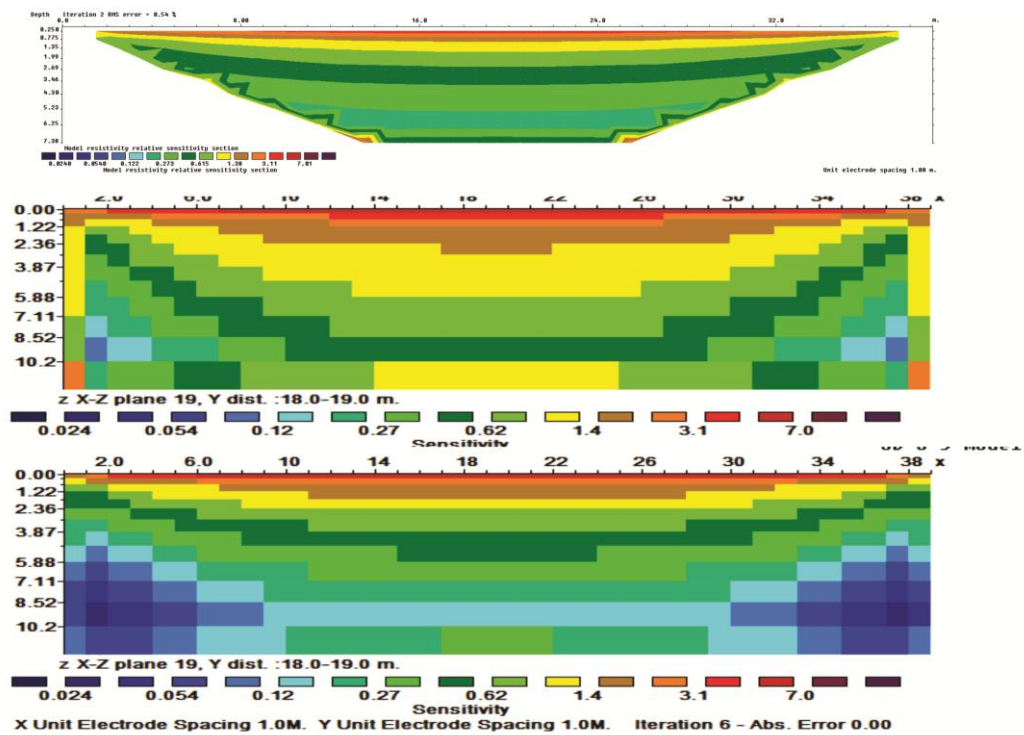
Σχήμα 4.17 : Γεωηλεκτρικές τομές για τη διάταξη διπόλου-διπόλου (Αριστερά) και οριζόντιες τομές για την ίδια διάταξη (Δεξιά).

Διακρίνονται σε όλες τις τομές χαμηλότερες τιμές (800 ohmm, πράσινο χρώμα).



Σχήμα 4.18 : Γεωηλεκτρικές τομές για τη διάταξη διπόλου-διπόλου (Αριστερά) και οριζόντιες τομές για την ίδια διάταξη (Δεξιά).

Σχεδόν σε όλες τις τομές οι τιμές έχουν μειωθεί στα 300 ohmm.



Σχήμα 4.19: Απεικόνιση της ευαισθησίας για τις γεωηλεκτρικές τομές  $Y=18-19\mu$  που προκύπτουν από το τρισδιάστατο μοντέλο. Η επάνω εικόνα αντιστοιχεί στην επεξεργασία 2 διαστάσεων. Η μεσαία, στην μέθοδο smoothness constrained inversion και η κάτω, στην μέθοδο Robust.

Όπως είναι εμφανές οι τιμές πάλι είναι ίδιες με αυτές στην πρώτη γραμμή για  $Y=0-1\mu$ . Τα αντίστοιχα σχήματα για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πόλου-διπόλου και Wenner-Schlumberger βρίσκονται στο Παράρτημα Α και Β.

## Κεφάλαιο 5 : Εφαρμογή σε δεδομένα από την επέκταση του αεροδρομίου

### 5.1 Εισαγωγή

Στην συνέχεια της παρούσας εργασίας γίνεται αναφορά σε μια έρευνα που έγινε από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, στην περιοχή του αεροδρομίου των Χανίων με σκοπό τον εντοπισμό καρστικών εγκοίλων στην επέκταση του κρατικού αερολιμένα Χανίων και στην συνέχεια τον συσχετισμό των αποτελεσμάτων των πραγματικών δεδομένων με δεδομένα από τη περιοχή 9. Καθώς και δεδομένα που προέκυψαν από την διάτρηση ορυγμάτων σε επιλεγμένες θέσεις με την χρήση WagonDrill. Στο σχήμα 5.1 απεικονίζεται το Αεροδρόμιο Χανίων, το οποίο απέχει 15 km από το κέντρο της πόλης.



Σχήμα 5.1: Δορυφορική εικόνα του αεροδρομίου Χανίων.



## 5.2 Στόχος της έρευνας

Στόχος της γεωφυσικής έρευνας είναι να εντοπιστούν καρστικές δομές διαστάσεων μεγαλύτερων από (διαμέτρου) 0.5 μ σε βάθη από 0 έως 4 μ από το επίπεδο θεμελίωσης των νέων κτιρίων του Κρατικού Αερολιμένα Χανίων με την χρήση της μεθόδου Ηλεκτρικής Τομογραφίας. Οι δομές αυτές είναι δυνατό να εντοπιστούν σε ανθρακικά πετρώματα σε θέσεις όπου παρατηρούνται διαφοροποιήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους (γεωηλεκτρικές ανωμαλίες).

Ειδικότερα, οι καρστικές δομές που είναι πληρωμένες με αργλικές προσχώσεις παρουσιάζουν μικρότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με αυτές του υγιούς πετρώματος. Αντίθετα, πολύ υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυνατό να οφείλονται, είτε σε πολύ συμπαγείς ανθρακικές δομές, είτε σε κενά έγκοιλα (Βαφείδης Α. 2014).

## 5.3 Παράμετροι της γεωφυσικής έρευνας

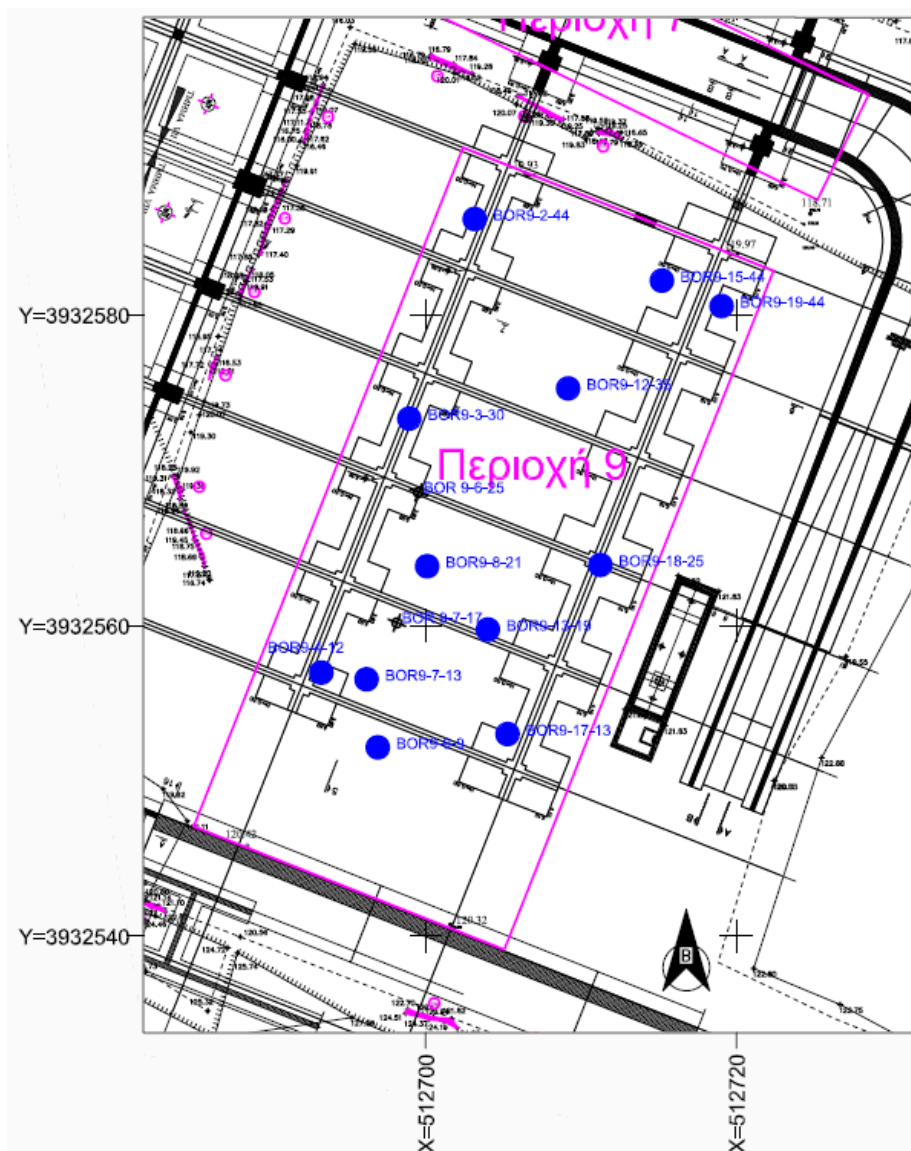
Οι θέσεις διασκόπησης επιλέχθηκαν με βάση τα σχέδια θεμελίωσης, ώστε να εντοπιστούν καρστικές δομές που επηρεάζουν τα δομικά στοιχεία της θεμελίωσης. Η προσβασιμότητα του χώρου αποτελεί επίσης σημαντικό κριτήριο για τη διεξαγωγή των γεωφυσικών μετρήσεων.

Ειδικότερα, στην περιοχή 9 (σχήμα 5.2) πραγματοποιήθηκε Ηλεκτρική Τομογραφία με διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου, με ισαποστάσεις ηλεκτροδίων 1 μ. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας 44 γραμμές μελέτης και 48 ηλεκτρόδια (21.5μx 47μ). Η ισαπόσταση μεταξύ των γραμμών μελέτης ορίστηκε στα 0.5 μ.

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση μετρήθηκε σε 30 επίπεδα βάθους επιτρέποντας τη διασκόπηση του υπεδάφους σε βάθος που υπερβαίνει τα 5 μ. Από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προέκυψαν οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους με την χρήση των λογισμικών Res2Dinv και Res3Dinv. Για την ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένες θέσεις ορύγματα με την χρήση WagonDrill.

## 5.4 Περιοχή Διασκόπησης

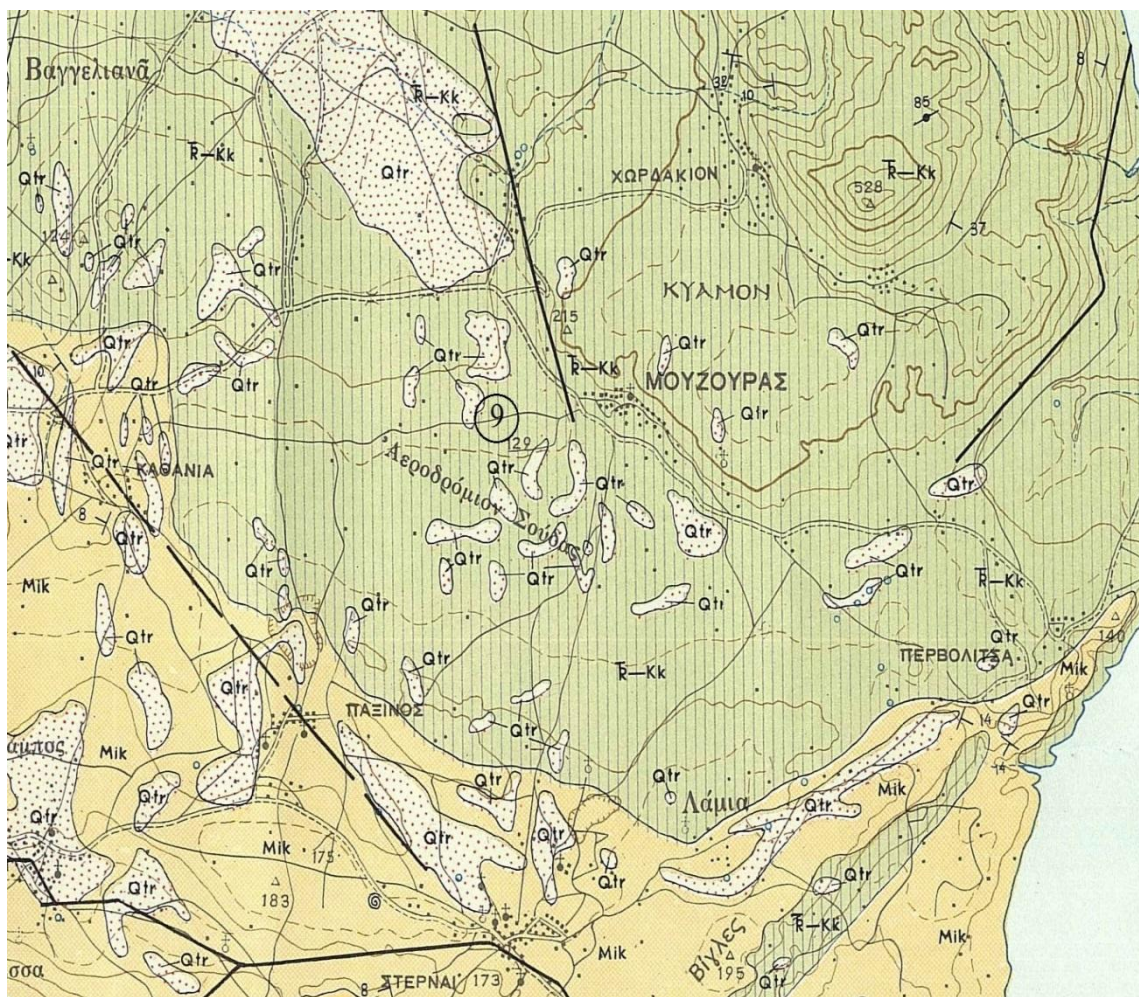
Στο σχήμα 5.2, απεικονίζεται η θέση του καννάβου των γεωφυσικών μετρήσεων καθώς και η θέση των ορυγμάτων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση WagonDrill.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση του κανάβου των γεωφυσικών μετρήσεων της Περιοχής 9, όπου παρατίθενται και οι θέσεις των ανορυχθέντων ορυγμάτων.

## 5.5 Γεωλογιά Περιοχής

Οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στον ευρύτερο χώρο του Κρατικού Αεροδρομίου Χανίων περιγράφονται στον ακόλουθο γεωλογικό χάρτη (Σχήμα 5.3):



Σχήμα 5.3: Απόσπασμα από Φύλλο Χανιά, Κλίμακας (1:50.000).

### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ (ΟΛΟΚΑΙΝΟ)

**Προσχωματικές αποθέσεις ερυθρογής (Qtr):** Παρατηρούνται εντός καρστικών εγκοίλων



### ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

**Μάργες (Mim):** Κιτρινόφαιες έως λευκοκίτρινες, πολλές φορές εναλλασσόμενες με στρώματα μαργαϊκών ψαμμιτών και πλακώδων μαργαϊκών ασβεστολίθων ενώ εγκλείουν απολιθώματα θαλάσσιων μαλακίων.

**Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος (Mik):** Συμπαγής, λευκοκίτρινος έως λευκότεφρος, με θαλάσσια απολιθώματα (ελασματοβράχια, εχινόδερμα, βρυόζωα, εχίνους, θραύσματα οστρακόδερμων και πλούσια μικροπανίδα).

### ΤΡΙΑΔΙΚΟ - ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

#### **Ζώνη Τρίπολης**

**Ασβεστόλιθοι (Tr-kr):** Συμπαγείς, λευκόφαιοι έως υποκύανοι, μικροκρυσταλλικοί έως στιφροί συνήθως με θραύσματα ρουδιστών, ενίοτε λατυποπαγείς, κατά τόπους δολομιτωμένοι και ισχυρά καρστικοποιημένοι. Ενδεχομένως να περιλαμβάνονται και κατώτερα μέλη, ιουρασικής έως τριαδικής ηλικίας, χωρίς αυτό να επιβεβαιώνεται παλαιοντολογικά.

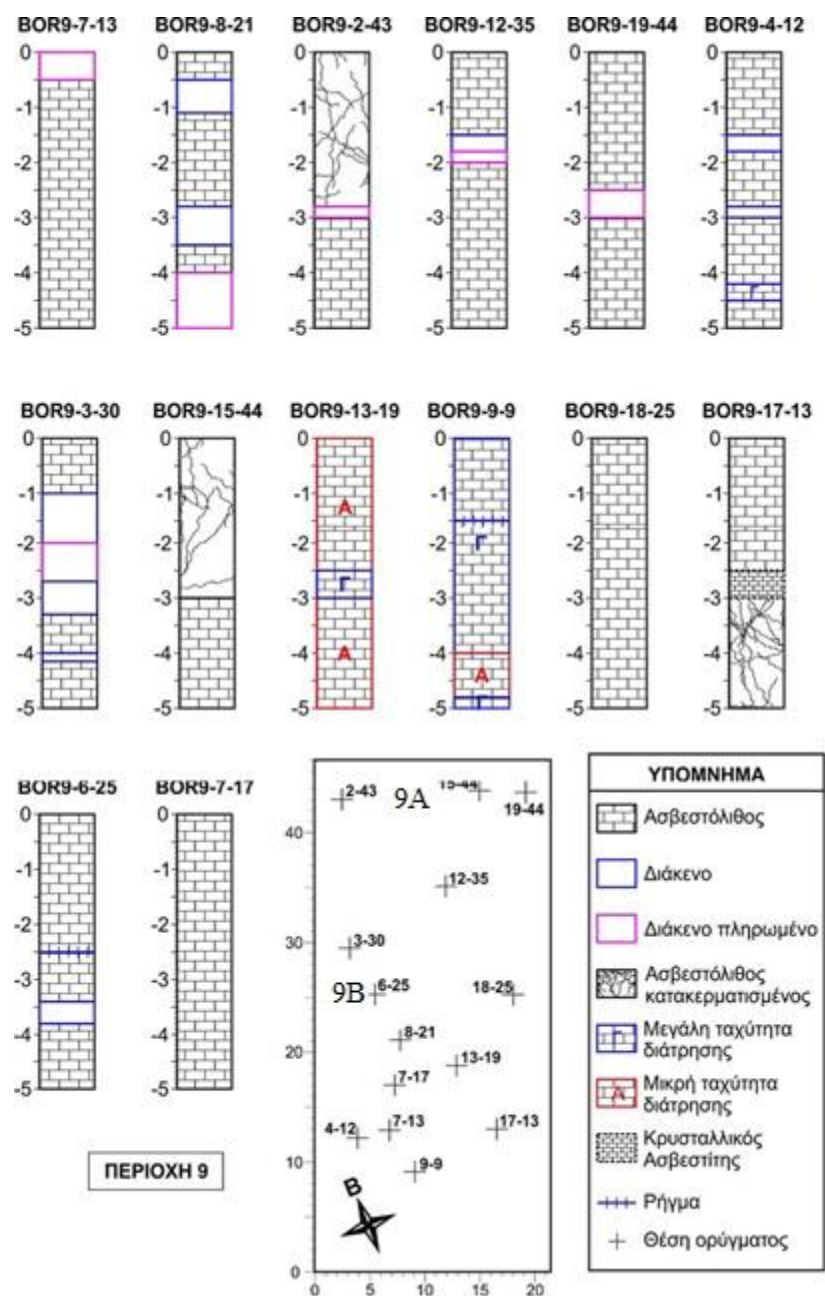
Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη του σχήματος 5.3 καθώς και το παραπάνω υπόμνημα, το γεωλογικό υπόβαθρο στην περιοχή του Αεροδρομίου αποτελείται από ασβεστόλιθους του Κρητιδικού και ενδεχομένως και του Τριαδικού. Προς τα δυτικά και νότια εμφανίζεται επιφανειακά ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος. Επίσης κατά τόπους εμφανίζονται και προσχωματικές αποθέσεις ερυθρογή σε όλη την ευρύτερη περιοχή.

## **5.5 Γεωτρητικά στοιχεία**

Για την ερμηνία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένες θέσεις ορύγματα με την χρήση του Wagon Drill. Πιο συγκεκριμένα, στην Περιοχή 9 διατρήθηκαν 14 ορύγματα συνολικού μήκους 70μ. Στο σχήμα 5.3, απεικονίζονται τα αποτελέσματα των ορυγμάτων στην Περιοχή 9.

Πίνακας 5.1: Θέσεις και βάθη διάτρησης των ορυγμάτων στην Περιοχή 9.

<b>Περιοχή 9</b>				
	<b>Γεωτρήσεις</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Βάθος Διάτρησης (μ)</b>
1	BOR9-7-13	6.85	12.9	5
2	BOR9-8-21	7.79	21.11	5
3	BOR9-2-43	2.39	43	5
4	BOR9-12-35	12.01	35.09	5
5	BOR9-19-44	19.23	43.66	5
6	BOR9-4-12	3.99	12.2	5
7	BOR9-3-30	3.22	29.52	5
8	BOR9-15-44	15.04	43.86	5
9	BOR9-13-19	12.92	18.77	5
10	BOR9-9-9	9.13	9.1	5
11	BOR9-18-25	18.12	25.28	5
12	BOR9-17-13	16.57	12.98	5
13	BOR9-6-25	5.52	25.31	5
14	BOR9-7-17	7.32	17	5



Σχήμα 5.4: Αναπαράσταση των γεωτρητικών στηλών της Περιοχής 9, όπως αυτές προέκυψαν από επί τόπου παρατηρήσεις του χειριστή του Wagon Drill και μελών της ερευνητικής ομάδας. Οι θέσεις των ορυγμάτων αποτυπώνονται στο σκαρίφημα του κανάβου της γεωφυσικής διασκόπησης.



Σχήμα 5.5: Απεικόνιση καννάβου της Περιοχής 9, στην οποία παρατίθενται και οι θέσεις των 14 ανορυχθέντων οργμάτων.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης των ορυγμάτων της Περιοχής 9 ανάλογα με την κατάσταση του ασβεστολίθου, το υλικό πλήρωσης και το ενιαίο μήκος των εγκοίλων που έχουν διατρήσει.

Πίνακας 5.2: Κατάσταση του ασβεστολίθου, το υλικό πλήρωσης και το ενιαίο μήκος των εγκοίλων που έχουν διατρήσει.

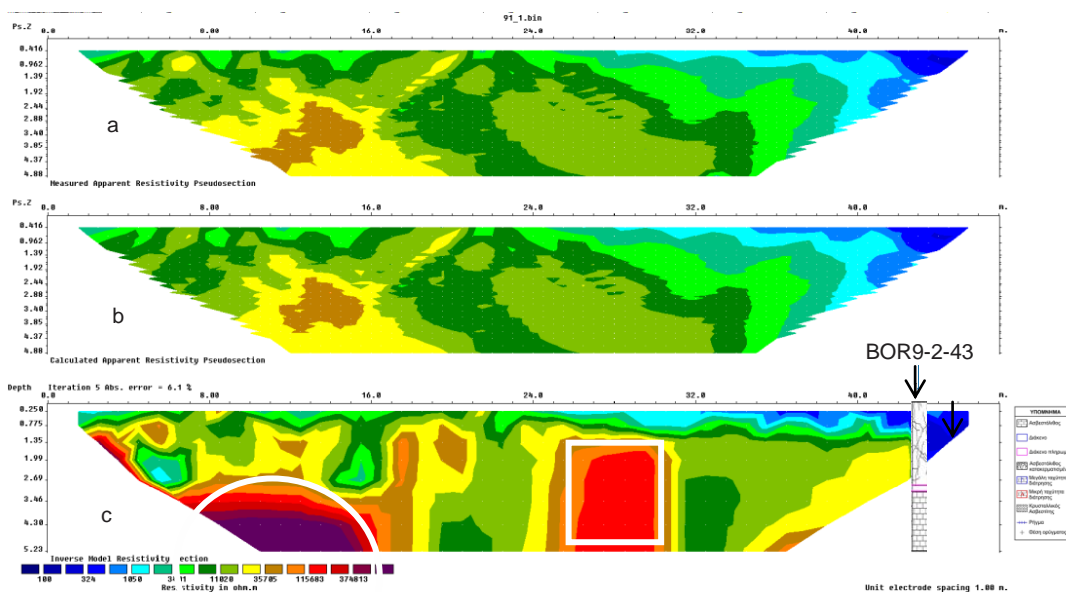
Περιοχή	Υγιής Ασβεστόλιθος	Ενιαίο μήκος διάτρησης εγκοίλων				Κατακεραματισμένος Ασβεστόλιθος
		<0.5 μ		≥ 0.5 μ		
		Κενό	Πληρωμένο	Κενό	Πληρωμένο	
9	18-25		7-13	8-21		2-43
	7-17	12-35	12-35	3-30	8-21	15-44
	13-19	4-12	19-44	6-25	3-30	17-13
	9-9					

Στην Περιοχή 9 εντοπίστηκαν δύο (2) θέσεις ενδιαφέροντος. Στην θέση 9Α (Σχήμα 5.3), έχουν εντοπιστεί σχετικά χαμηλές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις (2.5 – 7 kOhmm) και με βάση τα ορύγματα σε αυτή την περιοχή (BOR9-2-43 & BOR9-15-44) οι αντιστάσεις αυτές αποδίδονται σε κατακεραματισμένο ασβεστόλιθο. Αντίθετα, στην θέση 9Β, οι πολύ υψηλές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις (> 90 kOhmm) αποδίδονται, σύμφωνα με τα ορύγματα BOR9-8-21, BOR9-3-30 και BOR9-6-25, σε διάσπαρτα έγκοιλα που το μέγεθός τους κυμαίνεται από 0.5 έως 2.2 μ.



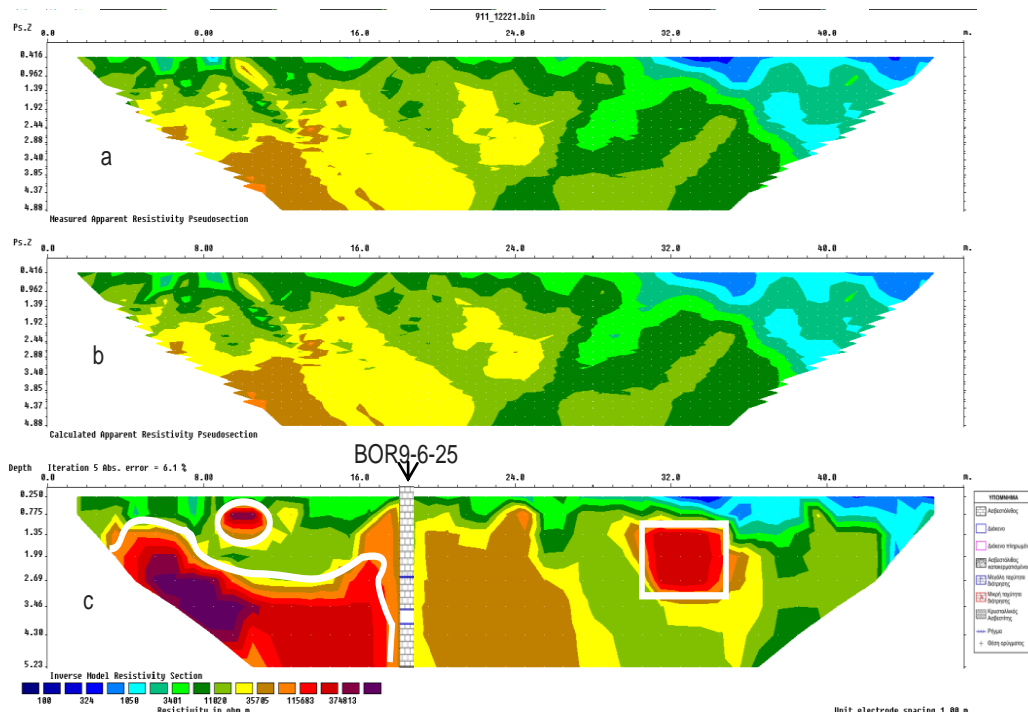
## 5.6 Ηλεκτρική τομογραφία σε 2 διαστάσεις

Η αντιστροφή των δεδομένων έγινε με την μέθοδο Robust. Στην συνέχεια τοποθετούνται 5 σημαντικές από τις 45 τομές. Οι τομές αυτές είναι οι  $y=0\mu$  ,  $y=5.5\mu$  ,  $y=11\mu$  ,  $y=16.5\mu$  ,  $y=22\mu$ . Οι τομές παρακάτω έχουν όλες υπολογισμένο σφάλμα μετά από 5 επαναλήψεις. Στις παρακάτω τομές έχουμε τοποθετηθεί και τα αντίστοιχα ορύγματα ανάλογα με την θέσης τους στον κάρναβο.



Σχήμα 5.6: Μετρούμενη (a) και υπολογιζόμενη (b) ψευδοτομή και γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (c) της γραμμής μελέτης y= 0μ. Το μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα μετά το τέλος της αντιστροφής είναι 6,1 %. Τομή στην οποία απεικονίζεται και θέση του ορύγματος BOR9-2-43.

Στο σχήμα 5.6 διακρίνονται σημεία με υψηλές αντιστάσεις. Η μια βρίσκεται από τα 8-16μ και από τα 3.5μ βάθος με τιμές 40 kOhmm. Ενώ η δεύτερη βρίσκεται από τα 25-30.5μ και σε βάθος 1.25 – 5μ με αντιστάσεις 11.5 kOhmm. Στο σημείο που βρίσκεται το όρυγμα BOR9-2-43 υπάρχει κατακερματισμένος ασβεστόλοθος μέχρι τα 3μ και ένα διάκενο από τα 3-3.3μ.

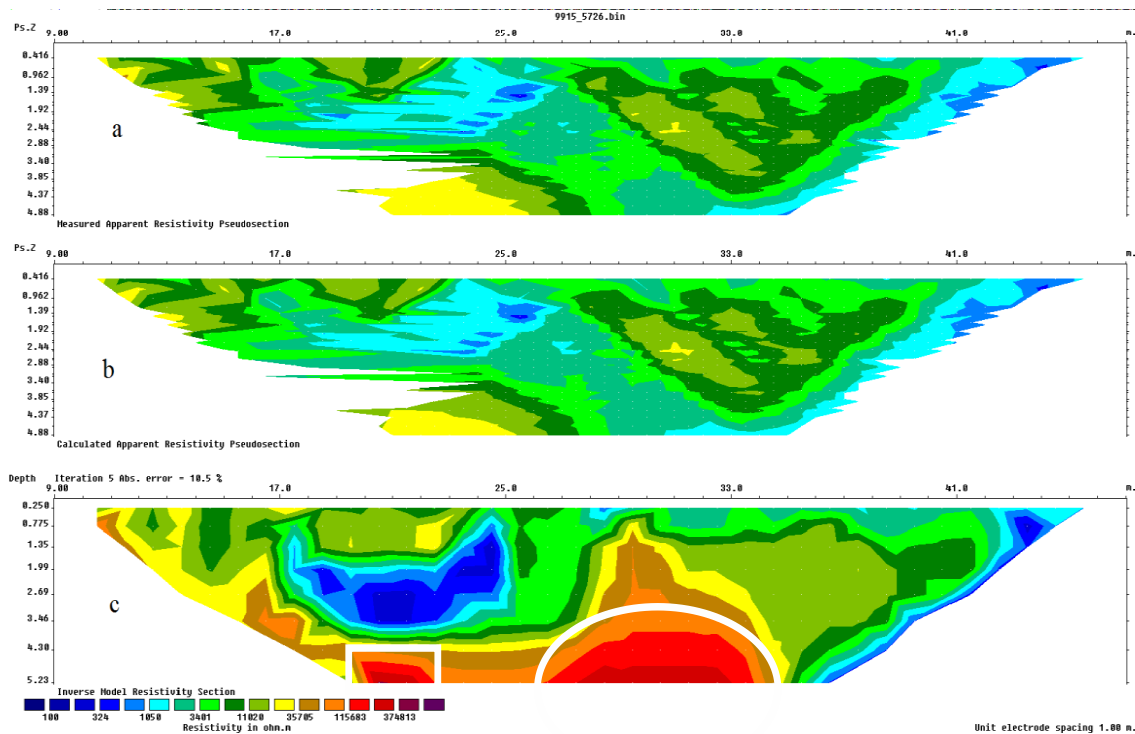


Σχήμα 5.7: Μετρούμενη (a) και υπολογιζόμενη (b) ψευδοτομή και γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (c) της γραμμής μελέτης  $y=5.5\mu$ . Το μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα μετά το τέλος της αντιστροφής είναι 6,1 %. Τομή στην οποία απεικονίζεται και η θέση του ορύγματος BOR9-6-25.

Στην παραπάνω εικόνα διακρίνονται 3 σημεία με υψηλές αντιστάσεις. Το πρώτο βρίσκεται από 9-11μ και 0.5-1.1μ βάθος με αντιστάσεις μεγαλύτερες από 37.5 kOhmm. Το δεύτερο σημείο είναι από 4-17μ και 1.35-5μ βάθος, με αντιστάσεις μεγαλύτερες από 37.5 kOhmm. Το τελευταίο σημείο είναι στο σημείο 31-35μ και σε βάθος 1.2-3μ με τιμές αντίστασης μέχρι 37.5 kOhmm. Στο σημείο που βρίσκεται το ορύγμα BOR9-6-25, μέσα στον ασβεστόλιθο υπάρχει ένα ρήγμα σε βάθος 2.7μ και ένα διάκενο από τα 3.5-4.14μ βάθος.







Σχήμα 5.10: Μετρούμενη (a) και υπολογιζόμενη (b) ψευδοτομή και γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (c) της γραμμής μελέτης  $y=22\mu$ . Το μέσο εκατοστιαίο τετραγωνικό σφάλμα μετά το τέλος της αντιστροφής είναι 10,5 %.

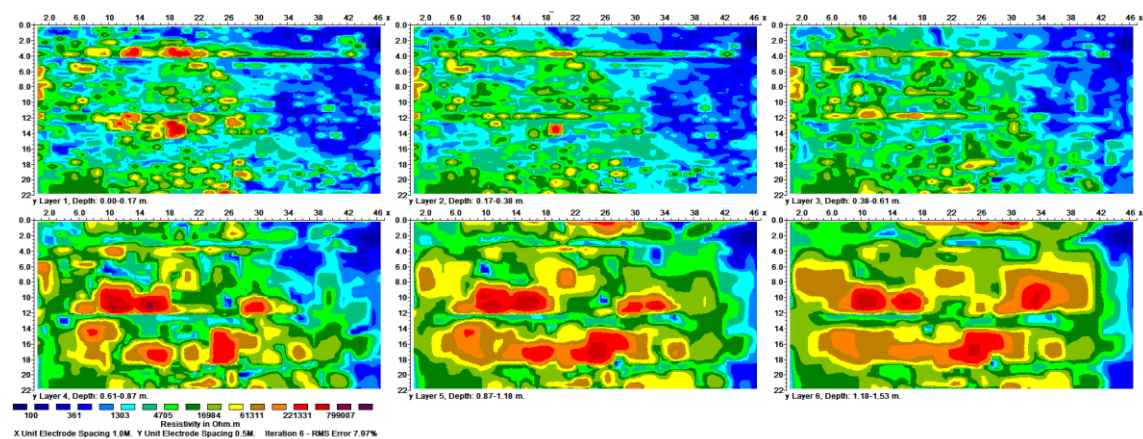
Στο σχήμα 5.8 διακρίνονται δύο σημεία με υψηλές αντιστάσεις. Το πρώτο σημείο είναι αυτό που βρίσκεται από 22-34μ και σε βάθος 3μ. Το δεύτερο σημείο είναι από 19-23μ και σε βάθος 4.5-5μ. Οι τιμές των αντιστάσεων και στα 2 σημεία είναι 11.5 kOhmm. Οι υπόλοιπες τομές βρίσκονται στο Παράρτημα Α.

## 5.7 Ηλεκτρική τομογραφία σε 3 διαστάσεις

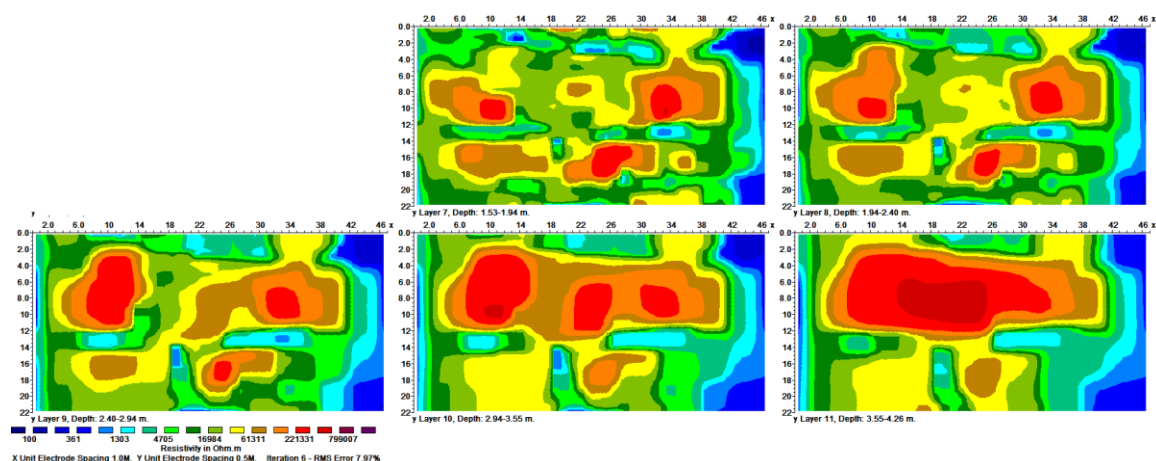
Για την ακριβέστερη απεικόνιση του υπεδάφους στην υπό μελέτη περιοχή κρίθηκε απαραίτητη η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων. Η αντιστροφή των δεδομένων έγινε με την μέθοδο Robust στο πρόγραμμα RES3DINV.

Για την απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 15 οριζόντιες τομές (horizontal-slices) και 44 γεωηλεκτρικές τομές.

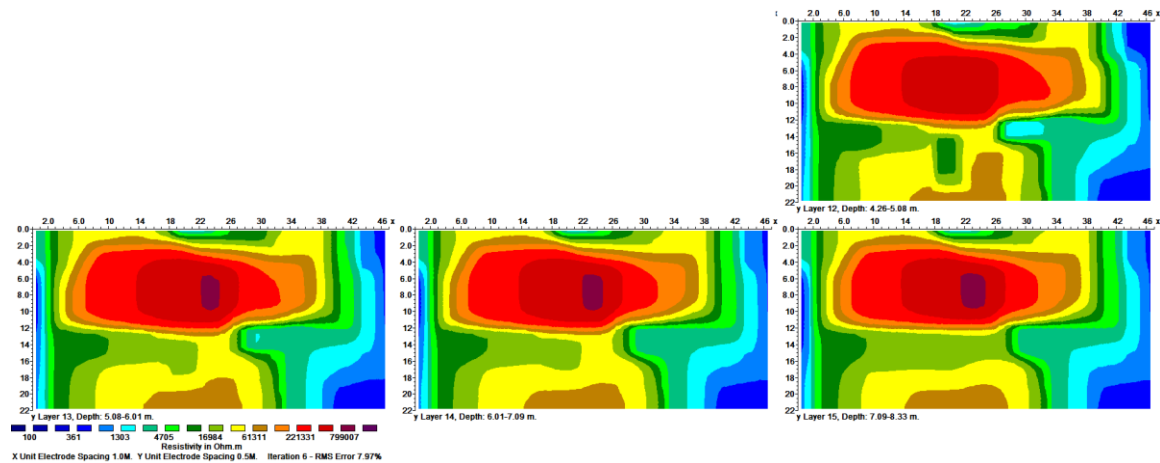
Στις οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής σε διάφορα βάθη. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τμηματικά ανά τομή τα αποτελέσματα σε όλο το μήκος και πλάτος τον γραμμών μελέτης από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι βάθος 8.33 μέτρων.



Σχήμα 5.11: Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής σε βάθος  $z=0-1.53$  μέτρων.

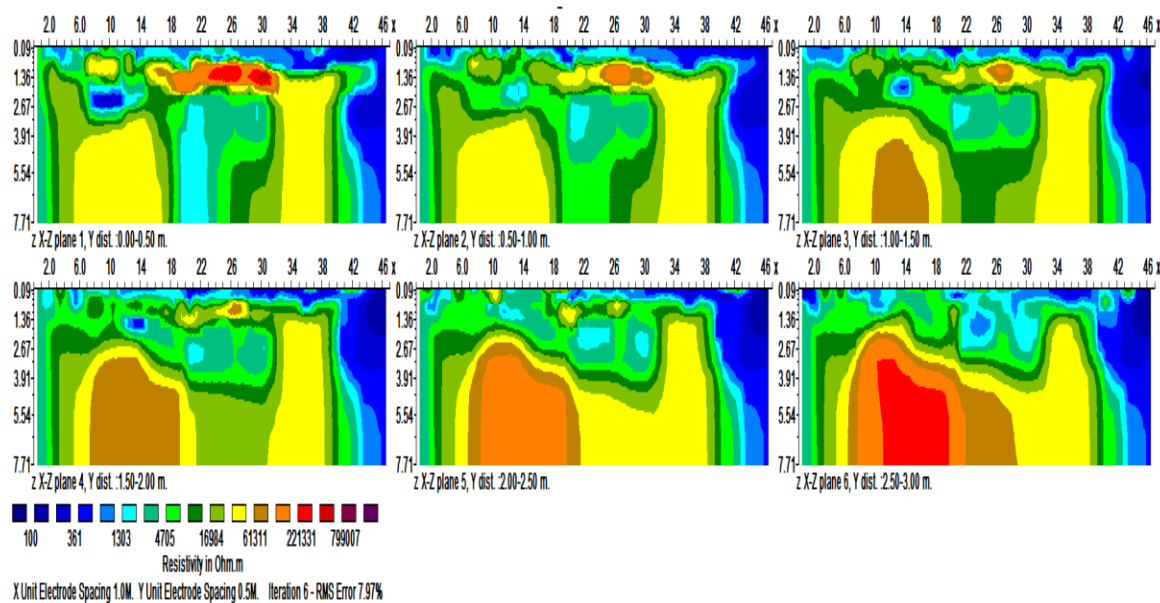


Σχήμα 5.12: Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής σε βάθος  $z=1.53-4.26$  μέτρων.

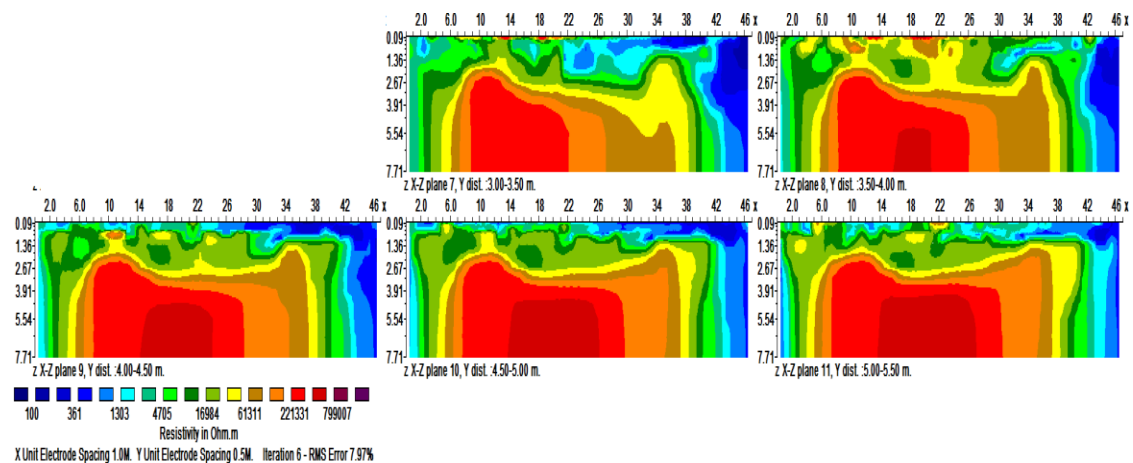


Σχήμα 5.13: Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής σε βάθος  $z=4.26-8.33$  μέτρων.

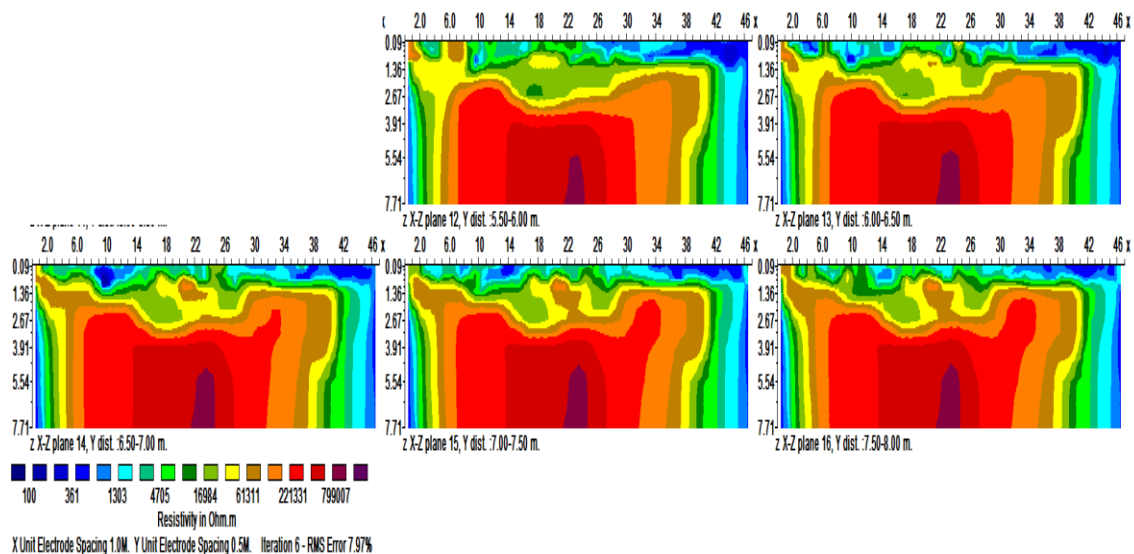
Οι παρακάτω τομές παρουσιάζουν τα τρισδιάστατα αποτελέσματα σε όλη την έκταση των γραμμών μελέτης και σε βάθος 7.71 μέτρων. Η παρουσίαση γίνεται τμηματικά και κάθε εικόνα δείχνει 6 τομές για γραμμές μελέτης με ισαπόσταση 0.5 μέτρα.



Σχήμα 5.14: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 0.00-3.00 μέτρα.

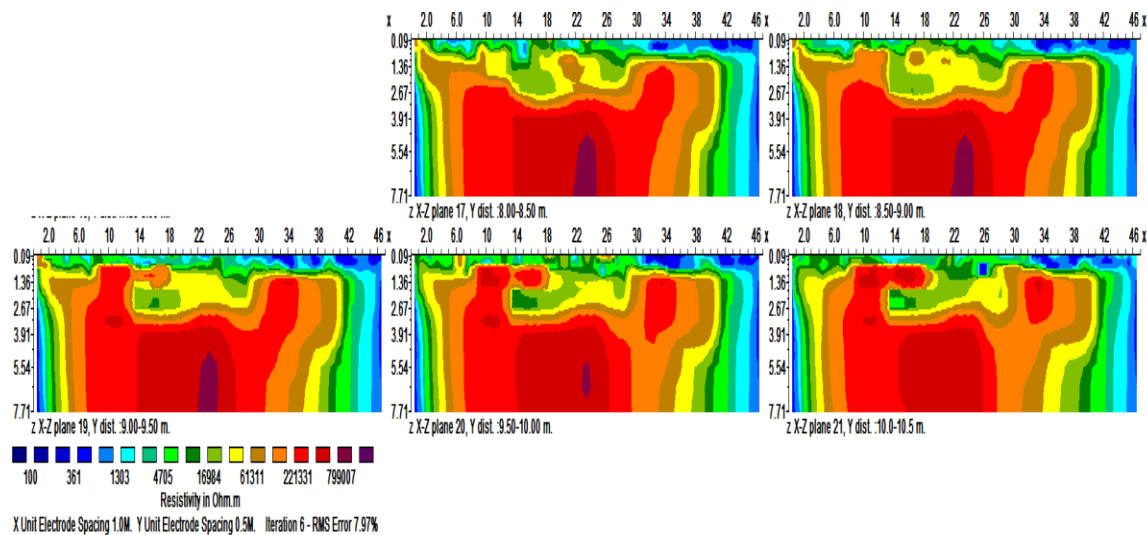


Σχήμα 5.15: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 3.00-5.50 μέτρα.

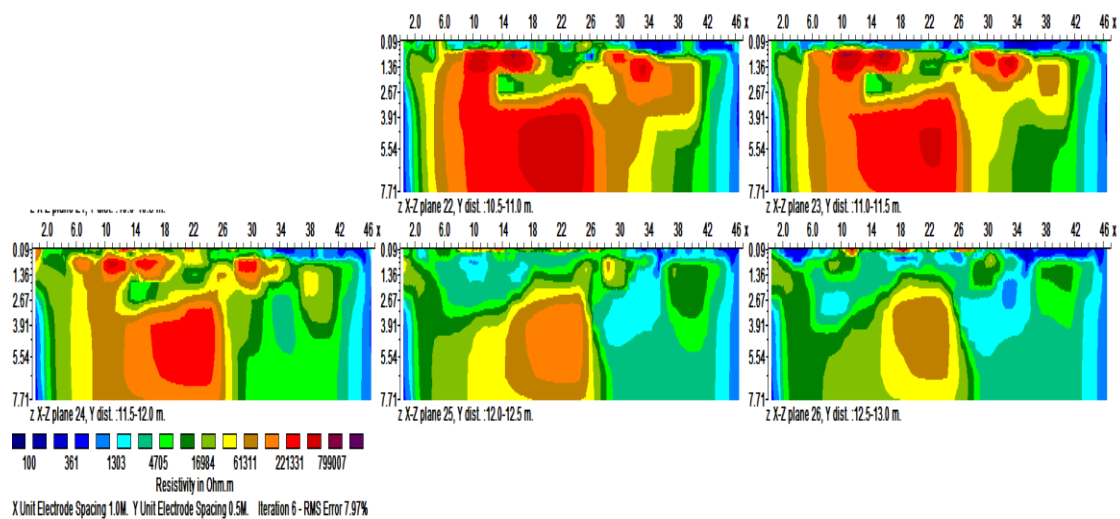


Σχήμα 5.16: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 5.50-8.00 μέτρα.

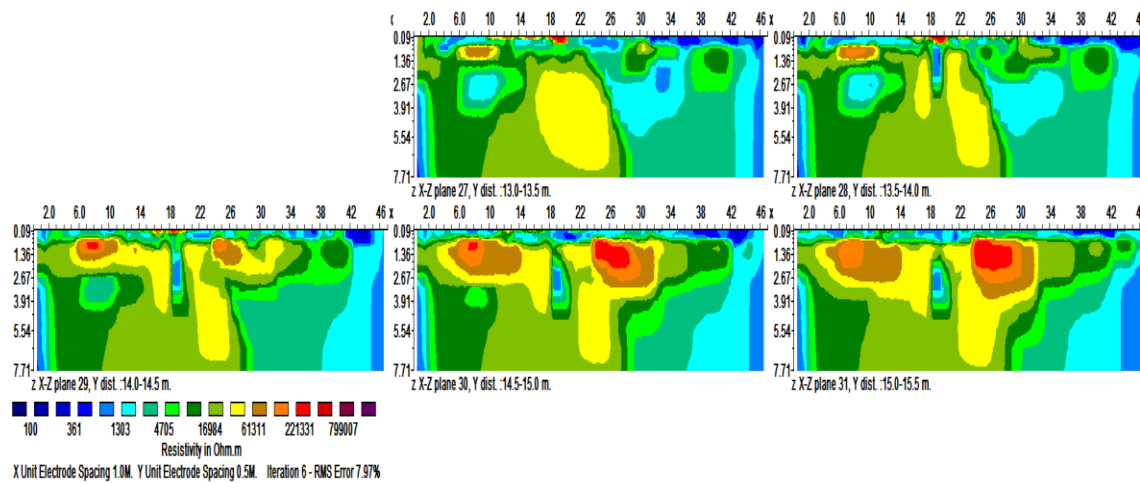




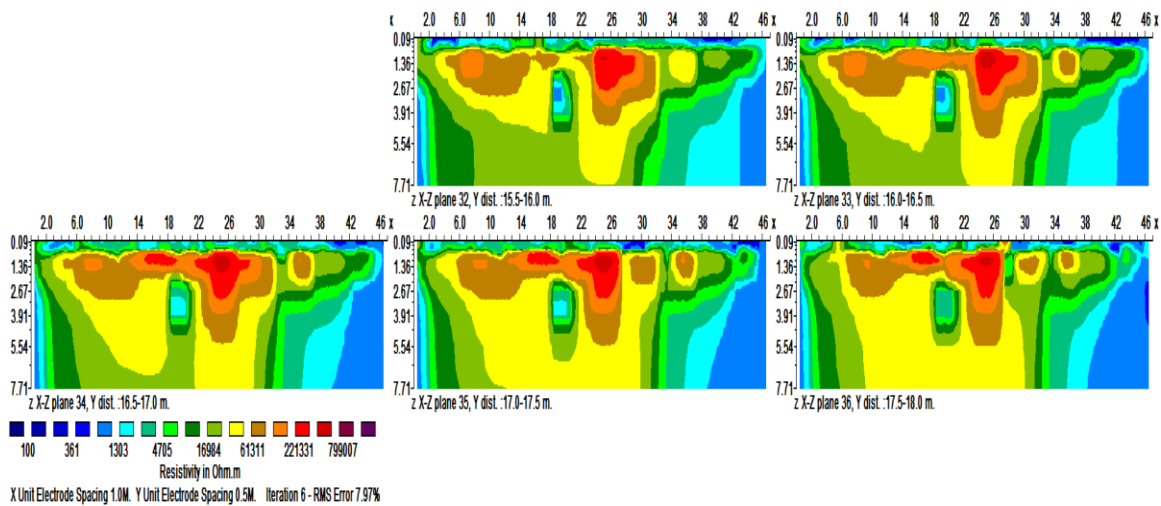
Σχήμα 5.17: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 8.00-10.50 μέτρα.



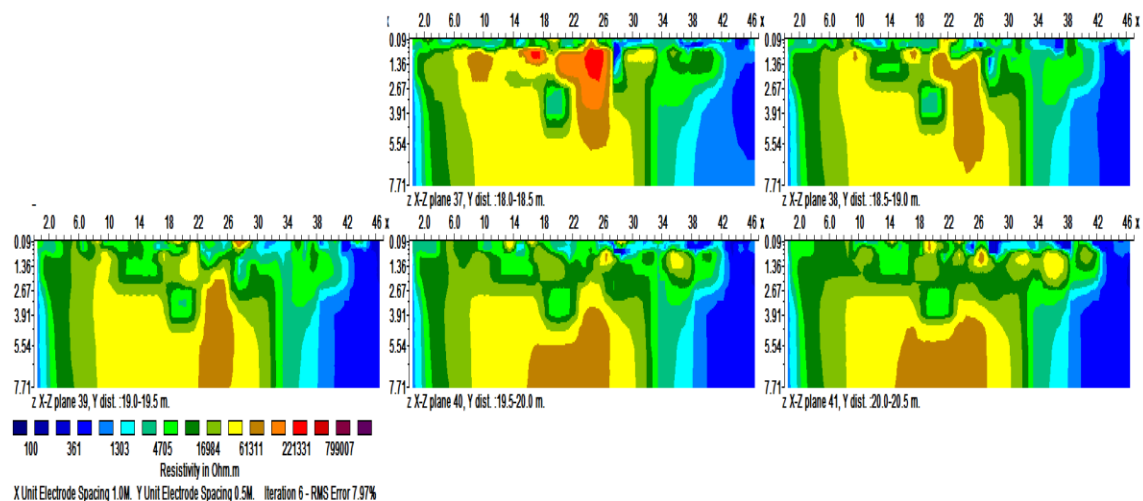
Σχήμα 5.18: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 10.50-13.00 μέτρα.



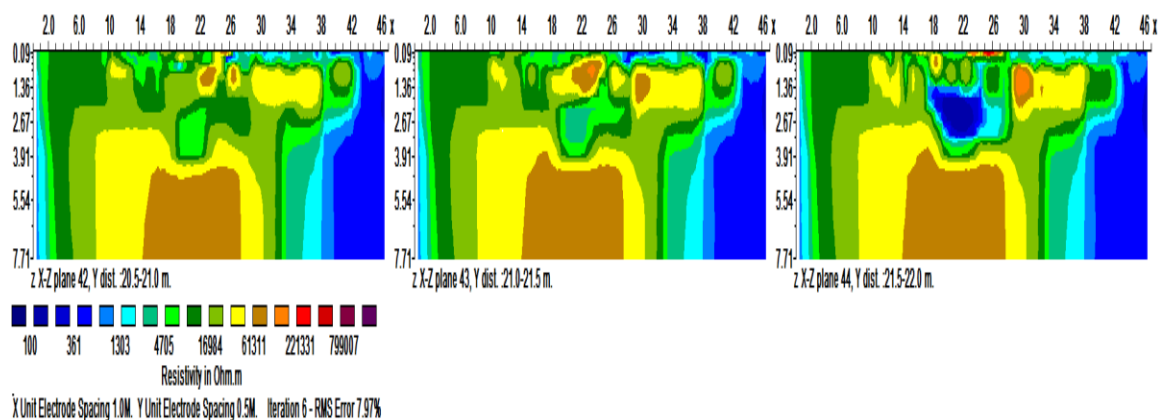
Σχήμα 5.19: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 13.00-15.50 μέτρα.



Σχήμα 5.20: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 15.00-18.00 μέτρα.



Σχήμα 5.21: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 18.00-20.50 μέτρα.



Σχήμα 5.22: Γεωηλεκτρικές τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής από 20.50-22.00 μέτρα.

## Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά το πέρας της παρούσας γεωφυσικής μελέτης. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων στην Περιοχή 9, απεικονίστηκαν καρστικά έγκοιλα στις τομές.

Χρησιμοποιώντας τα λογισμικά RES2DMOD και RES3DMOD δημιουργήθηκαν δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, εμφανίζονται καρστικές δομές. Μελετήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι αντιστροφής δεδομένων, η Least-Squares Inversion και η Robust Inversion. Από την σύγκριση των γεωηλεκτρικών τομών των συνθετικών δεδομένων προέκυψε ότι η μέθοδος Robust παρουσιάζει πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν κατά μήκος 44 γραμμών μελέτης με την διάταξη διπόλου-διπόλου, ισαπόσταση γραμμών 0.5μ και ισαπόσταση ηλεκτροδίων 1μ. Για την επεξεργασία των πραγματικών δεδομένων επιλέχθηκε μόνο η μέθοδος Robust. Με τα λογισμικά RES2DINV και RES3DINV έγινε επεξεργασία των πραγματικών δεδομένων, δημιουργώντας δισδιάστατες και τρισδιάστατες γεωηλεκτρικές τομές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κατακόρυφες τομές xz και οριζόντιες τομές xy. Η τρισδιάστατη γεωφυσική διασκόπηση απεικόνισε καλύτερα έγκοιλα διαστάσεων 0.5μ και μεγαλύτερα σε βάθη έως 4μ από το επίπεδο θεμελίωσης των νέων κτιρίων του Κρατικού Αερολιμένα Χανίων. Οι δομές αυτές επιβεβαιώθηκαν από γεωτρητικό πρόγραμμα (14 ορύγματα συνολικού μήκους 70μ). Χαρακτηρίζονται από την διαφοροποίηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Ειδικότερα έγκοιλα πληρωμένα με αργιλικό υλικό παρουσιάζουν μικρότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ( $< 7 \text{ kohmm}$ ) σε σχέση με αυτές με αυτές του υγιούς ανθρακικού πετρώματος (7-15 kohmm). Αντίθετα, πολύ υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ( $> 15 \text{ kohmm}$ ) οφείλονται σε μη πληρωμένα έγκοιλα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

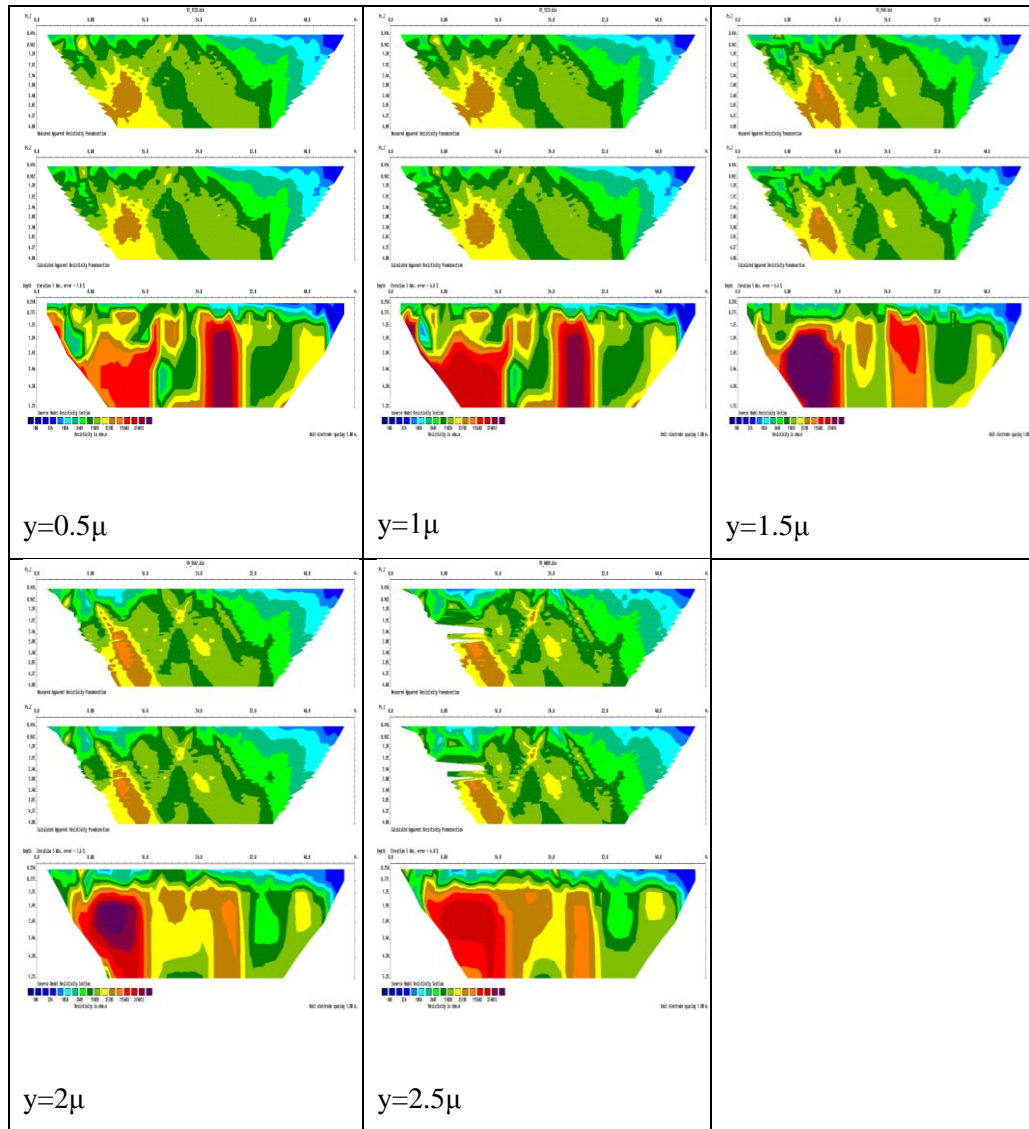
### Διεθνής Βιβλιογραφία

1. **Loke M.H. (1996-2004):** 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
2. **Gad El-Qady, Mahfooz Hafez, Mohamed A. Abdalla, And Keisuke Ushijima (2005):** Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar, *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 67, no. 3, p.174–181.
3. **Hugo C. Matias, Fernando A. Monteiro Santos, Fernando E. Rodrigues Ferreira, Conceição Machado, Rafael Luzio (2006) :** Detection of graves using the micro-resistivity method, *Annals of Geophysics*, vol. 49, no.6.
4. **Leucci Giovanni (2006):** Contribution of Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography to identify the cavity and fractures under the main Church in Botrugno (Lecce, Italy), *Journal of Archaeological Science* 33 (2006) p. 1194-1204.
5. **Muchaidze Iana (2008):** Imaging in karst terrain using electrical resistivity tomography, Master thesis, Missouri University of Science And Technology.
6. **Mohammed I.I. Abu-Shariah (2009):** Determination of cave geometry by using a geoelectrical resistivity inverse model, *Engineering Geology* 105, (2009) p.239–244.
7. **Martinez-Lopez J. (2011):** Electrical tomography applied to the detection of subsurface cavities. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 75, no. 1, p. 28–37.
8. **Simon D. Carrier (2013):** Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. *Journal of Applied Geophysics* 94, (2013) p.31–41.
9. **Martinez-Pagan P. (2013):** The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena. *Engineering Geology* 156, (2013) p.1–10.
10. **Martinez-Lopez J. (2013):** Electrical Tomography applied to the detection on subsurface cavities. *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 75, no. 1, p. 28–37.

1. **Βαφείδης Α. (2001):** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική 2 Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
2. **Γκανιάτσος Ι. (2000):** Γεωηλεκτρική Τομογραφία σε τρείς Διαστάσεις, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. **Σούρλας Γ. (2000):** Συμβολή της γεωφυσικής διασκόπησης στην αναζήτηση θαμμένων αρχαιοτήτων στην Ίτανο Λασιθίου. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. **Παπαδόπουλος Ν. (2007):** Ανάπτυξη Αλγορίθμων για την Τρισδιάστατη Αντιστροφή Γεωηλεκτρικών Δεδομένων που προέρχονται από Αρχαιολογικούς Χώρους, Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη.
5. **Βαφείδης Α. (2014):** Γεωφυσική Διασκόπηση Για Τον Εντοπισμό Καρστικών Έγκοιλων Στην Εκσκαφή Της Επέκτασης Του Κρατικού Αερολιμένα Χανίων. Τεχνική έκθεση, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
6. **Ι.Γ.Μ.Ε.:** Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Χανιά, κλίμακα (1:50.000)

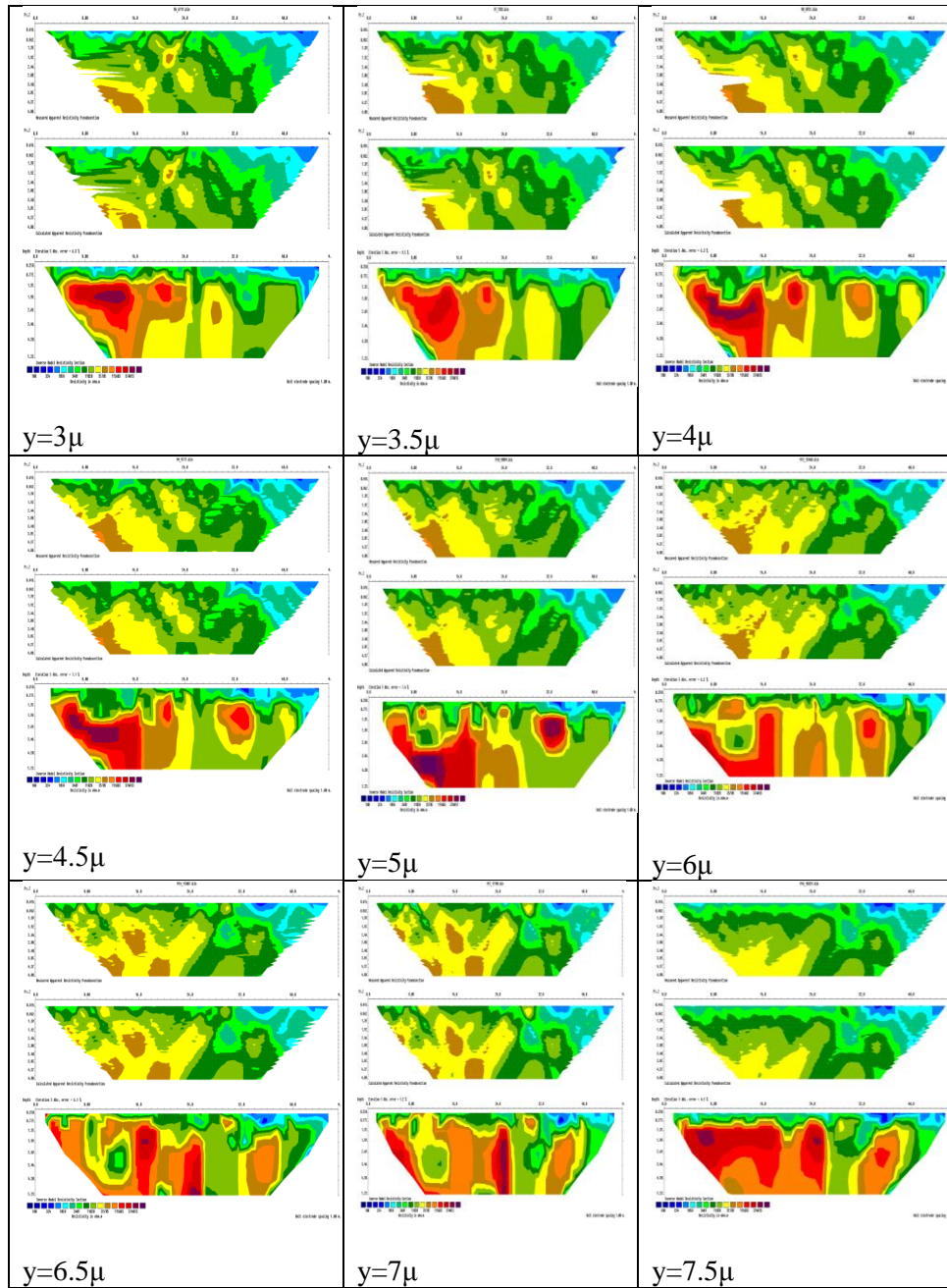
## Παράρτημα Α

Παρακάτω βρίσκονται τα υπόλοιπα αποτελέσματα της διάταξης διπόλου-διπόλου στις 2 διαστάσεις.



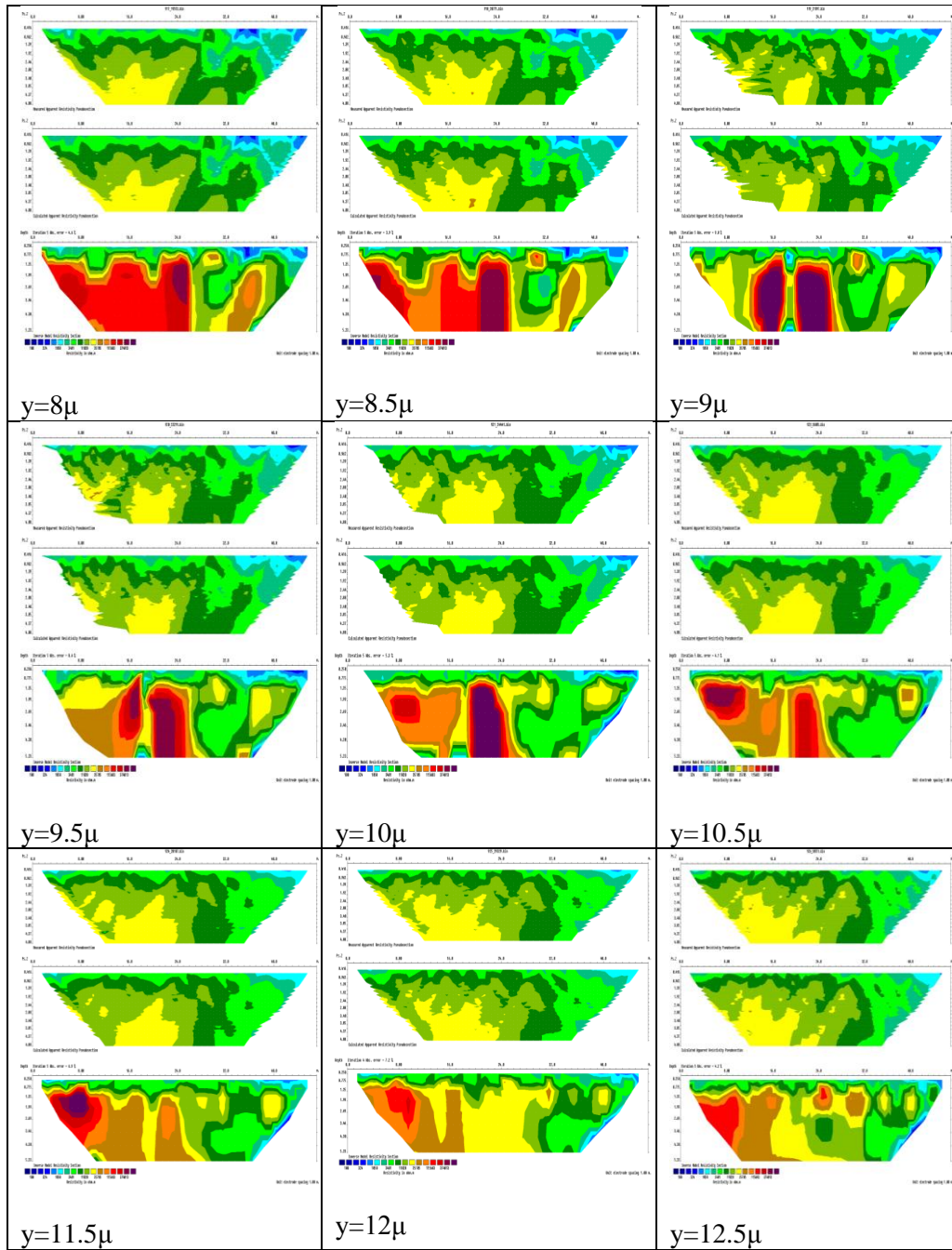
Πίνακας Α.1: : Γεωηλεκτρικές τομές στις 2 διαστάσεις της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $y=0.50-2.50\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μετρούμενη και στην μεσαία φωτογραφία είναι η υπολογιζόμενη ψευδοτομή και στην κάτω εικόνα διακρίνεται γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



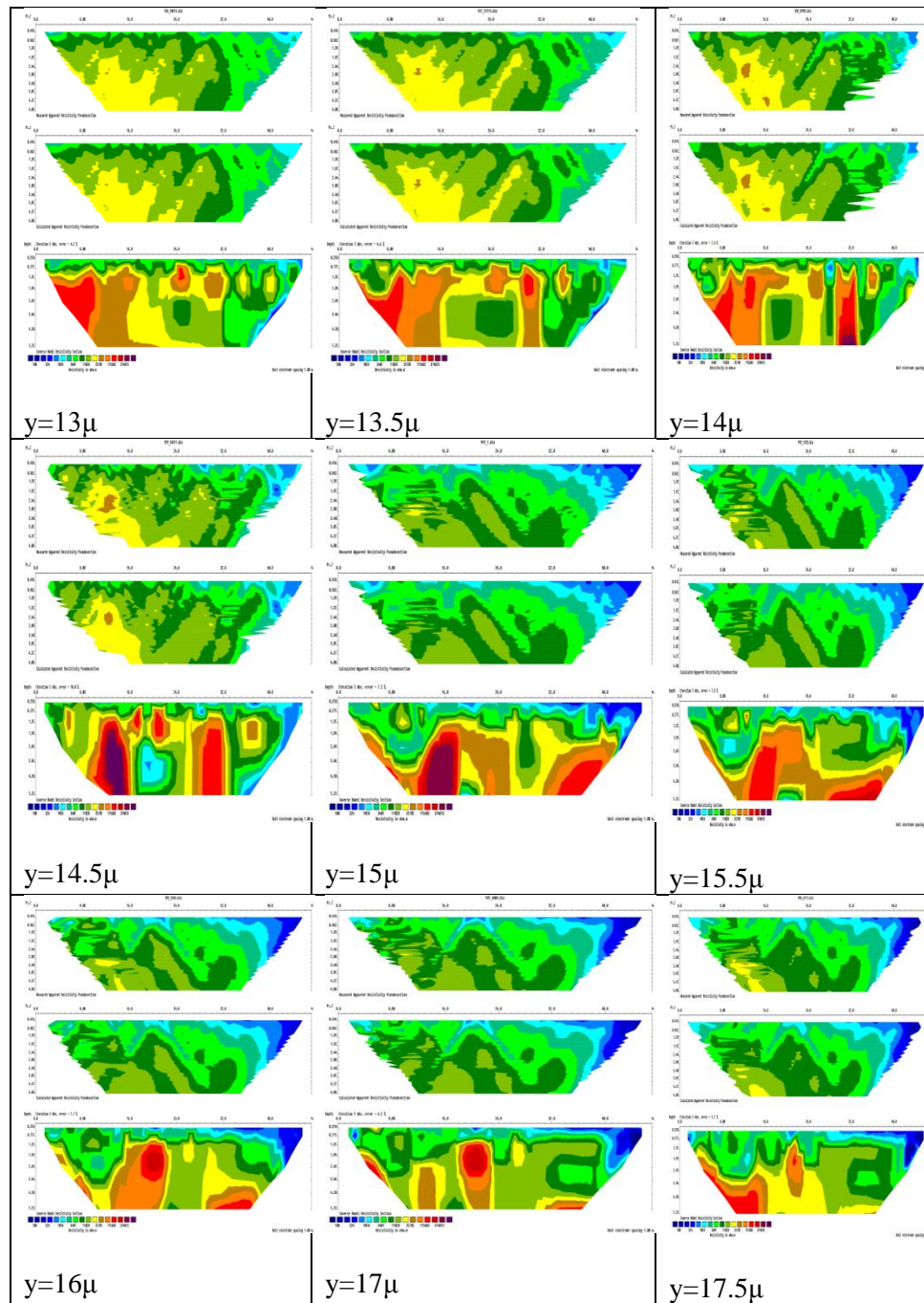


Πίνακας Α.2: Γεωηλεκτρικές τομές στις 2 διαστάσεις της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $y=3.00-7.50\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μετρούμενη και στην μεσαία φωτογραφία είναι η υπολογιζόμενη ψευδοτομή και στην κάτω εικόνα διακρίνεται γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

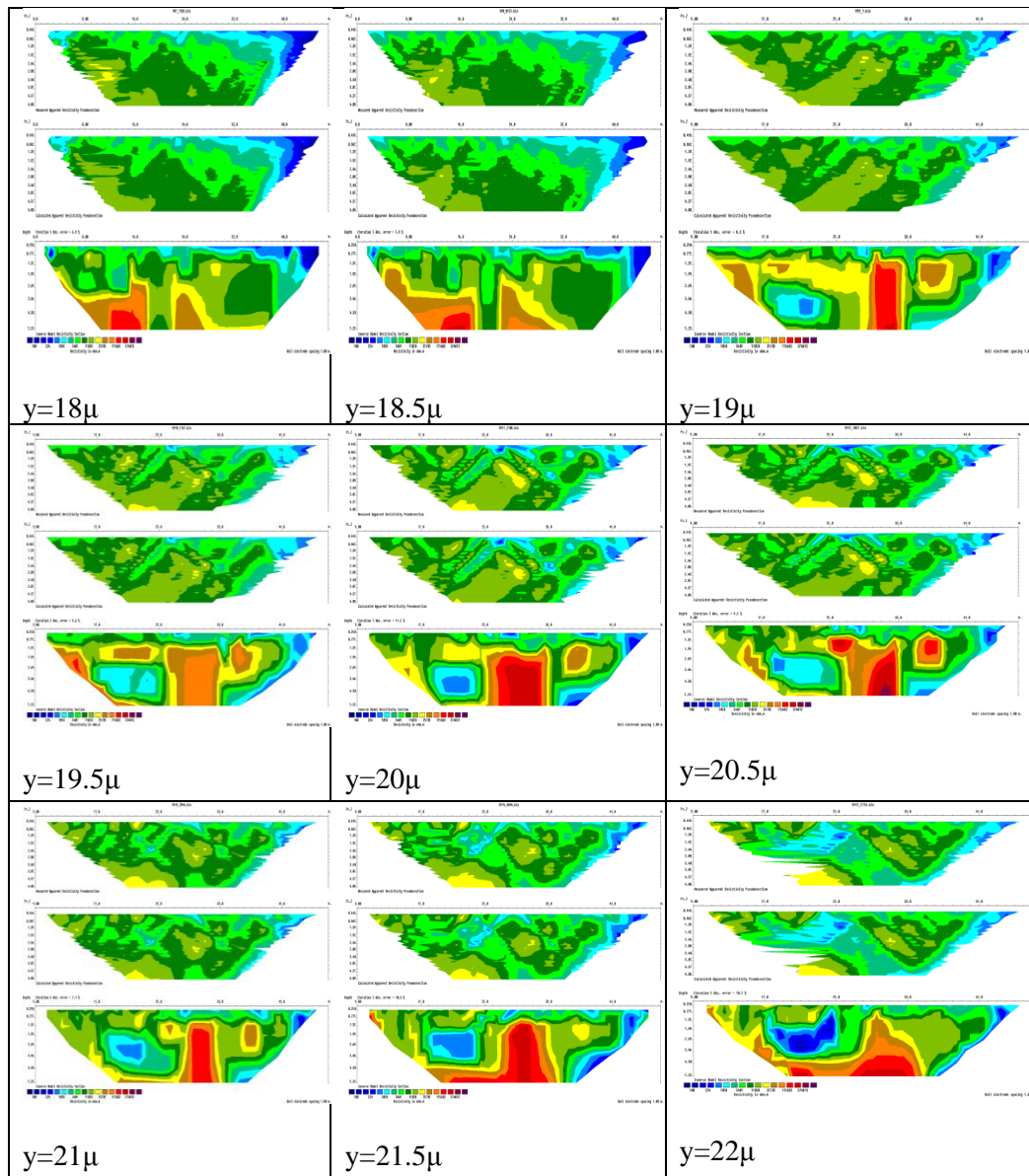




Πίνακας Α.3: Γεωηλεκτρικές τομές στις 2 διαστάσεις της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $y=8.00-12.50\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μετρούμενη και στην μεσαία φωτογραφία είναι η υπολογιζόμενη ψευδοτομή και στην κάτω εικόνα διακρίνεται γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

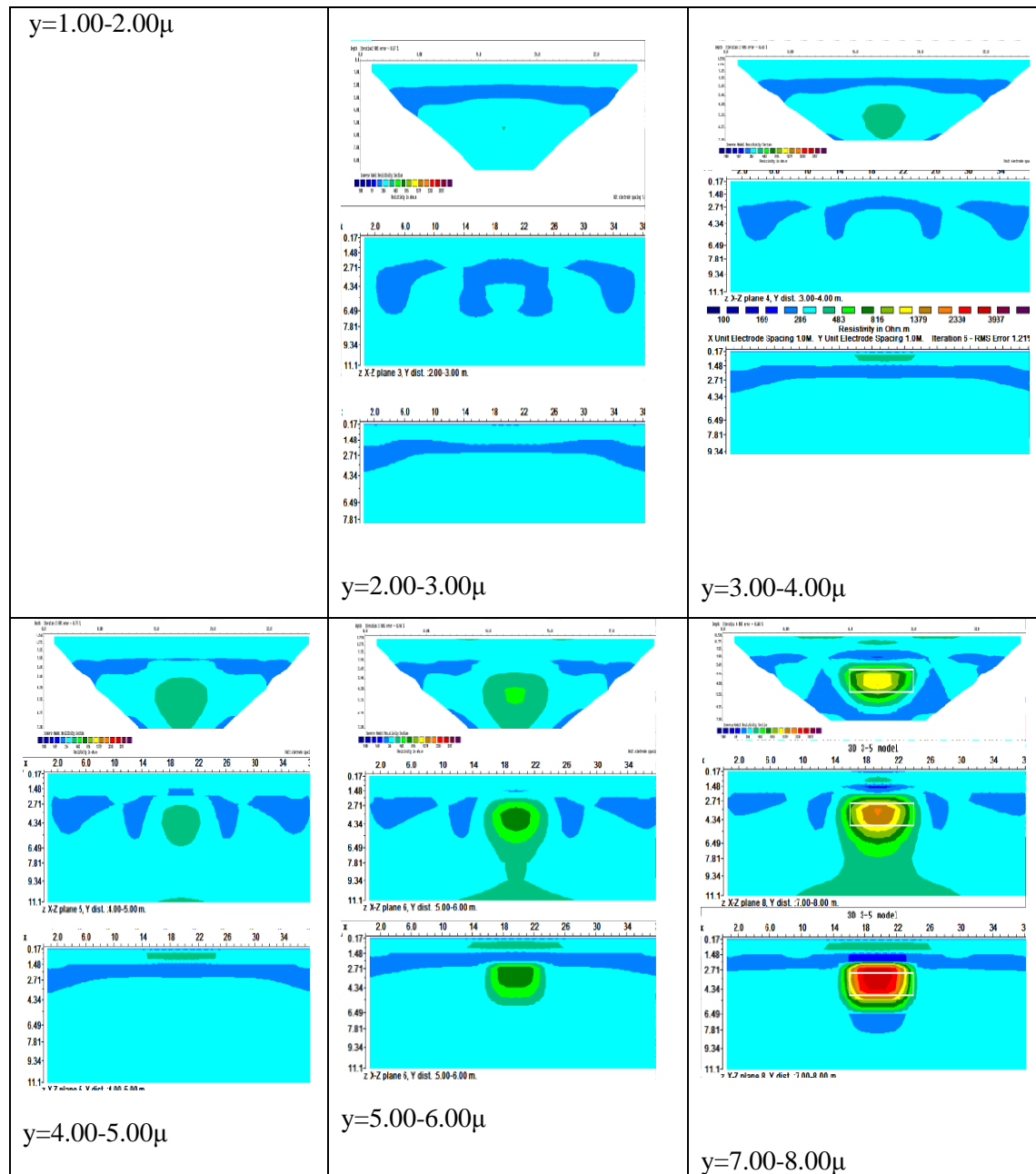


Πίνακας Α.4: Γεωηλεκτρικές τομές στις 2 διαστάσεις της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $y= 13.00-17.50\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μετρούμενη και στην μεσαία φωτογραφία είναι η υπολογιζόμενη ψευδοτομή και στην κάτω εικόνα διακρίνεται γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

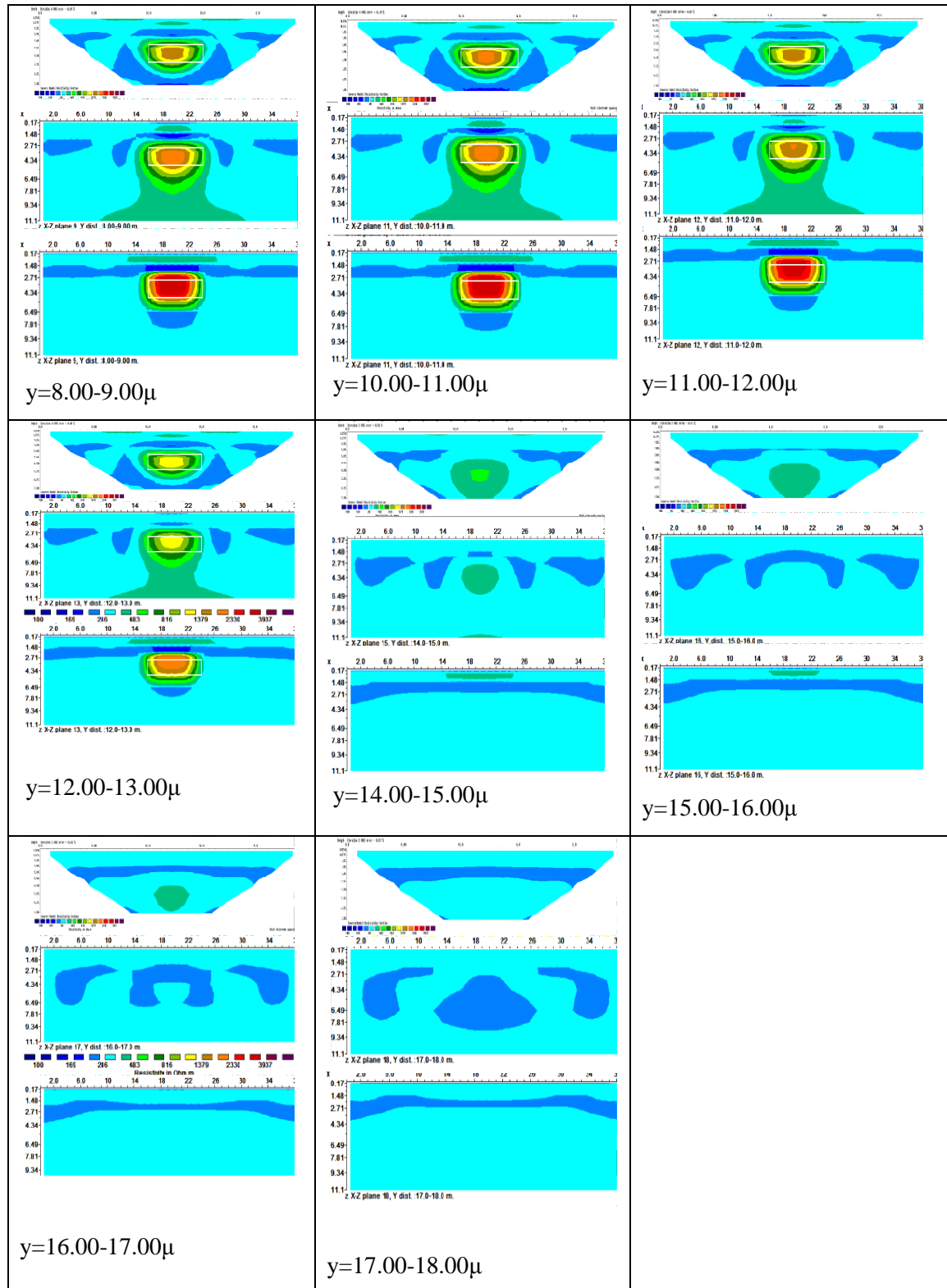


Πίνακας Α.5: Γεωηλεκτρικές τομές στις 2 διαστάσεις της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $y = 18.000-22.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μετρούμενη και στην μεσαία φωτογραφία είναι η υπολογιζόμενη ψευδοτομή και στην κάτω εικόνα διακρίνεται γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Παρακάτω βρίσκονται τα υπόλοιπα αποτελέσματα της μεθόδου διπόλου-διπόλου στον άξονα xz.



Πίνακας Α.6: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $y= 0.00-8.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

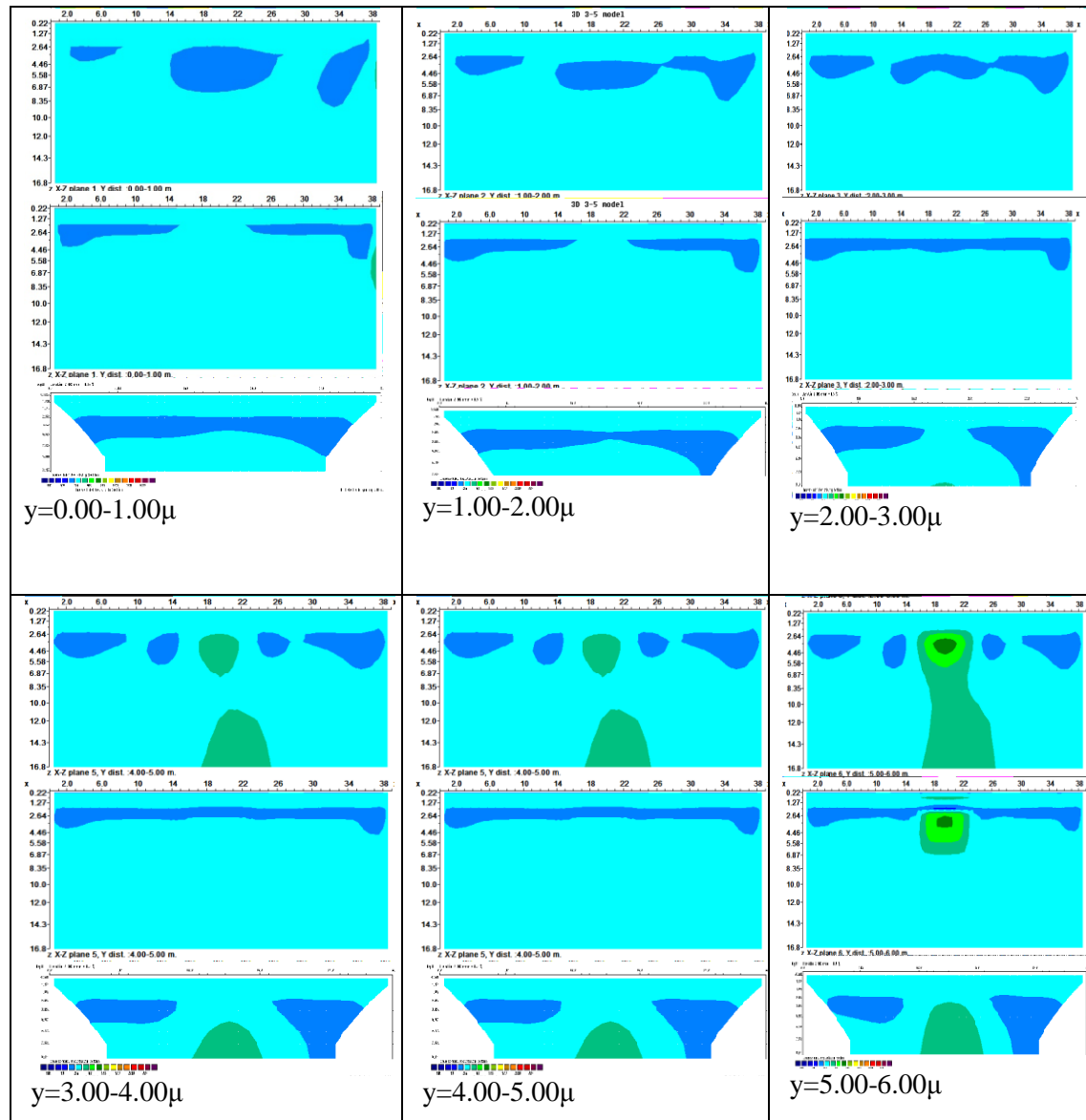


Πίνακας Α.7: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $y= 8.00-18.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία

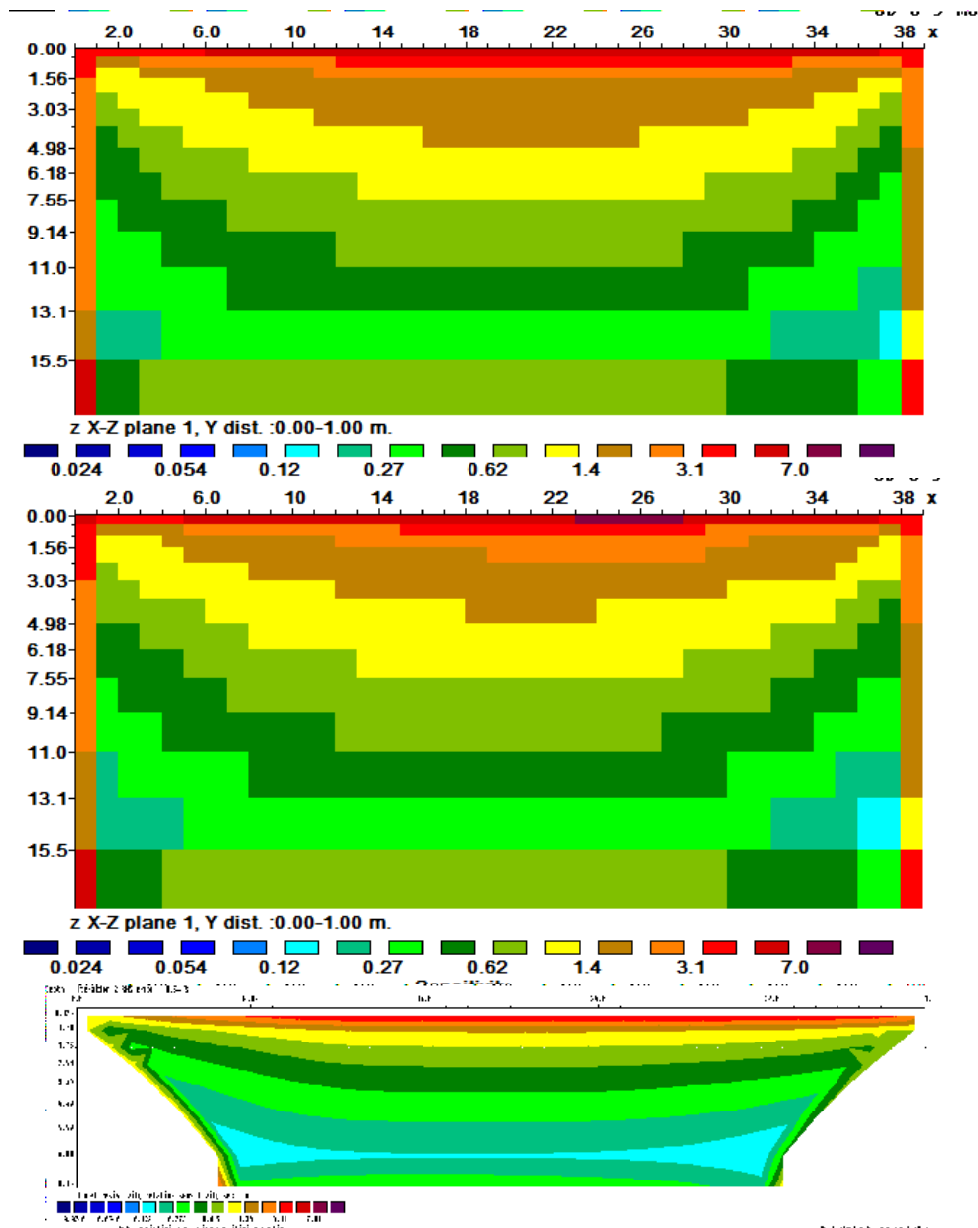


διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

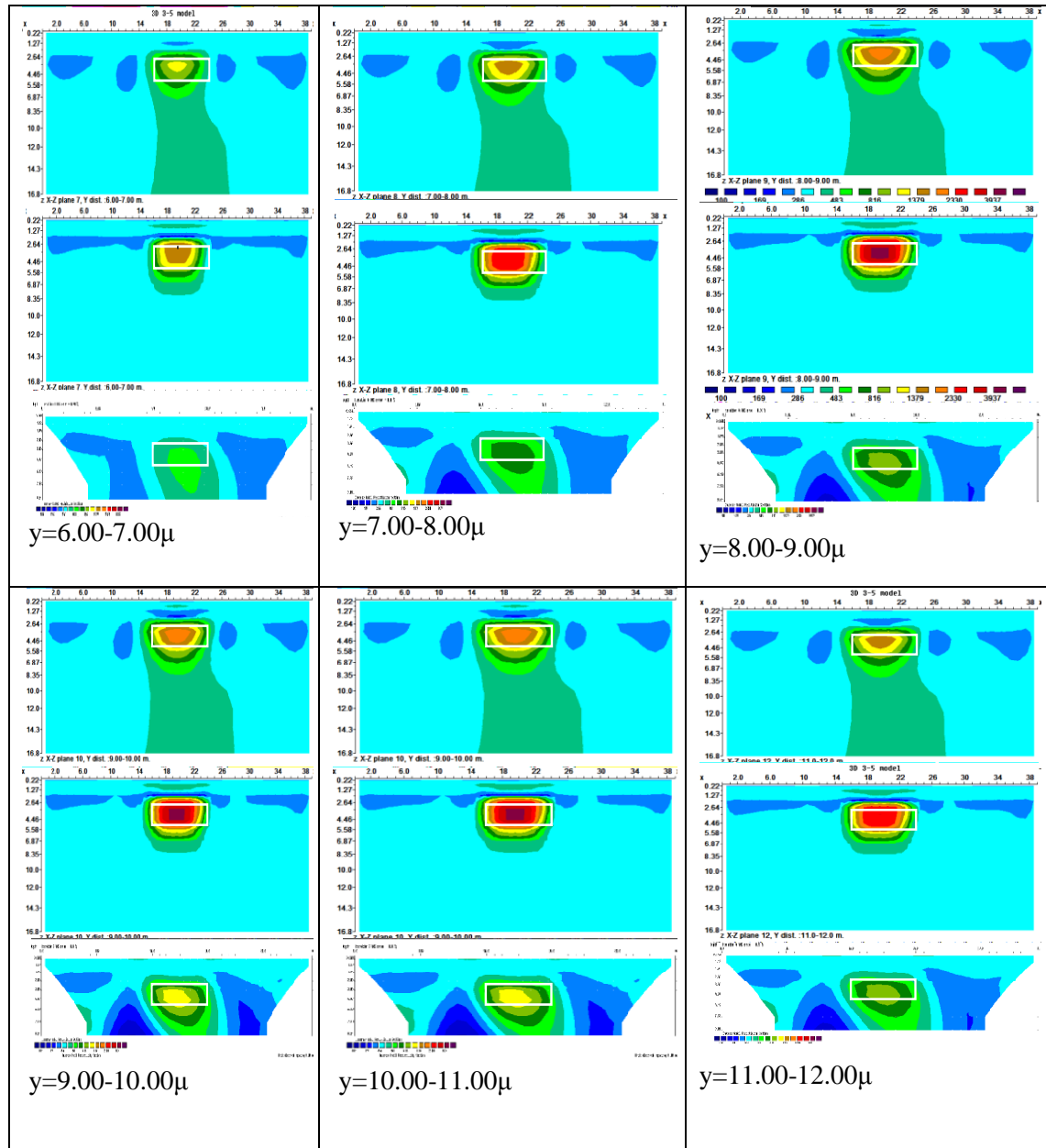
Παρακάτω βρίσκονται τα αποτελέσματα της μεθόδου πόλου-διπόλου στον άξονα xz. Καθώς και οι τιμές των sensitivity τους.



Πίνακας Α.8: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου πόλου-διπόλου για  $y = 0.00-6.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

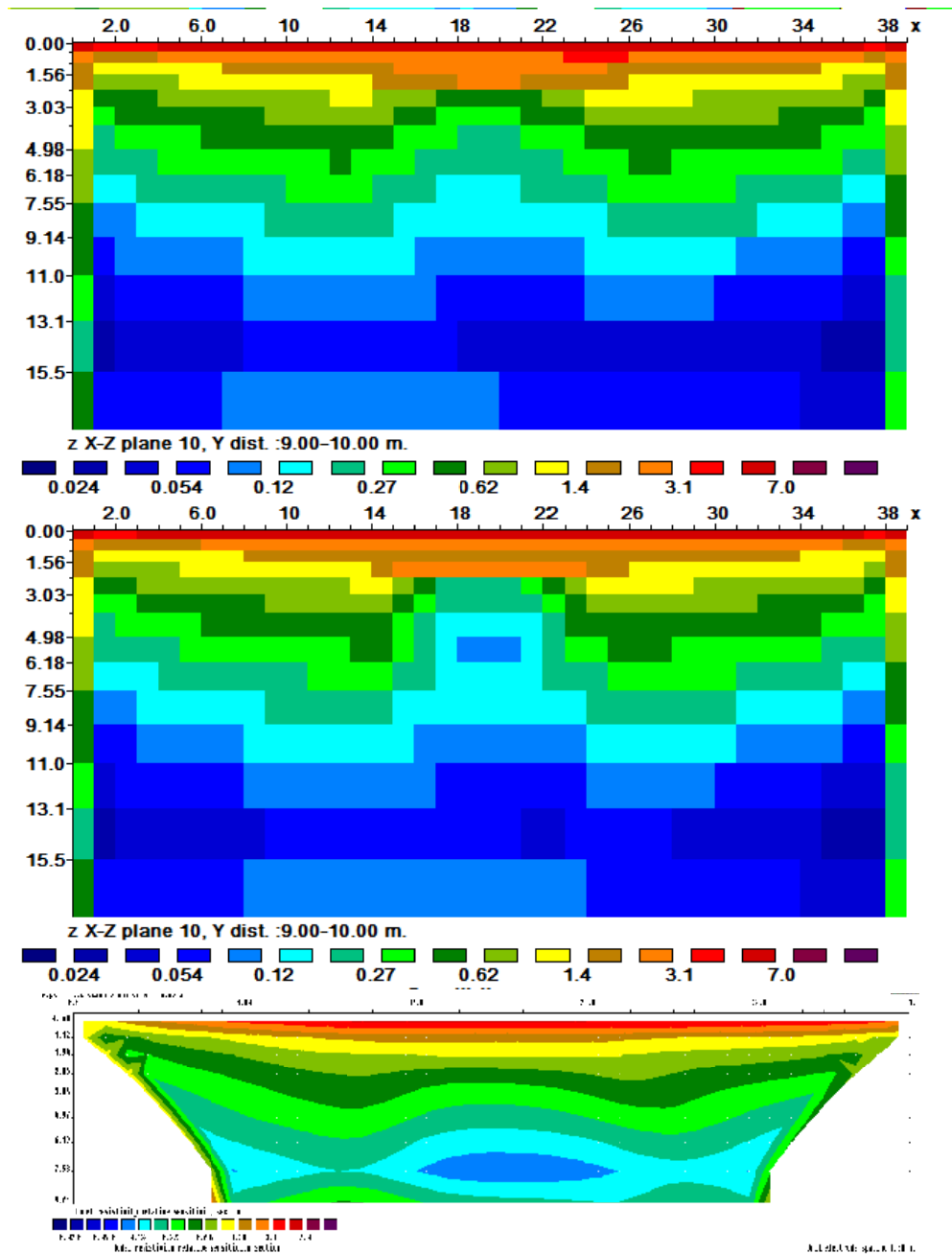


Σχήμα Α.1: Sensitivity  $y=0-1\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

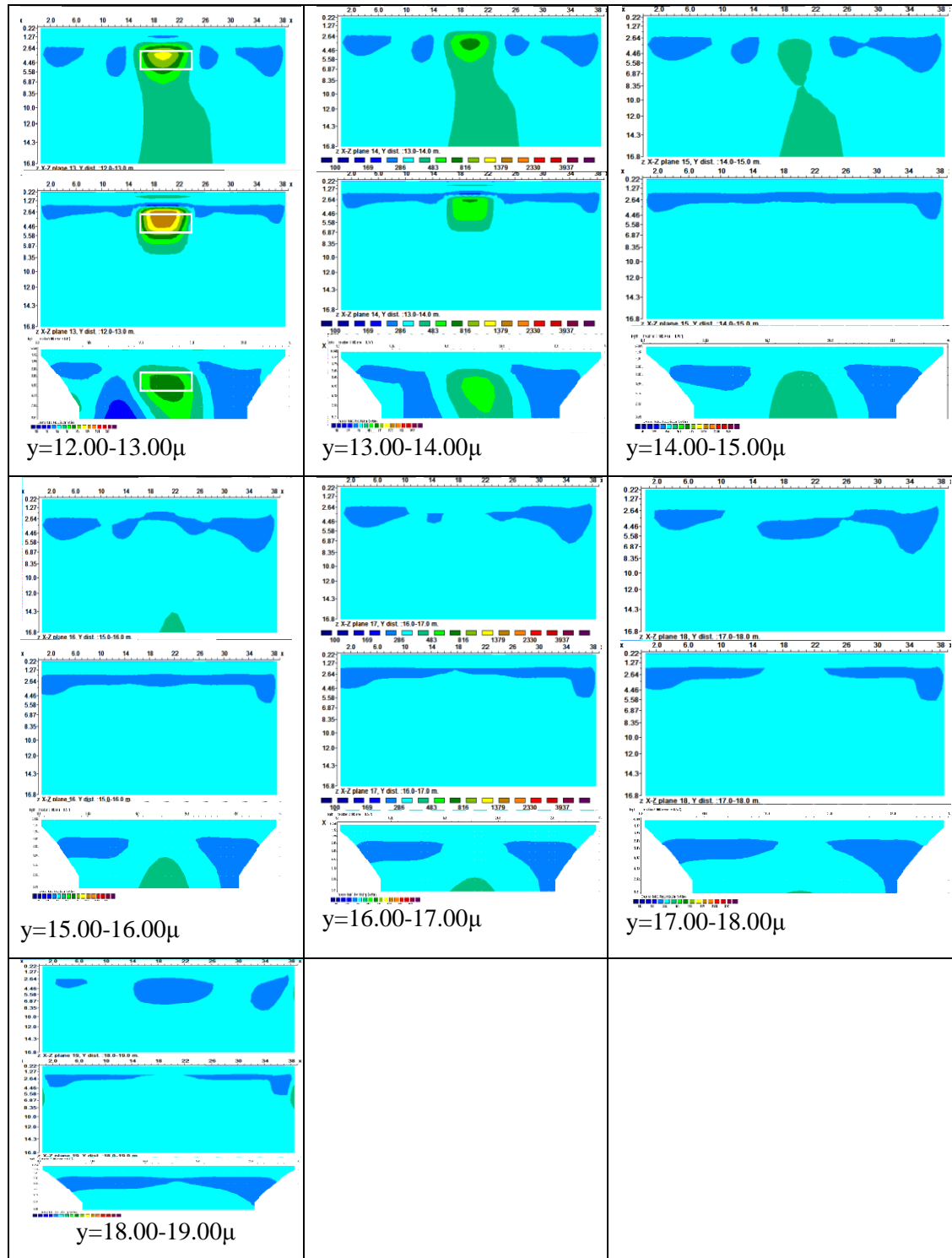


Πίνακας Α.9: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου πόλου-διπόλου για  $y= 6.00-12.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

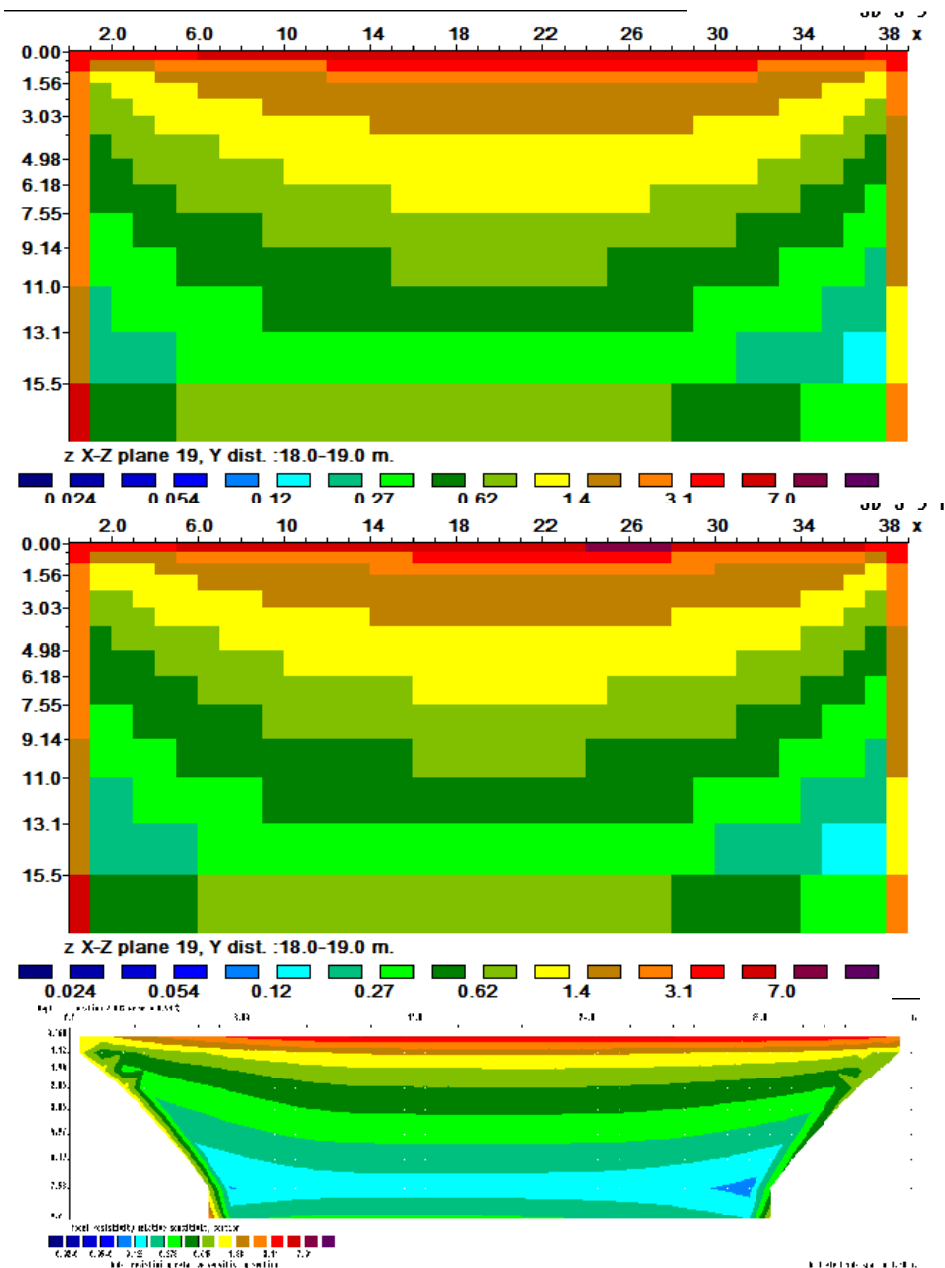




Σχήμα Α.2: Sensitivity  $\gamma = 9.00-10.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

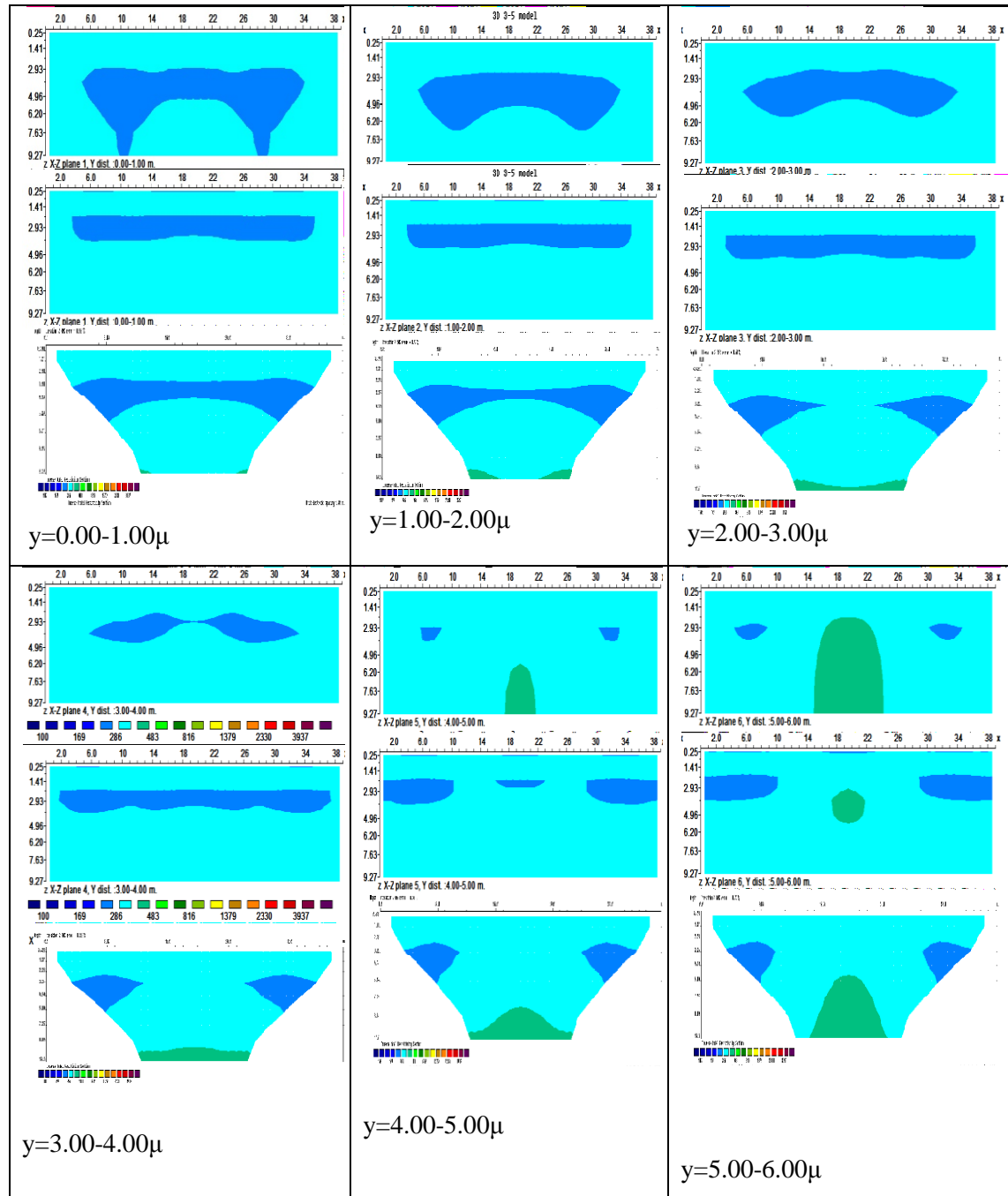


Πίνακας Α.10: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου πόλου-διπόλου για  $y = 12.00-19.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

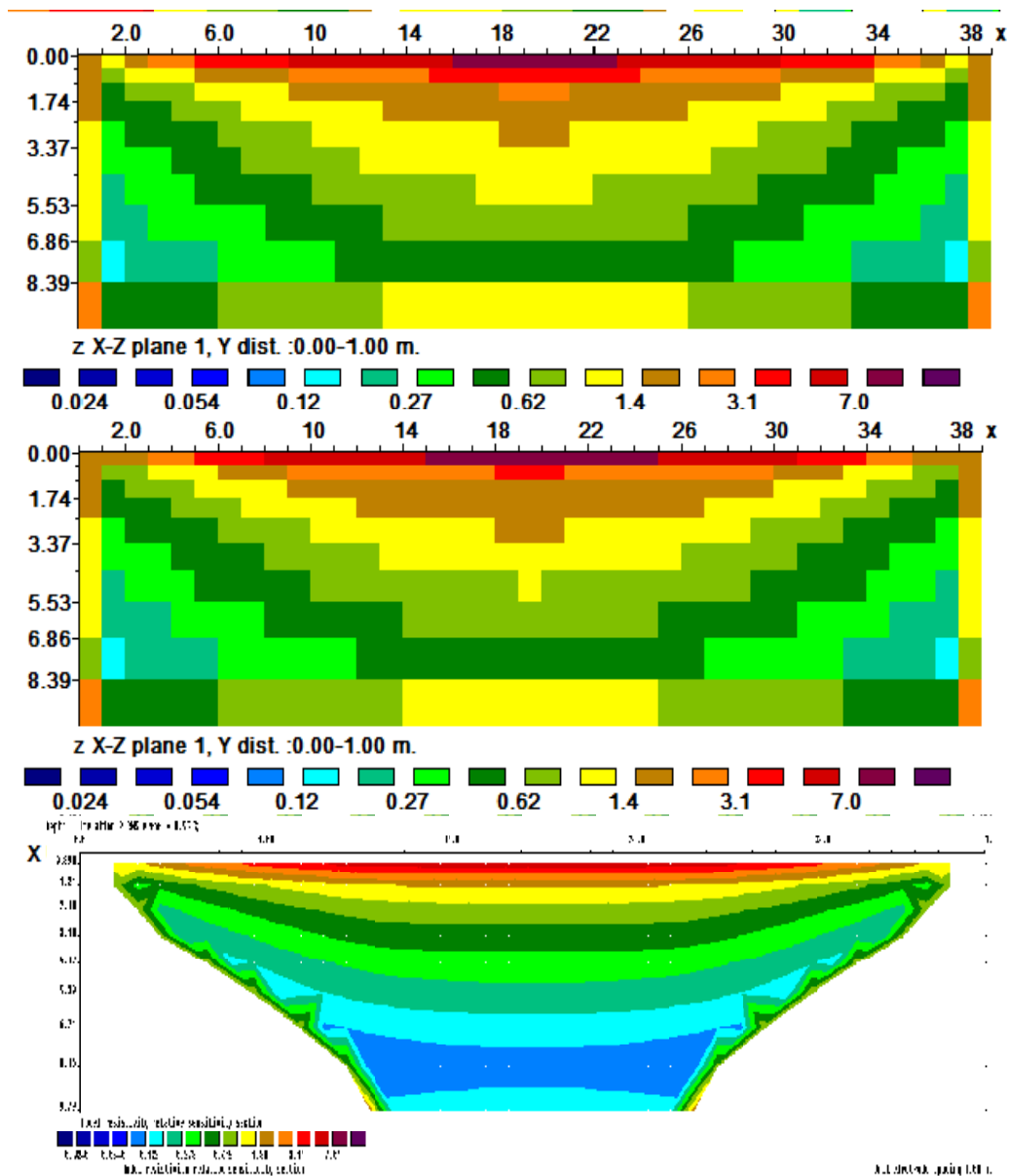


Σχήμα Α.3: Sensitivity  $y = 18.00-19.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

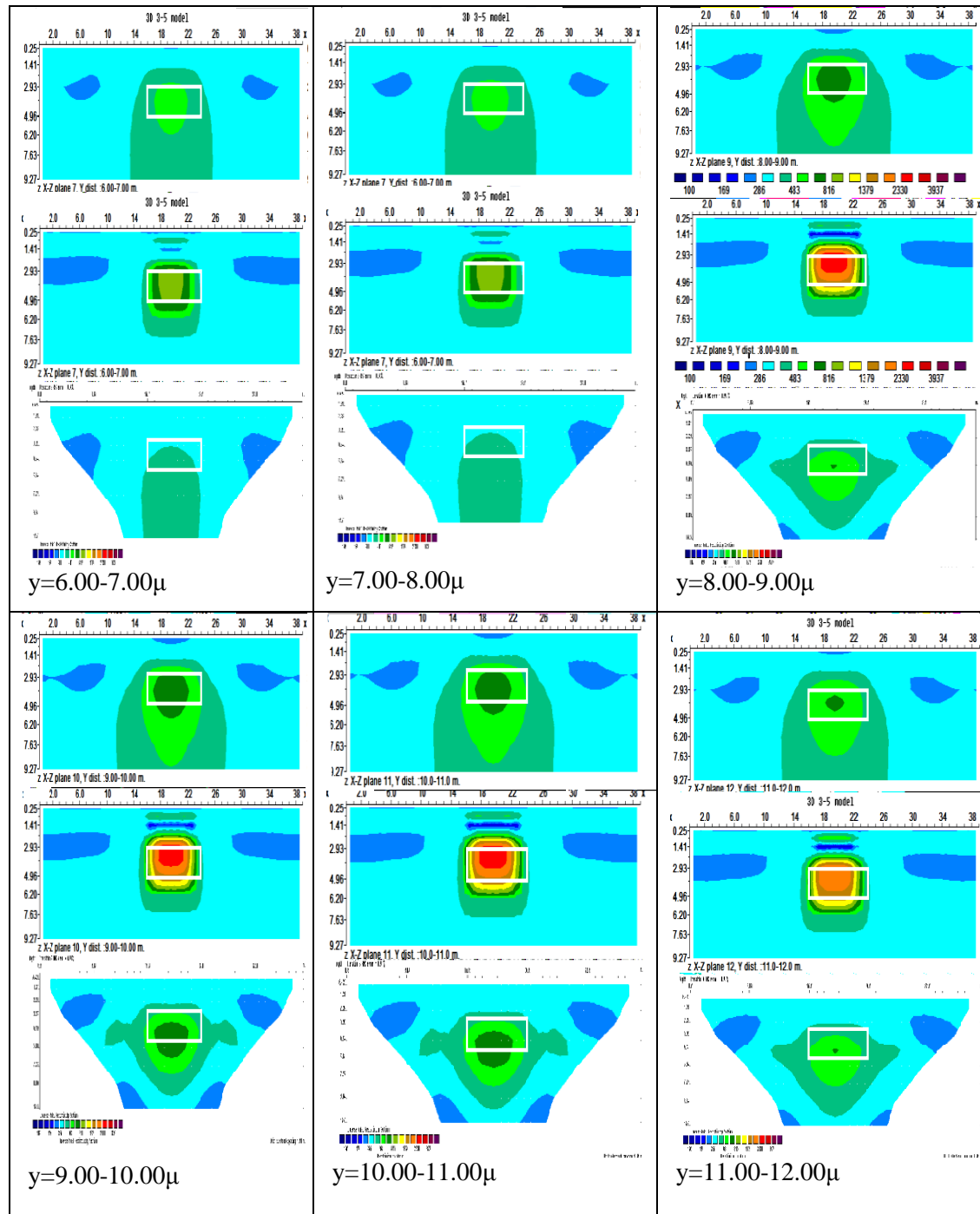
Παρακάτω βρίσκονται τα αποτελέσματα της μεθόδου Wenner - Schlumberger στον άξονα xz. Καθώς και τα sensitivity τους.



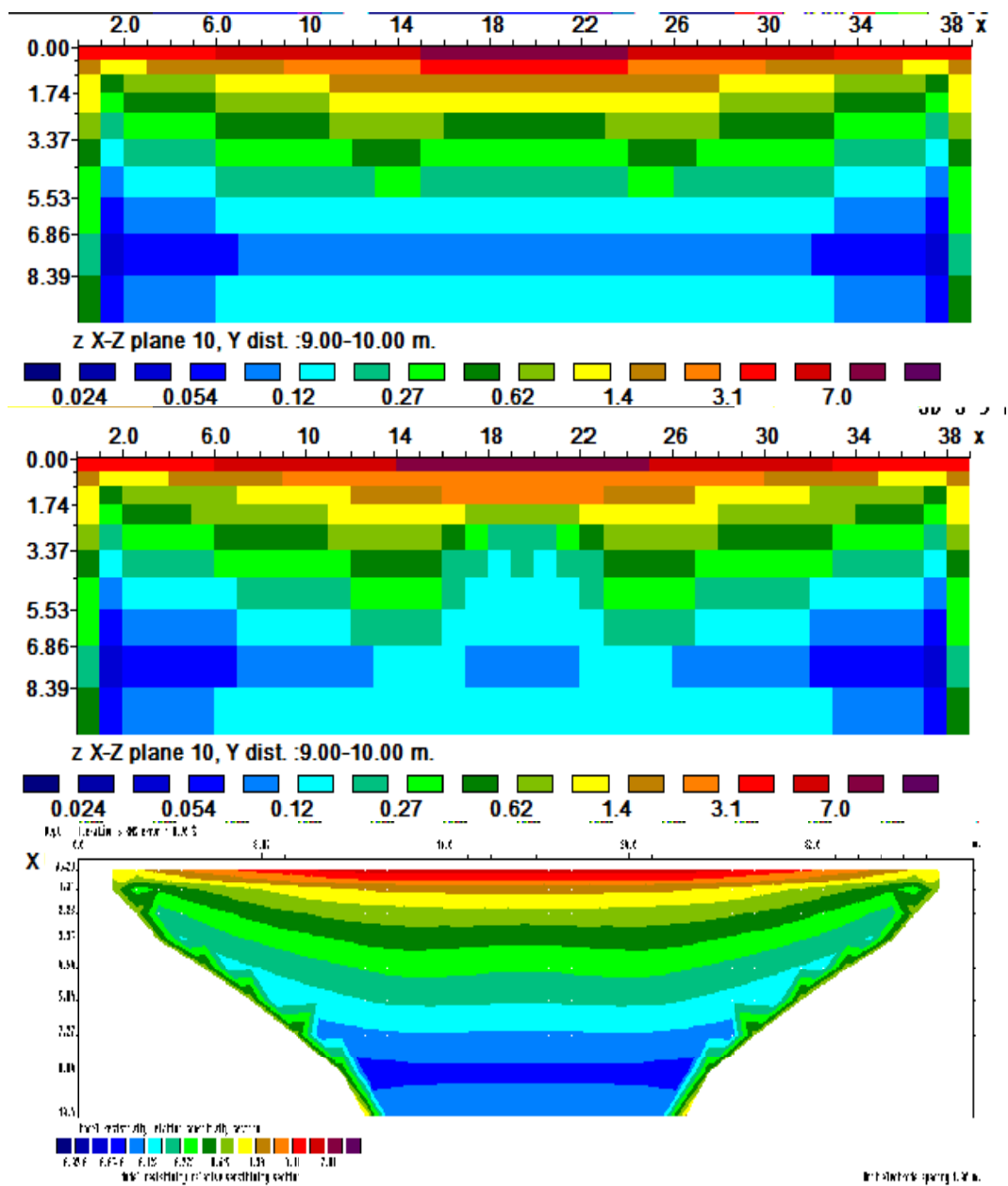
Πίνακας Α.11: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου Wenner – Schlumberger για  $y = 0.00 - 6.00 \mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.



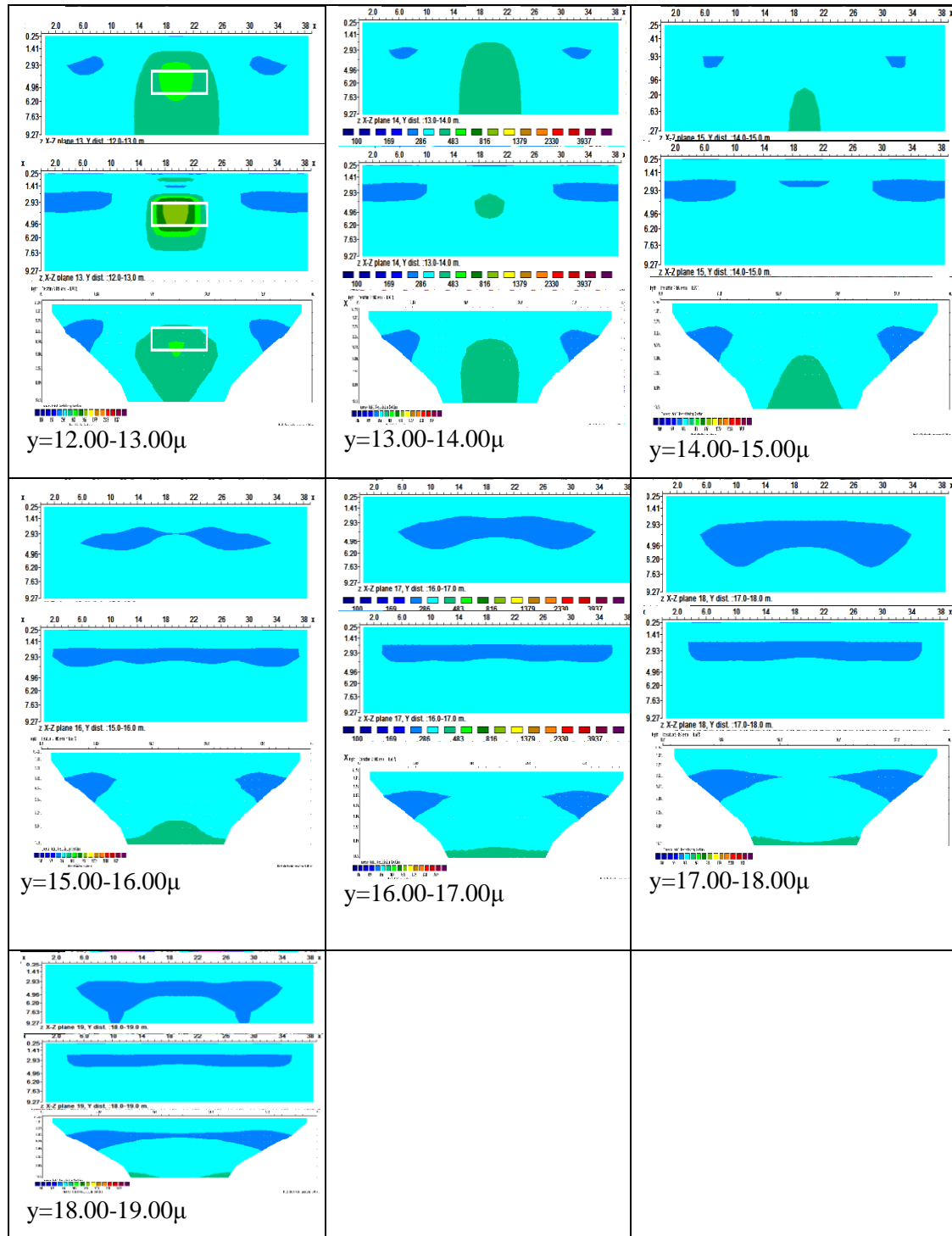
Σχήμα Α.4: Sensitivity  $y = 0.00-1.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.



Πίνακας Α.12: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου Wenner - Schlumberger για  $y = 6.00-12.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

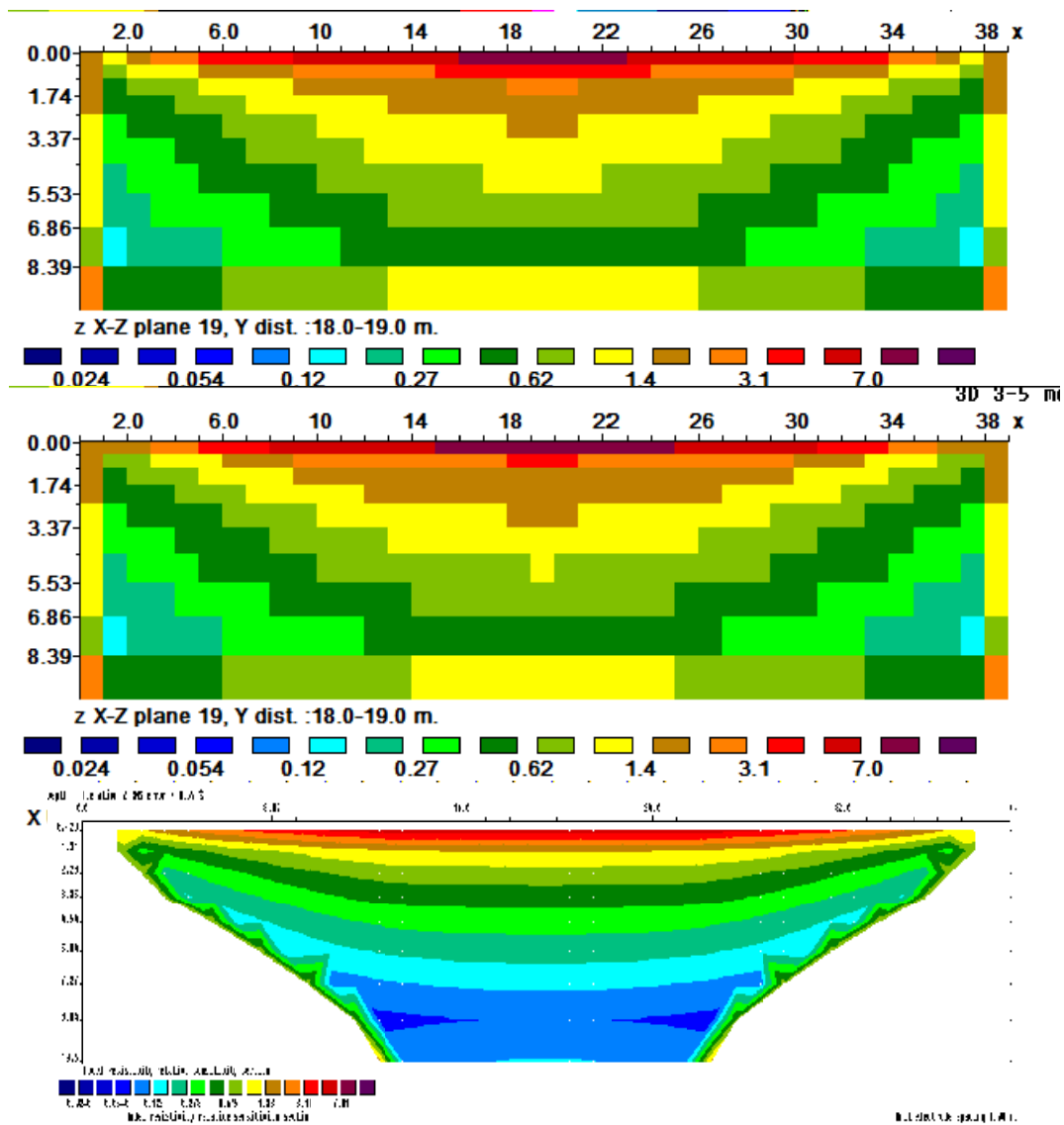


Σχήμα Α.5: Sensitivity  $y = 9.00-10.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.



Πίνακας Α.13: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου Wenner - Schlumberger για  $y = 12.00-19.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

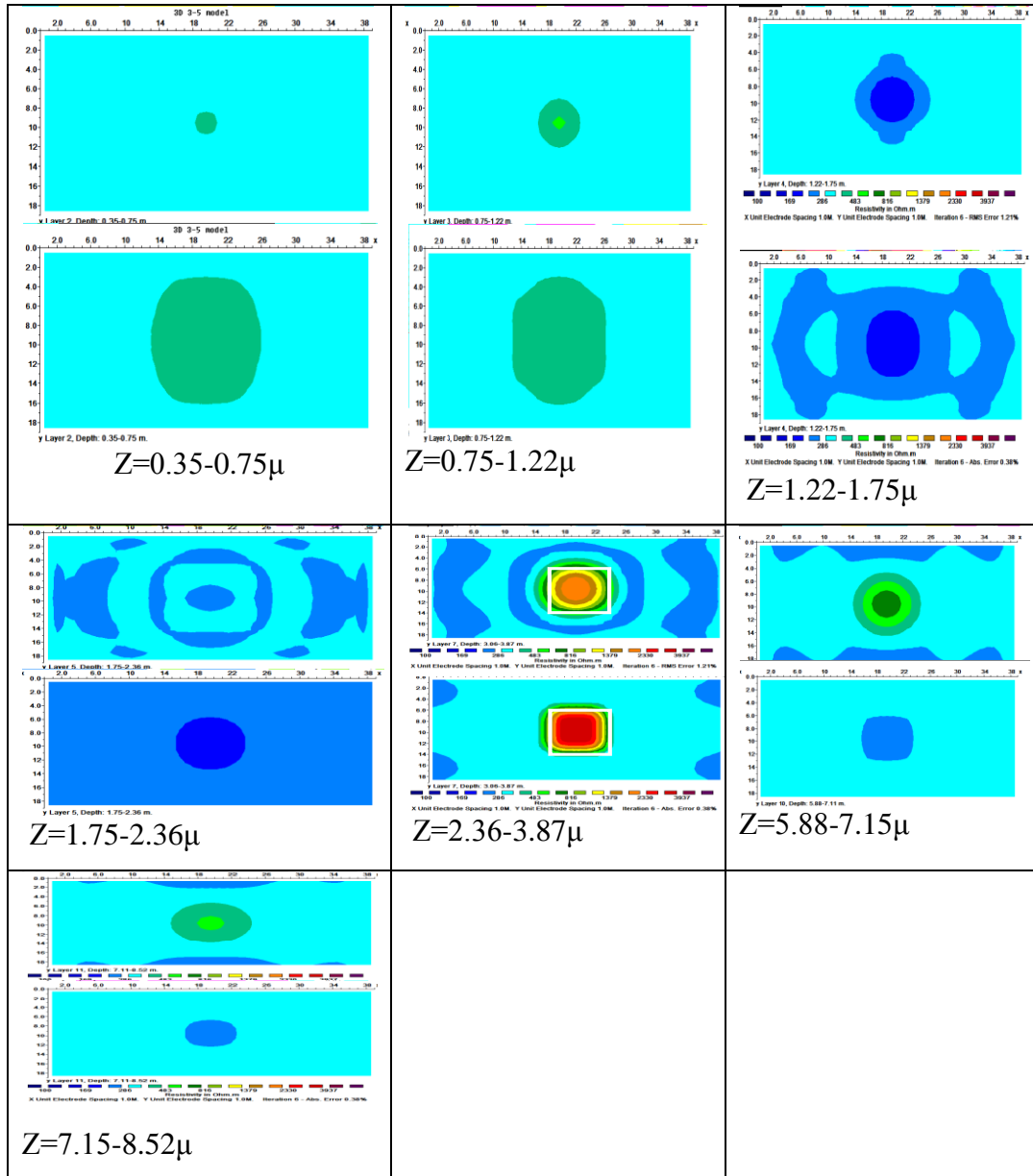




Σχήμα Α.6: Sensitivity  $y = 18.00\text{--}19.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην μεσαία φωτογραφία διακρίνεται επεξεργασία της μεθόδου Robust. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται επεξεργασία μέσω των 2 διαστάσεων.

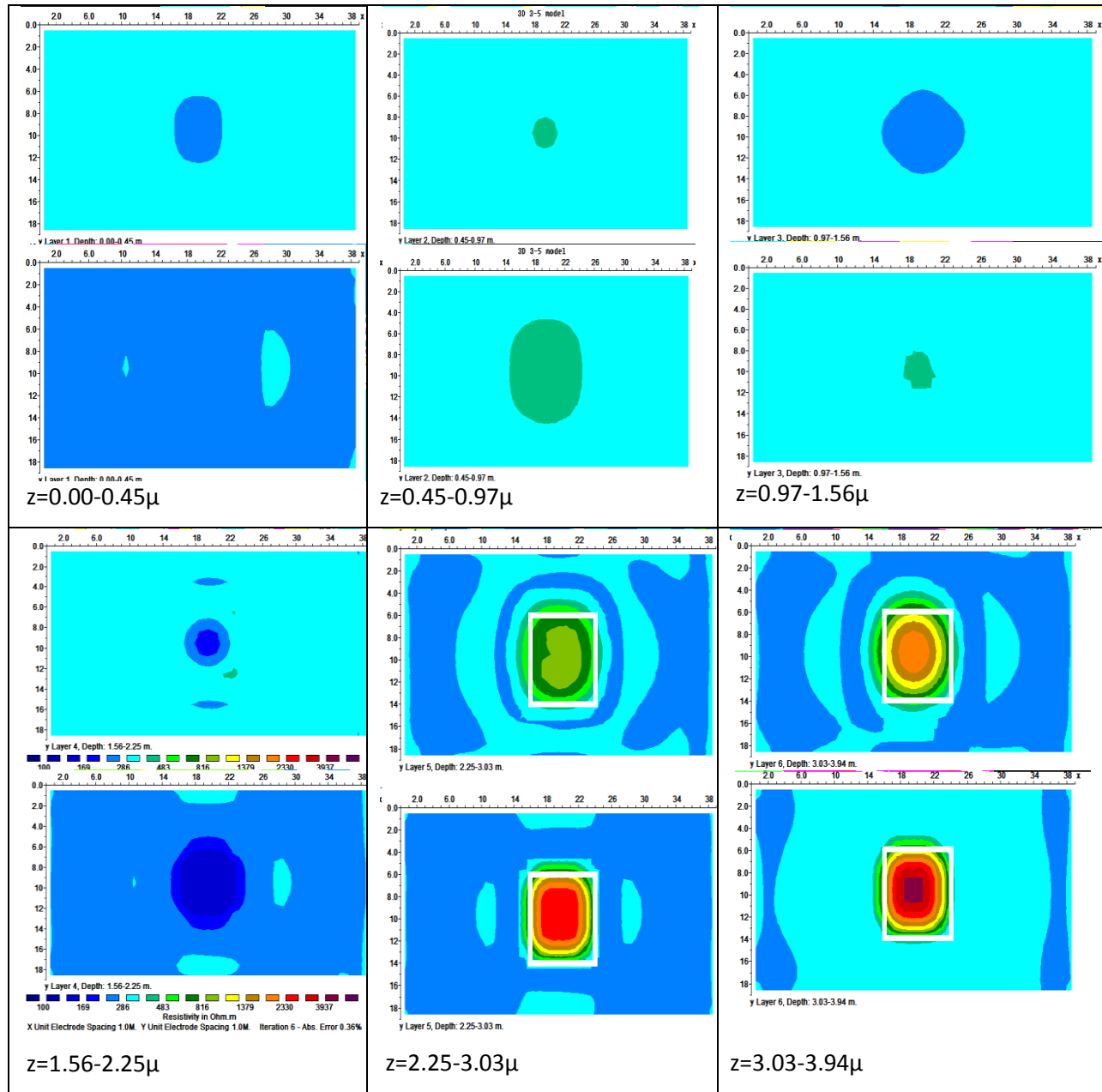
## Παράρτημα Β

Παρακάτω βρίσκονται τα υπόλοιπα αποτελέσματα της μεθόδου διπόλου-διπόλου στον άξονα horizontal.

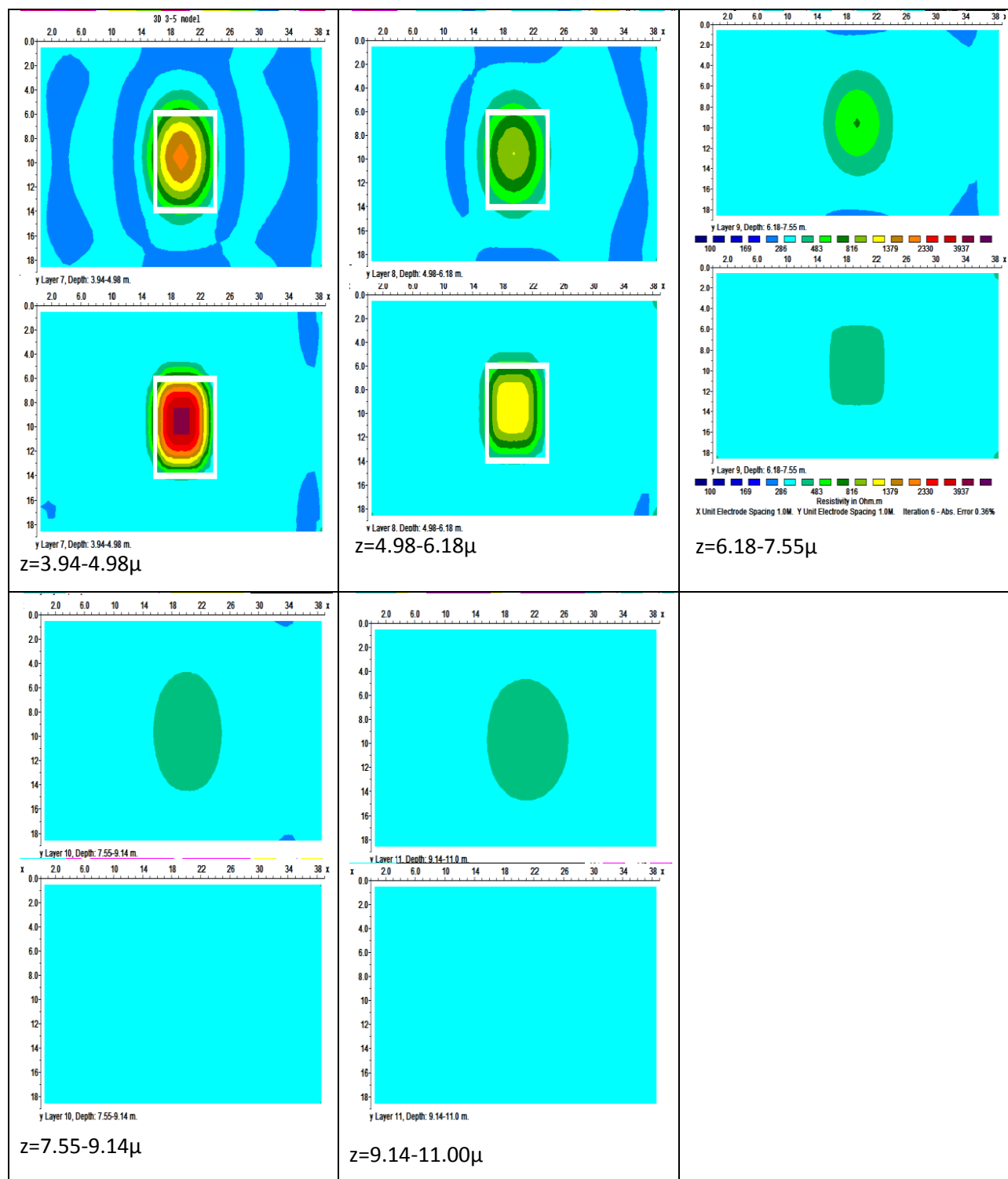


Πίνακας Β.1: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου διπόλου-διπόλου για  $z = 0.00-8.52\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust.

Παρακάτω βρίσκονται τα αποτελέσματα της μεθόδου πόλου-διπόλου στον άξονα horizontal.

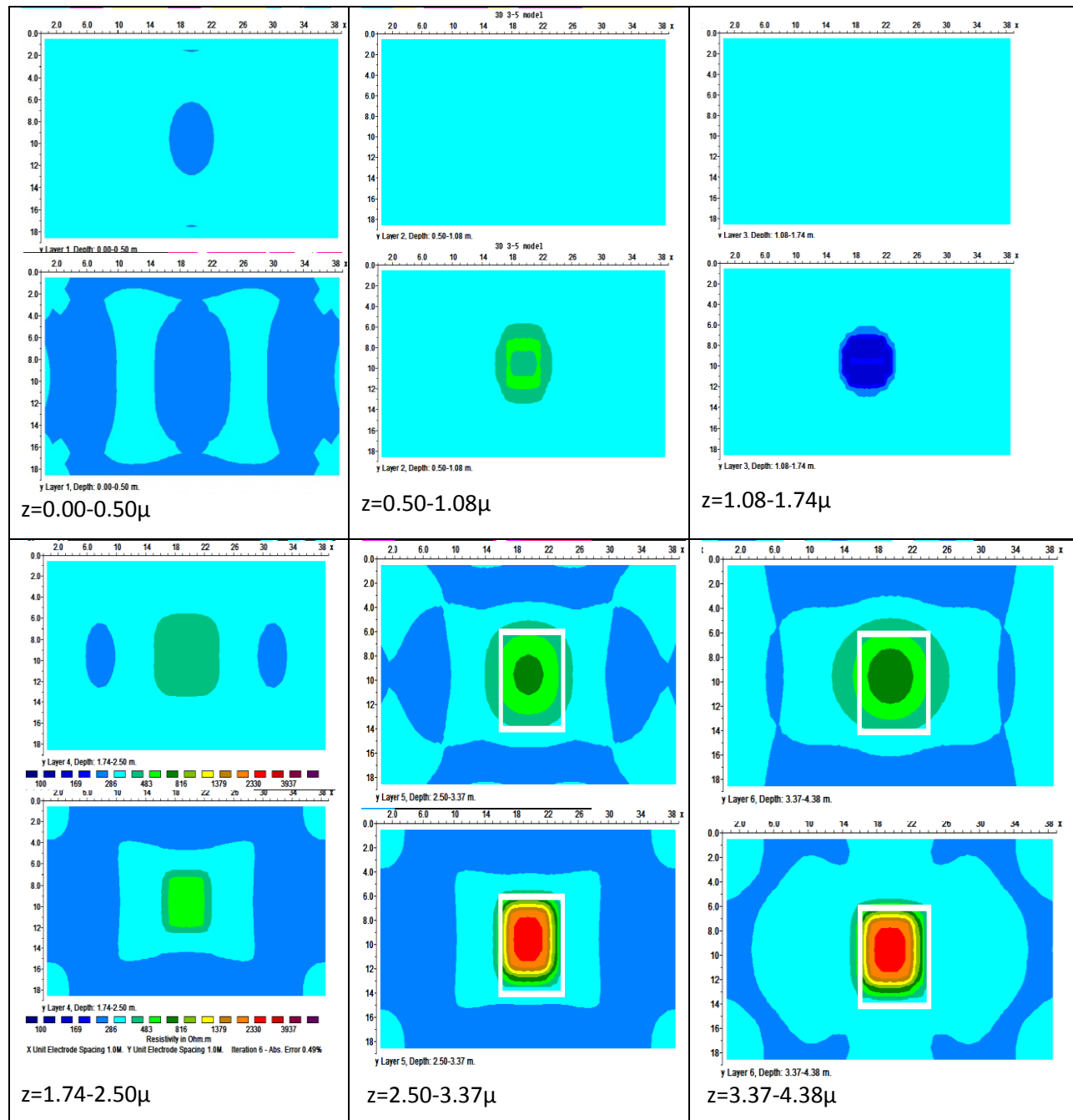


Πίνακας Β.2: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου πόλου-διπόλου για  $z = 0.00-3.94\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust.

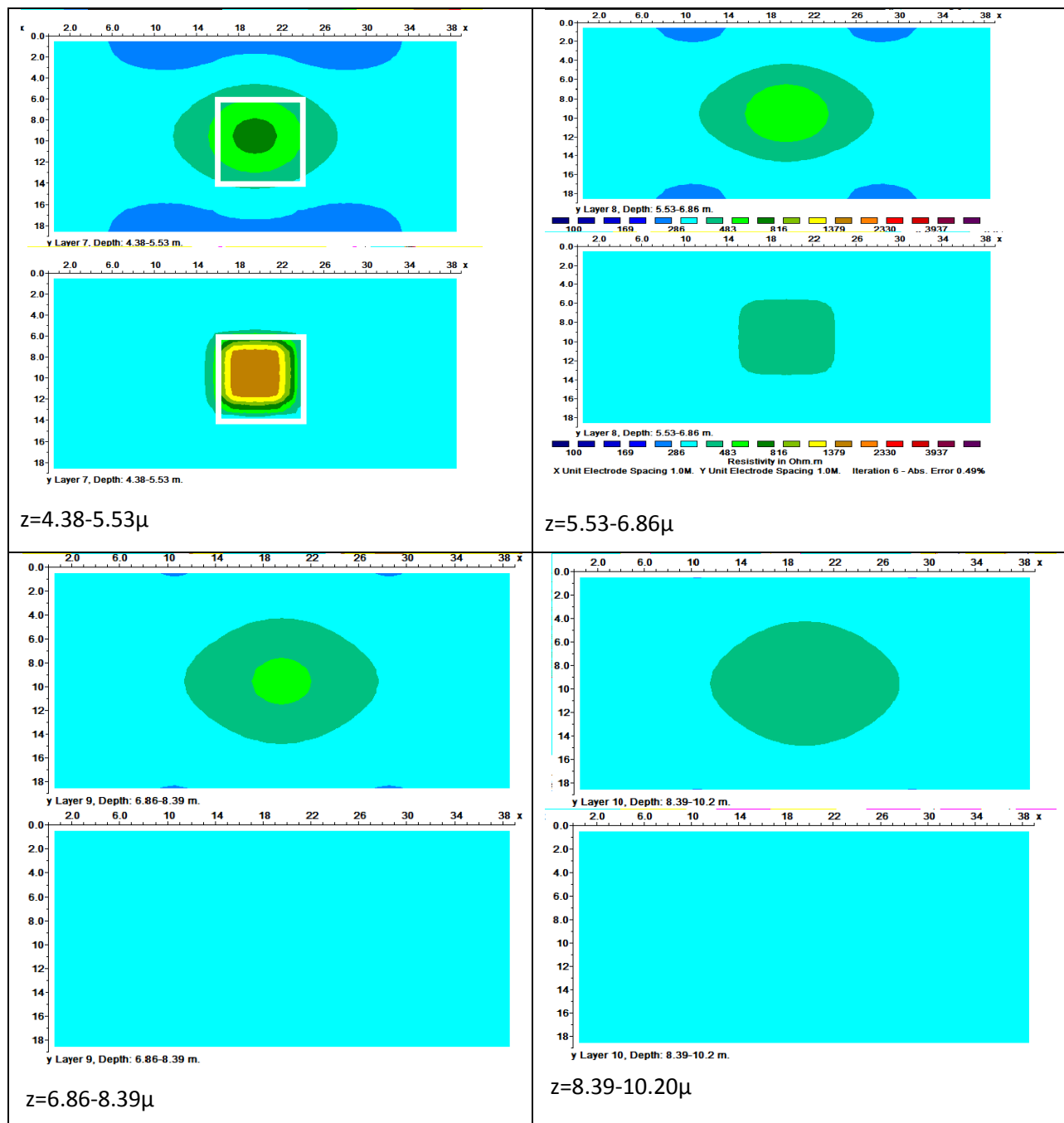


Πίνακας Β.3: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου πόλου-διπόλου για  $z = 3.94-11.00\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust.

Παρακάτω βρίσκονται τα αποτελέσματα της μεθόδου Wenner-Schlumberger στον άξονα horizontal.



Πίνακας Β.4: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου Wenner-Schlumberger για  $z = 0.00-4.38\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust.



Πίνακας B.5: Γεωηλεκτρικές τομές της μεθόδου Wenner-Schlumberger για  $z= 4.38-10.20\mu$ . Πάνω βρίσκεται η μέθοδος smoothness constrained inversion. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η επεξεργασία της μεθόδου Robust.

### ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DMOD

#### 1.Εισαγωγή

Παρακάτω θα αναφερθεί η χρήση του προγράμματος RES2DMOD στην έκδοση 3.02.06 για λειτουργικό σύστημα Windows. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να εκτελέσει προσομοίωση δισδιάστατων δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, τα οποία μπορούν να προκύψουν από πλήθος διατάξεων.

#### 2. Επιλογές του προγράμματος

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν οι επιλογές του προγράμματος.

## 2.1. Το μενού **File**



Το μενού αυτό έχει τις παρακάτω επιλογές:

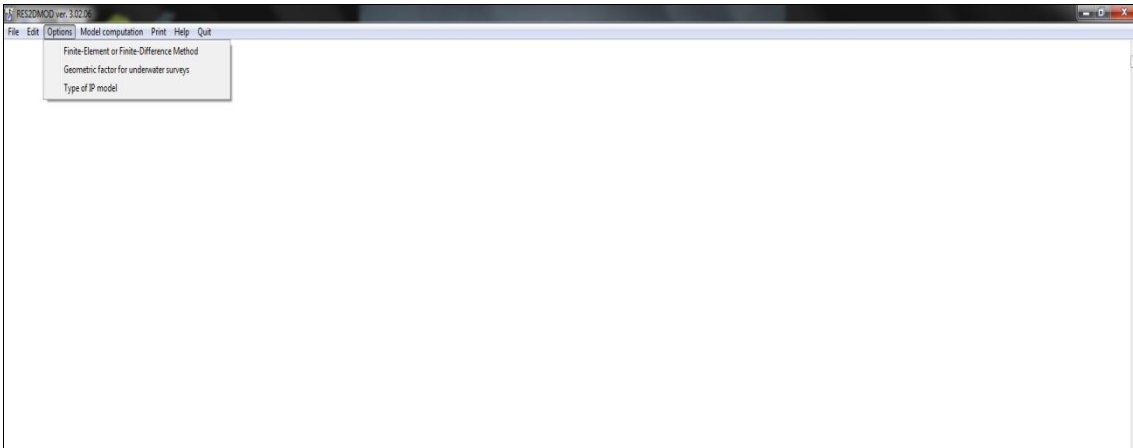
- Read file with forward model: Εδώ εισάγεται το αρχείο με τα δεδομένα, τα οποία έχουν προέκταση .mod
- Save results in RES2DMOD format: Εδώ αποθηκεύονται τα δεδομένα σε αρχείο με προέκταση .mod
- Convertfor 2 to 4 nodes: Με αυτή την επιλογή μετατρέπονται κατευθείαν οι 2 κόμβοι σε 4.
- Save results in RES2DINV format: Εδώ αποθηκεύονται τα δεδομένα σε αρχείο με προέκταση .dat
- Save model in SURFER format: Εδώ αποθηκεύονται τα δεδομένα σε αρχείο με προέκταση .txt
- Exit program: Από εδώ τερματίζεται το πρόγραμμα.





- Horizontal plotting scale: Αλλάζει η οριζόντια κλίμακα.
- Vertical display scaling factor: Αλλάζει ο κλιμακοτός παράγοντας.
- Customize colour scheme: Με την επιλογή αυτή αλλάζουν τα χρώματα.
- Read customize colour scheme: Άνοιγμα αρχείου έτοιμων χρωμάτων.
- Restore default colours: Με την εντολή αυτή γίνεται επαναφορά προεπιλεγμένων χρωμάτων.

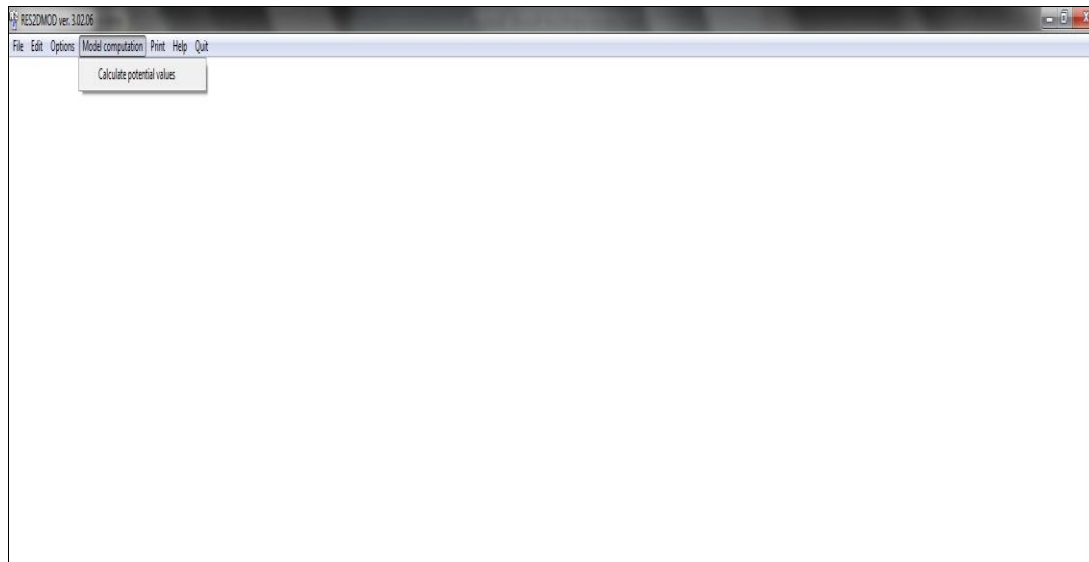
## 2.3. Το μενού Options



Το μενού αυτό έχει τις παρακάτω επιλογές:

- Finite-Element or Finite-Difference Method: Επιλογή ή της μεθόδου Πεπερασμένων-Στοιχείων ή της μεθόδου Πεπερασμένων-Διαφορών
- Geometric factor for underwater surveys: Επιλογή του γεωμετρικού συντελεστή για υποβρύχιες έρευνες.
- Type of IP model: Επιλογή αν το μοντέλο είναι γραμμικό ή όχι.

## 2.4. Το μενού **Model Computation**



Το μενού αυτό έχει την παρακάτω επιλογή:

- Calculate potential values: Υπολογισμός των τιμών των φαινόμενων αντιστάσεων.

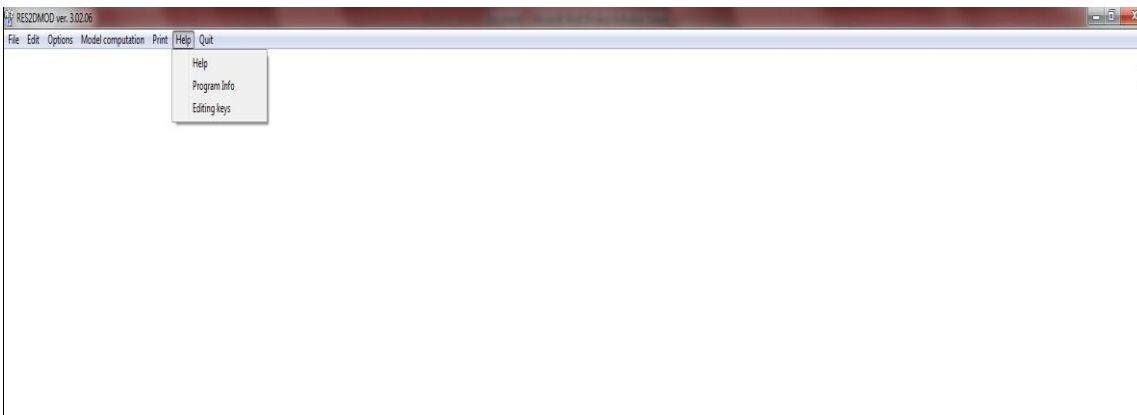
## 2.5. Το μενού **Print**



Το μενού αυτό έχει την παρακάτω επιλογή:

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

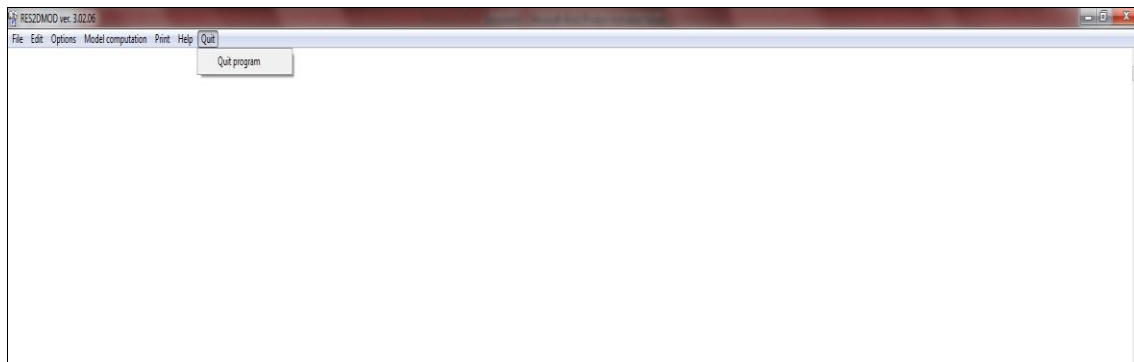
## 2.6. Το μενού **Help**



Το μενού αυτό έχει τις παρακάτω επιλογές:

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

## 2.7. Το μενού **Quit**



Το μενού αυτό έχει την παρακάτω επιλογή:

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

### 3. Αρχή λειτουργίας του προγράμματος

#### 3.1 Βήμα 1<sup>ο</sup>

Αρχικά δημιουργείται το μοντέλο σε ένα αρχείο Notepad και γίνεται εισαγωγή των αντίστοιχων παραμέτρων έτσι ώστε να ανοιχθεί στην συνέχεια από το RES2DMOD.

**Προσοχή:** Οι παράμετροι που θα εισαχθούν στο μοντέλο θα πρέπει να έχουνε μια συγκεκριμένη θέση μέσα στο αρχείο, αλλιώς δεν θα διαβαστούν σωστά.

- Εκτέλεση του προγράμματος Notepad.exe
  
- Εισαγωγή των δεδομένων.

Παρακάτω βλέπουμε την σωστή διάταξη των δεδομένων:

Γραμμή 1	Όνομα μοντέλου.
Γραμμή 2	Αριθμός ηλεκτροδίων (μέγιστο στο 101)
Γραμμή 3	Αριθμός ψευδοτηματικά επίπεδα δεδομένων (μέγιστο το 32 αλλά σχετίζεται και με τη μέθοδο και τον αριθμό των ηλεκτροδίων)

Γραμμή 4	Αναφορά για υποβρύχια έρευνα. Η τιμή είναι 0 όταν δεν έχουμε υποβρύχια έρευνα.
Γραμμή 5	Απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.
Γραμμή 6	Είδος του μοντέλου πλέγματος. Εισάγουμε είτε 0 ή 1 άμα το μοντέλο έχει προκαθορισμένα βάθη και πλέγμα γραμμών είτε 2 για καθορισμένο από τον χρήστη πλέγμα γραμμών. Συνήθως χρησιμοποιούμε την προκαθορισμένη επιλογή.
Γραμμή 7	Απόσταση του πρώτου κελιού από το πρώτο ηλεκτρόδιο. Συνήθως είναι 0.
Γραμμή 8	Αριθμός κελιών. Συνήθως για να βρούμε των αριθμό των κελιών που θα χρησιμοποιήσουμε μας βοηθάει η παρακάτω σχέση. (αριθμός ηλεκτροδίων -1)*αριθμός κόμβων/απόσταση των ηλεκτροδίων η οποία θα καλύψει όλα τα κελιά από το πρώτο μέχρι το τελευταίο ηλεκτρόδιο.
Γραμμή 9	Αριθμός των αντιστάσεων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.(μέγιστο το 16)π.χ. άμα δώσουμε την τιμή 3, τότε οι 3 αντιστάσεις θα συμβολίζονται στο μοντέλο ως εξής : η πρώτη ως 0, η δεύτερη ως 1 και η τρίτη ως 2 και αντίστοιχα άμα δώσουμε άλλες τιμές.
Γραμμή 10	Αριθμός των κόμβων που υπάρχουν μεταξύ της απόστασης των ηλεκτροδίων. Οι τιμές είναι (2 ή 4). Για αριθμό ηλεκτροδίων πάνω από 75 μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή 4.
Γραμμή 11	Τιμές των αντιστάσεων του μοντέλου.
Γραμμή 12	Αριθμός των σειρών των ορθογώνιων κελιών στο μοντέλο (μέγιστο το 29)
Γραμμή 13	Τα βάθη των οριζόντιων γραμμών πλέγματος. Όταν δημιουργούμε το μοντέλο η επιλογή αυτή δεν υπάρχει. Οπότε απλά την προσπερνάμε και πηγαίνουμε κατευθείαν στην επόμενη.(πάντα τα νούμερα αυτά πρέπει να έχουν αυξανόμενες τιμές.
Γραμμές 14 - 27	Σε αυτές τις γραμμές θα εμφανίζονται νούμερα ανάλογα με τον αριθμό των αντιστάσεων που έχουμε εισάχθει στο μοντέλο. Π.χ. Αμα έχουμε βάλει 2 αντιστάσεις τότε σε αυτές τις γραμμές θα έχουμε μόνο 0 και 1. <u>Ισχύει πάντα:</u> Ο αριθμός των επαναλήψεων που έχουμε στην ίδια σειρά είναι ίδιος με τον αριθμό των κελιών και ο αριθμός των σειρών είναι ίδιος με τον αριθμό των σειρών του μοντέλου.
Γραμμή 28	Είδος της μεθόδου.Δίνουμε τις τιμές: 1 για Wenner, 2 για two-pole, 3 για Διπόλου-Διπόλου, 4 για Wenner Beta, 5 για Wenner Gamma, 6 για inline pole-dipole, 7 για Wenner-Schlumberger, 8 για equatorial Διπόλου-Διπόλου.
Γραμμή 29	Η τιμή είναι 0
Γραμμή 30	Η τιμή είναι 0
Γραμμή 31	Η τιμή είναι 0





τιμές της δεύτερης αντίστασης, κάθε τιμή που δίνουμε αντιστοιχεί στην αντίσταση που έχει κάθε κελί στη συνέχεια), η μέθοδος είναι Διπόλου-Διπόλου.

- Αποθήκευση του αρχείου και στο τέλος χρησιμοποιούμε την επέκταση .mod
- Έξοδος από το πρόγραμμα Notepad

### **3.2 Βήμα 2<sup>ο</sup>**

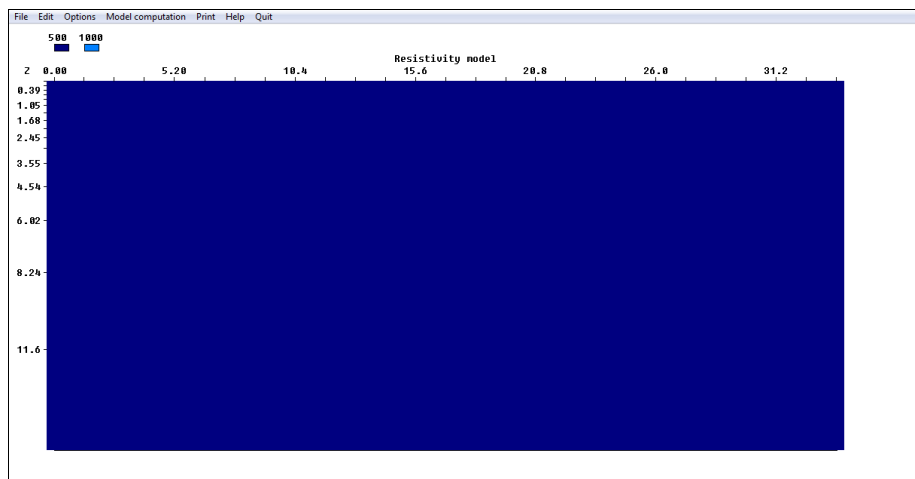
Άνοιγμα του μοντέλου με το RES2DMOD.

- Εκτέλεση του αρχείου RES2DMOD.exe
- Επιλέγουμε: File→Read file with forward model
- Ανοίγουμε το αρχείο που αποθηκεύτηκε πριν με την επέκταση .mod
- Ανοίγωντας το αρχείο εμφανίζονται πάνω αριστερά τα δεδομένα

```
File Edit Options Model computation Print Help Quit

Model name - Model 1 - Boreio tmima spilias.
Number of electrodes is 27.
Number of apparent resistivity levels is 20.
No water layer
Electrode spacing is 1.3.
No remote electrodes.
Model grid depths specified in model file.
Number of model resistivity values is 2.
The number of nodes per electrode spacing is 4.
500.00 1000.00
Number of grid rows in model is 20.
Depth values for model row grid lines are :-
0.19 0.39 0.58 0.78 1.05 1.35 1.68 2.05 2.45 2.89 3.55
4.54 6.02 8.24 11.58 16.59 24.10 35.37 52.27 77.63
Dipole-Dipole array
Reading of data file is complete.
```

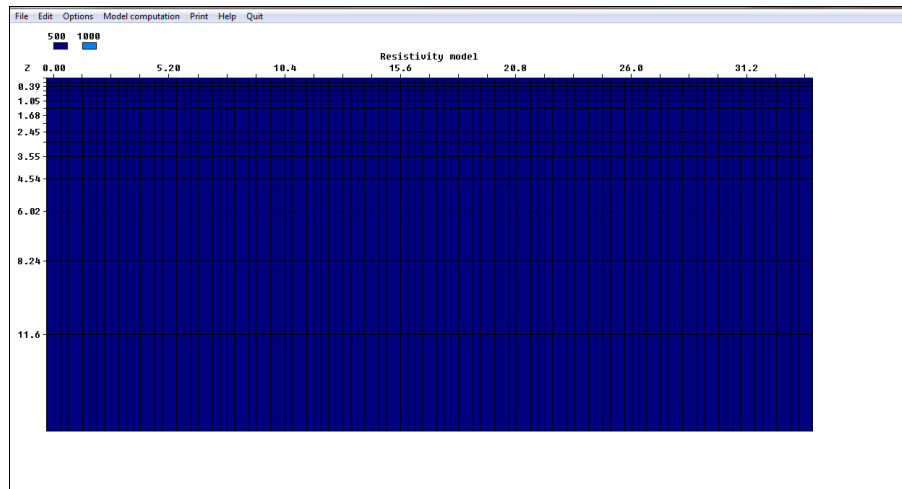
Παρακάτω βλέπουμε το αρχικό μοντέλο με ένα μόνο στρώμα.



### 3.3 Βήμα 3<sup>ο</sup>

Επεξεργασία του μοντέλου.

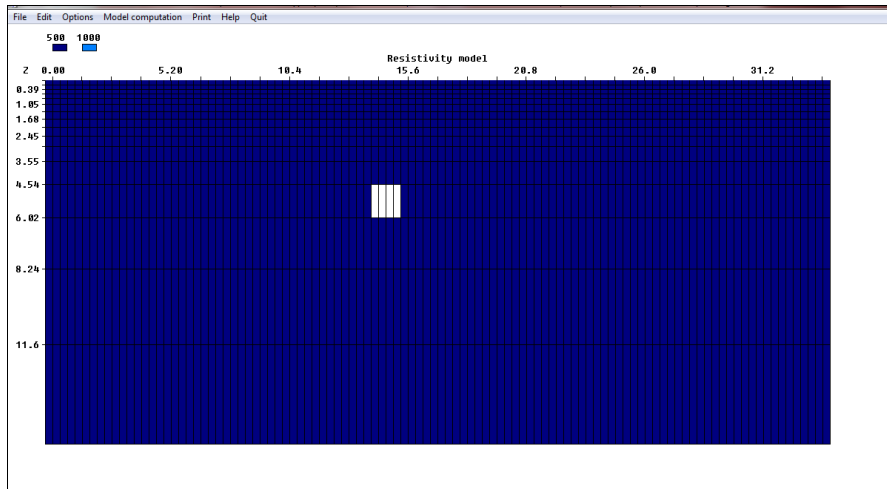
- Επιλέγουμε Edit → Edit model



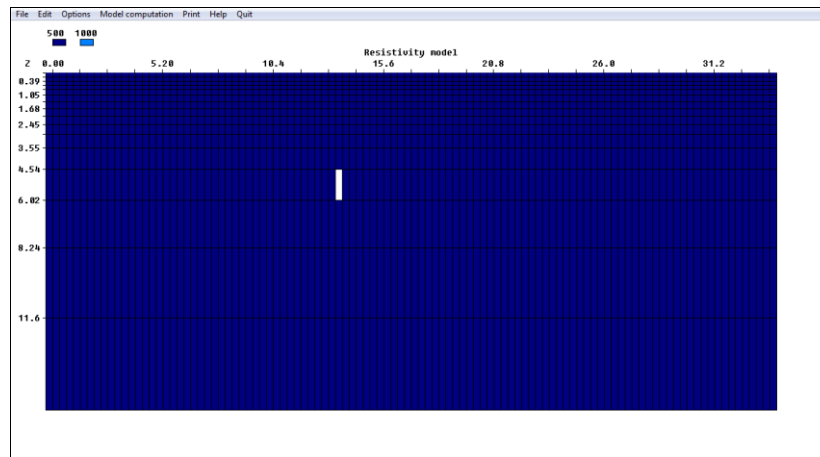
### 3.4 Βήμα 4<sup>ο</sup>

Για να επεξεργαστούμε γραφικά το μοντέλο και να δημιουργήσουμε ένα στρώμα 1000 ohmm με την δεύτερη αντίσταση

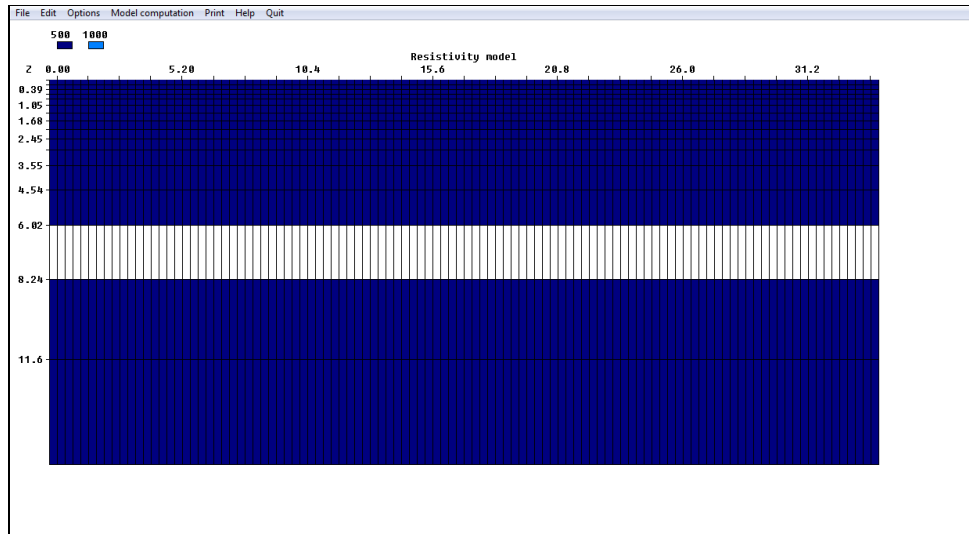
- Χρησιμοποιώντας το αριστερό click πάνω στο μοντέλο, δημιουργούμε μια άσπρη επιφάνεια που έχει μέγεθος 4 κελιά στη σειρά.



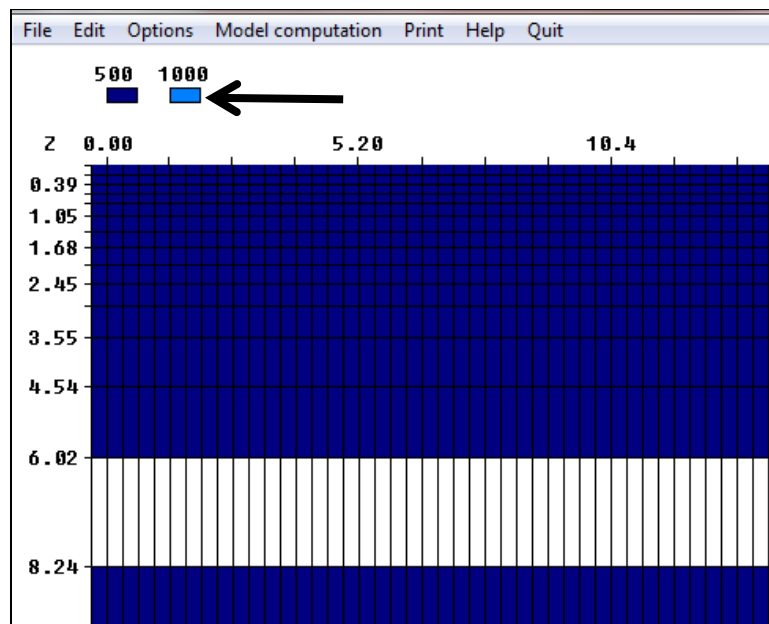
- Χρησιμοποιώντας το δεξί click πάνω στο μοντέλο, γίνεται άσπρο τώρα ένα κελί μόνο.



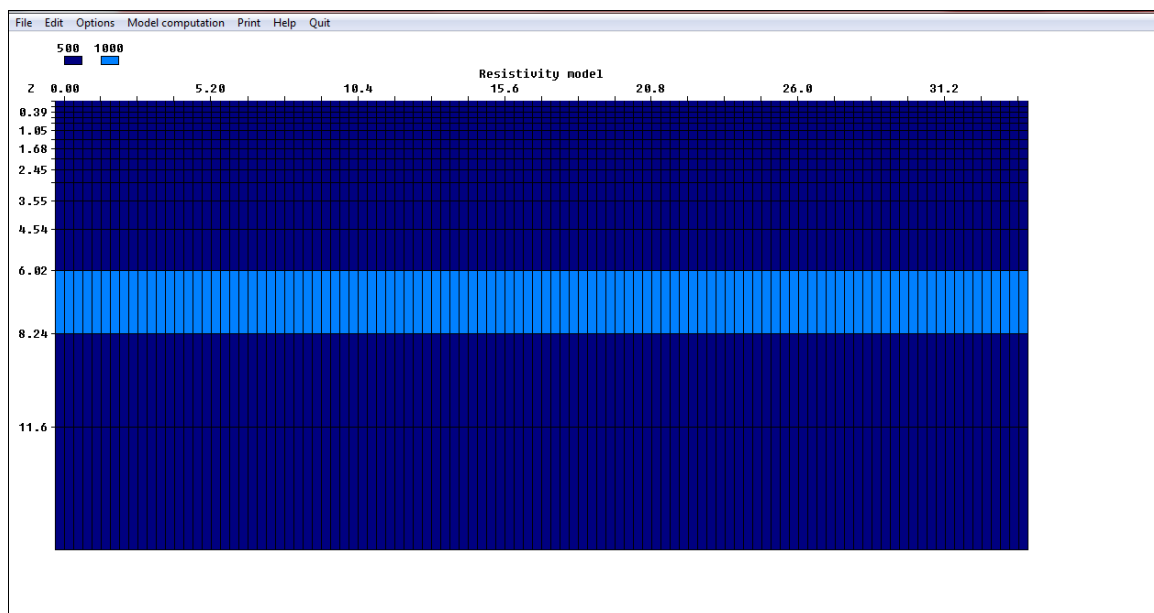
- Για να αλλάξουμε τώρα την τιμή που έχει μια επιφάνεια πάνω στο μοντέλο μας γραφικά πρώτα ασπρίζουμε την επιφάνεια κατάλληλα ανάλογα σε ποιο σημείο θέλουμε να κάνουμε την αλλαγή.



- Στη συνέχεια επιλέγουμε πάνω αριστερά που υπάρχουν οι τιμές των αντιστάσεων την τιμή που θέλουμε με click πάνω στην τιμή που θέλουμε.



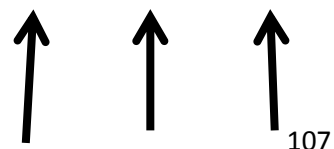
- Δημιουργήσαμε ένα στρώμα με  $-8,2\mu$  βάθος και με αντίσταση  $1000\ \Omega\text{mm}$ .



### 3.5 Βήμα 5<sup>ο</sup>

Ένας άλλος τρόπος να δημιουργήσουμε στρώματα στο μοντέλο σε συγκεκριμένο βάθος και για συγκεκριμένο πάχος στρώματος είναι να αλλάξουμε το αρχικό αρχείο.

- Για να δημιουργήσουμε ένα στρώμα από τα  $5\text{-}10\ \mu$  τότε θα πρέπει να αλλάξουμε τις τιμές στη γραμμή 13 έτσι ώστε να της δώσουμε τα νούμερα που θέλουμε. Δηλαδή για τα νούμερα 0.1950, 0.3900, 0.5850, 0.7800, 1.0530, 1.3533, 1.6836, 2.0470, 2.4467, 2.8864, 3.5459, 4.5351, 6.0190, 8.2448, 11.584, 16.592, 24.104, 35.372, 52.274, 77.628. Θα αλλάξουμε τα νούμερα 6.0190 σε 5.00 και το 11.584 σε 10.00. Άρα η καινούργια γραμμή 13 θα είναι η 0.1950, 0.3900, 0.5850, 0.7800, 1.0530, 1.3533, 1.6836, 2.0470, 2.4467, 2.8864, 3.5459, 4.5351, 5.000, 8.2448, 10.000, 16.592, 24.104, 35.372, 52.274, 77.628



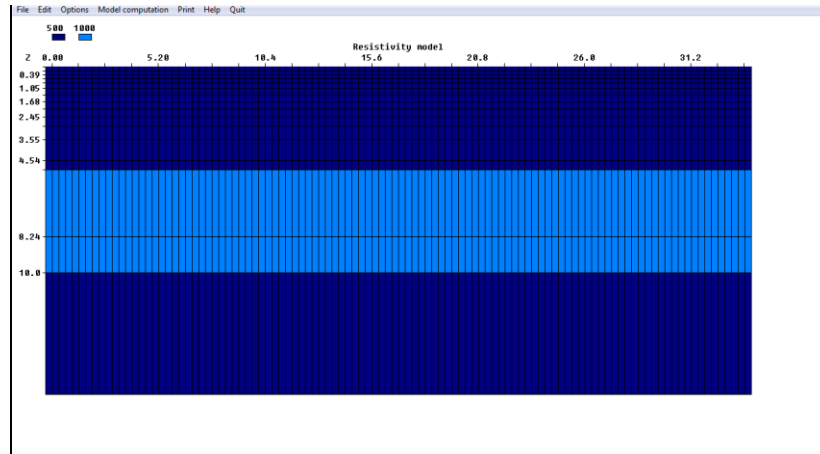
$15^\eta$ 

Αλλαγές θα γίνουνε και στις γραμμές με τα μηδενικά (γραμμές 15-34), θα αντικατασταθούν μηδενικά με άσσους στις γραμμες 28 και 29 γιατί οι γραμμές αυτές αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα βάθη στο μοντέλο. Δηλαδή η γραμμή 28 αντιπροσωπεύει το βάθος 5-8.2448μ (την 13<sup>η</sup> και 14<sup>η</sup> τιμή από τις τιμές της 13<sup>η</sup> γραμμής). Η 29 γραμμή αντιπροσωπεύει το βάθος 8.2448-10 μ (την 14<sup>η</sup> και 15<sup>η</sup> τιμή από την γραμμή 13).

[illegible]



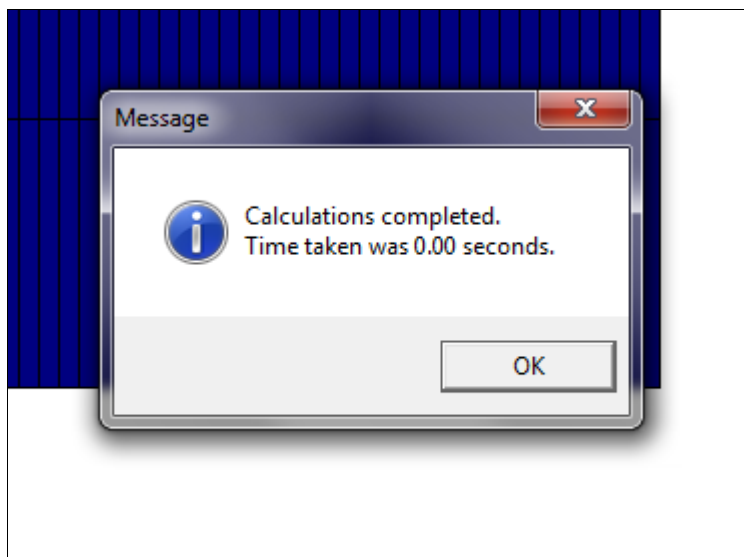
- Στο RES2DMOD τώρα πια εμφανίζεται ένα στρώμα με αντίσταση 1000 ohmm από τα 5-10 μ βάθος.



### 3.6 Βήμα 6<sup>ο</sup>

Στη συνέχεια εφόσον τελιώσαμε την επεξεργασία.

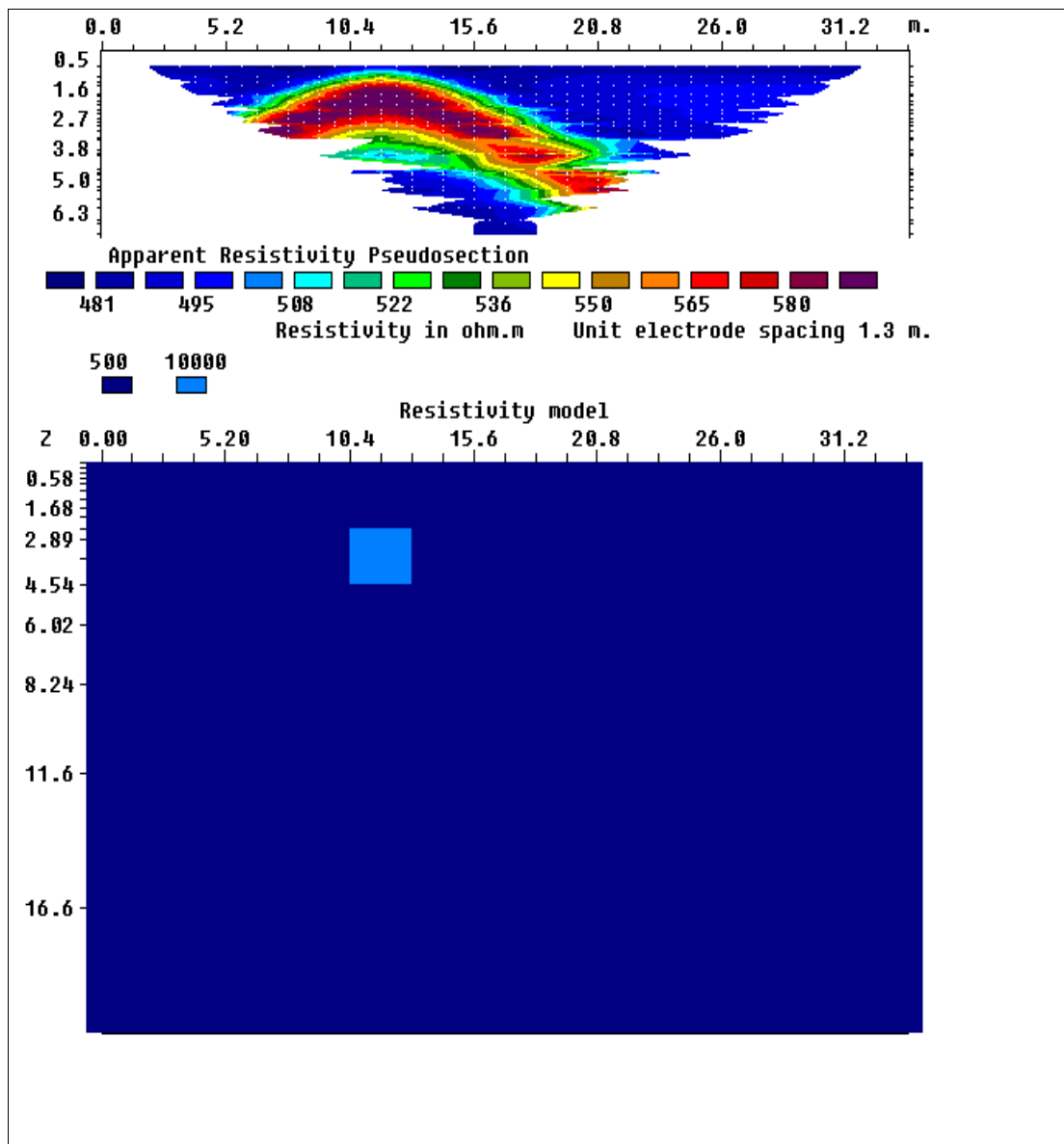
- Επιλέγουμε Model Computation → Calculate potential values



### 3.7 Βήμα 7<sup>ο</sup>

Αμα θέλουμε να μας εμφανίσει τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των τιμών.

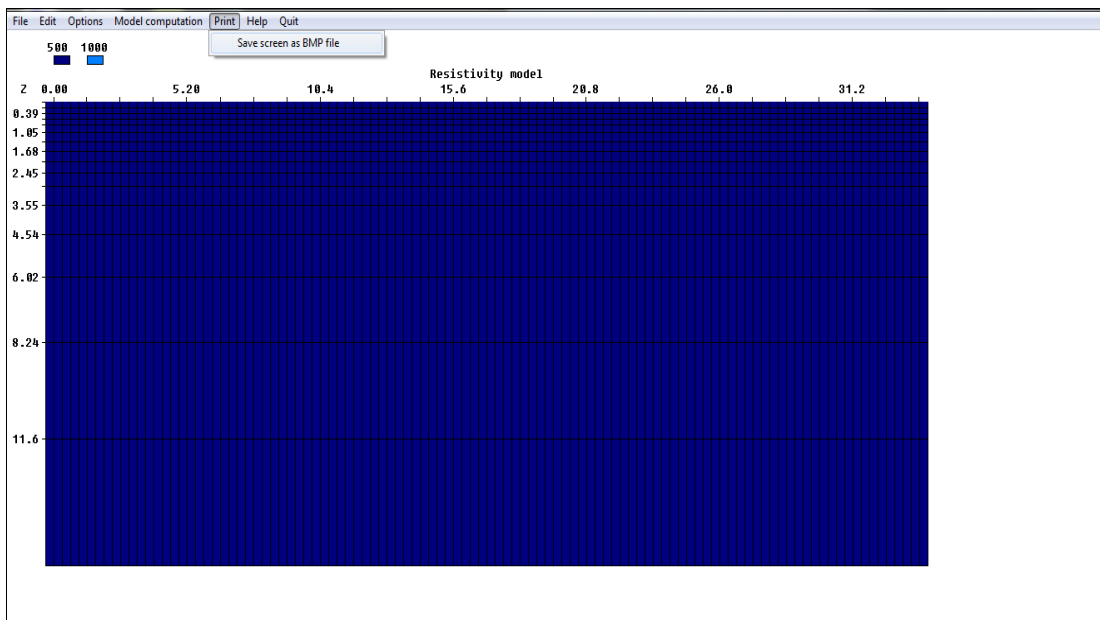
➤ Επιλέγουμε Edit → Display model



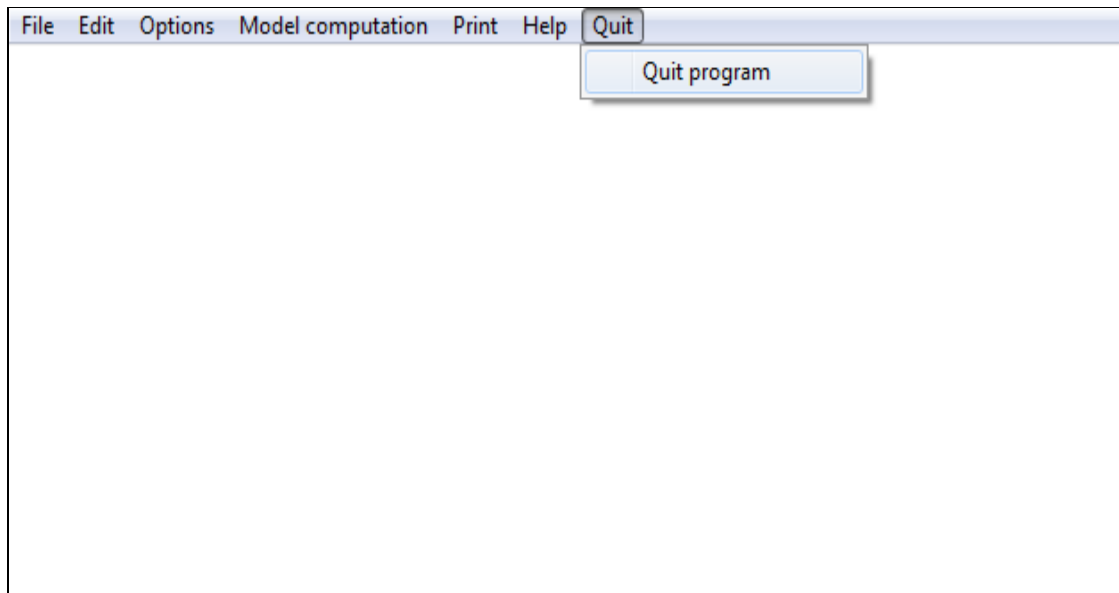
### 3.8 Βήμα 8°

Για να αποθηκεύσουμε το αρχείο. Μπορούμε να το αποθηκεύσουμε σε 2 μορφές, και σε .mod και σε .dat. Η μορφή .mod μπορεί να ανοιχθεί από το πρόγραμμα RES2DMOD ενώ η μορφή .dat μπορεί να ανοιχθεί από το πρόγραμμα RES2DINV μόνο.

- ΕπιλέγουμεFile → Save results in RES2DINV format
- ΕπιλέγουμεFile → Save results in RES2DMOD format
- Αποθήκευση του μοντέλου σε μορφή εικόνας



- Έξοδος από το πρόγραμμα RES2DMOD.



### 3.9 Βήμα 9<sup>ο</sup>

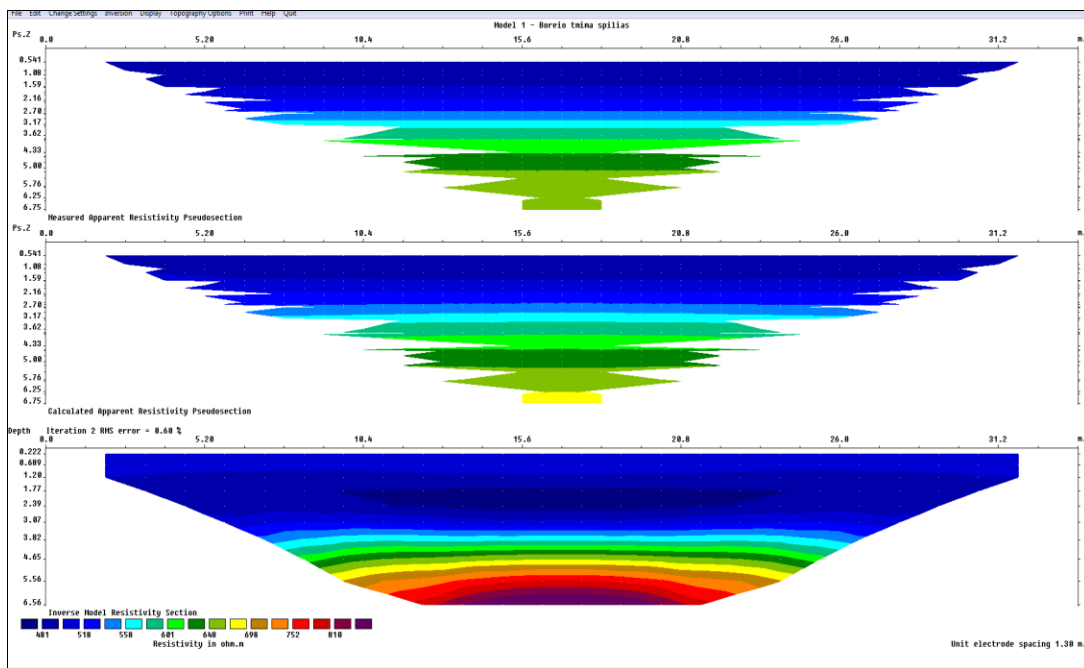
Άνοιγμα του μοντέλου με το RES2DINV.

- Εκτέλεση του αρχείου RES2DINV.exe
- Επιλογή File → Read data file
- Άνοιγμα του αρχείου που αποθηκεύθηκε πριν σε επέκταση .dat

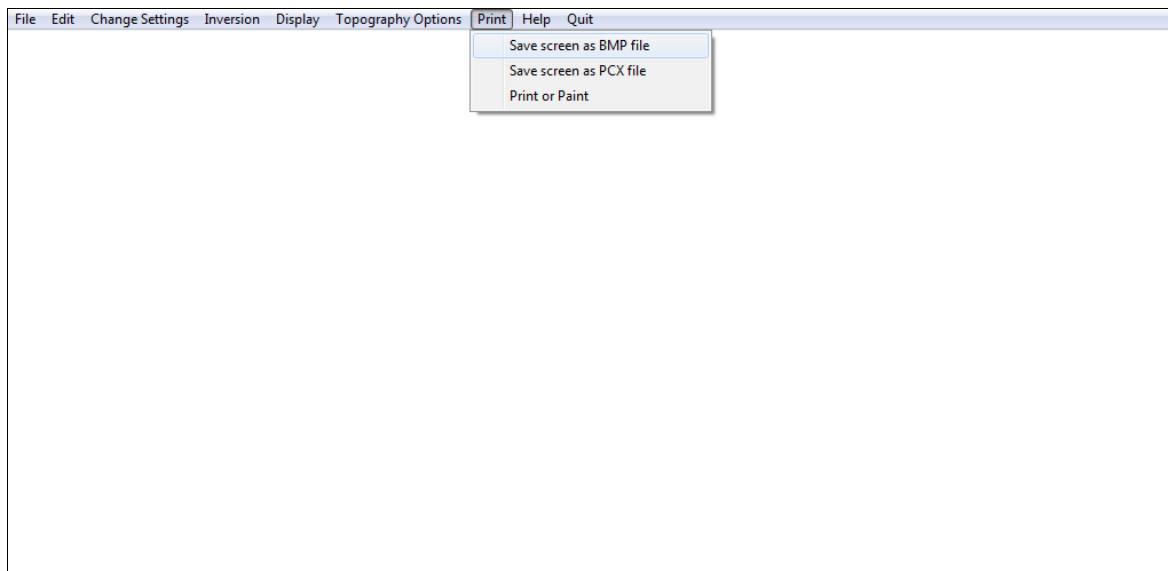
### 3.10 Βήμα 10°

Εμφάνιση φαινομένων και πραγματικών αντιστάσεων.

➤ Επιλογή Inversion → Least – squares inversion



- Αποθήκευση του μοντέλου σε μορφή εικόνας.



- Έξοδος από το πρόγραμμα RES2DINV.

