



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

«Συμβολή των ηλεκτρικών μεθόδων στον προσδιορισμό της μηχανικής σύστασης
των εδαφών στην περιοχή Κολυμπάρι-Βουκολιές Χανίων»

“A contribution of geophysical methods that determine the mechanical
composition of soils in the region of Kolympari - Voukolies Chanion”

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Κάτρης

Φεβρουάριος 2025, Χανιά

Ευχαριστίες

Θα ήθελα με την ευκαιρία αυτήν, να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου για την πολύτιμη οικονομική τους ενίσχυση & για την σπουδαστική καθοδήγηση κατά την φοίτηση μου στο πολυτεχνείο Κρήτης, καθώς επίσης και τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας τον κ. Αντώνη Βαφείδη, για την εξαιρετική συνεργασία & τις πολύτιμες γνώσεις τις οποίες μου μεταλαμπάδεψε έως το πέρας της ολοκλήρωσης της εργασίας.

Φυσικά δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους βοηθούς του κ. καθηγητή, τον κ. Ανδρονικίδη Νικόλαο, τον κ. Κρητικάκη Γεώργιο καθώς και τον κ. Οικονόμου Νικόλαο που τόσο πρόθυμα με βοήθησαν και καθοδήγησαν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής τον κ. Χρηστίδη Γεώργιο και την κα. Κόκκινου Ελένη για την συμμετοχή τους.

Περίληψη

Η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης σε συνδυασμό με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, αποτελούν δύο ξεχωριστές μεθόδους που είναι εξαιρετικά χρήσιμες σε εφαρμογές, όπως η ανίχνευση αργιλικών σχηματισμών, η μελέτη γεωθερμικών πεδίων, ο προσδιορισμός του υδροφόρου ορίζοντα ή της υγρασίας του εδάφους ή και ακόμα σε αρχαιολογικές μελέτες. Ο σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της χρησιμότητας των ηλεκτρικών μεθόδων στον προσδιορισμό της περιεκτικότητας αργιλικών ορυκτών σε εδάφη στην δυτική Κρήτη. Στα πλαίσια της διπλωματικής, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 13 γεωηλεκτρικές μετρήσεις, από τις οποίες οι 6 χρησιμοποιήθηκαν για να επιλεγούν θέσεις δειγματοληψίας των εδαφικών σχηματισμών. Οι περιοχές ενδιαφέροντος της εργασίας βρίσκονται στο Κολυμπάρι Χανίων στις Βουκολιές Χανίων & Αγία Χανίων. Κάθε θέση μέτρησης εντοπίστηκε δορυφορικά, μέσω της χρήσης GPS, καθώς και κάθε σημείο δειγματοληψίας το οποίο αποθηκεύτηκε σε δυο γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς, το "ΕΓΣΑ 87" & "WGS". Αμέσως μετά την συλλογή των μετρήσεων στο πεδίο ακολούθησε η επεξεργασία των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας, κάνοντας χρήση του λογισμικού «Res2Dinv», χάρις στο οποίο επιτεύχθηκε η μείωση του σφάλματος αποτυπώνοντας τα ακριβή σημεία ενδιαφέροντος της κάθε τομής. Ενώ κατόπιν της λήψης των αποτελεσμάτων της φασματοσκοπικής ανάλυσης των εδαφικών δειγματοληψιών, διαπιστώθηκε η συσχέτιση μεταξύ των εργαστηριακών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Abstract

The method of induced polarization, in combination with the electrical resistivity method, are two extremely useful techniques in various applications. These include the detection of rich clay formations, the study of geothermal fields, hydrogeological studies related to the determination of the water-bearing horizon or soil moisture or even upon some extent to archaeological studies. The aim of this study is the identification and characterization of clay formations within the examined areas in western Crete. A total of 13 electrical resistivity measurements were carried out, of which 6 were used to study the soil formations' samples. The areas of interest in the study are the extensive areas of Kolympari Chanion, Voukolies Chanion & Agia Chanion. Each measurement point was identified through satellite means using GPS, and each sampling point was stored in two geodetic reference systems, "EGSA 87" and "WGS." Right after the field measurements, the electrical resistivity data was processed using the "Res2Dinv" software. This software allowed for the reduction of the root mean square error, effectively capturing the precise points of interest in each cross-section of the site. While after obtaining the results of the spectroscopic analysis of the soil samples, the correlation between the experimental and field results of the work was established.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Ορισμός & εφαρμογές.....	15
1.3 Χωρο-χρονομέτρηση.....	15
1.4 Χωρο-συχνότητες.....	16
1.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	16
1.6 Κανονικοποιημένη Φορτιστικότητα (Normalized chargeability)	17
1.7 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	17
1.8 Πόλωση των κόκκων (Grain polarization).....	18
1.8.1 Πόλωση Μembrάνης.....	19
1.8.2 Επιρρεπή στοιχεία της πόλωσης μεμβράνης	19
1.9 Κατηγορίες καταγραφής θορύβου σε γεωφυσικές έρευνες.....	20
1.9.2 Μηχανισμοί ανίχνευσης αργιλικών ορυκτών.....	20
1.9.3 Μηχανισμοί ανίχνευσης μεταλλικών ορυκτών	21
1.9.4 Ορισμένα παραδείγματα εύρεσης μεταλλοφόρων πηγών	22
1.9.5 Ψευδοτομές (Pseudosections).....	24

Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγή.....	27
2.2 Ηλεκτρική τομογραφία– Electrical resistivity tomography (ERT)	28
2.4 Διάταξη «Gradient»	29
2.5 Διάταξη Διπόλου-Διπόλου	29
2.6 Λογισμικό «Res2dinv»	32
2.7 Αντιστροφή των δεδομένων.....	34

Κεφάλαιο 3

3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Μελετούμενη Περιοχή.....	37
3.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	38
3.4 Συσκευή Περιθλασιμετρίας	41
3.5 Επεξεργασία των δεδομένων	42

Κεφάλαιο 4

4.1 Εισαγωγή.....	44
4.2 Περιοχή Βουκολιών	44
4.2.3 Σημείο 33 (Βουκολίες)	45
4.2.4 Σημείο 34 (Βουκολίες)	50
4.2.5 Σημείο 35 (Βουκολίες)	54
4.2.6 Σημείο 36 (Βουκολίες)	56
4.2.7 Σημείο 47 (Βουκολίες)	61
4.2.8 Σημείο 48 (Βουκολίες)	63
4.3 Περιοχή Κολυμπαρίου	66
4.3.1 Σημείο 52 (Κολυμπάρι)	67
4.3.2 Σημείο 55 (Κολυμπάρι)	69
4.3.3 Σημείο 57 (Κολυμπάρι)	70
4.3.4 Σημείο 65 (Κολυμπάρι)	72
4.3.5 Σημείο 67 (Κολυμπάρι)	77
4.4 Περιοχή Αγιάς Χανίων	81
4.4.1 Σημείο 1 (Αγιά Χανίων)	82
4.4.2 Σημείο 6 (Αγιά Χανίων)	84
4.5 Διαγράμματα Αργιλότητας (%) – Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας & Ειδ. Ηλεκτρικής αντίστασης.....	88

Κεφάλαιο 5

5.0 Συμπεράσματα.....	94
-----------------------	----

Εικόνες

Εικόνα 1.1, Αναπαράσταση της διαδικασίας ανταλλαγής ηλεκτρονίων-ιόντων, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	18
Εικόνα 1.2, Απεικόνιση της πόλωσης μεμβράνης, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	19
Εικόνα 1.3, Κίνηση των ιόντων μεταξύ των πόρων & των μεμβρανών, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	20
Εικόνα 1.4 Διάγραμμα φορτιστικότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	22

Εικόνα 1.5, Απεικόνιση της απόκρισης κεκλιμένου αγώγιμου σώματος για δύο διατάξεις ηλεκτροδίων, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014).....	23
Εικόνα 1.6, Απεικόνιση των τομογραφιών υπό την διάταξη διπόλου-διπόλου (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	24
Εικόνα 1.7, Απεικόνιση των τομών “σύγκλισης” των δύο ηλεκτροδίων,, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	25
Εικόνα 1.8, Απεικόνιση ψευδοτομής παράλληλα με το (n), (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	26
Εικόνα 1.9, Αναλυτική απεικόνιση της ψευδοτομής με το αναστραμμένο «V», (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	26
Εικόνα 2.1, Γεωηλεκτρική τομή φορτιστικότητας σε mV/V, (Πηγή: Katris I. 2025)	27
Εικόνα 2.2, Απεικόνιση της διάταξης gradient στο πεδίο, (Dahlin and Zhou 2006).....	29
Εικόνα 2.3, Απεικόνιση της σχέσης ρ_a	30
Εικόνα 2.4, Διάταξη διπόλου-διπόλου, (Πηγή: Advanced Geosciences 2018)	30
Εικόνα 2.5, Απεικόνιση διατάξεων σε συνδυασμό με την αντίστοιχη ανωμαλία που παρατηρείται από μια ιδεατή δομή, (Βαφείδης “Γεωφυσική II”, 2001).....	31
Εικόνα 2.6.1, Απεικόνιση μιας πρωτότυπης γεωηλεκτρικής τομής διατάξεως «διπόλου-διπόλου».....	32
Εικόνα 2.6.2, Απεικόνιση μιας γεωηλεκτρικής τομής υπό το μέγεθος της επαγόμενης πόλωσης	33
Εικόνα 2.7.1, Εξίσωση Poisson όπου $V(r)$:ηλεκτρικό δυναμικό, $\sigma(r)$:ισοτροπική ηλεκτρική κατανομή αγωγιμότητας & r :απόσταση από κάθε ηλεκτρόδιο	34
Εικόνα 2.7.2, Σχηματικό διάγραμμα προβλήματος ευθέως-αντιστροφής, (Πηγή: Binley και Kemna, 2005)	34
Εικόνα 3.1, Η δορυφορική εικόνα της μελετούμενης περιοχής από το Google earth	37
Εικόνα 3.2, Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής & το υπόμνημα της κ. Αικ. Παυλάκη	38
Εικόνα 3.3, Παράδειγμα μιας τυπικής απεικόνισης της χάραξης της τομής σε συνδυασμό με τον εργαστηριακό εξοπλισμό	39
Εικόνα 3.4, Περιθλασίμετρο “Bruker D8 Advance”	41
Εικόνα 3.5.1, Αποτύπωση των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας σε φύλλο excel.....	42
Εικόνα 3.5.2, Απεικόνιση της χειροκίνητης επιλογής εισχώρησης τιμών “logarithmic contour intervals”	43
Εικόνα 4.1.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 33	45
Εικόνα 4.1.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 33, με τις τιμές φορτιστικότητας	46
Εικόνα 4.1.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 33, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	46
Εικόνα 4.1.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm	47
Εικόνα 4.1.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm	48
Εικόνα 4.1.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm	49

Εικόνα 4.2.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 34	50
Εικόνα 4.2.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 34, με τις τιμές φορτιστικότητας	50
Εικόνα 4.2.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 34, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	51
Εικόνα 4.2.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm	52
Εικόνα 4.2.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm	53
Εικόνα 4.2.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm	53
Εικόνα 4.3.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 35	54
Εικόνα 4.3.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 35, αναπαριστώντας τις τιμές τις φορτιστικότητας	55
Εικόνα 4.3.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 35, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	55
Εικόνα 4.4.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 36	56
Εικόνα 4.4.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 36, με τις τιμές φορτιστικότητας	57
Εικόνα 4.4.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 36, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	57
Εικόνα 4.4.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm	58
Εικόνα 4.4.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm	59
Εικόνα 4.4.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm	60
Εικόνα 4.5.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 47	61
Εικόνα 4.5.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 47, με τις τιμές φορτιστικότητας	62
Εικόνα 4.5.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 47, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	62
Εικόνα 4.6.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 48	63
Εικόνα 4.6.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 48, με τις τιμές φορτιστικότητας	64
Εικόνα 4.6.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 48, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	64
Εικόνα 4.7.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 52	67
Εικόνα 4.7.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 52, με τις τιμές φορτιστικότητας	67
Εικόνα 4.7.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 52, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	68

Εικόνα 4.8.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 55	69
Εικόνα 4.8.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 55, με τις τιμές φορτιστικότητας	69
Εικόνα 4.8.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 55, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	70
Εικόνα 4.9.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 57	71
Εικόνα 4.9.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 57, με τις τιμές φορτιστικότητας	71
Εικόνα 4.9.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 57, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	72
Εικόνα 4.10.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 65	73
Εικόνα 4.10.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 65, με τις τιμές φορτιστικότητας	73
Εικόνα 4.10.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 65, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	74
Εικόνα 4.10.4, Απεικόνιση διαγράμματος έντασης – γωνία κλίσης για το βάθος των 10cm	75
Εικόνα 4.10.5, Απεικόνιση διαγράμματος έντασης – γωνία κλίσης για το βάθος των 20cm	76
Εικόνα 4.11.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 67	77
Εικόνα 4.11.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 67, αναπαριστώντας τις τιμές τις φορτιστικότητας	77
Εικόνα 4.11.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 67, αναπαριστώντας τις τιμές τις κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	78
Εικόνα 4.11.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm	79
Εικόνα 4.11.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm	79
Εικόνα 4.11.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm	80
Εικόνα 4.12.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 1	82
Εικόνα 4.12.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 1, με τις τιμές φορτιστικότητας	82
Εικόνα 4.12.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 1, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	83
Εικόνα 4.13.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 6	84
Εικόνα 4.13.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 6, με τις τιμές φορτιστικότητας	84
Εικόνα 4.13.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 6, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας	85
Εικόνα 4.13.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm	86

Εικόνα 4.13.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm	87
Εικόνα 4.13.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm	88
Εικόνα 4.14.1, Διάγραμμα Κανονικοποιημένης φορτιστικότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά.....	89
Εικόνα 4.14.2, Διάγραμμα κανονικοποιημένης φορτιστικότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά, κατά ήμιλογαριθμική κλίμακα	90
Εικόνα 4.14.3, Διάγραμμα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά.....	90
Εικόνα 4.14.4, Διαγράμματος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά, κατά λογαριθμική κλίμακα	91
Εικόνα 4.14.5, Διάγραμμα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση, κατά λογαριθμική κλίμακα	91
Εικόνα 4.14.6, Διάγραμμα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση	92
Εικόνα 4.14.7, Διάγραμμα Καν. Φορτιστικότητας - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση σε ημι-λογαριθμική κλίμακα.....	92
Εικόνα 4.14.8, Διάγραμμα Καν. Φορτιστικότητας - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση σε λογαριθμική κλίμακα	93

Πίνακες

Πίνακας 1.1, Απεικόνιση των επιπέδων αλατότητας σε σχέση με ($\mu S/cm$), (Ahmad Cahyadi Hendy Fatchurohman, Indra Agus Riyanto	18
Πίνακας 1.2, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)	21
Πίνακας 2.1 Εφαρμογές Ηλεκτρικής Τομογραφίας	28
Πίνακας 3.1 Συντεταγμένες των σημείων 33, 34, 36 & 47	45
Πίνακας 3.2.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	47
Πίνακας 3.2.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm	48
Πίνακας 3.2.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm	48
Πίνακας 3.2.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm	49
Πίνακας 3.3.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	51
Πίνακας 3.3.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm	52
Πίνακας 3.3.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm	53
Πίνακας 3.3.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm	54

Πίνακας 3.4 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	56
Πίνακας 3.5.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	58
Πίνακας 3.5.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm	59
Πίνακας 3.5.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από το βάθος των 20cm	60
Πίνακας 3.5.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm	61
Πίνακας 3.6 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	63
Πίνακας 3.7 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	65
Πίνακας 4.1 Συντεταγμένες σημείων 65 & 67	66
Πίνακας 4.2 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	68
Πίνακας 4.3 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	70
Πίνακας 4.4 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	72
Πίνακας 4.5.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	74
Πίνακας 4.5.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm	75
Πίνακας 4.5.3 Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm	76
Πίνακας 4.6.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	78
Πίνακας 4.6.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10 cm	79
Πίνακας 4.6.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm	80
Πίνακας 4.6.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm	80
Πίνακας 4.7 Συντεταγμένες σημείου 6	81
Πίνακας 4.8 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	83
Πίνακας 4.9.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη	85
Πίνακας 4.9.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm	86
Πίνακας 4.9.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm	87
Πίνακας 4.9.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm	88

Κεφάλαιο Ι (Θεωρητικές Γνώσεις)

1.1 Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας δίνεται ιδιαίτερη έμφαση ως προς την επεξήγηση των φυσικών φαινομένων όπως της επαγόμενης πόλωσης αναλύοντας επακριβώς τον ορισμό της, τις εφαρμογές της, τα πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της σε σύγκριση με άλλες γεωφυσικές μεθόδους και φυσικά τους μηχανισμούς λειτουργίας της και τις τεχνικές συλλογής δεδομένων, οι οποίες είναι η μέθοδος στο πεδίο του χρόνου και η μέθοδος των χωρο-συχνотήτων. Άλλωστε δεν αποτελεί μυστικό πως η επαγόμενη πόλωση είναι ένα σημαντικό φαινόμενο στη γεωφυσική, και η συνεισφορά της στις γεωφυσικές διασκοπήσεις είναι αξιοσημείωτη.

Στον τομέα της γεωφυσικής, η επαγόμενη πόλωση χρησιμοποιείται για να διερευνηθούν τα γεωλογικά στρώματα και τα υποκείμενα πετρώματα. Ένα αποτελεσματικό μέσο για την απεικόνιση του υπεδάφους είναι η γεωηλεκτρική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί την επαγόμενη πόλωση για την μελέτη των υποκείμενων γεωλογικών δομών. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του εδάφους, παρατηρήσουμε το φαινόμενο της πόλωσης, το οποίο δίνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση και τη δομή του υπεδάφους. Επιπλέον, όπως αποτυπώνεται και στις παρακάτω ενότητες του κεφαλαίου, η επαγόμενη πόλωση πέρα από την εφαρμογή της σε μεταλλευτικές έρευνες έχει αντίστοιχα και τις εφαρμογές της στην μελέτη του υπεδάφους για την κατασκευή υποδομών και τον εντοπισμό υπογείων υδάτων. Η επαγόμενη πόλωση αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη γεωφυσική έρευνα και συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση του γεωλογικού περιβάλλοντος.

Επιπλέον, σε συνδυασμό βεβαίως με τα παραπάνω αντικείμενα θα αναλυθούν τα μεγέθη της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας & της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα οποία και τα δυο παίζουν σημαντικό ρόλο στις γεωφυσικές διασκοπήσεις.

Η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα όπως θα επεξηγηθεί και παρακάτω, αποτελεί τον λόγο της φορτιστικότητας με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των μετρήσεων του υπεδάφους. Αυτή η σχέση μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την σύσταση αλλά και ορισμένα χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Ενώ οι αλλαγές στην κανονικοποιημένη φορτιστικότητα μπορεί να υποδείξουν την ύπαρξη συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών, όπως πορώδεις σχηματισμούς, πλούσιους σε αργιλικά ορυκτά. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αφορά στον υπολογισμό της ηλεκτρικής αντίστασης ανά μονάδα όγκου στο υπέδαφος και παρέχει κυρίως πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα και τον τύπο των γεωλογικών σχηματισμών. Επειδή η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με τη σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών στο υπέδαφος, αυτή χρησιμοποιείται από την σκοπιά των μηχανικών

για τον εντοπισμό της ρύπανσης των υπόγειων νερών η οποία θα υποδηλώνεται αντιστοίχως με μικρή ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Και οι δύο παράγοντες, η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, αποτελούν ισχυρά εργαλεία στη γεωφυσική έρευνα, καθιστώντας δυνατή την πιο αποτελεσματική διαχείριση των ορυκτών πόρων. Σε συνδυασμό με όλα τα παραπάνω αναλύονται επίσης η διαδικασία αναζήτησης κοιτασμάτων μεταλλικών & αργιλικών ορυκτών, καθώς και ορισμένα αξιοσημείωτα παραδείγματα στα οποία εμπλέκονται τα φυσικά μεγέθη της φορτιστικότητας (M) & της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των διπόλων.

Συνοψίζοντας την εισαγωγή, το θεματικό περιεχόμενο το οποίο εμπεριέχεται εντός του 1ου κεφαλαίου είναι επικεντρωμένο ως προς τις θεωρητικές γνώσεις χάρις τις οποίες θα πραγματοποιηθεί η διεξαγωγή του πειράματος, προσφέροντας στον/στην αναγνώστη μια πιο ολιστική αντίληψη για τις θεμελιώδεις αρχές που διέπουν την συγκεκριμένη γεωφυσική διασκόπηση.

Φαινόμενο επαγόμενης πόλωσης (Induced Polarization)

1.2 Ορισμός & εφαρμογές

Το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης διερευνάται συνήθως με διατάξεις διπόλου-διπόλου & “gradient”, με απώτερο στόχο την αναζήτηση υπογείων νερών ή θειούχου μεταλλοφορίας. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν διαβιβάζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος. Το ηλεκτρικό πεδίο φορτίζει σχηματισμούς με μεταλλικά ή αργιλικά ορυκτά με έναν τρόπο παρόμοιο, όπως αυτόν του “κοινού” πυκνωτή.

Οι αιτίες της επαγόμενης πόλωσης ποικίλλουν ανάλογα:

- Ύπαρξη μεταλλικών ορυκτών σε πορώδες μέσο.
- Συνύπαρξης διαγενετικών ορυκτών στα προς μελέτη πετρώματα, που ενδέχεται εν ακολουθία να συσχετίζεται και με συνύπαρξη υδρογονανθράκων ρυπαντών στο εσωτερικό τους.
- Διεπιφανειακές τάσεις μεταξύ πετρωμάτων που περιέχουν ηλεκτρολύτες.

Οι συνηθέστερες εφαρμογές της μεθόδου της επαγόμενης πόλωσης στο πεδίο της έρευνας είναι:

- Ο εντοπισμός κοιτασμάτων μεταλλοφόρων ορυκτών
- Η ανίχνευση υπογείων πηγών νερού
- Η εκμετάλλευση ορυχείων
- Περιβαλλοντικές έρευνες επί θαμμένων αποβλήτων στο υπέδαφος

Οι τρόποι εφαρμογής της μεθόδου διαχωρίζονται σε 2 κατηγορίες, στο πεδίο του χρόνου (time domain) και στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain).

1.3 Πεδίο του χρόνου

Στον πιο κοινό τρόπο μέτρησης, στο πεδίο του χρόνου, που προαναφέρθηκε άλλωστε και προηγουμένως, οι μετρήσεις συλλέγονται κατά τη παύση της φόρτισης του υπεδάφους μέσω των δύο ηλεκτροδίων, στην επιφάνεια της γης. Ως αποτέλεσμα, η τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια τείνει να μειώνεται, γεγονός που υποδηλώνει δράση του υπεδάφους ως “πυκνωτής”.

Το μέγεθος της φορτιστικότητας (**M**) δίνεται από την σχέση $M = \frac{A}{\Delta V_c} = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_2}^{t_1} V(t) * dt \text{ (ms)}$, όπου το **V(t)** αντιπροσωπεύει την τάση του ηλεκτρικού ρεύματος ανά την πάροδο του χρόνου παύσης της φόρτισης. Ενώ, η φαινόμενη ικανότητα πόλωσης **S_a** δίνεται από την σχέση $S_a = \frac{V(t)}{\Delta V_c}$

που σε συνδυασμό με το μέγεθος της φορτιστικότητας (**M**) συλλέγονται με την διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου (Κουβαράς, 2020).

1.4 Χωρο-συχνότητες

Η δεύτερη πιο κοινή μέθοδος μέτρησης είναι η μέθοδος των χώρο-συχνοτήτων της με την διάταξη των ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου και δύο μετρήσεις με εναλλασσόμενο ρεύμα (στην μια υποβάλλεται συχνότητα 10 Hz (AC), ενώ στην άλλη 1 Hz (DC)). Στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι ο υπολογισμός της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ_a), που δίνεται από την σχέση $\rho_a = k * \frac{\Delta V}{I} = \pi * n * (n + 1) * (n + 2) \frac{\Delta V}{I}$ και έπειτα του αποτελέσματος (frequency effect) $\frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC}}$ σε συνδυασμό με τον μεταλλικό παράγοντα (metal factor) $2\pi * 105 * \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC} * \rho_{DC}}$. Σε αντίθεση με το AC, το DC αποτελεί το συνεχές ρεύμα. Αυξημένος μεταλλικός παράγοντας σε συνδυασμό με μειωμένη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση υποδεικνύουν παρουσία μεταλλοφορίας ή γραφίτη.

1.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

- **Πλεονεκτήματα**

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της επαγόμενης πόλωσης αποδίδεται στο γεγονός ότι μέσω της εφαρμογής της καθίσταται εφικτός ο εντοπισμός (υπό κανονικές συνθήκες) έως και σε πολύ μικρών σε μεταλλοφορία κοιτασμάτων διάσπαρτων σουλφιδίων στο υπέδαφος, (περιεκτικότητα σε μεταλλικά ορυκτά < 0.5%,).

Αυτό την καθιστά εξαιρετικά χρήσιμη στην αξιοποίηση της από μεταλλευτικές εταιρίες, καθώς μειώνονται έτσι σημαντικά τα έξοδα του ερευνητικού προγράμματος.

- **Μειονεκτήματα**

Σε αντίθεση με τα παραπάνω στοιχεία, ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου της επαγόμενης πόλωσης, είναι το γεγονός ότι σε ένα σημαντικό εύρος του πεδίου της έρευνας ενδέχεται να συνυπάρχουν ασυνήθιστες λιθολογίες, που να περιέχουν NaCl, Na₂SO₄ ή CuSO₄. Οι συγκεκριμένες ενώσεις μπορούν να προκαλέσουν ανωμαλίες κατά την διεξαγωγή της λήψης των δεδομένων του μεγέθους της φορτιστικότητας του υπεδάφους, με αποτέλεσμα να δημιουργήσουν παρεμβολές στις μετρήσεις κατά την διάρκεια λήψης των δεδομένων. (Biosca, 2020).

Επίσης, ως επιπρόσθετο μειονέκτημα θα πρέπει να θεωρείται ο καιρικός παράγοντας διεξαγωγής των μετρήσεων της μεθόδου, καθώς οι μετρήσεις είναι θορυβώδεις, ιδίως κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων.

1.6 Κανονικοποιημένη Φορτιστικότητα (Normalized chargeability)

Η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα χρησιμοποιείται σε γεωφυσικές διασκοπήσεις με σκοπό να περιγραφεί η ικανότητα ενός πορώδους μέσου να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια, σε συχνότητες μικρότερες των 10Hz (Revil, 2021)

Σε αντίθεση με την φορτιστικότητα, που είναι η ιδανική παράμετρος στο να αναδεικνύει μεταλλικά ορυκτά, η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα θεωρείται η ιδανική παράμετρος στο να αναδεικνύει το περιεχόμενο της αργίλου του υπεδάφους. Σε αντίθεση με τα υψηλά επίπεδα φόρτισης των αργιλικών ορυκτών, τα αμμούχα με ή χωρίς χαλίκια εδάφη τείνουν να εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας (Mao, 2016).

Ως φυσικό μέγεθος, η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα ορίζεται ως ο λόγος της φορτιστικότητας προς την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους.

1.7 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) αποτελεί το ακριβώς αντίστροφο μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) και δίνεται από τον λόγο $\sigma = \frac{1}{\rho}$. Ως μέγεθος, περιγράφει το μέτρο της ευκολίας με την οποία άγεται ηλεκτρικό ρεύμα δια μέσω κάποιου υλικού ανεξάρτητα από την διάσταση του στον χώρο, ενώ η μονάδα μέτρησης του είναι τα siemens/ μέτρο ($S \cdot m^{-1}$).

Όσον αφορά τους παράγοντες επηρεασμού της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, αυτοί δεν είναι άλλοι από την αλατότητα, από τον τύπο των λιπασμάτων, τον τρόπο αρδεύσεως & την μηχανική σύσταση του εδάφους.

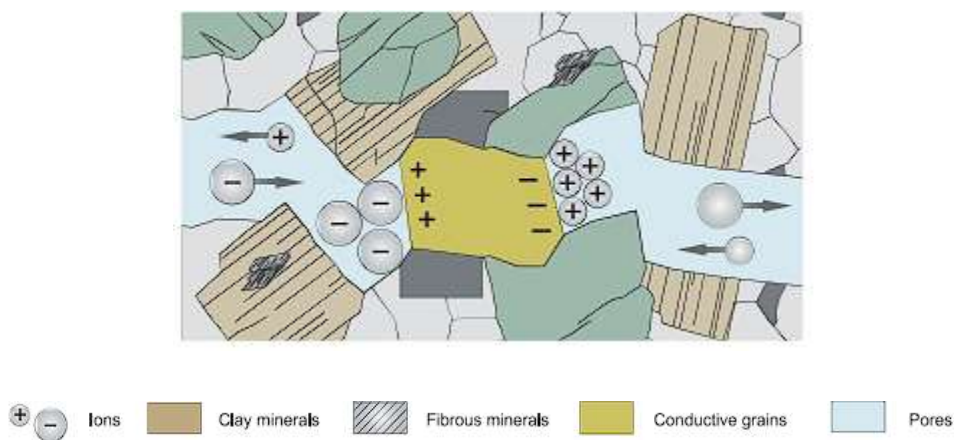
Πιο συγκεκριμένα η αλατότητα του εδάφους ποικίλει με το βάθος, καθώς στην επιφάνεια του εδάφους θεωρείται κατά μέσο όρο ίση με αυτή του νερού άρδευσης, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος είναι πολλαπλάσια του νερού άρδευσης. Στον (πίνακα 1.4.1) φαίνεται η διακύμανση της αλατότητας σε σχέση με την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Επίπεδο Αλατότητας	Ειδική Ηλεκτρική αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Καθαρό Νερό	<1,500
Ελαφρώς υφάλμυρο νερό	>1,500-<5,000
Υφάλμυρο Νερό	>5,000-<15,000
Αλατούχο Νερό	>15,000-<50,000

Πίνακας 1.1, Απεικόνιση των επιπέδων αλατότητας σε σχέση με ($\mu\text{S}/\text{cm}$), (Ahmad Cahyadi Hendy Fatchurohman, Indra Agus Riyanto)

1.8 Πόλωση των κόκκων (Grain polarization)

Η συνύπαρξη ιόντων και αγωγίμων κόκκων, (που αποτελούνται κατά πλειοψηφία από σουλφίδια) διευκολύνουν την αγωγή του ηλεκτρισμού στο υπέδαφος. Αυτό παρατηρείται στην πόλωση των κόκκων όπου αυτοί οι κόκκοι δρουν ως γέφυρα αναμετάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάμεσα στους πόρους του εδάφους.



Εικόνα 1.1, Αναπαράσταση της διαδικασίας ανταλλαγής ηλεκτρονίων-ιόντων, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

Η εναλλαγή των ηλεκτρονίων που συμβαίνει με την ανταλλαγή των ιόντων με ηλεκτρόνια από την μια πλευρά του τοιχώματος και ως συνέπεια εξαναγκάζει την ανταλλαγή ηλεκτρονίων με ιόντα στην απέναντι πλευρά του τοιχώματος των αγωγίμων κόκκων, είναι αυτό που καθιστά την τάση του ηλεκτρικού ρεύματος να κινείται. Η κίνηση φυσικά των ηλεκτρονίων γίνεται με την

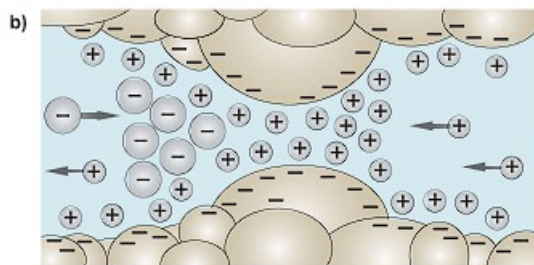
φυσική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, τα οποία ηλεκτρόνια μετακινούνται ελεύθερα ανάμεσα στους πόρους του σχηματισμού.

Εν τέλει, η πόλωση των αγωγίμων κόκκων είναι προϊόν ανταλλαγής ηλεκτρονίων, με ιόντα αντίθετης πόλωσης να τείνουν να συγκεντρώνονται πλησιέστερα στα όρια των κόκκων (Geophysics for the Mineral Exploration Scientist).

1.8.1 Πόλωση Μembrάνης

Στο ακόλουθο φαινόμενο κύριο ρόλο έχουν οι αρνητικές φορτίσεις που συσσωρεύονται κατά πλειοψηφία στους αργιλικούς κόκκους, που όταν τείνουν να καλύπτουν τους πόρους ως “τοιχώματα” τους, τα ανιόντα απωθούνται και τα κατιόντα που κινούνται εντός των ρευστών στους πόρους των πετρωμάτων, έλκονται από τους κόκκους. Ως αποτέλεσμα, σχηματίζεται μεμβράνη κατιόντων, όπως φαίνεται και στην παρακάτω (εικόνα 1.2).

Συμπληρωματικά σε αυτό, καθώς οι πόροι τείνουν να στενεύουν, τα θετικά ιόντα δημιουργούν αυτομάτως ένα φράγμα το οποίο παρεμποδίζει οποιαδήποτε κίνηση αρνητικού ιόντος εντός των πόρων.



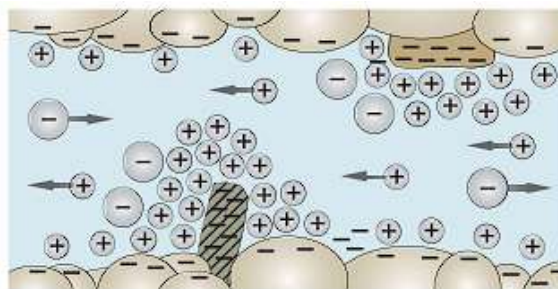
Εικόνα 1.2, Απεικόνιση της πόλωσης μεμβράνης, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

Ως αποτέλεσμα της εξής παρεμπόδισης, δημιουργείται ένα έλλειμα ανιόντων και περίσσεια κατιόντων στην μια πλευρά του τοιχώματος και στην ακριβώς απέναντι πλευρά δημιουργείται ταυτόχρονα μια τοπική συγκέντρωση ανιόντων με ταυτόχρονο έλλειμα κατιόντων, οδηγώντας σε **ηλεκτρική πόλωση** (Geophysics for the Mineral Exploration Scientist).

1.8.2 Ορυκτά που ευνοούν την πόλωσης μεμβράνης

Τα ορυκτά που ευνοούν την πόλωση μεμβράνης είναι φυλλώδη αργιλικά ορυκτά και ινώδη ορυκτά όπως ο χρυσοσίλης ή ο τρεμολίτης. Τόσο τα φυλλώδη όσο και τα ινώδη ορυκτά χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά ισχυρές φορτιστικότητες στις επιφάνειες τους που τους

επιτρέπουν να ελκύουν θετικά φορτισμένα ιόντα στις επιφάνειές τους, αναστέλλοντας βέβαια έτσι παράλληλα και την κίνηση των αρνητικών ιόντων.



Εικόνα 1.3, Κίνηση των ιόντων μεταξύ των πόρων & των μεμβρανών, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

1.9 Κατηγορίες καταγραφής θορύβου σε γεωφυσικές έρευνες

1.9.2 Μηχανισμοί ανίχνευσης αργιλικών ορυκτών

Υπάρχουν 3 κύριοι μηχανισμοί ανίχνευσης αργιλικών ορυκτών γνωστοί στην επαγόμενη πόλωση.

1. Ο πρώτος μηχανισμός περιλαμβάνει κορεσμένα σε νερό αργιλικά υλικά, τα οποία εκπέμπουν χαμηλές συχνότητες, (της τάξεως 1Hz-1MHz), διαθέτουν επαρκή αγωγιμότητα & επαρκές πορώδες, τα οποία είναι συνέπεια της πόλωσης της διεπιφάνειας του κρυσταλλικού νερού που καλύπτει την επιφάνεια των κόκκων, καθώς και του φαινόμενου της πόλωσης «Maxwell-Wagner».

Το συγκεκριμένο φαινόμενο «Maxwell-Wagner» αφορά την συσσώρευση φορτίσεων στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών, υπό την βασική θεώρηση πως το κάθε ένα από τα υλικά αποτελεί φορέα διαφορετικού χρόνου επίδρασης της φόρτισης. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες των χαμηλών συχνοτήτων μοντελοποιούνται, χάρις την γνώση των ήδη γνωστών ιδιοτήτων των ορυκτών του καολινίτη, του ιλλίτη και του σμεκτίτη. (Leroy και Revil, 2009)

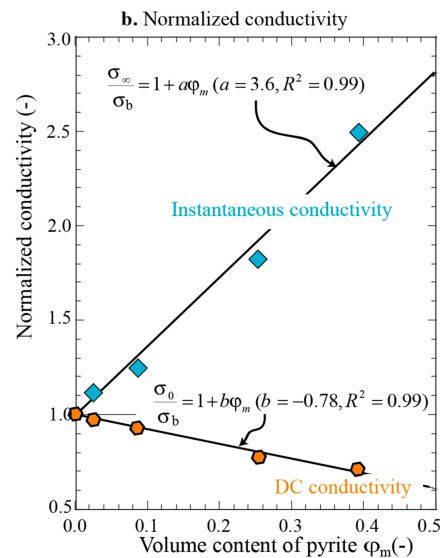
2. Στην συνέχεια υπάρχει το μοντέλο πόλωσης του στρώματος Stern (Stern layer), το οποίο ουσιαστικά αφορά το εσωτερικό τμήμα της ηλεκτρικής διπλής στιβάδας που καλύπτει την επιφάνεια των ορυκτών.
3. Το τρίτο μοντέλο ανίχνευσης αργιλικών ορυκτών είναι το μακροσκοπικό μοντέλο, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ηλεκτροχημική πόλωση των κόκκων, καθώς και της

εξάπλωσης του φαινομένου «Maxwell-Wagner». Το φαινόμενο Maxwell-Wagner δέχεται πως οι φορτίσεις συσσωρεύονται στην διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών, με αποτέλεσμα οι φορτίσεις να προκαθορίζονται από την αγωγιμότητα και την διαπερατότητα των συστατικών του υλικού.

1.9.3 Μηχανισμοί ανίχνευσης μεταλλικών ορυκτών

Η ανίχνευση των μεταλλικών στοιχείων ανάμεσα στο πεδίο μελέτης της περιοχής, εξαρτάται από έναν σημαντικό παράγοντα, την φορτιστικότητα των μεταλλικών στοιχείων. Στους προαναφερόμενους μηχανισμούς εφαρμογής της μεθόδου της επαγόμενης πόλωσης, “time-domain” & “frequency-domain”, εκ των οποίων απορρέουν ταυτόχρονα μέθοδοι ανίχνευσης μεταλλικών στοιχείων, θα πρέπει να προστεθεί και η εξίσωση «Maxwell–Clausius–Mossotti»

$$M = \frac{9 \cdot \varphi_M}{2 + 5\varphi_M + 2\varphi_M^2}$$
 (όπου φ_M : ογκομετρική σύσταση των μεταλλικών σωματιδίων), που υποδηλώνει πως η φορτιστικότητα εξαρτάται από την περιεκτικότητα των μεταλλικών ορυκτών στους πόρους ενός υλικού. Από αυτή την εξίσωση, προκύπτει επίσης πως η σχέση μεταξύ της φορτιστικότητας και της κατ’ όγκο περιεκτικότητας των μεταλλικών ορυκτών είναι γραμμική και ανεξάρτητη από την περίμετρο των κόκκων των μεταλλικών σωματιδίων. (Revil, 2022)



Πίνακας 1.2, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

Από το παραπάνω διάγραμμα, γίνεται αντιληπτή η γραμμική σχέση μεταξύ της αγωγιμότητας και της κατ’ όγκο περιεκτικότητας του σιδηροπυρίτη (FeS_2). Επιπλέον, είναι εμφανής η μείωση

της αγωγιμότητας κατά την αγωγή του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος DC σε όλο και περισσότερους κόκκους σιδηροπυρίτη.

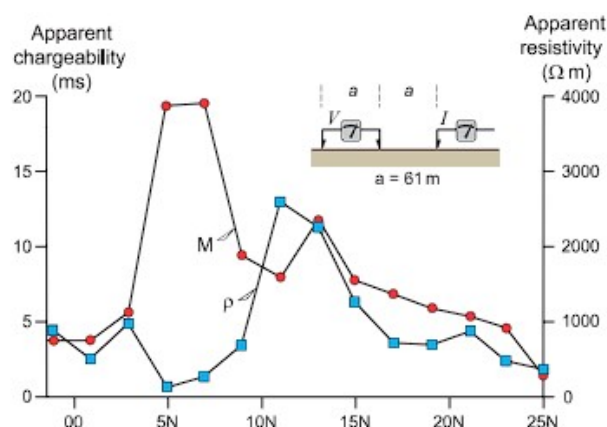
Επιπλέον, ο συντελεστής σ_b αντιπροσωπεύει την αγωγιμότητα του υπόλοιπου υπεδάφους, ο συντελεστής σ_o προσδιορίζει το όριο της χαμηλότερης συχνότητας του ρεύματος (DC) στο συνολικό φάσμα της αγωγιμότητας του συστήματος σε αντίθεση με τον συντελεστή σ_∞ που αντιπροσωπεύει το ανώτερο όριο συχνότητας.

1.9.4 Ορισμένα παραδείγματα μεταλλοφόρων κοιτασμάτων

- Ορυχείο αργύρου

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μεταλλοφορία απαντά κατά κύριο λόγο κοντά σε δολομιτικό ασβεστόλιθο. Τα κοιτάσματα είναι πλούσια σε σιδηροπυρίτη.

Οι αυξημένες ενδείξεις επαγόμενης πόλωσης (IP) ήταν αυτές οι οποίες οδήγησαν στην πραγματοποίηση διερευνητικών γεωτρήσεων για τα αποθέματα αργύρου (Ag) στην συγκεκριμένη περιοχή (Geophysics for the Mineral Exploration Scientist).

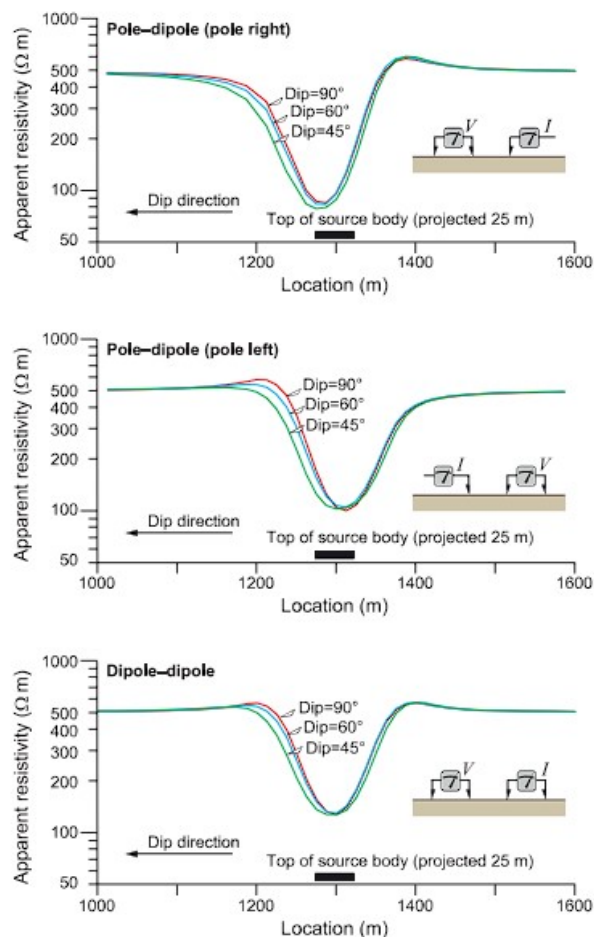


Εικόνα 1.4 Διάγραμμα φορτιστικότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Πηγή: *Dentith M. & Mudge S. 2014*)

Στο παραπάνω διάγραμμα, η μπλε καμπύλη αντικατοπτρίζει την φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ), ενώ η κόκκινη αντίστοιχα την φορτιστικότητα (M). Στις θέσεις μεταξύ 5N και 10N, παρατηρείται με 4αλύτερη φορτιστικότητα (M), χρησιμοποιώντας την διάταξη πόλου-διπόλου.

Όσον αφορά αγωγή κεκλιμένο σώμα, υπάρχει χαρακτηριστική διαφορά ανάμεσα στην απόκριση των διατάξεων **πόλου-διπόλου** και **διπόλου- διπόλου**, (Εικόνα 1.6). Οι αποκρίσεις, διαφοροποιούνται ως προς την ασυμμετρία της καμπύλης τους, με την διάταξη πόλου-διπόλου

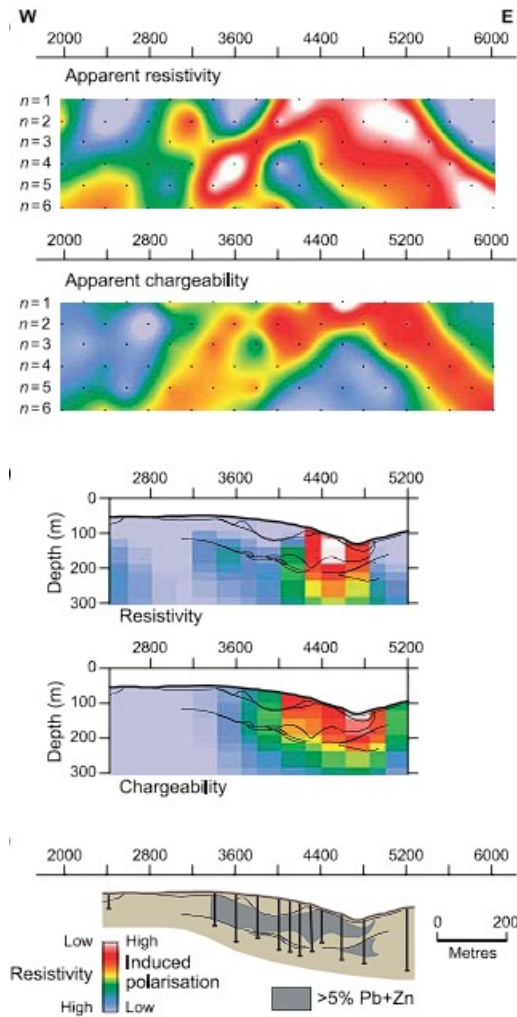
να παρουσιάζει ασυμμετρία στα άκρα καθώς και στο κέντρο της. Αυτή η ασυμμετρία έχει ως αποτέλεσμα να υπολογίζεται δυσκολότερα η κλίση του αγώγιμου σώματος στην διάταξη πόλου-διπόλου.



Εικόνα 1.5, Απεικόνιση της απόκρισης κεκλιμένου αγώγιμου σώματος για δύο διατάξεις ηλεκτροδίων, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

- Κοίτασμα «Red Dog», Αλάσκα

Το συγκεκριμένο παράδειγμα αφορά σχιστολιθικό κοίτασμα Pb, Zn και Al και την χρήση της επαγόμενης πόλωσης με την διάταξη των ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου. Τα κύρια ορυκτά είναι σφαλερίτης, σιδηροπυρίτης και γαληνίτης, με την κατανομή του Pb και του Zn να παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.8. Ενδείξεις εμφάνισης “ελαφρών” σουλφιδίων, καθώς και σιδηροπυρίτη παρουσιάζονται στην τελικές τομογραφίες της πόλωσης (Geophysics for the Mineral Exploration Scientist).

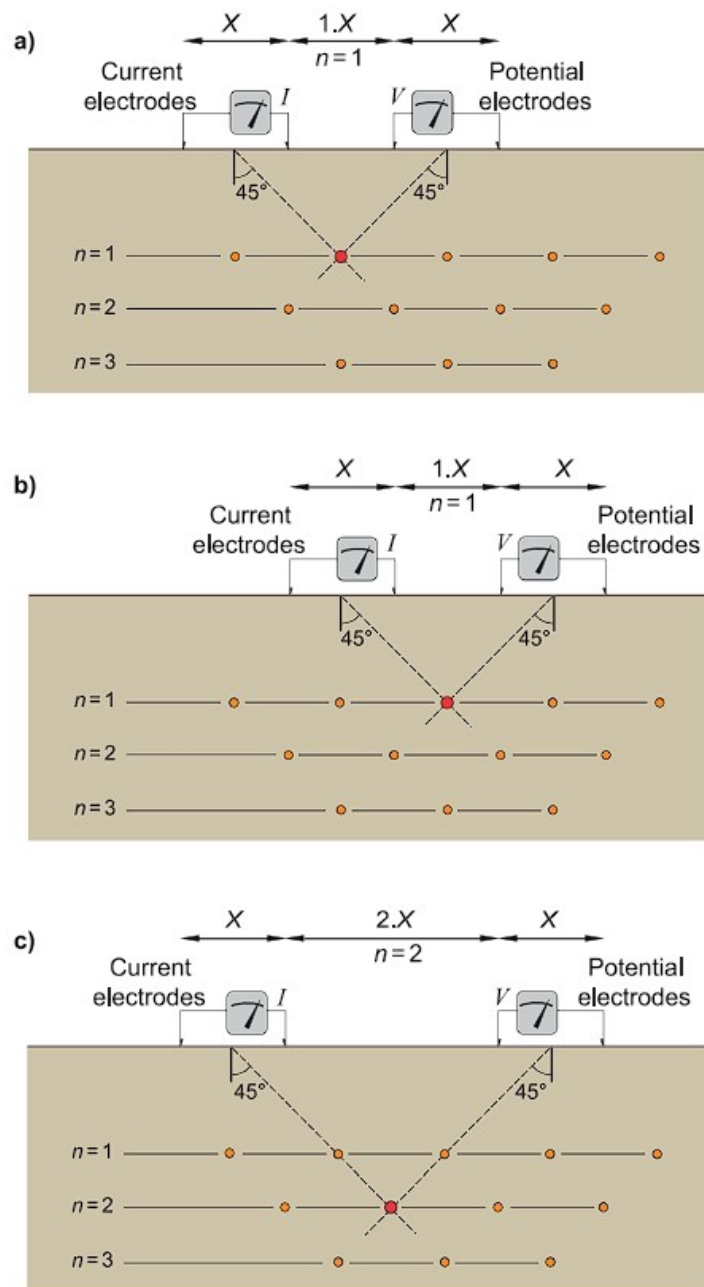


Εικόνα 1.6, Απεικόνιση των τομογραφιών υπό την διάταξη διπόλου-διπόλου (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

Όπως γίνεται φανερό στις παραπάνω ψευδοτομές, για μικρές τιμές του n (της ισαποστάσεως δηλαδή των διπόλων) οι αρκετά έντονες απεικονίσεις επαγόμενης πόλωσης υποδηλώνουν πως και η πηγή βρίσκεται σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια και έχει μεγάλο πλευρικό μήκος.

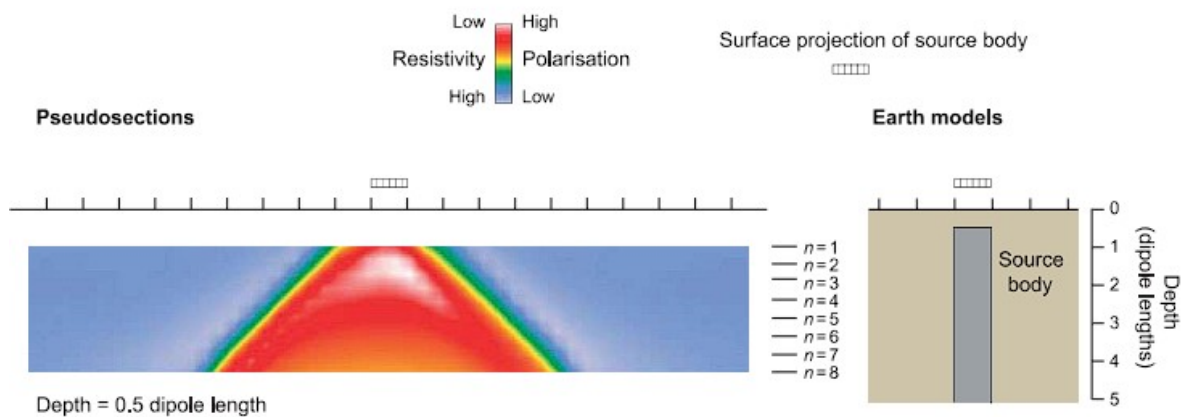
1.9.5 Ψευδοτομές (Pseudosections)

Οι ψευδοτομές αποτελούν εν ολίγοις αποτυπώσεις πολλαπλών ηλεκτροδίων τοποθετημένων κατά σειρά μεταξύ τους. Η μέτρηση από κάθε “ζευγάρι” ηλεκτροδίων, αντιστοιχίζεται στην τομή εύρεσης των δύο ευθειών υπό γωνία 45° η κάθε μια με την οριζόντια.

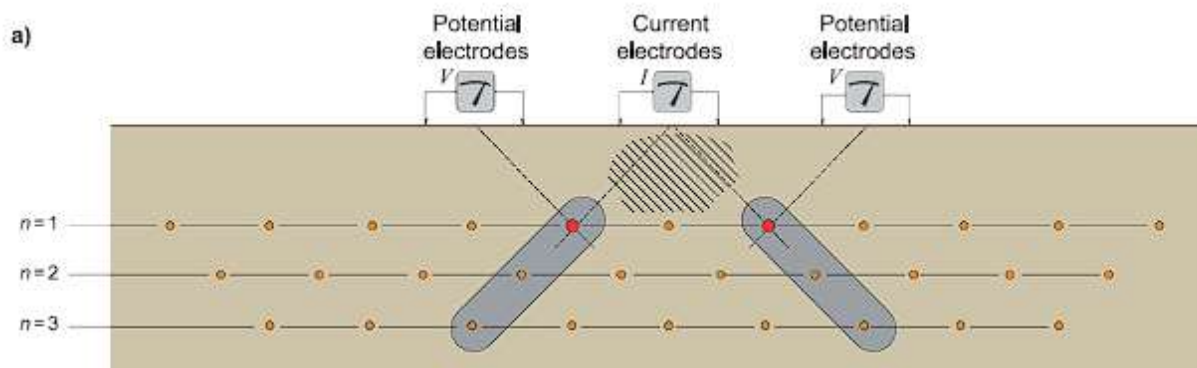


Εικόνα 1.7, Απεικόνιση των τομών “σύγκλισης” των δύο ηλεκτροδίων,, (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

Όπως φαίνεται στην (εικόνα 1.9.1), το (n) υποδηλώνει το βάθος εξερεύνησης του υπεδάφους με τις μεγαλύτερες τιμές (n) να φτάνουν έως και τα βαθύτερα μέρη της ψευδοτομής, (Εικόνα 1.9.2).



Εικόνα 1.8, Απεικόνιση ψευδοτομής παράλληλα με το (n), (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)



Εικόνα 1.9, Αναλυτική απεικόνιση της ψευδοτομής με το αναστραμμένο «V», (Πηγή: Dentith M. & Mudge S. 2014)

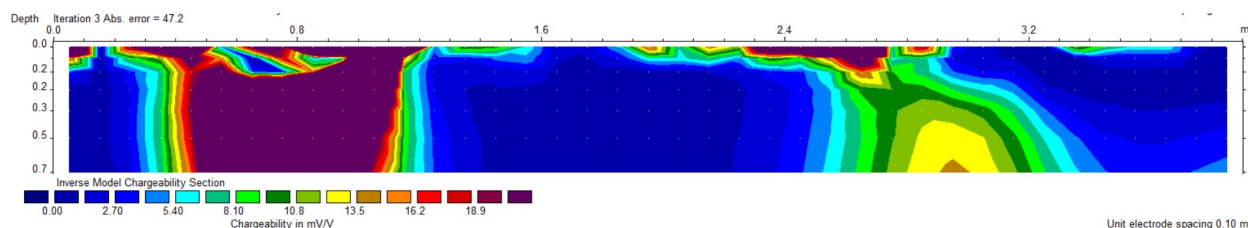
Κεφάλαιο II (Πειραματικές Γνώσεις)

2.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) είναι να καθορίσει την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, πραγματοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνεια της γης. Μέσω της χρήσης της, γίνεται εφικτή η χαρτογράφηση γεωλογικών δομών σε πεδία όπου η ηλεκτρική βυθοσκόπηση είναι ανεπαρκής. Οι μετρήσεις της τομογραφίας μπορούν να συνδυαστούν με δεδομένα γεωτρήσεων, φέρνοντας έτσι αναλυτικά στο φως, την γεωμετρία των γεωλογικών δομών.

Η προ-τομογραφική εποχή στην οποία η ειδική ηλεκτρική αντίσταση θεωρείτο πως μεταβαλλόταν ανά μόνο μια διεύθυνση έπαψε να ισχύει με την ηλεκτρική τομογραφία, αφού χάρη στις τομές της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, έγινε εφικτός ο προσδιορισμός της μεταβολής της ρ (ειδικής αντίστασης), σε δισδιάστατο & τρισδιάστατο επίπεδο, αφήνοντας έτσι περιθώριο να εντοπιστούν ασυνέχειες όπως ρήγματα.

Παράλληλα με την ηλεκτρική τομογραφία υπάρχει και η τομογραφία της επαγόμενης πόλωσης, η οποία χρησιμοποιεί τα μεγέθη της φαινόμενης φορτιστικότητας (M) και της πολικότητας σε (mV/V) στις ψευδοτομές ούτως ώστε να αναπαραστήσουν την φορτιστικότητα των γεωλογικών δομών (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1, Γεωηλεκτρική τομή φορτιστικότητας σε mV/V , (Πηγή: Katris I. 2025)

Όπως θα φανεί και στις επόμενες ενότητες στην πραγματοποίηση της έρευνας θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές διατάξεις, η «gradient» και η διάταξη διπόλου-διπόλου. Κάθε διάταξη έχει τα δικά της ξεχωριστά γνωρίσματα, με τα οποία βοηθούν στο να αναγνωριστούν γεωλογικές δομές στο υπέδαφος.

2.2 Ηλεκτρική τομογραφία– Electrical resistivity tomography (ERT)

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας απεικονίζει την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένο αριθμό ηλεκτροδίων τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή μεταξύ τους (Daily, 2004). Ο σχεδιασμός και η αρχική ανάπτυξη της καινοτόμου αυτής της ηλεκτρικής μεθόδου, συνέβη κατά τα τέλη της δεκαετίας του '80 και στις αρχές της δεκαετίας του '90. Αξίζει να σημειωθεί χάρις στην χρήση της τομογραφικής αντιστροφής η πρόσβαση σε πιο ακριβείς τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, έγινε για πρώτη φορά εφικτή, σε αντίθεση με τις παλιές συμβατικές μεθόδους, όπως για παράδειγμα οι ψευδοτομές.

Η ειδοποιός διαφορά με την χρήση του γεωραντάρ, είναι το γεγονός πως το γεωραντάρ τείνει να χρησιμοποιείται για γεωφυσικές διασκοπήσεις σε σχετικά μικρή ακτίνα δράσης, στην οποία συμπεριλαμβάνονται οι εδαφικοί σχηματισμοί. Σε αντίθεση με το γεωραντάρ, η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας έχει το συγκριτικό πλεονέκτημα του μεγαλύτερου βάθους διασκόπησης.

Οι εφαρμογές της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας ποικίλλουν, με τις πιο επίκαιρες να περιορίζονται στην:

Εφαρμογές	
1	Ανίχνευση αργιλικών σχηματισμών
2	Υφαλμύριση του υδροφόρου ορίζοντα
3	Μεταλλευτική έρευνα
4	Περιβαλλοντικές έρευνες, με αντικείμενο τον εντοπισμό συσσωρευμένων ρυπογόνων αποβλήτων

Πίνακας 2.1 Εφαρμογές Ηλεκτρικής Τομογραφίας

2.4 Διάταξη «Gradient»

Με την διάταξη «gradient» συλλέγονται πολύ περισσότερες μετρήσεις συγκριτικά με την διάταξη διπόλου-διπόλου. Οι μετρήσεις αντιστοιχούν σε θέσεις μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, που σχηματίζουν μεταξύ τους το δίπολο ρεύματος. Η διάταξη «gradient» χρησιμοποιείται κατά κόρον για την ανάδειξη της κατακόρυφης μεταβολής της ρ , σε αντίθεση με την διάταξη διπόλου-διπόλου που χρησιμοποιείται για “πλευρικές” μεταβολές.

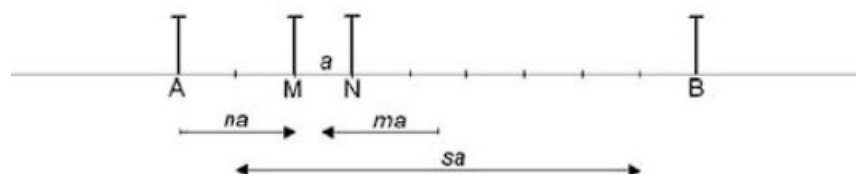
Στην επανομαζόμενη σχέση παρουσιάζεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ως εξής, $(s + 2) * a$, όπου s (separation factor) είναι ο συντελεστής διαχωρισμού και a είναι η μικρότερη σχετική απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Επιπλέον, σημαντικό παράγοντα στην διάταξη παίζει και ο συντελεστής μεσοδιαστήματος (midpoint factor), ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$m = \frac{(x_M + x_N)/2 - (x_A + x_B)/2}{(x_N - x_M)} = \frac{x_{MN} - x_{AB}}{a},$$

Η παραπάνω σχέση προσδιορίζει το ενδιάμεσο σημείο μεταξύ των επικείμενων ηλεκτροδίων διπόλου σε άμεση σχέση με αυτό στην μέση του διπόλου-διπόλου. Τα x_M, x_N, x_A, x_B είναι οι θέσεις των ηλεκτροδίων “ρεύματος” και “δυναμικού”, ενώ τα x_{AB}, x_{MN} είναι τα ενδιάμεσα σημεία των αντιστοίχων διπόλων, όπως φαίνεται και στην (εικόνα 2.4.1) (Dahlin and Zhou, 2006).

Ενώ, ο παράγοντας « N » καθορίζει την μικρότερη σχετική απόσταση μεταξύ του υφιστάμενου ηλεκτροδίου σε σχέση με το διπλανό του.



Εικόνα 2.2, Απεικόνιση της διάταξης gradient στο πεδίο, (Dahlin and Zhou 2006)

2.5 Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Στην διάταξη διπόλου διπόλου, τα ηλεκτρόδια του ρεύματος σχηματίζουν το δίπολο ρεύματος με απόλυτα σταθερό ανάπτυγμα (a), ενώ τα ηλεκτρόδια του δυναμικού σχηματίζουν το δίπολο δυναμικού με εξίσου σταθερό ανάπτυγμα (a). Η σχέση $(n * a)$ δίνει την απόσταση μεταξύ των

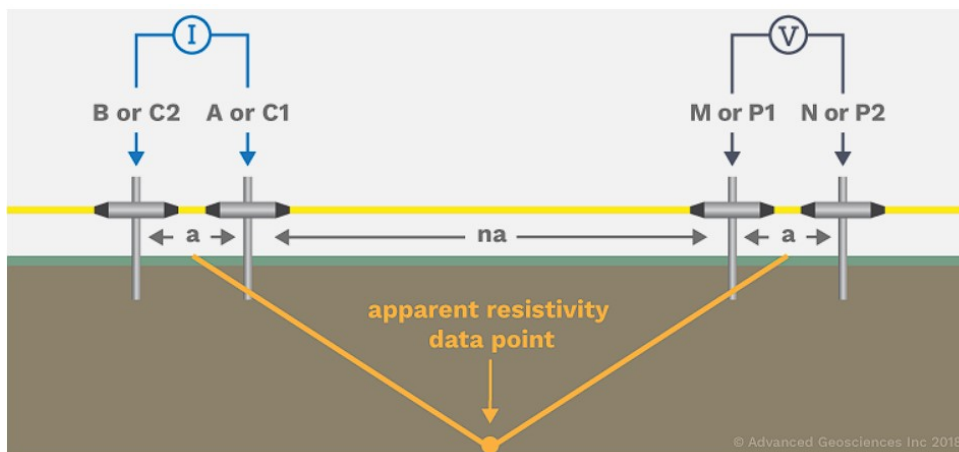
διπόλων, όπου η “α” είναι το ακέραιο πολλαπλάσιο του α, το οποίο όπως διατυπώθηκε και προηγουμένως είναι η μικρότερη σχετική απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

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

Εικόνα 2.3, Απεικόνιση της σχέσης ρ_{α}

Η σχέση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης απεικονίζεται στην (εικόνα 2.5.1), με το γινόμενο $\pi * n(n+1)(n+2) * a$ να αποτελεί τον γεωμετρικό συντελεστή, το ΔV την διαφορά του δυναμικού και το I την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (A) (Βαφείδης, 2001).

Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις στην διάταξη διπόλου-διπόλου έχει ως εξής. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από 2 ηλεκτρόδια A και B (δίπολο ρεύματος) και από άλλα 2 ηλεκτρόδια M και N (δίπολο δυναμικού). Η ιδέα πίσω από την συγκεκριμένη διάταξη είναι να υπολογιστεί η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση εντός περιοχής, η οποία οριοθετείται συνολικά από τα 4 προαναφερθέντα ηλεκτρόνια A, B, M και N, (εικόνα 2.5.2).

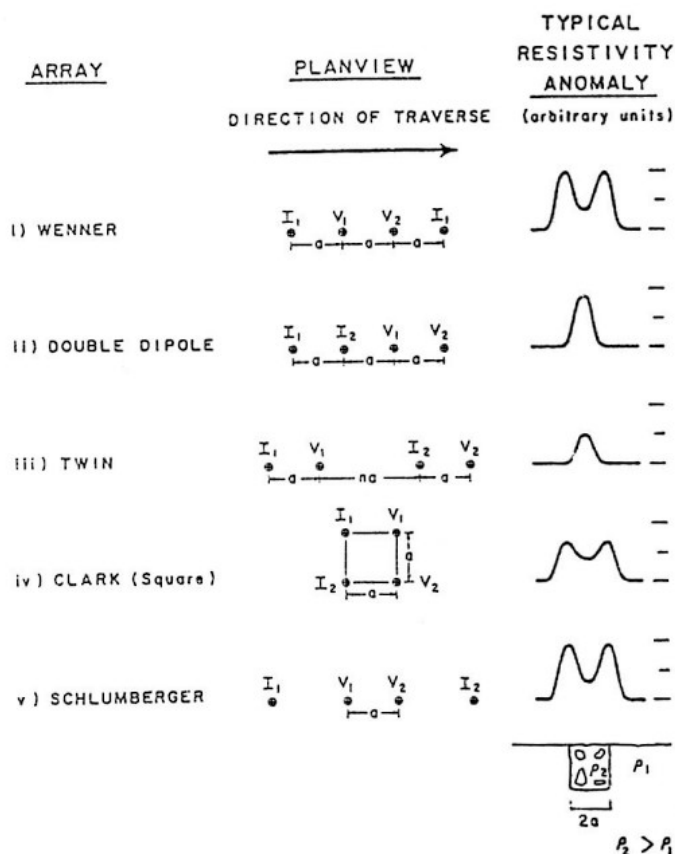


Εικόνα 2.4, Διάταξη διπόλου-διπόλου, (Πηγή: Advanced Geosciences 2018)

Στην συγκεκριμένη διάταξη η απόσταση μεταξύ των διπόλων επηρεάζει και το εύρος της διοχέτευσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος. Εν ολίγοις, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο διπόλων, τόσο αυξάνεται και το βάθος διασκόπησης, με τις μετρήσεις της

φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης να επηρεάζονται από βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους.

Η διάταξη διπόλου-διπόλου υποστηρίζει πολυκαναλικές λήψεις σε ταυτόχρονο χρονικό διάστημα, σε αντίθεση με την διάταξη «Wenner» που μπορεί να υποστηρίξει έως μια μέτρηση.



Εικόνα 2.5, Απεικόνιση διατάξεων σε συνδυασμό με την αντίστοιχη ανωμαλία που παρατηρείται από μια ιδεατή δομή, (Βαφείδης "Γεωφυσική II", 2001)

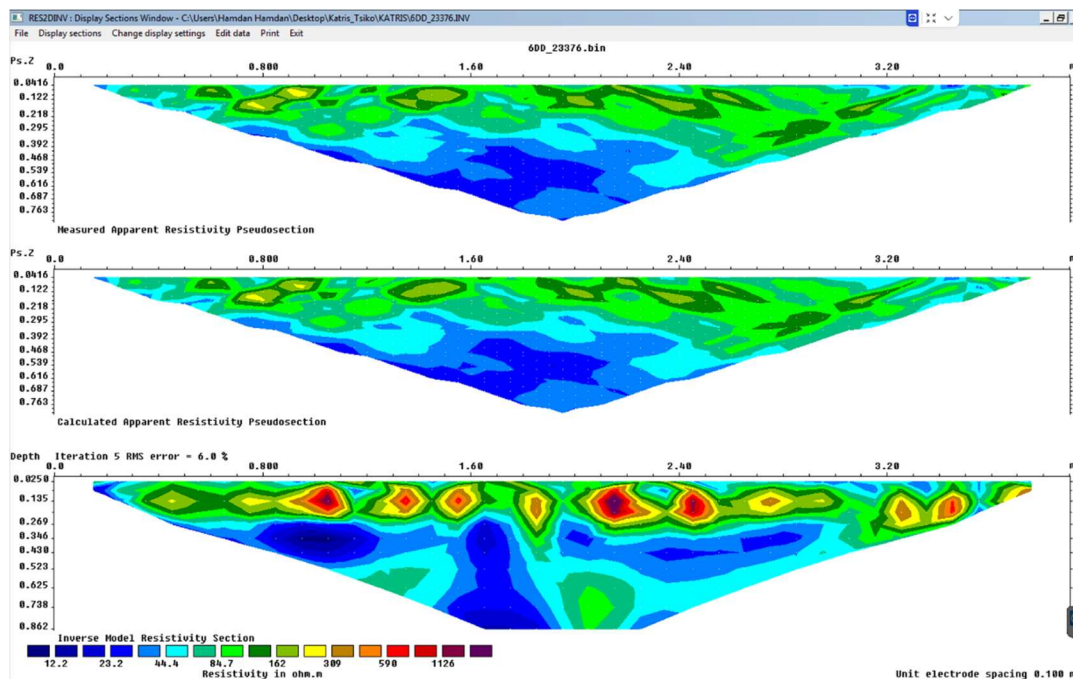
Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί πως η διάταξη διπόλου-διπόλου παρέχει και εικόνα υψηλής ευκρίνειας σε αντίθεση με την διάταξη «Wenner», που χαρακτηρίζεται από υποδεέστερη ευκρίνεια.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα της διάταξης διπόλου-διπόλου, είναι η χαμηλή εμβέλεια του σήματος το οποίο διαθέτει, αποτρέποντας την εφαρμογή τους σε πολύ βαθιές διασκοπήσεις.

2.6 Λογισμικό «Res2dinv»

Το πρόγραμμα «Res2dinv» είναι σχεδιασμένο για να επεξεργάζεται δεδομένα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης καθώς και επαγόμενης πόλωσης από δισδιάστατη (2D) γεωφυσική διασκόπηση. Η αντιστροφή των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία κάνει χρήση όλων των διατάξεων των ηλεκτροδίων, που στην προκειμένη περίπτωση αφορούν αποκλειστικά τις διατάξεις «gradient» και διπόλου-διπόλου.

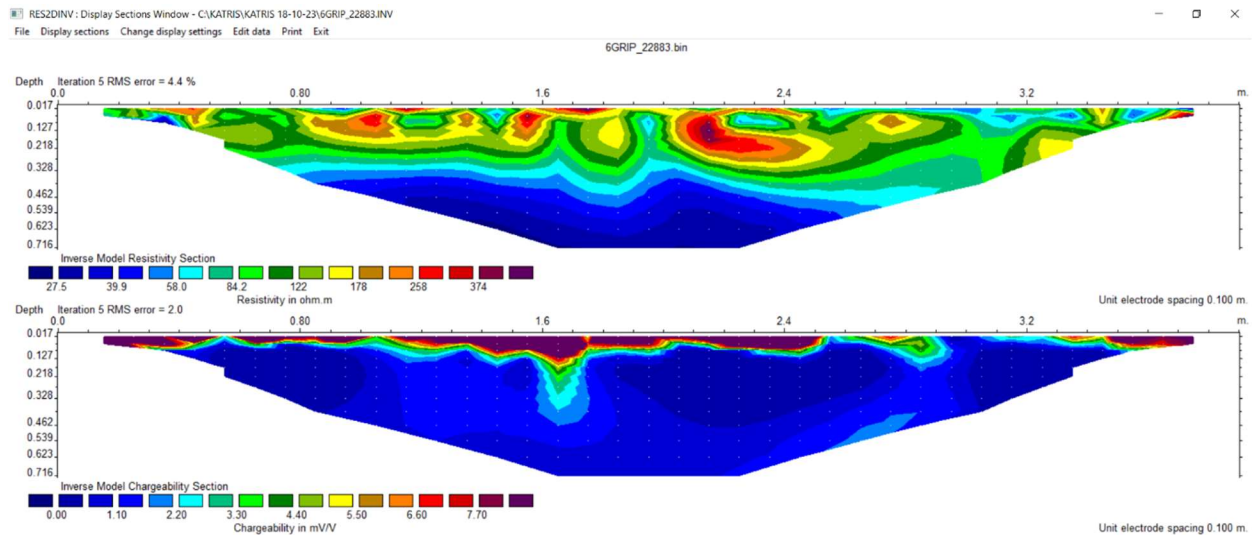
Μέσα από το αρχείο εισάγονται στο λογισμικό τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από το πεδίο. Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτει στην οθόνη η απεικόνιση 3 τριών διαφορετικών τομών, όπου η πρώτη απεικονίζει τα αληθινά δεδομένα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η δεύτερη απεικονίζει τις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τρίτη τομή απεικονίζει το μοντέλο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



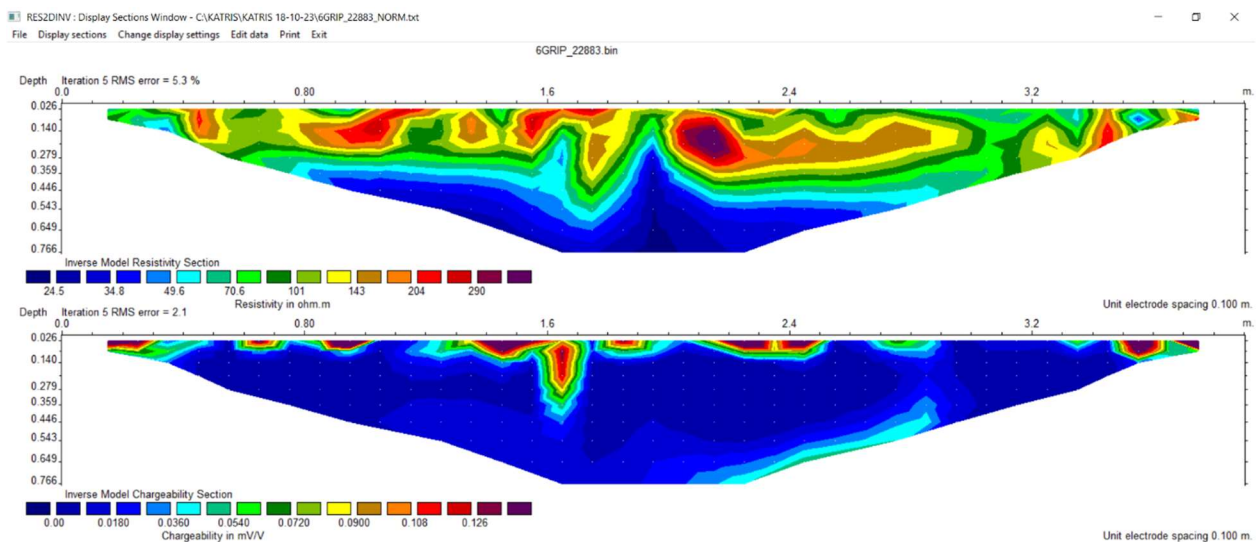
Εικόνα 2.6.1, Απεικόνιση μιας πρωτότυπης γεωηλεκτρικής τομής διατάξεως «διπόλου-διπόλου»

Ακολουθεί η ολοκλήρωση της αντιστροφής για την διάταξη διπόλου-διπόλου και το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την ακριβώς αντίστοιχη μεθοδολογία για την αντιστροφή των δεδομένων της επαγόμενης πόλωσης (εικόνα 2.6.2). Μέσω της μετατροπής των δεδομένων σε αρχείο excel, θα υπολογιστεί το μέγεθος της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας, αρχικά ως λόγος της

ειδικής αντίστασης προς την φορτιστικότητα και μετά ως μια “γενικευμένη” μορφή σε ψευδοτομή (όπως στην εικόνα 2.6.3).



Εικόνα 2.6.2, Απεικόνιση μιας γεωηλεκτρικής τομής υπό το μέγεθος της επαγόμενης πόλωσης



Εικόνα 2.6.3. Απεικόνιση μιας γεωηλεκτρικής τομής υπό το μέγεθος της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

2.7 Αντιστροφή των δεδομένων

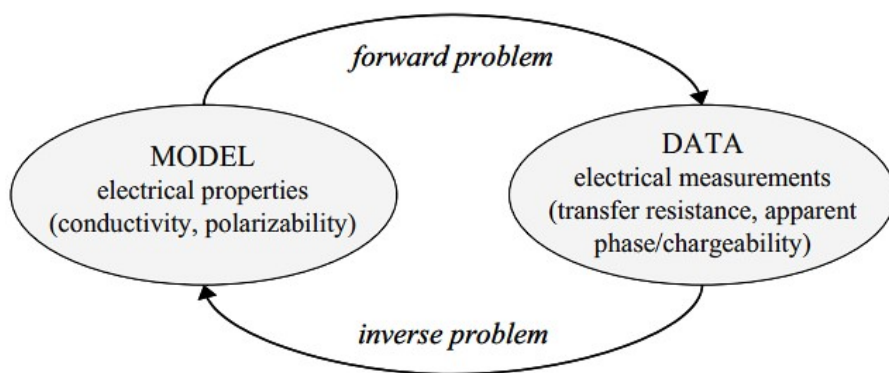
Ο σκοπός της αντιστροφής των δεδομένων μιας γεωφυσικής έρευνας για μια σειρά δεδομένων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, είναι ο υπολογισμός των τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Όπως σε κάθε γεωφυσική αντιστροφή, έτσι και σε αυτή εμπεριέχεται η λύση μιας διαφορικής εξίσωσης, η οποία “μοντελοποιεί” τις παραμέτρους της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ώστε να προσεγγίζουν τις πραγματικές της τιμές στο πεδίο.

Ο συνολικός στόχος όλων των ηλεκτρικών μεθόδων είναι να κατανέμουν συγκεκριμένες ηλεκτρικές ιδιότητες (χαμηλής συχνότητας στο υπέδαφος. Το θεωρητικό αντίκτυπο που θα έχουν οι ηλεκτρικές ιδιότητες μπορεί να προσδιοριστεί μαθηματικά, μέσω “μοντελοποίησης”, χάρις την χρήση μαθητικών εξισώσεων, όπως αυτή του «Poisson» για την ηλεκτρική τομογραφία (εικόνα 2.7.1), που υπόκειται σε οριακές συνθήκες του υπεδάφους (Binley και Kemna, 2005).

Το παραπάνω πρόβλημα, ονομάζεται ευθύ πρόβλημα (εικόνα 2.7.2) και σε αντίθεση με το αντίστροφο, αποτελεί το στάδιο μοντελοποίησης για την δημιουργία συνθετικών δεδομένων. Εν ολίγοις, αναφέρεται στην εκτίμηση των συνθετικών δεδομένων της αγωγιμότητας και φορτιστικότητας από συγκεκριμένο εδαφικό μοντέλο για την σύγκρισή τους με τις πραγματικές μετρήσεις του πειράματος. Μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φορτιστικότητας προκύπτουν από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (Εικόνα 2.7.1)

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = -I \delta(\mathbf{r})$$

Εικόνα 2.7.1, Εξίσωση Poisson όπου $V(r)$:ηλεκτρικό δυναμικό, $\sigma(r)$:ισοτροπική ηλεκτρική κατανομή αγωγιμότητας & r :απόσταση από κάθε ηλεκτρόδιο



Εικόνα 2.7.2, Σχηματικό διάγραμμα προβλήματος ευθέως-αντιστροφής, (Πηγή: Binley και Kemna, 2005)

Η πιο συχνή μέθοδος που χρησιμοποιείται για να αντιστραφούν τα δεδομένα και η οποία χρησιμοποιείται στην εργασία, είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων με την εφαρμογή επαναληπτικών τεχνικών, στοχευμένων για να επιλύσουν το συγκεκριμένο αντίστροφο πρόβλημα. Προέρχεται βέβαια, η επίλυση μη γραμμικού προβλήματος με γραμμικό, χάρις την στην σειρά «Taylor» (Βαφείδης, 2001).

Κεφάλαιο III (Εξοπλισμός & Επεξεργασία)

3.1 Εισαγωγή

Στο 3ο κεφάλαιο της εργασίας δίνεται μεγάλη έμφαση στην ευρύτερη μελετούμενη περιοχή διεξαγωγής των μετρήσεων, διαχωρίζοντάς τις ανάλογα με τις γεωγραφικές τους θέσεις και το περιεχόμενο των εδαφικών τους σχηματισμών, όπως θα φανεί χαρακτηριστικά και στην εικόνα (3.2.2) της δεύτερης ενότητας του κεφαλαίου. Συνολικά η μελετούμενη περιοχή της εργασίας εκτείνεται προσεγγιστικά από την περιοχή της Αγίας Χανίων έως και την περιοχή του Κολυμπαρίου, αποτελώντας και το δυτικότερο σημείο της εργασίας.

Έμφαση θα δοθεί επίσης και στον εργαστηριακό εξοπλισμό της εργασίας, κάνοντας ειδική αναφορά στο ηλεκτρόμετρο του πειράματος, το «Syscal Pro», με το οποίο συλλέχθηκαν οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ρ) και της φορτιστικότητας (M). Οι χρήσεις του «Syscal Pro» εκτείνονται κυρίως στον τομέα της γεωφυσικής για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης υπογείων σχηματισμών με τις εφαρμογές του να επεκτείνονται σε εξορύξεις, στην υδρογεωλογία, σε περιβαλλοντικές μελέτες καθώς και σε γεωτεχνικές μελέτες. Σε συνδυασμό βεβαίως με το «Syscal Pro», ειδική αναφορά γίνεται και στο GPS το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην εργασία, με το οποίο εντοπίστηκαν και προσδιορίστηκαν τα ακριβή σημεία των δειγματοληψιών της εργασίας.

Επιπλέον, παράλληλα με την αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού της εργασίας δεν θα μπορούσε να παραλειφθεί η επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων, η οποία επεξεργασία όπως θα επεξηγηθεί και παρακάτω έγινε χάρις την χρήση του λογισμικού «Res2dinv». Ένα λογισμικό, χάρις στο οποίο έγινε η αντιστροφή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην πραγματική & στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μείωση του «RMS», δηλαδή του σφάλματος ελαχίστου τετραγώνου, προσδίδοντας έτσι μια πολύ πιο αξιόπιστη απεικόνιση των πραγματικών αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

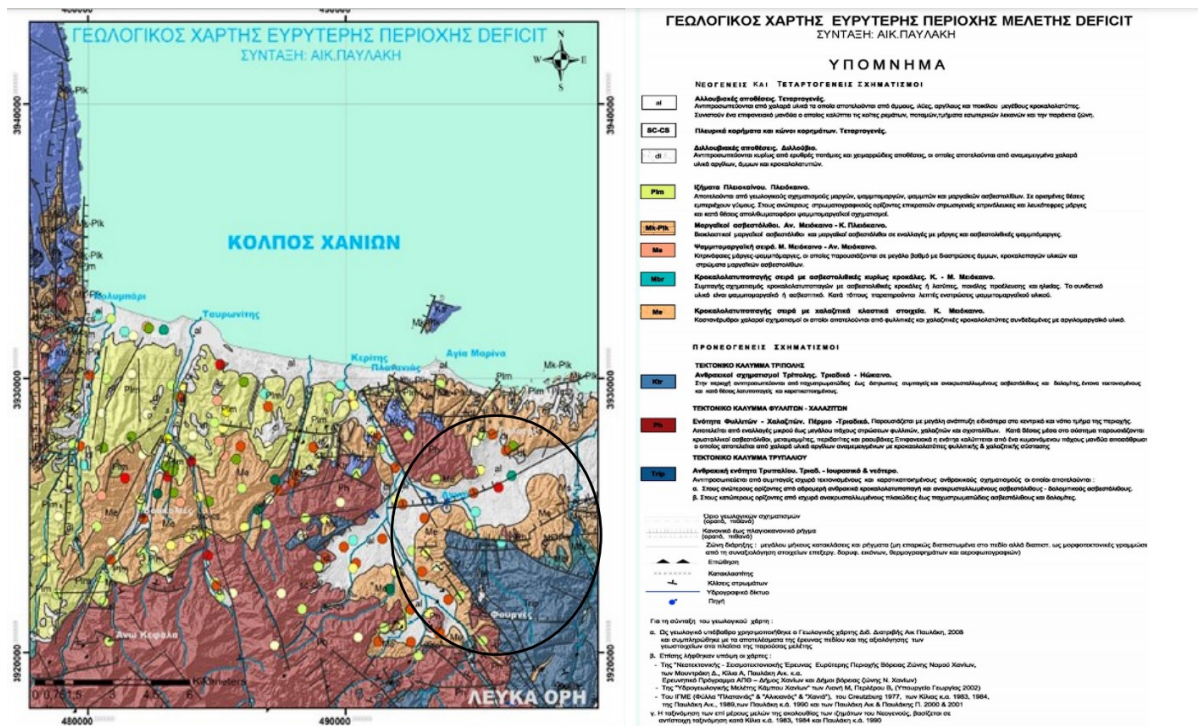
3.2 Μελετούμενη Περιοχή

Οι εργασίες πεδίου διεξάχθηκαν στην δυτική Κρήτη και πιο συγκεκριμένα νοτίως του κόλπου των Χανίων (εικόνα 3.2.1). Η συγκεκριμένη μελετώμενη γεωλογική περιοχή επιλέχθηκε από ειδικές συστάσεις μιας ομάδας επιστημόνων στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος. Η περιοχή μελέτης εκτείνεται από την Αγία Χανίων έως και το Κολυμπάρι Χανίων σχηματίζοντας έτσι μια συνολική ακτίνα 15.5 χιλιομέτρων.



Εικόνα 3.1, Η δορυφορική εικόνα της μελετούμενης περιοχής από το Google earth

Η περιοχή της Αγίας Χανίων περιβάλλεται κατά κόρον από Αλλουβιακές αποθέσεις, συνδυασμένες μερικώς από διλλουβιακές αποθέσεις, καστανέρυθρους χαλαρούς σχηματισμούς αποτελούμενους από κροκαλολατυποπαγή χαλαζιτικά κλαστικά στοιχεία & μαργαϊκούς ασβεστόλιθους (Υπόμνημα Αικ. Παυλάκη, εικόνα 3.2.2)



Εικόνα 3.2, Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής & το υπόμνημα της κ. Αικ. Παυλάκη

- Δίπλα από την Αγιά Χανίων, στον Σχινέ παρατηρούνται κατά κύριο λόγο Αλλουβιακές αποθέσεις σε συνδυασμό με σχηματισμούς της ενότητας φυλλιτών χαλαζιτών.
- Πιο νότια στον Φουρνέ Χανίων εμφανίζονται και πάλι αλλουβιακές αποθέσεις, καστανέρυθροι χαλαροί σχηματισμοί και ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Τρυπαλίου.
- Στις Βουκολιές εμφανίζονται ιζήματα Πλειόκαινου σε συνδυασμό με καστανέρυθρους χαλαρούς σχηματισμούς.
- Τέλος στο Κολυμπάρι, η περιοχή δομείται και πάλι από ιζήματα Πλειόκαινου.

3.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Η διεξαγωγή της γεωφυσικής διασκόπησης, πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης μιας σειράς από ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαλειτουργικά, ούτως ώστε να σχηματιστούν στην διαμόρφωση που απεικονίζεται και στην (εικόνα 3.3.1), αποδίδοντας τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) και της φορτιστικότητας (M).



Εικόνα 3.3, Παράδειγμα μιας τυπικής απεικόνισης της χάραξης της τομής σε συνδυασμό με τον εργαστηριακό εξοπλισμό

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα στις μετρήσεις καθοριστικό ρόλο έπαιξε το ηλεκτρόμετρο «Syscal Pro», μέσω του οποίου έγινε η συλλογή των δεδομένων φαινομένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) και φορτιστικότητας (M), σε δυο διαφορετικές διατάξεις, την διάταξη διπόλου-διπόλου & την διάταξη «gradient-induced polarization». Το ηλεκτρόμετρο «Syscal Pro» έχει δυνητικά την ικανότητα να διαχειριστεί έως και 10 διαφορετικές μετρήσεις ταυτόχρονα, ενώ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις 48 έως και 120 ηλεκτροδίων στο πεδίο των μετρήσεων. Ο τρόπος λειτουργίας του ξεκινάει ως εξής.

- 1ο Βήμα: Το όργανο χρησιμοποιεί δύο σειρές τοποθετημένων καλωδίων με τα ηλεκτρόδια (κόκκινα και μαύρα καλώδια), τα οποία συνδέονται αντιστοίχως διαδοχικά ένα προς ένα σε κάθε ηλεκτρόδιο, και με τον πολυπλέκτη. Ο πολυπλέκτης διαβιβάζει το ηλεκτρικό ρεύμα στα ηλεκτρόδια από το ηλεκτρόμετρο και μετρά τις ηλεκτρικές τάσεις. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στο έδαφος σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους.
- 2ο Βήμα: Το ηλεκτρόμετρο, με την υποβοήθηση μιας μπαταρίας (τύπου αυτοκινήτου) παρέχει το απαιτούμενο ηλεκτρικό ρεύμα στα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους. Το ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται στο υπέδαφος.

- 3ο Βήμα: Τα ηλεκτρόδια καταγράφουν την ηλεκτρική τάση του πεδίου στο υπέδαφος.
- 4ο Βήμα: Οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται σε διάφορες θέσεις και συλλέγεται το σύνολο των δεδομένων.
- 5ο Βήμα: Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις εισάγονται στο ειδικό λογισμικό επεξεργασίας και ανάλυσης. Το λογισμικό αναλύει τα δεδομένα και παράγει τομές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) & της φορτιστικότητας (M) στην γεωλογική τομή.

Το «Syscal Pro» αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην γεωφυσική, καθώς επιτρέπει την απόκτηση πληροφοριών σχετικά με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών, που είναι σημαντικές για πολλούς επιστημονικούς και εφαρμοσμένους σκοπούς. Σε συνδυασμό με το μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, το «Syscal Pro» αποδεικνύεται και ταυτοχρόνως πολύ εύχρηστο στην ανάκτηση των δεδομένων της επαγόμενης πόλωσης, κατά την οποία τα συλλέγει μέσω του υπολογισμού της χρονοκαθυστέρησης του σήματος αναμετάδοσης των υπογείων σχηματισμών.

Η διάρκεια εκπομπής του κύματος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ήταν 500ms, ενώ η ευκρίνεια του αγγίζει το 1 μV και η ακρίβεια του 0.2%. Επιπλέον, χαρακτηριστικό είναι πως η συγκεκριμένη συσκευή μπορεί να αποθηκεύσει έως και 44800 δεδομένα, χρήζοντας την ιδανική για τις απαιτήσεις του πειράματος, που στην προκειμένη περίπτωση η κάθε μέτρηση στην διάταξη «gradient» άγγιζε τις 496.

Σε συνδυασμό με το «Syscal», απαραίτητο για τον εντοπισμό των θέσεων υπήρξε το GPS, μέσω του οποίου εντοπίστηκαν στο πεδίο οι ακριβείς θέσεις των σημείων δειγματοληψίας. Επιπλέον μέσω του GPS καθορίστηκαν και οι θέσεις των μετρήσεων, προσκομίζοντας έτσι μια καθαρή εικόνα για την θέση τους. Φυσικά, δεν θα μπορούσε να λείπει ο υπολογιστής, με τον οποίο έγινε σε άμεσο χρόνο η αντιστροφή των δεδομένων από την οποία καθορίστηκαν τα πιο “πλούσια” σε αργιλικά ορυκτά σημεία.

Το αμέσως επόμενο βήμα μετά τον καθορισμό αυτών των σημείων μέσω του προγράμματος «res2div», είναι η εκσκαφή του σημείου με την χρήση ενός τρυπανιού εδάφους, ώστε να ληφθούν τα εδαφικά δείγματα στην εν λόγω θέση. Τα δείγματα τα οποία ελήφθησαν και μετέπειτα εξετάστηκαν προέρχονται από βάθος 30 cm, 20 cm & 10cm.

Μετά την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στο υπέδαφος, γίνεται ένας ενδεδειγμένος έλεγχος της σύνδεσης τους μέσω του «rs check», σε συνδυασμό με έγχυση αλατόνευρου για να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης (ρ), ούτως ώστε να μειωθούν οι υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής. Αφού γίνουν οι παραπάνω οι διαδικασίες, ακολούθησε η επιλογή του χρόνου εκπομπής του ρεύματος, του αριθμού των καναλιών & της διάταξης των ηλεκτροδίων.

3.4 Περιθλασμετρία ακτίνων –X (XRD)

Στο τελικό στάδιο της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περίθλασης ακτίνων X (XRD) για τον προσδιορισμό των ορυκτών φάσεων των εδαφών. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανάλυση των κρυσταλλικών δομών των υλικών, μέσω της χρήσης ακτίνων-X. Χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο “Bruker D8 Advance”, του εργαστηρίου της Ορυκτολογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Το περιθλασίμετρο αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα:

- Την συσκευή παραγωγής των ακτίνων X.
- Τον δειγματολήπτη στον οποίο τοποθετείται το προς εξέταση υλικό το οποίο στην εν λόγω περίπτωση δεν είναι άλλο από το αργιλικό χώμα.
- Τον αναλυτή, ο οποίος διαχωρίζει τις αντανάκλαστικές ακτίνες ανάλογα με τη γωνία.
- Τον ανιχνευτή, οποίος καταγράφει τις περιθλώμενες από το δείγμα ακτίνες X, ούτως ώστε υπολογιστούν οι γωνιακές θέσεις & εντάσεις των κρυσταλλικών δομών του υλικού.
- Τέλος, υπάρχει και το σύστημα ψύξης, το οποίο διαχειρίζεται τις εξαιρετικά κρίσιμα υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της μέτρησης.



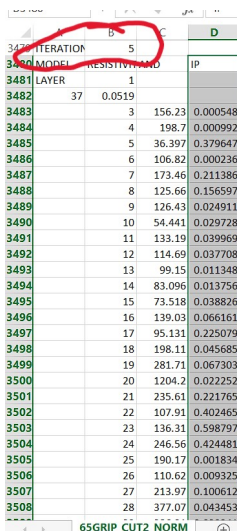
Εικόνα 3.4, Περιθλασίμετρο “Bruker D8 [Advance](#)”

3.5 Επεξεργασία των δεδομένων

Όπως περιγράφηκε και στα κεφάλαια 2.4 & 2.5, η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε χάρις το λογισμικό «res2div». Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να αναπαρασταθούν οι τομές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φορτιστικότητας, από τα δεδομένα τα οποία αποκτήθηκαν μέσω του ηλεκτρόμετρου «Syscal», είναι (2-D) δισδιάστατο όπως θα φανεί και στις επόμενες εικόνες.

Αφού επιτευχθεί η “πρωτογενής” αντιστροφή των δεδομένων στο πρόγραμμα, το αμέσως επόμενο βήμα είναι η μείωση του σφάλματος RMS (Root Mean Square/ρίζα του μέσου τετραγώνου) κάτω από 15% στην ηλεκτρική τομογραφία. Αντίστοιχα στην τομογραφία φορτιστικότητας λόγω της μεγάλης απόκλισης των υπολογισμένων από τις μετρούμενες τιμές, το RMS φτάνει έως και 45% σε ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις όπως θα φανεί και παρακάτω. Σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω του μεγάλου σφάλματος, κρίθηκε αναγκαίο να περικοπούν αρκετές μετρήσεις, συνήθως με ρυθμό 10 ή 20 μετρήσεων.

Ένα επιπρόσθετο στάδιο για την επεξεργασία των δεδομένων, υπήρξε η εισαγωγή των αρχείων των τομών σε φύλλο του excel (εικόνα 3.5.1), ούτως ώστε να γίνει ο υπολογισμός της κανονικής φορτιστικότητας και να παρουσιαστεί και αυτή σε τομή. Η κανονική φορτιστικότητα (NM) όπως έχει περιγράψει και προηγουμένως, είναι ο λόγος της φορτιστικότητας προς την ειδική ηλεκτρική αντίσταση και ο υπολογισμός της πραγματοποιείται στην τελευταία επανάληψη (iteration) των μετρήσεων (κύκλος στην εικόνα 3.5.1)

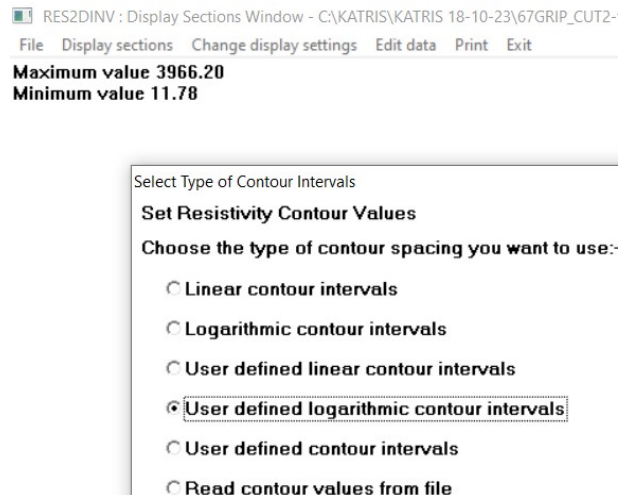


	B	C	D
3477	ITERATION	5	
3478	MODEL	RESISTIVITY	IP
3481	LAYER	1	
3482	37	0.0519	
3483		3	156.23
3484		4	198.7
3485		5	36.397
3486		6	106.82
3487		7	173.46
3488		8	125.66
3489		9	126.43
3490		10	54.441
3491		11	133.19
3492		12	114.69
3493		13	99.15
3494		14	83.096
3495		15	73.518
3496		16	139.03
3497		17	95.131
3498		18	198.11
3499		19	281.71
3500		20	1204.2
3501		21	235.61
3502		22	107.91
3503		23	136.31
3504		24	246.56
3505		25	190.17
3506		26	110.62
3507		27	213.97
3508		28	377.07

Εικόνα 3.5.1, Αποτύπωση των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας σε φύλλο excel

Επιπλέον, σε κάθε ηλεκτρική τομή, λόγω της διαφορετικού εύρους των τιμών των μετρήσεων της, απαιτήθηκε αντιστοίχως και η ανάλογη αντιστοίχιση των αποχρώσεων στις τιμές της ειδικής

ηλεκτρικής (ρ) ή της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας (M). Η αντιστοίχιση πραγματοποιήθηκε χάρις την επιλογή χειροκίνητης εισχώρησης τιμών “λογαριθμικών διαστημάτων περιγράμματος” (εικόνα 3.5.2).



Εικόνα 3.5.2, Απεικόνιση της χειροκίνητης επιλογής εισχώρησης τιμών “logarithmic contour intervals”

Κεφάλαιο IV (Αποτελέσματα)

4.1 Εισαγωγή

Κατά την διεξαγωγή του τέταρτου κεφαλαίου γίνεται η αποτύπωση όλων των αποτελεσμάτων των μετρήσεων τόσο των ηλεκτρικών τομογραφιών, δηλαδή του λογισμικού «Res2dinv», όσο και της περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD). Από τις μετρήσεις αυτές διαχωρίστηκαν οι αργιλικά “ενδιαφέρουσες” εδαφικές δειγματοληψίες και εξετάστηκαν ως προς την ορυκτολογική τους σύσταση.

Συνολικά τα σημεία των μετρήσεων ήταν 13, με 6 από αυτά να βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή των Βουκολιών, τα 5 στην περιοχή του Κολυμπαρίου και τα υπόλοιπα 2 στην Αγιά. Σε συνδυασμό φυσικά με τον χαρακτηρισμό των αργιλικών σχηματισμών, πραγματοποιήθηκε ακριβής προσδιορισμός των σημείων δειγματοληψίας με χρήση του GPS, με τα σημεία να αποτυπώνονται σε δύο διαφορετικά γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς, το “ΕΓΣΑ 87” & το “WGS”.

Όπως κρίνεται λογικό από τις αποτυπώσεις των παρακάτω αποτελεσμάτων των ηλεκτρικών τομογραφιών, μόνο 6 από τις συνολικά 13 μετρήσεις μπορούσαν να επιδεχθούν ανάλυση με ακτίνες-Χ, με τις υπόλοιπες 8, να μην ικανοποιούν έστω και στο ελάχιστο τις απαιτούμενες προδιαγραφές ενός αργιλικού σχηματισμού.

4.2 Περιοχή Βουκολιών

Στην ευρύτερη περιοχή των Βουκολιών πραγματοποιηθήκαν οι μετρήσεις των σημείων 33, 34, 35, 36, 47 & 48, με τον απώτερο στόχο τον ακριβή χαρακτηρισμό των αργιλικών σχηματισμών στο κάθε σημείο. Στις παρακάτω παραγράφους απεικονίζονται αναλυτικά οι ακριβείς χαρακτηρισμοί των δειγματοληψιών καθώς επίσης και οι ακριβείς θέσεις των δειγματοληψιών στα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς το “ΕΓΣΑ 87” και το “WGS”.

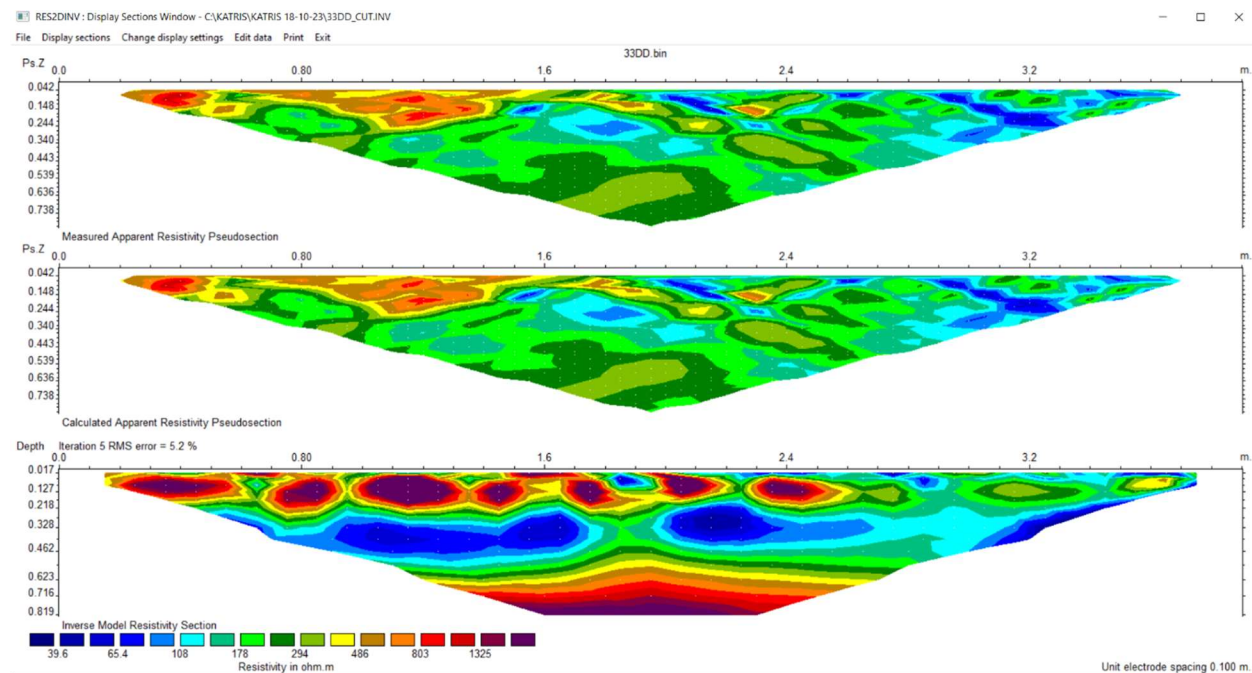
Επιπροσθέτως, θα πρέπει να σημειωθεί πως από τα έξι συνολικά σημεία τα οποία μετρήθηκαν, τα σημεία “35”, “47” και “48”, δεν περιείχαν επαρκές αργιλικό υλικό στα σημεία δειγματοληψίας τους, πράγμα το οποίο θα επεξηγηθεί κιόλας και στις παρακάτω ηλεκτρικές τους τομογραφίες. Συνεπώς, δεν εξετάστηκαν περαιτέρω οι εδαφικοί σχηματισμοί.

	“ΕΓΣΑ 87”		“WGS”	
	X	Y	X	Y
“VOUK33DS”	483090.338	3929706.374	35.513397425415	23.815161439759
“VOUK34DS”	482344.881	3928688.770	35.504209217924	23.806962547466
“36NEWSA”	481748.239	3927906.639	35.497146340708	23.80040101645
“VOUK47DS”	483153.834	3927738.495	35.495654888972	23.815902164141

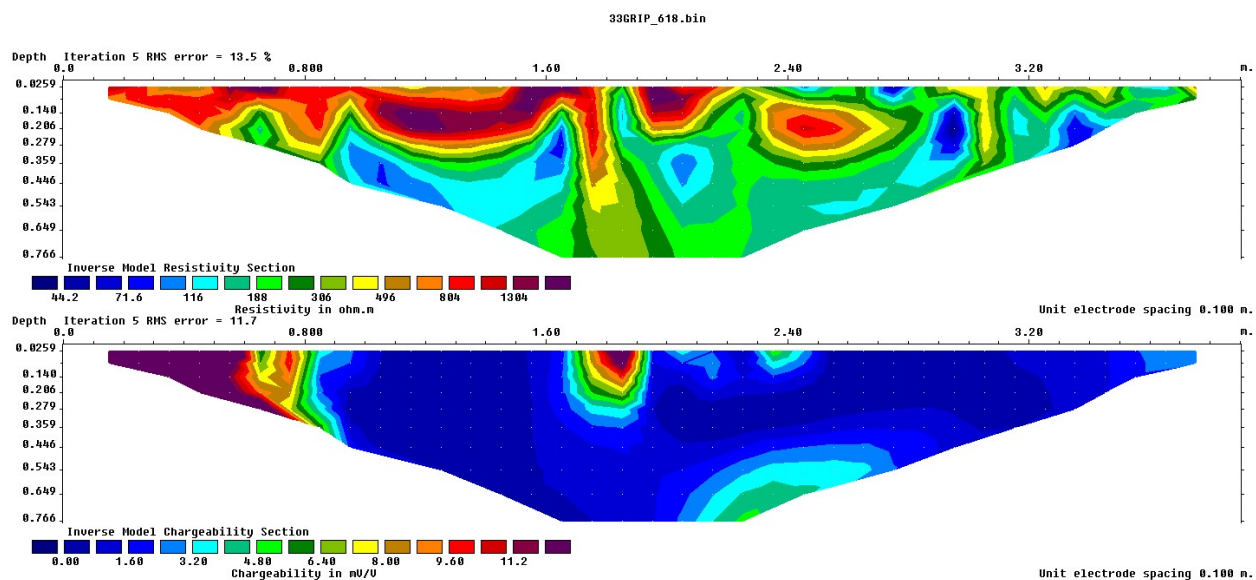
Πίνακας 3.1 Συντεταγμένες των σημείων 33, 34, 36 & 47

*

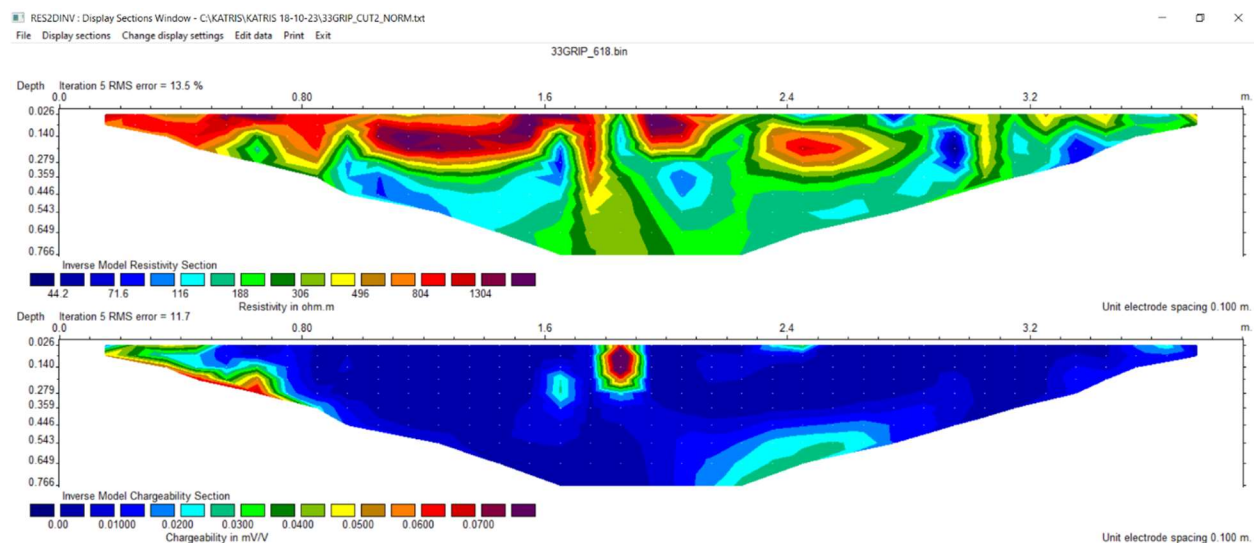
4.2.3 Σημείο 33 (Βουκολιές)



Εικόνα 4.1.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 33



Εικόνα 4.1.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 33, με τις τιμές φορτιστικότητας



Εικόνα 4.1.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 33, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 1,85 m είναι της τάξεως των

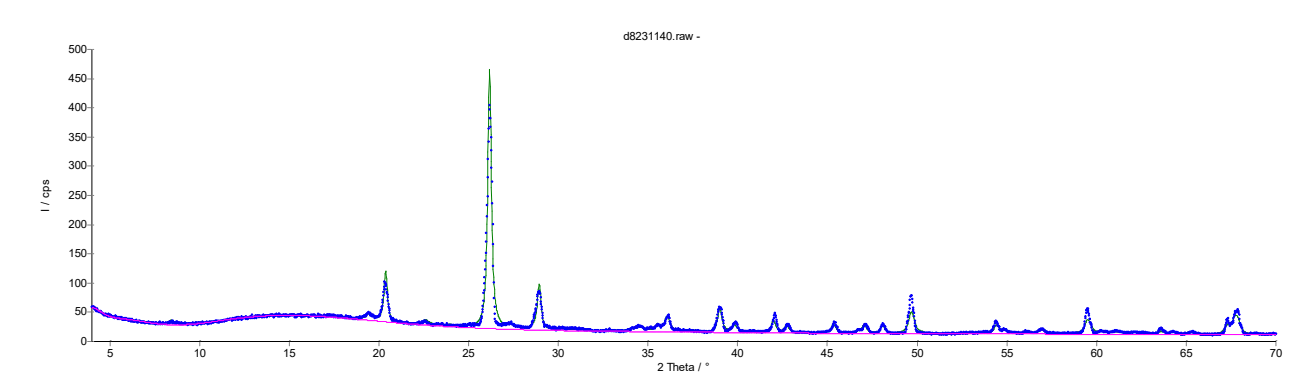
0.0086-0.0973 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης προσεγγίζουν τα 109.69-282.32 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται οριακά ευνοϊκές για την ανεύρεσή εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

Επιπλέον, γίνεται επίσης φανερό πως στα ανώτερα στρώματα της συγκεκριμένης γεωλογικής τομής και πιο συγκεκριμένα προς την δυτική πλευρά, εμφανίζονται ορισμένοι σκληροί εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλές τιμές της φορτιστικότητας, σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες των τομογραφιών.

Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/Ω*m
1	230.96	0.0652
2	133.29	0.0973
3	109.69	0.0900
4	116.6	0.0602
5	185.39	0.0212
6	282.32	0.0086

Πίνακας 3.2.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

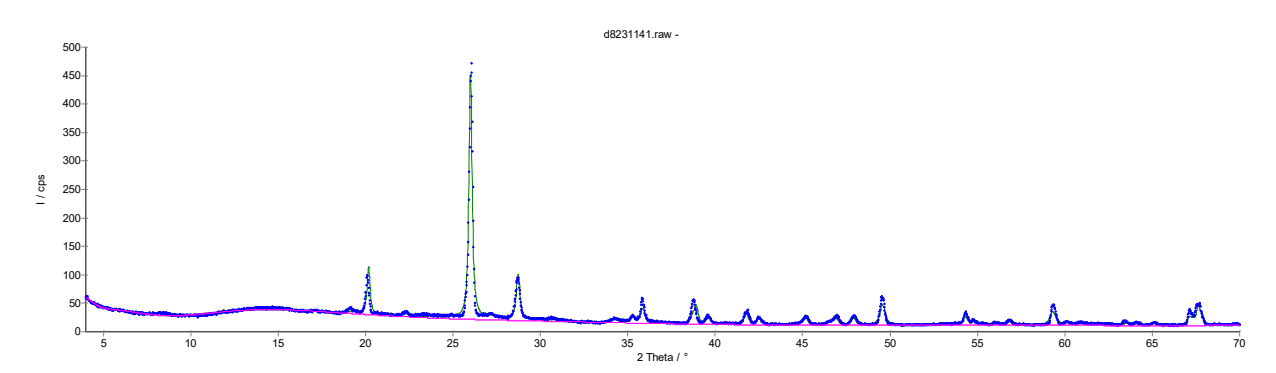
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα XRD, η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων στη συγκεκριμένη θέση παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες και πίνακες. Για το κάθε δείγμα, η εικόνα αναφέρεται στο ακτινογράφημα του κάθε δείγματος, και ο πίνακας στην % κατά βάρος (% κβ) ορυκτολογική σύσταση του κάθε δείγματος.



Εικόνα 4.1.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm

33-10	
Ένωση	(%)
Calcite	14.5
Chlorite	0.6
Illite	15.9
Paragonite	4.0
Plagioclase	1.4
Quartz	62.7
K-feldspar	0.9
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	20.5

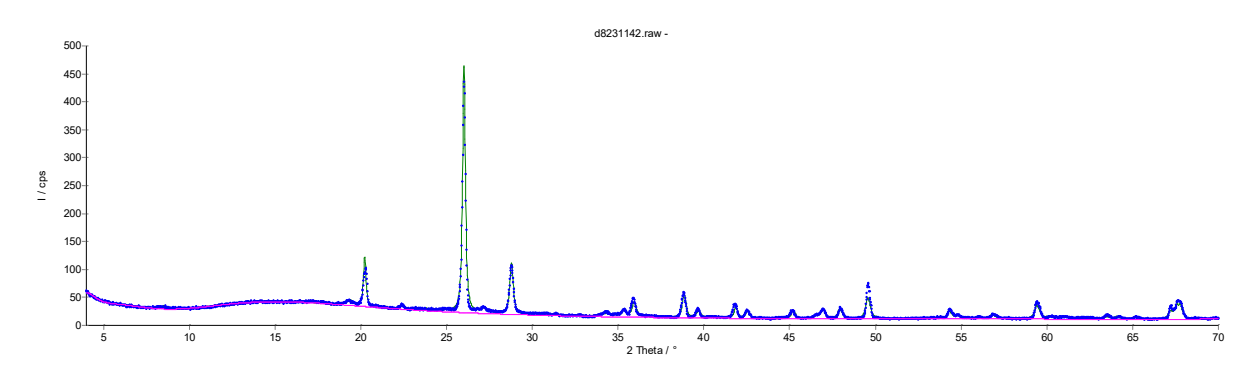
Πίνακας 3.2.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm



Εικόνα 4.1.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm

33-20	
Ένωση	(%)
Anatase	0.6
Calcite	17.9
Chlorite	0.6
Illite	15.9
Plagioclase	2.9
Quartz	58.9
K-feldspar	3.2
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	16.5

Πίνακας 3.2.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm

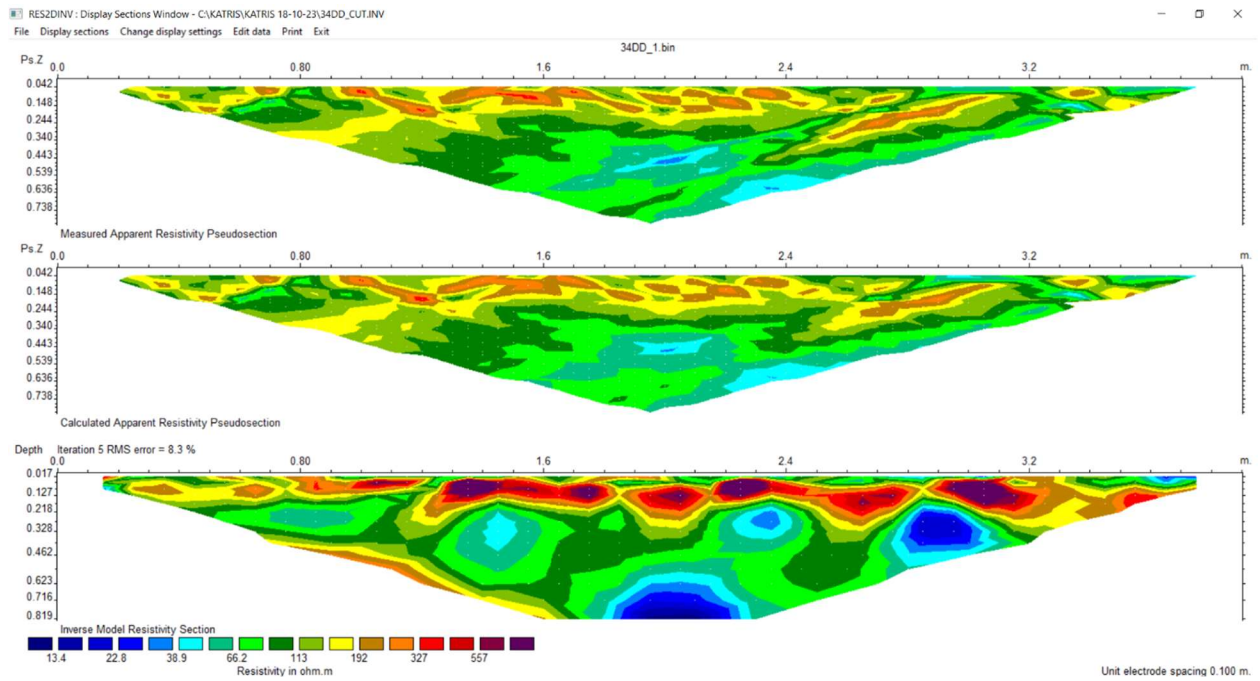


Εικόνα 4.1.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm

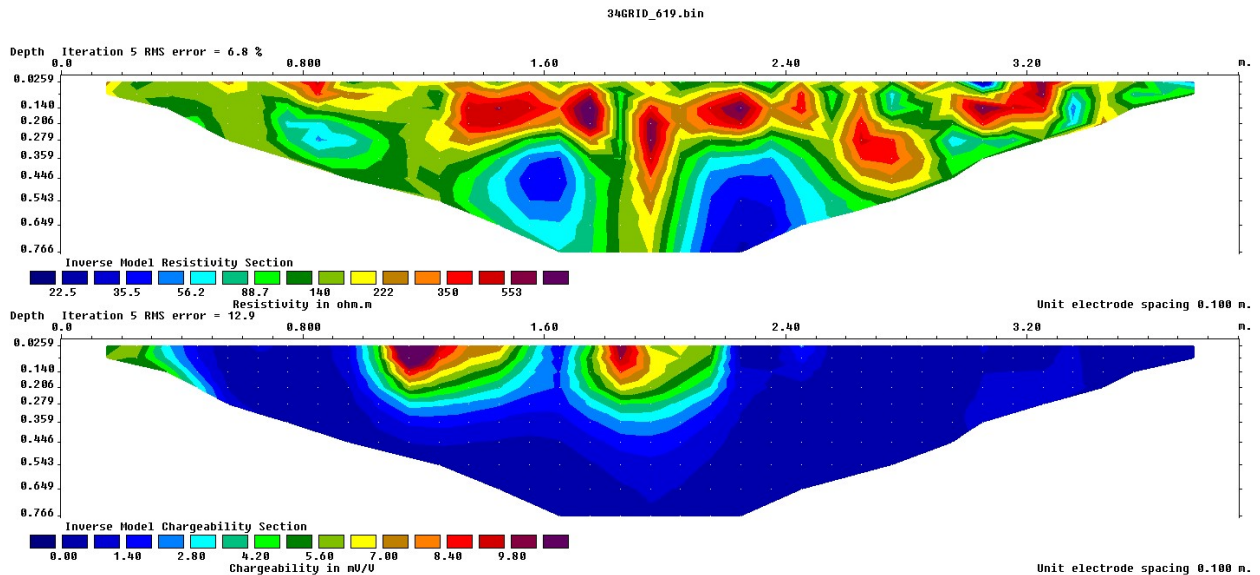
33-30	
Ένωση	(%)
Anatase	0.5
Calcite	20.6
Chlorite	0.7
Illite	13.8
Paragonite	2.6
Plagioclase Albite	1.6
Quartz	58.3
K-feldspar	1.9
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	17.1

Πίνακας 3.2.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm

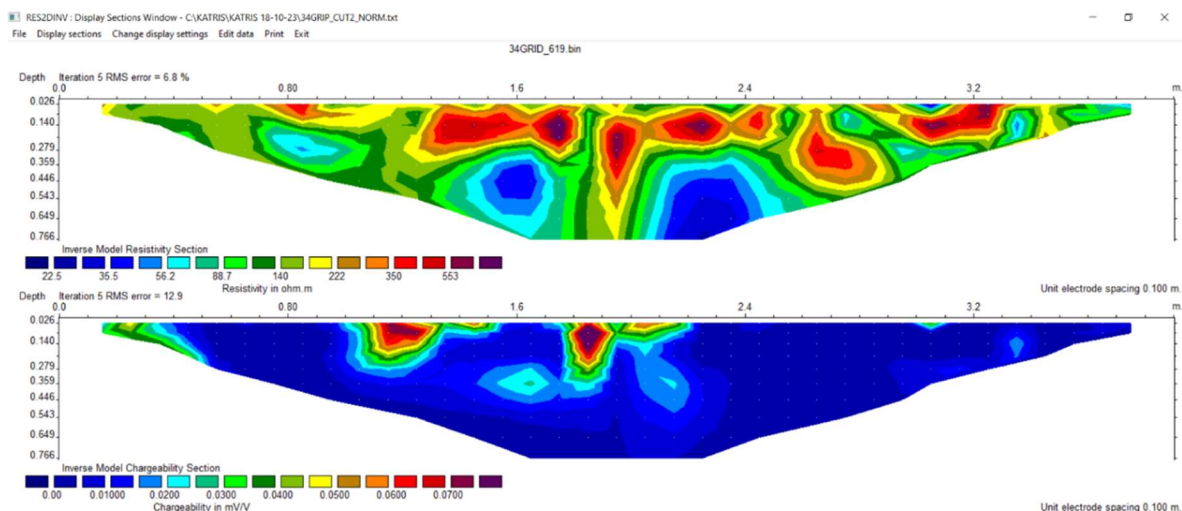
4.2.4 Σημείο 34 (Βουκολιές)



Εικόνα 4.2.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 34



Εικόνα 4.2.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 34, με τις τιμές φορτιστικότητας



Εικόνα 4.2.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 34, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

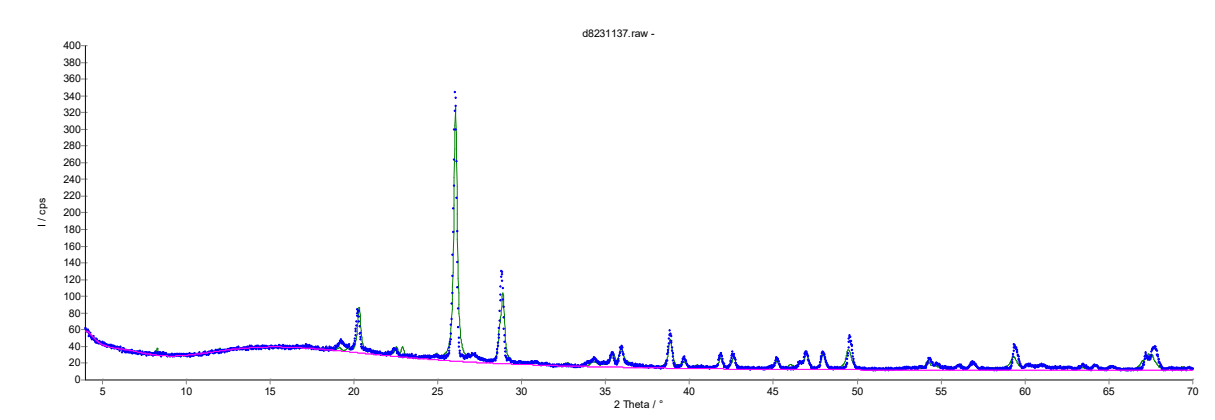
Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 1,85 m είναι της τάξεως των 0.0720-0.0840 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης αγγίζουν προσεγγιστικά τα 120-140 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται οριακά ευνοϊκές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

Επιπλέον, γίνεται επίσης φανερό πως στα ανώτερα στρώματα της συγκεκριμένης γεωλογικής τομής, πιο συγκεκριμένα προς το κεντρικό σημείο επί του μήκους της τομής, εμφανίζονται ορισμένοι σκληροί εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλές τιμές φορτιστικότητας.

Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/ Ω *m
1	161.63	0.065
2	96.574	0.103
3	99.863	0.084
4	100.89	0.066
5	98.875	0.042
6	110.29	0.024

Πίνακας 3.3.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

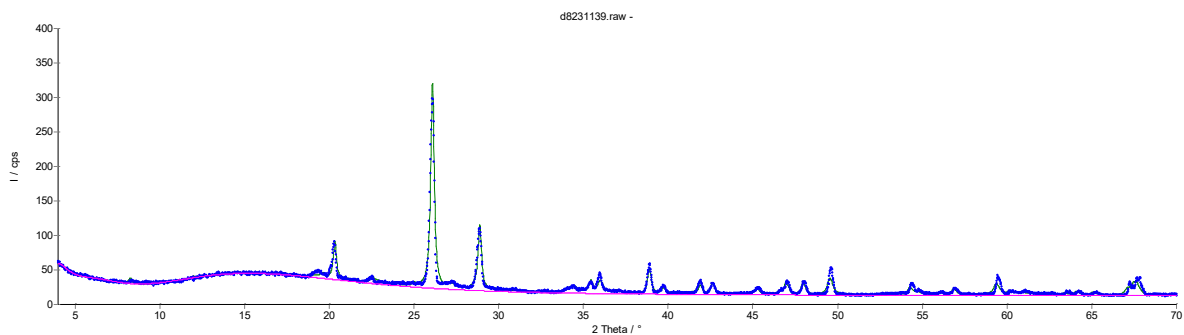
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα XRD, η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων στη συγκεκριμένη θέση παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες και πίνακες. Για το κάθε δείγμα, η εικόνα αναφέρεται στο ακτινογράφημα του κάθε δείγματος, και ο πίνακας στην % κατά βάρος (% κβ) ορυκτολογική σύσταση του κάθε δείγματος.



Εικόνα 4.2.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm

34-10	
Ένωση	(%)
Anatase	0.6
Calcite	23.1
Chlorite	2.8
Illite	16.5
Paragonite	2.6
Plagioclase	2.0
Quartz	49.4
K-feldspar	3.0
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	21.9

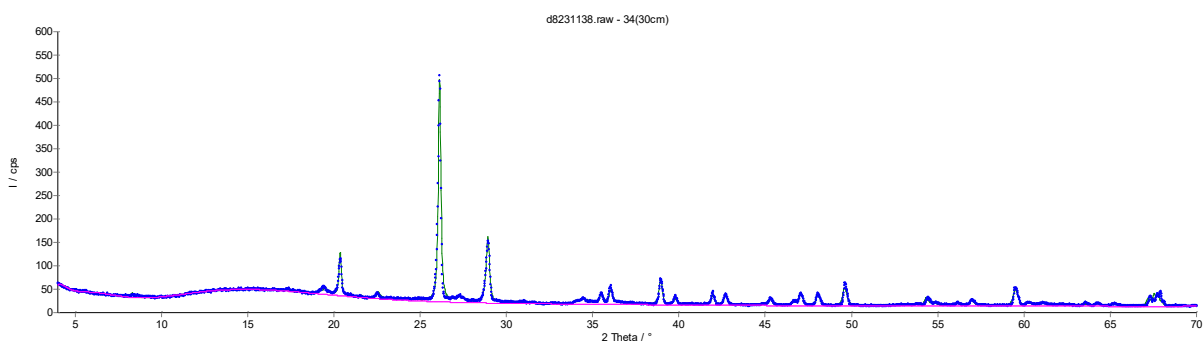
Πίνακας 3.3.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm



Εικόνα 4.2.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm

34-20	
Ένωση	(%)
Anatase	0.6
Calcite	22.6
Chlorite	2.0
Illite	22.1
Paragonite	0.8
Plagioclase Albite	2.2
Quartz	46.6
K-feldspar	3.1
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	24.9

Πίνακας 3.3.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm

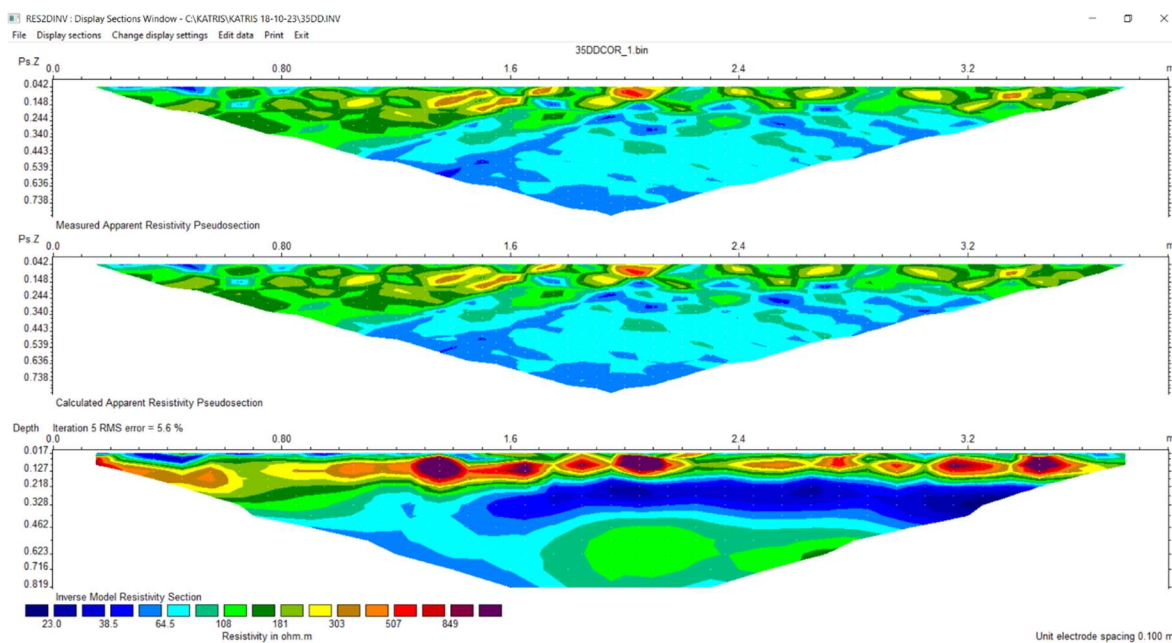


Εικόνα 4.2.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm

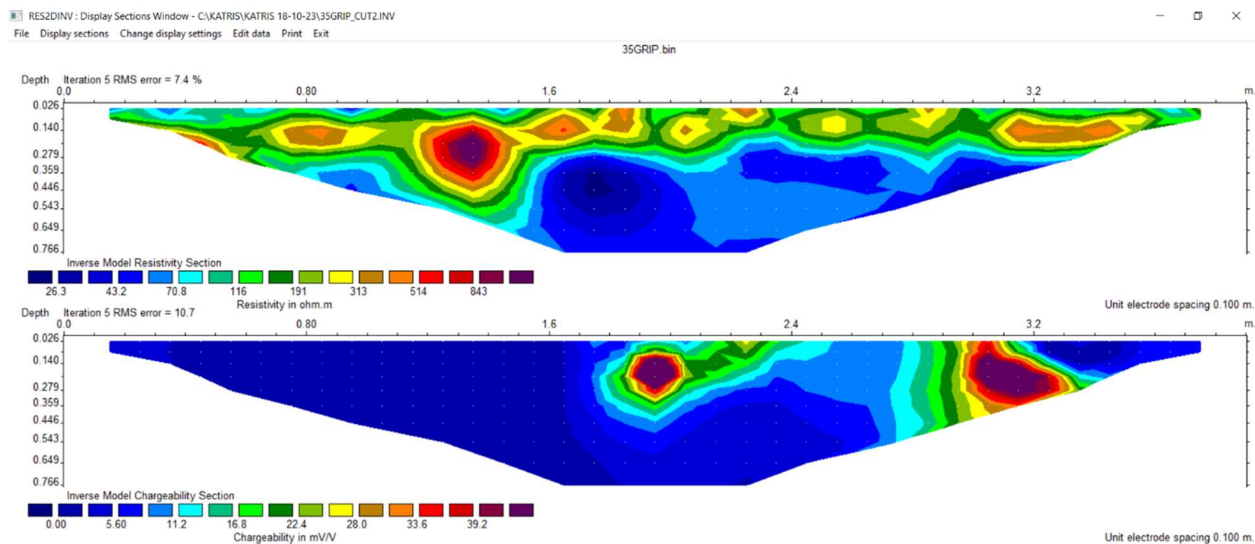
34-30	
Ένωση	(%)
Anatase	0.6
Calcite	23.0
Chlorite	3.7
Illite	17.8
Paragonite	4.9
Plagioclase Albite	2.5
Quartz	44.6
K-feldspar	2.9
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	26.4

Πίνακας 3.3.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm

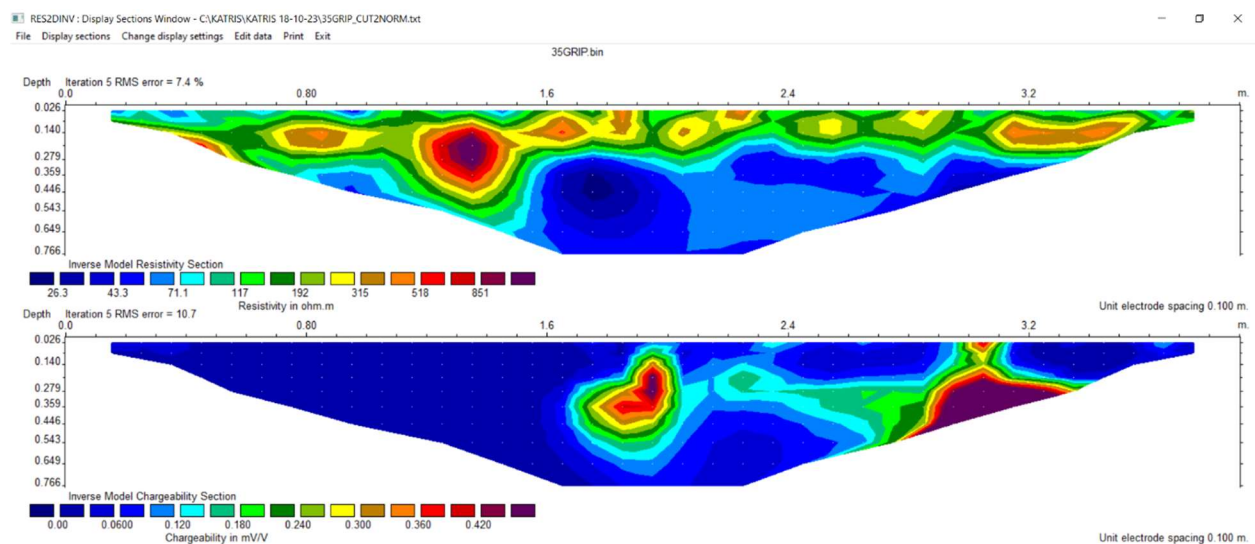
4.2.5 Σημείο 35 (Βουκολιές)



Εικόνα 4.3.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 35



Εικόνα 4.3.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 35, αναπαριστώντας τις τιμές τις φορτιστικότητας



Εικόνα 4.3.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 35, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

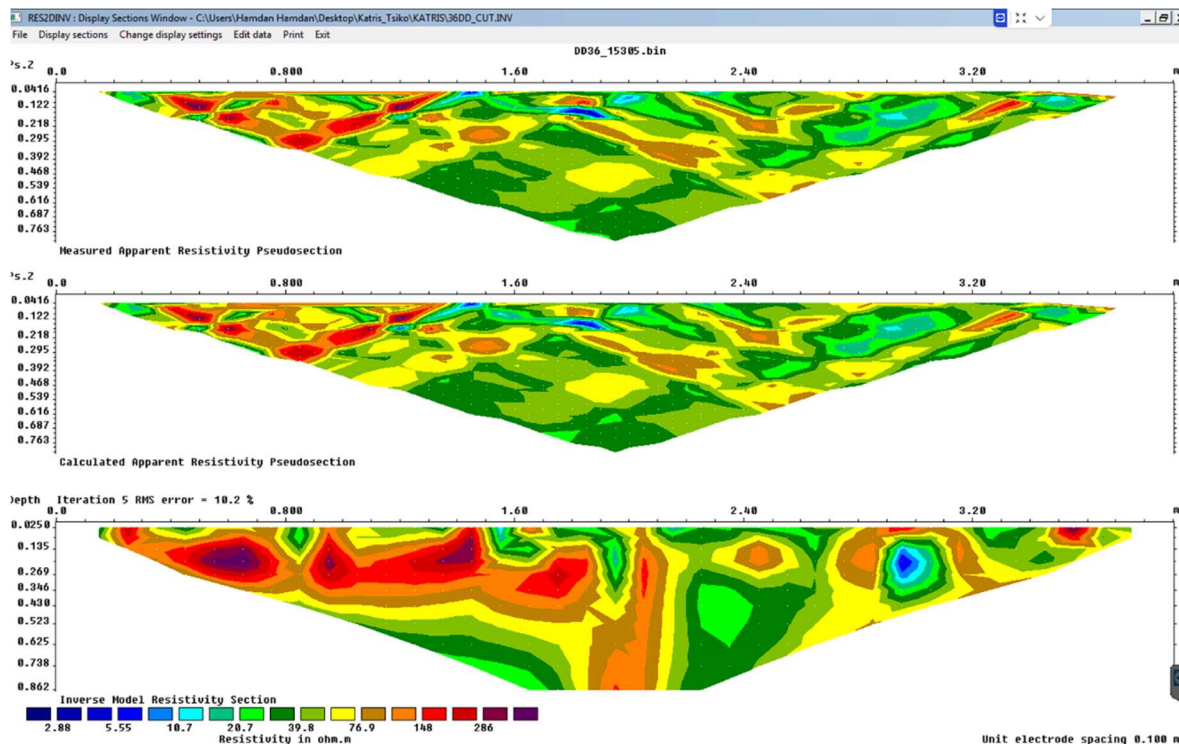
Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω ηλεκτρικές τομογραφίες του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 3,0 m είναι της τάξεως των 0.1195-0.5435 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης αγγίζουν προσεγγιστικά τα 41.69-197.52

ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποτρεπτικές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

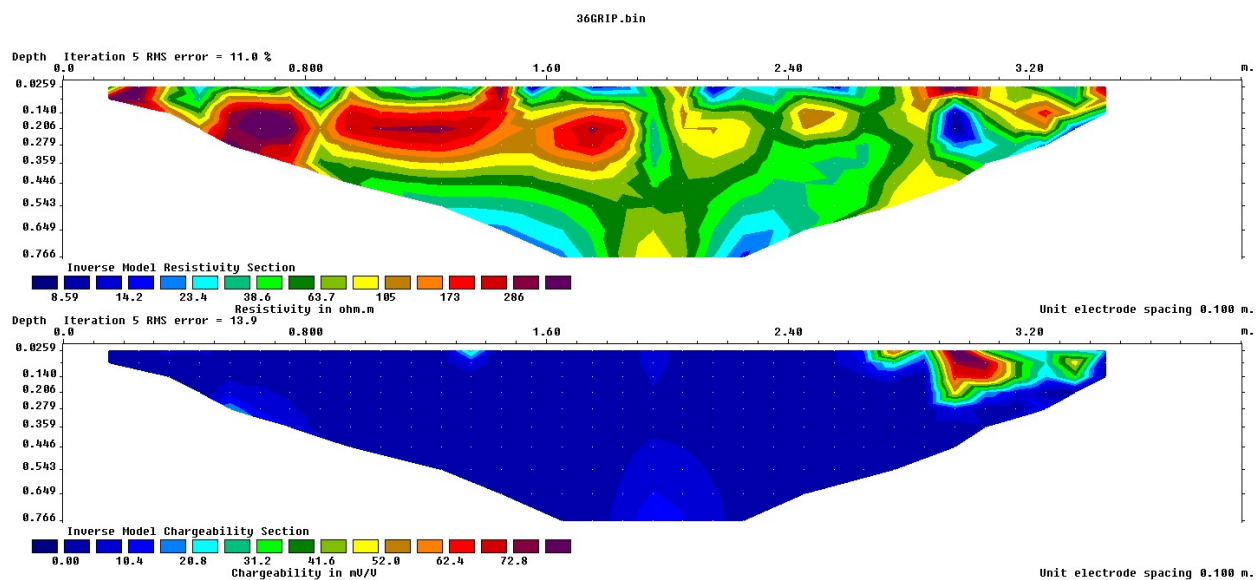
Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/Ω*m
1	197.52	0.1195
2	181.47	0.1222
3	148.1	0.1555
4	89.07	0.2700
5	54.31	0.4405
6	41.69	0.5435

Πίνακας 3.4 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

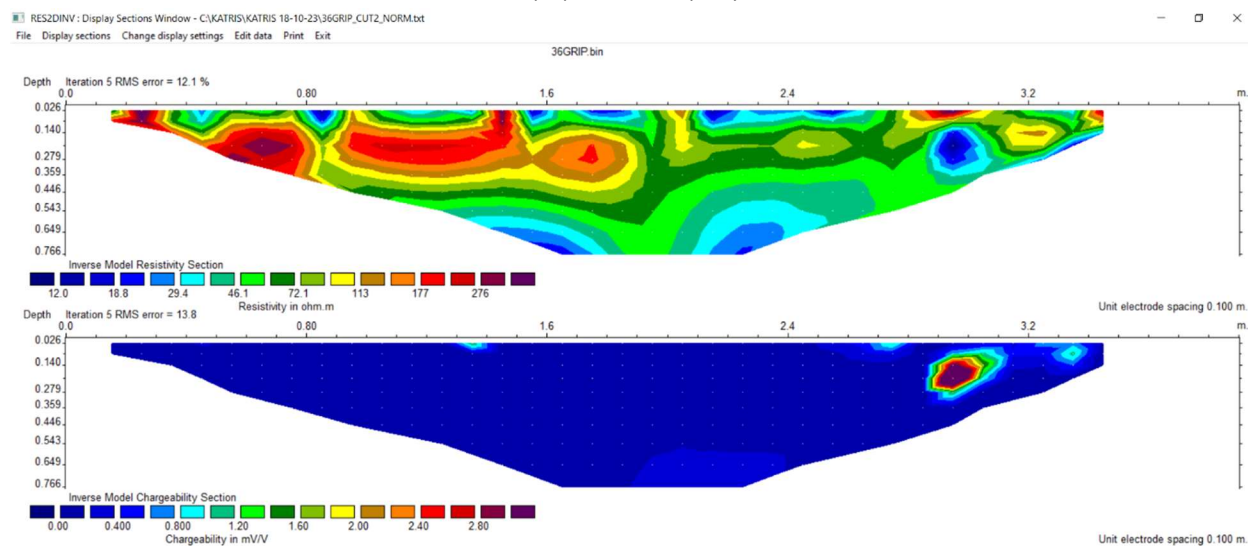
4.2.6 Σημείο 36 (Βουκολιές)



Εικόνα 4.4.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 36



Εικόνα 4.4.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 36, με τις τιμές φορτιστικότητας



Εικόνα 4.4.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 36, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 3,0 m είναι της τάξεως των 0.0548-5.0467 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης αγγίζουν προσεγγιστικά τα 11.13-435.34

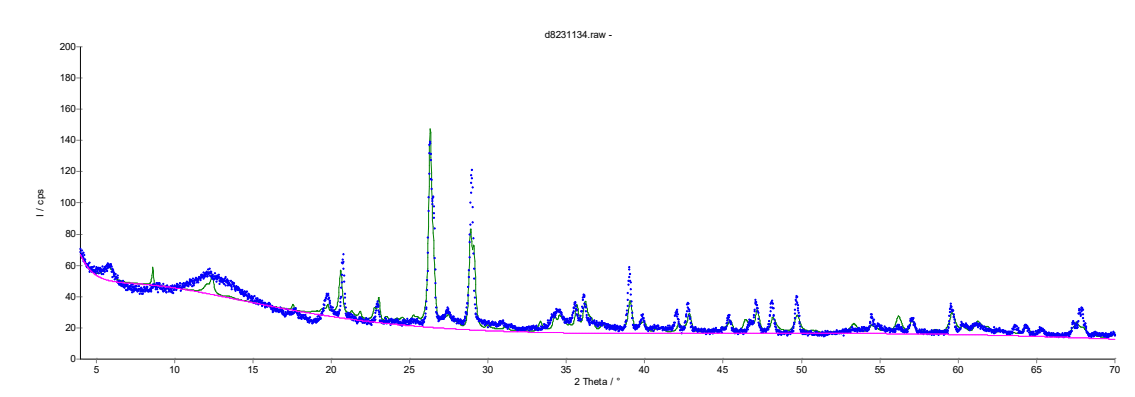
ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται οριακά ευνοϊκές για την ανεύρεσή εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

Επιπλέον, γίνεται επίσης φανερό πως στα ανώτερα στρώματα της συγκεκριμένης γεωλογικής τομής, πιο συγκεκριμένα προς την δυτική πλευρά, εμφανίζονται ορισμένοι σκληροί εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι υποδηλώνονται υπό την υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλή φορτιστικότητα, σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες των τομογραφιών.

Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/Ω*m
1	435.34	0.1764
2	82.57	0.7684
3	18.20	3.1896
4	11.13	5.0467
5	18.46	1.1592
6	35.43	0.0548

Πίνακας 3.5.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

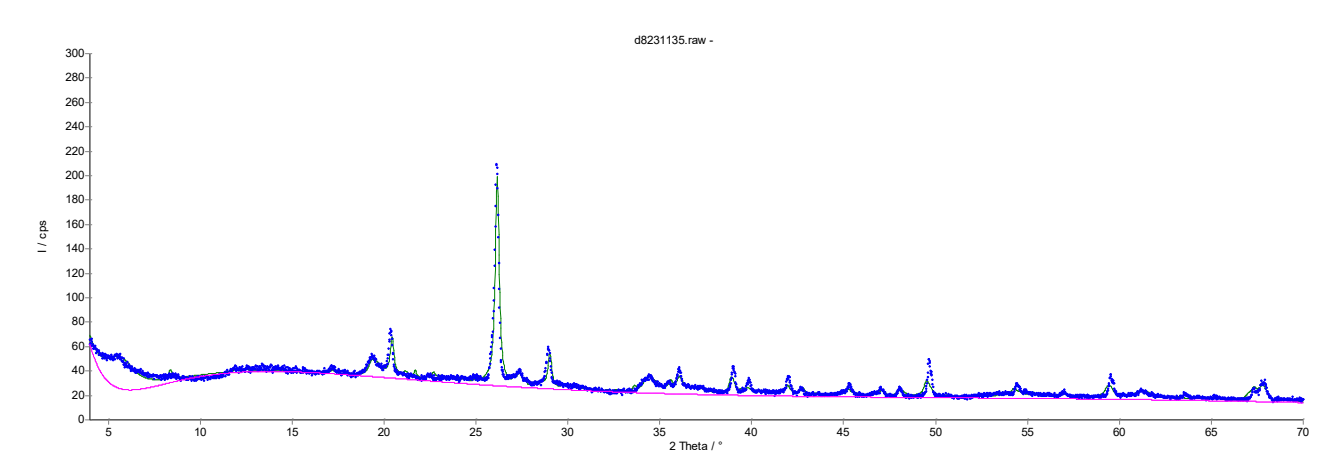
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα XRD, η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων στη συγκεκριμένη θέση παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες και πίνακες. Για το κάθε δείγμα, η εικόνα αναφέρεται στο ακτινογράφημα του κάθε δείγματος, και ο πίνακας στην % κατά βάρος (% κβ) ορυκτολογική σύσταση του κάθε δείγματος.



Εικόνα 4.4.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm

36-10	
Ένωση	(%)
Calcite	21.3
Chlorite	11.1
Illite	25.1
Kaolinite	9.2
Plagioclase	3.3
Quartz	24.5
K-feldspar	4.3
Smectite	1.2
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	46.6

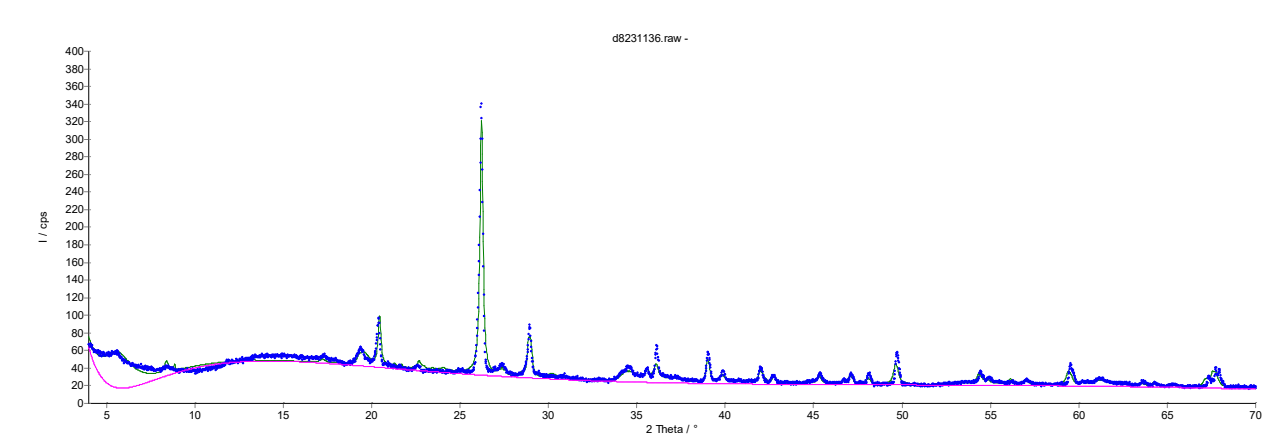
Πίνακας 3.5.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm



Εικόνα 4.4.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm

36-20	
Ένωση	(%)
Anatase	0.6
Calcite	8.9
Chlorite	6.4
Illite	27.2
Kaolinite	2.2
Plagioclase	4.0
Quartz	29.9
K-feldspar	3.2
Smectite	17.6
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	53.4

Πίνακας 3.5.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από το βάθος των 20cm

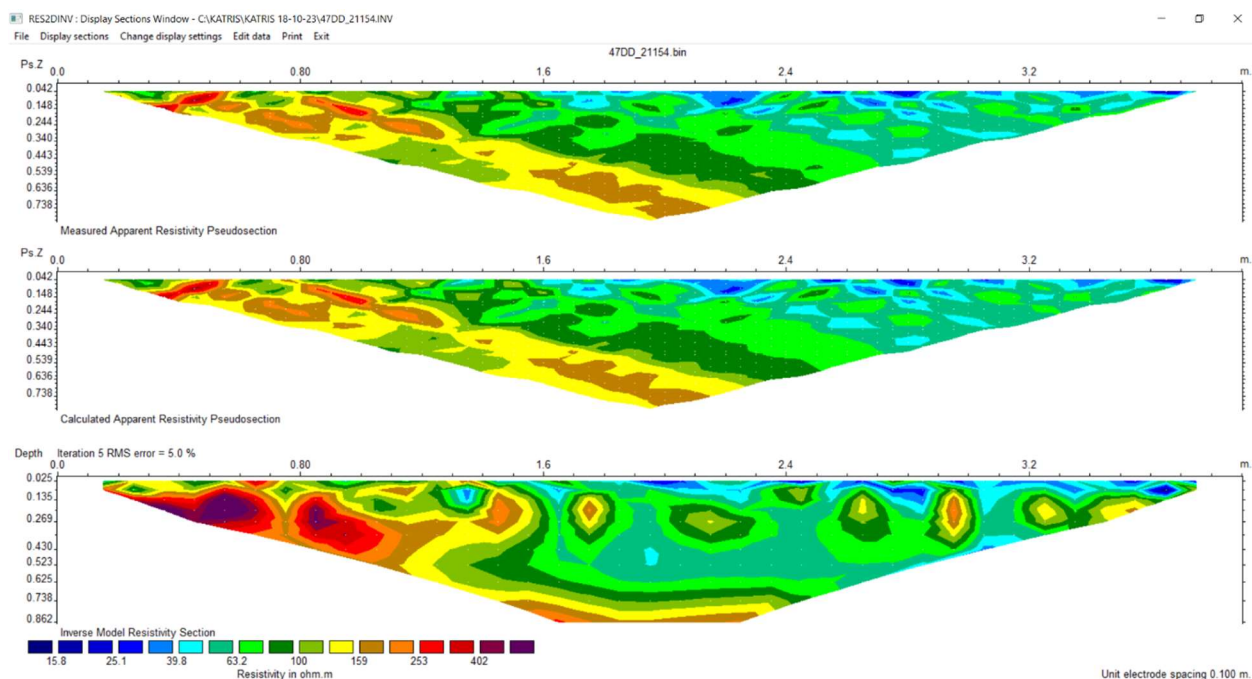


Εικόνα 4.4.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm

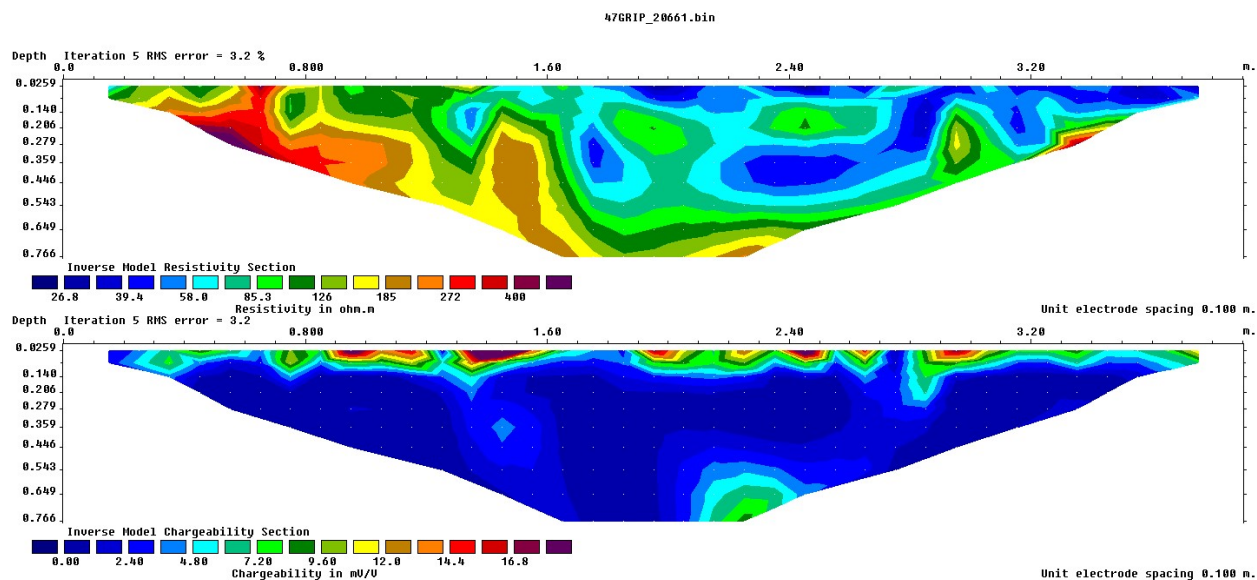
36-30	
Ένωση	(%)
Calcite	9.5
Illite	20.3
Paragonite	5.5
Plagioclase	0.8
Quartz	38.8
K-feldspar	1.7
Smectite	24.2
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	50

Πίνακας 3.5.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm

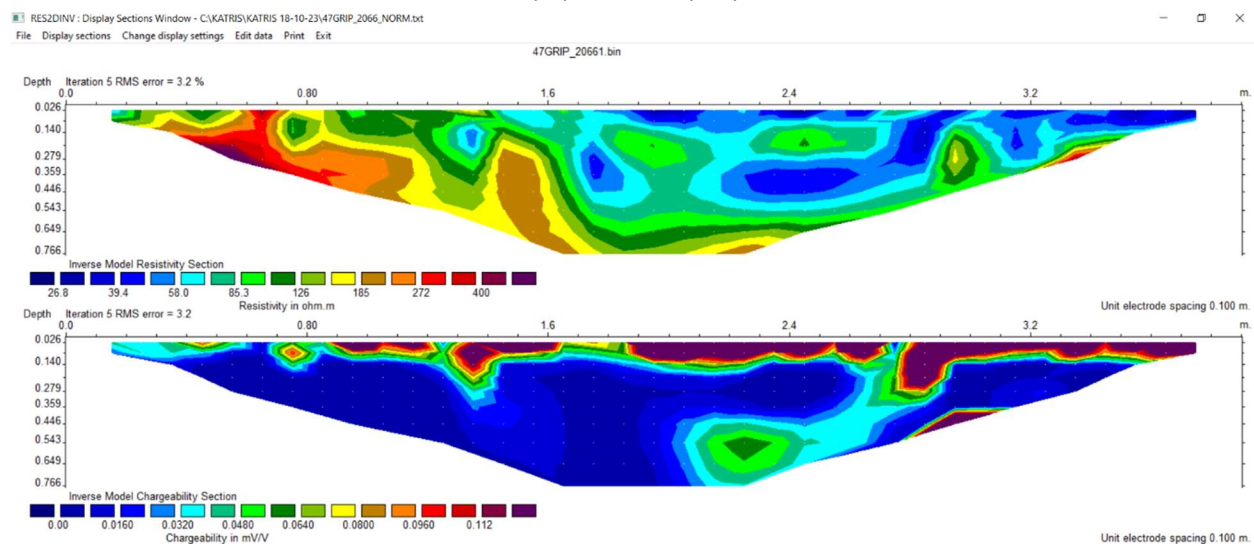
4.2.7 Σημείο 47 (Βουκολιές)



Εικόνα 4.5.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 47



Εικόνα 4.5.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 47, με τις τιμές φορτιστικότητας



Εικόνα 4.5.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 47, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

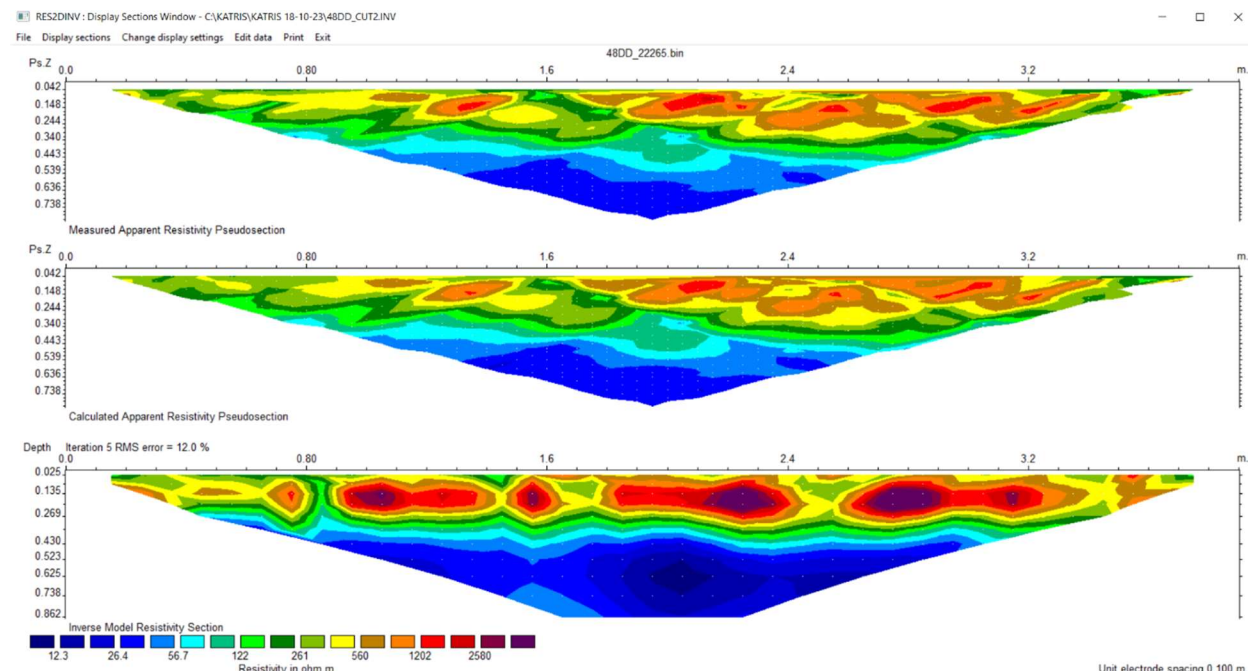
Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 1,35 m είναι της τάξεως των 0.0254-0.1671 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης κυμαίνονται από 48.88 έως 173.56 ohm*m.

Οι τιμές αυτές θεωρούνται οριακά αποτρεπτικές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

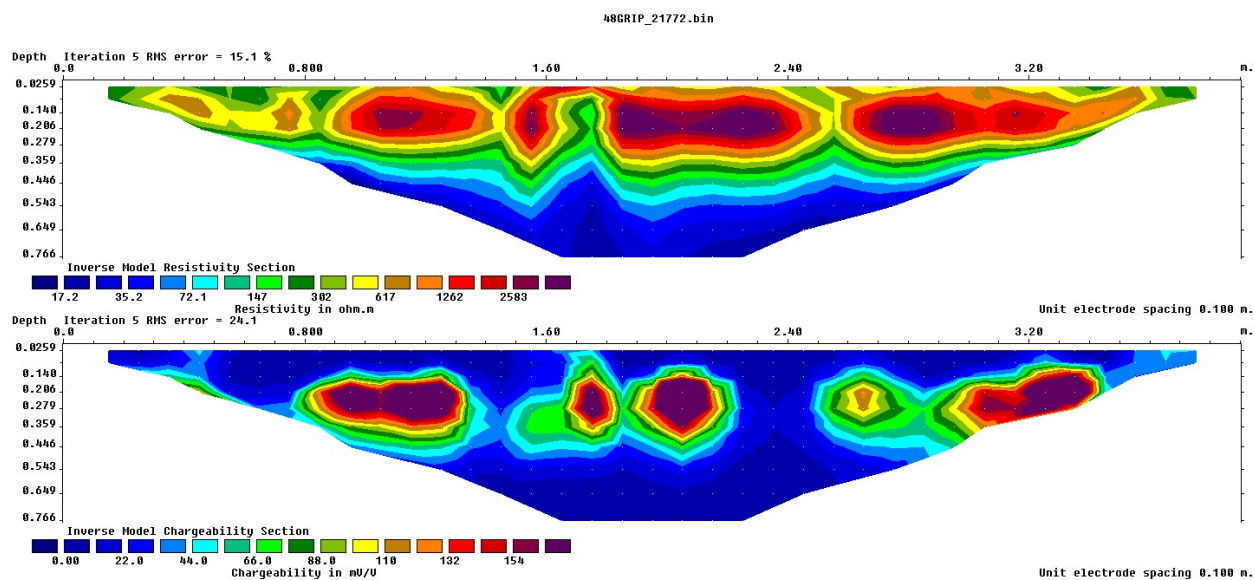
Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) ($\Omega\text{m}\cdot\text{m}$)	Κανονικοποιημένη Φορ. ($\text{mV/V}/\Omega\cdot\text{m}$)
1	173.56	0.1101
2	78.39	0.1671
3	48.88	0.1234
4	52.05	0.0756
5	80.46	0.0407
6	110.76	0.0254

Πίνακας 3.6 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

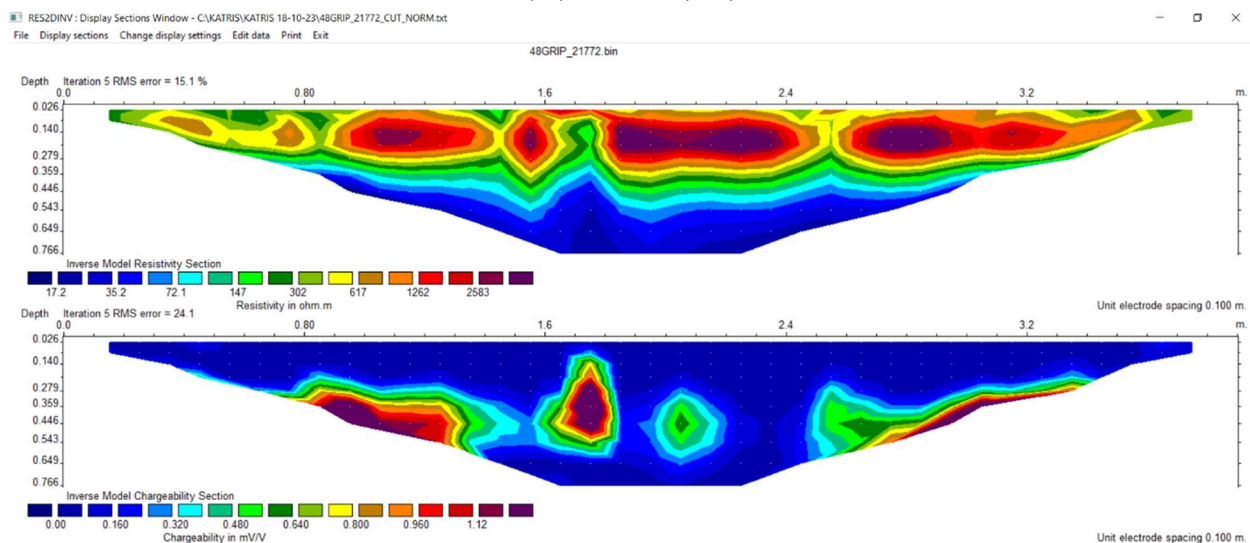
4.2.8 Σημείο 48 (Βουκολιές)



Εικόνα 4.6.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 48



Εικόνα 4.6.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 48, με τις τιμές φορτιστικότητας



Εικόνα 4.6.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 48, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω ηλεκτρικές τομογραφίες του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 0.85 m μέτρων είναι της τάξεως των 0.0006-1.4699 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης κυμαίνονται από 58.731 έως

365.69 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποτρεπτικές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

Επιπλέον, γίνεται επίσης φανερό πως στα ανώτερα στρώματα της συγκεκριμένης γεωλογικής τομής, πιο συγκεκριμένα προς το κεντρικό σημείο επί το μήκος της τομής, εμφανίζονται ορισμένοι σκληροί εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι υποδηλώνονται υπό την υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση και τη χαμηλή φορτιστικότητα, σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες των τομογραφιών.

Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/ Ω *m
1	306.78	0.0006
2	203.29	0.0015
3	298.94	0.0757
4	365.69	0.3545
5	149.29	0.7555
6	58.731	1.4699

Πίνακας 3.7 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

4.3 Περιοχή Κολυμπαρίου

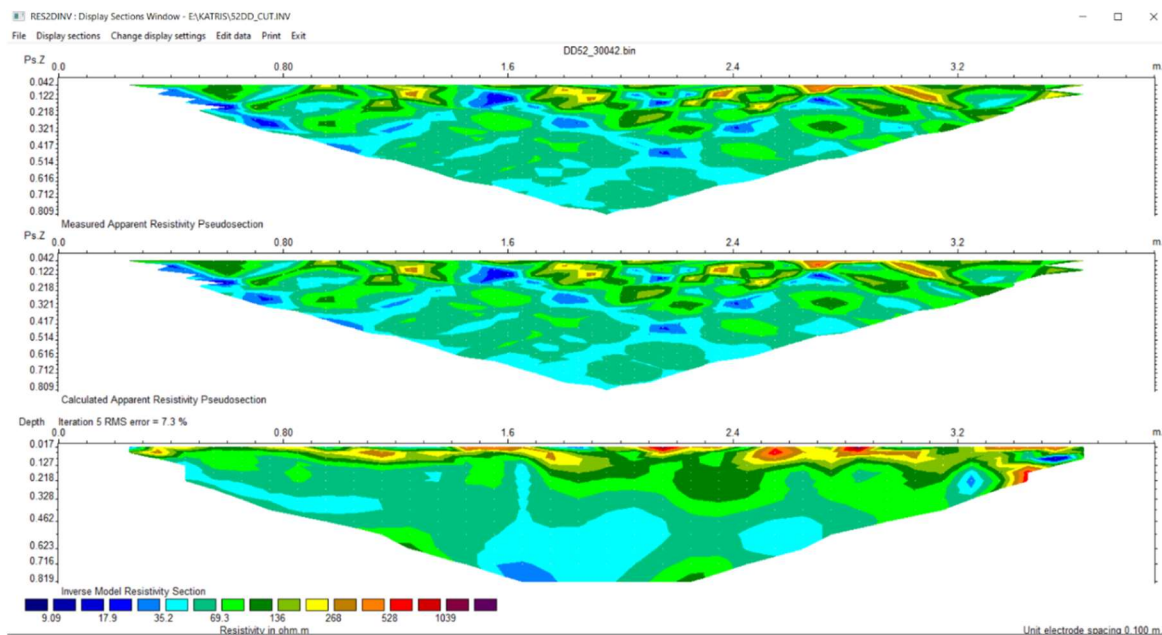
Στην ευρύτερη περιοχή του Κολυμπαρίου πραγματοποιηθήκαν οι μετρήσεις των σημείων 52,55,57,65 & 67 της εργασίας, με απώτερο στόχο τον ακριβή χαρακτηρισμό των αργιλικών σχηματισμών των στις θέσεις δειγματοληψιών του κάθε προαναφερθέντος σημείου. Στις παρακάτω παραγράφους απεικονίζονται αναλυτικά οι ακριβείς χαρακτηρισμοί των δειγματοληψιών καθώς επίσης και οι ακριβείς θέσεις των δειγματοληψιών στα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς το “ΕΓΣΑ 87” και το “WGS”.

Θα πρέπει επιπλέον να σημειωθεί πως από τα πέντε συνολικά σημεία τα οποία μετρήθηκαν, τα σημεία “52”, “55” και “57”, δεν περιείχαν επαρκές αργιλικό υλικό στα σημεία δειγματοληψίας τους, πράγμα το οποίο θα εξεξηγηθεί κιόλας και στις παρακάτω ηλεκτρικές τους τομογραφίες. Συνεπώς, δεν εξετάστηκαν περεταίρω οι εδαφικοί σχηματισμοί.

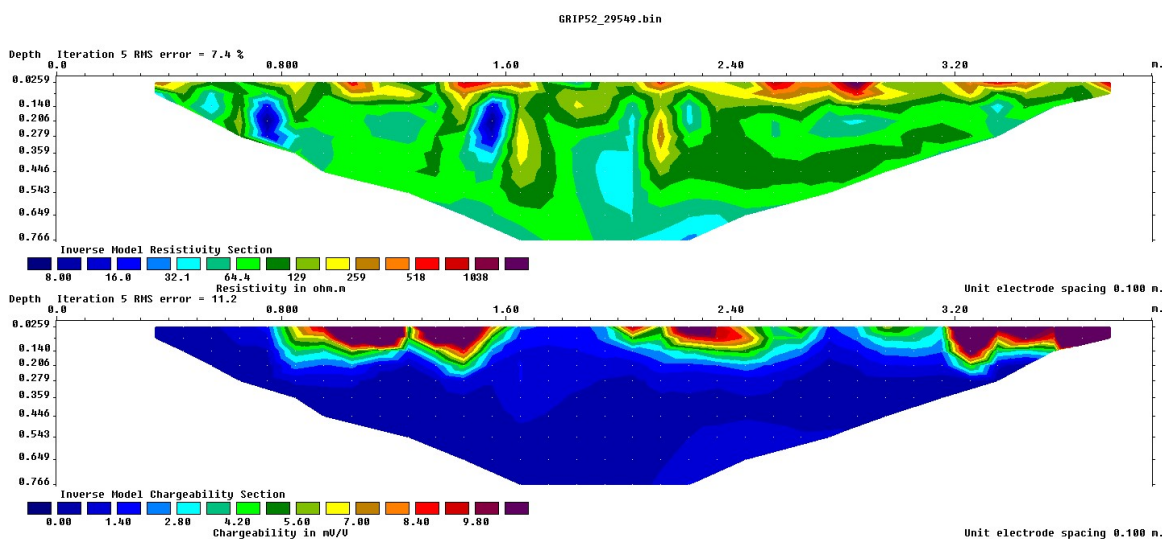
	“ΕΓΣΑ 87”		“WGS”	
	X	Y	X	Y
“NE65NEWSA”	480336.379	3928234.889	35.500079288314	23.784826378928
“67NEWSA”	480686.918	3930020.162	35.516183201973	23.788649284941

Πίνακας 4.1 Συντεταγμένες σημείων 65 & 67

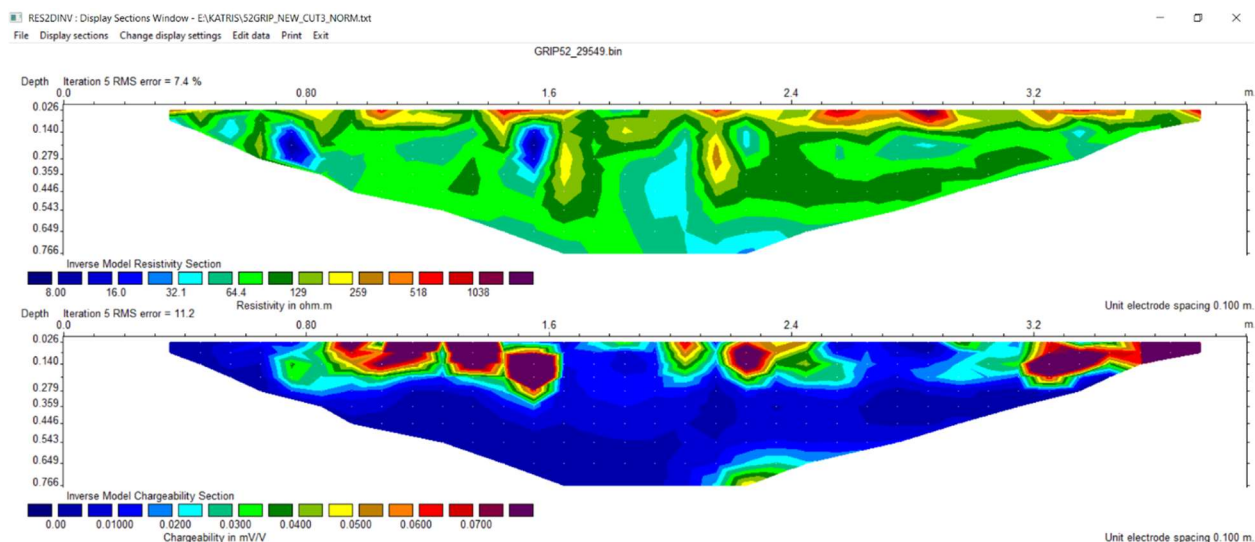
4.3.1 Σημείο 52 (Κολυμπάρι)



Εικόνα 4.7.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 52



Εικόνα 4.7.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 52, με τις τιμές φορτιστικότητας



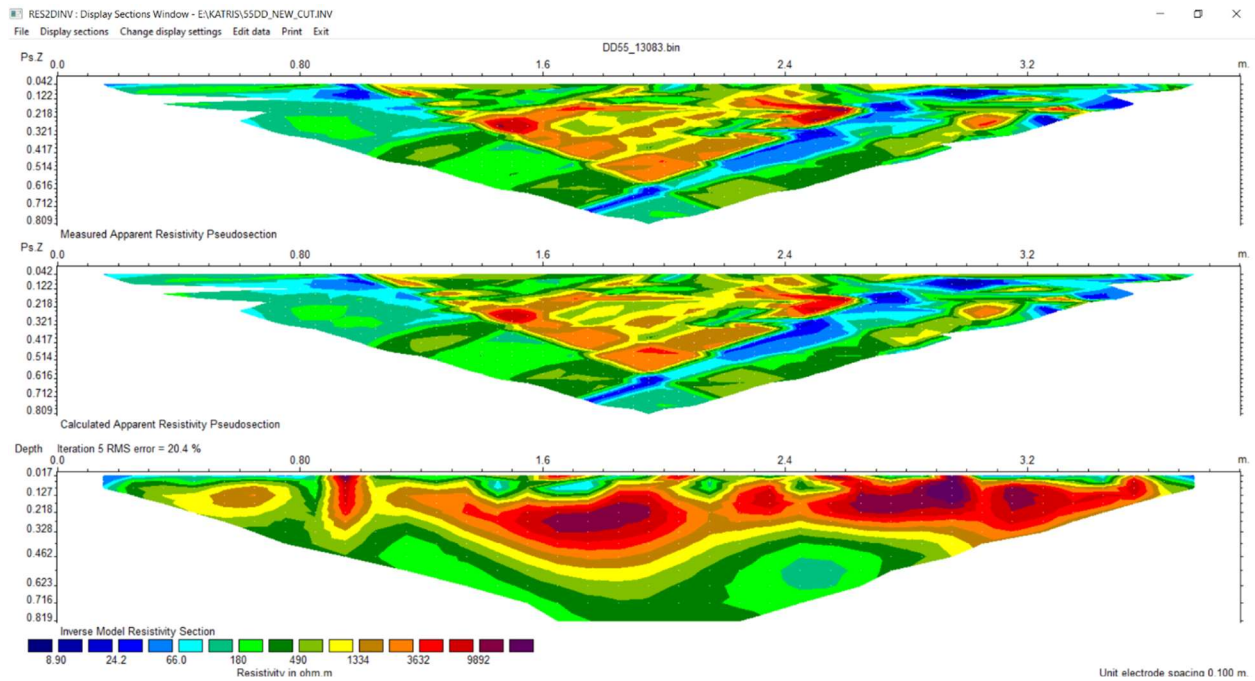
Εικόνα 4.7.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 52, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 2.4 m είναι της τάξεως των 0.0046-0.0524 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης αγγίζουν προσεγγιστικά τα 114.36-205.97 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποτρεπτικές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

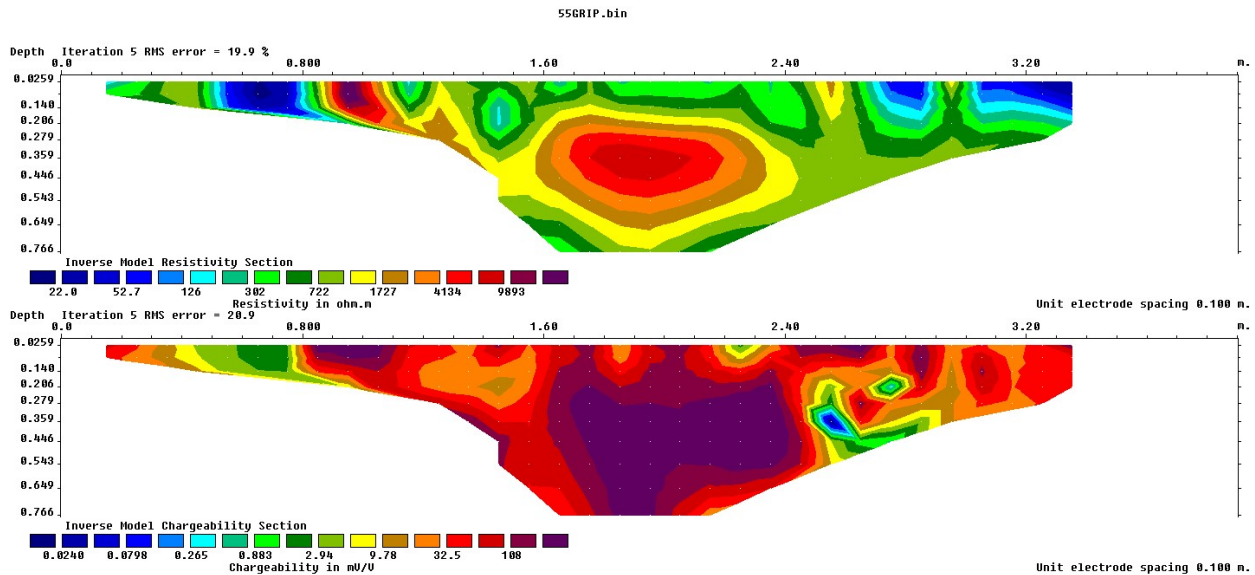
Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/Ω*m
1	205.97	0.0477
2	181.24	0.0524
3	137.49	0.0357
4	116.51	0.0176
5	114.36	0.0070
6	122.51	0.0046

Πίνακας 4.2 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

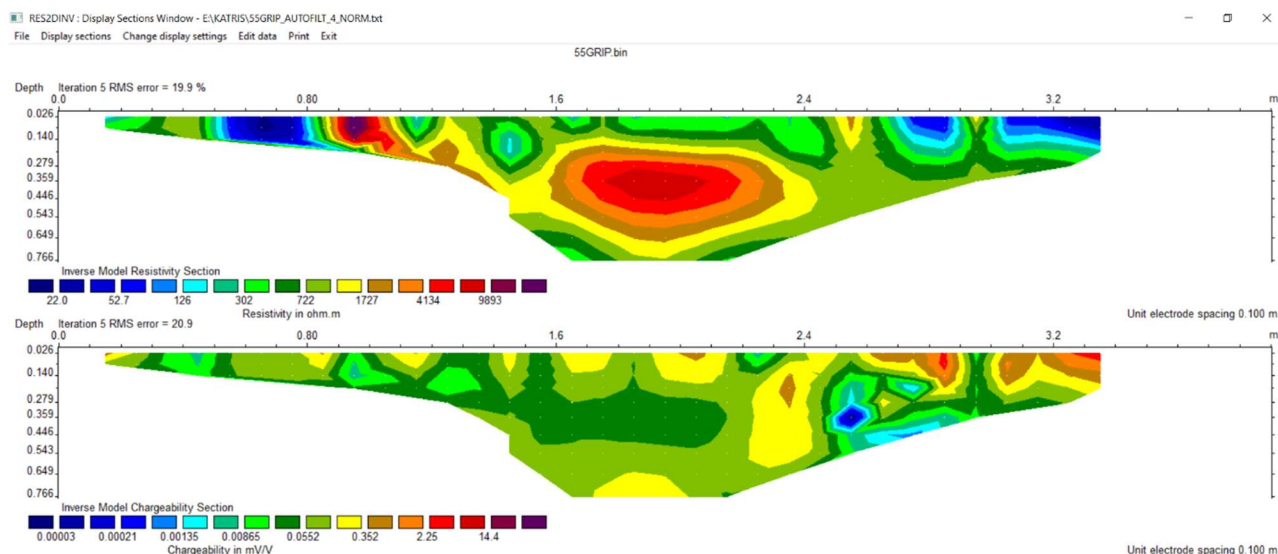
4.2.2 Σημείο 55 (Κολυμπάρι)



Εικόνα 4.8.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 55



Εικόνα 4.8.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 55, με τις τιμές φορτιστικότητας



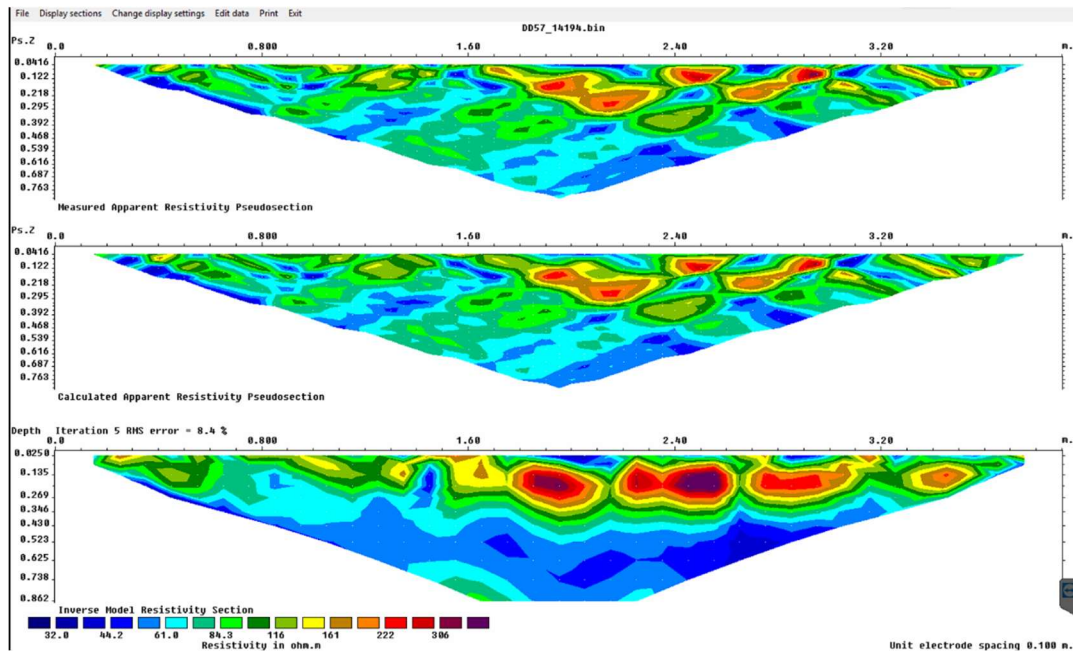
Εικόνα 4.8.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 55, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 1,1 m είναι της τάξεως των 0.00984-0.0585 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης κυμαίνονται από 722 έως 1727 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποτρεπτικές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως κατά την επεξεργασία των μετρήσεων του συγκεκριμένου σημείου κρίθηκε ως απαραίτητη η αφαίρεση ενός αξιοσημείωτου αριθμού μετρήσεων, οι οποίες απείχαν κατά πολύ από τον μέσο όρο των ρεαλιστικών μεγεθών αποτύπωσης των μετρήσεων. Η μεγάλη αυτή απήχηση στις τιμές οφειλόταν κυρίως στα χαρακτηριστικά του εδάφους, το οποίο περιελάμβανε κυρίως από χώματα με πολύ χαμηλή υγρασία και συνεκτικότητα.

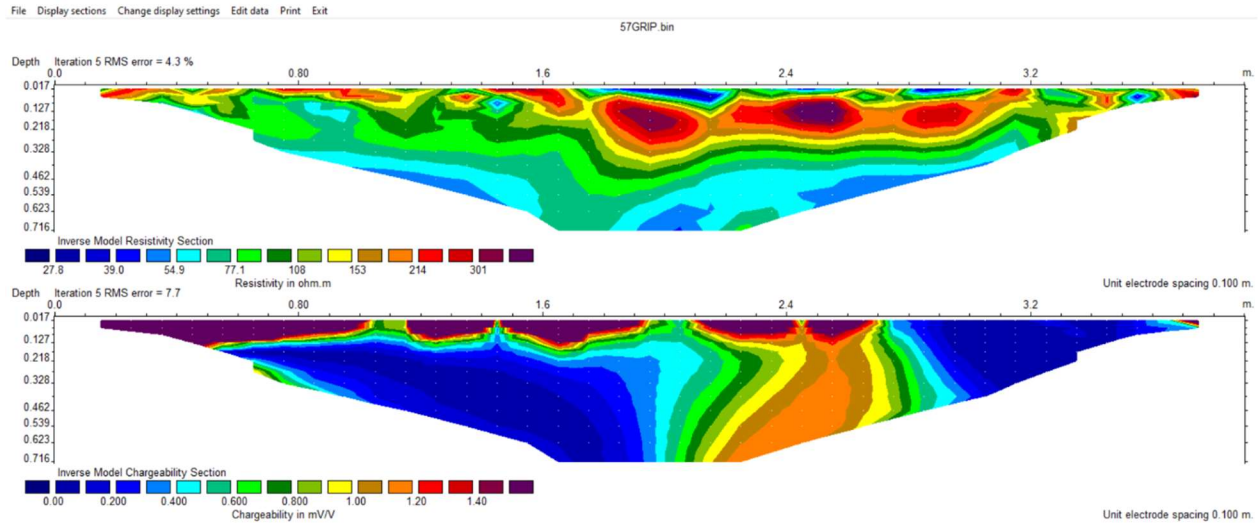
Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/ Ω *m
1	2183.5	0.1158
2	2901.9	0.0674
3	6557.6	0.0156
4	4183.6	0.0253
5	1964.5	0.0449
6	2049.7	0.0856

Πίνακας 4.3 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

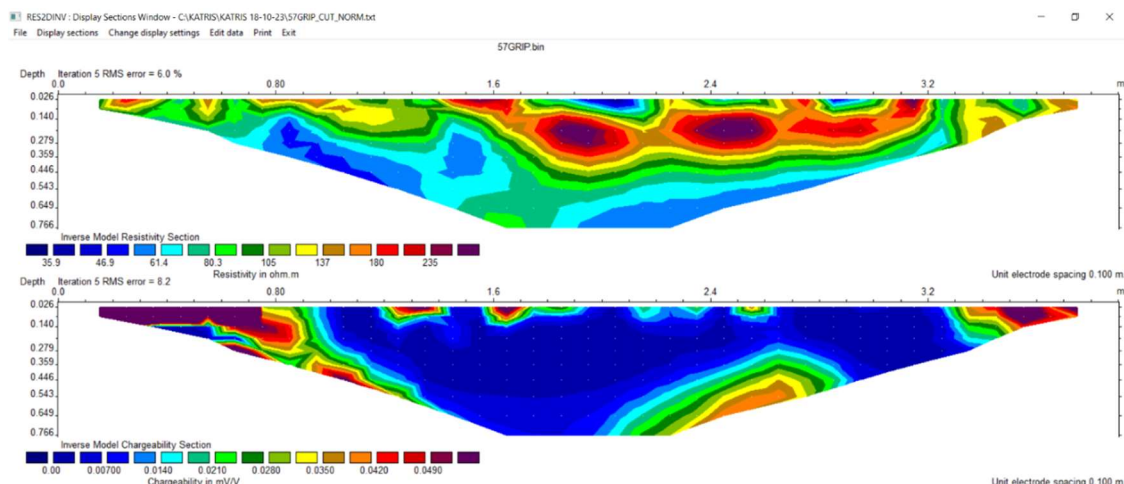
4.3.3 Σημείο 57 (Κολυμπάρι)



Εικόνα 4.9.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 57



Εικόνα 4.9.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 57, με τις τιμές φορτιστικότητας



Εικόνα 4.9.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 57, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

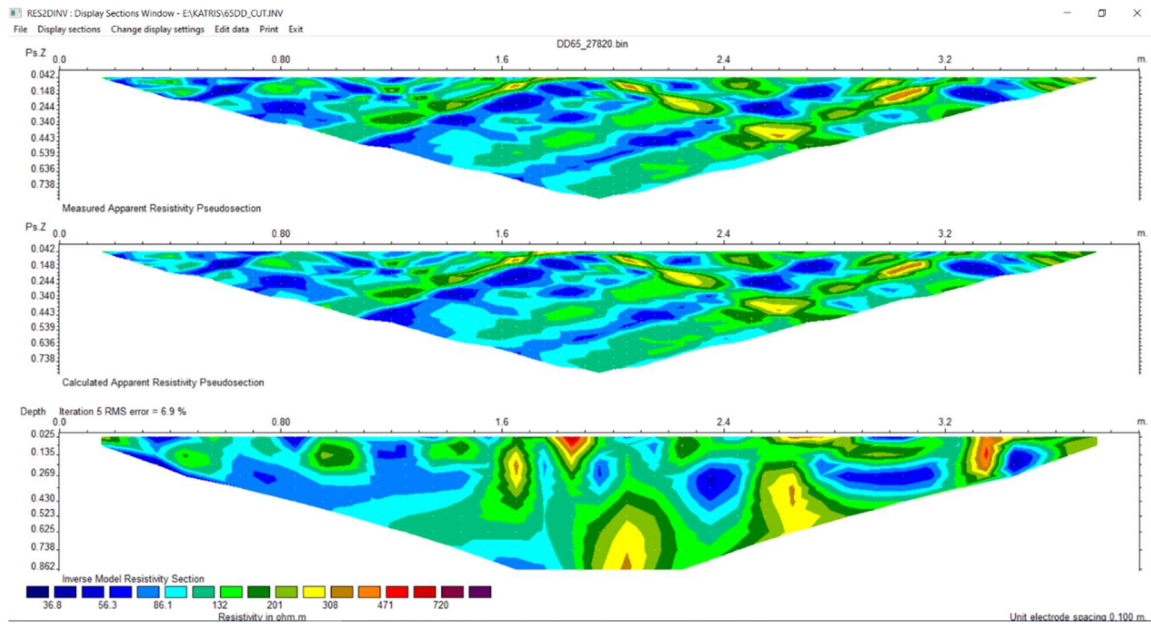
Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2din, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 1.1 (m) μέτρων είναι της τάξεως των 0.0022-0.0275 (mS/m), ενώ οι τιμές της αντίστασης αγγίζουν προσεγγιστικά τα 74.16-144.45 (ohm*m). Πράγμα το οποίο κρίνεται ως αποτρεπτικό για την ανεύρεσή εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο, μιας και οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας δεν ξεπερνούν τα 0.07 mS/m.

Επιπλέον, γίνεται επίσης φανερό πως στα ανώτερα στρώματα της συγκεκριμένης γεωλογικής τομής, πιο συγκεκριμένα προς την ανατολική πλευρά, εμφανίζονται ορισμένοι σκληροί εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι υποδηλώνονται υπό την υψηλή έκθεση τους σε ειδική ηλεκτρική αντίσταση και ταυτοχρόνως στις χαμηλές τιμές της φορτιστικότητας, σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες των τομογραφιών.

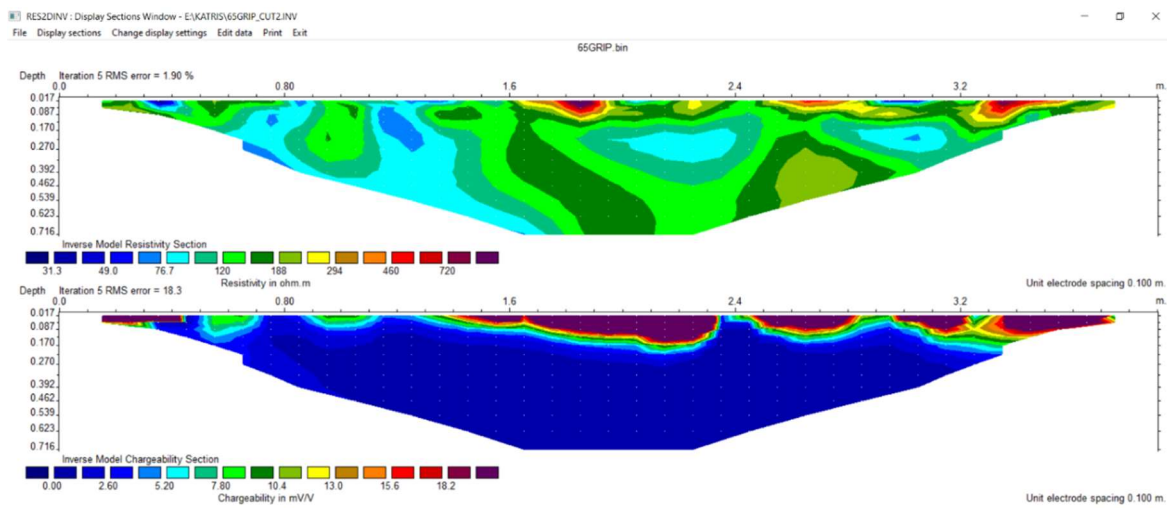
Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/ Ω *m
1	125.38	0.0022
2	144.45	0.0021
3	123.88	0.0027
4	94.57	0.0048
5	74.16	0.0056
6	53.69	0.0275

Πίνακας 4.4 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

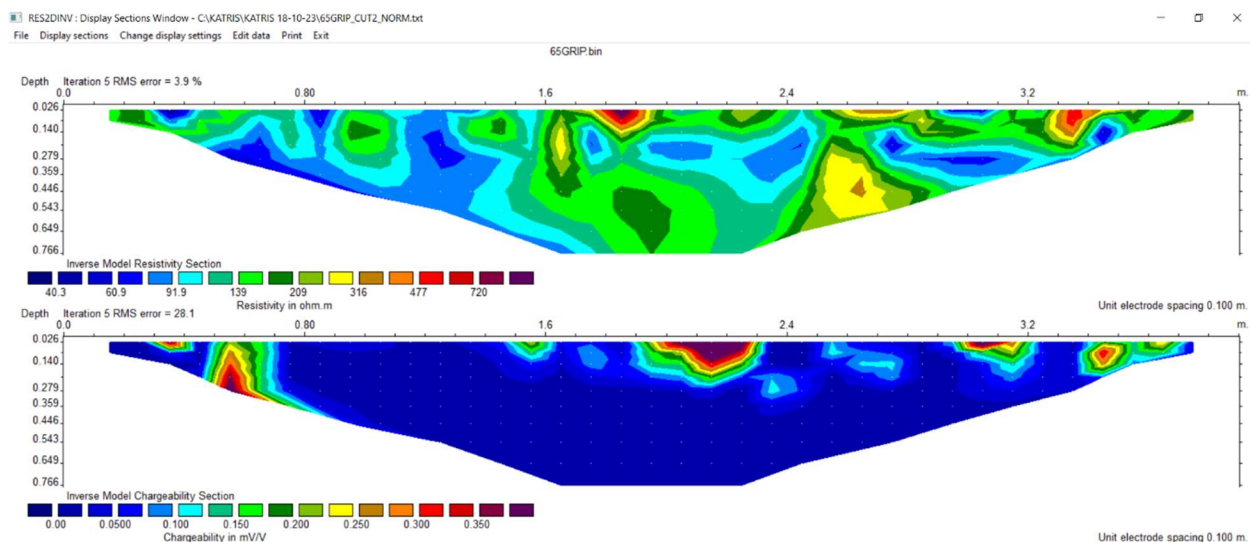
4.3.4 Σημείο 65 (Κολυμπάρι)



Εικόνα 4.10.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 65



Εικόνα 4.10.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 65, με τις τιμές φορτιστικότητας



Εικόνα 4.10.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 65, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

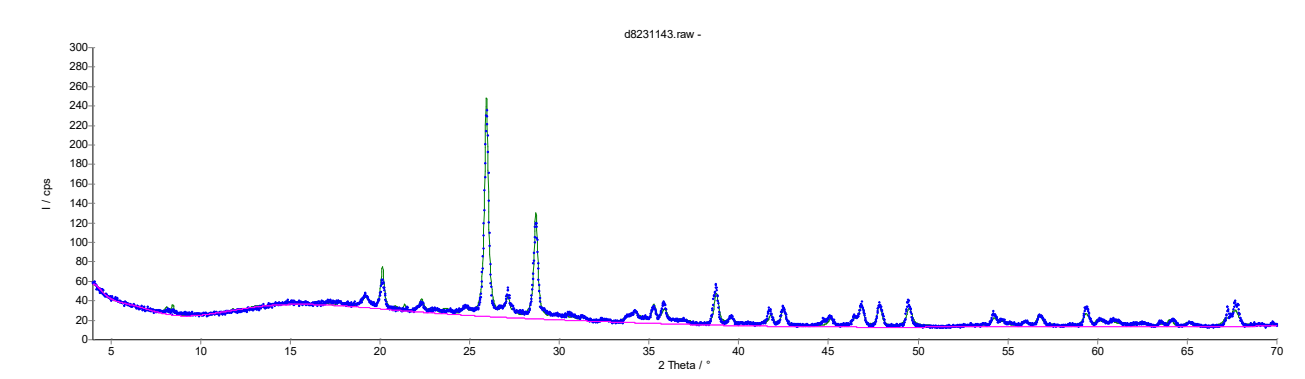
Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 2.1 m είναι της τάξεως των 0.0600-0.140 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης κυμαίνονται μεταξύ 91 και 139 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται οριακά επιτρεπτές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/ Ω *m
1	107.91	0.4024
2	160.42	0.2152
3	119.08	0.1516
4	81.419	0.0906
5	87.319	0.0243
6	120.77	0.0074

Πίνακας 4.5.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα XRD, η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων στη συγκεκριμένη θέση παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες και πίνακες. Για το κάθε δείγμα, η εικόνα

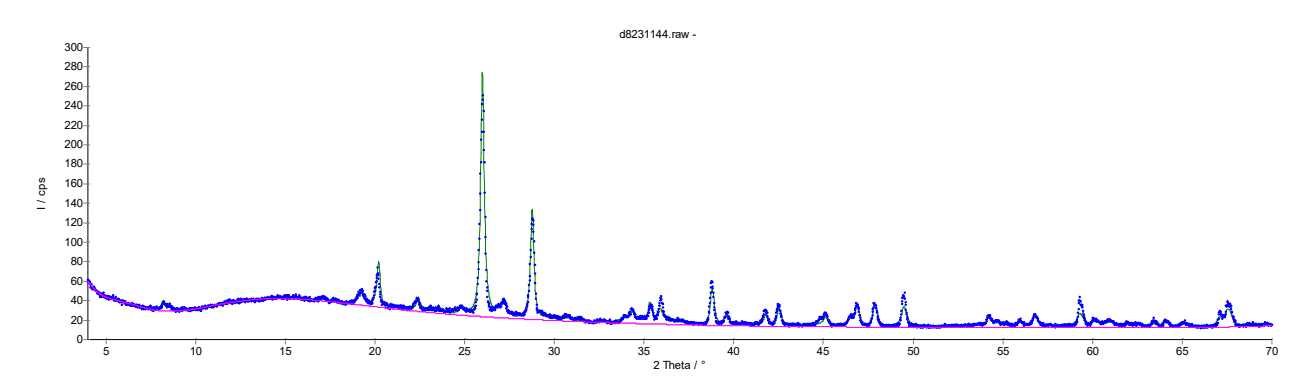
αναφέρεται στο ακτινογράφημα του κάθε δείγματος, και ο πίνακας στην % κατά βάρος (% κβ) ορυκτολογική σύσταση του κάθε δείγματος.



Εικόνα 4.10.4, Απεικόνιση διαγράμματος έντασης – γωνία κλίσης για το βάθος των 10cm

65-10	
Ένωση	(%)
Anatase	0.8
Calcite	27.2
Chlorite	1.1
Dolomite	0.8
Illite	20.2
Paragonite	5.6
Plagioclase Albite	3.9
Quartz	37.1
K-feldspar	3.3
Άθροισμα	26.9

Πίνακας 4.5.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm

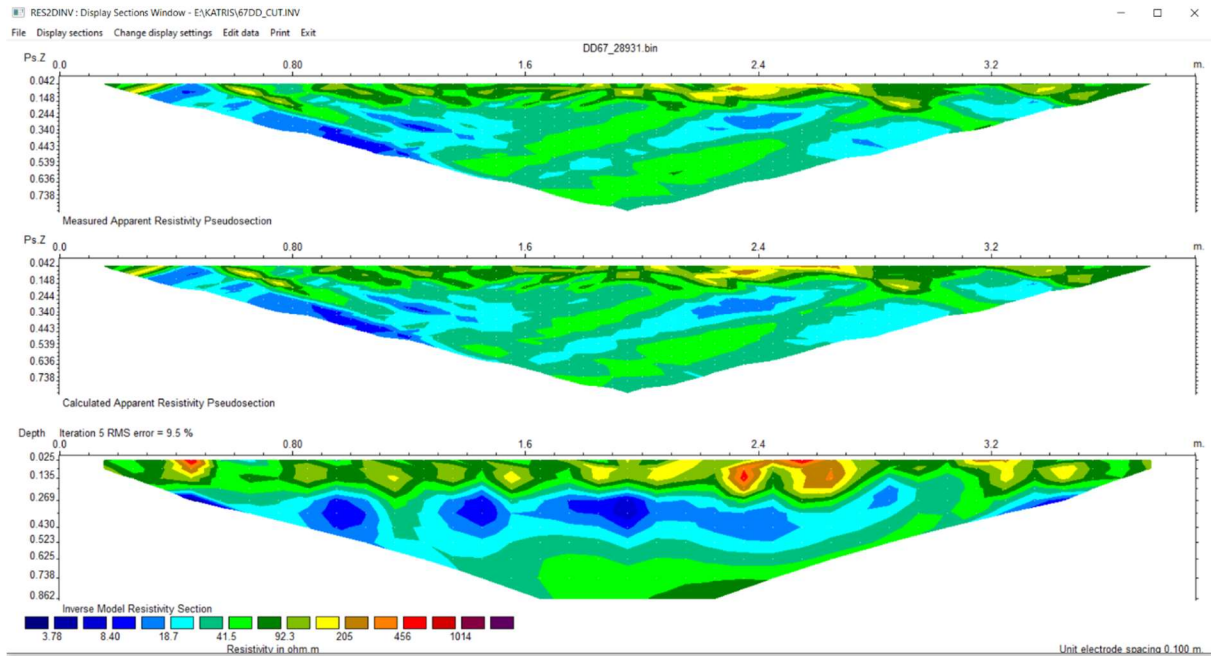


Εικόνα 4.10.5, Απεικόνιση διαγράμματος έντασης – γωνία κλίσης για το βάθος των 20cm

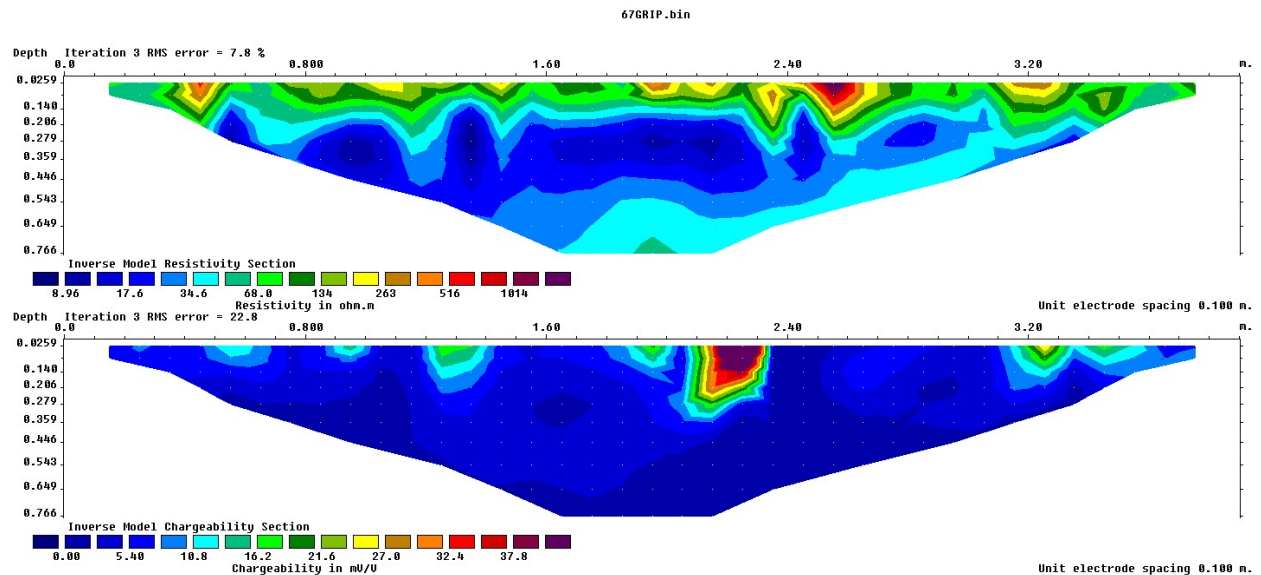
65-20	
Ένωση	(%)
Anatase	1.1
Calcite	27.0
Chlorite	4.2
Dolomite	0.7
Illite	18.1
Paragonite	4.2
Plagioclase	2.4
Quartz	38.3
K-feldspar	4.0
Άθροισμα	26.5

Πίνακας 4.5.3 Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm

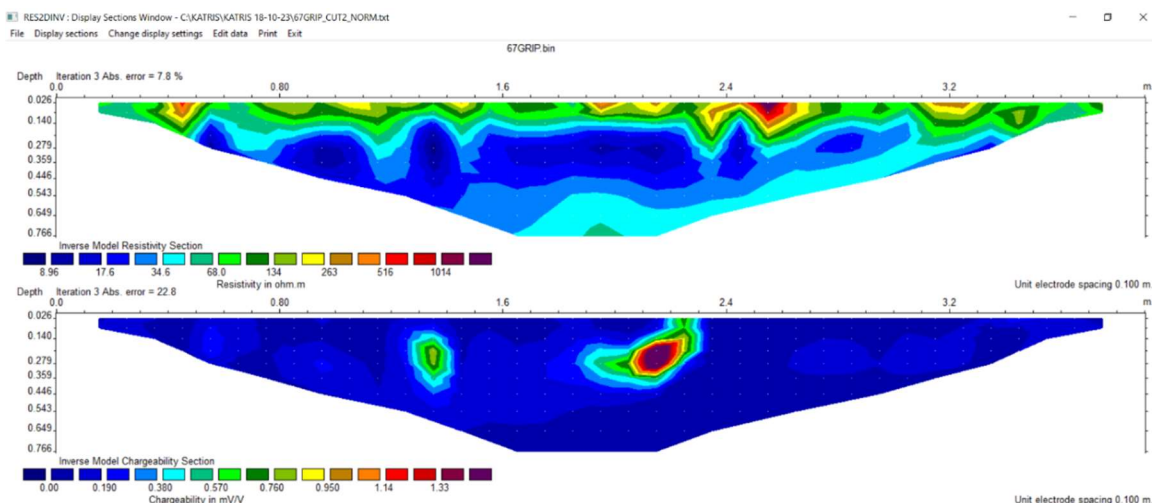
4.3.5 Σημείο 67 (Κολυμπάρι)



Εικόνα 4.11.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 67



Εικόνα 4.11.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 67, αναπαριστώντας τις τιμές της φορτιστικότητας



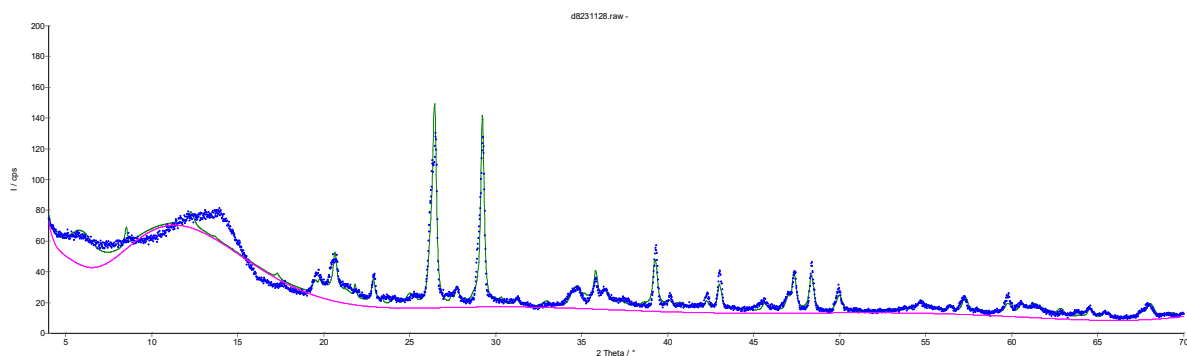
Εικόνα 4.11.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 67, αναπαριστώντας τις τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2din, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 2.2 (m) μέτρων είναι της τάξεως των 0.519-1.19 (mS/m), ενώ οι τιμές της αντίστασης αγγίζουν προσεγγιστικά τα 34.6-120 (ohm*m). Πράγμα το οποίο κρίνεται ως επιτρεπτό για την ανεύρεσή εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/ Ω *m
1	296.32	0.1048
2	190.35	0.1508
3	51.681	0.6013
4	17.169	1.8335
5	10.32	1.8026
6	12.728	0.57848

Πίνακας 4.6.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

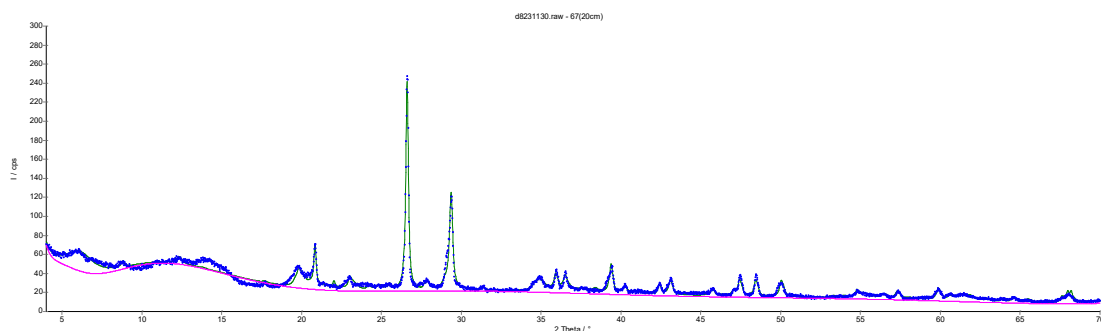
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα XRD, η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων στη συγκεκριμένη θέση παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες και πίνακες. Για το κάθε δείγμα, η εικόνα αναφέρεται στο ακτινογράφημα του κάθε δείγματος, και ο πίνακας στην % κατά βάρος (% κβ) ορυκτολογική σύσταση του κάθε δείγματος.



Εικόνα 4.11.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm

67-10	
Ένωση	(%)
Anatase	0.5
Calcite	28.0
Illite	19.7
Kaolinite	15.1
Plagioclase	5.0
Quartz	17.9
Smectite	13.8
Άθροισμα Αργιλικών ορυκτών	48.6

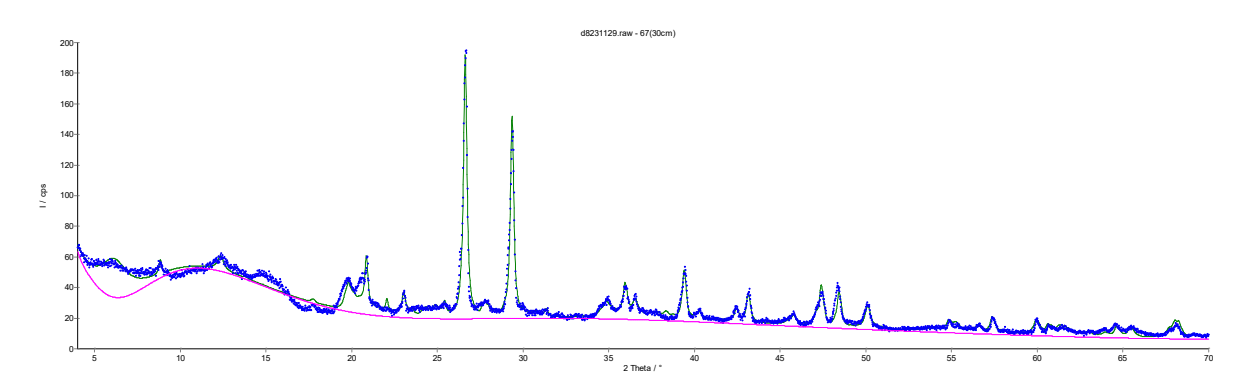
Πίνακας 4.6.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10 cm



Εικόνα 4.11.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm

67-20	
Ένωση	(%)
Anatase	0.7
Calcite	21.5
Illite	23.3
Kaolinite	11.9
Plagioclase	3.9
Quartz	25.5
Smectite	13.2
Άθροισμα Αργιλικό	53 48.4

Πίνακας 4.6.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm



Εικόνα 4.11.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm

67-30	
Ένωση	(%)
Anatase	1.1
Calcite	29.5
Illite	10.3
Kaolinite	10.8
Plagioclase	4.9
Quartz	26.9
Smectite	16.5
Άθροισμα Αργιλικό	37.6

Πίνακας 4.6.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm

4.4 Περιοχή Αγίας Χανίων

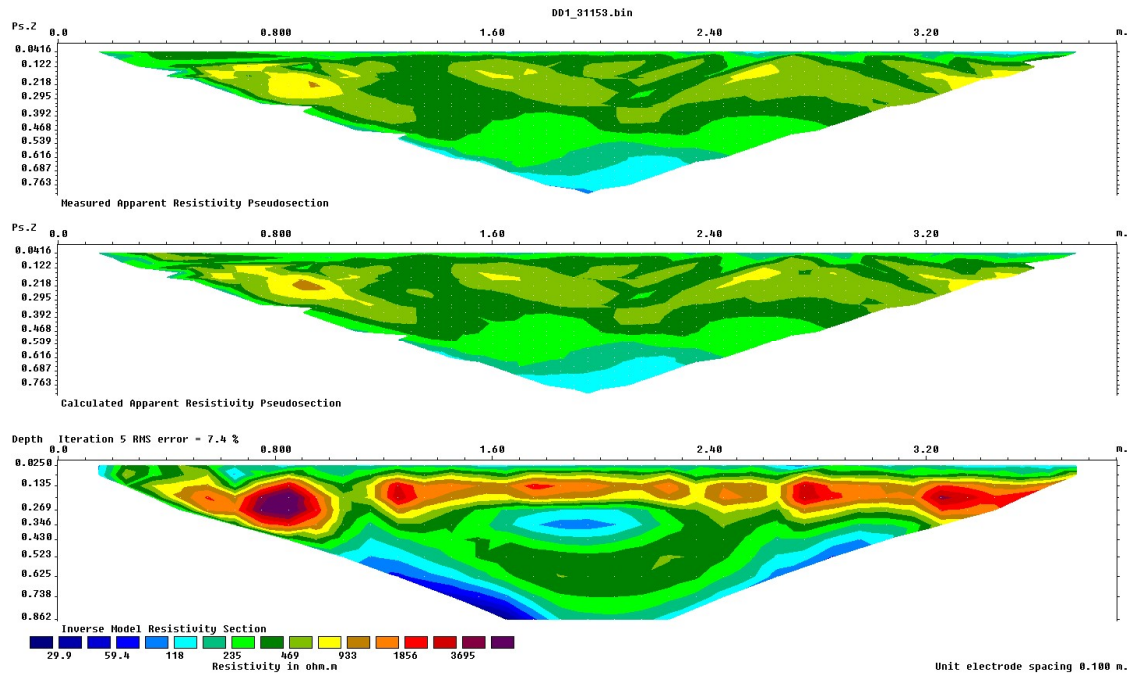
Στην περιοχή της Αγίας Χανίων, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 2 μετρήσεις εκ των οποίων μόνο η μια κρίθηκε ως σημαντική για περαιτέρω ορυκτολογική ανάλυση, καθώς οι τιμές που έδειχναν οι ηλεκτρικές τομογραφίες της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας ήταν συμβατές με τις προ απαιτούμενες επιθυμητές τιμές. Στον παρακάτω πίνακα 4.2.15 αναγράφονται οι ακριβείς θέσεις της δειγματοληψίας στα συστήματα αναφοράς “ΕΓΣΑ 87” & “WGS” του μοναδικού σημείου 6 το οποίο αναλύθηκε περαιτέρω.

Ακολουθεί ακριβής ορυκτολογικός χαρακτηρισμός του εδαφικού σχηματισμού του “σημείου 6”, για τα διάφορα βάθη της δειγματοληψίας.

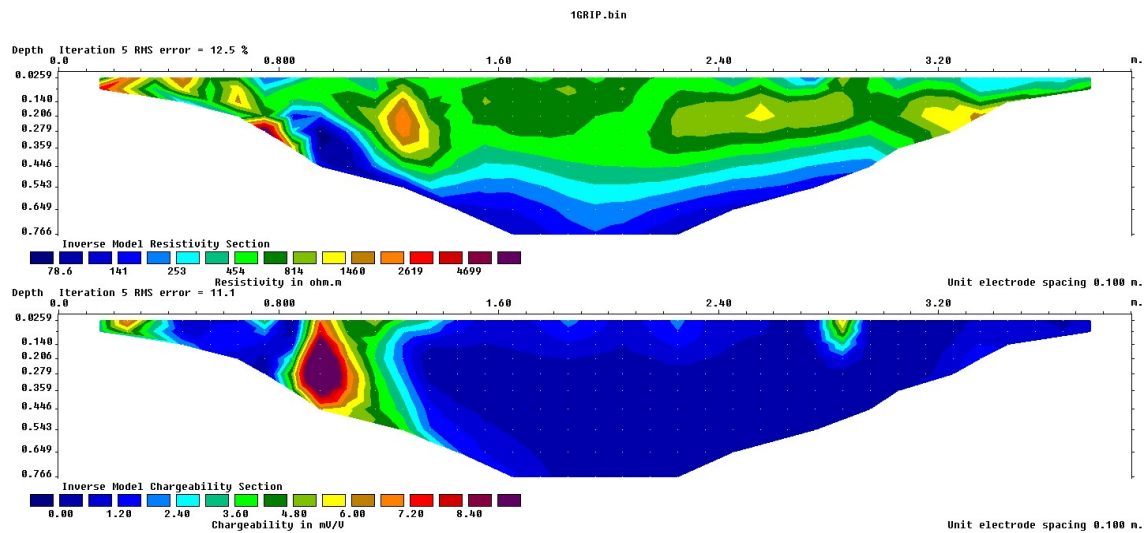
	“ΕΓΣΑ 87”		“WGS”	
	X	Y	X	Y
“6DS”	495007.710	3927673.011	35.495193058252	23.946598119269

Πίνακας 4.7 Συντεταγμένες σημείου 6

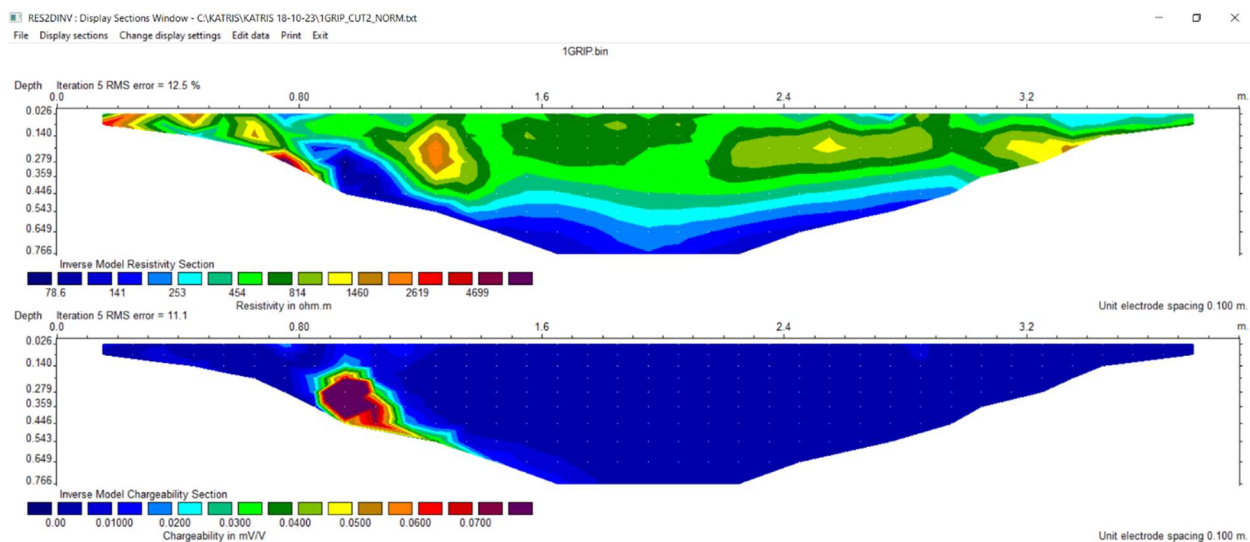
4.4.1 Σημείο 1 (Αγιά Χανιών)



Εικόνα 4.12.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 1



Εικόνα 4.12.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 1, με τις τιμές φορτιστικότητας



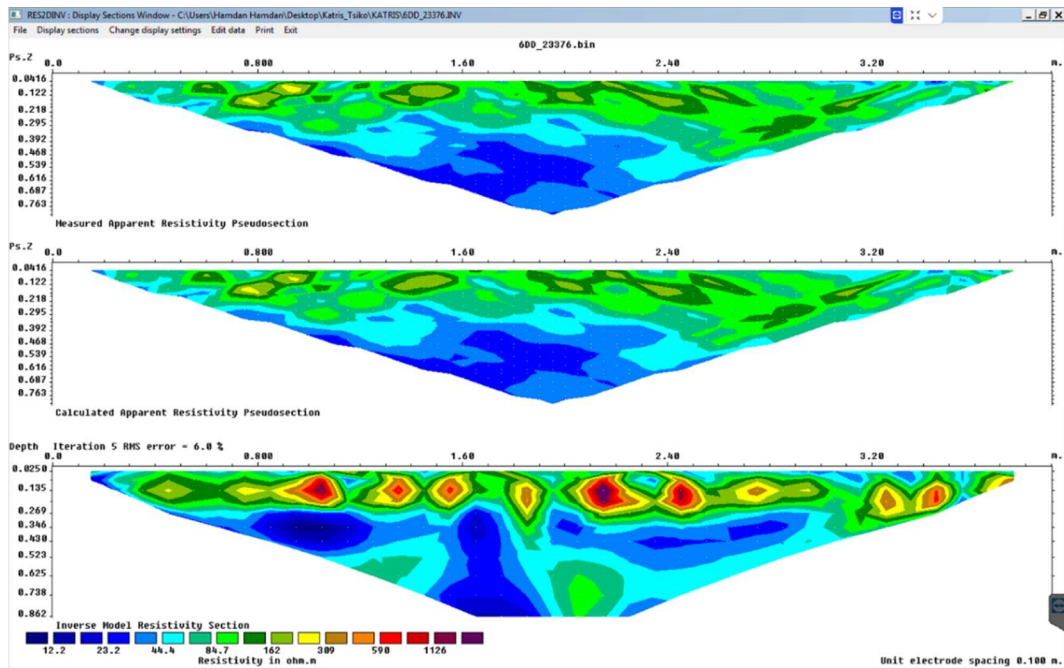
Εικόνα 4.12.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 1, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2din, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση του 1 m είναι της τάξεως των 0.00002-0.0188 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης κυμαίνονται από 190.56 ως 9757.2 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποτρεπτικές για την ανεύρεση εδαφικών αργιλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

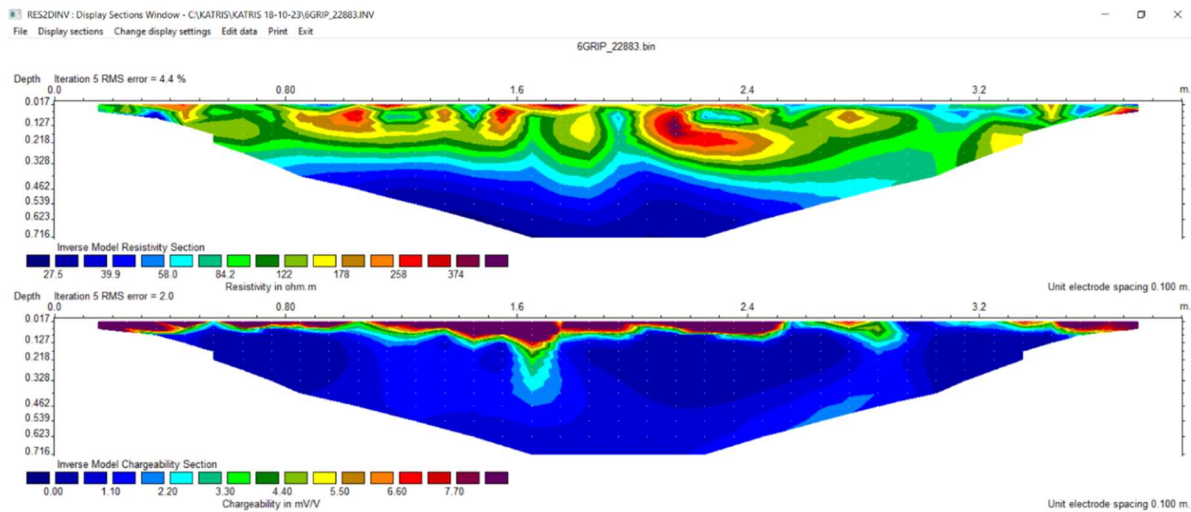
Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/ Ω *m
1	190.56	0.0188
2	303.31	0.0068
3	552.49	0.0020
4	736.58	0.0005
5	9757.2	2.20E-05
6	1441.9	0.0027

Πίνακας 4.8 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

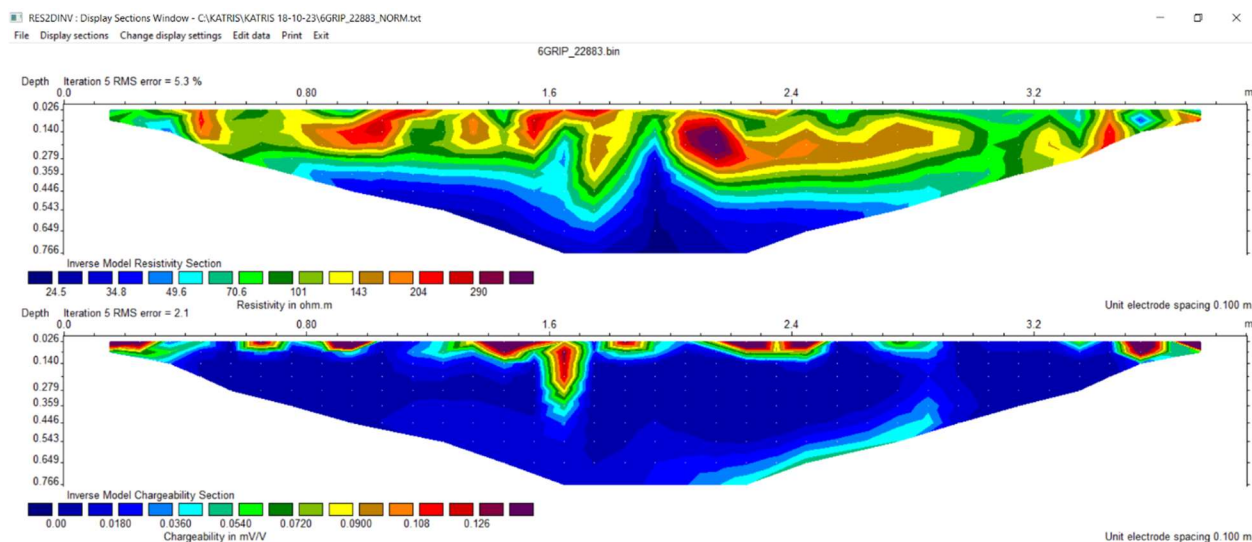
4.4.2 Σημείο 6 (Αγιά Χανίων)



Εικόνα 4.13.1: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης διπόλου-διπόλου για το σημείο 6



Εικόνα 4.13.2: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 6, με τις τιμές φορτιστικότητας



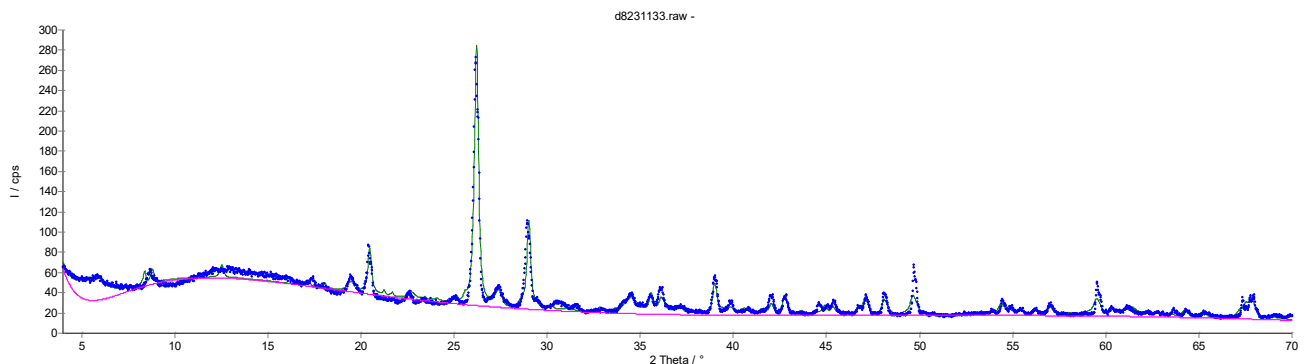
Εικόνα 4.13.3: Ηλεκτρική τομογραφία της διάταξης «gradient» για το σημείο 6, με τις τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γεωηλεκτρικές τομές του προγράμματος res2dinv, οι τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας στην θέση των 1.65 m είναι της τάξεως των 0.05-0.1406 mS/m, ενώ οι τιμές της αντίστασης ανέρχονται σε 74.27-159.08 ohm*m. Οι τιμές αυτές θεωρούνται οριακά επιτρεπτές για την ανεύρεση εδαφικών αργλικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο σημείο.

Αριθμός "Layer"	Ειδική Ηλ. Αντίσταση (ρ) (ohm*m)	Κανονικοποιημένη Φορ. (mV/V)/Ω*m
1	159.08	0.1406
2	129.72	0.1329
3	74.27	0.1252
4	50.56	0.1221
5	46.72	0.0869
6	52.02	0.0500

Πίνακας 4.9.1 Τιμές (ρ) & Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας ως προς τα ανάλογα βάθη

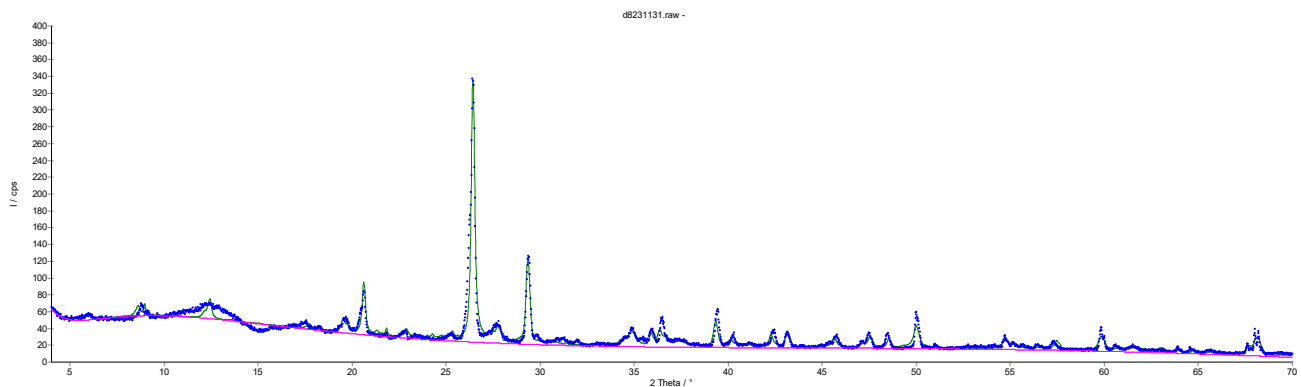
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα XRD, η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων στη συγκεκριμένη θέση παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες και πίνακες. Για το κάθε δείγμα, η εικόνα αναφέρεται στο ακτινογράφημα του κάθε δείγματος, και ο πίνακας στην % κατά βάρος (% κβ) ορυκτολογική σύσταση του κάθε δείγματος.



Εικόνα 4.13.4, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 10cm

6-10	
Ένωση	(%)
Anatase	0.5
Calcite	19.9
Chlorite	6.1
Illite	23.6
Paragonite	5.8
Plagioclase	1.1
Quartz	34.1
K-feldspar	1.7
Smectite	7.2
Άθροισμα αργιλικών ορυκτών	42.7

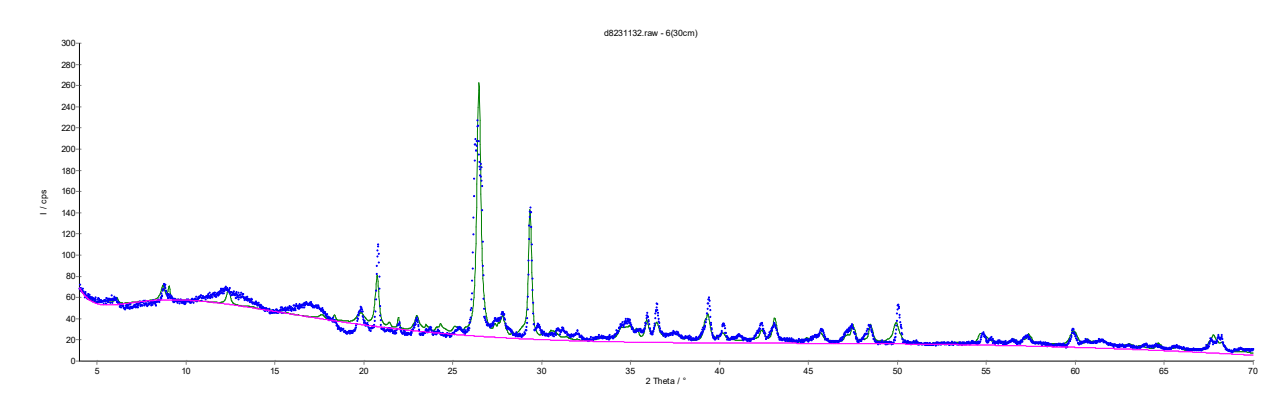
Πίνακας 4.9.2, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 10cm



Εικόνα 4.13.5, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 20cm

6-20	
Ένωση	(%)
Calcite	13.3
Chlorite	2.1
Illite	17.4
Kaolinite	5.0
Paragonite	13.0
Plagioclase	4.6
Quartz	40.5
K-feldspar	4.1
Άθροισμα αργιλικών ορυκτών	37.5

Πίνακας 4.9.3, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 20cm



Εικόνα 4.13.6, Ακτινογράφημα δείγματος για το βάθος των 30cm

6-30	
Ένωση	(%)
Calcite	18.5
Chlorite	6.0
Illite	27.1
Paragonite	7.3
Plagioclase	4.0
Quartz	34.2
K-feldspar	2.9
Άθροισμα αργιλικών ορυκτών	40.4

Πίνακας 4.9.4, Ποσοτική ορυκτολογική σύσταση (%κβ) του δείγματος από τα 30cm

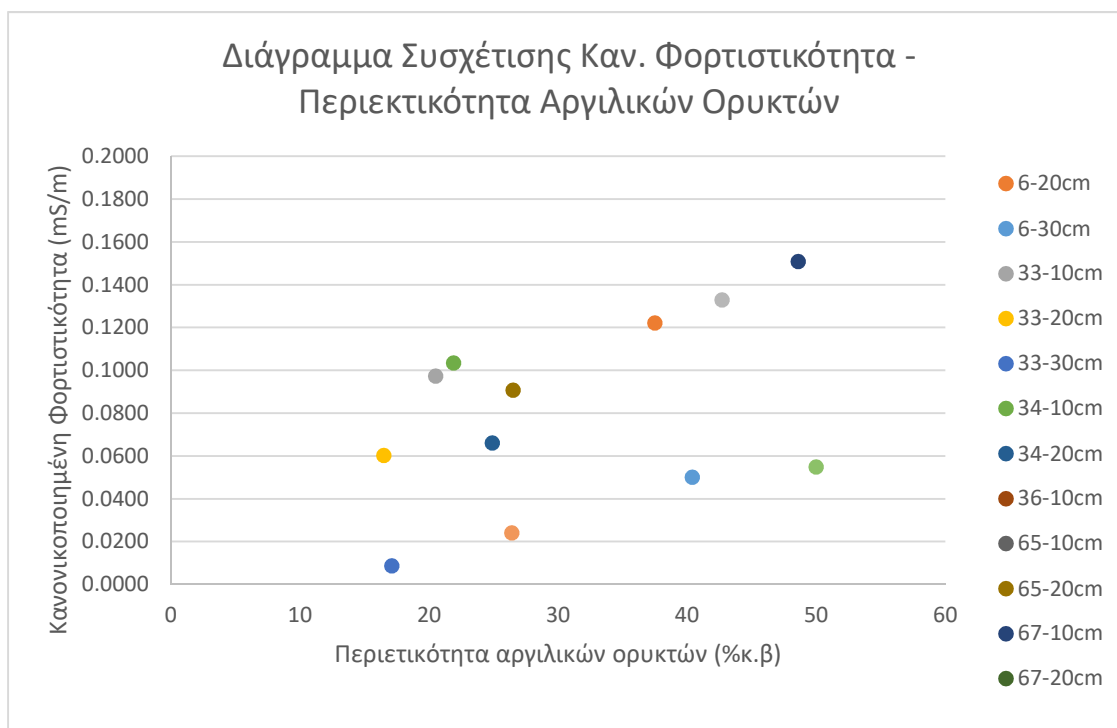
4.5 Συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας των εδαφών σε αργιλικά ορυκτά (%κβ) και των γεωηλεκτρικών τους ιδιοτήτων (Κανονικοποιημένης Φορτιστικότητας και Ειδική Ηλεκτρική αντίσταση)

Στα παρακάτω διαγράμματα, παρουσιάζεται η συσχέτιση της περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά των εδαφών με τα μεγέθη της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ).

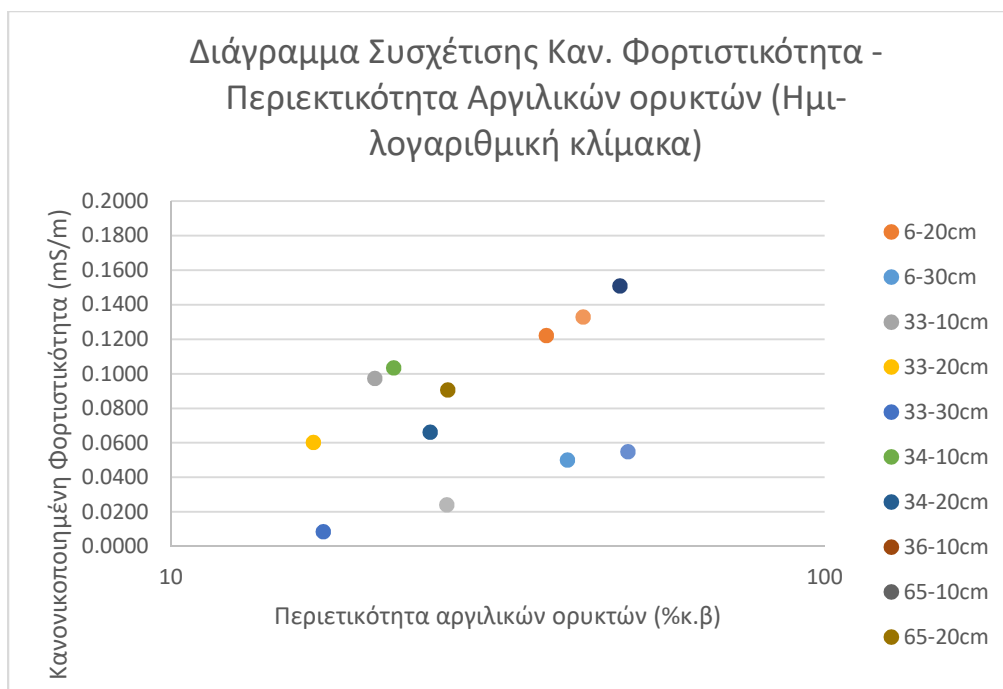
Όπως γίνεται φανερό από τις εικόνες 4.14.1, 4.14.2, 4.14.7 & 4.14.8 η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα δείχνει μια ανοδική τάση με αύξηση της περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά.

Αυτή η τάση αποδίδεται στο ότι τα αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται από υψηλότερη κανονικοποιημένη φορτιστικότητα.

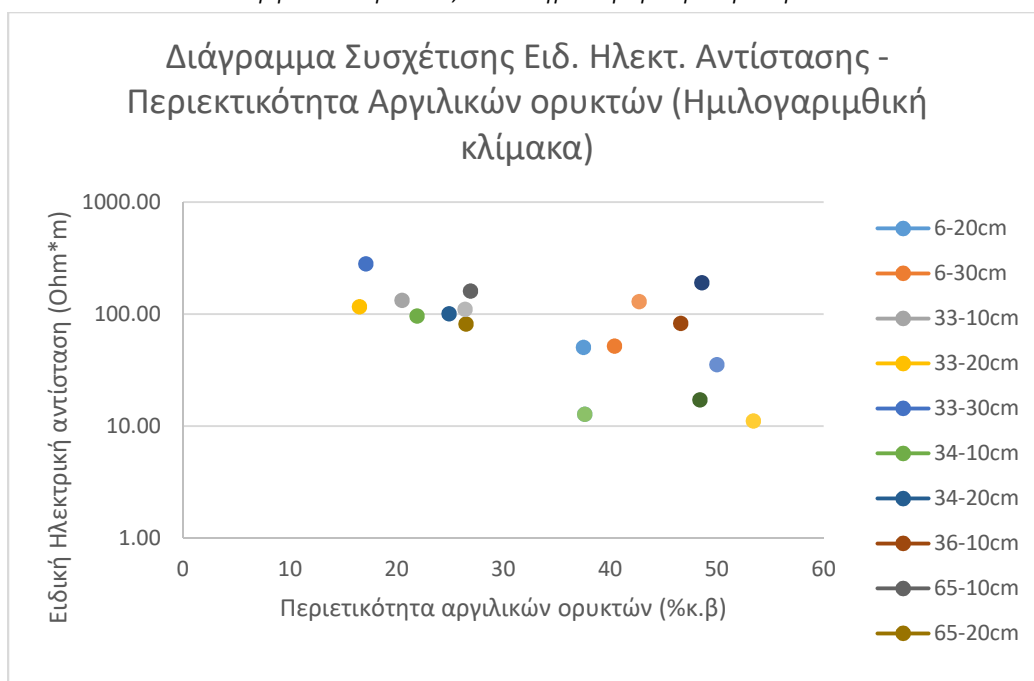
Σε αντίθεση, οι εικόνες 4.14.3, 4.14.4, 4.14.5 & 4.14.6, αναδεικνύουν μια φθίνουσα τάση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με αύξηση της περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά. Η συγκεκριμένη καθοδική τάση αποδεικνύεται και έμπρακτα από το γεγονός, πως τα αργιλικά ορυκτά είναι αγωγιμα και ως εκ τούτου έχουν χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση.



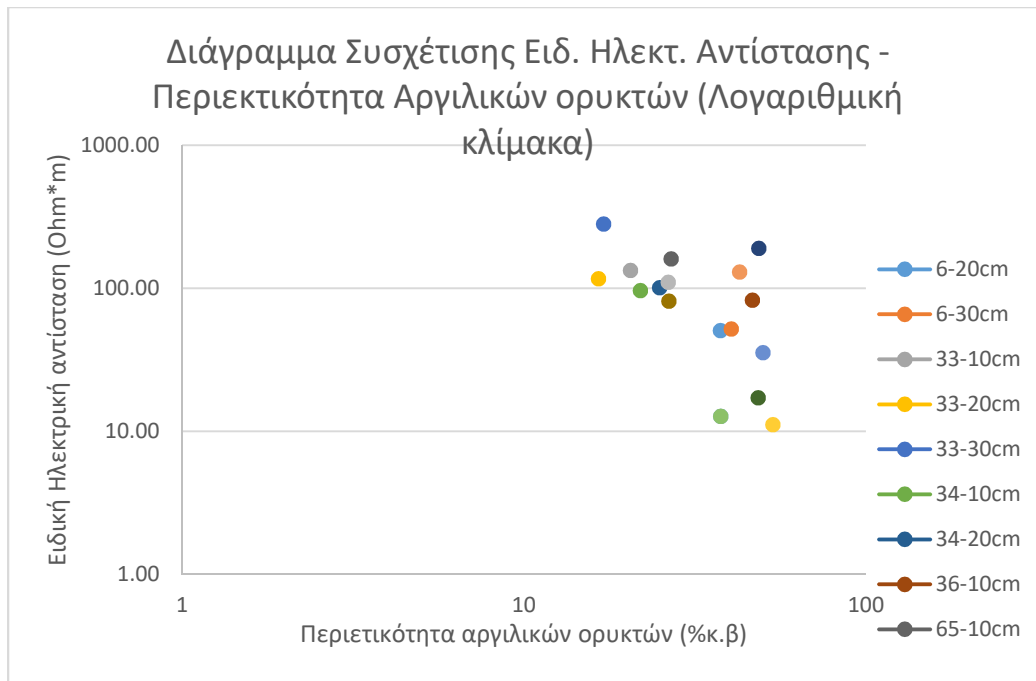
Εικόνα 4.14.1, Διάγραμμα Κανονικοποιημένης φορτιστικότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά



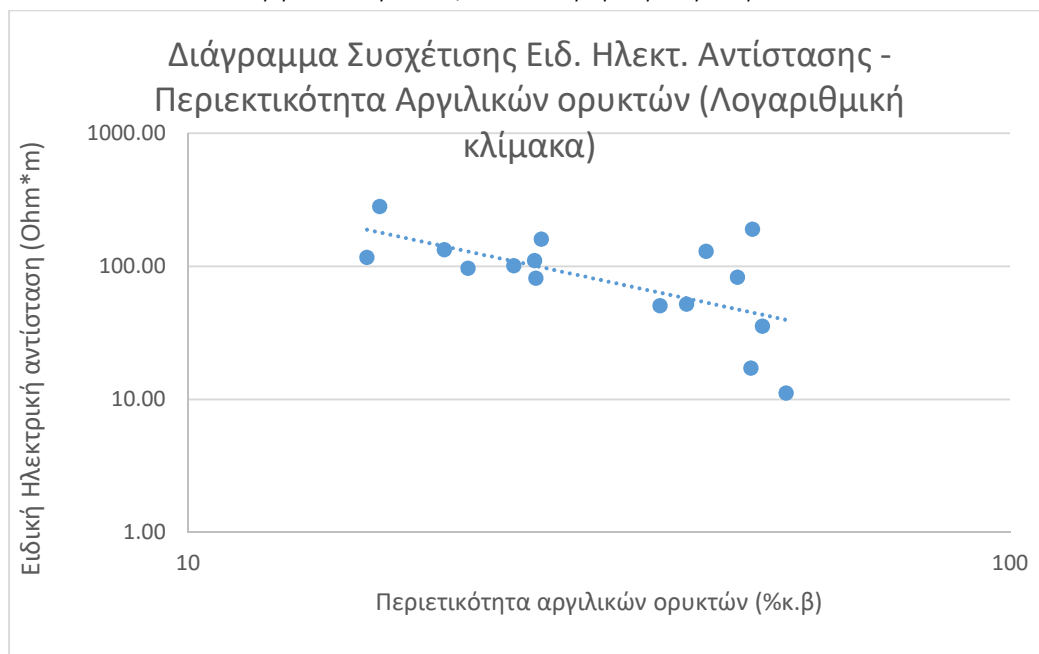
Εικόνα 4.14.2, Διάγραμμα κανονικοποιημένης φορτιστικότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά, κατά ήμιλογαριθμική κλίμακα



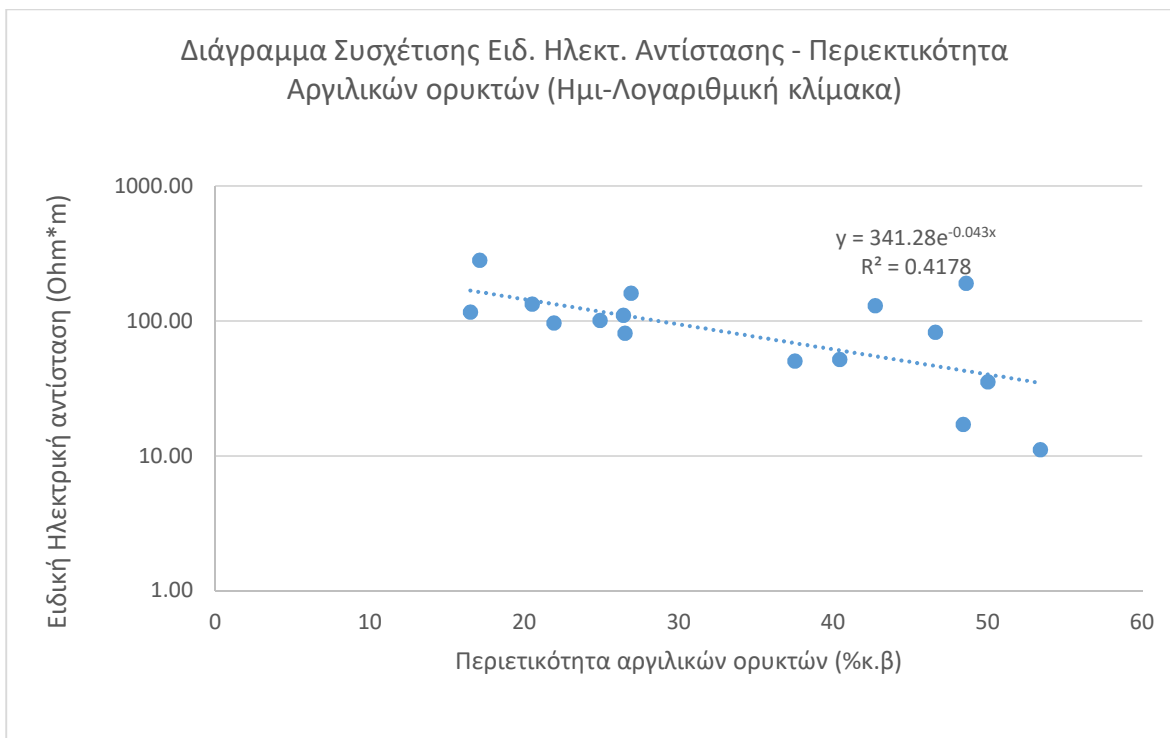
Εικόνα 4.14.3, Διάγραμμα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά



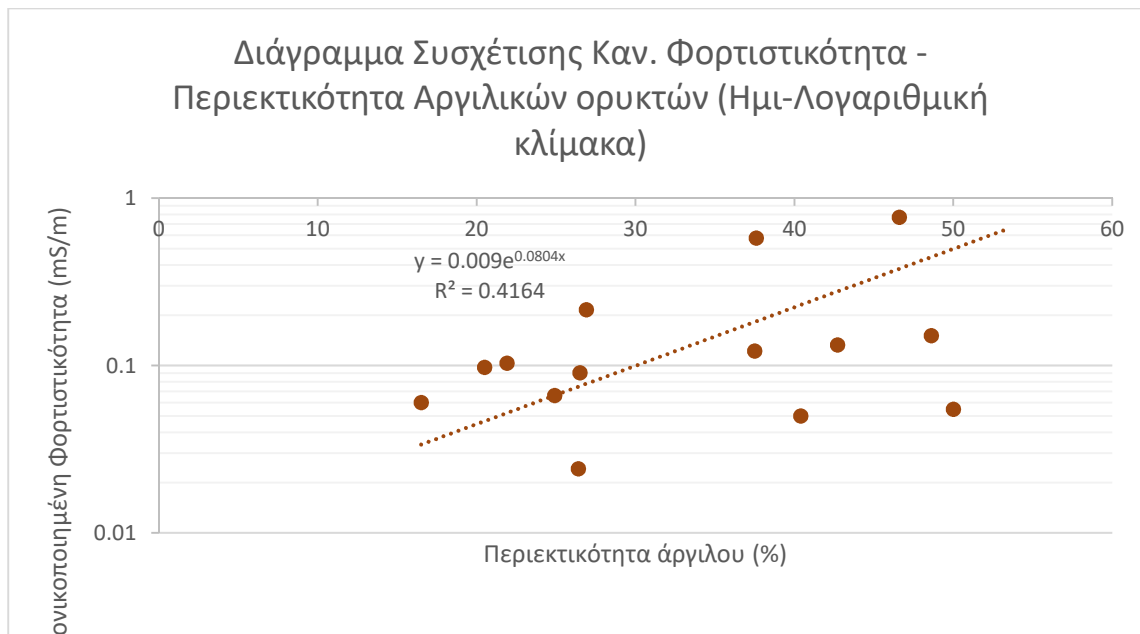
Εικόνα 4.14.4, Διαγράμματος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά, κατά λογαριθμική κλίμακα



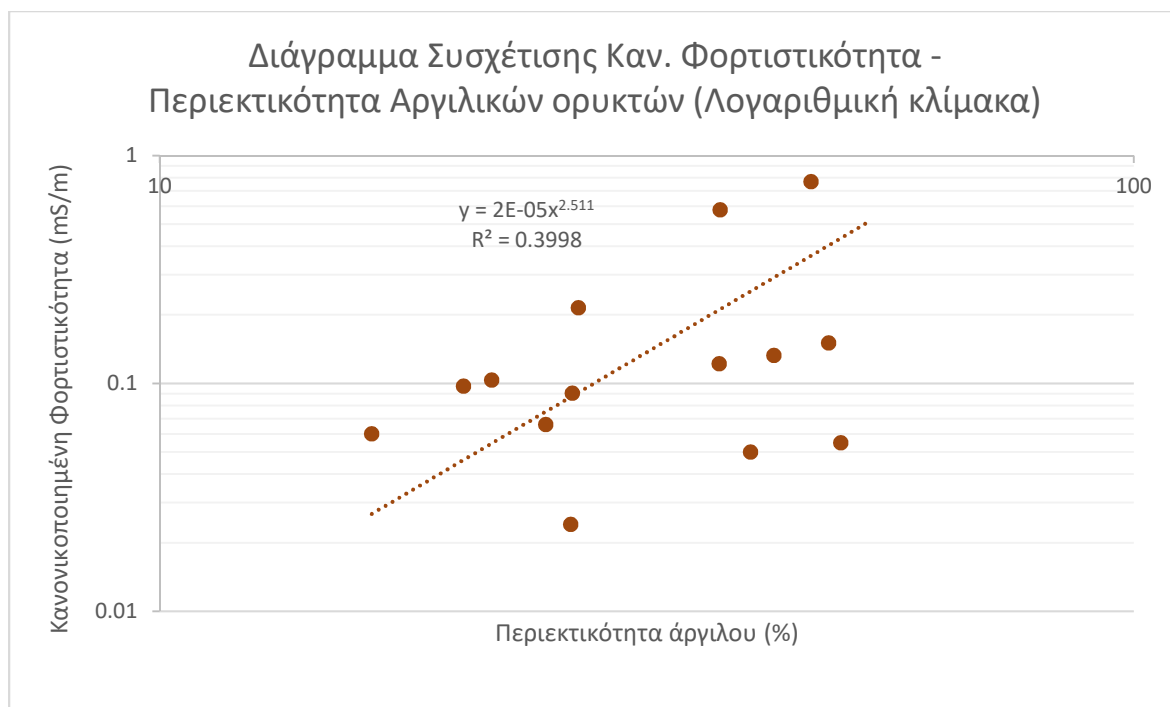
Εικόνα 4.14.5, Διάγραμμα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση, κατά λογαριθμική κλίμακα



Εικόνα 4.14.6, Διάγραμμα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση



Εικόνα 4.14.7, Διάγραμμα Καν. Φορτιστικότητας - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση σε ημι-λογαριθμική κλίμακα



Εικόνα 4.14.8, Διάγραμμα Καν. Φορτιστικότητας - περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά με την γραμμική τάση σε λογαριθμική κλίμακα

Κεφάλαιο V

5.0 Συμπεράσματα

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 13 γεωφυσικές διασκοπήσεις σε εδάφη εκ των οποίων οι 6 σε εδάφη με επαρκείς περιεκτικότητες αργιλικών ορυκτών. Οι περιοχές οι οποίες μελετήθηκαν ήταν η περιοχή της Αγιάς Χανίων, οι Βουκολιές και το Κολυμπάρι Χανίων.

Τα διαγράμματα συσχέτισης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και κανονικοποιημένης φορτιστικότητας με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά των 6 σημείων (συνολικά 17 εδαφικές δειγματοληψίες), δείχνουν την συσχέτιση των ορυκτολογικών δεδομένων και των γεωφυσικών δεδομένων (ενότητα 4.5).

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας τα διαγράμματα 4.14.1, 4.14.2, 4.14.7 & 4.14.8 συμπεραίνουμε πως η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα δείχνει μια ανοδική τάση με αύξηση της περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά, γεγονός που συμβαδίζει με το γεγονός πως τα αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας.

Αντίθετα παρατηρώντας τα διαγράμματα 4.14.3, 4.14.4, 4.14.5 & 4.14.6, συμπεραίνουμε πως η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δείχνει μια φθίνουσα τάση με αύξηση της περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά. Αυτό είναι σε συμφωνία με το γεγονός, ότι εδάφη με αργιλικά ορυκτά δεν παρουσιάζουν υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Αναλυτικά, μέσω των αποτελεσμάτων των διασκοπήσεων, συμπεραίνονται τα εξής:

- Οι τιμές κανονικοποιημένης φορτιστικότητας καθώς και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) για τα σημεία: “VOUK33DS”, “VOUK34DS”, “36NEWSA”, “NE65NEWSA”, “67NEWSA” & “6DS”, κυμαίνονται στο εύρος των $> 0.07 \text{ mS/m}$ και $0-100 \Omega\text{m}$ αντιστοίχως.
- Τα σημεία: “VOUK35T”, “VOUK47DS”, “VOUK48DS”, “NE52NEWSA”, “NE55NEWSA” & “NE57NEWSA”, δεν παρουσιάζουν κάποια ένδειξη αυξημένης περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά στους εδαφικούς τους σχηματισμούς.

Εν κατακλείδι, τα δείγματα στα οποία προσδιορίστηκε η ορυκτολογική σύσταση ήταν λίγα, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται σαφής συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων πεδίου και των ορυκτολογικών δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η ορυκτολογική ανάλυση περισσότερων δειγμάτων, ούτως ώστε να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα.

Επιπλέον, προτείνεται να μελετηθεί η συσχέτιση της κανονικοποιημένης φορτιστικότητας με κάθε ένα είδος ορυκτού, κάτι που θα συμβάλει στην κατανόηση της συμβολής στο φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης κάθε αργιλικού ορυκτού ξεχωριστά.

Βιβλιογραφία

- 1) <https://www.guidelinegeo.com/resistivity-and-induced-polarization/>
- 2) [Biosca, B., Arévalo-Lomas L., Barrio-Parra F., J. \(2020\). Application and limitations of time domain-induced polarization tomography for the detection of hydrocarbon pollutants in soils with electro-metallic components: a case study](#)
- 3) [Veeken P., Legeydo P., Davidenko Y., Kudryavceva E., Ivanov S., Chuvaev A. \(2009\). Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration.](#)
- 4) [Leroy P., Revil A. \(2009\). A mechanistic model for the spectral induced polarization of clay materials.](#)
- 5) [Revil A., Vaudelet P., Su Z., Chen R. \(2022\). Induced Polarization as a Tool to Assess Mineral Deposits.](#)
- 6) https://gdr.geosci.xyz/content/physical_properties/induced_polarization_physical_properties_duplicate.html#:~:text=This%20build%20Dup%20of%20ionic,influence%20of%20an%20electric%20field.
- 7) [Revil A., Gresse M. \(2021\). Induced Polarization as a Tool to Assess Alteration in Geothermal.](#)
- 8) [Deqiang M., Hinton J. \(2016\). Induced polarization response of porous media with metallic particles — Part 4: Detection of metallic and nonmetallic targets in time-domain-induced polarization tomography.](#)
- 9) “Geophysics for the Mineral Exploration Scientist”
- 10) [Eppelbaum L. \(2001\).Some common aspects of magnetic, induced polarization and self-potential anomalies interpretation: implication for ore target localization.](#)

- 11) Dentith M., Mudge S. (2014). Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Perth: Vector Research Pty Ltd.
- 12) <https://www.agiusa.com/blog/gradient-array-electrical-resistivity-methods-part-8>
- 13) Dahlin T., Zhou B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging.
- 14) <https://www.agiusa.com/d=ipole-dipole%E2%80%8B-%E2%80%8Barray%E2%80%8B>
- 15) Binley A., Kemna A. (2005). DC Resistivity and Induced Polarization Methods
- 16) <http://www.iris-instruments.com/syscal-prosw.html>
- 17) Cahyadi A., Hendy Fatchurohman H., Riyanto I. (2018). Groundwater quality analysis in dry seasons in Panggang Cay, Kepulauan Seribu, Jakarta, Indonesia.
- 18) Daily W., Ramirez A. Binley A., LeBrecque D. (2004). Electrical resistance tomography.
- 19) https://www.splashcos.org/sites/splashcos.org/files/downloads/12_GPR.pdf
- 20) https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc350/content/methods/meth_2/3measurements.htm