

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ-ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**«ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΓΚΟΙΛΩΝ ΣΤΟ  
ΑΤΣΙΠΟΠΟΥΛΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ, ΚΡΗΤΗΣ »**

**ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΝΑ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ**



Εξεταστική Επιτροπή:

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Κρητικάκης Γεώργιος, Ε.ΔΙ.Π Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά, Ιανουάριος 2020

«Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην εργασία αυτή εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών»

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Αντώνη Βαφείδη για την καθοδήγηση του τόσο στην επιλογή του θέματος της διπλωματικής όσο και στην εκπόνηση της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Νικόλαο Ανδρονικίδη για όλη την βοήθεια που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια της επεξεργασίας της διπλωματικής .

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εξεταστική επιτροπή, τον κύριο Μανούτσογλου Εμμανουήλ και τον κύριο Κρητικάκη Γεώργιο που παρευρέθη στην παρουσίαση και παρακολούθησε τα αποτελέσματα της παρούσας γεωφυσικής έρευνας.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>σελ:8</b>
----------------------	--------------

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....**

1.1.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	σελ:9
1.2.ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ .....	σελ: 9-11
1.3.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ .....	σελ:11-12

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ**

2.1.ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	σελ:13-14
2.2.ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ...σελ:	14-16
2.3.ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ .....	σελ: 16-17
2.4.ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ .....	σελ: 17
2.4.1.Διάταξη Wenner.....	σελ:18
2.4.2. Διάταξη Schlumberger.....	σελ:19-20
2.4.3. Διάταξη διπόλου-διπόλου .....	σελ: 20-21
2.5.ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ .....σελ:	21-22

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ**

3.1.ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ.....σελ:	23
3.1.1.Αντιστροφή σε δύο διαστάσεις (2D).....σελ:	23-24
3.1.2. Αντιστροφή σε τρεις διαστάσεις (3D).....σελ:	24
3.2.ΤΟ ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....σελ:	24-25
3.3.ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ.....σελ:	26-27
3.4.ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....σελ:	27-28



3.5.ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DINV.....σελ: 28-29
3.6. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES3DINV.....σελ: 29-31
3.7. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EARTHIMAGER 3D.....σελ: 31

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**

4.1.ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....σελ: 32-35
4.2.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....σελ: 35
4.2.1. Αντιστροφή με την νόρμα L2.....σελ:36
4.2.2. Αντιστροφή με την νόρμα L1.....σελ: 36-38
4.3.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....σελ: 39
4.3.1. Αντιστροφή με την νόρμα L2.....σελ: 39-40
4.3.2. Αντιστροφή με την νόρμα L1.....σελ: 40-41
4.4.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EARTHIMAGER 3D.....σελ: 42
4.4.1. Αντιστροφή με την νόρμα L2 (TRIAL 2 ) .....σελ: 42-43
4.4.2. Αντιστροφή με την νόρμα L1 (TRIAL 1).....σελ: 44-45

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ**

5.1.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....σελ: 46-49
5.2.ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....σελ: 49
5.2.1.Πιθανό έγκοιλο στον κάρναβο K1 (1 <sup>ο</sup> έγκοιλο).....σελ: 49-50
5.2.2.Όρατο έγκοιλο στον κάρναβο K1 και K2 ( 2 <sup>ο</sup> έγκοιλο).....σελ: 50-52
5.2.3. Πιθανό έγκοιλο στον κάρναβο K1 (3 <sup>ο</sup> έγκοιλο) .....σελ: 52-53
5.3.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ RES3DINV ΜΕ ΤΟ EARTHIMAGER3D.....σελ: 54

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

6.1.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΕΜΦΑΝΕΣ ΕΓΚΟΙΛΟ.....σελ: 55-56

6.1.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις νόρμες L1 και L2 για τα 2D δεδομένα για το εμφανές έγκοιλο.....σελ: 56

6.1.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις νόρμες L1 και L2 για τα 3D δεδομένα για το εμφανές έγκοιλο.....σελ: 56-57

6.1.3.Επιλογή νόρμας και προγράμματος επεξεργασίας.....σελ: 57

6.2.ΠΙΘΑΝΑ ΕΓΚΟΙΛΑ 1 ΚΑΙ 3 ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΑ 3D ΔΕΔΟΜΕΝΑ  
.....σελ: 57-58

### **ΕΛΛΗΝΙΚΗ**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ: 59**

**ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ:60-61**

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ:62**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....σελ: 63-82**



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Ατσιπόπουλου Ρεθύμνου για την ανίχνευση εγκοίλων με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε σε δύο και τρεις διαστάσεις. Στόχος της ήταν η απεικόνιση των σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης και πιο συγκεκριμένα η εύρεση πιθανών εγκοίλων.

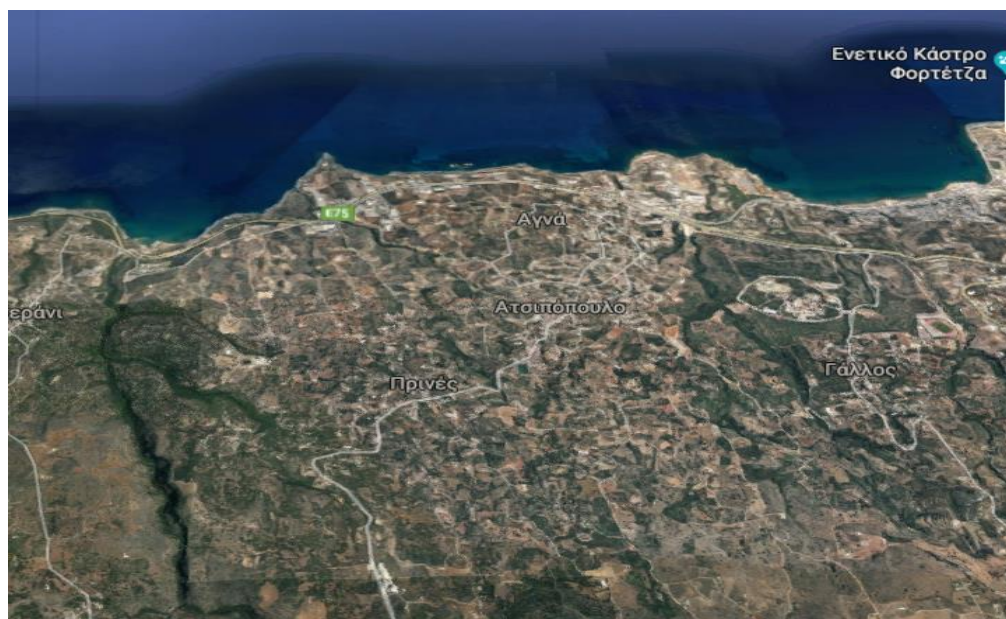
Τα δεδομένα προέκυψαν από τις μετρήσεις σε δύο καννάβους K1 και K2 της περιοχής μελέτης, η κατασκευή των οποίων διευκόλυνε την συλλογή των δεδομένων και την διεξοδική έρευνα για την ανίχνευση εγκοίλων. Χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα επεξεργασίας Res2dinv, Res3dinv και EarthImager 3D. Κατόπιν, οι γεωηλεκτρικές τομές συγκρίνονται έτσι ώστε να επιλεγούν πιθανές θέσεις των εγκοίλων. Είναι σημαντικό τα αποτελέσματα της δισδιάστατης αντιστροφής να συγκλίνουν με εκείνα της τρισδιάστατης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ τους επιλέχθηκε το κατάλληλο πρόγραμμα και μέθοδος αντιστροφής.

Από την γεωηλεκτρική διασκόπηση προκύπτουν θέσεις που συνιστούν ιδιαίτερης προσοχής για την κατασκευή σχολικού συγκροτήματος στην περιοχή αυτή. Μετά την υπόδειξη πιθανών εγκοίλων στην περιοχή μελέτης εκτιμήθηκε το μέγεθός των.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ**

Η περιοχή του Ρεθύμνου χαρακτηρίζεται από ασβεστολιθικά πετρώματα που κυριαρχούν στον ορεινό όγκο του Ψηλορείτη, στον οποίο υπάρχουν πάνω από 850 καταγεγραμμένα σπήλαια.



**Σχήμα1.1:**Δορυφορική εικόνα Ατσιπόπουλου

Το Ατσιπόπουλο βρίσκεται 7 περίπου χιλιόμετρα δυτικά από το Ρέθυμνο, μετά το Πανόραμα και το Βιολί Χαράκι. Το Ατσιπόπουλο βρίσκεται σε υψόμετρο 185 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας.

### **1.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΕ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Η γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα χρησιμεύει ώστε να γίνουν γνωστές οι εδαφομηχανικές ιδιότητες του εδάφους όπου θα θεμελιωθεί ένα τεχνικό έργο, έτσι ώστε να εξαλειφθεί ο κίνδυνος από την ύπαρξη επικίνδυνων συνθηκών στο έδαφος. Επομένως είναι απαραίτητη η ασφάλεια κατασκευής του έργου σε συνδυασμό με το μειωμένο κόστος. Η απαίτηση αυτή καθιστά αναγκαία την

λεπτομερή μελέτη καθ' όλη την διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής οποιουδήποτε επιφανειακού ή υπόγειου τεχνικού έργου, με σκοπό την αποφυγή αστοχιών και προβλημάτων τόσο στην κατασκευή όσο και στο έδαφος κάτω από αυτήν.

Την λύση στα προβλήματα που δημιουργούνται από το υπέδαφος έδωσαν οι γεωφυσικές μέθοδοι παρέχοντας μια γρήγορη εικόνα του υπεδάφους με χαμηλό κόστος. Με αυτόν τον τρόπο οι μηχανικοί κατασκευής του έργου έχουν μία εικόνα για την δομή του υπεδάφους έτσι ώστε να καθορίσουν τα επίπεδα ασφαλείας της κατασκευής. Γι' αυτούς τους λόγους είναι αναγκαία η σύνταξη γεωφυσικής μελέτης στον σχεδιασμό και την κατασκευή οποιουδήποτε τεχνικού έργου.

- *Επιφανειακοί γεωφυσικοί στόχοι μέχρι 5m μπορεί να είναι:*
  - i. Σωλήνες, κοιλότητες στο έδαφος, έγκοιλα μικρού μεγέθους, κατασκευές μέσα στο έδαφος.*
  - ii. Γεωλογικά στοιχεία όπως μικρορήγματα, στρωματογραφική επαλληλία, κατάσταση πρανών, ποσοστό εδαφικής υγρασίας.*
  - iii. Αρχαιολογικοί στόχοι ( τάφοι, κ.α.)*
- *Επιφανειακοί γεωφυσικοί στόχοι μεσαίου βάθους ( 5-25 m) μπορεί να είναι:*
  - i. Έγκοιλα, σπηλαιώσεις, καρστικά, υπόγεια ρήγματα.*
  - ii. Γεωλογικοί ορίζοντες, θαμμένες ζώνες απορριμμάτων σε σκουπιδότοπους, τούνελ, ζώνες μεταλλευμάτων.*
- *Γεωφυσικοί στόχοι μεγάλου βάθους (>25 m) μπορεί να είναι:*
  - i. Γεωλογικά στρώματα διαφόρων ειδών*
  - ii. Υδροφόρα ρήγματα*

Υπάρχουν δύο στάδια σε ένα πρόγραμμα γεωφυσικής διασκόπησης: το στάδιο σχεδιασμού και εργασιών υπαίθρου και το στάδιο της επεξεργασίας - ερμηνείας. Στην ύπαιθρο πραγματοποιούνται μετρήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις που οριοθετούνται κατά τον σχεδιασμό με την συνεργασία του επιβλέποντος φορέα. Ο προσδιορισμός του βάθους βραχώδους υποβάθρου είναι ένας αρκετά κοινός γεωφυσικός στόχος. Χρήσιμο θα ήταν πριν την

*επιλογή της μεθόδου, να γίνεται μια εκτίμηση για το πιθανό βάθος έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη μέθοδος με τις αντίστοιχες παραμέτρους (Πολυχρονίδου, 2014).*

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ (G.P.R) είναι από τις πιο διαδεδομένες στις γεωφυσικές έρευνες που λαμβάνουν χώρα στα γεωτεχνικά έργα. Η ηλεκτρική τομογραφία λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια και προκύπτει μία εικόνα του υπεδάφους πάνω στο οποίο θα εδρασθεί η κατασκευή. Στην περίπτωση παραγωγής τρισδιάστατων μοντέλων οι μετρήσεις συνήθως λαμβάνονται κατά μήκος γραμμών μελέτης, οι οποίες ισαπέχουν μεταξύ τους, στις οποίες τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια τα οποία διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι, για κάθε σημείο λαμβάνεται και μία μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η πιθανή ύπαρξη εγκοίλων ή άλλων ασυνεχειών έτσι ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ασφάλειας της κατασκευής.

### 1.3.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τους El-Qady et al., οι γενεσιουργοί λόγοι καταστροφών των κατοικημένων περιοχών, όπως συνέβη στο Ν.Α Κάιρο στην Αίγυπτο, αποτελούν οι σπηλαιώσεις και οι καθιζήσεις. Οι επιλεγμένες γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτές της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ. Κατά την διεξαγωγή της έρευνας προέκυψε ότι η περιοχή επηρεάζεται και από τις κατακόρυφες ζώνες ρηγμάτωσης του ασβεστόλιθου.

Οι Matias et al., (2006) περιγράφουν την ανίχνευση ενός τάφου που χρονολογείται τον 14ο αιώνα με την χρήση γεωηλεκτρικών μεθόδων. Χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις διπόλου- διπόλου, και πόλου-πόλου. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής έδειξαν ανωμαλίες υψηλής αντίστασης κοντά στα τοιχώματα του τάφου. Αντίστοιχα ανωμαλίες χαμηλής αντίστασης εμφανίστηκαν σε πιθανές θέσεις συσσώρευσης νερού. Το αποτέλεσμα ενισχύεται από την απεικόνιση της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας.

Οι Leucci and Negri (2006) χρησιμοποίησε την τρισδιάστατη (3D) ηλεκτρική τομογραφία προκειμένου να ερευνήσει αν στην θεμελίωση της

Εκκλησίας του Botugno (Lecce, Ιταλία) υπάρχουν πιθανές ρωγμές και κενά στο υπόστρωμα. Η 3D ηλεκτρική τομογραφία κατάφερε να εντοπίσει μία κοιλότητα νερού στο υπέδαφος, βάθους 2 μέτρων.

Η Muchaidze (2008) επεδίωκε την ανακούφιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, κατά τις ώρες αιχμής, με την κατασκευή ενός αυτοκινητοδρόμου. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από καρστικές δομές, όπως υπόγεια ρέματα, σπηλιές και καθιζήσεις. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της ηλεκτρικής τομογραφίας και η διάταξη των ηλεκτροδίων η διπόλου-διπόλου, καθώς υπερέχει στην ανάλυση πλευρικών διαφορών. Απώτερος σκοπός είναι να αποτραπούν τυχόν προβλήματα, όπως προβλήματα λόγω κενών αέρα.

Ο Abu-Shariah (2009) με την μέθοδο της δισδιάστατης (2D) ηλεκτρικής τομογραφίας μπόρεσε να εκτιμήσει την θέση και τις διαστάσεις υπόγειων κοιλοτήτων. Με την μέθοδο αυτή πραγματοποιείται η αναζήτηση κρυμμένων αντικειμένων.

Ο Martinez-Lopez et al., (2013) βάσει της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης ανέλυσε τρεις κοιλότητες σχηματισμού σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόστηκαν ήταν: η διάταξη Wenner-Slumberger, η διάταξη Wenner και η διάταξη Διπόλου – Διπόλου και στις τρεις κοιλότητες.

Ο Carrière (2013) μελέτησε τη δομή μίας καρστικής μη κορεσμένης ζώνης σε ένα τυπικό μεσογειακό περιβάλλον όπου το έδαφος είναι λεπτό ή απουσιάζει. Οι μέθοδοι που χρησιμοποίησε ήταν η μέθοδος του Γεωραντάρ (GPR) και η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT). Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο μέθοδοι είναι διότι καμία μέθοδος από μόνη της δεν επαρκεί για να παρέχει έναν ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό των γεωλογικών δεδομένων σε ένα καρστικό πεδίο.

Ο Martínez-Pagán (2013) εντόπισε κοιλότητες σε μικρά βάθη που είχαν δημιουργηθεί από την εξόρυξη ορυχείου. Επιπλέον, λόγω καθιζήσεων στην



περιοχή καθίσταται επιτακτική ανάγκη η χαρτογράφηση των κοιλοτήτων σε περίπτωση ανέγερσης κτιρίων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 :ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ**

### **2.1.ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ**

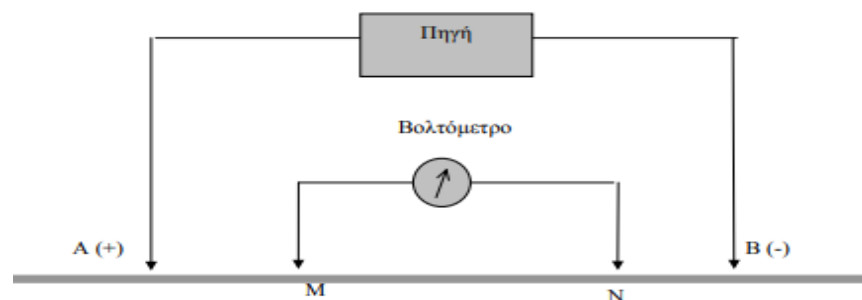
Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιούνται προκειμένου να καθοριστούν οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων κοντά στην επιφάνεια της Γης. Το μέγεθος που μετριέται είναι η διαφορά δυναμικού ενώ το μέγεθος που μας ενδιαφέρει είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους.

Η εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων χαρακτηρίζεται επιτυχημένη όταν υπάρχει αντίθεση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων μεταξύ του στόχου της γεωφυσικής διασκόπησης και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος. Γενικά, χρησιμοποιούνται στη χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών, στην κοιτασματολογία, στην τεκτονική, στην υδρογεωλογία, στην τεχνική γεωλογία (απεικόνιση ζώνης αποσάθρωσης και υπόγειων εγχοίλων), στη γεωθερμία, στη στρωματογραφία αλλά και στην αρχαιολογία (προσδιορισμός θέσεως αρχαιολογικών λειψάνων).

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η πιο γνωστή μέθοδος ηλεκτρικής διασκόπησης. Καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διαβιβάζεται στο υπέδαφος προκαλεί ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από τη δομή του υπεδάφους. Από μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ο σχηματισμός που παρουσιάζει σχετικά σταθερή τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χαρακτηρίζεται ως γεωηλεκτρικό στρώμα. Ο άμεσος στόχος αυτής της μεθόδου είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής, ενώ απώτερος σκοπός είναι η γεωλογική δομή, δηλαδή η απόδοση των γεωηλεκτρικών στρωμάτων σε γεωλογικά. Ηλεκτρικό ρεύμα γνωστής έντασης  $I$ , διαβιβάζεται στο έδαφος από δύο ηλεκτρόδια  $A,B$  (ηλεκτρόδια ρεύματος). Σε δύο άλλα ηλεκτρόδια  $M,N$  (ηλεκτρόδια δυναμικού), μετριέται η διαφορά δυναμικού (Σχήμα 2.1).

$$\Delta V = VM - VN = \left(\frac{l \cdot \rho}{2 \cdot \pi}\right) \cdot \left[\left(\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right)\right) - \left(\left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BN}\right)\right)\right] \quad (2.1)$$

Από τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού προκύπτει η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η οποία εξαρτάται από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζει κάθε πέτρωμα και τον τρόπο που διατάσσονται τα ηλεκτρόδια. Από την επεξεργασία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προκύπτει η κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος (γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους).



**Σχήμα2.1:** Ηλεκτρόδια ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) (Σακελλάριος 2014).

## 2.2.ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση,  $\rho$ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Το αντίστροφο,  $\sigma = 1/\rho$ , της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης καλείται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η πλειοψηφία των ορυκτών και πετρωμάτων δεν είναι αγωγοί ηλεκτρισμού με εξαίρεση τα μεταλλικά ορυκτά. Τα μεταλλικά ορυκτά εμφανίζουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα διότι κατά την διέλευση των ελεύθερων ηλεκτρονίων των μετάλλων έχουμε την δημιουργία ηλεκτρισμού (ηλεκτρονική αγωγή).

Η λιθολογία και η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Καθώς τα χρόνια περνάνε το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων μεγαλώνει και κατ' επέκταση μεγαλώνει και η πίεση που ασκούν στα υποκείμενα. Άρα τα παλαιότερα υποκείμενα στρώματα εμφανίζουν μεγάλη συνοχή, μικρό πορώδες και μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Στην περίπτωση των τριτογενών ιζημάτων οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μεγαλύτερες από ότι σε αυτή των μεσοζωικών ιζημάτων και αυτό ευθύνεται στο ότι τα πρώτα δημιουργήθηκαν σε γλυκό νερό ενώ τα δεύτερα σε αλμυρό. Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό η ειδική ηλεκτρική συνδέεται με την λιθολογία και την γεωλογική ηλικία διότι αυτές οι δύο παράμετροι καθορίζουν το πορώδες. Στα κρυσταλλικά πετρώματα των οποίων το πορώδες είναι εξαιρετικά χαμηλό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά σχεδόν, στις ρωγμές που υπάρχουν στα πετρώματα αυτά.

Κατά συνέπεια, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υδροφόρων και μη σχηματισμών ελαττώνεται με την αύξηση:

- i. του όγκου του νερού στο πέτρωμα
- ii. της περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα του υπόγειου ύδατος
- iii. της θερμοκρασίας (αύξηση της ευκινησίας των ιόντων)
- iv. της περιεκτικότητας σε αργίλους
- v. του βαθμού κορεσμού του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος
- vi. της καρστικοποίησης (η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται σε ακόρεστους ή ελαττώνεται σε κορεσμένους ή πληρωμένους με αργίλους καρστικούς σχηματισμούς.
- vii. της εξαλλοίωσης.

Στις διασκοπήσεις μικρού βάθους, η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος βασίζεται σε διαλυμένα ιόντα όπως το ανθρακικό ασβέστιο και ανθρακικό νάτριο που υπάρχουν στο ίδιο το έδαφος – κυρίως για αργιλώδη εδάφη – ή προέρχονται από τα υποκείμενα γεωλογικά στρώματα, βροχοπτώσεις, σύγχρονα γεωργικά λιπάσματα ή άλλες ανθρωπογενείς

διαδικασίες. Επίσης συγκεντρώσεις ριζών και κολλοειδών στο νερό επηρεάζουν την αγωγιμότητα. Τέλος σε περίπτωση εμφάνισης κορεσμού του εδάφους σε νερό τότε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται από το πορώδες ενώ στην περίπτωση ξηρών εδαφών ακόμα και η παραμικρή κατακράτηση νερού είναι σημαντική.

### 2.3.ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η ηλεκτρική τομογραφία, η οποία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, αποτελεί μέθοδο υψηλής διακριτικής ικανότητας και δίνει την δυνατότητα συλλογής πληροφοριών τόσο για την πλευρική όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Σκοπός της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ο προσδιορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους ή καλύτερα της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, που καλείται γεωηλεκτρική δομή. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού δημιουργούνται τεχνητά ηλεκτρικά πεδία τα οποία διαδίδονται στο υπέδαφος μέσω του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος εξαρτάται από τους σχηματισμούς από τους οποίους περνάει. Ουσιαστικά η διαφορά δυναμικού απεικονίζει την δυσκολία με την οποία εισέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος, δίνοντας μια αρχική ένδειξη για την ειδική ηλεκτρική αντίστασή του.

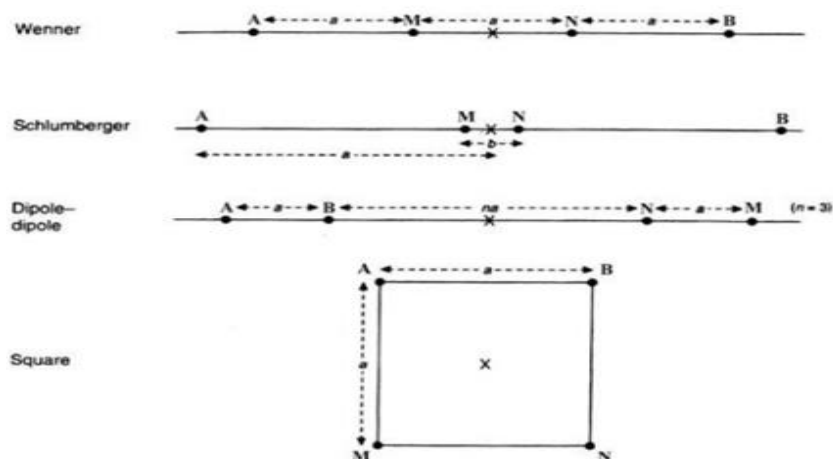
Οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης λαμβάνονται μετακινώντας την διάταξη των ηλεκτροδίων (ρεύματος ή/και δυναμικού) σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Το βάθος διασκόπησης αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων. Άρα λαμβάνουμε τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε θέσεις της γραμμής μελέτης που αντιστοιχούν σε διάφορα βάθη. Κατόπιν, είναι εφικτή η επεξεργασία των τιμών αυτών ώστε να προσδιοριστούν προσεγγιστικά οι τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η διαδικασία από την οποία παίρνουμε τις τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης καλείται αντιστροφή και έχει ως τελικό

αποτέλεσμα τη δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους. Παρόλο που η αντιστροφή αποτελεί ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss–Newton με εξομάλυνση αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, κάτι που την καθιστά την πιο χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

Πιο αναλυτικά, σε περιπτώσεις που γίνεται χρήση της ηλεκτρικής τομογραφίας για την χαρτογράφηση περιοχών πολύπλοκης γεωλογικής δομής, πραγματοποιούνται διασκοπήσεις χρησιμοποιώντας μεγάλο σχετικά αριθμό ηλεκτροδίων, με τοποθέτηση κατά αύξουσα σειρά πάνω στην γραμμή μελέτης. Στην συνέχεια, δημιουργείται κατάλληλο πρωτόκολλο μετρήσεων σε υπολογιστή, όπου επιλέγονται ποια ηλεκτρόδια θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε μέτρηση, λαμβάνοντας υπόψη μια προεπιλεγμένη διάταξη ηλεκτροδίων (π.χ. Wenner, Dipole-Dipole). Η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων και η διάταξη τους λαμβάνεται υπόψη κατά τη δημιουργία του πρωτοκόλλου των μετρήσεων. Το ηλεκτρόμετρο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο των μετρήσεων και με βάση αυτό επιλέγει και χρησιμοποιεί αυτόματα τέσσερα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια (2 ρεύματος και 2 δυναμικού) για κάθε μέτρηση. Οι μετρήσεις λαμβάνονται αυτόματα και αποθηκεύονται στον υπολογιστή. Ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής στις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από όπου προκύπτουν οι τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για να προσδιοριστεί η γεωηλεκτρική δομή.

#### 2.4.ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

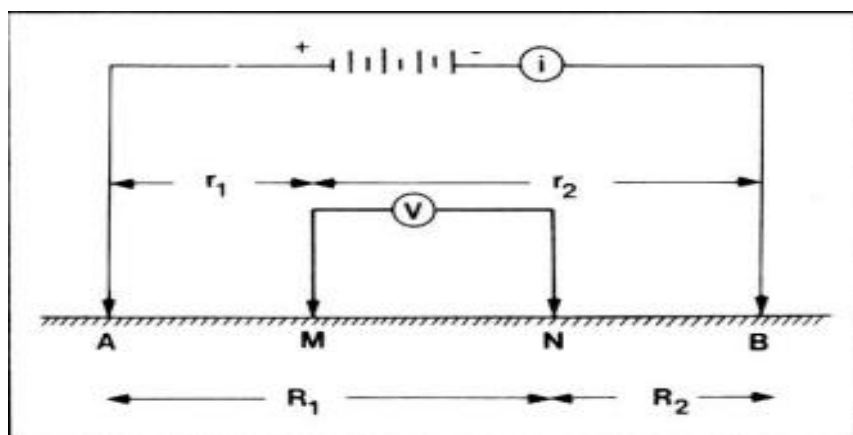
Υπάρχουν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στην ύπαιθρο. Η επιλογή μίας συγκεκριμένης διάταξης καθορίζεται κυρίως από τον στόχο τη διασκόπησης. Οι πιο διαδεδομένες διατάξεις είναι: διπόλου-διπόλου, Wenner και Schlumberger(Σχήμα 2.2).



**Σχήμα 2.2:** Διατάξεις Ηλεκτροδίων

### 2.4.1 Διάταξη Wenner

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού διατάσσονται σε αποστάσεις ίσες μεταξύ τους, με  $AM = MN = NB = \alpha$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω (Σχήμα 2.3):



**Σχήμα 2.3:** Διάταξη Wenner

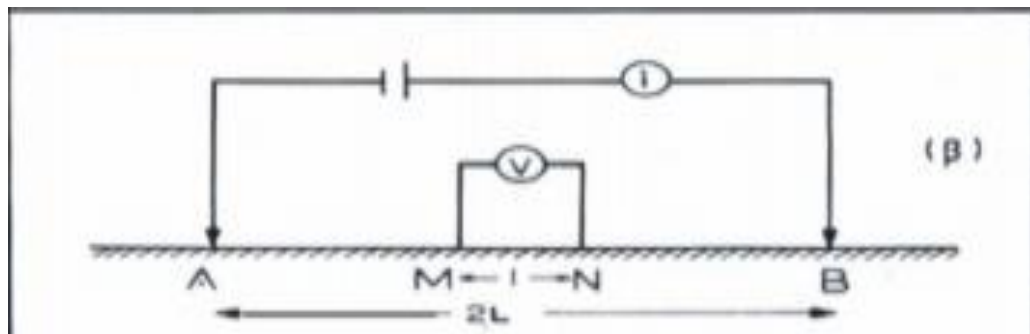
Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρα προκύπτει από την σχέση:

$$\rho_a = 2 * \pi * \left( \frac{\Delta V}{I} \right) * \left[ \left( \frac{1}{\alpha} \right) - \left( \frac{1}{2 * \alpha} \right) - \left( \frac{1}{2 * \alpha} \right) + \left( \frac{1}{\alpha} \right) \right]^{-1} = 2 * \pi * \alpha * \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2.2)$$

όπου:  $\alpha$  είναι η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων,  $\Delta V$  είναι η διαφορά τάσης που μετρείται στα  $M$  και  $N$  ενώ  $I$  είναι η ένταση του ρεύματος που διοχετεύεται στο υπέδαφος. Για τον υπολογισμό της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος (μέθοδος ηλεκτρικής βυθοσκόπησης, 1D) τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται συμμετρικά ως προς ένα σημείου το οποίο καλείται κέντρο της βυθοσκόπησης, ενώ κατά την ηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μεταφέρονται κατά μήκος των γραμμών μελέτης. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχείται στο κέντρο της διάταξης. Μειονέκτημα της διάταξης Wenner είναι ότι όλα τα ηλεκτρόδια πρέπει να μετακινούνται μετά το πέρας κάθε νέας μέτρησης καθώς και το φαινόμενο της διπλής κορυφής.

#### 2.4.2 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, ενώ τα ηλεκτρόδια του δυναμικού  $M$  και  $N$  βρίσκονται ανάμεσα στα  $A$  και  $B$  και σε απόσταση  $b$  από το κέντρο της διάταξης. Δηλαδή,  $AB=2L$  και  $MN=2b$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4:** Διάταξη Schlumberger

Ο γεωμετρικός συντελεστής  $K$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$K = 2 * \pi * \left[ \left( \frac{1}{L-b} \right) - \left( \frac{1}{L+b} \right) - \left( \frac{1}{L+b} \right) + \left( \frac{1}{L-b} \right) \right]^{-1} = (L^2 - b^2) * \left( \frac{\pi}{2 * b} \right) \quad (2.3)$$

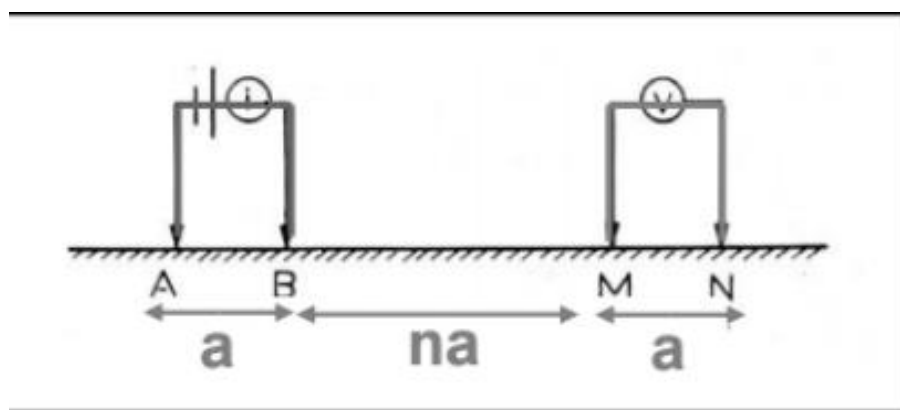
Και επειδή ( $L \gg b$ ), όπου  $L$  και  $b$  η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού αντίστοιχα η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα υπολογίζεται

από την σχέση:  $\rho_a = \left( \pi * \frac{L^2}{2 * b} \right) * \left( \frac{\Delta V}{i} \right)$  (2.4)

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο διάταξης. Για την ηλεκτρική χαρτογράφηση αντίστοιχα, τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται ενώ η μεταξύ τους απόσταση παραμένει σταθερή όπως και στην διάταξη Wenner. Η διάταξη Schlumberger αποτελεί την πιο γνωστή διάταξη για εφαρμογές ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Η αιτία είναι ο μικρός χρόνος διεξαγωγής των μετρήσεων, όταν σε σύγκριση με τις άλλες διατάξεις, απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Επίσης, το γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, αποτρέπει επιδράσεις από τυχόν πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των σχηματισμών.

#### 2.4.3 Διάταξη διπόλου-διπόλου

Στη διάταξη διπόλου-διπόλου οι μετρήσεις πραγματοποιούνται τοποθετώντας τα ηλεκτρόδια ρεύματος σε απόσταση  $a$  μεταξύ τους, η οποία είναι ίδια με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγών των ηλεκτροδίων είναι ίση με  $na$  (Σχήμα 2.5).



**Σχήμα 2.5:** Διάταξη Διπόλου-Διπόλου



Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίδεται από τον τύπο:

$$\rho_a = \pi * n a * (n + 1) * (n + 2) * \left(\frac{\Delta V}{I}\right) \quad (2.5)$$

Όπου:

ο γεωμετρικός συντελεστής:  $K = \pi * n a * (n + 1) * (n + 2)$  (2.6)

n: ακέραιος αριθμός

$\Delta V$ : η διαφορά δυναμικού

I: η ένταση του ρεύματος

Η γεωμετρική μορφή του διπόλου καθορίζει και την διακριτικότητα που θα προκύψει από το προφίλ. Επιπλέον, η ανάλυση μειώνεται με το βάθος. Παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις πλευρικές μεταβολές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ωστόσο, παρουσιάζει μικρό λόγο σήματος προς θόρυβο (μειωμένη ευαισθησία στην κατακόρυφη διεύθυνση).

## 2.5.ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τις γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις. Η διάταξη των ηλεκτροδίων δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι παράγοντες-κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις είναι οι παρακάτω (Σακελλάριος 2014).

1. **Λόγος σήματος προς θόρυβο:** Ως προς τον παράγοντα αυτό κατά σειρά προτεραιότητας οι διατάξεις είναι: Wenner, Schlumberger, διπόλου-διπόλου.

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

3. **Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος:** Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος δίνει λεπτομερή ανάλυση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

4. **Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος (Επίδραση του επιδερμικού φαινομένου):** Το επιδερμικό φαινόμενο επηρεάζει την ικανότητα διείσδυσης σε μεγάλα βάθη. Η δυνατότητα μεγάλου ανοίγματος ηλεκτροδίων ρεύματος της διάταξης Schlumberger μαζί με την ευαισθησία σε βάθος που έχει, της παρέχουν ένα σαφές προβάδισμα.

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

6. **Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου:** Η διάταξη διπόλου-διπόλου υπερτερεί των άλλων διατάξεων στην περίπτωση των γεωλογικών ανωμαλιών.

7. **Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.**

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

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ**

### **3.1.ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ**

Η αντιστροφή είναι η μέθοδος με την οποία υπολογίζουμε τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Από το γεωηλεκτρικό μοντέλο των εκτιμώμενων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στο τέλος συγκρίνονται οι μετρούμενες με τις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και προκύπτει το σφάλμα ταύτισης. Στην περίπτωση που ο αριθμός των δεδομένων υπερβαίνει τον αριθμό των παραμέτρων του μοντέλου, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται υπερκαθορισμένο.

Αρχικά, οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μαζί με τις πραγματικές τιμές και τις παραμέτρους του αρχικού μοντέλου που θεωρήθηκαν απαρτίζουν ένα σύστημα εξισώσεων. Κατόπιν με την μέθοδο της αντιστροφής το σύστημα επιλύεται με αγνώστους τις παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται υπολογίζοντας για το μοντέλο που προέκυψε τις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης αντίστασης, οι οποίες συγκρίνονται με τις μετρούμενες. Σκοπός της αντιστροφής είναι η εύρεση μοντέλου του οποίου οι υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης αντίστασης να συγκλίνουν στις μετρούμενες.

#### **3.1.1.Αντιστροφή σε δύο διαστάσεις (2D)**

Στην επεξεργασία δεδομένων δύο διαστάσεων (2D) οι γεωλογικές δομές περιγράφονται από σώματα που εκτείνονται στις δυο διαστάσεις γεγονός που καθιστά τα αντίστοιχα μοντέλα προσεγγιστικά. Προκειμένου να επιλυθούν κατάλληλα τέτοιες δομές με αυθαίρετες κατανομές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, χρησιμοποιείται η μέθοδος βελτιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων με βάση τη νόρμα L2 δηλαδή το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ μετρούμενης και υπολογισμένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το μοντέλο που προκύπτει παρουσιάζει μία ομαλή διακύμανση στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σε περίπτωση όπου η ειδική

ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει απότομες μεταβολές, το αποτέλεσμα της αντιστροφής δεν είναι το βέλτιστο δυνατόν. Για τέτοιες καταστάσεις χρησιμοποιείται η νόρμα L1, η οποία ισούται με το άθροισμα των απόλυτων τιμών των διαφορών μεταξύ μετρούμενης και υπολογισμένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τείνει δηλαδή να παράγει μοντέλα με περιοχές που παρουσιάζουν ομοιογένεια, με εμφανή όρια να τις διαχωρίζουν μεταξύ τους.

### 3.1.2.Αντιστροφή σε τρεις διαστάσεις (3D)

Με την αυξημένη διαθεσιμότητα ταχύτερων υπολογιστών, είναι τώρα εφικτό να χρησιμοποιούνται τεχνικές αριθμητικής μοντελοποίησης για την αντιστροφή 3D δεδομένων. Έχουν αναπτυχθεί πλήρεις και προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης του ευθέως προβλήματος. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν την λύση των πεπερασμένων στοιχείων που συνδέει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτουν από το μοντέλο.

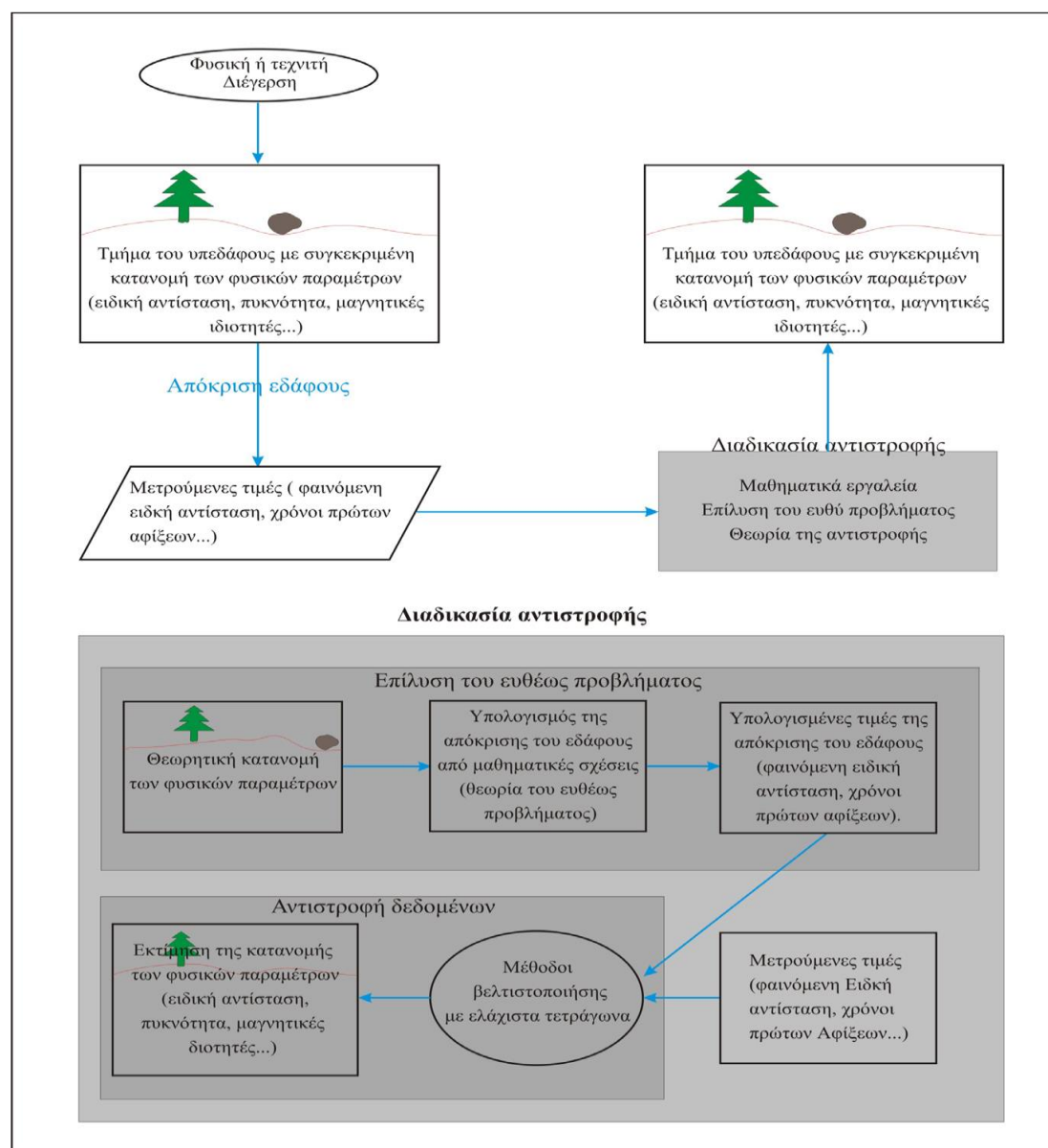
Οι μέθοδοι πλήρους αντιστροφής εφαρμόζονται σε συνθετικά δεδομένα που προέρχονται από 3D μοντέλα προκειμένου να ελεγχθούν τα αποτελέσματα. Από συγκρίσεις διαφορετικών μοντέλων προέκυψε ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου της πλήρους αντιστροφής παρουσιάζουν καλύτερη ανάλυση, ιδιαίτερα σε περιοχές κοντά στην επιφάνεια, από αυτά της προσεγγιστικής μεθόδου δύο διαστάσεων.

### 3.2. ΤΟ ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Η απόκριση του μοντέλου περιγράφεται από τα συνθετικά δεδομένα τα οποία υπολογίζονται από μαθηματικές σχέσεις στις οποίες εισάγονται οι απαιτούμενες παράμετροι. Είναι απαραίτητη λοιπόν μια σχέση που να συνδέει τις πραγματικές τιμές με τις μετρούμενες τιμές της φυσικής παραμέτρου. Ποικίλες τεχνικές μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται για την καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ των μετρούμενων και πραγματικών τιμών καθώς επίσης και για τις αλλαγές ή ασυνέχειες στις φυσικές ιδιότητες του υπεδάφους (επίλυση ευθέως προβλήματος). Η διαδικασία κατά την οποία

μελετάται απόκριση του εδάφους σε φυσική ή τεχνητή διέγερση είναι γνωστή ως επίλυση του ευθέως προβλήματος (Meju, 1994).

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα στάδια συλλογής και επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων, η διαδικασία της αντιστροφής καθώς και η επίλυση του ευθέως προβλήματος. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία εκτίμηση της κατανομής των επιθυμητών φυσικών παραμέτρων από το οποίο έπεται το γεωλογικό μοντέλο της περιοχής μελέτης.



**Σχήμα 3.1** Βασικά στάδια της συλλογής και επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων. Η επίλυση του ευθέως και του αντίστροφου προβλήματος (Hamdan, 2010).

### 3.3.ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

Όλες οι μέθοδοι αντιστροφής έχουν σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός μοντέλου του υπεδάφους, το οποίο αναπαράγει τα μετρούμενα μεγέθη υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Στην περίπτωση της γεωηλεκτρικής τομογραφίας οι παράμετροι είναι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κάθε κελιού ή στοιχείου του μοντέλου, ενώ τα μετρούμενα μεγέθη είναι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

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

$$d = F(m) \quad (3.1)$$

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

$$m = F^{-1}(d) \quad (3.2)$$

Η  $(F^{-1})$  καλείται αντίστροφη συνάρτηση που συνδέει το γνωστό διάνυσμα που περιέχει τις μετρούμενες τιμές με το άγνωστο διάνυσμα των παραμέτρων του μοντέλου. Είναι βέβαια πιθανόν να μην υφίσταται η αντίστροφη συνάρτηση  $F^{-1}$ , με αποτέλεσμα το πρόβλημα να είναι ασθενώς ορισμένο ή “αόριστο” (ill-conditioned ή ill-posed). Δηλαδή οι φυσικές παράμετροι που ερμηνεύουν την παρατήρηση και υπόκεινται σε φυσικούς περιορισμούς, δεν δίνουν απαραίτητα μία και μοναδική λύση. Επίσης, μικρές αλλαγές στα πραγματικά δεδομένα  $d$  μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες

μεταβολές στο διάνυσμα  $m$ . Γενικά, οι μέθοδοι επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος μπορούν να καταταχθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στην στατιστική ή πιθανολογική προσέγγιση και στην αιτιοκρατική (ντετερμινιστική) προσέγγιση (Ramirez et al., 2005, Λούης, 2006). Κατά την πρώτη, οι παράμετροι του μοντέλου ( $m$ ), αλλά και τα δεδομένα ( $d$ ) αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές των οποίων καθορίζεται η κατανομή των πιθανοτήτων. Κατά την διαδικασία αυτή το αποτέλεσμα προέρχεται κυρίως από την στατιστική ανάλυση του σφάλματος της λύσης (Menke, 1989). Χρησιμοποιούνται αριθμητικές τεχνικές με πιο γνωστή την μέθοδο Monte Carlo, ενώ άλλες προσεγγίσεις είναι οι αλυσίδες (Chain) Markov, οι γενετικοί αλγόριθμοι κ.α. Αναλυτική περιγραφή της παραπάνω μεθοδολογίας υπάρχει στους Tarantola (1987), Debski (1997), Robert and Cassella (1999), Debski (1997), Mosegaard and Tarantola (2002), Basokur et al. (2007).

Υπάρχουν δύο είδη προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στην γεωφυσική, τα γραμμικά και τα μη γραμμικά. Στην πρώτη περίπτωση, οι παράμετροι του μοντέλου ( $m$ ) συνδέονται με γραμμικές σχέσεις με τα παρατηρούμενα δεδομένα ( $d$ ) από τις οποίες προκύπτει η βέλτιστη λύση με την επίλυση του συστήματος γραμμικών εξισώσεων. Στην δεύτερη περίπτωση, η βέλτιστη λύση προκύπτει προσεγγιστικά, όπου το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται επαναληπτικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν, η αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων και των δεδομένων σεισμικής τομογραφίας.

#### 3.4. ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι το αντίστροφο γεωηλεκτρικό πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία των μη γραμμικών γεωφυσικών προβλημάτων. Η μη γραμμικότητα του βασίζεται στην εξίσωση Poisson, καθώς είναι προφανές ότι ο τελεστής του ευθέως προβλήματος περιέχει τον πολλαπλασιασμό του μοντέλου (ηλεκτρική αγωγιμότητα,  $\sigma$ ) με την βαθμίδα της απόκρισης  $V$  (ηλεκτρικό δυναμικό).

Με σκοπό την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του Ιακωβιανού πίνακα ή αλλιώς πίνακα

ευαισθησίας. Ο ρόλος του είναι η σύνδεση των μετρούμενων τιμών με τις παραμέτρους του μοντέλου. Η ακρίβεια του υπολογισμού των στοιχείων του Ιακωβιανού πίνακα είναι το κλειδί για την εύρεση της μεταβολής των παραμέτρων του εδαφικού μοντέλου και επιδρά δραματικά στην σύγκλιση της διαδικασίας της αντιστροφής. Η διαδικασία της αντιστροφής εμπεριέχει και την εύρεση του Ιακωβιανού πίνακα. Σε περίπτωση ελλιπής πληροφορίας που περιέχεται στον Ιακωβιανό πίνακα καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό του αντιστρόφου του Ιακωβιανού πίνακα.

*Τα σφάλματα των μετρήσεων και οι προσεγγίσεις που έγιναν από την διακριτοποίηση του μέσου κατά την επίλυση του ευθέως προβλήματος καθιστούν το πρόβλημα ασθενώς ορισμένο. Αυτό σημαίνει δυσκολίες κατά την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, εφόσον δεν υπάρχει μόνο μία αλλά άπειρες λύσεις που ικανοποιούν τα πραγματικά δεδομένα, μέσα στα όρια των συγκεκριμένων σφαλμάτων. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα εισάγονται εκ των προτέρων περιορισμοί στο αντίστροφο πρόβλημα με σκοπό την σταθεροποίηση του (Hamdan, 2010).*

### 3.5.ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DINV

Στο λογισμικό RES2DINV το μοντέλο χωρίζει την τομή του υπεδάφους σε παραλληλόγραμμου σχήματος κελιά και θεωρεί ότι η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι σταθερή σε κάθε κελί. Το μοντέλο αποτελεί μια εξιδανικευμένη μαθηματική αντιπροσώπευση της γεωηλεκτρικής τομής του υπεδάφους. Οι παρατηρήσεις αντιστοιχούν στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κάθε κελιού ενώ οι παράμετροι αντιστοιχούν στις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η μαθηματική σχέση που συνδέει τις μετρούμενες με τις υπολογισμένες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρέχεται από τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών (Day and Morrison, 1979) ή των πεπερασμένων στοιχείων (Silvester and Ferrari, 1990). Το αρχικό μοντέλο θα μεταβάλλεται μέσα σε μια επαναληπτική διαδικασία με στόχο οι υπολογισμένες τιμές και τα μετρούμενα δεδομένα να συγκλίνουν.



Τα δεδομένα από τις μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας καταχωρούνται σε αρχείο dat. Κατόπιν πραγματοποιείται η αντιστροφή των δεδομένων και στην οθόνη εμφανίζονται 3 εικόνες, η πρώτη παρουσιάζει τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η δεύτερη τις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτουν από τη τρίτη εικόνα, το μοντέλο στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σχεδόν σε όλες τις έρευνες κάποια δεδομένα για την γεωλογία είναι γνωστά. Βέβαια σε κάποιες περιπτώσεις είναι γνωστό αν τα όρια της περιοχής που μας ενδιαφέρει είναι κλιμακωτά, όπως τα όρια ρύπανσης, με αποτέλεσμα η συμβατική μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής να δίνει πρότυπο που να αντιστοιχεί στην πραγματικότητα. Αυτή την μεθοδολογία ακολουθεί το πρόγραμμα RES2DINV.

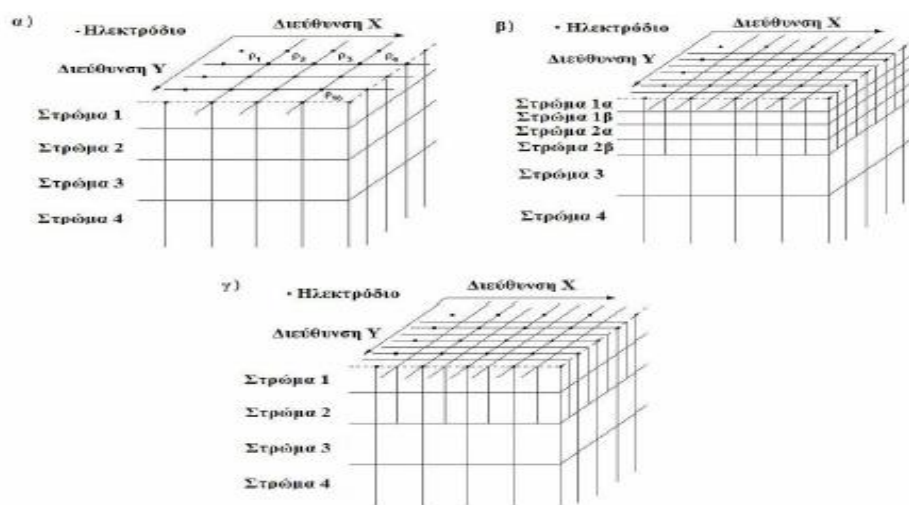
Με το λογισμικό RES2DINV μπορούν επίσης να παρουσιαστούν τα δεδομένα με την μορφή διαγράμματος, το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να απομακρύνει δεδομένα με μεγάλο σφάλμα. Επίσης ο χρήστης δύναται να αλλάξει και το μέγιστο βάθος του μοντέλου (GEOTOMO SOFTWARE, n.d).

### 3.6.ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES3DINV

Κατά την διεξαγωγή τρισδιάστατης έρευνας, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πιο ακριβή λαμβάνοντας υπόψη ότι όλες οι γεωλογικές δομές είναι τρισδιάστατης φύσης. Οι τρισδιάστατες έρευνες δεν χρησιμοποιούνται τόσο όσο οι δισδιάστατες και αυτό οφείλεται στο ότι το κόστος ερευνών είναι συγκριτικά υψηλότερο στην περίπτωση της τρισδιάστατης έρευνας για εκτεταμένη περιοχή μελέτης. Για την πραγματοποίηση των τρισδιάστατων ερευνών τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε ορθογώνιο κάναβο με συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στην περίπτωση της παρούσας γεωφυσικής έρευνας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο ορθογώνιους καννάβους K1 (40m\*8m) και K2 (23.5m\*10m).

Ακόμη, το πρόγραμμα RES3DINV παρέχει την δυνατότητα επιλογής και πραγματοποίησης οριζόντιων τομών Χ- Υ. Είναι σημαντικό να υπάρχει ομοιομορφία στην κλίμακα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις γεωηλεκτρικές τομές, για αυτό επιλέγεται ίδια ελάχιστη τιμή της και ίδιος αυξητικός παράγοντας σε όλες τις τομές.

Το υπέδαφος διαιρείται σε διάφορα στρώματα και κάθε στρώμα υποδιαιρείται περαιτέρω σε ορθογώνια κελιά. Το πρόγραμμα RES3DINV προσπαθεί να καθορίσει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των κελιών στο πρότυπο ώστε ν' αναπαράγει όσο αξιόπιστα γίνεται τις μετρημένες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής 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 3.2β και 3.2γ. 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 3.2γ). 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 (Σακελλάριος, 2014).



**Σχήμα 3.2:** Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη αντιστροφή .α)μοντέλο όπου τα άκρα των ορθογωνίων παραλληλεπιπέδων συμπίπτουν με τις αποστάσεις ηλεκτρονίων στην x και y διάσταση, β)μοντέλο στο οποίο τα πρώτα στρώματα είναι υποδιαιρεμένα στο μισό σε κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση, γ) μοντέλο στο οποίο τα πρώτα στρώματα είναι υποδιαιρεμένα στο μισό σε οριζόντια διεύθυνση (Σακελλάριος, 2014).

Οι μέθοδοι αντιστροφής που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα RES3DINV όπως και στο πρόγραμμα RES2DINV είναι η μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων με περιορισμό εξομάλυνσης και η μέθοδος με την νόρμα L1). Στην πρώτη περίπτωση η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων υπαγορεύει ότι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μοντέλου αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο. Αντίθετα στην άλλη περίπτωση η μέθοδος Robust χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που στο υπέδαφος η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται απότομα. Η συγκεκριμένη μέθοδος αντιστροφής είναι λιγότερο ευαίσθητη στις μετρήσεις με θόρυβο και συνεπώς δίνει πιο μικρό σφάλμα.

### 3.7.ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EARTHIMAGER 3D

Το EarthImager 3D είναι μία πλατφόρμα για τριών διαστάσεων (3D) γεωηλεκτρικά μοντέλα τα οποία απεικονίζονται σε 2D (τομές) και 3D (όγκοι) έτσι ώστε να αποκαλύπτουν πιθανούς στόχους. Μετατρέπει την πολύπλοκη

αντιστροφή των δεδομένων σε μια απλή διαδικασία δύο σταδίων που διαρκεί μόνο μερικά λεπτά, δηλαδή, την ανάγνωση ενός αρχείου δεδομένων και την έναρξη της αντιστροφής. Επιπλέον παρουσιάζει μια μεγάλη λίστα επιλογών για περαιτέρω επεξεργασία.

Το EarthImager 3D είναι ιδανικό για απεικόνιση γεωηλεκτρικών δεδομένων - ακόμη και σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο. Η τελική εικόνα μπορεί να περιστραφεί σε οποιοδήποτε προσανατολισμό, να μεγεθυνθεί και να μετακινηθεί. Μπορεί να δείξει το σχήμα μιας θαμμένης σπηλιάς, τον όγκο ενός ανιχνευόμενου μεταλλοφόρου κοιτάσματος ή την έκταση ενός ρυπασμένου πετρώματος (AGI EarthImager 3D, n.d.).

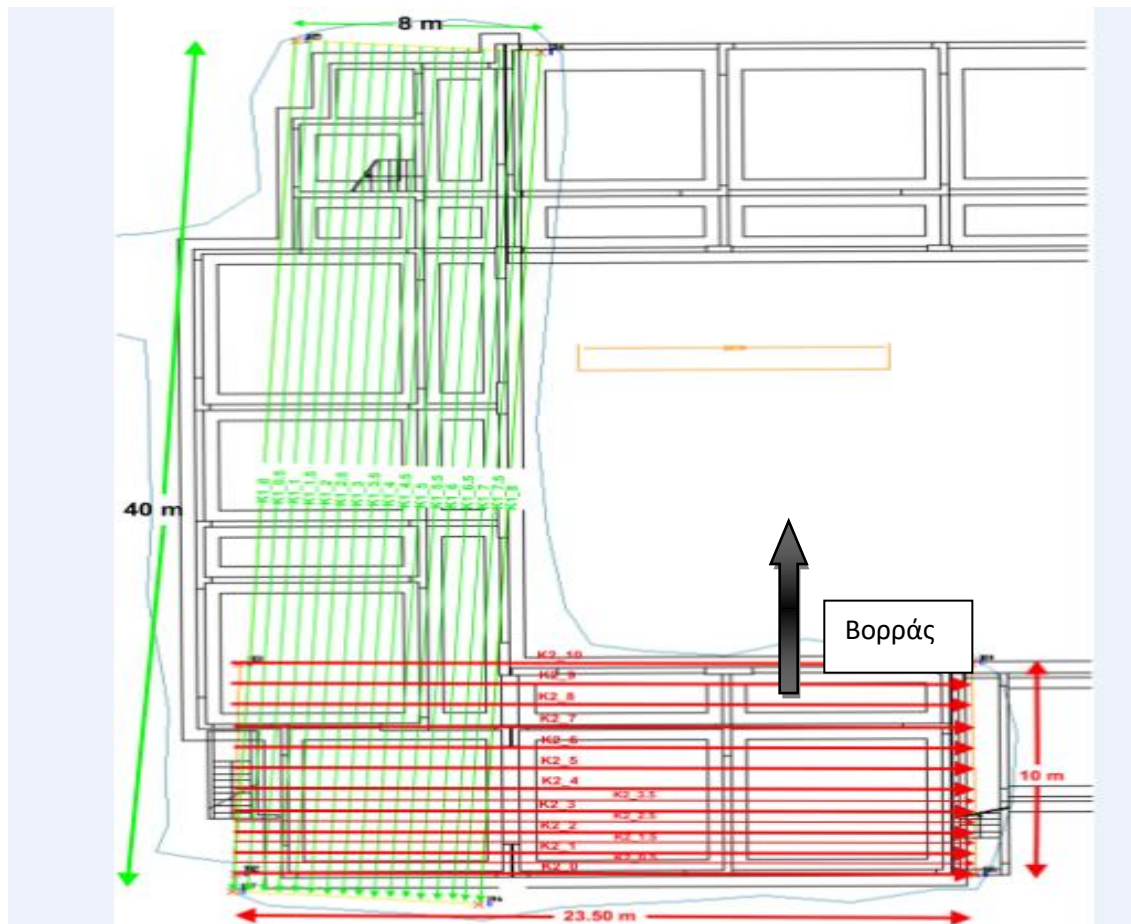
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**

### **4.1. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**

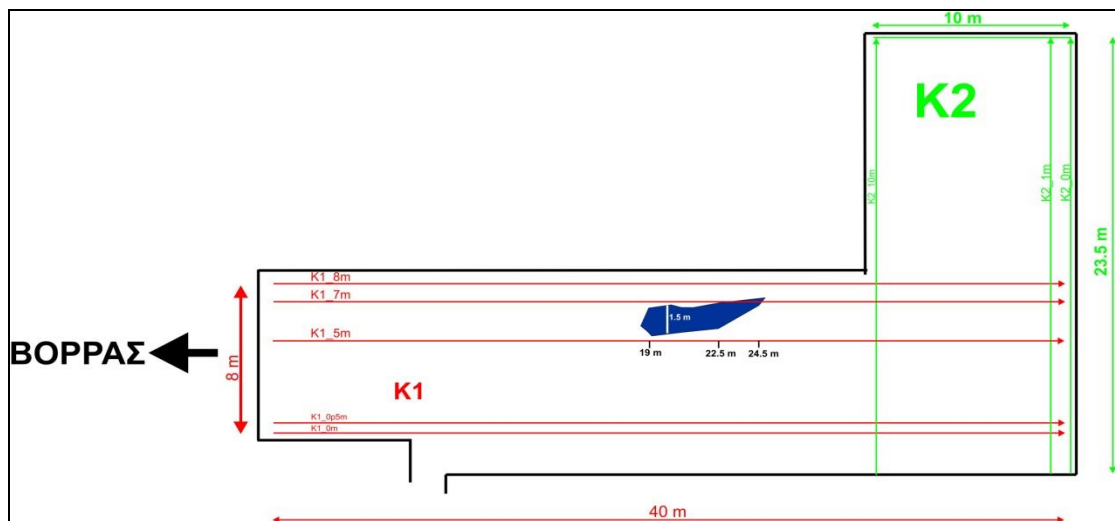
Η γεωφυσική έρευνα για την κατασκευή ενός σχολικού συγκροτήματος έλαβε χώρα στην περιοχή Ατσιπόπουλο στο νομό Ρεθύμνου. Λόγω της μεγάλης έκτασης του υπό ανέγερση κτιρίου διαμορφώθηκαν 2 κάρναβοι για πραγματοποίηση των μετρήσεων, κάρναβος K1 και K2 (Σχήμα 4.1).

Στον κάρναβο K1 οι γραμμές μελέτης ήταν 17 και απείχαν 0.5 m η μία από την άλλη. Η διάταξη των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε ήταν η διπόλου-διπόλου, τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 41 στο σύνολο και απείχαν 1 m μεταξύ τους. Επίσης, το μέγιστο βάθος διασκόπησης στο κέντρο της τομής ήταν 8 m. Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων στην περιοχή μελέτης, για τον κάρναβο K1, εντοπίσαμε την ύπαρξη ενός εγκοίλου στην επιφάνεια του εδάφους με διαστάσεις 6m x 1.5m. Το γεγονός αυτό μας προϊδεάζει ότι πιθανόν να υπάρχουν κι άλλα έγκοιλα στην περιοχή μελέτης.

Αντίστοιχα, στον κάρναβο K2 οι γραμμές μελέτης ήταν 14 και απείχαν 0.5m και 1m μεταξύ τους. Η διάταξη των ηλεκτροδίων ήταν η διπόλου-διπόλου, ο αριθμός των ηλεκτροδίων ήταν 48 και απείχαν μεταξύ τους 0.5 m. Επιπλέον, το μέγιστο βάθος διασκόπησης στο κέντρο της τομής ήταν 5m (Σχήμα 4.2).



**Σχήμα 4.1:** Κάτοψη της θεμελίωσης των μελλοντικών κτιρίων, στην οποία έχουν υπερτεθεί οι γραμμές μελέτης (με πράσινο χρώμα οι γραμμές του καννάβου K1, με κόκκινο χρώμα οι γραμμές του καννάβου K2).



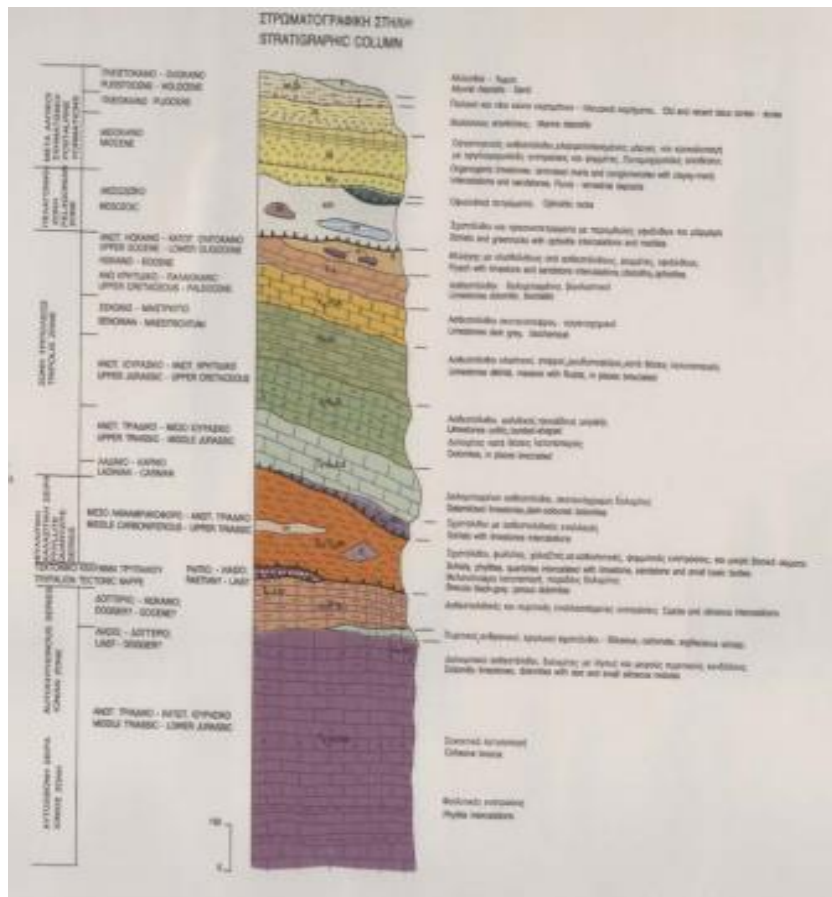
**Σχήμα 4.2:** Σχεδιάγραμμα διαστασιολόγησης καννάβων K1 και K2(με μπλε χρώμα έχει σχεδιαστεί το ορατό έγκοιλο το οποίο εντοπίσθηκε από την επιφάνεια του εδάφους με διαστάσεις 6m\*1.5m) .

Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 4.3) παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης.



**Σχήμα 4.3:** Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη (κλίμακας 1:50.000) "Φύλλο Ρεθύμνου" όπου με κύκλο οριοθετείται η ευρύτερη περιοχή μελέτης (τροποποιημένο από Ι.Γ.Μ.Ε, 1988).

Παρακάτω εμφανίζεται η στρωματογραφική στήλη της περιοχής μελέτης (Σχήμα 4.4).



**Σχήμα 4.4:** Στρωματογραφική Στήλη του γεωλογικού χάρτη (κλίμακας 1:50.000) “Φύλλο Ρεθύμνο” (τροποποιημένο από Ι.Γ.Μ.Ε, 1988).

Επομένως λαμβάνοντας υπόψη τον γεωλογικό χάρτη στο Ατσιπόπουλο Ρεθύμνου εμφανίζονται επιφανειακά κυρίως μάργες, μαργαίκοι ασβεστόλιθοι και αλλούβια.

## 4.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

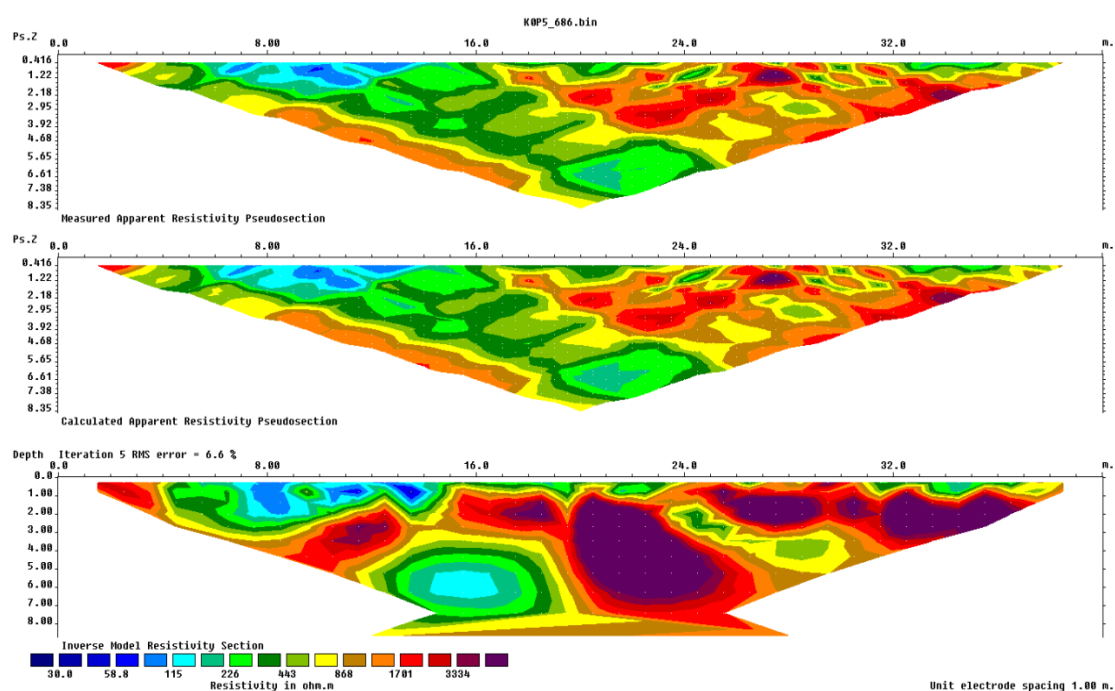
Η αντιστροφή των δεδομένων στο πρόγραμμα RES2DINV πραγματοποιείται με δύο διαφορετικές μεθόδους: την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (νόρμα L2) και την μέθοδο Robust (νόρμα L1).



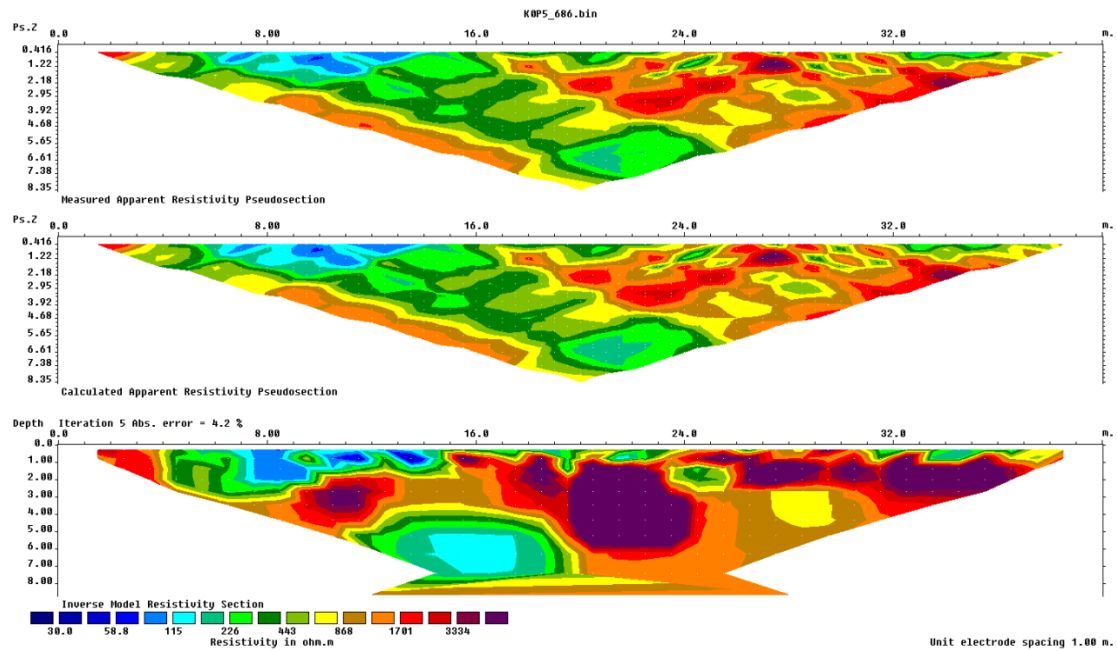
#### 4.2.1. Αντιστροφή με τη νόρμα L2

Κατά την αντιστροφή των μετρήσεων με την νόρμα L2 (μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, Least Square) δημιουργούνται γεωηλεκτρικές τομές. Επιλέγοντας την εντολή “Edit Data” και στην συνέχεια “RMS Statistics” προκύπτει το γράφημα του σφάλματος. Αφαιρώντας από το γράφημα 10-15 μετρήσεις σώζουμε το νέο σαν “cut” του προηγούμενο και κάνουμε ξανά αντιστροφή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου το σφάλμα μειωθεί ή όταν αφαιρέσουμε προσεγγιστικά το 20% των συνολικών μετρήσεων. Επίσης επιλέχθηκε λογαριθμική κλίμακα των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην γεωηλεκτρική τομή με ελάχιστη τιμή 30 και 10 ohm και βήμα 1.4 και 1.5 για τους καννάβους K1 και K2 αντίστοιχα.

Οι γεωηλεκτρικές τομές των σχημάτων 4.5α και 4.6α αντιστοιχούν σε γραμμές του καννάβου K1 που δεν περνούσαν από το ορατό έγκοιλο.



**Σχήμα 4.5α:** Γεωηλεκτρική τομή της 2<sup>ης</sup> γραμμής μελέτης, απέχει 0.5m από την αρχή του Υ άξονα του καννάβου K1, με την νόρμα L2 χωρίς την αφαίρεση τιμών και με σφάλμα 6.6%. Η διεύθυνση της γραμμής μελέτης για τον κানাβο K1 είναι από τον Βορρά στον Νότο.

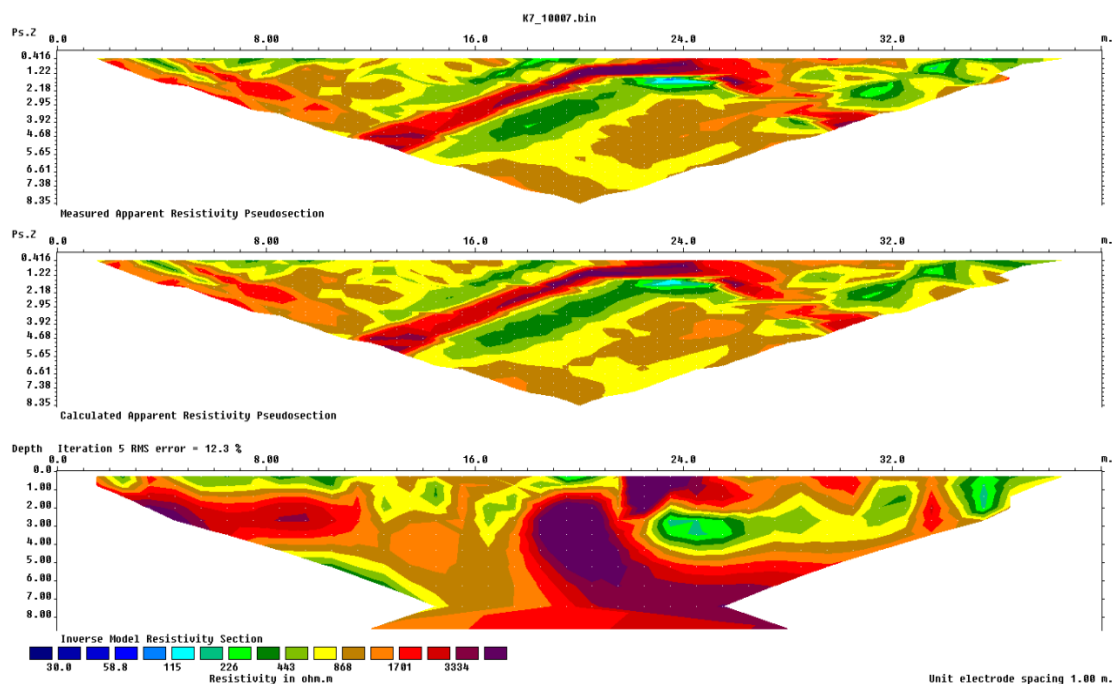


**Σχήμα 4.6α:** Γεωηλεκτρική τομή της 2<sup>ης</sup> γραμμής μελέτης, απέχει 0.5m από την αρχή του Υ άξονα για τον κάνναβο K1 για την νόρμα L1 χωρίς την αφαίρεση τιμών και με σφάλμα 4.2%. Η διεύθυνση της γραμμής μελέτης για τον κάνναβο K1 είναι από τον Βορρά στον Νότο.

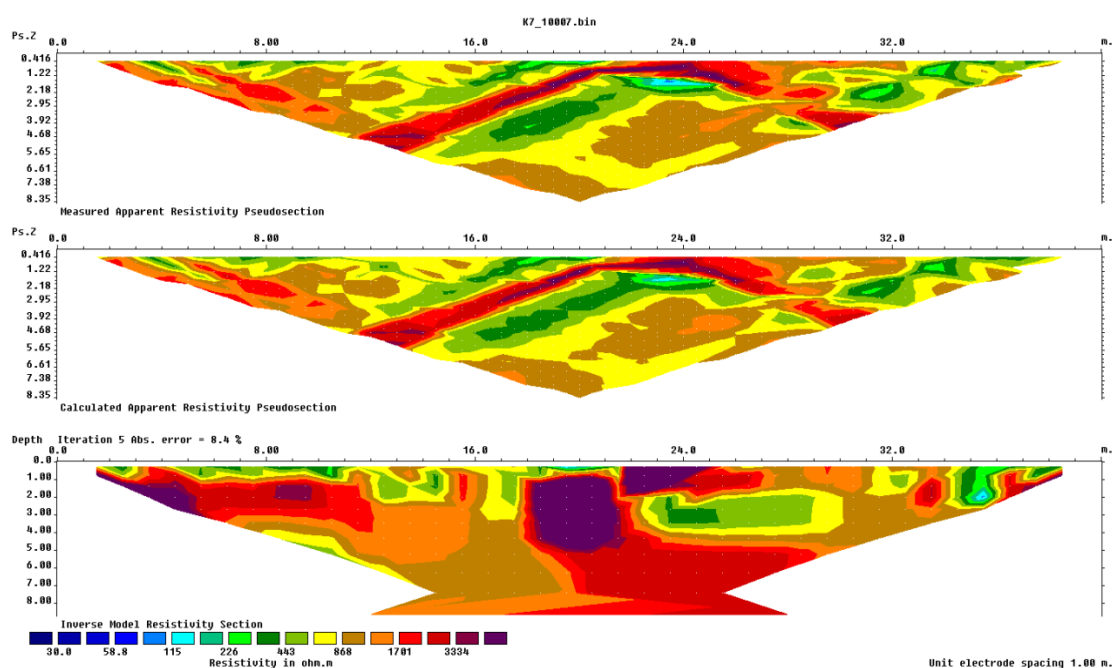
#### 4.2.2. Αντιστροφή με τη νόρμα L1

Κατά την αντιστροφή των μετρήσεων με την νόρμα L1 (Robust Inversion) δημιουργούνται γεωηλεκτρικές τομές οι οποίες εμφανίζουν σφάλμα μικρότερο από αυτό που προκύπτει από την νόρμα L2 το οποίο μπορεί να μειωθεί με την ίδια διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω.

Οι γεωηλεκτρικές τομές του σχήματος 4.5β και 4.6β αντιστοιχούν σε γραμμές του κάνναβου K1 που δεν περνούσαν από το ορατό έγκοιλο.



**Σχήμα 4.5β:** Γεωηλεκτρική τομή της 14<sup>ης</sup> γραμμής μελέτης, απέχει 7m από την αρχή του Υ άξονα για τον κάνναβο K1 για την νόρμα L1 με την αφαίρεση τιμών και με σφάλμα 12.3%. Η διεύθυνση της γραμμής μελέτης για τον κάνναβο K1 είναι από τον Βορρά στον Νότο.



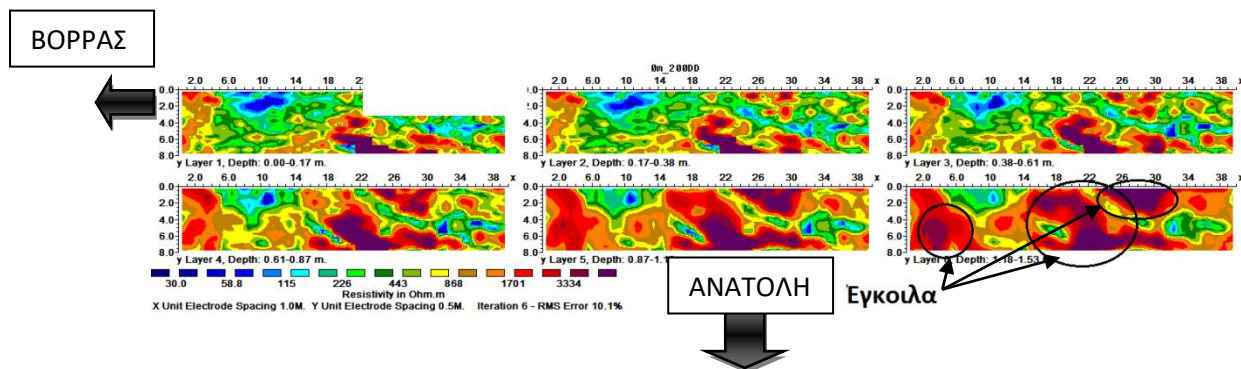
**Σχήμα 4.6β:** Γεωηλεκτρική τομή της 14<sup>ης</sup> γραμμής μελέτης, απέχει 7m από την αρχή του Υ άξονα για τον κάνναβο K1 για την με την νόρμα L1 με την αφαίρεση τιμών και με σφάλμα 8.4%. Η διεύθυνση της γραμμής μελέτης για τον κάνναβο K1 είναι από τον Βορρά στον Νότο.

### 4.3.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

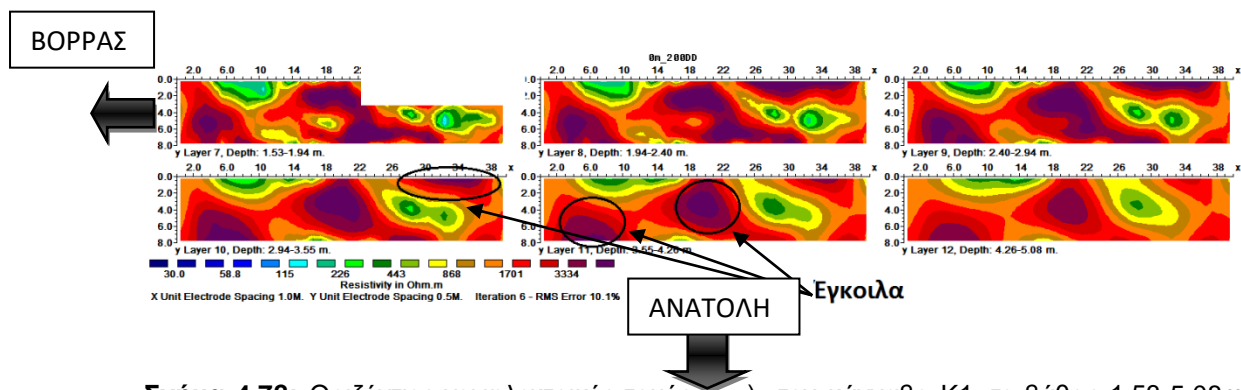
Οι μέθοδοι στο πρόγραμμα αντιστροφής Res3dinv χρησιμοποίησαν τις νόρμες L1 και L2.

#### 4.3.1. Αντιστροφή με τη νόρμα L2

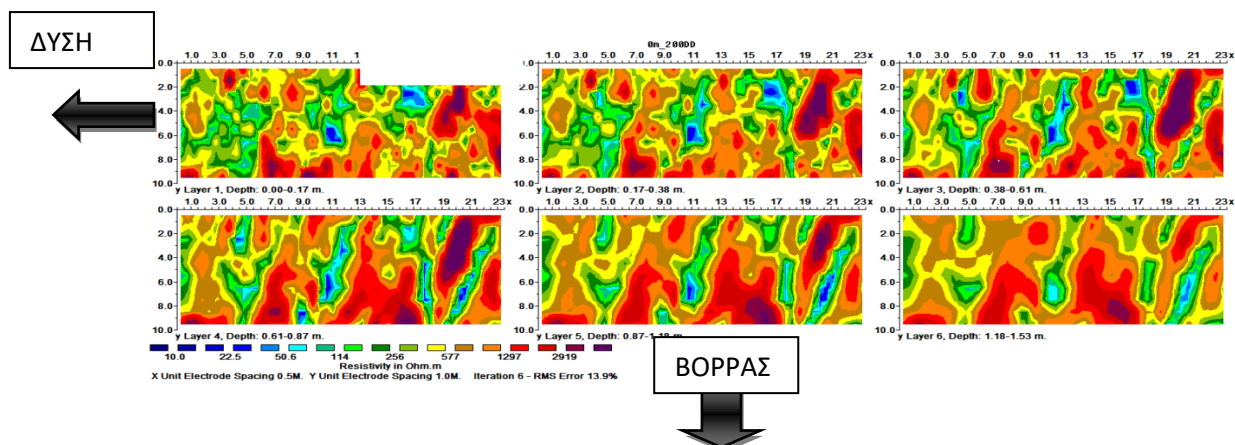
Οι παρακάτω οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές x-y προέκυψαν με τη χρήση της νόρμας L2 (Σχήμα 4.7) και αντιστοιχούν στους καννάβους K1 και K2.



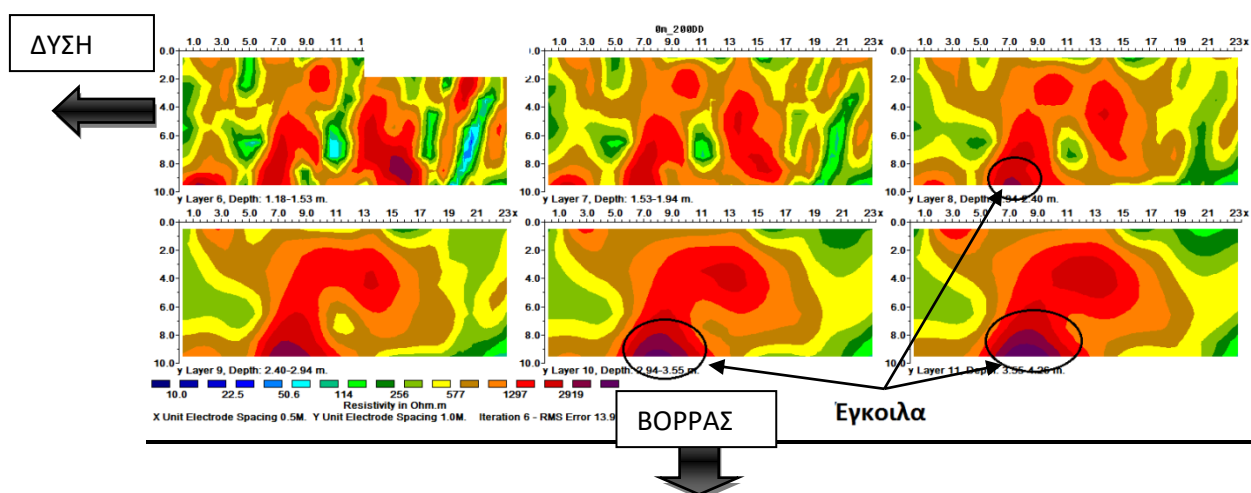
Σχήμα 4.7α: Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) στον κάνναβο K1 σε βάθος 0-1.53m, σφάλμα 10.1%.



Σχήμα 4.7β: Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) τον κάνναβο K1 σε βάθος 1.53-5.08m, σφάλμα 10.1%.



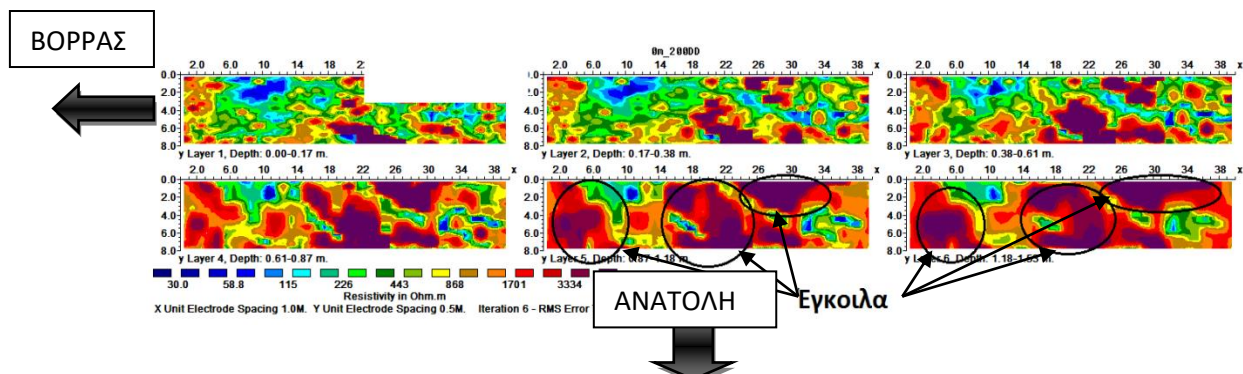
**Σχήμα 4.7γ:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) στον κάνναβο K2 σε βάθος 0-1.53m,σφάλμα 13.9%.



**Σχήμα 4.7δ:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) στον κάνναβο K2 σε βάθος 1.18-4.26m,σφάλμα 13.9%.

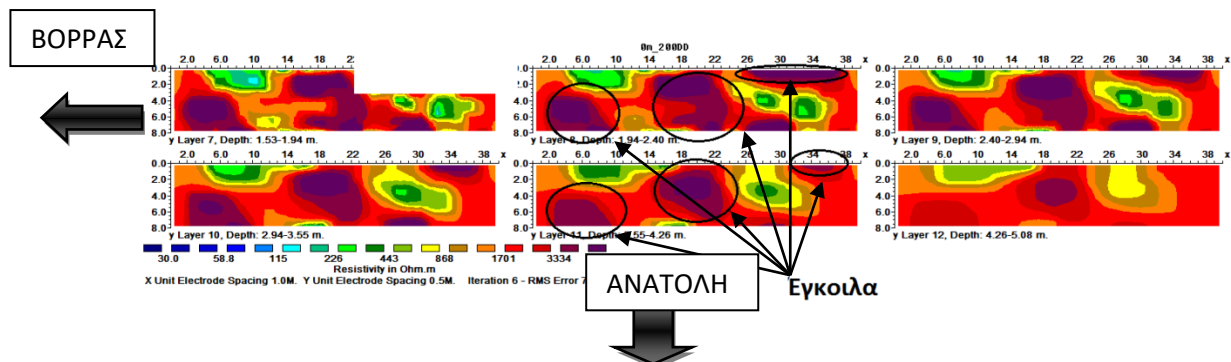
#### 4.3.2. Αντιστροφή με τη νόρμα L1

Οι παρακάτω οριζόντιες τομές y-z (Σχήμα 4.8) αντιστοιχούν στους καννάβους K1 και K2.

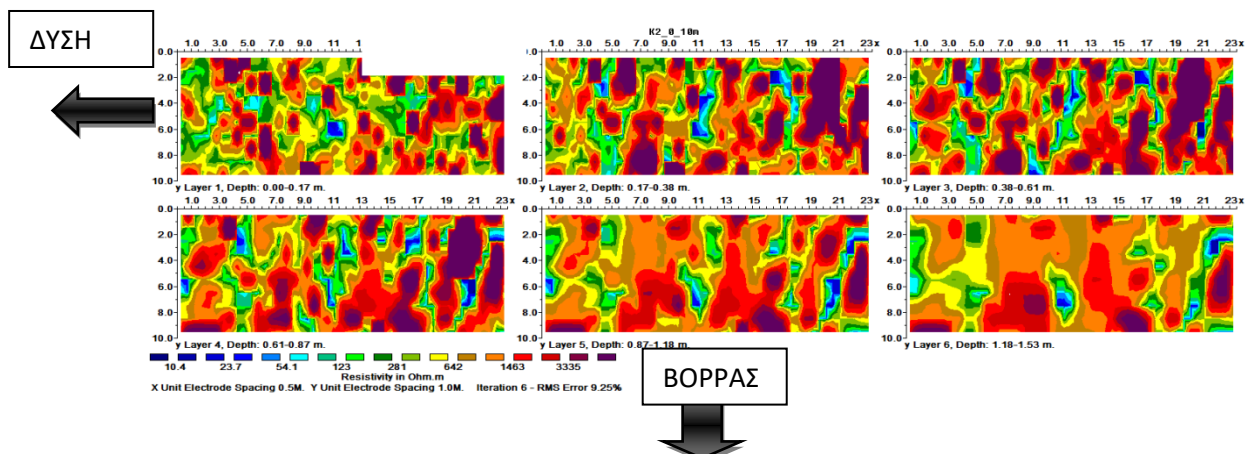


**Σχήμα 4.8α:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) στον κάνναβο K1 σε βάθος 0-1.53m,σφάλμα 7.89%.

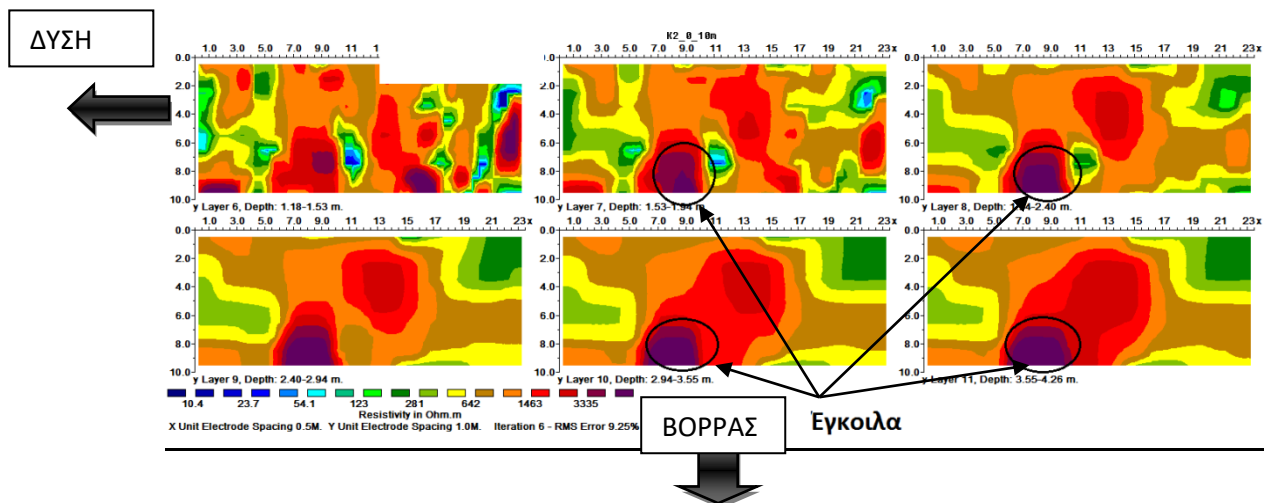




**Σχήμα 4.8β:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) στον κάρναβο K1 σε βάθος 1.53-5.08m,σφάλμα 7.89%.



**Σχήμα 4.8γ:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) στον κάρναβο K2 σε βάθος 0-1.53m,σφάλμα 9.25%.



**Σχήμα 4.8δ:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) στον κάρναβο K2 σε βάθος 1.18-4.26m,σφάλμα 9.25%.

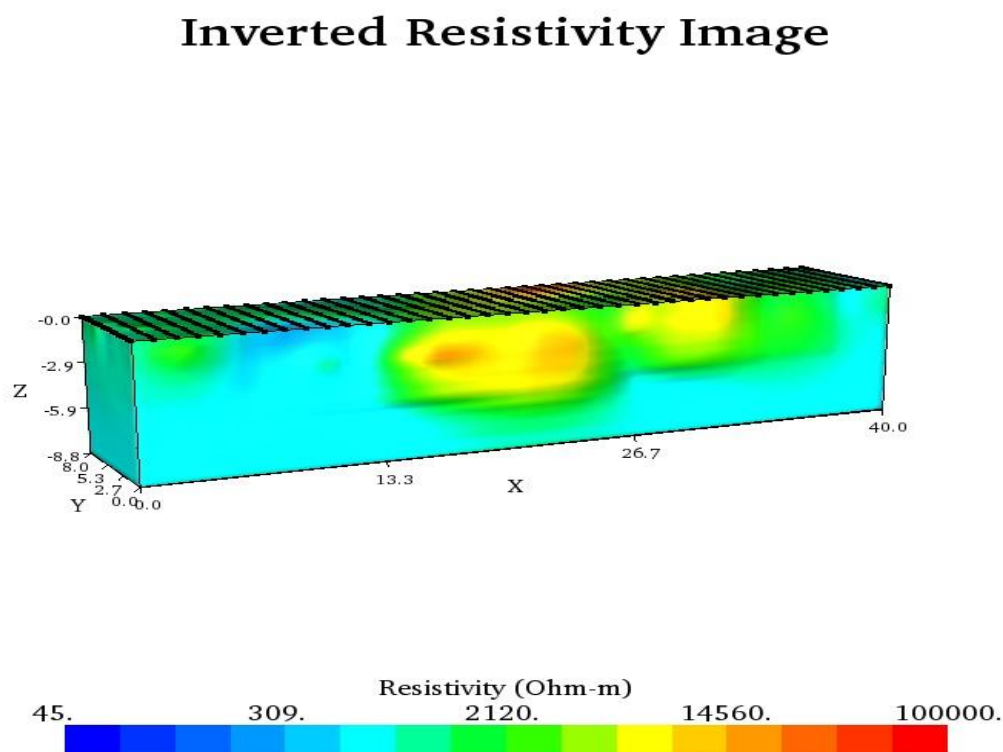
#### 4.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EARTHIMAGER 3D

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήσαμε δύο μεθόδους αντιστροφής. Στο trial1 χρησιμοποιήσαμε την νόρμα L1 και στο trial2 χρησιμοποιήσαμε την νόρμα L2.

##### 4.4.1 Αντιστροφή με την νόρμα L2 (TRIAL 2)

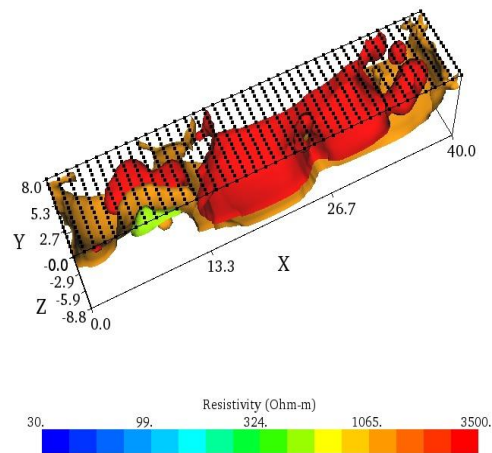
Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα EarthImager 3D, επιλέγουμε την μέθοδο αντιστροφής με την νόρμα L2. Το σφάλμα που προέκυψε από την μέθοδο αυτή για τον κάνναβο K1 είναι 9.4% και για τον κάνναβο K2 είναι 8.2%.

Από το λογισμικό EarthImager 3D προέκυψαν το ακόλουθο μοντέλο (Σχήμα 4.9):



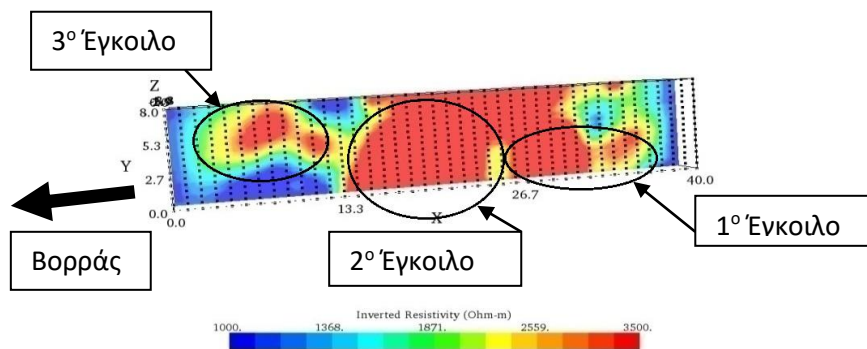
**Σχήμα 4.9α:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής του υπεδάφους για τον κάνναβο K1.

### 3D Resistivity Contour Plot



**Σχήμα 4.9β:** Τρισδιάστατη απεικόνιση των μετρούμενων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος για τον κάρναβο Κ1.

### Z Slices of Inverted Resistivity



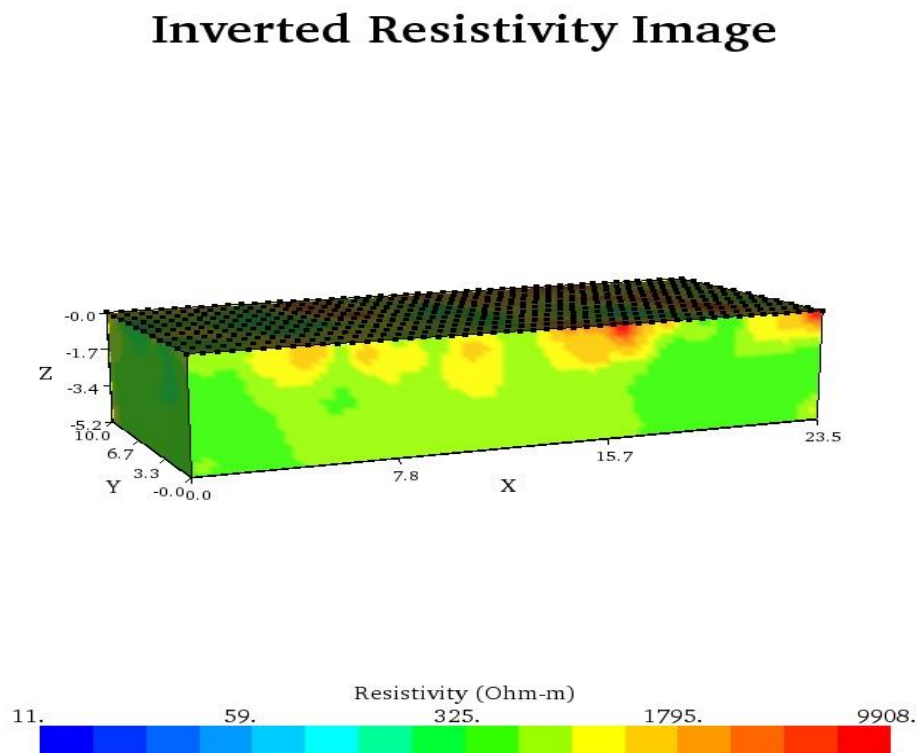
**Σχήμα 4.9γ:** Οριζόντια τομή της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους σε βάθος 3m στον κάρναβο Κ1.



#### 4.4.2.Αντιστροφή με την νόρμα L1 (TRIAL 1)

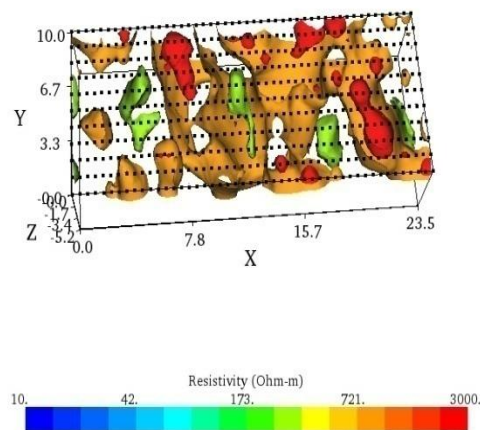
Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα EarthImager 3D, επιλέγουμε την μέθοδο αντιστροφής με την νόρμα L1. Το σφάλμα που προέκυψε για την μέθοδο αυτή για τον κάνναβο K1 είναι 9.7% και για τον κάνναβο K2 είναι 7.9%.

Από το λογισμικό EarthImager 3D προέκυψαν το ακόλουθο μοντέλο (Σχήμα 4.10):

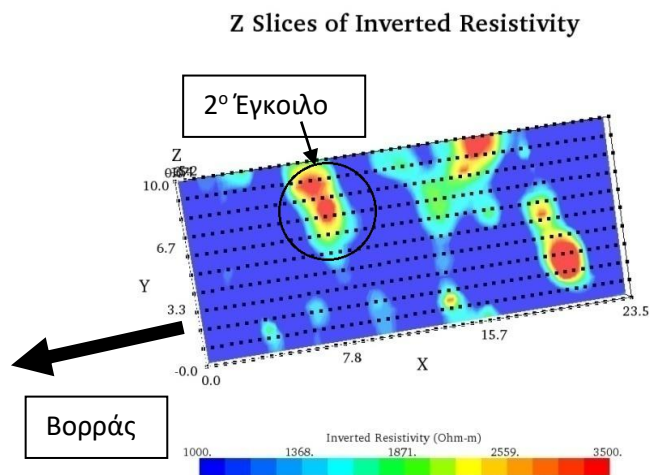


**Σχήμα 4.10α:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους για τον κάνναβο K2.

### 3D Resistivity Contour Plot



**Σχήμα 4.10β:** Τρισδιάστατη απεικόνιση των μετρούμενων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους για τον κάνναβο K2.



**Σχήμα 4.10γ:** Οριζόντια τομή της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους σε βάθος 1m για τον κάνναβο K2.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ**

### **5.1.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Σκοπός της γεωφυσικής έρευνας είναι η ανίχνευση πιθανών εγκοίλων στα θεμέλια του υπό ανέγερση σχολικού συγκροτήματος. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν τις δύο μεθόδους με τις νόρμες L1 και L2, παρατηρούνται οι πιθανές θέσεις εγκοίλων στην περιοχή μελέτης.

- Πιθανό Έγκοιλο 1 (βρίσκεται στον κάνναβο K1 και εκτείνεται σε απόσταση από 26m έως 36m κατά μήκος του X άξονα και από 0m έως 3m κατά μήκος του Y άξονα).

**Πίνακας 5.1:** Σύγκριση των προγραμμάτων Res2dinv, Res3dinv και EarthImager 3D καθώς και των μεθόδων αντιστροφής με τις νόρμες L1 και L2 για το πιθανό έγκοιλο 1 του καννάβου K1.

(+): όταν το έγκοιλο εμφανίζεται στο αντίστοιχο βάθος για το πρόγραμμα κι την μέθοδο αντιστροφής και  
(-): όταν δεν εμφανίζεται

K1	Πρόγραμμα Res2dinv		Πρόγραμμα Res3dinv		Πρόγραμμα EarthImager 3D	
Βάθος (m)	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1
0	+	+	+	+	+	+
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	+
3	+	+	+	+	+	-
4	+	+	+	+	+	-
5	+	+	+	-	-	-

- Ορατό Έγκοιλο 2 ( Είναι ορατό από την επιφάνεια του εδάφους στον κάνναβο K1 και εκτείνεται από 16m έως 26m κατά μήκος του Χ άξονα και από 0m έως 8m κατά μήκος του Υ άξονα).

**Πίνακας 5.2:** Σύγκριση των προγραμμάτων Res2dinv, Res3dinv και EarthImager 3D καθώς και των μεθόδων αντιστροφής με τις νόρμες L1 και L2 για το ορατό έγκοιλο 2 του καννάβου K1.

K1	Πρόγραμμα Res2dinv		Πρόγραμμα Res3dinv		Πρόγραμμα EarthImager 3D	
Βάθος (m)	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1
0	+	+	+	+	+	+
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	+
3	+	+	+	+	+	+
4	+	+	+	+	+	+
5	+	+	+	+	+	+
6	+	+	+	+	+	+

- Η συνέχεια του ορατού εγκοίλου εμφανίζεται στον κάνναβο K2, το οποίο εκτείνεται σε απόσταση 8m έως 12m κατά μήκος του Χ άξονα και από 6m έως 8m κατά μήκος του Υ άξονα).

Όσον αφορά στην επέκταση του εγκοίλου στον κάνναβο K2, από το Res3dinv προκύπτει ότι το έγκοιλο εκτείνεται από 1-5m βάθος το

οποίο και επιβεβαιώνει το Res2dinv. Αντίθετα, το EarthImager 3D δεν εμφανίζει το έγκοιλο μετά το 1m βάθος.

**Πίνακας 5.3:** Σύγκριση των προγραμμάτων Res2dinv, Res3dinv και EarthImager 3D καθώς και των μεθόδων αντιστροφής με τις νόρμες L1 και L2 για το ορατό έγκοιλο 2 του καννάβου K2.

K2	Πρόγραμμα Res2dinv		Πρόγραμμα Res3dinv		Πρόγραμμα EarthImager 3D	
Βάθος (m)	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1
0	-	-	-	-	+	+
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	-
3	+	+	+	+	+	-
4	+	+	+	+	+	-
5	+	+	+	+	-	-

- Πιθανό έγκοιλο 3 (βρίσκεται στον κάνναβο K1 και εκτείνεται σε απόσταση από 2m έως 8m κατά μήκος του X άξονα και από 4m έως 8m κατά μήκος του Y άξονα).

Το πιθανό έγκοιλο δείχνει ότι εκτείνεται από 1m έως 5m βάθος στις γεωηλεκτρικές τομές από το Res3dinv, ενώ για το EarthImager 3D , σύμφωνα με την μέθοδο Robust (νόρμα L1) δείχνει την ύπαρξη του εγκοίλου μόνο κοντά στην επιφάνεια (0m).

**Πίνακας 5.4:** Σύγκριση των προγραμμάτων Res2dinv, Res3dinv και EarthImager 3D καθώς και των μεθόδων αντιστροφής με τις νόρμες L1 και L2 για το πιθανό έγκοιλο 3 του καννάβου K1.

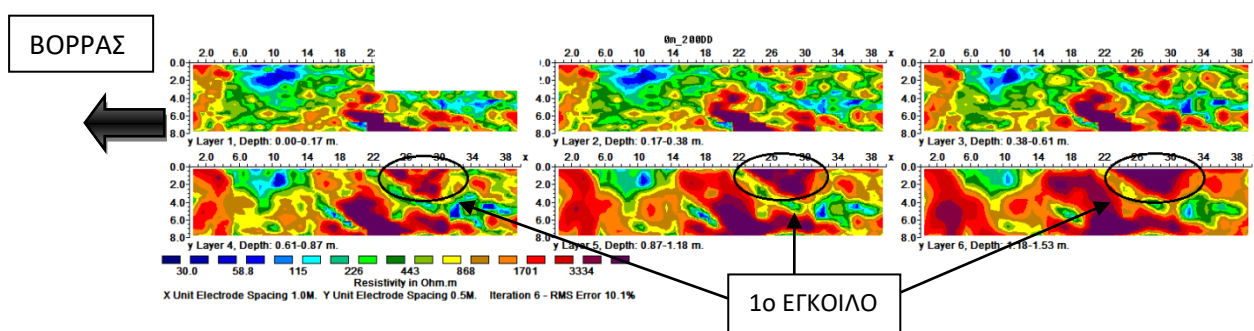
K1	Πρόγραμμα Res2dinv		Πρόγραμμα Res3dinv		Πρόγραμμα EarthImager 3D	
Βάθος (m)	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1	Νόρμα L2	Νόρμα L1
0	-	-	-	-	+	+
1	+	+	+	+	+	-
2	+	+	+	+	+	-
3	+	+	+	+	+	-
4	+	+	+	+	-	-
5	-	-	+	-	-	-

## 5.2. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

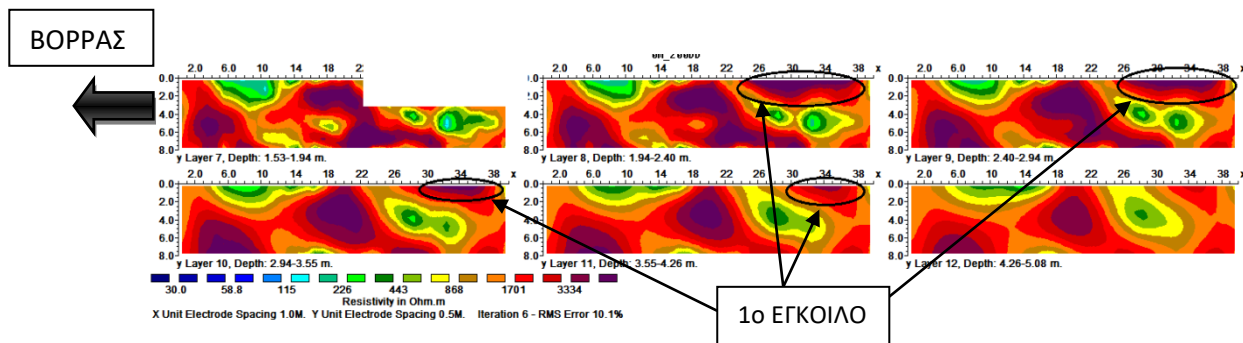
### 5.2.1. Πιθανό έγκοιλο στον καννάβο K1 ( 1ο έγκοιλο)

Αρχικά στις γεωηλεκτρικές τομές (Παράρτημα) υπάρχουν ενδείξεις γεωηλεκτρικών ανωμαλιών μέχρι 10 περίπου μέτρα, που εμφανίζονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και φτάνουν μέχρι και τα 5m βάθος. Οι ανωμαλίες εμφανίζονται από την 1η γραμμή έως την 8η γραμμή του καννάβου (4m πλάτος) και κατά μήκος των γραμμών από τα 25 έως και τα 35 περίπου μέτρα, όπου έχουμε υψηλότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (2000-3000 Ohm m) και είναι πιθανόν να αντιστοιχούν στην ύπαρξη εγκοίλου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προγράμματος Res3dinv παρατηρούμε ότι στις οριζόντιες τομές (Σχήματα 5.1α και β) το πιθανό έγκοιλο εμφανίζεται από την επιφάνεια του εδάφους και εκτείνεται μέχρι τα 5 περίπου μέτρα βάθος βάση της νόρμας L2, ενώ δείχνει να εκτείνεται σε βάθος από περίπου 0.5m μέχρι 4m περίπου, βάση της αντιστροφής με τη νόρμα L1 (Σχήματα 4.7 και 4.8). Επίσης στα αποτελέσματα του λογισμικού EarthImager 3D βάσει της νόρμας αντιστροφής L2 βλέπουμε ότι το πιθανό έγκοιλο εκτείνεται μέχρι και τα 4m περίπου βάθος, ενώ βάσει της νόρμας αντιστροφής L1 το πιθανό έγκοιλο εκτείνεται έως τα 2m περίπου βάθος (Σχήματα 4.9 και 4.10).



**Σχήμα 5.1α:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) για την νόρμα L2 στον κάνναβο K1 σε βάθος 0-1.53m.



**Σχήμα 5.1β:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) για την νόρμα L2 στον κάνναβο K1 σε βάθος 1.53-5.08m.

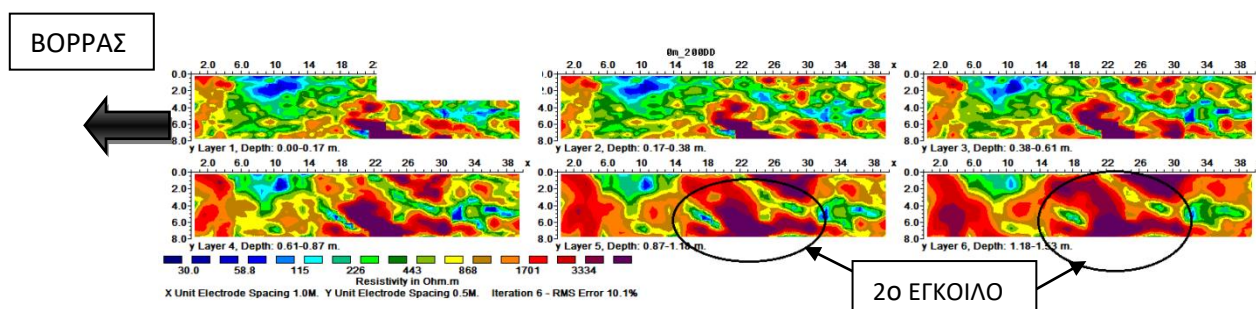
### 5.2.2. Ορατό έγκοιλο στον κάνναβο K1 και K ( 2ο έγκοιλο)

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκε ορατό έγκοιλο στην επιφάνεια του εδάφους, στον κάνναβο K1, διαστάσεων 6m X 1.5m. Σύμφωνα με τις γεωηλεκτρικές τομές (Παράρτημα) από τα 6m έως τα 8m του Y άξονα

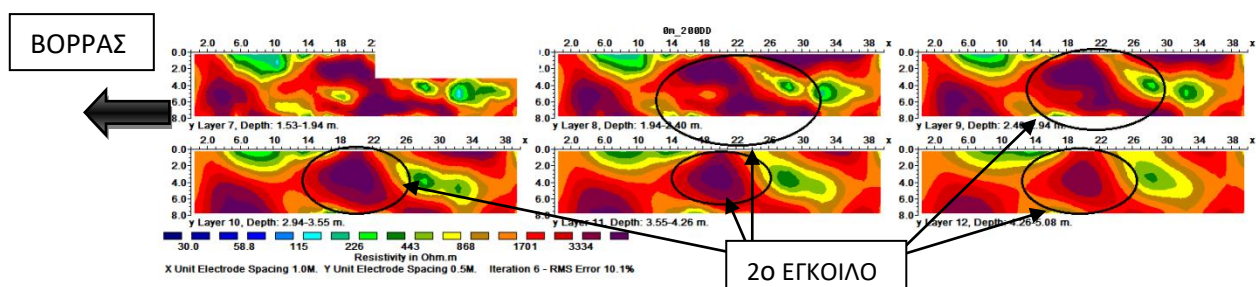
του καννάβου K1 παρουσιάζονται επιφανειακά (19-25m) οι μεγαλύτερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (2000-3000 Ohm m), κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού σε αυτές τις θέσεις εμφανίζεται επιφανειακά και το έγκοιλο. Επίσης στις υπόλοιπες γραμμές μελέτης παρατηρείται ότι το εν λόγω έγκοιλο πιθανότατα έχει μεγαλύτερη έκταση.

Από τις οριζόντιες τομές (Σχήματα 5.2α και β) προέκυψε ότι το ορατό έγκοιλο εμφανίζεται από τα 16m έως 26m στην χ-διεύθυνση και μέχρι το βάθος των 6m περίπου. Το προαναφερθέν βάθος παίρνει την τιμή των 5.5m για την αντιστροφή με τη νόρμα L1 (Σχήματα 4.8α,β,γ,δ).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του EarthImager 3D το ορατό έγκοιλο εκτείνεται έως τα 6.3m βάθος βάσει της νόρμας L2, ενώ εκτείνεται μέχρι και τα 5m βάθος βάσει της νόρμας L1 (Σχήματα 4.10α,β,γ)



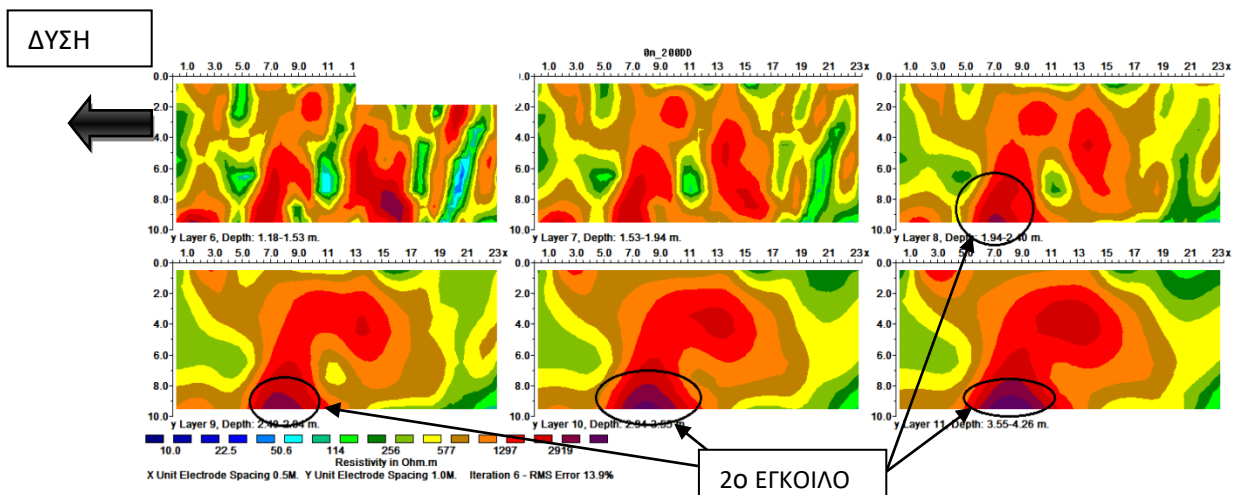
**Σχήμα 5.2α:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) για την νόρμα L2 στον κάνναβο K1 σε βάθος 0-1.53m.



**Σχήμα 5.2β:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) για την νόρμα L2 στον κάνναβο K1 σε βάθος 1.53-5.08m.



Επιπλέον η συνέχεια του ορατού εγκοίλου εμφανίζεται στον κάνναβο K2. Σύμφωνα με τις γεωηλεκτρικές τομές (Παράρτημα) εκτείνεται σε απόσταση 8m έως 12m στην οριζόντια διεύθυνση και εμφανίζεται από την 3<sup>η</sup> γραμμή έως την 10<sup>η</sup> γραμμή. Υψηλότερες τιμές της ειδική ηλεκτρικής αντίστασης (2000-3000 Ohm m) έχουμε στη 8<sup>η</sup> γραμμή έως στη 10<sup>η</sup> γραμμή, ενώ το ορατό έγκοιλο εκτείνεται από 1m έως και τα 5m βάθος. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος Res3dinv. Βάσει της νόρμας αντιστροφής L2 το ορατό έγκοιλο εμφανίζεται από περίπου 1m και φτάνει μέχρι τα 4.5m βάθος (Σχήμα 5.2γ). Αντίστοιχα βάσει της νόρμας L1 το ορατό έγκοιλο εκτείνεται από 1m μέχρι 5m βάθος (Σχήμα 4.8). Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του λογισμικού EarthImager 3D, το ορατό έγκοιλο εκτείνεται μέχρι και τα 4.5m βάθος με βάση την νόρμα αντιστροφής L2 (Σχήμα 4.9). Αντίστοιχα, με βάση την νόρμα L1 το ορατό έγκοιλο εκτείνεται μέχρι περίπου 1m βάθος (Σχήμα 4.10).

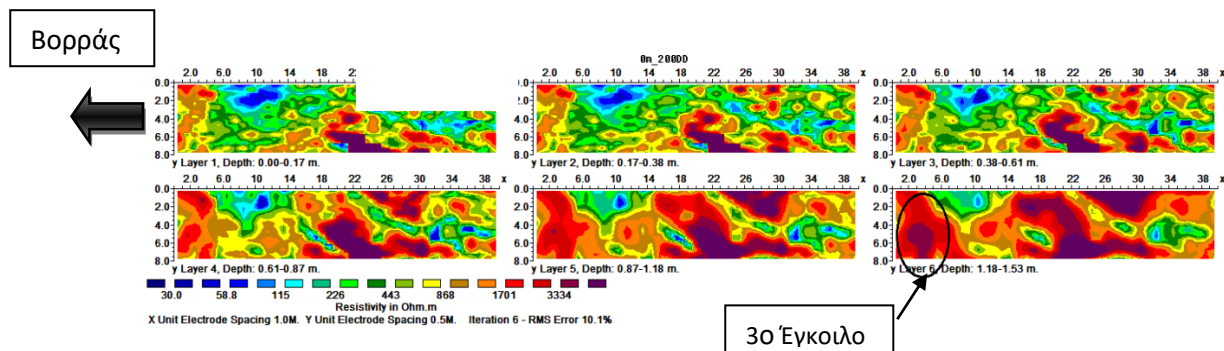


**Σχήμα 5.2γ:** Γεωηλεκτρικές τομές (x-y) για την νόρμα L2 στον κάνναβο K2 σε βάθος 1.18-4.26m.

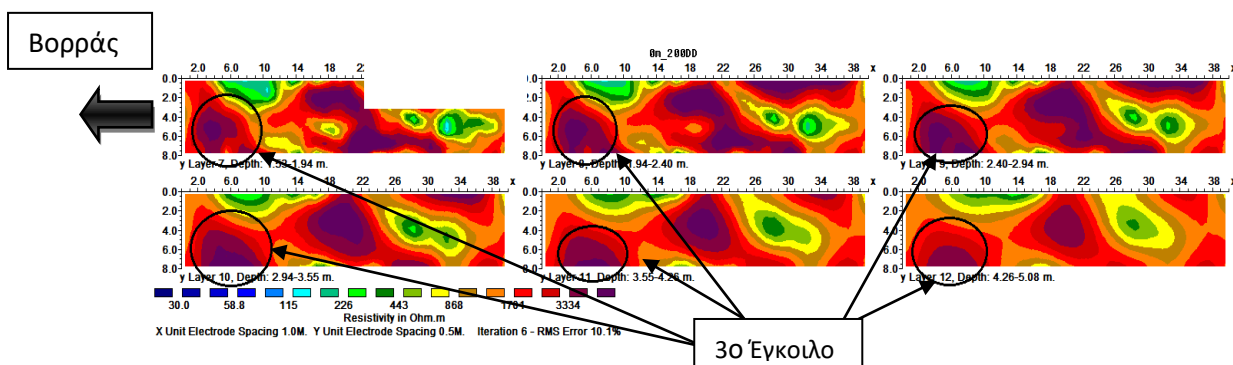
### 5.2.3. Πιθανό έγκοιλο στον Κάνναβο K1 ( 3ο έγκοιλο)

Λαμβάνοντας υπόψη το λογισμικό Res2dinv παρατηρούμε την ύπαρξη υψηλών γεωηλεκτρικών ανωμαλιών στον κάνναβο K1, οι οποίες σύμφωνα με

τις γεωηλεκτρικές τομές (Παράρτημα) εκτείνονται σε απόσταση 2m έως 8m στην οριζόντια διάσταση. Οι ανωμαλίες αυτές πιθανόν αντιστοιχούν σε ένα πιθανό έγκοιλο, το οποίο εμφανίζεται στις γραμμές μελέτης από την 6<sup>η</sup> γραμμή έως την 16<sup>η</sup> γραμμή (3 έως 8 περίπου μέτρα κατά μήκος του Y άξονα του καννάβου), με υψηλότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (2000-3000 Ohm m). Το βάθος εμφάνισης του πιθανού εγκοίλου είναι περίπου 1m από την επιφάνεια ενώ εκτείνεται μέχρι το βάθος των 4m. Στις οριζόντιες τομές (Σχήματα 5.3α και β ) του προγράμματος Res3dinv το πιθανό έγκοιλο εμφανίζεται σε βάθος από 1m έως τα 5.5m, βάσει της νόρμας αντιστροφής L2 (Σχήματα 4.7α,β,γ,δ), ενώ με την νόρμα αντιστροφής L1 (Σχήματα 4.8α,β,γ,δ) το πιθανό έγκοιλο εμφανίζεται σε βάθος 0.5m και φτάνει μέχρι τα 4.5m βάθος. Τέλος, σύμφωνα με το λογισμικό EarthImager 3D το πιθανό έγκοιλο εκτείνεται από την επιφάνεια μέχρι τα 3.5m βάθος βάσει της νόρμας αντιστροφής L2 (Σχήματα 4.9α,β,γ), ενώ βάσει της νόρμας αντιστροφής L1 (Σχήματα 4.10α,β,γ) εκτείνεται από την επιφάνεια μέχρι περίπου 1m.



**Σχήμα 5.3α:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) με την νόρμα L2 στον κάνναβο K1 σε βάθος 0-1.53m.



**Σχήμα 5.3β:** Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές (x-y) με την νόρμα L2 στον κάνναβο K1 σε βάθος 1.53-5.08m.

### 5.3.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ RES3DINV ΜΕ ΤΟ EARTHIMAGER 3D

Το Res3dinv και το EarthImager 3D είναι προγράμματα αντιστροφής τρισδιάστατων δεδομένων και χρησιμοποιούνται κατά την γεωφυσική διασκόπηση προκειμένου να απεικονιστεί η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους. Το Res3dinv χρησιμοποιεί την τεχνική αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων Gauss-Newton με περιορισμούς εξομάλυνσης. Παρέχει την δυνατότητα πραγματοποίησης οριζόντιων και κατακόρυφων τομών x-z και y-z του υπεδάφους. Αντίστοιχα το πρόγραμμα EarthImager 3D είναι ιδανικό για απεικόνιση ακόμη και σε περιοχές όπου υπάρχει ανάγλυφο. Το τρισδιάστατο μοντέλο είναι δυνατόν να περιστραφεί σε οποιοδήποτε προσανατολισμό, να μεγεθυνθεί, να μετακινηθεί, να εξαχθούν τομές και να μετακινηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του παραθύρου της εικόνας, προκειμένου να βρεθεί το χαρακτηριστικό εκείνο με τρισδιάστατη λεπτομέρεια. Παρέχει δηλαδή στον χρήστη, με ευκολία, την μελέτη και επεξεργασία τυχόν δομών στο υπέδαφος ( π.χ. έγκοιλα). Για το πρώτο έγκοιλο στο πρόγραμμα EarthImager 3D δεν εντοπίζεται, βάσει της νόρμας L1, το έγκοιλο μετά τα 2m βάθος ενώ το Res3dinv δείχνει ότι φτάνει μέχρι τα 5m. Επιπλέον, το δεύτερο πιθανό έγκοιλο στον κάρναβο K1 εκτείνεται μέχρι τα 6m σύμφωνα με το πρόγραμμα Res3dinv, όπως φαίνεται και στις γεωηλεκτρικές τομές από το Res2dinv, ενώ το EarthImager 3D, μέχρι τα 5m. Όσον αφορά στην επέκταση του δεύτερου πιθανού εγκοίλου στον κάρναβο K2, από το Res3dinv προκύπτει ότι το έγκοιλο εκτείνεται από 1-5m βάθος; το οποίο και επιβεβαιώνει το Res2dinv. Αντίθετα, το EarthImager 3D δεν εμφανίζει πιθανό έγκοιλο μετά το 1m βάθος. Τέλος, στο τρίτο πιθανό έγκοιλο δείχνει ότι εκτείνεται από 1m έως 5m βάθος στις γεωηλεκτρικές τομές από το Res3dinv, ενώ για το EarthImager 3D , σύμφωνα με την μέθοδο Robust (νόρμα L1), δείχνει την ύπαρξη του εγκοίλου μόνο κοντά στην επιφάνεια (0m). Άρα ενώ τα αποτελέσματα από τα προγράμματα Res3dinv και Res2dinv συμφωνούν ως προς την ύπαρξη εγκοίλων, στην διαστασιολόγηση και το βάθος τους, τα αποτελέσματα από το EarthImager 3D δείχνουν αρκετές και σημαντικές διαφορές συγκριτικά με εκείνα του προγράμματος Res2dinv.



Από την επεξεργασία προέκυψαν τρία έγκοιλα εκ των οποίων τα δύο είναι πιθανά. Προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα, η σύγκριση θα γίνει για το ορατό στην επιφάνεια έγκοιλο 2 (Σχήμα 6.1).

#### 6.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις νόρμες L1 και L2 για τα 2D δεδομένα για το εμφανές έγκοιλο

Οι μέθοδοι αντιστροφής που χρησιμοποιήθηκαν στο Res2dinv είναι δύο: η αντιστροφή με την νόρμα L2 και περιορισμό εξομάλυνσης, η οποία υπαγορεύει ότι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μοντέλου αλλάζουν με ομαλό τρόπο και η αντιστροφή με την νόρμα L1, οποία είναι λιγότερο ευαίσθητη στις μετρήσεις με υψηλό θόρυβο και συνεπώς δίνει μικρότερο σφάλμα. Το εμφανές έγκοιλο 2 εμφανίζεται και στους δύο καννάβους K1 και K2. Για τον κάνναβο K1, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της νόρμας L2 συμπίπτουν με εκείνα της νόρμας L1 με την μόνη διαφορά ότι για την νόρμα L2 το έγκοιλο εκτείνεται μέχρι τα 6m βάθος, ενώ για την νόρμα L1, εκτείνεται μέχρι τα 5m περίπου.

Για τον κάνναβο K2, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για την νόρμα L2 διαφέρουν από εκείνα της L1. Στην νόρμα L2 το έγκοιλο βρίσκεται σε βάθος από 1m έως και 5m, ενώ στην νόρμα L1, από 2m έως 5m.

#### 6.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις νόρμες L1 και L2 για τα 3D δεδομένα για το εμφανές έγκοιλο

Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιστροφή των 3D δεδομένων είναι τα Res3dinv και EarthImager 3D. Οι μέθοδοι αντιστροφής είναι ίδιες όπως και στο Res2dinv. Όσον αφορά τον κάνναβο K1, στο Res3dinv τα αποτελέσματα για τις νόρμες L1 και L2 συμφωνούν με την μόνη διαφορά ότι για την νόρμα L2 το έγκοιλο εκτείνεται από το 0m έως και τα 6m βάθος, ενώ για την νόρμα L1, από τα 0m έως και τα 5m. Στο πρόγραμμα EarthImager 3D τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους αντιστροφής διαφέρουν. Για την νόρμα L2 το έγκοιλο εκτείνεται μέχρι τα 6m βάθος, ενώ για την νόρμα L1, μέχρι το 5m.

Όσον αφορά τον κάνναβο K2, στο Res3dinv τα αποτελέσματα για τις νόρμες L1 και L2 συμφωνούν με την μόνη διαφορά ότι για την νόρμα L2 το έγκοιλο εκτείνεται από το 1m έως τα 5m βάθος ενώ για την νόρμα L1, από το 1m έως τα 4m. Στο πρόγραμμα EarthImager 3D τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους αντιστροφής διαφέρουν. Για την νόρμα L2 το έγκοιλο εκτείνεται μέχρι τα 3m βάθος ενώ για την νόρμα L1 το έγκοιλο εμφανίζεται μόνο επιφανειακά.

### 6.1.3 Επιλογή νόρμας και προγράμματος επεξεργασίας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το εμφανές έγκοιλο 2, το πρόγραμμα αντιστροφής Res3dinv παρουσιάζει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία συμπίπτουν και με αυτά από το πρόγραμμα Res2dinv. Αυτός είναι και ο λόγος που επιλέγουμε το Res3dinv. Όσον αφορά τις νόρμες αντιστροφής, παρατηρούμε ότι η νόρμα L2 παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία αποτελεσμάτων σε όλα τα προγράμματα από ότι η νόρμα L1. Επομένως επιλέγουμε την νόρμα L2 ως την πιο αντιπροσωπευτική.

## 6.2.ΠΙΘΑΝΑ ΕΓΚΟΙΛΑ ΑΠΟ ΤΑ 3D ΔΕΔΟΜΕΝΑ

### 1. Πιθανό Έγκοιλο 1

Σύμφωνα με το Res3dinv και για την νόρμα L2, το πιθανό έγκοιλο 1 που βρίσκεται στον κάνναβο K1 εκτείνεται από την γραμμή μελέτης K1\_0m έως K1\_8m όπου οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κυμαίνονται από 2000-3334Ohm m. Εντοπίζεται στις γεωηλεκτρικές τομές από την επιφάνεια και έχει διαστάσεις από 26m έως 36m κατά μήκος του X άξονα, από 0m έως 3m κατά μήκος του Y άξονα και εκτείνεται σε βάθος από 0m έως 5m.

### 2. Πιθανό Έγκοιλο 3

Σύμφωνα με το Res3dinv και για την νόρμα L2, το πιθανό έγκοιλο 3 που βρίσκεται στον κάνναβο K1 εμφανίζεται στις γραμμές K1\_5p5m K1\_8m,

όπου οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι υψηλότερες (2000-3334 Ohm m). Έχει διαστάσεις από 2m έως 8m κατά μήκος του Χ άξονα, από 4m έως 8m κατά μήκος του Υ άξονα και εκτείνεται σε βάθος από 1m έως 4m.

## **Ελληνική Βιβλιογραφία**

1. **Αλευράς, Α., 2006**, «Γεωηλεκτρική διασκόπηση για τον προσδιορισμό καρστικών δομών στο οροπέδιο του Ομαλού», Διπλωματική εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
2. **Βαφείδης, Α., 2001**, «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II», Σημειώσεις Μαθήματος, Χανιά.
3. **Λούης, Φ., (2006)**, «Ανάπτυξη λογισμικού για την επίλυση του μη γραμμικού αντίστροφου σεισμικού προβλήματος με εφαρμογή στην απεικόνιση υπεδάφικών δομών», Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
4. **Μαύρης, Μ., 2017**, «Συμβολή της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στην απεικόνιση σπηλαιώσεων», Διπλωματική εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
5. **Πολυχρονίδου, Κ., 2014**, «Συμβολή των γεωφυσικών μεθόδων ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ στην απεικόνιση καρστικών δομών στο Ατσιπόπουλο Ν. Ρεθύμνου», Διπλωματική εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
6. **Σακελάρης, Α., 2014**, «Γεωφυσική διασκόπηση στον Ομαλό με την μέθοδο της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας», Διπλωματική εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
7. **Hamdan, H., 2010**, «Ανάπτυξη τεχνικών συνδυασμένης επεξεργασίας γεωφυσικών δεδομένων (ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων) για την απεικόνιση της υπαλμύρινσης σε παράκτιους υδροφορείς», Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.



## Διεθνής Βιβλιογραφία

1. **Basokur, A. T., Akca, I., and Siyam, N. A., 2007**, “Hybrid genetic algorithms in the view of the evolution theories with application for the electrical sounding method”, *Geophysical Prospecting*, v.55, pp.393-406.
2. **Carrière, S.D., Chalikakis, K., Sénéchal, G., Danquigny, C., Emblanch, C., (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.
3. **Dey A. and Morrison H.F., 1979b**, “Resistivity modeling for arbitrary shaped three-dimensional shaped structures”, *Geophysics*, 44, pp 753-780.
4. **Debski, W., RUDZIŃSKI, L., 1997**, “The probabilistic formulation of the inverse theory with application to the selected seismological problems”, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Soc.*, Vol. B-19, pp. 1-173.
5. **El-Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M.,A., and Ushijima, K., 2005**, Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar, *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 67, no. 3, p.174–181.
6. **Matias, H., C., Monteiro Santos, F., A., Rodrigues Ferreira, F., E., Machado, C., Luzio, R., 2006**, Detection of graves using the micro-resistivity method, *Annals of Geophysics*, vol. 49, no.6.
7. **Leucci, G., 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.
8. **Martinez-Lopez J., Rey J., DUEN~AS J., Hidalgo G., Benavente J., 2013**, Electrical Tomography applied to the detection on subsurface cavities. *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 75, no. 1, p. 28–37.
9. **Martinez-Pagan P., Gómez-Ortiz D., Martin-Crespo T., Manteca JI., Rosique M., 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. **Meju M. A., 1994**, "Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice", Course Notes series Volume 6, Society of Exploration Geophysics, United States of America.
11. **Menke W., 1989**, "Geophysical data analysis: Discrete inverse theory", Academic Press, New York.
12. **Mohammed I.I., A., S., 2009**, Determination of cave geometry by using a geoelectrical resistivity inverse model, Engineering Geology 105, (2009) p.239–244.
13. **Mosegaard, K, and Tarantola, A., 2002**, "International Handbook of Earthquake Engineering seismology", Chapter Probabilistic Approach to Inverse problems, Academic Press, pp. 237-265.
14. **Muchaidze Iana, 2008**, Imaging in karst terrain using electrical resistivity tomography, Master thesis, Missouri University of Science AndTechnology.
15. **Ramirez, A. L., Niato, J. J., Hanley, W. G., Aines, R., Glaster, R. E., Sengupta, S. K., Dyer, K. M., Hickling, T. L., and Daily, W. D 2005**, "Stochastic inversion of electrical resistivity changes using a Markov Chain Monte Carlo approach", Journal of geophysical Research, Vol 110.Numb B2, pp. B02101.
16. **Robert, P. C., and Casella, G., 1999**, "Monte Carlo statistical methods",Springer, Berlin.
17. **Silvester, P. P., 1990**, Finite Elements for Electrical Engineers.
18. **Tarantola A., 1987**, "Inverse Problem Theory", Elsevier Sci., New York.

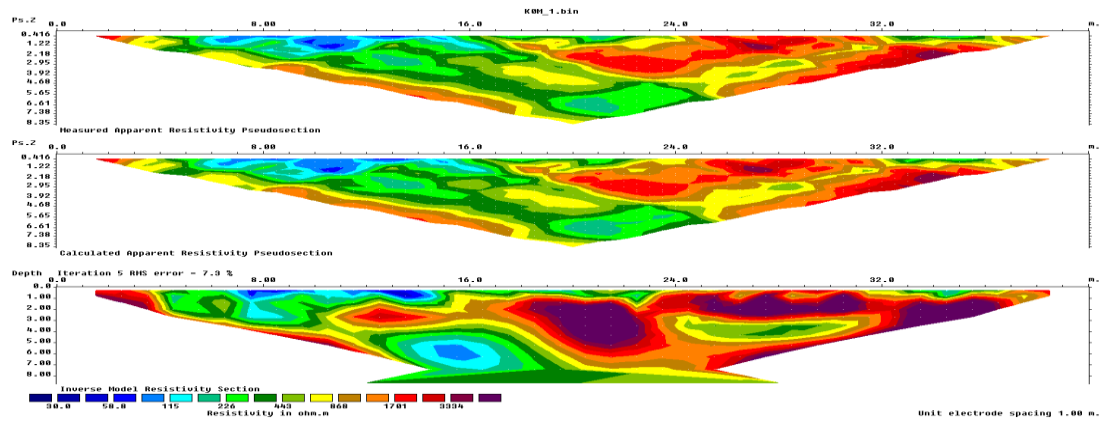
## **Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία**

1. <https://www.geotomosoft.com/products.php>
2. <https://www.agiusa.com/agi-earthimager-3d>

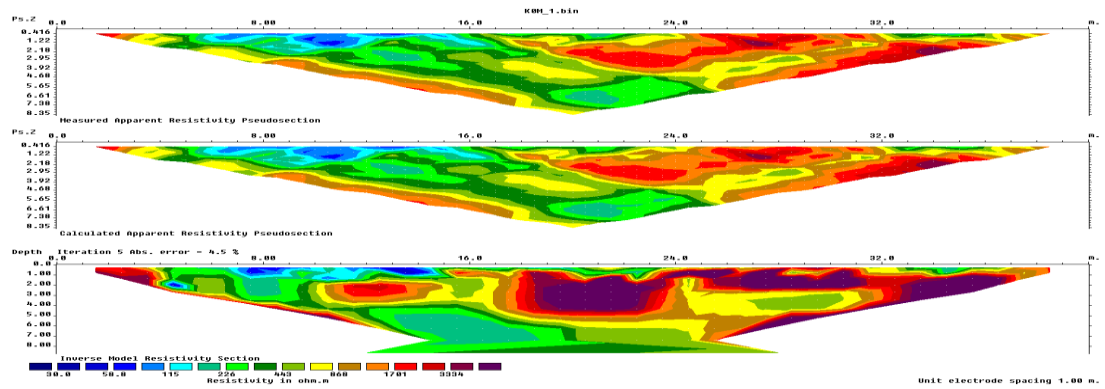
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

- Πρόγραμμα *Res2dinv*

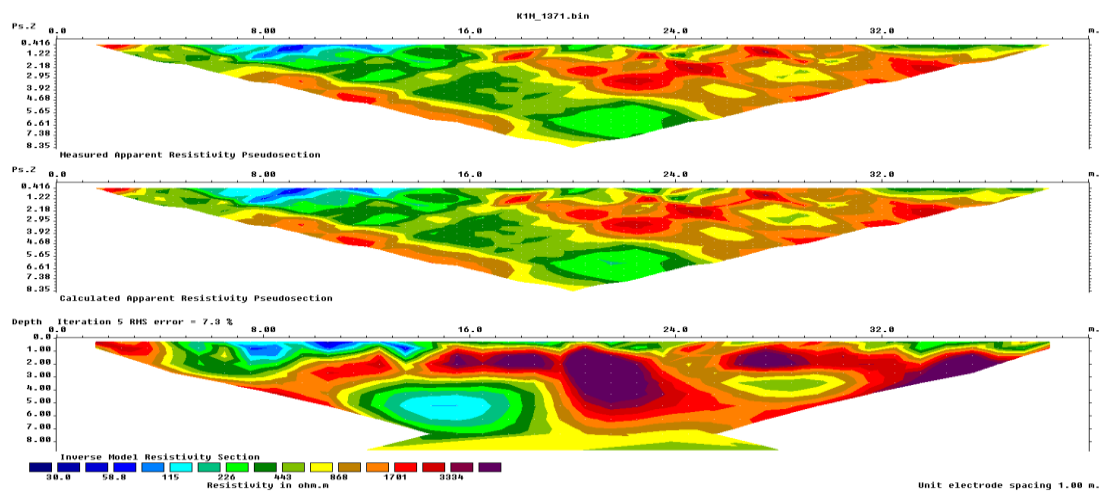
### Γραμμή K1\_0m L-S



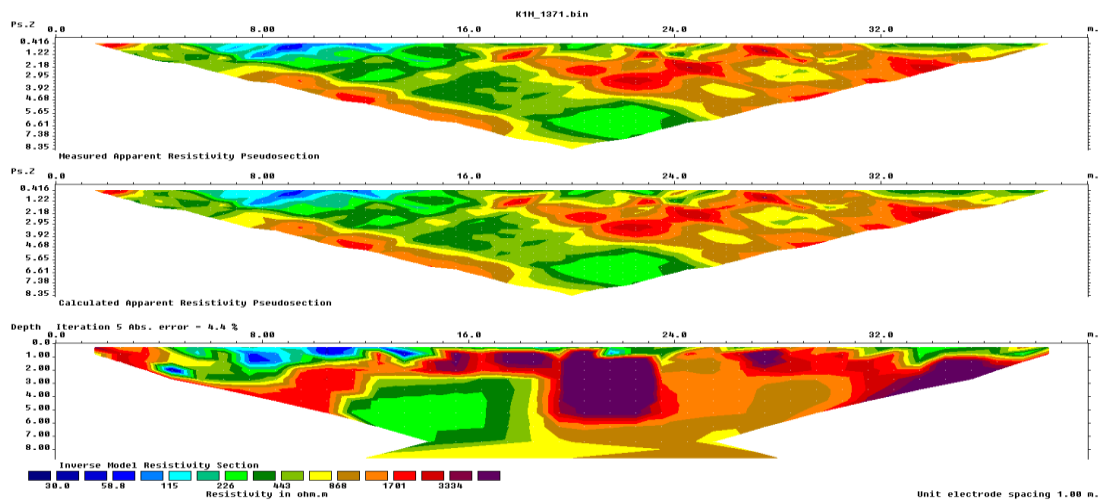
### Γραμμή K1\_0m Robust



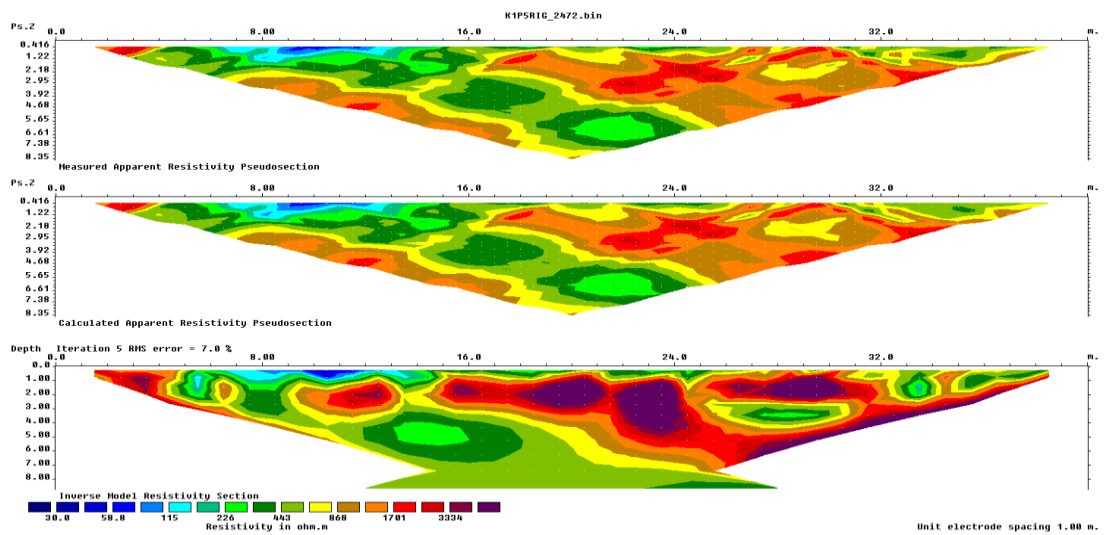
### Γραμμή K1\_1m L-S



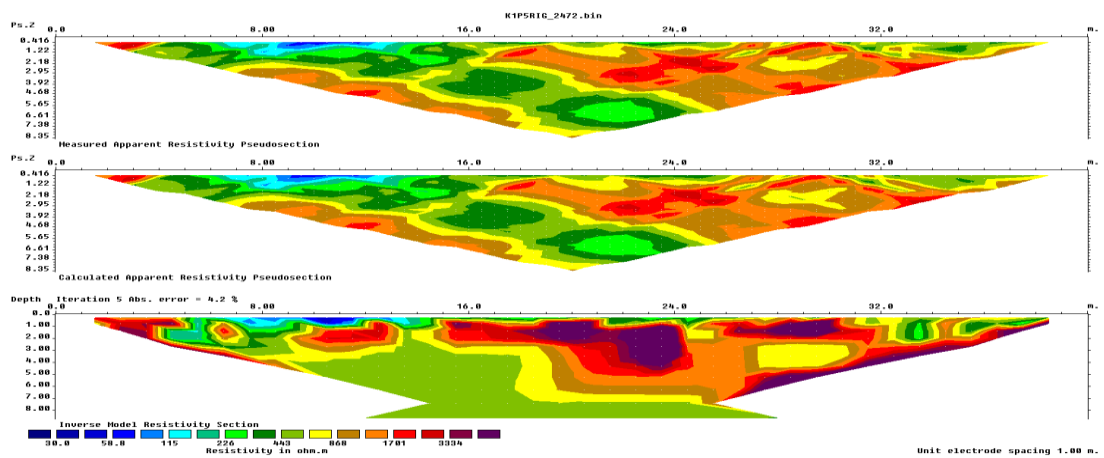
### Γραμμή K1\_1m Robust



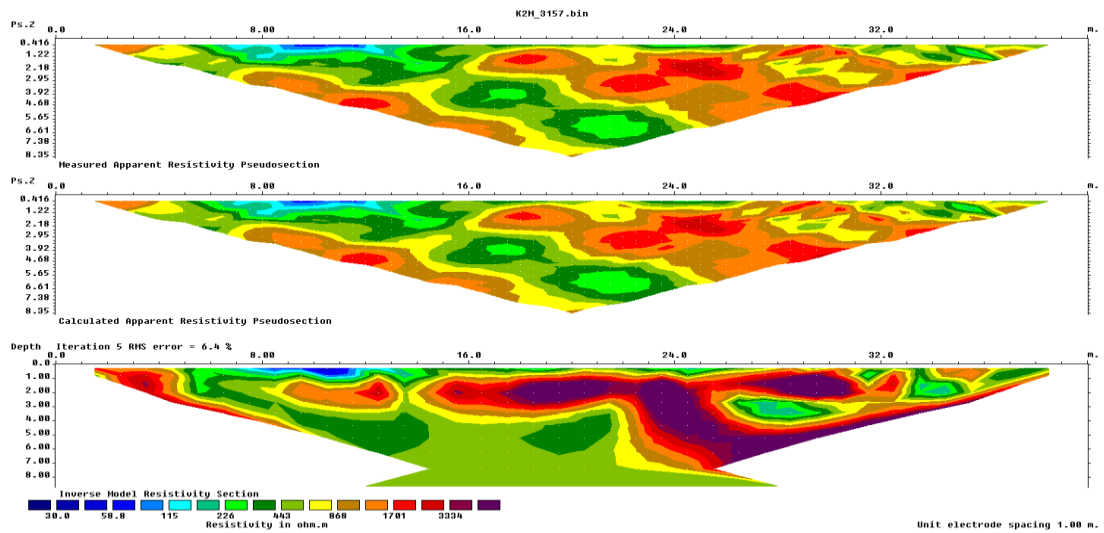
Γραμμή K1\_1p5m L-S



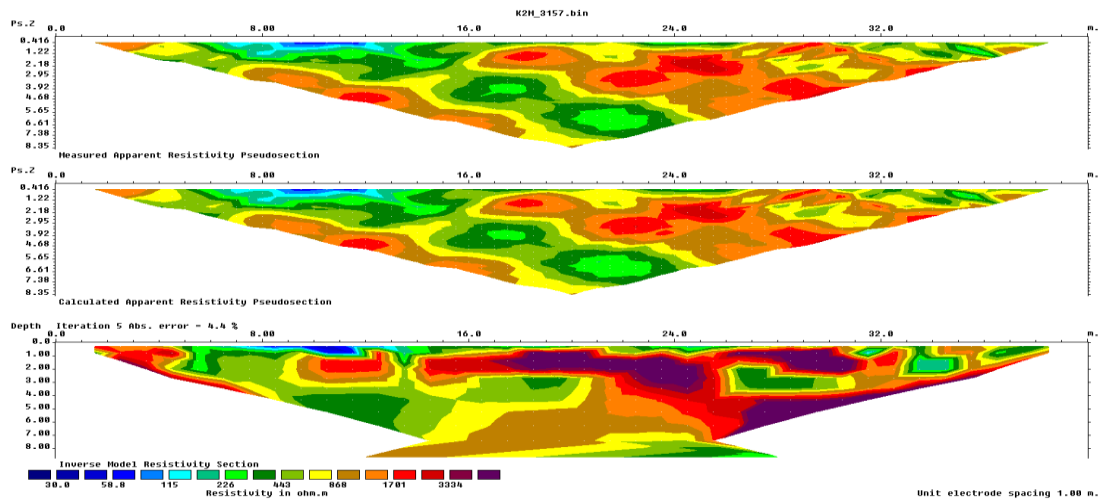
Γραμμή K1\_1p5m Robust



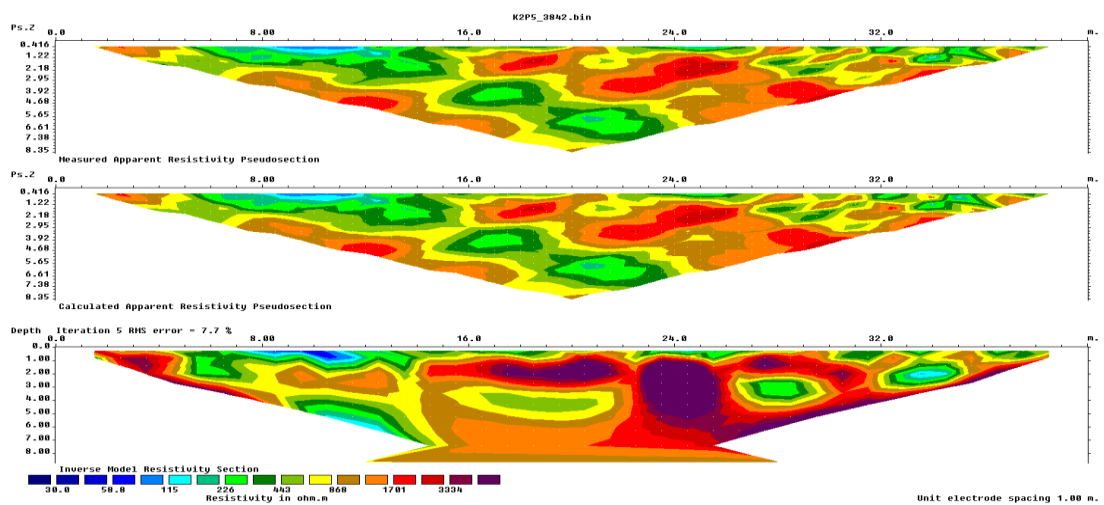
Γραμμή K1\_2m L-S



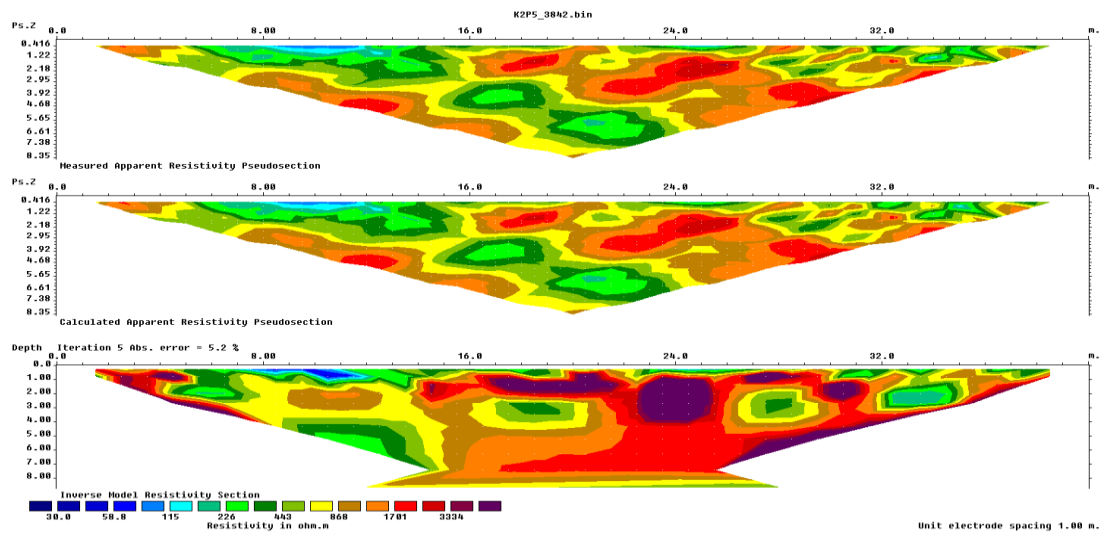
### Γραμμή K1\_2m Robust



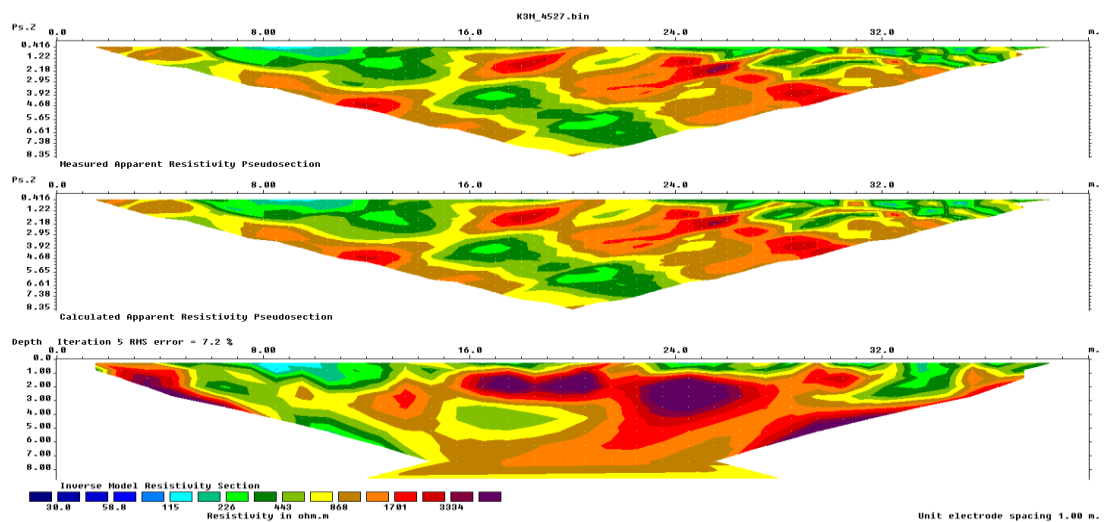
### Γραμμή K1\_2p5m L-S



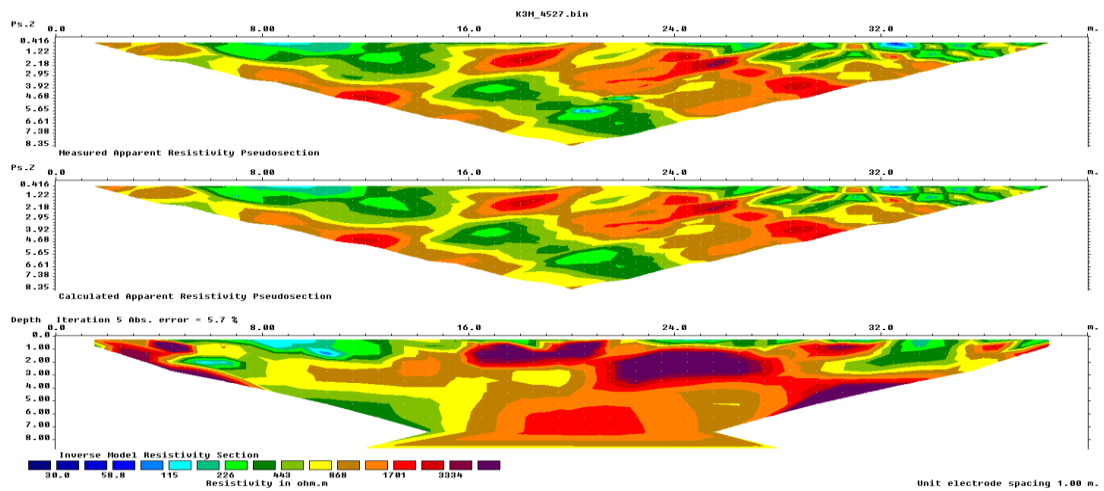
## Γραμμή K1\_2p5m Robust



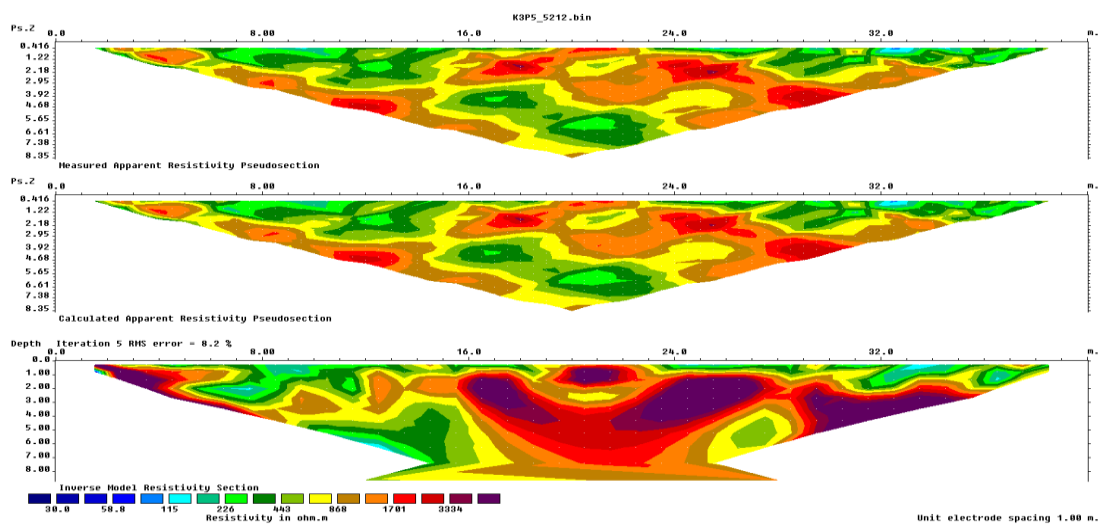
## Γραμμή K1\_3m L-S



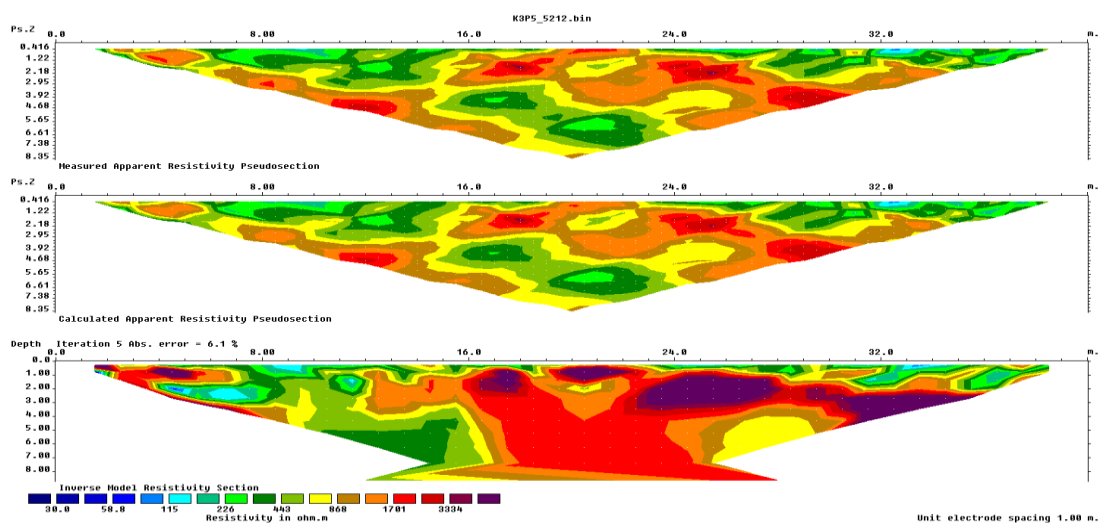
## Γραμμή K1\_3m Robust



Γραμμή K1\_3p5m L-S

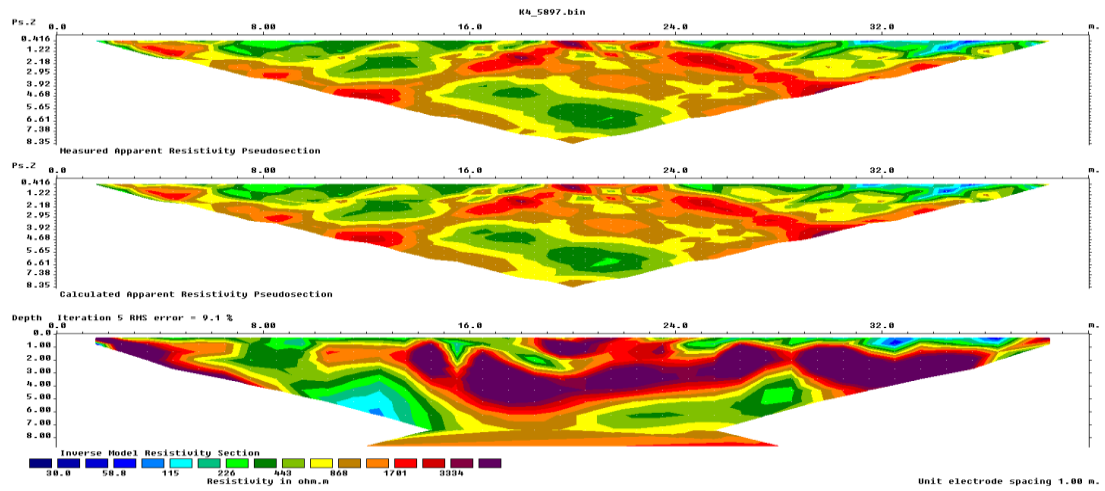


Γραμμή K1\_3p5m Robust

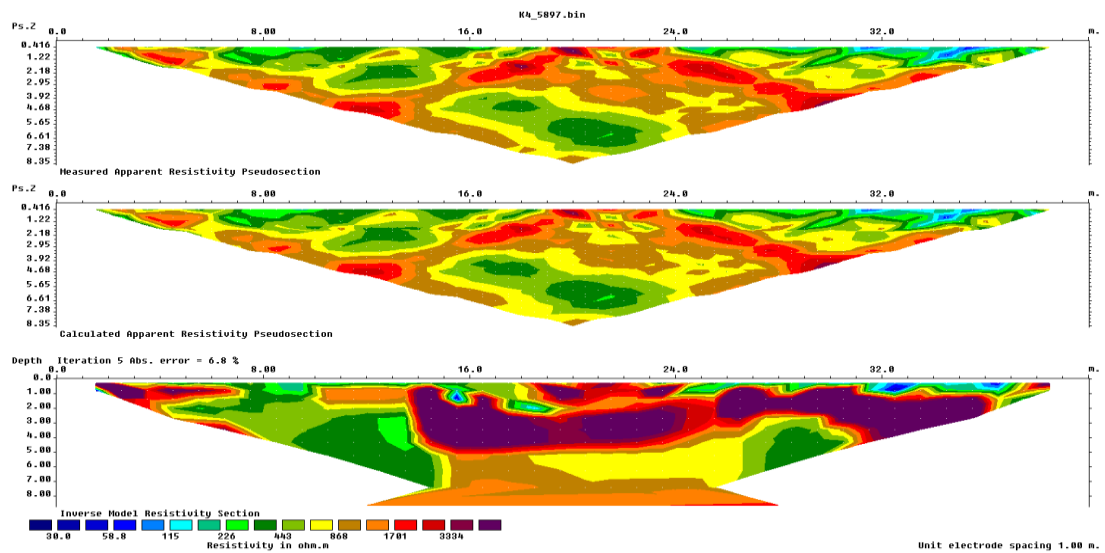




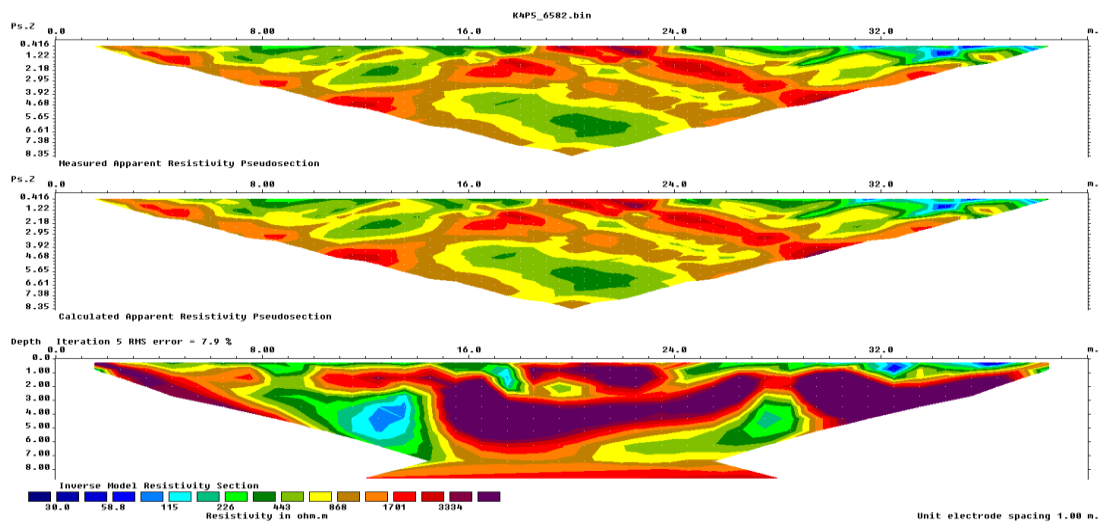
### Γραμμή K1\_m L-S



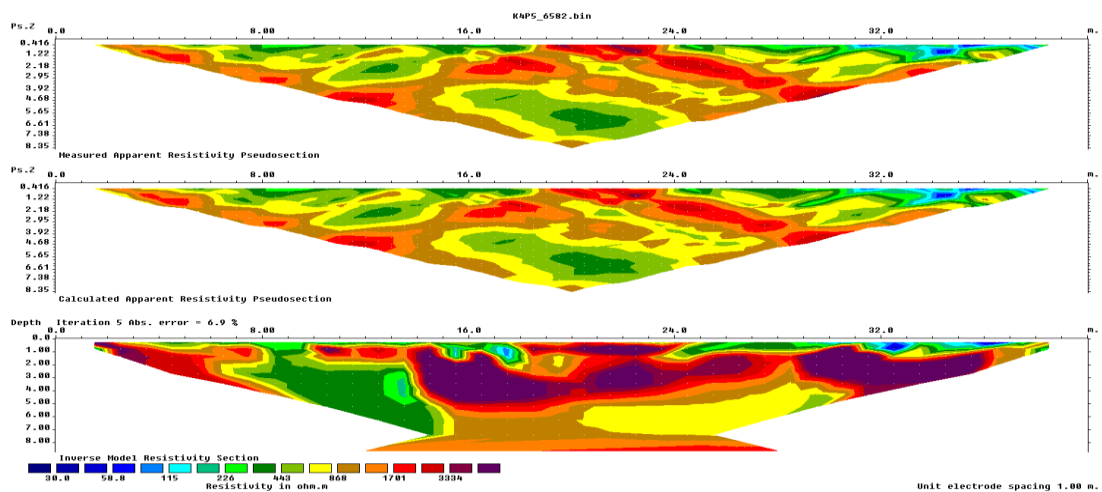
### Γραμμή K1\_4m Robust



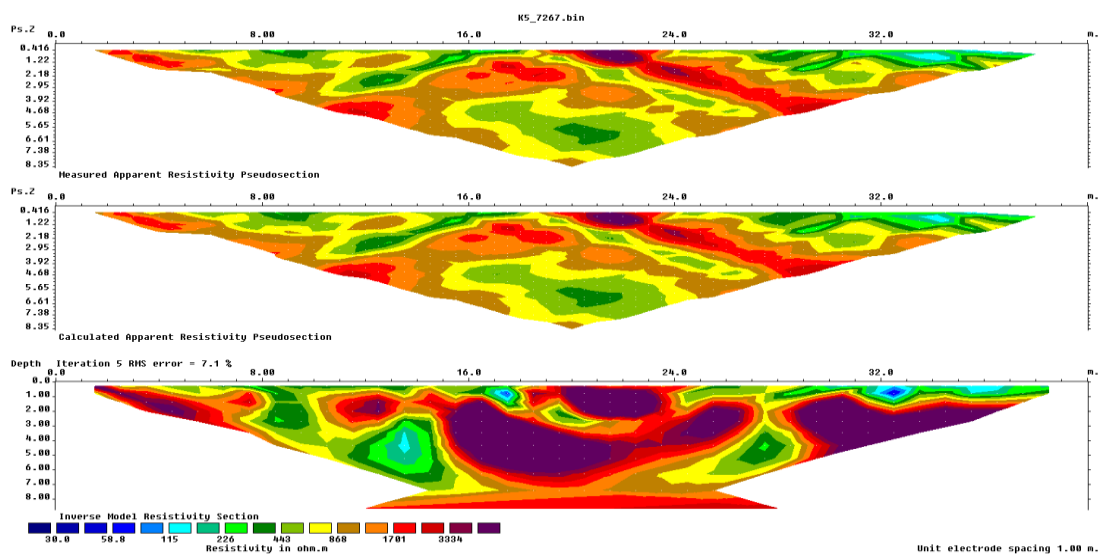
### Γραμμή K1\_4p5m L-S



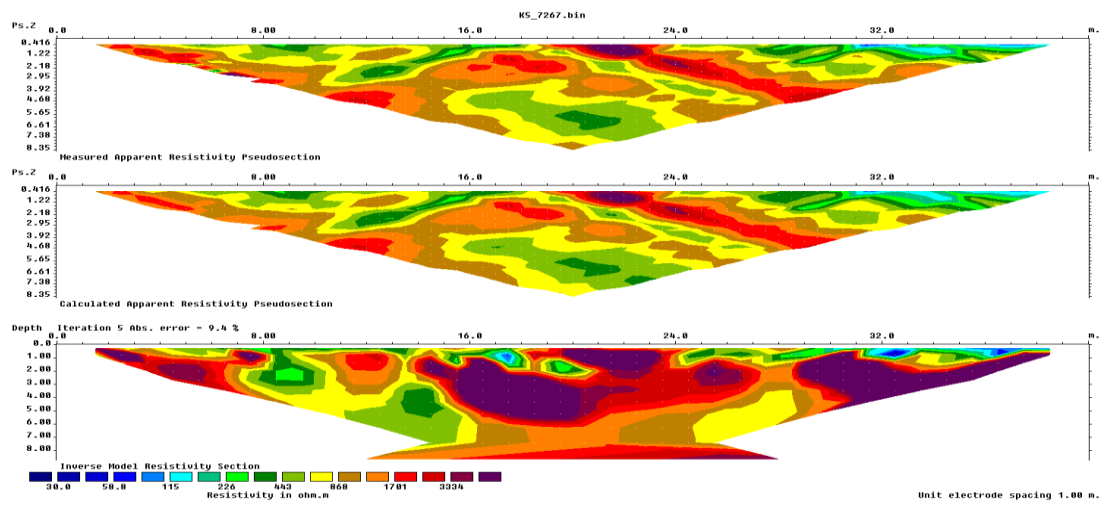
### Γραμμή K1\_4p5m Robust



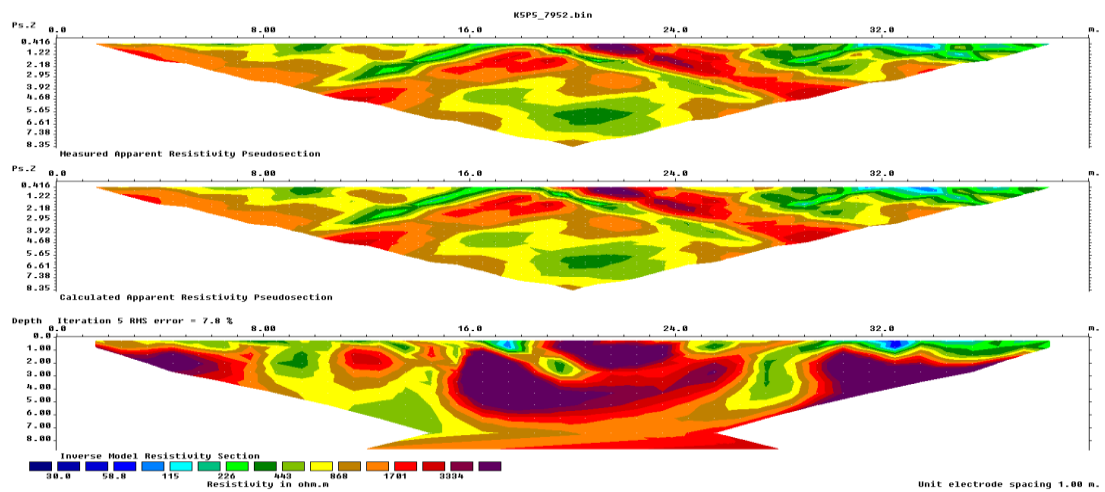
### Γραμμή K1\_5m L-S



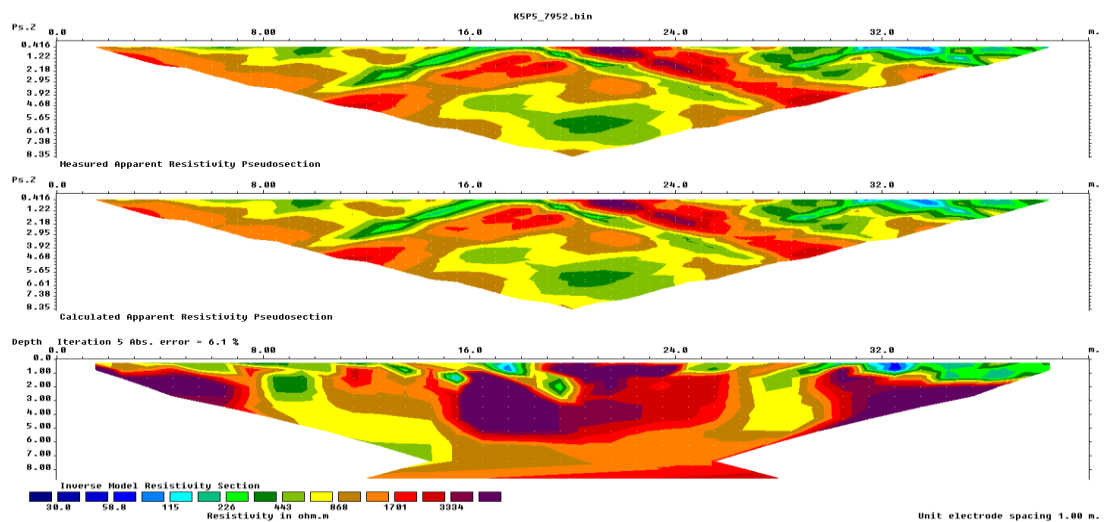
## Γραμμή K1\_5m Robust



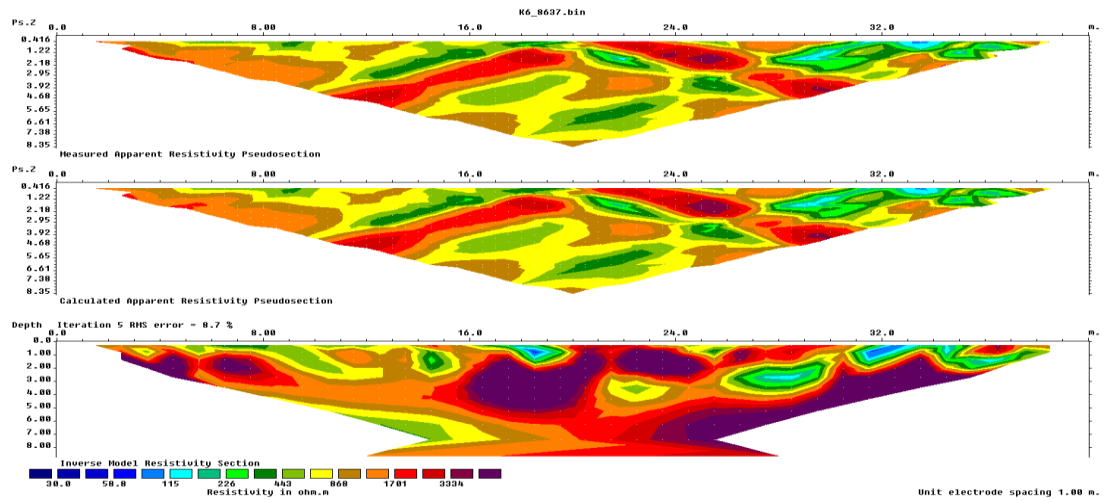
## Γραμμή K1\_5p5m L-S



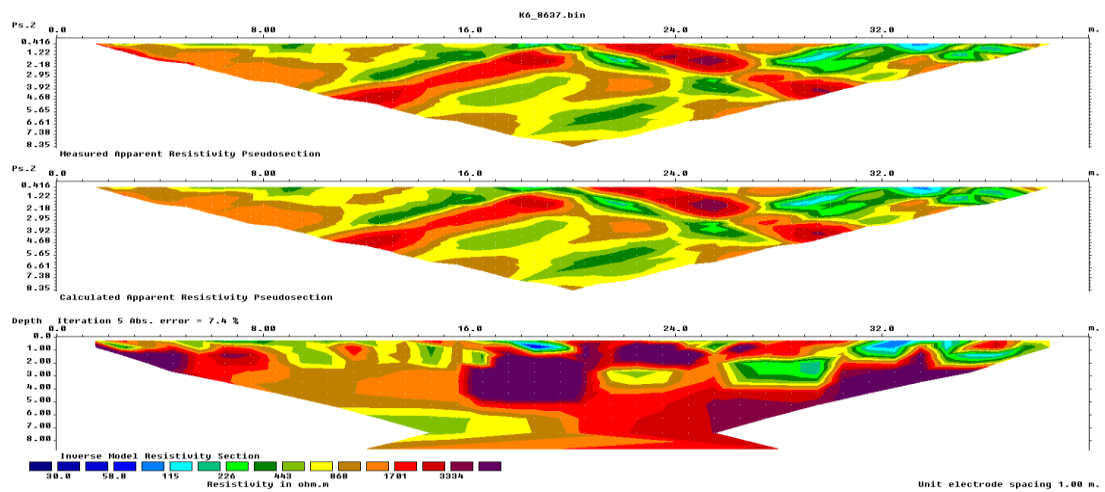
## Γραμμή K1\_5p5m Robust



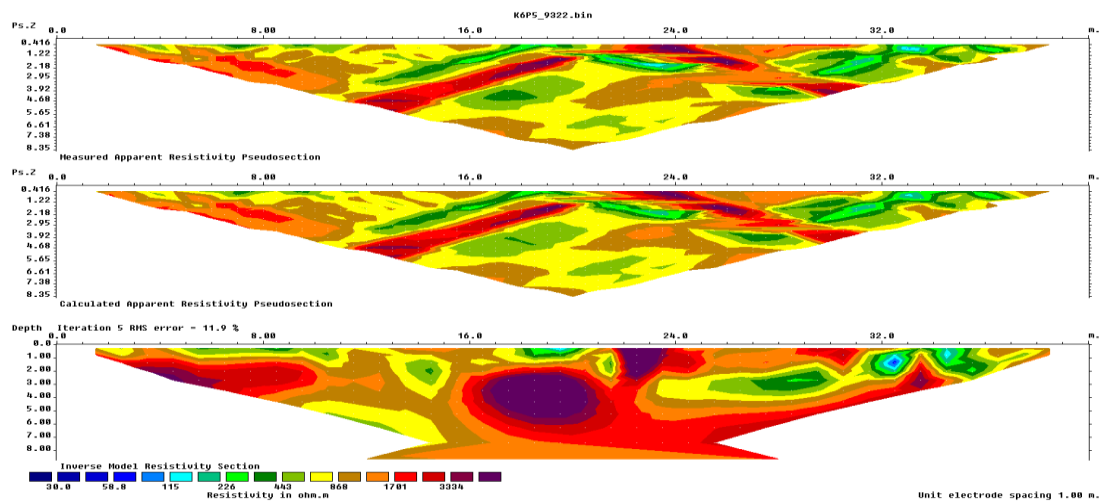
## Γραμμή K1\_6m L-S



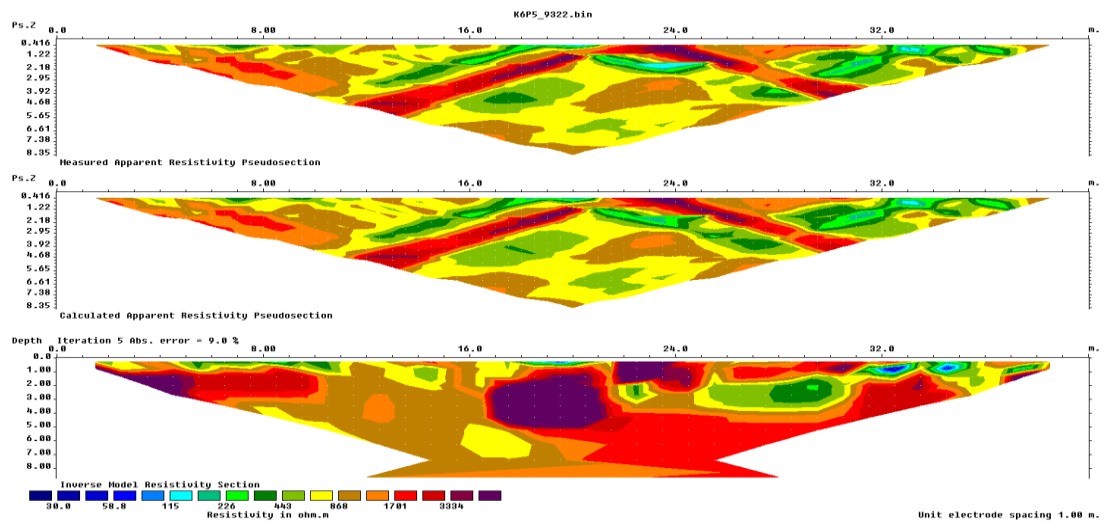
## Γραμμή K1\_6m Robust



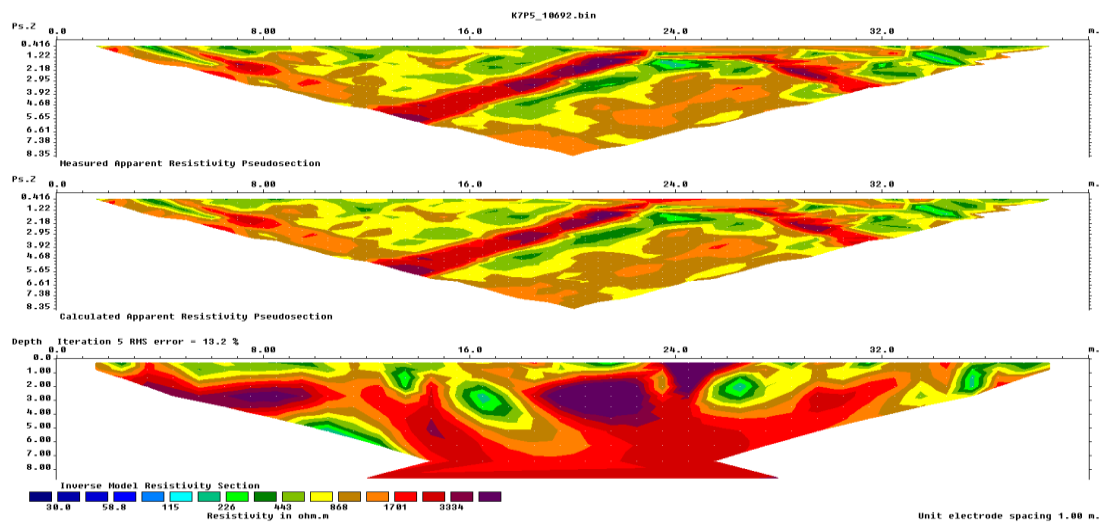
## Γραμμή K1\_6p5m L-S



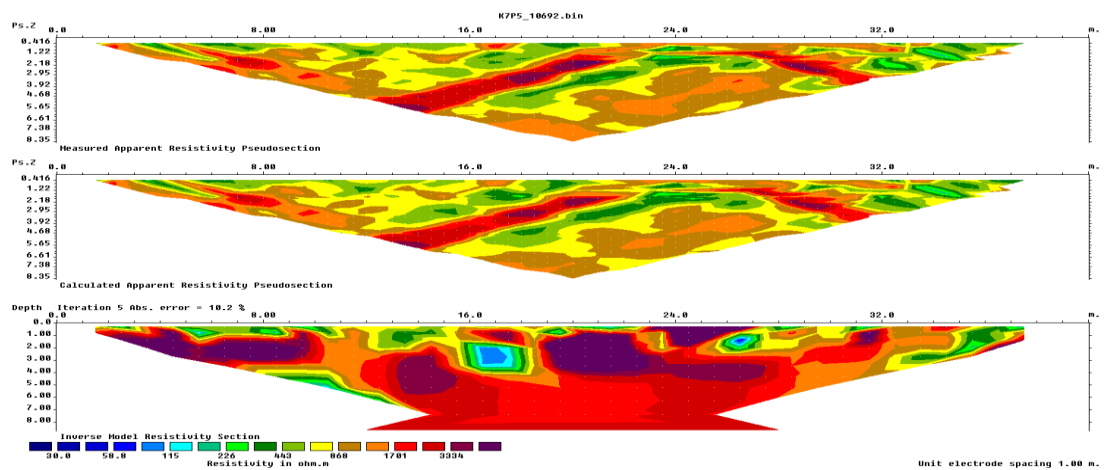
## Γραμμή K1\_6p5m Robust



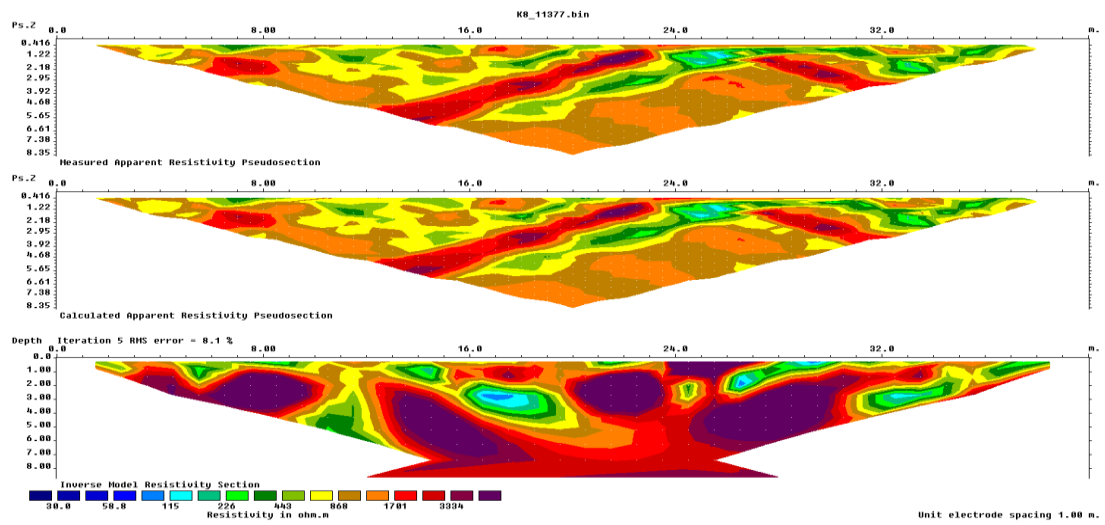
## Γραμμή K1\_7p5m L-S



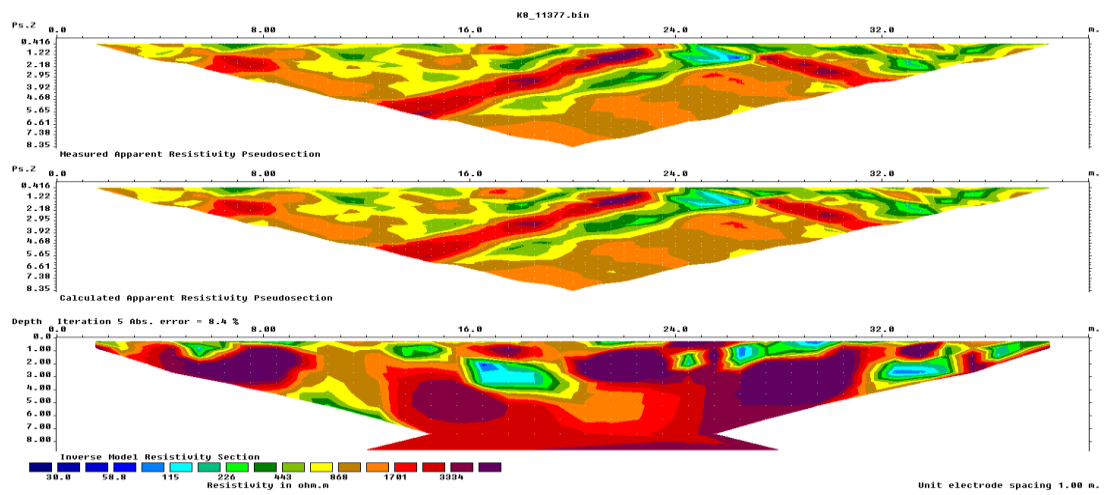
## Γραμμή K1\_7p5m Robust



## Γραμμή K1\_8m L-S

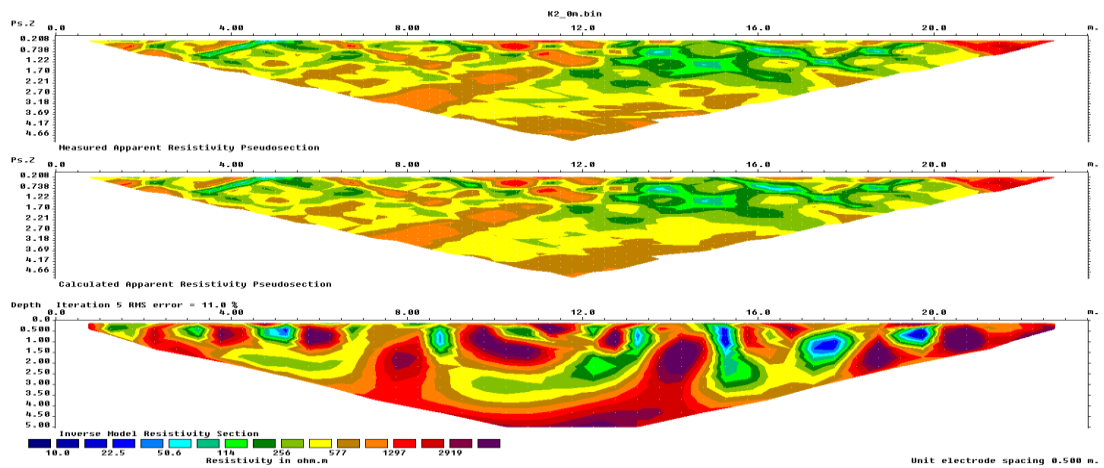


## Γραμμή K1\_8m Robust

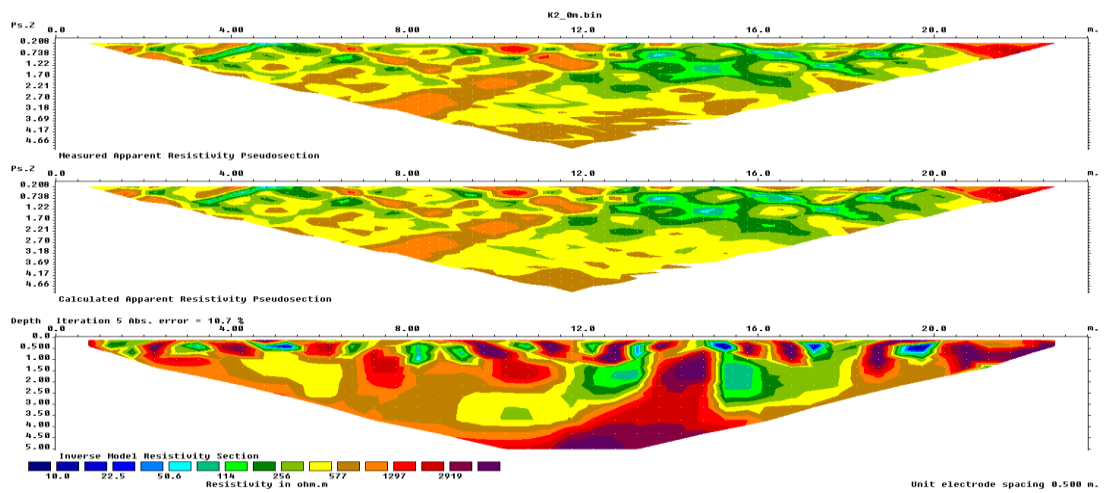


## Γραμμή K2\_0m L-S

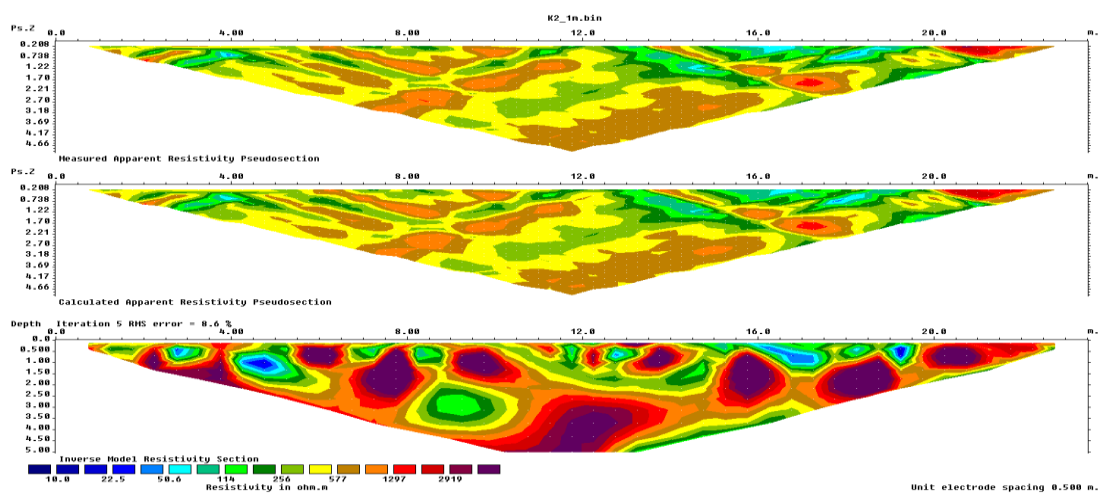




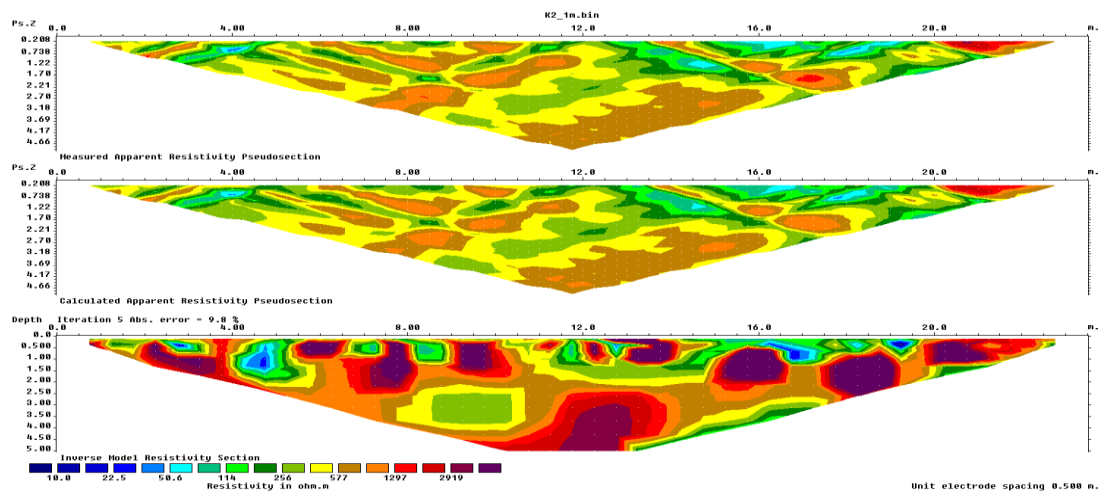
Γραμμή K2\_0m Robust



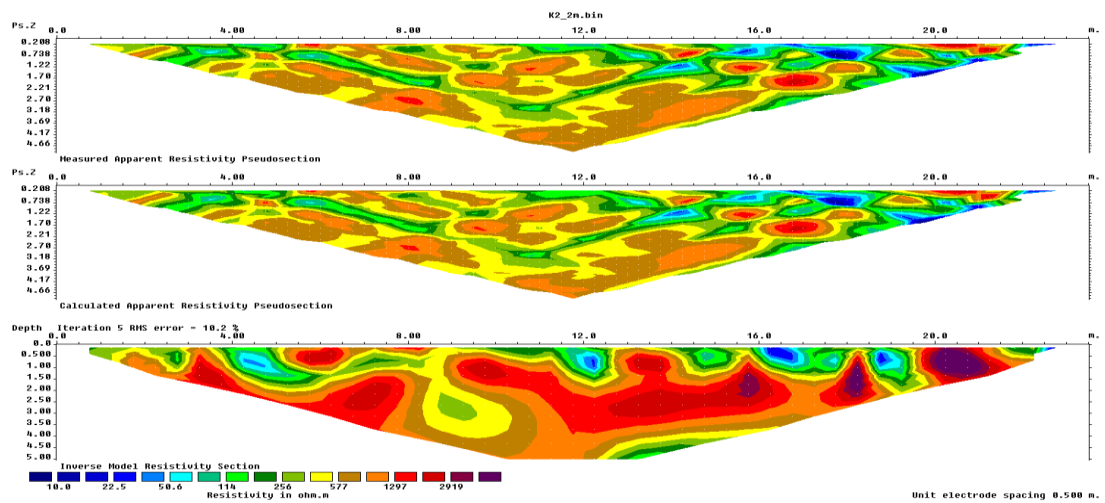
Γραμμή K2\_1m L-S



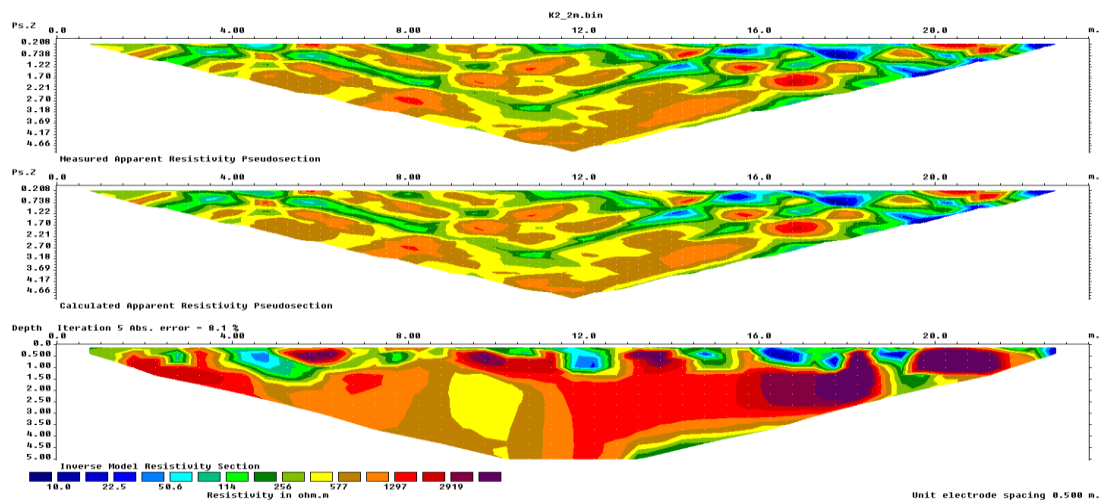
## Γραμμή K2\_1m Robust



## Γραμμή K2\_2m L-S

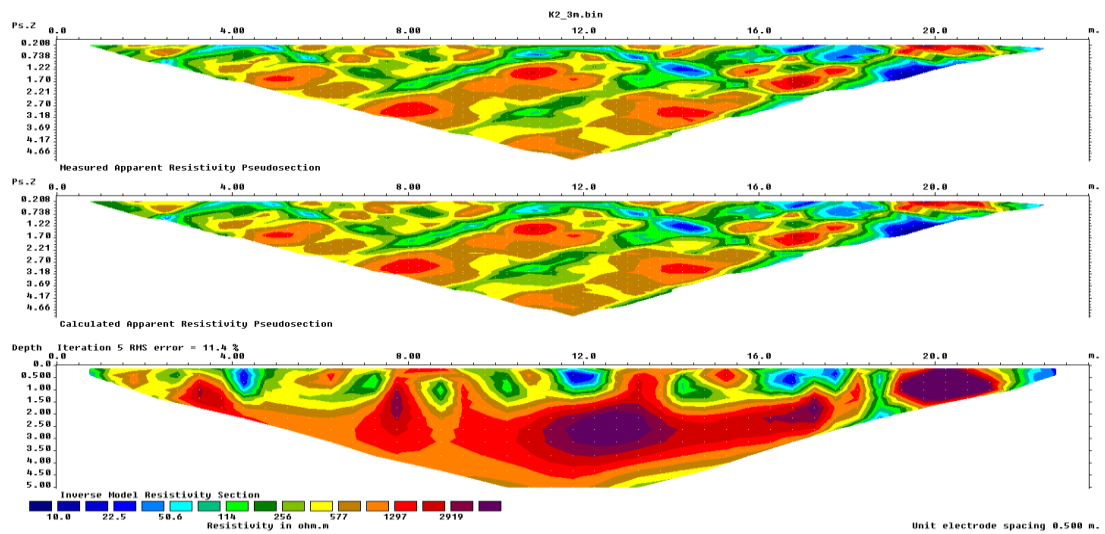


## Γραμμή K2\_2m Robust

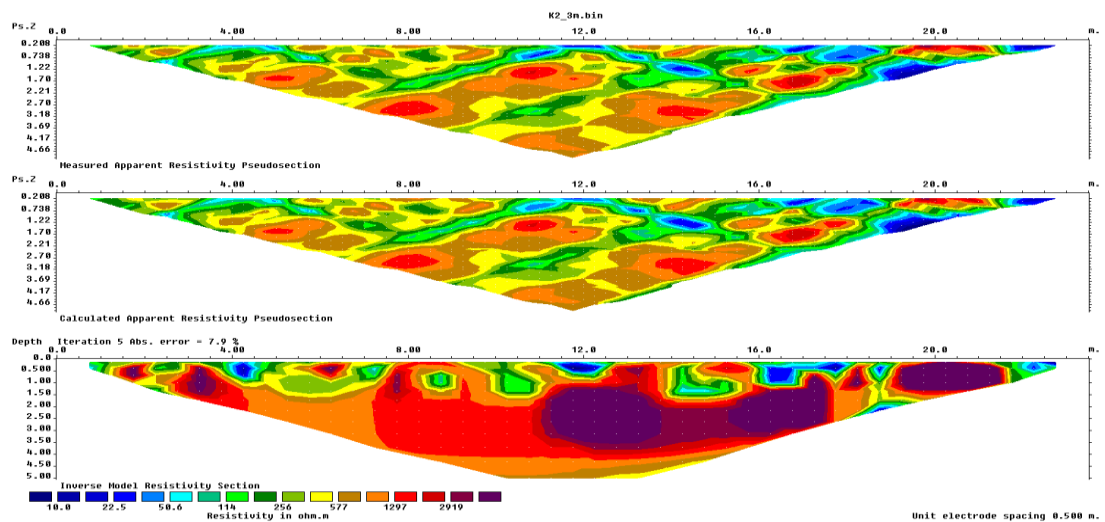




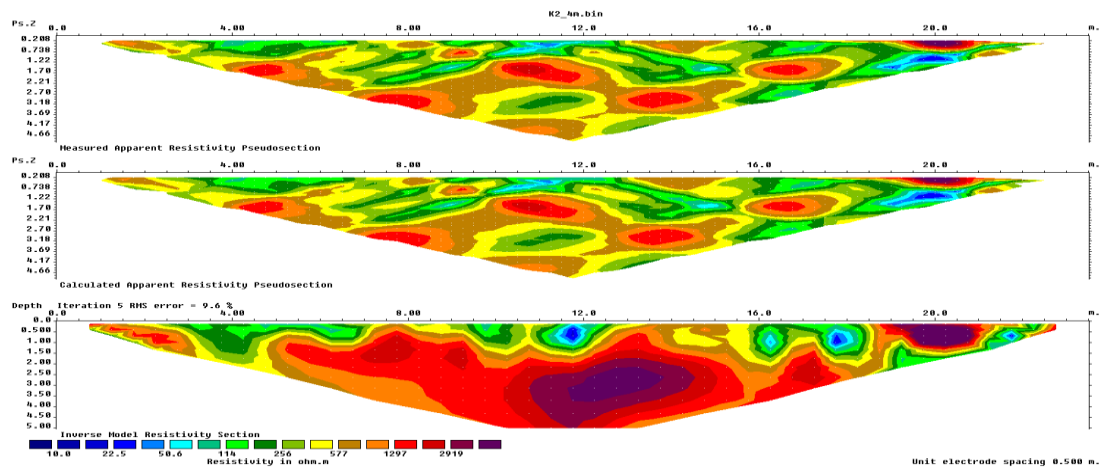
## Γραμμή K2\_3m L-S



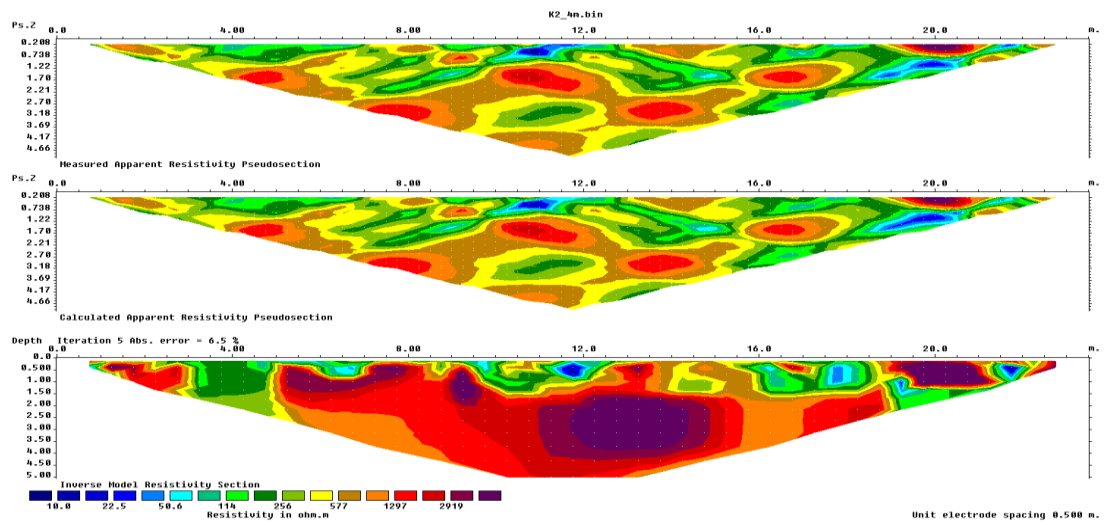
## Γραμμή K2\_3m Robust



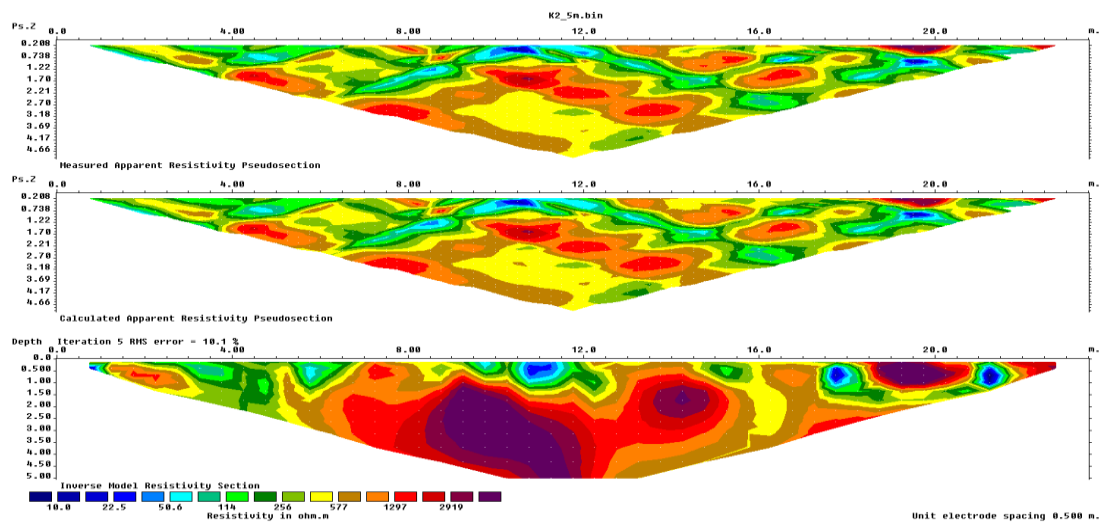
## Γραμμή K2\_4m L-S



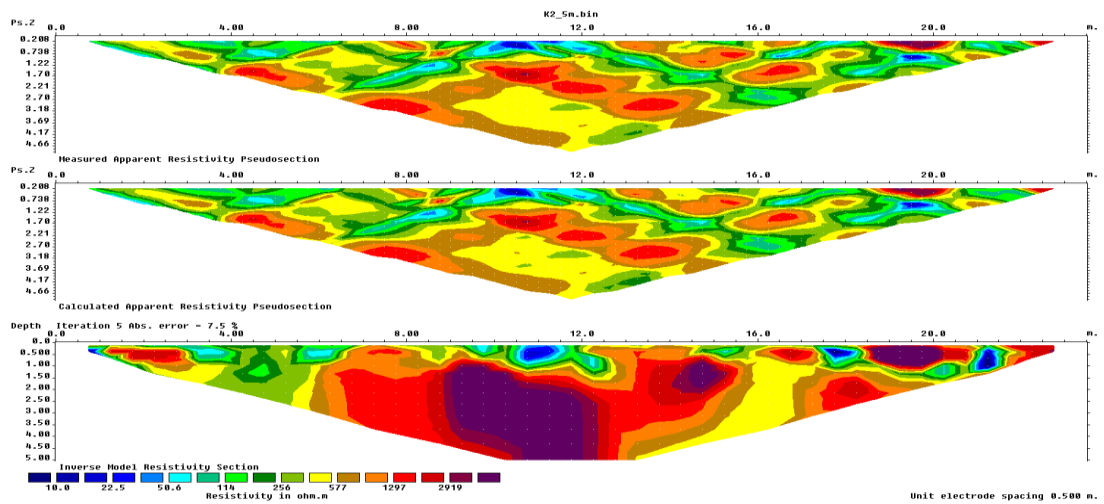
### Γραμμή K2\_4m Robust



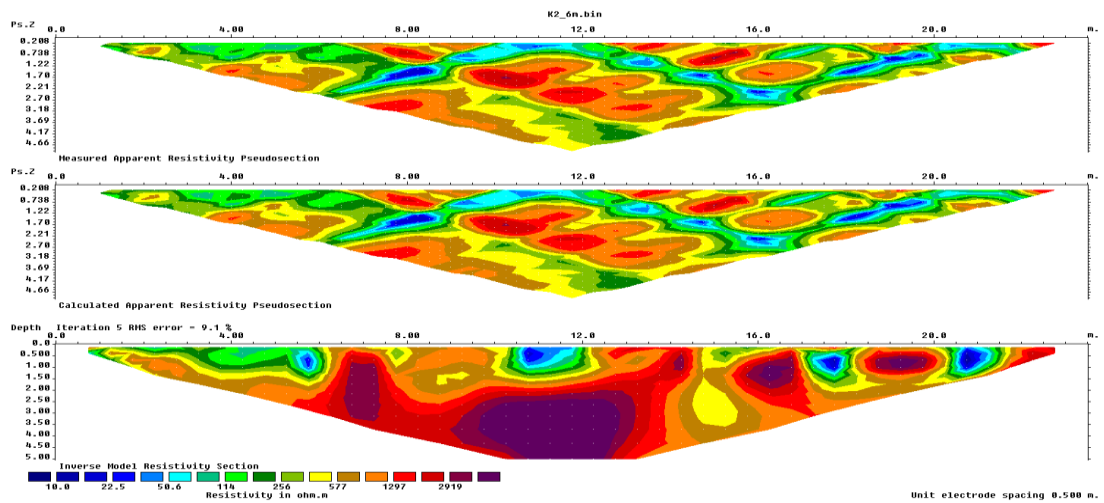
### Γραμμή K2\_5m L-S



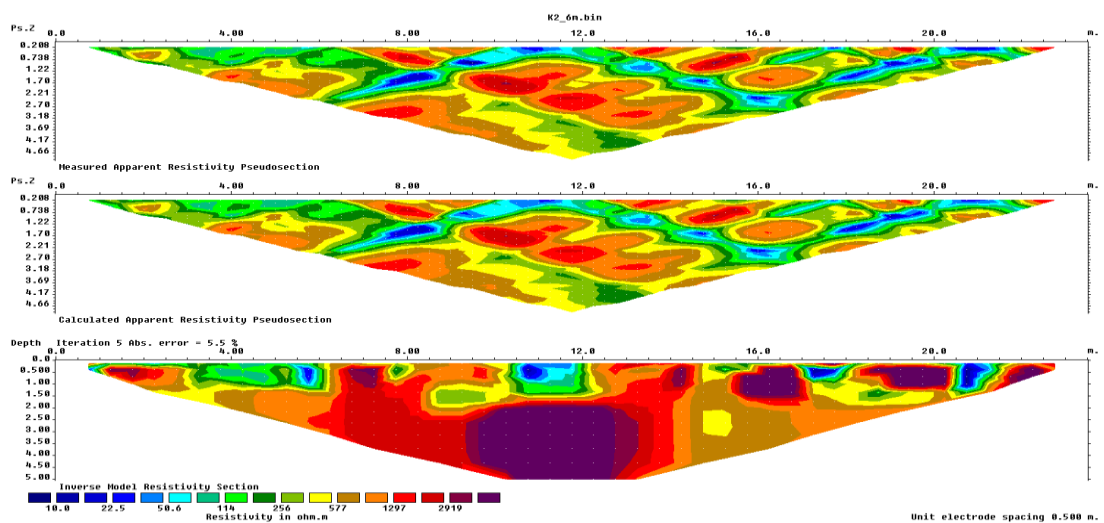
### Γραμμή K2\_5m Robust



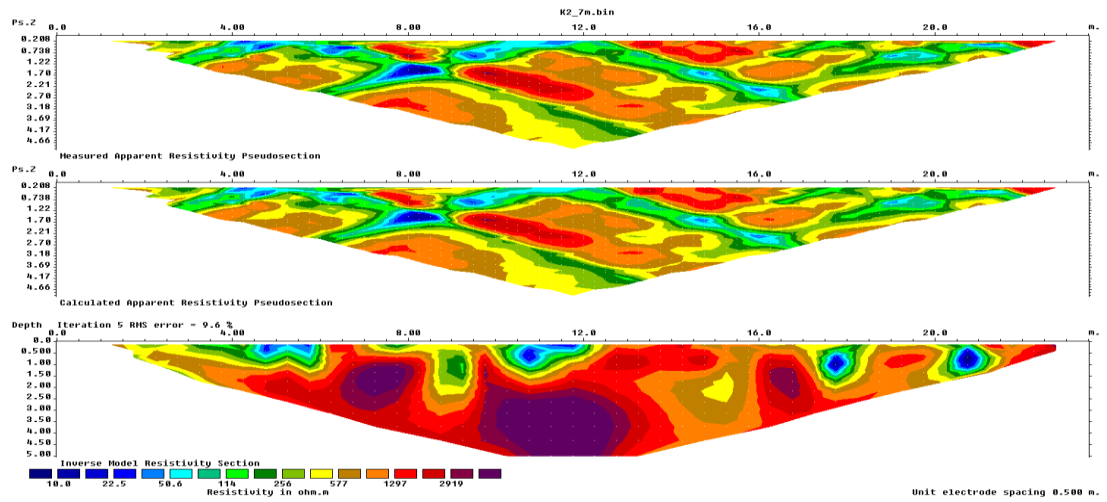
Γραμμή K2\_6m L-S



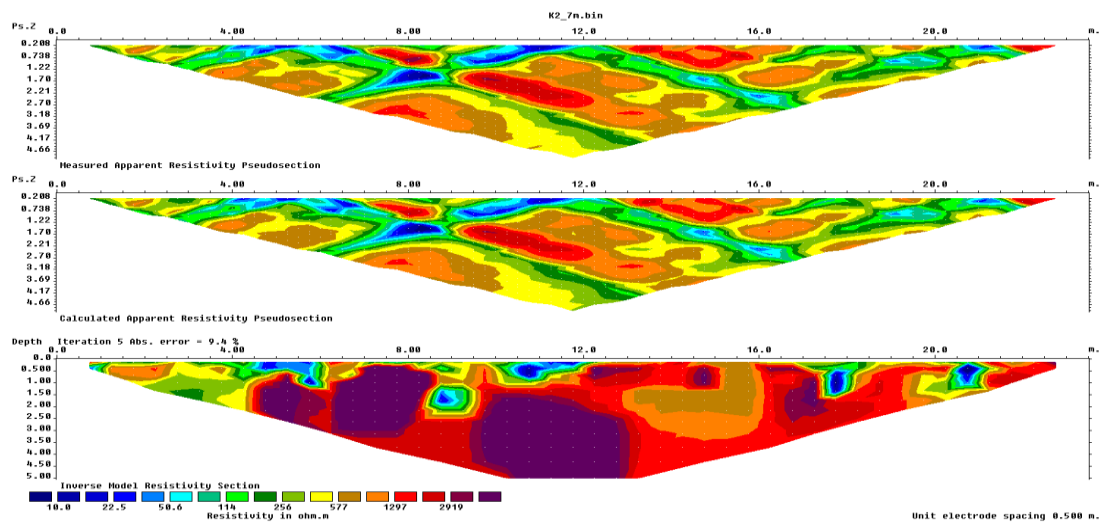
Γραμμή K2\_6m Robust



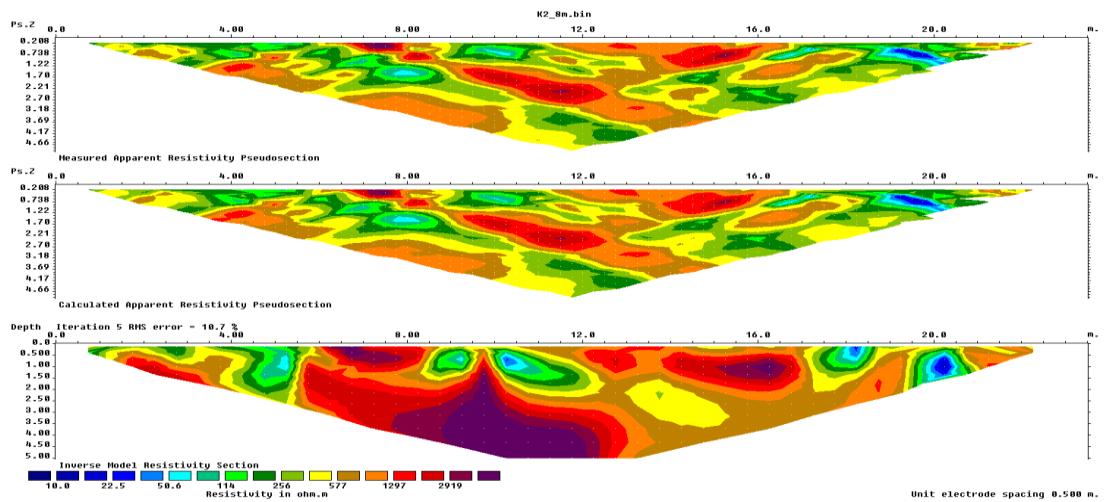
## Γραμμή K2\_7m L-S



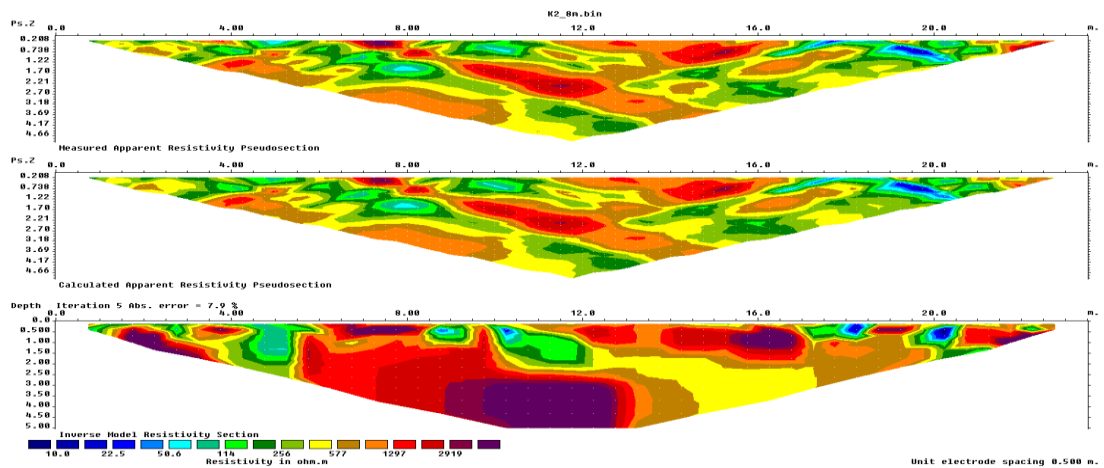
## Γραμμή K2\_7m Robust



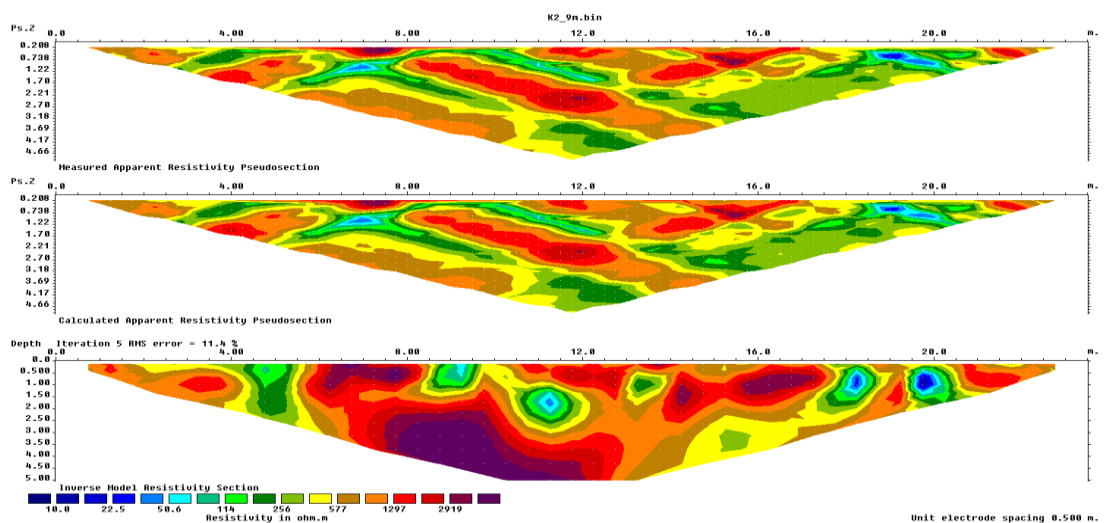
## Γραμμή K2\_8m L-S



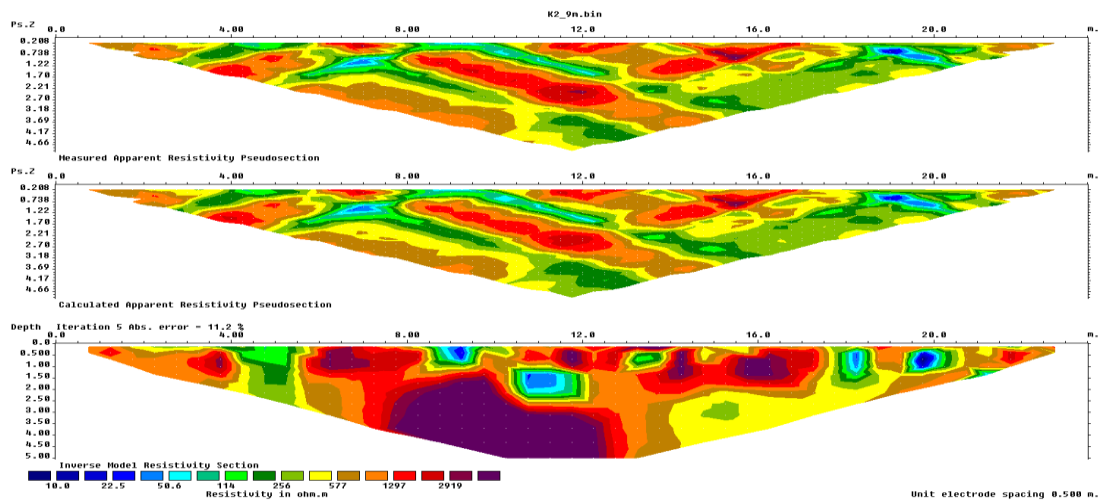
Γραμμή K2\_8m Robust



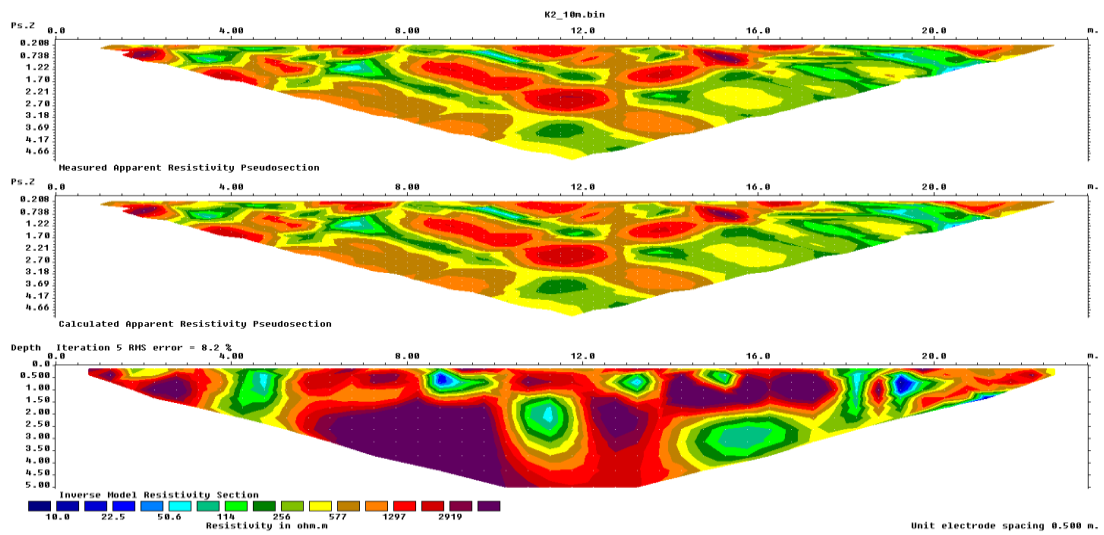
Γραμμή K2\_9m L-S



Γραμμή K2\_9m Robust



Γραμμή K2\_10m L-S



Γραμμή K2\_10m Robust

