



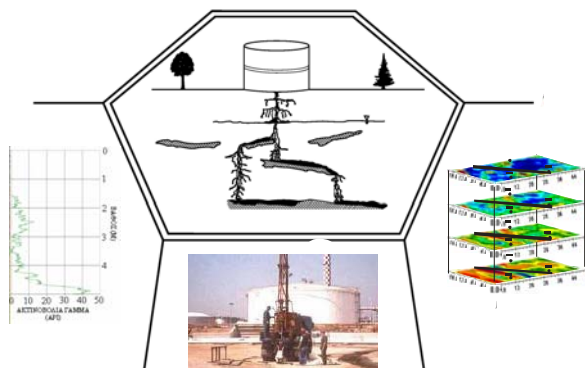
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**‘ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΑ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ
ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ (ΕΛ.ΠΕ)’**



ΚΑΡΑΜΠΙΝΟΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ

Εξεταστική επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ.(επιβλέπων)

Κομνίτσας Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Κ.

Πασαδάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Κ.

XANIA

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ρύπανσης του υπεδάφους από οργανικούς ρύπους με γεωφυσικές μεθόδους και ειδικότερα με αυτήν της ηλεκτρικής τομογραφίας .

Η προς μελέτη περιοχή όπου πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική έρευνα είναι οι δεξαμενές στα διυλιστήρια του Ασπροπύργου του ομίλου εταιριών ‘ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ’.

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν και με βοήθησαν στην πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

Αρχικά , οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνιο Βαφείδη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ανάθεση της εργασίας και τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, και τον κ. Νικόλαο Πασαδάκη, Επίκουρο καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνα και Τεχνολογίας στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ‘ΕΛΕΓΧΟΣ’. Θερμές ευχαριστίες στην εταιρία ‘ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ’ για την άδεια χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων τους στον Ασπρόπυργο για την διεξαγωγή των μετρήσεων καθώς και στο Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπογείων Ταμιευτήρων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για τις αναλύσεις δειγμάτων.

Επίσης, ευχαριστώ τους κ. Hamdan Hamdan και κ. Νίκο Οικονόμου, υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Ορυκτών Πόρων για την συνεχή υποστήριξη και βοήθεια.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική υποστήριξη κατά τη διάρκεια περάτωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που ελήφθησαν κατά την διασκόπηση στα διυλιστήρια του Ασπροπύργου του ομίλου εταιριών 'ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ' τον Ιούλιο και τον Νοέμβριο του 2005. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν κατά μήκος 15 γραμμών ηλεκτρικής τομογραφίας και από τρεις γεωτρήσεις συνολικού μήκους 20 m. Σε δείγματα εδάφους από τις γεωτρήσεις έγινε χημική ανάλυση και βρέθηκαν η συγκέντρωση των πετρελαιοειδών και η υγρασία. Επίσης, στις ίδιες γεωτρήσεις μετρήθηκε η συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών στο υπέδαφος με την χρήση διαγραφιών ακτίνων γάμμα.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πακέτα RES2DINV και RES3DINV με τα οποία έγινε αντιστροφή των ηλεκτρικών δεδομένων και απεικόνιση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους σε δυο ή τρεις διαστάσεις. Από την τρισδιάστατη αντιστροφή δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας οριζοντίων τομών του υπεδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που οι μετρήσεις δεν έγιναν όπως απαιτεί μια καθεαυτού τρισδιάστατη έρευνα, πράγμα που είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, αλλά σε παράλληλες γραμμές διςδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, εντούτοις τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά.

Ειδικότερα η παραπάνω μεθοδολογία οριοθέτησε ζώνες με υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αντιστοιχούν σε σχηματισμούς χαμηλότερης συγκέντρωσης σε αργιλικά ορυκτά μικρότερης υγρασίας ή αυξημένης ρύπανσης από πετρελαιοειδή.

Στην συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της ηλεκτρικής τομογραφίας με αυτά από τις χημικές αναλύσεις και τις διαγραφίες και υποδείχθηκαν θέσεις για δειγματοληπτικές γεωτρήσεις σε πιθανά ρυπασμένες ζώνες.

ABSTRACT

The present diploma thesis focuses on the analysis of electric tomography data acquired at the geophysical survey in Aspropyrgos refineries of the companies 'Hellenic Petroleum'. The data was collected in July and November 2005 along 15 electric tomography lines and in three boreholes of 20 m total length. The clays concentration was also estimated by using gamma ray logs. Furthermore, chemical analysis in soil samples from the boreholes was performed to quantify the total petroleum hydrocarbon (TPH) concentration and the moisture.

The RES2DINV and RES3DINV programs were used to invert the resistivity data and create images of the geoelectrical subsoil structure in two or three dimensions. The three dimensional inversion provided horizontal slices of the subsoil. Although the measurements were taken in electric tomography parallel lines, which is not a common strategy for three dimensional surveys, the three-dimensional results were satisfactory.

Specifically, the present methodology imaged zones with higher electric resistivity which is due to concentration in clays, lower moisture or increased contamination of petroleum products.

Finally, the location of sampling boreholes is proposed based on the results from the electric tomography results, the chemical analyses and the gamma ray logs.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</i>	<i>1</i>
1.1 Οργανικοί ρύποι στο νερό	1
1.2 DNAPL και γεωφυσικές μέθοδοι	1
1.3 Περιγραφή γεωφυσικής τεχνολογίας.....	2
1.3.1 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	2
1.3.2 Γεωραντάρ	3
1.3.3 Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	3
1.3.4 Σεισμική Ανάκλαση.....	4
1.3.5 Σεισμική Διάθλαση	4
1.3.6 Μαγνητομετρία.....	4
1.3.7 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού	5
1.3.8 Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας	5
1.3.9 Μέθοδος Γωνίας Κλίσης Χαμηλών Συχνοτήτων	6
1.4 Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (πλεονεκτήματα-περιορισμοί)	6
1.4.1 Πλεονεκτήματα	6
1.4.2 Περιορισμοί	7
1.5 Γεωφυσικές μελέτες σε περιβαλλοντικά προβλήματα.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
<i>ΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΔΙΥΛΗΣΤΗΡΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ.....</i>	<i>11</i>
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Προσβασιμότητα.....	11

2.3 Ιδιαίτερα Χαρακτηριστικά της περιοχής γεωφυσικής διασκόπησης.....	12
2.4 Γεωλογικός Χάρτης	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	16
<i>ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</i>	<i>16</i>
3.1 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	16
3.1.1 Εισαγωγή	16
3.1.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενές και ισότροπο έδαφος.....	17
3.1.3 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση	20
3.1.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων	20
3.1.5 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.	21
3.1.6 Ηλεκτρική Τομογραφία	22
3.1.6.1 Θεωρία	22
3.1.6.2 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων	23
3.1.6.3 Αντιστροφή των δεδομένων	25
3.1.7 Η Τρισδιάστατη Έρευνα της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	27
3.1.7.1 Εισαγωγή	27
3.1.7.2 Οι μετρήσεις στην τρισδιάστατη έρευνα	28
3.1.7.3 Η τρισδιάστατη αντιστροφή	30
3.1.8 Το λογισμικό πακέτο RES2DINV	31
3.1.9 Το λογισμικό πακέτο RES3DINV	32
3.2 Διαγραφίες Φυσικής Ραδιενέργειας.....	33
3.2.1 Ιδιότητες των ακτίνων γάμμα	34
3.2.2 Διαγραφίες ακτίνων γάμμα	35
3.2.3 Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε αργλικές προσμίξεις.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	38
<i>Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΑ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ.....</i>	<i>38</i>
4.1 Περιοχή των μετρήσεων	38
4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης των δειγμάτων εδάφους.....	44
4.3 Οι διαγραφίες ακτίνων γάμμα.....	47

4.3 Επεξεργασία δεδομένων με το πρόγραμμα RES2DINV	47
4.3.1 Η Περιοχή Α	47
4.3.2 Η Περιοχή Β	52
4.3.3 Η Περιοχή Γ	53
4.3.4 Η Περιοχή Δ	54
4.4 Επεξεργασία δεδομένων με το πρόγραμμα RES3DINV	56
4.4.1 Οι γεωηλεκτρικές τομές	56
4.4.2 Οι οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	62
<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</i>	<i>62</i>
5.1 Συνδυασμός ηλεκτρικών τομών περιοχής Α με τη γραμμή μελέτης T2	62
5.2 Συνδυασμός ηλεκτρικών τομών και γεωτρήσεων	63
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Οργανικοί ρύποι στο νερό

Το υπόγειο νερό αποτελεί μία πολύτιμη φυσική πηγή πλούτου. Ο έλεγχος τόσο της ποιότητας, όσο και της ποσότητάς του μέσα είναι πολύ σημαντικός.

Η λειτουργία βαριάς βιομηχανίας, στρατιωτικών μονάδων και διυλιστηρίων πετρελαίου συχνά οδηγεί σε συσσώρευση υδρογονανθράκων στο υπέδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ρύπανση του υπογείου νερού.

Αποτελέσματα ερευνών αναφέρουν ότι οι κύριοι τύποι ρύπανσης του υπεδάφους είναι οι ακόλουθοι (Bedient et al., 1994):

- LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού, όπως είναι οι υδρογονάνθρακες με αυξημένες συγκεντρώσεις αρωματικών συστατικών (βενζόλιο, τολουόλιο ή ξυλόλιο).
- DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού, όπως το τριχλωροαιθυλένιο ή τα βαριά πετρέλαια.
- Άλλοι ανόργανοι ρύποι, όπως λευκόχρυσος ή νικέλιο ως πρόσθετο στη βενζίνη.

Αν και αυτό το απλό σύστημα ταξινόμησης βασίζεται αποκλειστικά στην πυκνότητα του ρυπαντή, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο όσον αφορά την εκτίμηση της εξάπλωσης της ρύπανσης από πετρελαιοειδή.

1.2 DNAPL και γεωφυσικές μέθοδοι

Η δυνατότητα πολλών DNAPLs να κινηθούν ανεξάρτητα από τη ροή υπόγειων νερών τα καθιστά συχνά δύσκολα να εντοπιστούν. Οι γεωφυσικές μέθοδοι έχουν

χρησιμοποιηθεί ιστορικά για την χαρτογράφηση του υπεδάφους και βοηθούν στον καθορισμό των θέσεων δειγματοληψίας.

Υπάρχουν διάφορες γεωφυσικές τεχνικές για την ανίχνευση ανωμαλιών που συνδέονται με την παρουσία DNAPL. Η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, έχει χρησιμοποιηθεί για να οριοθετήσει ρυπασμένα από DNAPLs αργιλικά εδάφη. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης έχει ανιχνεύσει ανωμαλίες στα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων, σε περιοχές που είναι γνωστή η ύπαρξη DNAPLs. Αυτές οι τεχνικές, ενώ δεν είναι καινούργιες στη γεωφυσική κοινότητα είναι σχετικά νέες στην περιβαλλοντική κοινότητα και παραμένει να φανεί πόσο χρήσιμες μπορούν να γίνουν στις περιβαλλοντικές έρευνες.

1.3 Περιγραφή γεωφυσικής τεχνολογίας

Συνοπτικά οι κυριότερες γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται για την ανίχνευση και οριοθέτηση υπεδάφειων περιοχών ρύπανσης είναι οι εξής :

- Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Electrical Resistivity)
- Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)
- Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (Electromagnetometry)
- Σεισμική Ανάκλαση (Seismic Reflection)
- Σεισμική Διάθλαση (Seismic Refraction)
- Μαγνητομετρία (Magnetometry)
- Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (Self Potential)
- Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization)
- Μέθοδος Γωνίας Κλίσης Χαμηλών Συχνοτήτων (Very Low Frequency)

1.3.1 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (electrical resistivity)

Η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους. Το μέγεθος που μελετάται είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η κατανομή των τιμών της στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης (γεωηλεκτρική δομή). Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διεισδύει μέσα

στο υπέδαφος μέσω ηλεκτροδίων και στη συνέχεια μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ αυτών. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους και επομένως από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της δομής. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ηλεκτροδίων είναι αυτές των διπόλου-διπόλου, Schlumberger και Wenner (Hamdan, 2002).

1.3.2 Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)

Ο τρόπος που λειτουργεί το γεωραντάρ είναι απλός. Ο πομπός παράγει ηλεκτρομαγνητικό παλμό ο οποίος διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec). Ο παλμός αυτός “ταξιδεύει” στο υπό έρευνα υλικό ωσότου συναντήσει επιφάνεια ή υλικό με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο υλικό (διάθλαση), και ένα μέρος θα ανακλαστεί και θα επιστρέψει στον δέκτη. Έτσι η μονάδα ελέγχου καταγράφει το χρόνο διαδρομής και το πλάτος του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος επηρεάζεται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού καθώς και από τη συχνότητα εκπομπής της κεραίας.

Το γεωραντάρ βρίσκει εφαρμογή στους παρακάτω τομείς:

- Γεωλογία (έγκοιλα, ασυνέχειες, επιφανειακά κοιτάσματα)
- Επιστήμη μελέτης παγετώνων (πάχος των πάγων, ανίχνευση ρωγμών, εσωτερική δομή)
- Κατασκευές (αστοχίες, ρωγμές, οπλισμός σκυροδέματος)
- Αρχαιολογία (τάφοι, δρόμοι)
- Περιβαλλοντικός τομέας (ρύποι στο υπόγειο νερό, χωματερές, θαμμένα βυτία και βαρέλια, διαρροή αερίων από θαμμένους αγωγούς)

1.3.3 Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (electromagnetometry)

Η μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων βασίζεται στη μέτρηση της απόκρισης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το οποίο προκαλείται μέσα στη γη. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής (κατανομή της ειδικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Το

ηλεκτρομαγνητικό πεδίο χαμηλών συχνοτήτων που παράγεται από πομπό προκαλεί τη ροή ρεύματος μέσα σε ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά του εδάφους. Το παραγόμενο αυτό ρεύμα δημιουργεί με τη σειρά του δευτερεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο επιστρέφει στην επιφάνεια. Τελικά, δέκτης ανιχνεύει το δευτερεύον πεδίο όταν το πρωτεύον είναι μηδενικό και μετράει τη χρονική μεταβολή της έντασής του (Σπανουδάκης, 2001).

1.3.4 Σεισμική Ανάκλαση (seismic reflection)

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

1.3.5 Σεισμική Διάθλαση (seismic refraction)

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

1.3.6 Μαγνητομετρία (magnetometry)

Η Μαγνητομετρία βασίζεται στη μέτρηση μεταβολών του μαγνητικού πεδίου της γης, οι οποίες οφείλονται στην παρουσία μαγνητικών σωμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της. Οι μεταβολές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον σχετίζονται με μαγνητικές ανωμαλίες μικρής κλίμακας στην επιφάνεια της γης (τοπικές μεταβολές της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου). Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής μπορεί να μειωθεί από παρεμβολές (θόρυβος), οι οποίες οφείλονται σε θαμμένες μεταλλικές κατασκευές, οχήματα κτλ (Σπανουδάκης, 2001).

1.3.7 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (self potential)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μετρήσεις του δυναμικού, το οποίο προέρχεται από φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα. Τα ρεύματα αυτά είτε έχουν ηλεκτροκινητική προέλευση είτε παράγονται με ηλεκτροχημική δράση. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της τάσης χρησιμοποιούνται βολτόμετρα. Οι μετρήσεις της τάσης πραγματοποιούνται με δύο βασικούς τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, η τάση υπολογίζεται κατά μήκος γραμμής η οποία διασχίζει την περιοχή μελέτης. Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων διατηρούνται σταθερές και στο τέλος υπολογίζεται η βαθμίδα του δυναμικού. Κατά το δεύτερο τρόπο, το ένα ηλεκτρόδιο παραμένει σε σταθερή θέση, ενώ με το άλλο εντοπίζονται σημεία που εμφανίζουν το ίδιο δυναμικό με αυτό του ακίνητου ηλεκτροδίου (Παπαζάχος, 1986).

1.3.8 Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (induced polarization)

Όταν το συνεχές ρεύμα που διαβιβάζεται στη γη μέσω δύο ηλεκτροδίων διακοπεί απότομα, η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων δε μηδενίζεται αμέσως. Αντίθετα, αρχίζει να ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο και περνούν αρκετά δευτερόλεπτα έως ότου αυτή μηδενιστεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ικανότητα του υπεδάφους να λειτουργεί ως πυκνωτής και να συσσωρεύει ηλεκτρικά φορτία. Η επαγόμενη πολικότητα οφείλεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και μπορεί να δημιουργηθεί από κόκκους μεταλλικών ορυκτών που βρίσκονται σε πορώδη πετρώματα ή από την τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής ορισμένων πετρωμάτων με ηλεκτρολύτες. Με τις

μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας δύο είναι οι ποσότητες που υπολογίζονται: η φορτιστικότητα και η πολικότητα (Παπαζάχος, 1986).

1.3.9 Μέθοδος Γωνίας Κλίσης Χαμηλών Συχνοτήτων (very low frequency)

Οργανισμοί επικοινωνιών και ναυσιπλοΐας χρησιμοποιούν ισχυρούς πομπούς, οι οποίοι εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή των 15-25KHz, δηλαδή στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων. Σε μεγάλες αποστάσεις από το δέκτη, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στην οριζόντια διεύθυνση, ενώ η ένταση του μαγνητικού πεδίου βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο και είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Παράλληλα, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατακόρυφη. Ο δέκτης VLF είναι αποτελείται από δύο πηνία κάθετα μεταξύ τους, τα οποία συντονίζονται στις συχνότητες των πομπών και υπολογίζουν τη γωνία που σχηματίζει ο μέγιστος άξονας της έλλειψης πόλωσης με τη συνιστώσα του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου H_p (Παπαζάχος, 1986).

1.4 Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (πλεονεκτήματα-περιορισμοί)

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση επιτρέπει την απεικόνιση του υπεδάφους και παρέχει πληροφορίες χρήσιμες για τους γεωεπιστήμονες.

1.4.1 Πλεονεκτήματα

➤ Μη καταστρεπτική τεχνική χαρτογράφησης

Πρόκειται για μια μη καταστρεπτική τεχνική χαρτογράφησης. Οι ετερογένειες των εδαφών, μπορούν να καθοριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι απαραίτητη η μέτρηση σε γεωτρήσεις. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα μιας, δυο ή τριών διαστάσεων έρευνας σε αντίθεση με άλλες μη καταστρεπτικές τεχνικές όπως για παράδειγμα την τομογραφία ακτίνων X.

Μπορεί να είναι γρήγορα και εύκολα πραγματοποιήσιμη περιγράφοντας την οριζόντια και πλευρική μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους (Tabbagh et al., 2000).

Ο Park (1998) υπογράμμισε ότι αυτή η μέθοδος πιθανόν να υποδεικνύει λεπτομέρειες σχετικά με την ροή των ρευστών που δεν είναι διαθέσιμες με τις συμβατικές τεχνικές παρακολούθησης.

➤ Παρακολούθηση της χρονικής μεταβολής

Παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της χρονικής μεταβολής της κατανομής των υπογείων νερών σε εδάφη (Slater et al., 2002).

Οι Jackson et al. (2002) προσδιόρισαν ανωμαλίες σε αναχώματα στα άκρα του δρόμου με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε μια περίοδο 18 μηνών όπου υπάρχουν διάφορες υγρές και ξηρές περίοδοι.

➤ Βάθος διασκόπησης

Η έρευνα της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλης παραδοσιακής εδαφολογικής έρευνας (π.χ. έλεγχος νετρονίων, TDR). Οι κλασσικές τεχνικές έχουν περιορισμένο βάθος διασκόπησης. Στην γεωηλεκτρική μέθοδο το βάθος διασκόπησης ρυθμίζεται από το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων με την δυνατότητα να εφαρμοστούν στο ίδιο σημείο διάφορες αποστάσεις ηλεκτροδίων.

➤ Μεγάλη ευαισθησία μετρήσεων

Η ευαισθησία της μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Οι Choudhury et al. (2001) χαρτογράφησαν την ρύπανση εδαφών με υφάλμυρο νερό σε μια περιοχή με απόσταση ηλεκτροδίων 2χλμ.

1.4.2 Περιορισμοί

Η μέθοδος της μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες οι οποίοι δυσκολεύουν την ερμηνεία των μετρήσεων.

➤ Επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος

Μπορούν να γίνουν συστηματικά λάθη λόγω της μη καλής επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος. Οι Hesse et al. (1986) κατέληξαν ότι αυτό το πρόβλημα εμφανίζεται κυρίως σε ξηρά εδάφη και πρότειναν την έγχυση ενός αγωγίμου υγρού.

➤ Βαθμονόμηση

Οι μετρήσεις με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με τις εργαστηριακές μετρήσεις για τη βαθμονόμηση των μετρήσεων υπαίθρου (Shaaban και Shaaban, 2001).

➤ Η διαδικασία αντιστροφής και η μη-μοναδικότητα της λύσης

Η μη-μοναδικότητα της λύσης στην αντιστροφή των δεδομένων μπορούν να οδηγήσουν στην ασάφεια ή την παρερμηνεία. Κατά συνέπεια, βασική γνώση της υπό μελέτη περιοχής συστήνεται πριν από την αντιστροφή. Οι Olayinka και Yaramanci (2000) ισχυρίστηκαν ότι η διαδικασία αντιστροφής δεν μπορεί να είναι πολύ ακριβής επειδή: (i) η λύση από το αντίστροφο πρόβλημα δεν είναι συχνά μοναδική, (ii) τα μοντέλα καθορίζουν συνεχή συνάρτηση από πεπερασμένο αριθμό μετρήσεων, (iii) όταν η λύση είναι μοναδική, οι ακριβείς τεχνικές αντιστροφής είναι συχνά ασταθείς και (iv) οι μετρήσεις περιέχουν θόρυβο. Η αντιστροφή μπορεί μόνο να παρέχει έναν κατά προσέγγιση οδηγό στην αληθινή γεωμετρία των κάτω από την επιφάνεια ετερογενειών.

1.5 Γεωφυσικές μελέτες σε περιβαλλοντικά προβλήματα

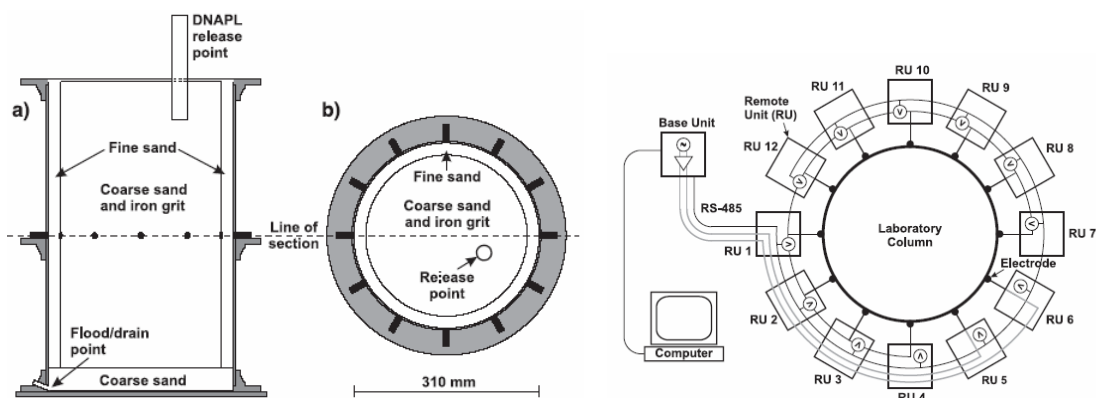
Στο παρελθόν αρκετές φορές, διάφορες ηλεκτρικές και μη μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί σε περιβαλλοντικά προβλήματα και ειδικότερα στον εντοπισμό της ρύπανσης.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε για να ελέγξει την απορρύπανση με την άντληση μιας κινητής φάσης DNAPL στην πολιτεία της Utah στις ΗΠΑ, στη βάση της Πολεμικής Αεροπορίας στο Hill. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν και διαγραφίες νετρονίων και ακτίνων γάμμα.. Η διαγραφή νετρονίων ανίχνευσε ζώνη χαμηλής έντασης νετρονίων στο όριο μεταξύ στρώματος άμμου και αργιλικού στρώματος. Η διαγραφή γάμμα παρουσίασε απότομη μεταβολή στην ίδια θέση. Κατά την άντληση του DNAPL, το πάχος της παραπάνω ζώνης μειώθηκε γεγονός το οποίο αποτελεί ένδειξη ότι η διαγραφή νετρονίων επηρεάζεται από την περιεκτικότητα χλώριου / υδρογόνου. Μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας έγιναν μέσα σε γεωτρήσεις, πριν αρχίσει η άντληση αλλά και κατά την διάρκεια αυτής. Από την

σύγκριση εικόνων που αντιστοιχούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές έδειξαν την βαθμιαία μετατόπιση DNAPL το οποίο αντλήθηκε (Newmark, et al., 1998).

Γεωηλεκτρική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε το 2001 από το πανεπιστήμιο Al-Balqa στην Ιορδανία σε χώρο βιομηχανικών απορριμμάτων στο Qasr Tuba στην κεντρική Ιορδανία. Χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις Schlumberger και διπόλου-διπόλου. Χαρτογραφήθηκε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους και συγκρίθηκε με δεδομένα από γεωτρήσεις και αεροφωτογραφίες.

Η ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης (EIT) χρησιμοποιήθηκε για να ελέγξει τη μετακίνηση DNAPL σε μια εργαστηριακή στήλη διαποτισμένου πορώδους μέσου (Chambers et al., 2004). Στο άνω άκρο κυλινδρικής στήλης η οποία ήταν γεμάτη με πορώδες υλικό διοχετεύθηκαν μεγάλης πυκνότητας, μη υδατικής υγρής φάσης υδρογονάνθρακες. Μελετήθηκε η πορεία τους και αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στον εντοπισμό τους. Οι μετρήσεις σύνθετης αντίστασης έγιναν χρησιμοποιώντας 12 ηλεκτρόδια τοποθετημένα γύρω από το κέντρο της στήλης. Ένας αλγόριθμος αντιστροφής, ο οποίος ενσωμάτωσε την κυλινδρική γεωμετρία της στήλης, χρησιμοποιήθηκε για να εκτιμήσει την ειδική αντίσταση. Εκτός από την κατακόρυφη μετανάστευση του DNAPL, παρατηρήθηκε και πλευρική. Συγκρίνοντας τις διαδοχικές σε χρόνο γεωηλεκτρικές τομές περιγράφηκε η ροή DNAPL η οποία επιβεβαιώθηκε με άλλες μετρήσεις.



Σχήμα 1.1: Η εργαστηριακή κυλινδρική στήλη με το πορώδες μέσο και η διάταξη των ηλεκτροδίων.

Γεωφυσική διασκόπηση έγινε σε περιοχή διάθεσης αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων στην πόλη Isparta στην Τουρκία (Karlik και Kaya, 2000). Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η μέθοδος VLF μαζί με χημικές και υδρογεωλογικές μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της ρύπανσης των υπογείων νερών. Ειδικότερα, από τις μετρήσεις στην περιοχή, οι ζώνες της ρύπανσης χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης.

Επίσης γεωφυσική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε στην περιοχή διάθεσης αστικών αποβλήτων στο Savoia di Lucania στην νότια Ιταλία (Bavusi et al., 2006). Χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας και η μέθοδος φυσικού δυναμικού. Οι γεωφυσικές μέθοδοι εντόπισαν ζώνες συγκέντρωσης και αποστράγγισης αποβλήτων. Η χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας και της μεθόδου επαγόμενης πολικότητας έδωσε πληροφορίες για τη ρύπανση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΔΙΥΛΗΣΤΗΡΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στα Διυλιστήρια Ασπροπύργου του ομίλου εταιριών 'ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ'.

Στη δεκαετία του 1970 τα Ελληνικά Διυλιστήρια Πετρελαίου Ασπροπύργου (ΕΛ.Δ.Α.), εξαγοράζονται από το Ελληνικό Δημόσιο και ιδρύεται η Δημόσια Επιχείρηση Πετρελαίου (Δ.Ε.Π.) Α.Ε. Το Ελληνικό Δημόσιο ελέγχει πλήρως τη διύλιση, διάθεση και εμπορία διυλισμένων προϊόντων. Το 1998 η Δ.Ε.Π. μετονομάζεται σε ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε. και συγχωνεύεται με τις ΔΕΠ - ΕΚΥ, ΕΛ.Δ.Α., και ΕΚΟ.

Το διυλιστήριο δραστηριοποιείται στη διακίνηση πετρελαίων και αεροπορικών καυσίμων, καθώς και συσκευασμένου PVC. Λειτουργεί συμπληρωματικά με την εγκατάσταση Σκαραμαγκά ώστε να ικανοποιούνται με τον επωφελέστερο τρόπο οι ανάγκες διακίνησης.

2.2 Προσβασιμότητα

Στην ευρύτερη περιοχή των δεξαμενών αποθήκευσης αργού πετρελαίου, στις εγκαταστάσεις των Διυλιστηρίων υπάρχει οδικό δίκτυο, το οποίο είναι κυρίως ανεπτυγμένο περιφερειακά των εγκαταστάσεων, με μικρότερους δρόμους πάνω στα επιχώματα ανάμεσα στις δεξαμενές πετρελαίου. Οι δεξαμενές βρίσκονται σε ένα επίπεδο περί των 5 μέτρων χαμηλότερα από το οδικό δίκτυο για λόγους ασφαλείας. Ο περιβάλλοντας χώρος τους είναι επιστρωμένος με κατάλληλο εδαφικό υλικό επιτρέποντας και την εύκολη πρόσβαση σε κάθε σημείο του χώρου.

2.3 Ιδιαίτερα Χαρακτηριστικά της περιοχής γεωφυσικής διασκόπησης

Διαστάσεις χώρου: 8 x 160 μέτρα

Υψόμετρο: περίπου 20 μέτρα πάνω από τον ορίζοντα του θαλασσινού νερού.

Ενδείξεις διαρροής: Καμία.

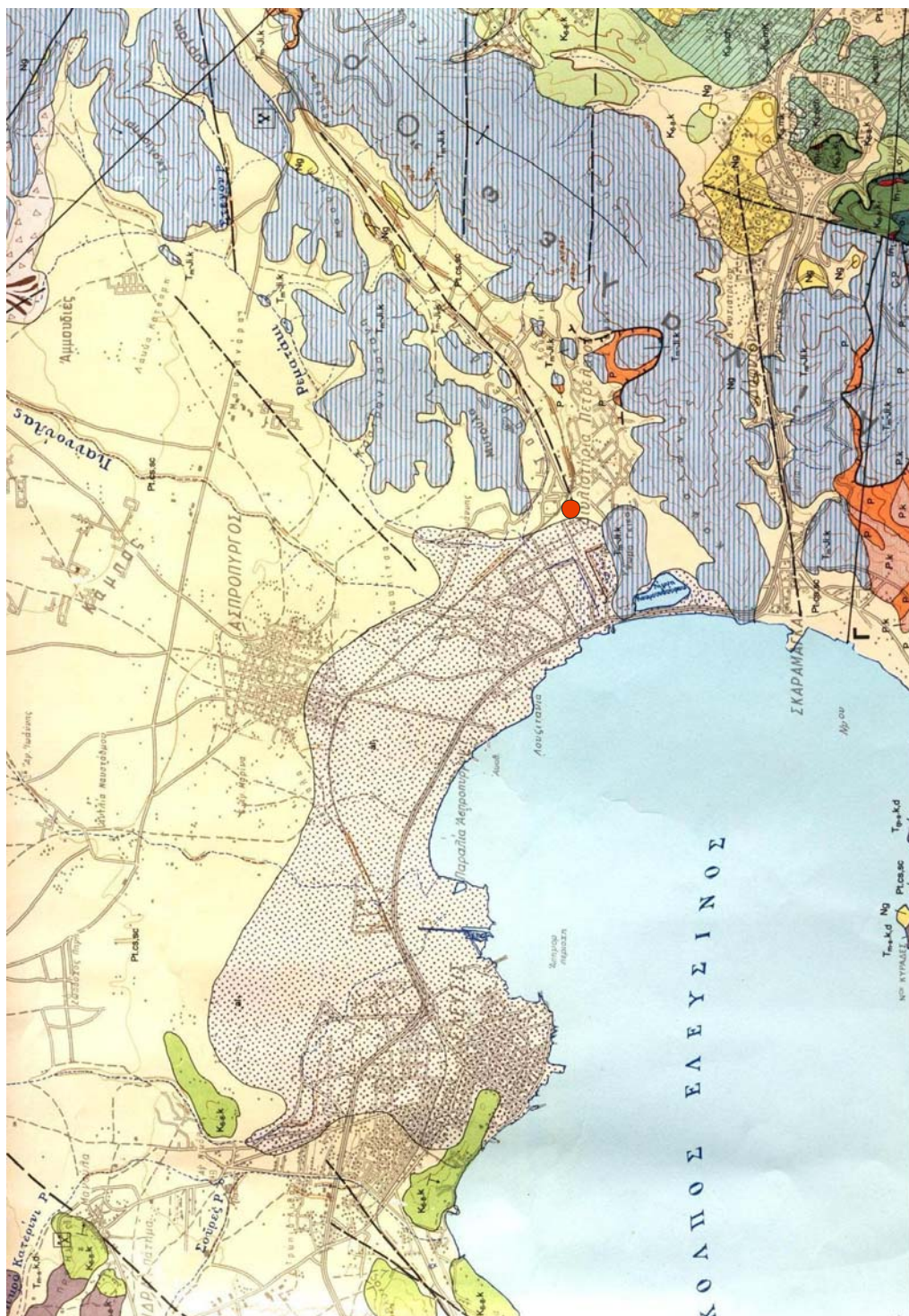
Υπέργειοι αγωγοί: Αργού πετρελαίου

Τσιμεντωμένες περιοχές: 15% της ολικής έκτασης

Επιχώματα από χαλίκι, γύρω από τις δεξαμενές, κάτω από τα οποία βρίσκονται καλώδια υψηλής τάσης και το δίκτυο πυρασφαλείας.

2.4 Γεωλογικός Χάρτης

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ. φύλλο ΑΘΗΝΑ - ΕΛΕΥΣΙΝΑ. η περιοχή των Διυλιστηρίων Πετρελαίου Ασπρόπυργου, καλύπτεται από Πλειστοκαινικές αποθέσεις της κλειστής λεκάνης Σκούρτων, αργιλλοαμμώδη υλικά με ασβεστιτικά συγκρίματα και διάσπαρτες κροκαλολατύπες μικρής συνεκτικότητας, καστανοκόκκινου χρώματος. Το πάχος των αποθέσεων δεν ξεπερνά τα 30 μέτρα. Κάτω από τις Πλειστοκαινικές αποθέσεις συναντώνται ασβεστόλιθοι. δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες Μ. Τριαδικού - Κ. Ιουρασικού. Αυτοί οι σχηματισμοί είναι ανοιχτότεφροι και μερικές φορές σκοτεινότεφροι, μέσο- έως παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις άστρωτοι, έντονα κερματισμένοι μικροκρυσταλλικοί και κατά θέσεις πολύ κρυσταλλικοί. Στη βάση τους είναι τοπικά λεπτοστρωματώδεις και έχουν χρώμα τεφρόμαυρο με κόκκινο. Το πάχος τους αν και είναι δύσκολο να εκτιμηθεί επακριβώς, υπολογίζεται ότι φτάνει τα 700 μέτρα περίπου.

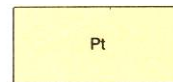


Σχήμα 2.1: Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε.(ΦΥΛΛΟ : ΑΘΗΝΑ – ΕΛΕΥΣΙΝΑ) κλίμακας 1:50.000. Σημειώνεται η θέση των δεξαμενών αποθήκευσης αργού πετρελαίου στις εγκαταστάσεις των Διυλιστηρίων Ασπροπύργου με κόκκινο χρώμα (N 38°02' 04.79" - E 23° 36' 11.69").

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

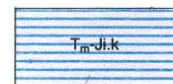
ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

Αποθέσεις κλειστής λεκάνης Σκούρτων: από αργιλοαμμώδη υλικά με ασβεστίτικα συγκρίμματα και διάσπαρτες κρεκαλολατύπες, μικρής συνεκτικότητας, χρώματος καστανοκόκκινου. Μέγιστο πάχος: 30 μ. περίπου.



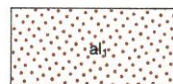
ΜΕΣΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ-ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες: ανοικτότεφροι και μερικές φορές σκοτεινότεφροι, μεσο-μέχρι παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις άστρωτοι, έντονα κερματισμένοι, μικροκρυσταλλικοί και κατά θέσεις πολύ κρυσταλλικοί. Στη βάση τους είναι τοπικά λεπτοστρωματώδεις και έχουν χρώμα τεφρόμαυρο ή κόκκινο. Από τα κατώτερα προς τα ανώτερα στρώματα έχουμε τα απολιθώματα:



ΟΛΟΚΑΙΝΟ

Αλλουθιακές προσχώσεις πεδινών περιοχών ανοικτών προς τη θάλασσα και **αργιλοαμμώδη υλικά** τεναγών και παραλιακών περιοχών.



Σχήμα 2.2: Απόσπασμα υπομνήματος Χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε.(ΦΥΛΛΟ : ΑΘΗΝΑ – ΕΛΕΥΣΙΝΑ)



Σχήμα 2.3: Διάνοιξη δειγματοληπτικής γεώτρησης Β στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 2.4: Διάνοιξη δειγματοληπτικής γεώτρησης Α στην περιοχή μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

3.1.1 Εισαγωγή

Η εμφάνιση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης χρονολογείται από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών επιτεύχθηκε ο εντοπισμός φυσικού αερίου στη Ρουμανία το 1923 και αλατούχων δόμων στη Γαλλία το 1926. Η συστηματική εφαρμογή τους ξεκίνησε τη δεκαετία του '70 και αυτό λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γεγονός που βοήθησε τόσο στη συλλογή των δεδομένων όσο και στην επεξεργασία τους.

Βασική επιδίωξη των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Μετρούμενο μέγεθος είναι η ηλεκτρική τάση. Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο καθορισμός της τιμής, καθώς και η μελέτη των μεταβολών αυτής στα επιφανειακά στρώματα, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Για την εφαρμογή των ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων απαιτείται σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος.

Από τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης οι πιο σημαντικές είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων. Για τη συλλογή δεδομένων στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκεκριμένα η ηλεκτρική τομογραφία, η ηλεκτρική βυθοσκόπηση και η ηλεκτρική χαρτογράφηση.

3.1.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενές και ισότροπο έδαφος

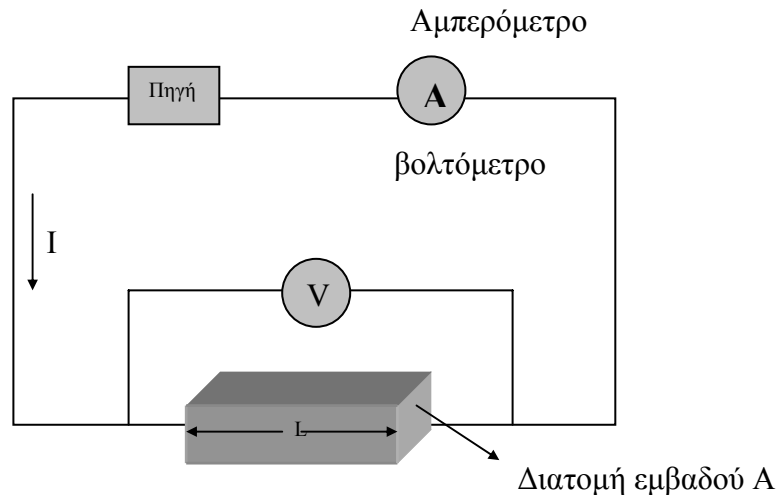
Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm (Robinson, 1988), σύμφωνα με τον οποίο αντίσταση R (σε Ohm) ενός αγωγού ονομάζεται ο σταθερός λόγος της διαφοράς δυναμικού ΔV (σε Volt) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση I (σε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

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.1)$$

Η αντίσταση ενός ομογενούς αγωγού είναι ανάλογη με το μήκος L του αγωγού, αντιστρόφως ανάλογη με το εμβαδόν A της τομής του αγωγού και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία του.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.2)$$

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



Σχήμα 3.1: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου.

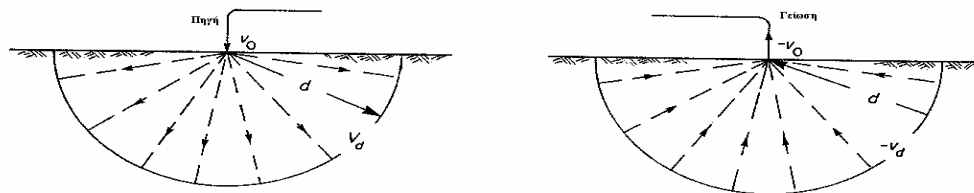
Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) μονάδα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το $1 \Omega m$. Πολλές φορές όμως χρησιμοποιείται και η μονάδα $1 \Omega cm$ και είναι $1 \Omega m = 100$

Ωcm . Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από $10^{-6} \Omega\text{m}$ σε ορισμένα ορυκτά όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι $10^{15} \Omega\text{m}$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1} \Omega\text{m}$ χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15} \Omega\text{m}$. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι: α) η λιθολογία, β) το πορώδες, γ) η γεωλογική ηλικία, δ) η θερμοκρασία των πετρωμάτων.

Τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους συνδεδεμένα με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος δημιουργείται κλειστό κύκλωμα, στο οποίο η γη αποτελεί τον αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή ο αέρας της ατμόσφαιρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, όλο το ρεύμα από το ηλεκτρόδιο διοχετεύεται στη γη.

Για την κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται ότι η γη είναι ομοιογενής και ισότροπη ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ . Επιπλέον τα ηλεκτρόδια θεωρούνται σημειακά, δηλαδή οι εξισώσεις που προκύπτουν, ισχύουν για σημειακή πηγή.

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

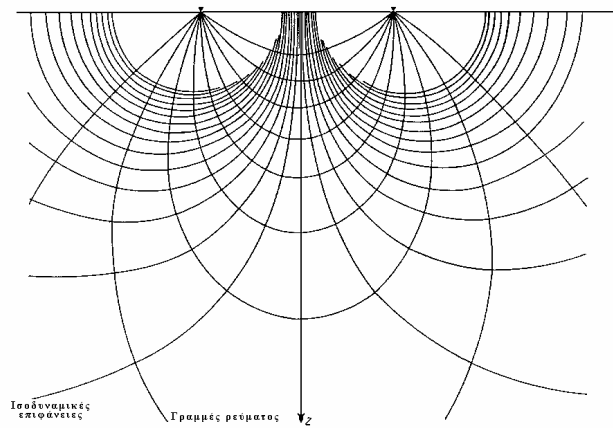


Σχήμα 3.2: Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη στην περίπτωση που δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Το συνολικό δυναμικό V σε ένα σημείο του υπεδάφους που απέχει αποστάσεις d_1 και d_2 από την πηγή και τη γείωση αντίστοιχα, ισούται με το άθροισμα του δυναμικού V_{d1} που οφείλεται στην πηγή, με το δυναμικό V_{d2} που οφείλεται στη γείωση:

$$V = V_{d1} + V_{d2} = V_{d1} - V_0 + V_0 + V_{d2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (3.3)$$

Με βάση τη σχέση (3.3) υπολογίζεται το δυναμικό σε όλα τα σημεία του υπεδάφους και γίνεται η σχεδίαση των ισοδυναμικών επιφανειών. Οι γραμμές ρεύματος σχεδιάζονται κάθετα στις ισοδυναμικές επιφάνειες. Τόσο οι γραμμές ρεύματος όσο και οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι συμμετρικές ως προς την ευθεία που τέμνει κάθετα και στο μέσο το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα δύο ηλεκτρόδια.



Σχήμα 3.3: Ροή ηλεκτρικού ρεύματος στην περίπτωση που δύο ηλεκτρόδια εισάγονται σε ομοιογενές και ισότροπο έδαφος (Dobrin, 1976).

Το σχήμα 3.3 ισχύει για κάθε επίπεδο που περιέχει τα δύο ηλεκτρόδια, ανεξάρτητα από τη γωνία κλίσης του ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

3.1.3 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα.

Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος και από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων που θα περιγραφούν παρακάτω.

3.1.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων, το σχήμα 3.4 δείχνει τις τρεις πιο σημαντικές διατάξεις που είναι:

α) Διάταξη Wenner

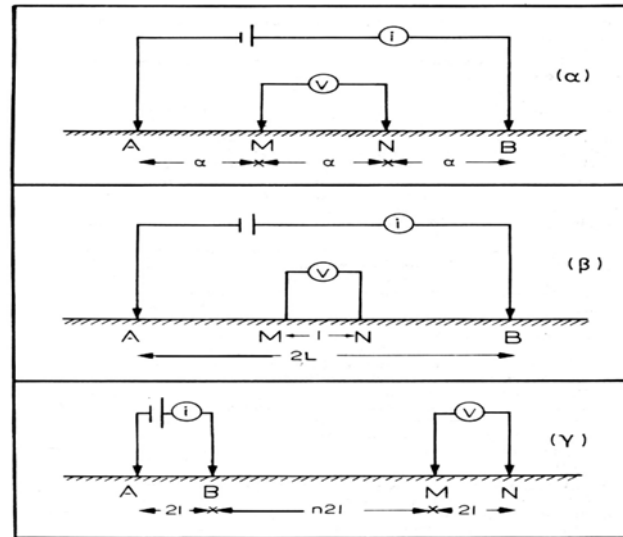
Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, δηλαδή, $AM = MN = NB = a$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.α.

β) Διάταξη Schlumberger

Στη διάταξη Schlumberger (σχήμα 3.4β), τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης.

γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Σε αυτή τη διάταξη η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος είναι ίση με a . Ομοίως a είναι και το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγαριών των ηλεκτροδίων είναι μεγάλη και ίση με na ($\gg a$), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.γ.



Σχήμα 3.4: Διατάξεις Wenner (α), Schlumberger (β), διπόλου-διπόλου (γ) (Παπαζάχος, 1986, σελ. 253).

3.1.5 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τη γεωηλεκτρική διασκόπηση. Η διάταξη των ηλεκτροδίων δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι παράγοντες-κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι οι κάτωθι.

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο

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

2. Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες

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

3. Ευαισθησία σε βάθος

Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος δίνει

λεπτομερή ανάλυση της ειδικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

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

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

5. Βάθος διασκόπησης

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

6. Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου

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

7. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αραίωση των ρευματικών γραμμών.

3.1.6 Ηλεκτρική Τομογραφία

3.1.6.1 Θεωρία

Με την ηλεκτρική τομογραφία επιδιώκεται ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, δηλαδή η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

Επειδή δεν είναι εύκολος ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος από μετρήσεις στην επιφάνεια της γης, υπολογίζεται αρχικά η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος όπως:

- α) την ορυκτολογική σύσταση
- β) το πορώδες, τη φύση και τη θερμοκρασία των περιεχόμενων ρευστών
- γ) τη κατάσταση ρηγμάτωσης
- δ) το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων.

3.1.6.2 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων

Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Wenner – Schlumberger και η διάταξη διπόλου-διπόλου. Η διάταξη Wenner – Schlumberger είναι ένας συνδυασμός των δύο διατάξεων, όπου η θέση των ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος για την πρώτη μέτρηση είναι σύμφωνη με τη διάταξη Wenner. Εν συνεχεία η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού παραμένει σταθερή από το κέντρο της διάταξης και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, πάντα συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης (τρόπος πραγματοποίησης μετρήσεων με τη διάταξη Schlumberger). Στη διάταξη Wenner η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερή και ίση με a και όλη η διάταξη μετακινείται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση :

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I} \quad (3.4)$$

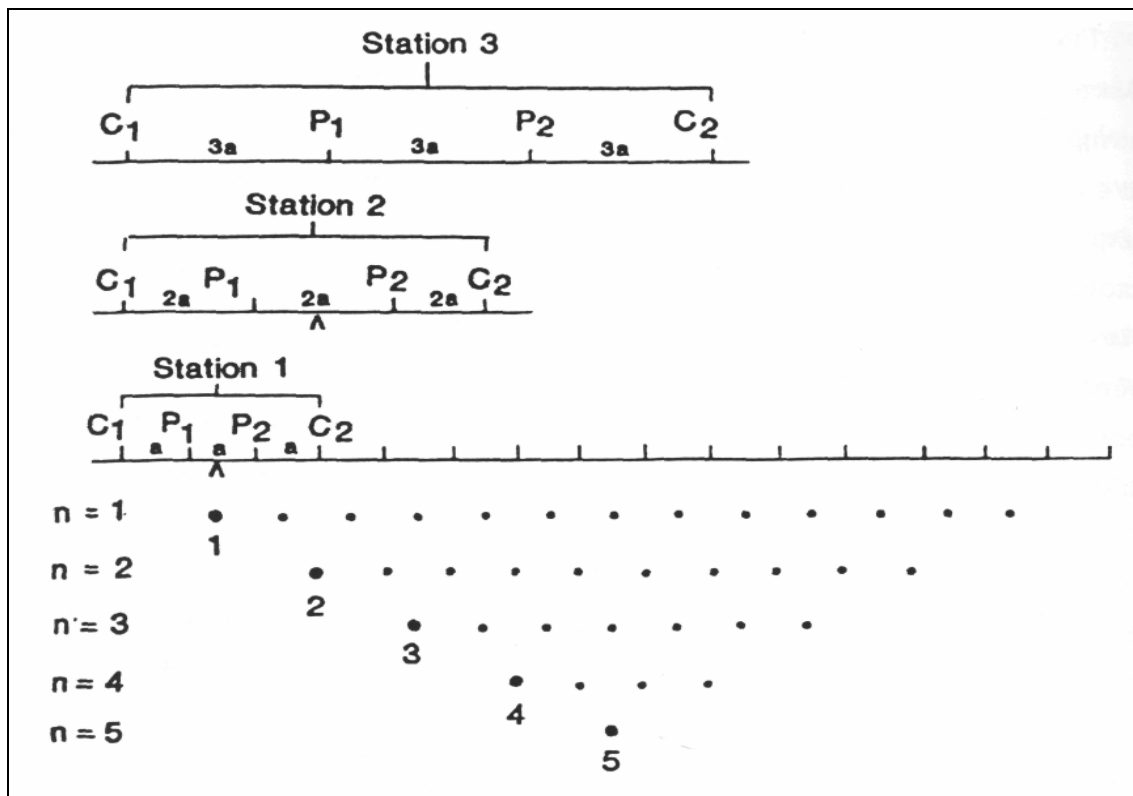
Στη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα βάθη, αυξάνεται σταδιακά η απόσταση σε $2a, 3a$ κ.ο.κ.

Στη διάταξη Schlumberger η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, συμμετρικά πάντα με το κέντρο της όλης διάταξης. Στη συγκεκριμένη διάταξη η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i} \quad (3.5)$$

Για την επίτευξη διέλευσης ρεύματος σε μεγαλύτερα βάθη αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους. Στην ψευδοτομή (pseudosection) οι φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι σχεδιασμένες σε μία τομή σε σημεία ακριβώς κάτω από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και σε βάθος που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διάταξη.



Σχήμα 3.5: Ψευδοτομή (pseudosection) φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται μια προσεγγιστική εικόνα της κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων που δίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ξεκινώντας από ένα αρχικό μοντέλο το επόμενο βήμα είναι η λύση του ευθέως προβλήματος, στο οποίο υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό. Οι θεωρητικές αυτές τιμές, μαζί με τις πραγματικές μετρήσεις και τις παραμέτρους του μοντέλου καθορίζουν ένα σύστημα εξισώσεων. Ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής, όπου επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων με αγνώστους

τις παραμέτρους του μοντέλου. Υπολογίζεται με τη διαδικασία αυτή ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο. Η βελτίωση αφορά μόνο τις παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο τις φαινόμενες αντιστάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τη σειρά τους με τις πραγματικές μετρήσεις. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο που να δίνει φαινόμενες αντιστάσεις όσο το δυνατό πιο κοντά στις μετρήσεις.

3.1.6.3 Αντιστροφή των δεδομένων

Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις. Στα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα που χρησιμοποιείται η αντιστροφή, τα δεδομένα συνδέονται με μη γραμμικές σχέσεις με τις παραμέτρους του μοντέλου. Έτσι και στην περίπτωση της αντιστροφής των φαινόμενων αντιστάσεων το πρόβλημα είναι μη γραμμικό. Επιπλέον το πρόβλημα είναι υπερπροσδιορισμένο, δηλαδή ο αριθμός των δεδομένων υπερβαίνει τον αριθμό των παραμέτρων του μοντέλου.

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

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

$$d_i = f_i(m_1, m_2, \dots, m_M) + e \quad (3.6)$$

όπου e το σφάλμα των μετρήσεων.

Για το αρχικό μοντέλο $m^0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0)$ είναι:

$$d_i = f_i(m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0) + e$$

Προσεγγίζοντας τη συνάρτηση f_i με σειρά Taylor γύρω από το m^0 προκύπτει:

$$f_i(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, \dots, m_M^0 + \delta m_M) \quad (3.7)$$

Το σφάλμα από τη σχέση (3.6) είναι:

$$e_i = d_i - f_i(m) \approx d_i - f_i(m^0) - \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \right\}_{m_j=m_j^0} \cdot \delta m_j \quad (3.8)$$

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

$$e_i \approx \Delta d - Ax \quad (3.9)$$

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

$$q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad (3.10)$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το q ως προς x και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων επιβάλλεται περιορισμός στον πίνακα x με στόχο να μην αυξάνεται απότομα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Η λύση x προστίθεται στο αρχικό μοντέλο m^0 και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο m^1

$$m^1 = m^0 + x \quad (3.11)$$

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

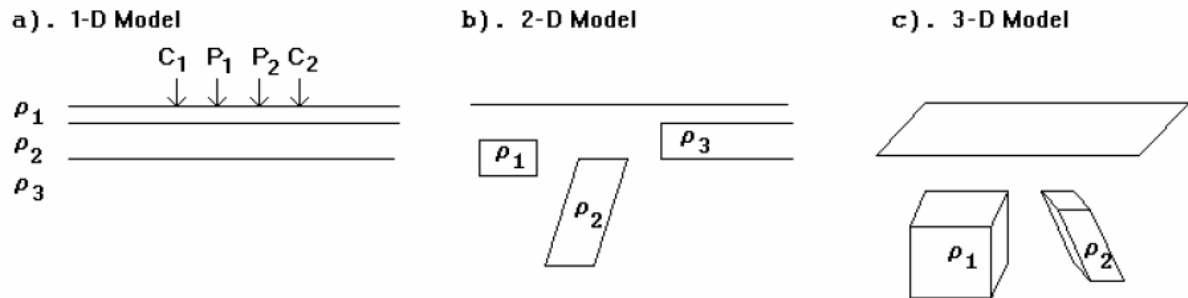
$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad (3.12)$$

όπου N ο αριθμός των μετρήσεων, δίνει ένα μέτρο του πόσο καλά ταιριάζουν οι θεωρητικές μετρήσεις με τις πραγματικές για κάθε μοντέλο. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της αντιστροφής δεν έχει μονοσήμαντη λύση. Το μοντέλο με το μικρότερο σφάλμα δε σημαίνει ότι είναι γεωλογικά αποδεκτό. Από τη χρήση γεωλογικών πληροφοριών βελτιώνεται η αξιοπιστία του προκύπτοντος μοντέλου. Στην όλη διαδικασία οι υπολογισμοί γίνονται με τους λογάριθμους των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φαινόμενης αντίστασης.

3.1.7 Η Τρισδιάστατη Έρευνα της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

3.1.7.1 Εισαγωγή

Συνήθως χρησιμοποιούνται μοντέλα μιας δυο ή τριών διαστάσεων. Στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο αποτελείται από οριζόντια στρώματα στη δεύτερη η γεωηλεκτρική δομή είναι δυο διαστάσεων και τέλος στην τρίτη είναι τριών διαστάσεων.

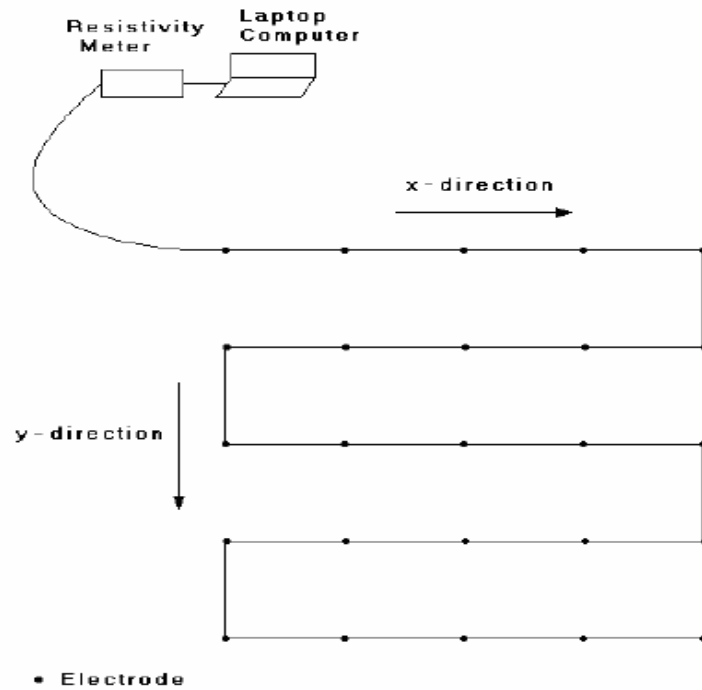


Σχήμα 3.6: Τα τρία διαφορετικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται στην ερμηνεία των μετρήσεων ειδικής αντίστασης.

Δεδομένου ότι όλες οι γεωλογικές δομές είναι τρισδιάστατες, μια πλήρως τρισδιάστατη έρευνα ειδικής αντίστασης που χρησιμοποιεί το τρισδιάστατο πρότυπο ερμηνείας πρέπει θεωρητικά να δώσει τα ακριβέστερα αποτελέσματα.. Οι τρισδιάστατες έρευνες αποτελούν ένα αντικείμενο εξέλιξης. Εντούτοις δεν έχει φθάσει στο επίπεδο ώστε να χρησιμοποιείται συνήθως όπως ή δισδιάστατη έρευνα. Ο κύριος λόγος είναι ότι το κόστος ερευνών είναι συγκριτικά υψηλότερο για μια τρισδιάστατη έρευνα. Η ανάπτυξη των πολυδιαυλικών μετρητών ειδικής αντίστασης που επιτρέπει περισσότερους από μια αναγνώσεις ταυτόχρονα και οι γρηγορότεροι μικροϋπολογιστές για την αντιστροφή 8000 δεδομένων σε λογικό χρόνο ευνοούν την πιο συχνή χρήση της τρισδιάστατης έρευνας.

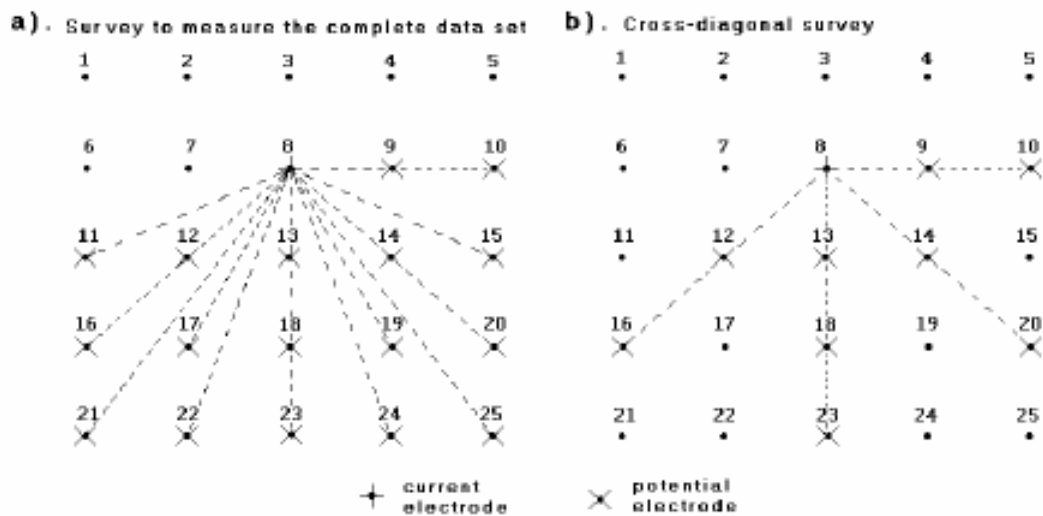
3.1.7.2 Οι μετρήσεις στην τρισδιάστατη έρευνα

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται διάταξη των ηλεκτροδίων για μια τρισδιάστατη έρευνα χρησιμοποιώντας κάνναβο με 25 κόμβους.



Σχήμα 3.7: Διάταξη ηλεκτροδίων σε τρισδιάστατη έρευνα

Παρακάτω παρουσιάζονται δυο πιθανοί τρόποι μέτρησης σε τρισδιάστατη έρευνα όπου η θέση των ηλεκτροδίων δυναμικού αντιστοιχεί σε ένα μόνο τρέχον ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 3.8: Δυο πιθανοί τρόποι μέτρησης σε τρισδιάστατη έρευνα α)μέτρηση του πλήρες συνόλου των στοιχείων, β) μέτρηση στην διαγώνια διεύθυνση (cross diagonal technique)

Μια εμπορική τρισδιάστατη έρευνα θα χρειαζόταν 16x16 ηλεκτρόδια για να καλύψει μια λογικά μεγάλη περιοχή. Τα 256 ηλεκτρόδια που απαιτούνται είναι πάρα πολλά. Μια άλλη συνήθης προσέγγιση είναι να διεξαχθούν μετρήσεις στην X και τη Y κατεύθυνση μόνο, χωρίς τις διαγώνιες μετρήσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα σύνηθες εάν η έρευνα διεξάγεται με περιορισμένο αριθμό ηλεκτροδίων

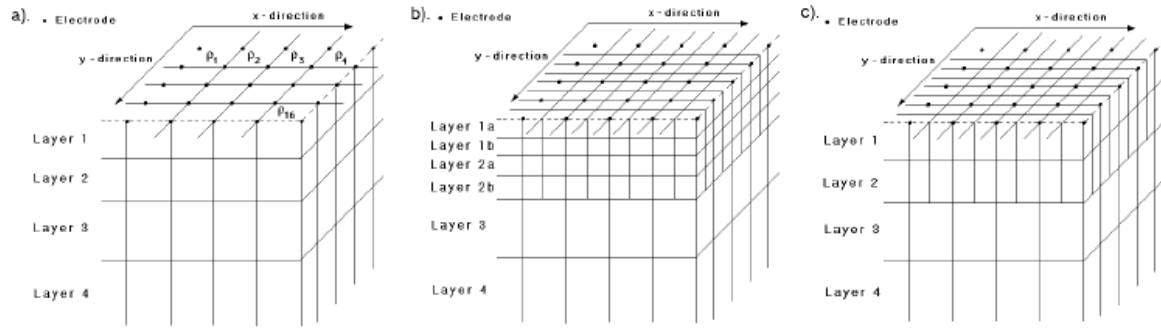
Σε μερικές περιπτώσεις, οι μετρήσεις γίνονται μόνο σε μια κατεύθυνση. Το τρισδιάστατο σύνολο μετρήσεων αποτελείται από μετρήσεις κατά μήκος παραλλήλων γραμμών μελέτης. Οι μετρούμενες όμως τιμές μπορούν να αντιστραφούν ώστε να δώσουν μια τρισδιάστατη εικόνα. Ωστόσο η ποιότητα του τρισδιάστατου μοντέλου αναμένεται να είναι φτωχότερη από αυτή μιας πλήρους τρισδιάστατης έρευνας.

3.1.7.3 Η τρισδιάστατη αντιστροφή

Η τρισδιάστατη αντιστροφή μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων όπως και στην δισδιάστατη αντιστροφή. Το υπέδαφος διαιρείται σε στρώματα και κάθε στρώμα υποδιαιρείται περαιτέρω σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα.

Η αντιστροφή καθορίζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ορθογώνιων παραλληλεπίπεδων, στο μοντέλο το οποίο θα αναπαράγει καλύτερα τις μετρούμενες φαινόμενες αντιστάσεις από το πεδίο της έρευνας.

Ακόμα υπάρχουν άλλα δυο μοντέλα. Το δεύτερο μοντέλο περιγράφει λεπτομερέστερα τα ρηχά στρώματα. Το τρίτο μοντέλο περιγράφει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια μόνο τη πλευρική μετατόπιση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αφού η ανάλυση της μεθόδου φθίνει σε σχέση με το βάθος, έχει βρεθεί πως αυτά τα μοντέλα είναι κατάλληλα.



Σχήμα 3.9: Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη αντιστροφή .α)μοντέλο όπου τα άκρα των ορθογωνίων παραλληλεπιπέδων συμπίπτουν με τις αποστάσεις ηλεκτρονίων στην x και y διάσταση, β)μοντέλο στο οποίο τα πρώτα στρώματα είναι υποδιαιρεμένα στο μισό σε κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση, γ)μοντέλο στο οποίο τα πρώτα στρώματα είναι υποδιαιρεμένα στο μισό σε οριζόντια διεύθυνση.

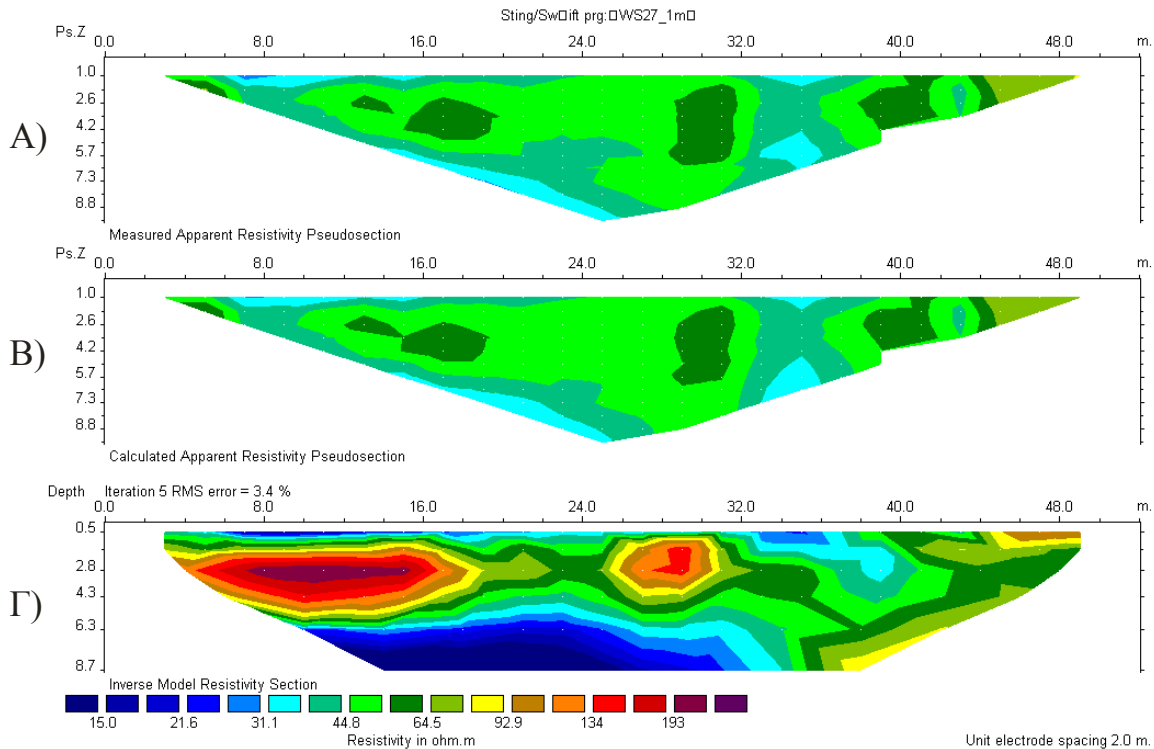
3.1.8 Το λογισμικό πακέτο RES2DINV

Το RES2DINV (έκδοση 3.4) καθορίζει αυτόματα δισδιάστατο (2-D) μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Griffiths and Barker 1993). Αυτό το πρόγραμμα αντιστρέφει δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν με τη χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων.

Χρησιμοποιείται μη γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων για την αντιστροφή των δεδομένων (deGroot-Hedlin and Constable, 1990, Loke and Barker, 1996a) τα οποία συλλέχθηκαν με οποιαδήποτε από τις παρακάτω διατάξεις: Wenner, πόλου- πόλου, διπόλου-διπόλου, πόλου-δίπολου, Schlumberger, Wenner - Schlumberger και τις ορθογώνιες σειρές. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί ψευδοτομές με έως και 650 ηλεκτρόδια και 6500 σημεία δεδομένων.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα, εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο dat. Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές. Η πρώτη τομή είναι η ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η δεύτερη τομή είναι η ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή. Υπάρχει η δυνατότητα να μην ληφθούν υπόψη μετρήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο σφάλμα. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του αριθμού των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής. Ακόμα, στα

αποτελέσματα του προγράμματος συγκαταλεγεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS.



Σχήμα 3.10: Γεωηλεκτρική τομή από το πακέτο RES2DINV Α) ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, Β) ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

3.1.9 Το λογισμικό πακέτο RES3DINV

Το RES3DINV είναι ένα πρόγραμμα που καθορίζει αυτόματα ένα τρισδιάστατο πρότυπο ειδικής αντίστασης χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που λαμβάνονται από τρισδιάστατη ηλεκτρική έρευνα (Li and Oldenburg 1992). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω τα ηλεκτρόδια για μια τέτοια έρευνα τοποθετούνται σε ορθογώνιο πλέγμα.

Εντούτοις, παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από την δισδιάστατη έρευνα πυκνών παράλληλων γραμμών.

Το πρόγραμμα αντιστρέφει τα δεδομένα μέσω μη γραμμικής τεχνικής ελαχίστων τετραγώνων (deGroot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992). Μπορεί να δεχθεί δεδομένα τα οποία έχουν συλλεχθεί με διάφορες διατάξεις : Wenner, πόλου- πόλου,

διπόλου-διπόλου, πόλου-δίπολου, Schlumberger, Wenner-Schlumberger και τις ορθογώνιες σειρές.

Τα αποτελέσματα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μετά από την τρισδιάστατη αντιστροφή μπορούν να δοθούν σε μορφή οριζοντίων τομών (σε κατεύθυνση x-y) αλλά και σε μορφή γεωηλεκτρικών τομών (σε κατεύθυνση x-z) .

Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του αριθμού των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής. Ακόμα, στα αποτελέσματα του προγράμματος συγκαταλέγεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS.

3.2 Διαγραφίες Φυσικής Ραδιενέργειας

Όλα τα ιζηματογενή πετρώματα περιέχουν μικρές ποσότητες ραδιενεργών στοιχείων. Η ποσότητα των ραδιενεργών στοιχείων ποικίλλει από ορίζοντα σε ορίζοντα. Η διαγραφή ακτίνων Γάμμα (Gamma Ray Log) και η διαγραφή φασματοσκοπίας ακτίνων Γάμμα (Natural Gamma Ray Spectrometry Log, NGS) αποτελούν τις κυριότερες διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας.

Η διαγραφή ακτίνων γάμμα σε ιζηματογενείς σχηματισμούς συνήθως δίνει πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ραδιενεργά στοιχεία τείνουν να συγκεντρώνονται στα αργιλικά πετρώματα όπου υπάρχει ιδιαίτερη συγκέντρωση του ραδιενεργού ισότοπου του καλίου (K^{40}) και των ραδιενεργών στοιχείων των οικογενειών του ουρανίου και του θορίου. Ιζηματογενείς σχηματισμοί χωρίς αργιλικές προσμίξεις εμφανίζουν χαμηλές τιμές φυσικής ραδιενέργειας εκτός αν το νερό του σχηματισμού περιέχει ραδιενεργά άλατα.

Η διαγραφή ακτίνων γάμμα είναι δυνατόν να καταγραφεί και σε σωληνωμένες γεωτρήσεις, γεγονός που την καθιστά πολύ χρήσιμη στο συσχετισμό γεωτρήσεων. Συχνά χρησιμοποιείται σαν συμπληρωματική της διαγραφίας φυσικού δυναμικού και επίσης αντικαθιστά την διαγραφή φυσικού δυναμικού όταν η γεωτρητική λάσπη έχει υψηλή συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων ή έχει σαν βάση το πετρέλαιο. Η κυριότερη εφαρμογή των διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας είναι ο εντοπισμός στρωμάτων αργιλικών σχιστόλιθων και σχηματισμών που περιέχουν αργιλικές προσμίξεις.

3.2.1 Ιδιότητες των ακτίνων γάμμα

Οι ακτίνες γάμμα είναι υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία εκπέμπονται από μερικά ραδιενεργά στοιχεία. Σχεδόν όλη η ακτινοβολία γάμμα μέσα στη γη προέρχεται από το ραδιενεργό ισότοπο του καλίου (K^{40}) και από τα ραδιενεργά στοιχεία των οικογενειών του ουρανίου και του θορίου.

Τα ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπουν ακτίνες γάμμα των οποίων η ενέργεια είναι χαρακτηριστική κάθε ραδιενεργού στοιχείου. Το ραδιενεργό ισότοπο K^{40} , εκπέμπει ακτίνες γάμμα ενέργειας 1.46 MeV.

Κατά τη διάδοση των ακτίνων γάμμα διαμέσου της ύλης, τα φωτόνια συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια του υλικού με αποτέλεσμα να χάνουν μέρος της ενέργειάς τους (φαινόμενο σκέδασης Compton). Όταν το φωτόνιο έχει χάσει σημαντική ποσότητα ενέργειας λόγω διαδοχικών σκεδάσεων, τότε είναι δυνατόν να απορροφηθεί από ένα άτομο του σχηματισμού (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Άρα, οι φυσικές ακτίνες γάμμα υφίστανται απορρόφηση και η έντασή τους μειώνεται κατά τη διέλευσή τους διαμέσου ενός σχηματισμού. Ο ρυθμός απορρόφησης εξαρτάται από την πυκνότητα του σχηματισμού. Αν δύο είδη σχηματισμών εμφανίζουν την ίδια ποσότητα ραδιενεργού υλικού αλλά έχουν διαφορετική πυκνότητα, τότε θα εμφανίζουν διαφορετικά επίπεδα ραδιενέργειας και μεγαλύτερη φυσική ραδιενέργεια θα παρατηρείται στον λιγότερο πυκνό σχηματισμό. Η φυσική ραδιενέργεια η οποία μετράται με απεριθμητή τοποθετημένο στο φρεάτιο, είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των τριών ραδιενεργών στοιχείων

$$GR = \frac{1}{\rho_b} (\rho_K V_K A_1 + \rho_{Th} V_{Th} A_2 + \rho_U V_U A_3) \quad (3.13)$$

όπου ρ_b είναι η πυκνότητα του σχηματισμού, ρ_K , ρ_{Th} και ρ_U είναι οι πυκνότητες των ραδιενεργών στοιχείων K^{40} , Th^{232} και U^{238} αντίστοιχα, το V συμβολίζει την κατ' όγκο περιεκτικότητα των ραδιενεργών στοιχείων και το A σχετίζεται με την ραδιενέργεια των στοιχείων.

3.2.2 Διαγραφίες ακτίνων γάμμα

Στις διαγραφίες ακτίνων γάμμα καταγράφεται η φυσική ραδιενέργεια η οποία προέρχεται από το τμήμα του σχηματισμού το οποίο βρίσκεται κοντά στο φρεάτιο. Η φυσική ραδιενέργεια ανιχνεύεται με απαριθμητή Geiger-Muller ή με απαριθμητή σπινθηρισμών.

Στον απαριθμητή Geiger-Muller, ο εντοπισμός των ακτίνων γάμμα γίνεται σε θάλαμο ιονισμού κυλινδρικού σχήματος. Ο θάλαμος ιονισμού περιέχει αδρανές αέριο σε χαμηλή πίεση και μικρή ποσότητα αιθυλικής αλκοόλης. Μέσα στο θάλαμο τοποθετείται λεπτό σύρμα και εφαρμόζεται τάση της τάξης των 1000 V μεταξύ του σύρματος (άνοδος) και του μεταλλικού περιβλήματος (κάθοδος) του θαλάμου. Η εισερχόμενη στο θάλαμο ακτινοβολία γάμμα προκαλεί ιονισμό των ατόμων του αερίου με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών εκκενώσεων. Η ένταση του παραγόμενου από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις ηλεκτρικού ρεύματος είναι ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας γάμμα.

Στον απαριθμητή σπινθηρισμών, ο εντοπισμός των ακτίνων γάμμα γίνεται από κρύσταλλο NaI. Ο κρύσταλλος NaI έχει την ιδιότητα να φθορίζει, δηλαδή να εκπέμπει ορατό φως, όταν πάνω του προσπίπτει ακτινοβολία γάμμα. Αυτό οφείλεται στη διέγερση που υφίστανται τα άτομα του κρυστάλλου λόγω απορρόφησης φωτονίου και στην αποδιέγερση αυτών μετά, οπότε η ενέργεια αποδιέγερσης εκπέμπεται με τη μορφή ορατού φωτός. Όταν ένα φωτόνιο (ακτίνα γάμμα) προσπέσει πάνω στον κρύσταλλο NaI, κατά μήκος της τροχιάς του φωτονίου διεγείρονται άτομα του υλικού και παράγεται σπινθηρισμός, δηλαδή έντονο φως μικρής διάρκειας. Κατάλληλος φωτοπολλαπλασιαστής μετατρέπει την φωτεινή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η ένταση είναι ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας γάμμα.

Ο απαριθμητής σπινθηρισμών παρουσιάζει πολύ καλή ικανότητα εντοπισμού ακτίνων γάμμα λόγω των μικρών διαστάσεων του κρυστάλλου NaI και προτιμάται από τον απαριθμητή Geiger-Muller όταν απαιτείται μεγάλη ευαισθησία και καλή διακριτική ικανότητα. Ο απαριθμητής σπινθηρισμού δεν δίνει αξιόπιστες πληροφορίες όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τους 120°C, επειδή οι κρύσταλλοι NaI είναι ευαίσθητοι στην θερμοκρασία.

Για την πραγματοποίηση των διαγραφιών ακτίνων γάμμα, ο απαριθμητής τοποθετείται μέσα στο φρεάτιο και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά την ανύσυσή του στην

επιφάνεια για να αποφευχθούν σφάλματα στη μέτρηση του βάθους προερχόμενα από τις ελαστικές παραμορφώσεις του καλωδίου. Η ρύθμιση των συσκευών φυσικής ραδιενέργειας πραγματοποιείται με δείγμα το οποίο περιέχει 4% K, 24 ppm Th και 12 ppm U. Η μονάδα μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας η οποία χρησιμοποιείται στις διαγραφίες ακτίνων γάμμα είναι το API. Στο δείγμα με το οποίο πραγματοποιείται η ρύθμιση, η μετρούμενη φυσική ραδιενέργεια είναι 200 API.

3.2.3 Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε αργιλικές προσμίξεις

Η διαγραφή ακτίνων γάμμα χρησιμοποιείται αντί της διαγραφίας φυσικού δυναμικού (SP) για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά όταν:

- Η καμπύλη SP είναι παραμορφωμένη (μετρήσεις SP σε ανθεκτικούς σχηματισμούς).
- Η καμπύλη SP δεν δίνει αξιόπιστες πληροφορίες (οι σχηματισμοί περιέχουν νερό υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ή η αλατότητα της γεωτρητικής λάσπης είναι υψηλή).
- Η καταγραφή του SP δεν είναι δυνατή (π.χ. μη αγωγίμη γεωτρητική λάσπη, σωληνωμένες γεωτρήσεις).

Η περιεκτικότητα σε αργιλικές προσμίξεις δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sh} = \frac{GR_{\log} - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (3.1.4)$$

όπου I_{sh} ο δείκτης αργιλικών προσμίξεων, $GR_{\max}$ και $GR_{\min}$ είναι οι τιμές της φυσικής ραδιενέργειας στους αργιλικούς σχιστόλιθους και σε σχηματισμό που δεν περιέχει αργιλικές προσμίξεις αντίστοιχα, ενώ $GR_{\log}$ είναι η μετρούμενη τιμή (από τη διαγραφή ακτίνων γάμμα) του υπό μελέτη σχηματισμού.

Οι τιμές της φυσικής ραδιενέργειας στις διαγραφίες ακτίνων γάμμα αντιστοιχούν στο μέσο όρο μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε χρονικό διάστημα π.χ. 1 sec. Η διαγραφή των ακτίνων γάμμα επηρεάζεται από την ταχύτητα με την οποία κινείται η συσκευή. Μια τυπική ταχύτητα είναι 550 m/hour. Μεγαλύτερη ταχύτητα (π.χ. 1100

m/hour) χρησιμοποιείται όταν οι διαγραφίες ακτίνων γάμμα πραγματοποιούνται για συσχετισμό.

Η διακριτική ικανότητα των διαγραφιών ακτίνων γάμμα εξαρτάται κυρίως από τις διαστάσεις του απαριθμητή και λιγότερο από την πυκνότητα του σχηματισμού, τη διάμετρο του φρεατίου, την ενέργεια των ακτίνων γάμμα και το πάχος των στρωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΑ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ

4.1 Περιοχή των μετρήσεων

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας στις περιοχές Α, Β, Γ και Δ (σχήματα 4.1 και 4.2).

Η περιοχή Δ βρίσκεται νοτιοδυτικά των δεξαμενών P-8714A και P-8714B. Πάνω στον δρόμο πραγματοποιήθηκαν δύο γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας (σχήμα 4.3).

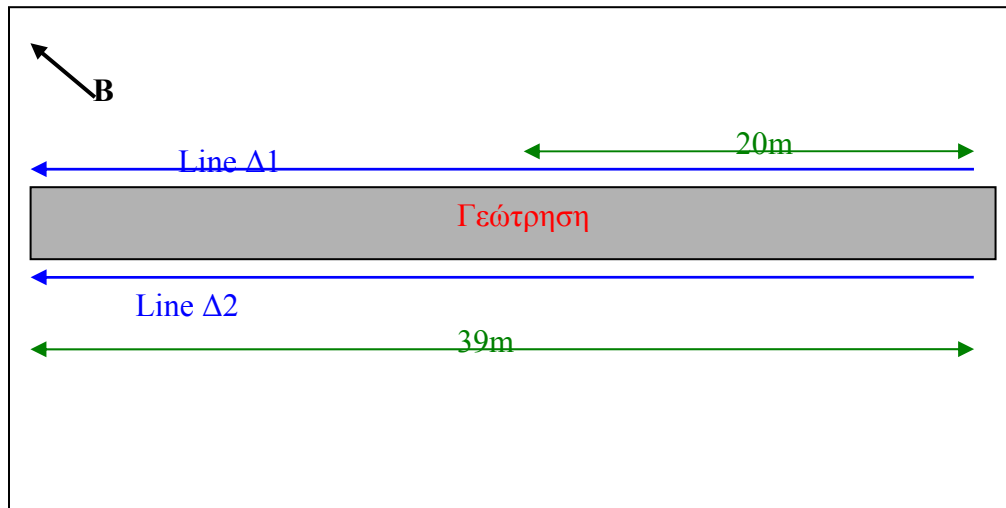
Η γραμμή μελέτης Δ1 βρίσκεται παράλληλα και βορειοανατολικά του δρόμου, έχει μήκος 39m, ξεκινά από νοτιοανατολικά προς βορειοδυτικά. Πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την διάταξη διπόλου διπόλου με $a = 1.5m$. Η γεώτρηση βρίσκεται στα 20 m από την αρχή της γραμμής.

Η γραμμή μελέτης Δ2 βρίσκεται παράλληλα και Νοτιοδυτικά του δρόμου, έχει μήκος 39m, ξεκινά από νοτιοανατολικά προς βορειοδυτικά. Πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την διάταξη διπόλου διπόλου με $a = 1.5m$, αλλά και με την διάταξη Wenner-Schlumberger με $a = 1.5m$.

Στη ίδια περιοχή υπάρχει η γεώτρηση RW14 παρακολούθησης και άντλησης της ελαιώδους φάσης. Στην RW14 κατά τη διάρκεια των γεωφυσικών μετρήσεων τον Νοέμβριο του 2005 παρατηρήθηκε στρώμα ελαιώδους φάσης σε βάθος 4m - 4.6m, πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.



Σχήμα 4.1: Τα δυλιστήρια Ασπροπύργου και η περιοχή των μετρήσεων από φωτογραφία δορυφόρου (google earth).

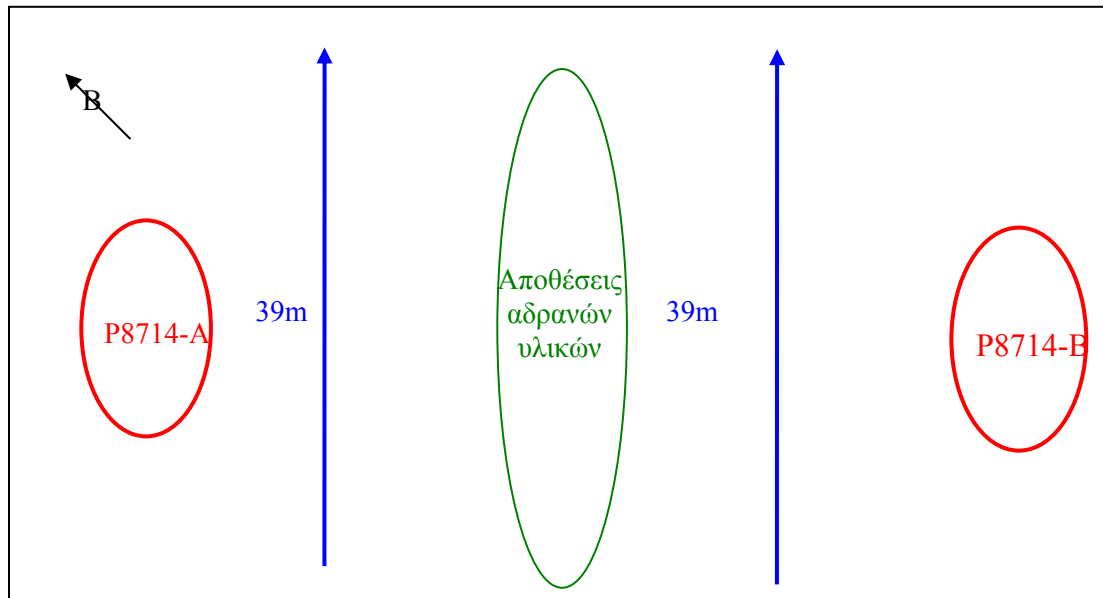


Σχήμα 4.3: Απεικόνιση γραμμών μελέτης Δ1 και Δ2 ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή Δ.

Ανάμεσα από τις δεξαμενές P-8714A και P-8714B πραγματοποιήθηκαν δύο γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η Περιοχή Γ βρίσκεται κοντά στην δεξαμενή P-8714B. Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας έχει μήκος 39m, ξεκινά από νοτιοδυτικά προς βορειανατολικά. Πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την διάταξη διπόλου διπόλου με $\alpha = 1.5\text{m}$, αλλά και με την διάταξη Wenner-Schlumberger $\alpha = 1.5\text{m}$. Η θέση της γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή Γ φαίνεται στο σχήμα 4.4.

Η Περιοχή Β βρίσκεται κοντά στην δεξαμενή P-8714A. Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας έχει μήκος 39m, ξεκινά από νοτιοδυτικά προς βορειανατολικά. Πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την διάταξη διπόλου διπόλου με $\alpha = 1.5\text{m}$. Η θέση της γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας φαίνεται στο σχήμα 4.4 .

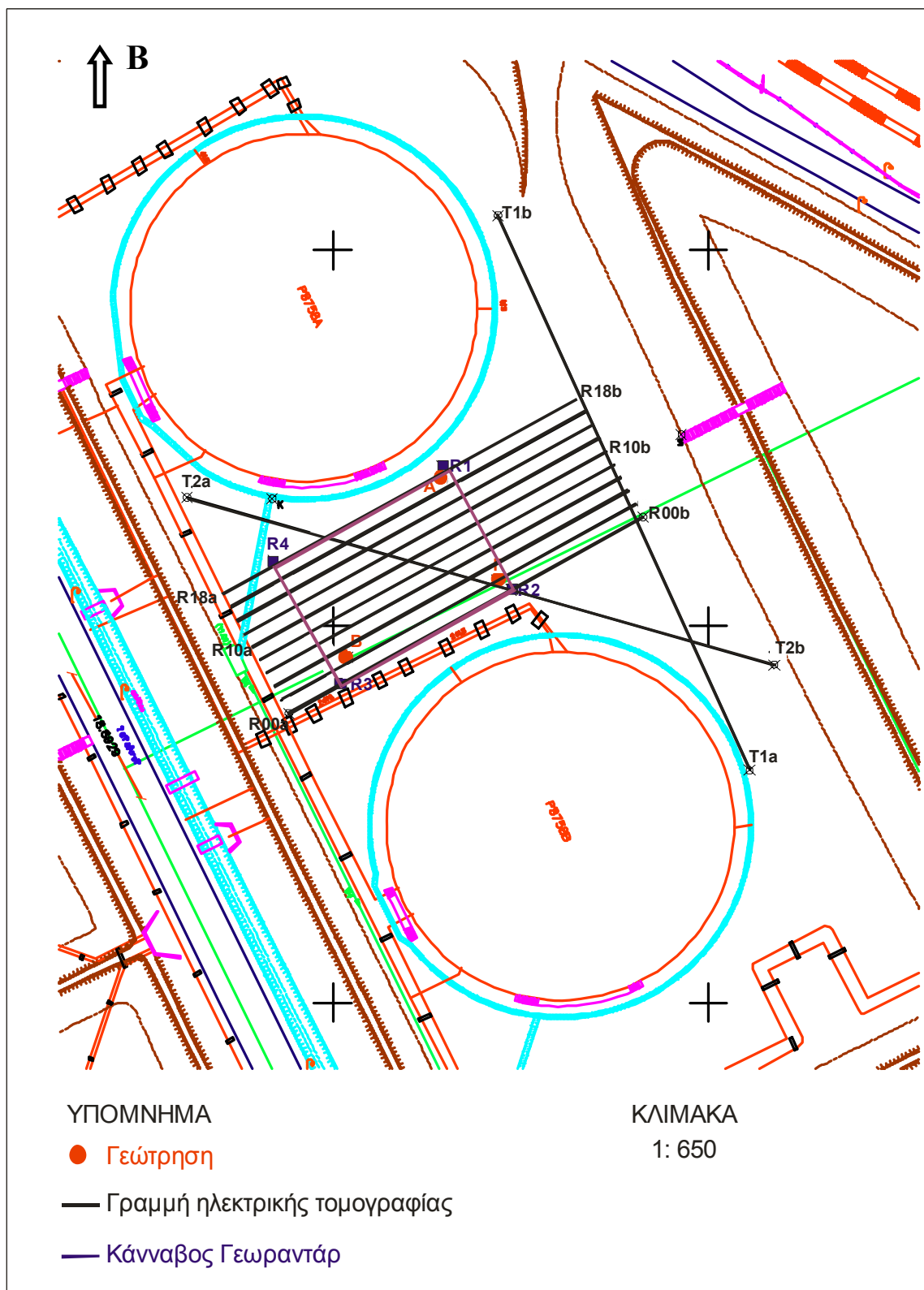


Σχήμα 4.4: Γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας στις περιοχές Β και Γ.

Ακόμα διασκοπήθηκαν 10 παράλληλες γραμμές μελέτης (R00-R18) στην περιοχή Α η οποία βρίσκεται ανάμεσα στις δεξαμενές P8758A και P8758B μήκους 52 μέτρων και ισαπόστασης 2 μέτρων. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε όλες τις ηλεκτρικές γραμμές με την διάταξη διπόλου-διπόλου και σε μία με τη διάταξη Wenner-Shlumberger (γραμμή 18). Η απόσταση a μεταξύ των ηλεκτροδίων ήταν 2 μέτρα. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 28 ηλεκτρόδια για κάθε γραμμή μελέτης.

Επίσης διασκοπήθηκε ακόμα μια γραμμή μελέτης, η γραμμή T2 η οποία διασχίζει διαγώνια την περιοχή Α.

Παράλληλα έγινε διάνοιξη τριών γεωτρήσεων στην περιοχή Α όπου πραγματοποιήθηκαν διαγραφίες ακτίνων γάμμα και συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους. Η γεώτρηση Α έχει βάθος 6,8 μέτρα και βρίσκεται στην ηλεκτρική γραμμή 18 σε απόσταση 34 μέτρων από την αρχή της. Οι γεωτρήσεις Β και Γ έχουν βάθος 5 μέτρων και βρίσκονται στην ηλεκτρική γραμμή 02 σε απόσταση 11 και 34 μέτρων αντίστοιχα από την αρχή της (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Οι γραμμές μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας R00m-R18m, η γραμμή T2 και οι γεωτρήσεις Α, Β και Γ στην περιοχή Α .

4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης των δειγμάτων εδάφους

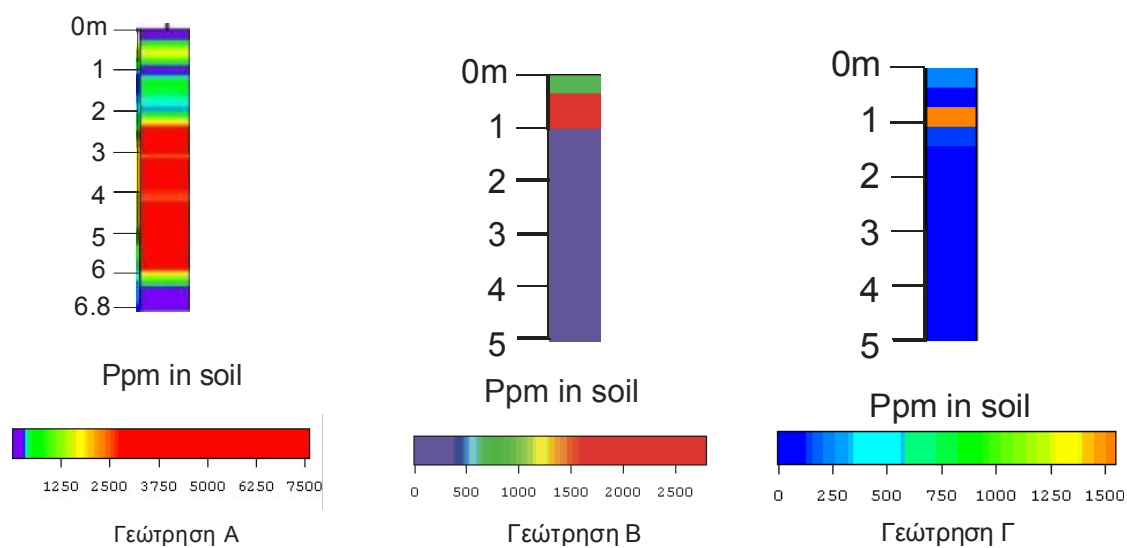
Στα δείγματα εδάφους από τις γεωτρήσεις Α, Β και Γ (σχήμα 4.5) μετρήθηκαν η υγρασία και η συγκέντρωση ΤΡΗ από το εργαστήριο Ανάλυσης Πυρήνων και Ρευστών Υπόγειων Ταμιευτήρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις από τα δείγματα των γεωτρήσεων

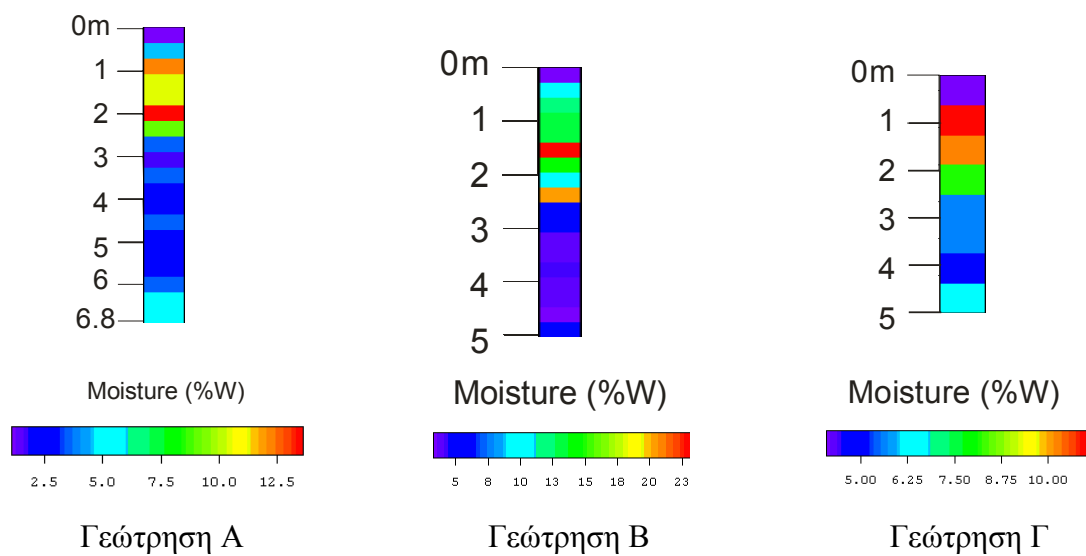
Δείγμα	Βάθος (cm)	Υγρασία (% κ.β.)	ΤΡΗ στο έδαφος (ppm)
A0-20cm	10	1.1	89
A20-50cm	35	4.5	1920
A50-80cm	65	12.1	69
A80-110cm	95	10.4	552
A80-110cm	95	10.5	374
A110-140cm	125	13.6	333
A140-170cm	155	9.1	2445
A170-200cm	185	3.6	7595
A200-230cm	215	1.7	2151
A230-260cm	245	3.5	5944
A260-290cm	275	2.6	2807
A290-320cm	305	2.5	2471
A320-350cm	335	3.5	5121
A350-380cm	365	2.6	5872
A380-410cm	395	2.7	5562
A410-440cm	425	3.1	4748
A440-470cm	455	3.7	1639
A550-600cm	575	5.3	19
A650-680cm	665	5.4	227
B0-20cm	10	3.3	702

B20-40cm	30	10.2	2793
B40-80cm	60	12.0	2629
B80-130cm	105	13.1	M.A
B80-130cm	105	12.7	22
B130-180cm	155	23.1	145
B130-180cm	155	14.2	16
B180-200cm	190	10.6	18
B180-200cm	205	20.6	12
B200-230cm	215	6.3	21
B230-250cm	240	4.4	38
B250-280cm	265	3.7	29
B280-310	295	4.0	M.A
B310-340cm	325	4.2	78
B340-380cm	360	3.8	19
B380-420cm	365	3.8	109
B420-460cm	440	3.5	216
B460-500cm	480	4.4	30
Γ0-20cm	10	4.1	434
Γ20-60cm	40	11.0	234
Γ20-60cm	40	10.3	137
Γ60-90cm	75	8.2	0
Γ90-120cm	105	5.6	1543
Γ120-150cm	135	5.6	150
Γ180-200	190	4.8	0
Γ450-500	475	6.5	0

M.A.:Μη ανιχνεύσιμο



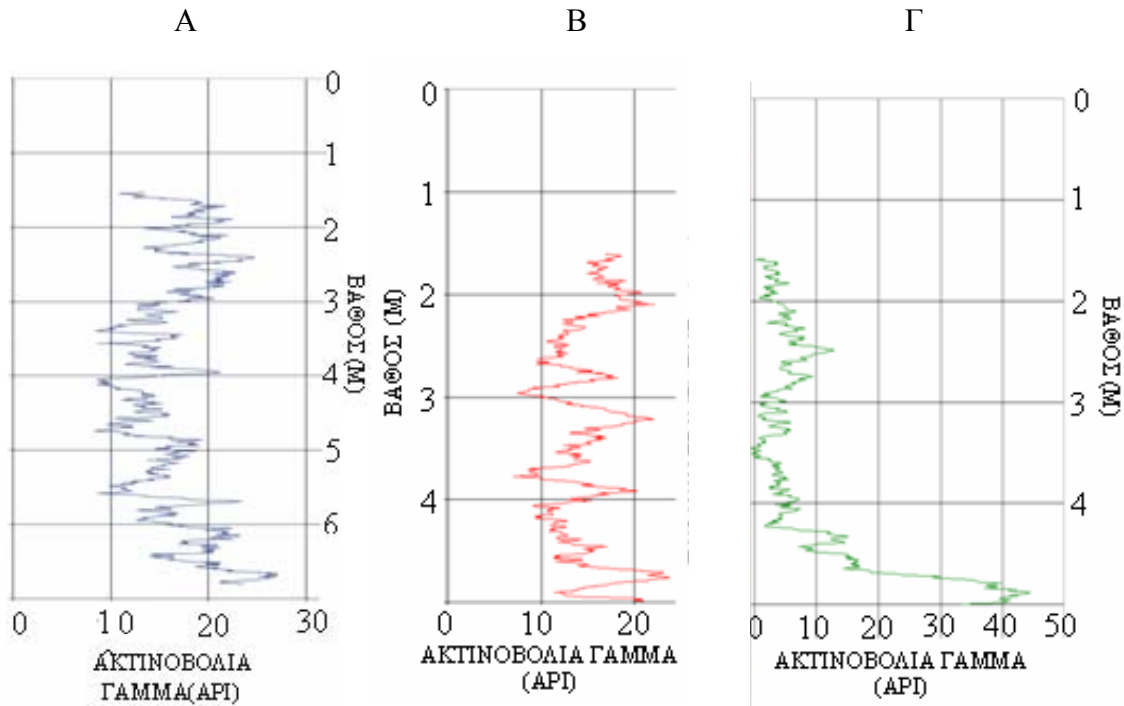
Σχήμα 4.6: Συγκέντρωση TPH γεωτρήσεων A, B και Γ



Σχήμα 4.7: Υγρασία Γεωτρήσεων A, B και Γ

4.3 Οι διαγραφίες ακτίνων γάμμα

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ακτινοβολίας γάμμα από τις γεωτρήσεις Α, Β και Γ.



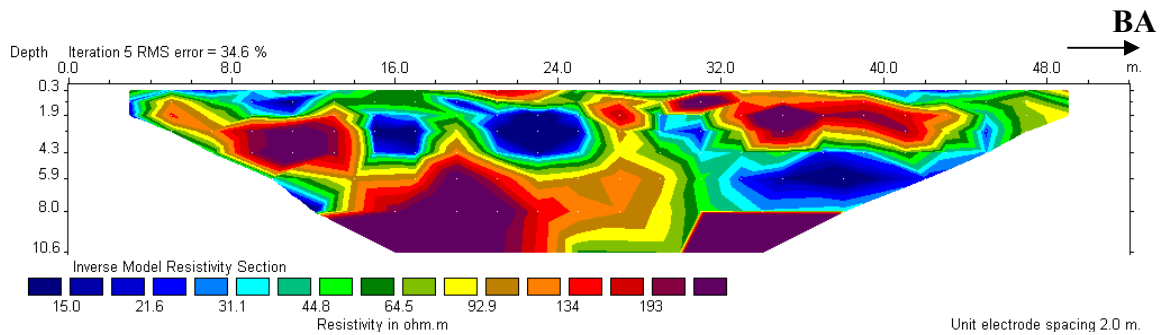
Σχήμα 4.8: Διαγραφίες γεωτρήσεων Α, Β και Γ

4.3 Επεξεργασία δεδομένων με το πρόγραμμα RES2DINV

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων από τις περιοχές Α, Β, Γ και Δ με το πρόγραμμα RES2DINV.

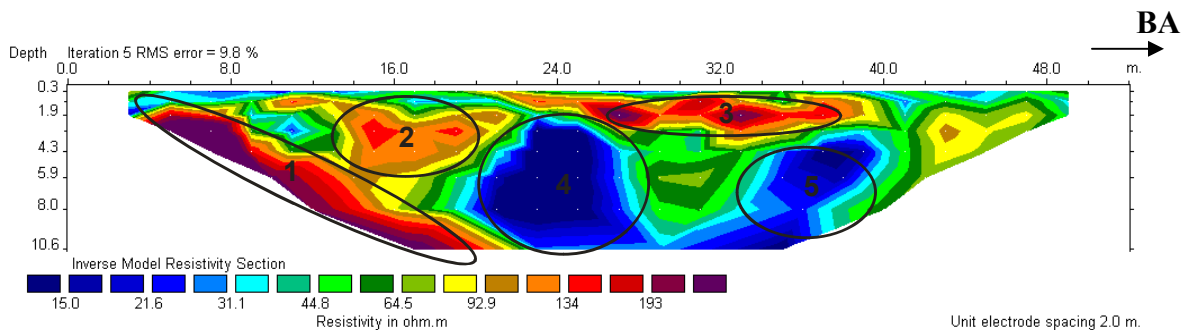
4.3.1 Η Περιοχή Α

Στην γεωηλεκτρική τομή 0 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου προκύπτει αρκετά μεγάλο σφάλμα RMS κατά την αντιστροφή (34,6%).



Σχήμα 4.9: Γεωηλεκτρική τομή 0 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου

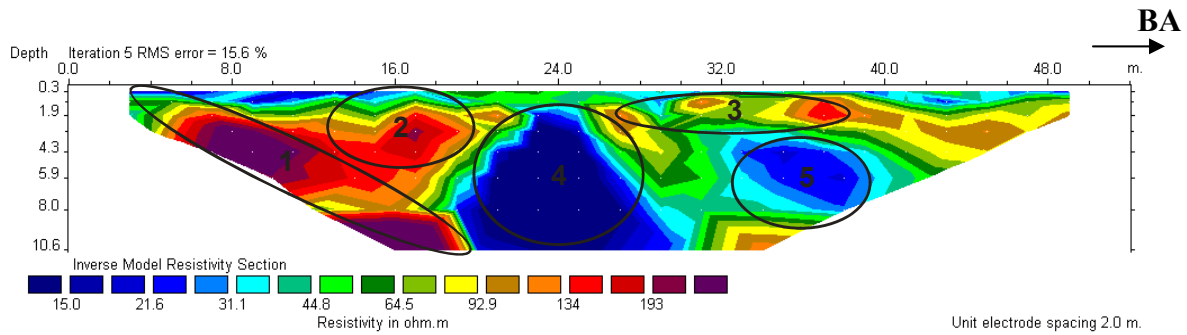
Στην γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης 2m παρατηρείται ένας κεκλιμένος σχηματισμός (σχηματισμός 1) μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ο οποίος ξεκινάει σε μήκος 4 μέτρων και σε βάθος 2 μέτρων και συνεχίζεται σε βάθος 10,6 μέτρων και μήκος 22 μέτρων. Οι τιμές της αντίστασης φτάνουν τα 350 Ωm . Ακόμα, υπάρχει μια ζώνη υψηλότερων αντιστάσεων (σχηματισμός 2) των 140 Ωm σε μικρότερο βάθος, από 1 μέτρο ως 6 μέτρα και σε μήκος από 15 έως 22 μέτρα. Ένας ακόμα σχηματισμός μεγάλης αντίστασης που φτάνει τα 200 Ωm (σχηματισμός 3) βρίσκεται επιφανειακά από 0,3 ως 3 μέτρα βάθος, σε 25 με 40 μέτρα μήκος. Υπάρχουν δυο ζώνες χαμηλών ειδικών αντιστάσεων που φτάνουν τα 15 Ωm . Η πρώτη έχει κυκλικό σχήμα (σχηματισμός 4) και βρίσκεται σε βάθος από 2 έως 10,6 μέτρα στα 20 με 27 μέτρα μήκος. Η δεύτερη βρίσκεται στα 4 με 10,6 μέτρα βάθος και σε μήκος 30 με 40 μέτρα (σχηματισμός 5).



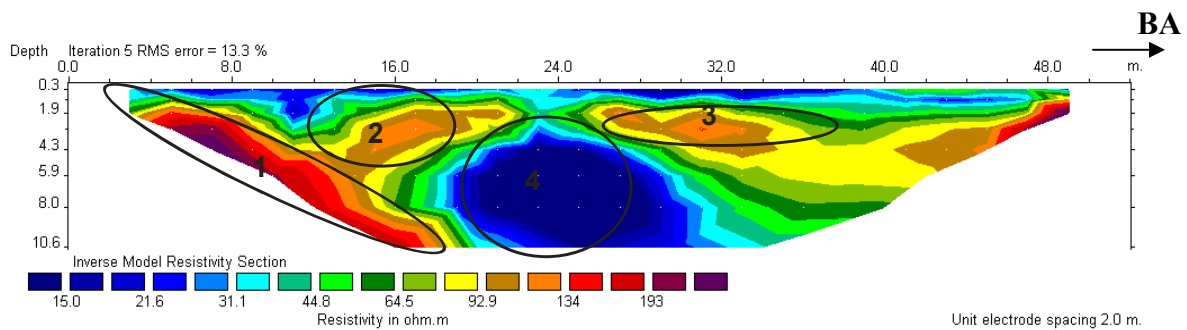
Σχήμα 4.10: Γεωηλεκτρική τομή 2m της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1,2,3,4 και 5

Στις γεωηλεκτρικές τομές 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 και 18m με τη διάταξη διπόλου-διπόλου, εμφανίζονται παρόμοιες ζώνες υψηλής αντίστασης. Ειδικότερα ο σχηματισμός 1 υπάρχει σε όλες αυτές τις τομές. Ο σχηματισμός 2 μετά την τομή των 8m ενώνεται με τον σχηματισμό 1. Ομοίως, ο σχηματισμός 3 εμφανίζεται σε όλες αυτές τις γεωηλεκτρικές

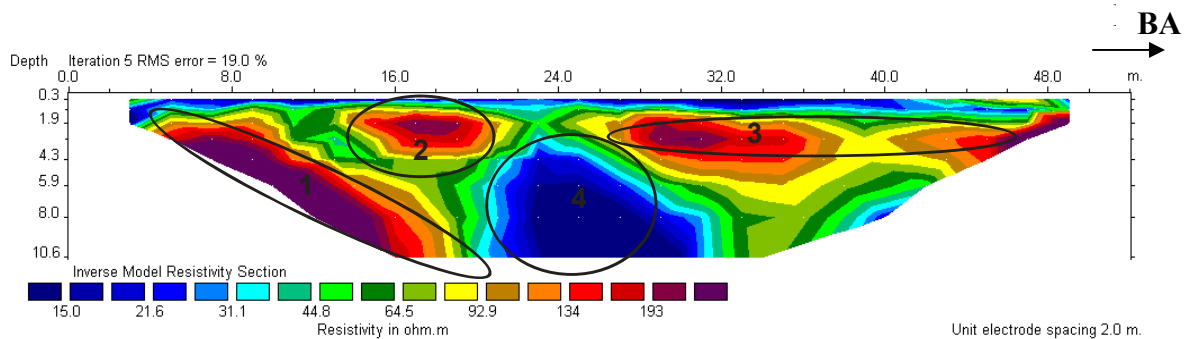
τομές. Η ζώνη μικρών αντιστάσεων στο κέντρο των τομών (σχηματισμός 4) συνεχίζεται ενώ ο σχηματισμός 5 εξακολουθεί να υπάρχει μόνο στην τομή των 4m. Το σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 7% και 19% ενώ στην γεωηλεκτρική τομή των 18m παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένο (24,4%) γεγονός που μειώνει στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.



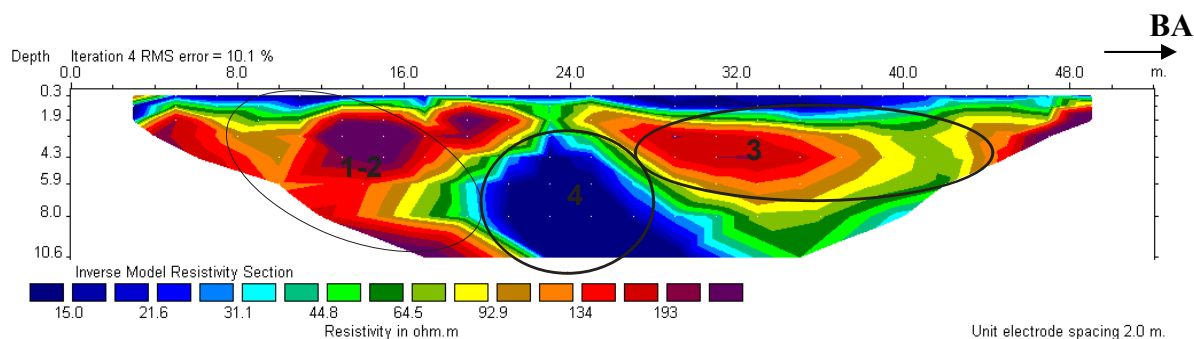
Σχήμα 4.11: Γεωηλεκτρική τομή 4 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1,2,3,4 και 5



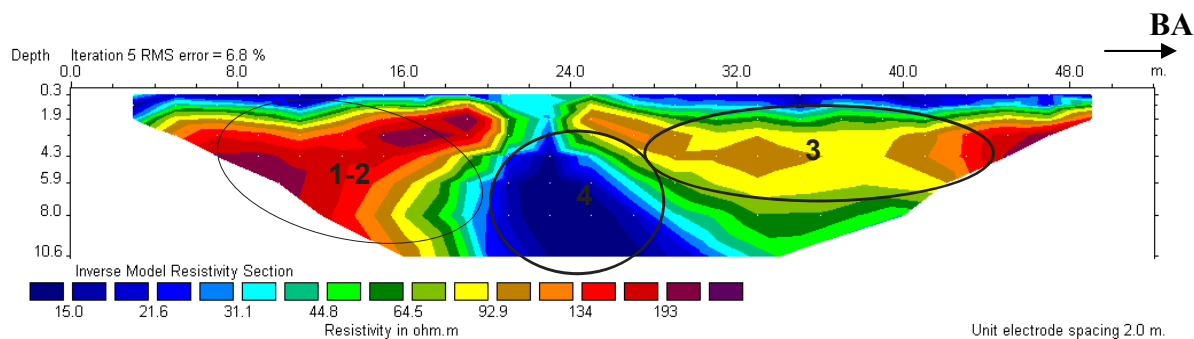
Σχήμα 4.12: Γεωηλεκτρική τομή 6 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1,2,3 και 4



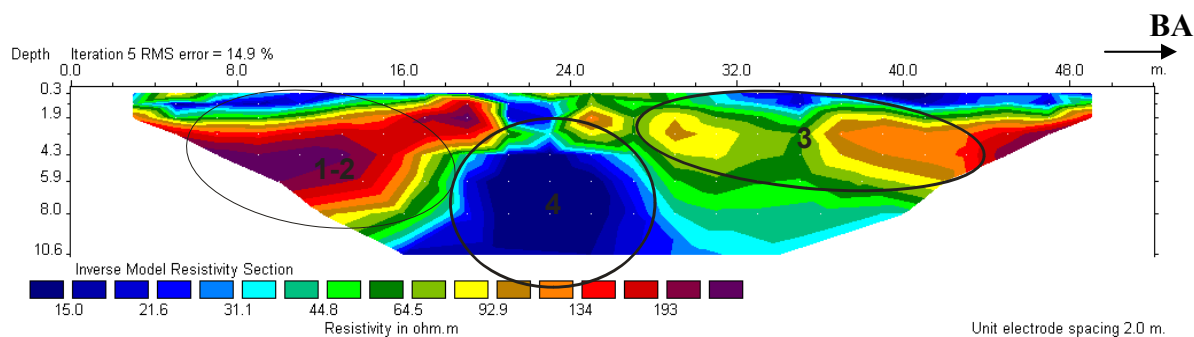
Σχήμα 4.13: Γεωηλεκτρική τομή 8 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1,2,3 και 4



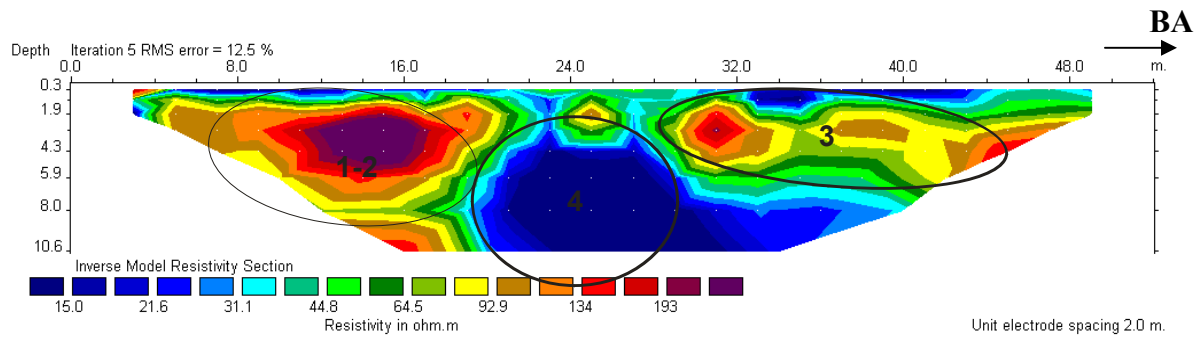
Σχήμα 4.14: Γεωηλεκτρική τομή 10 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1-2 ,3 και 4



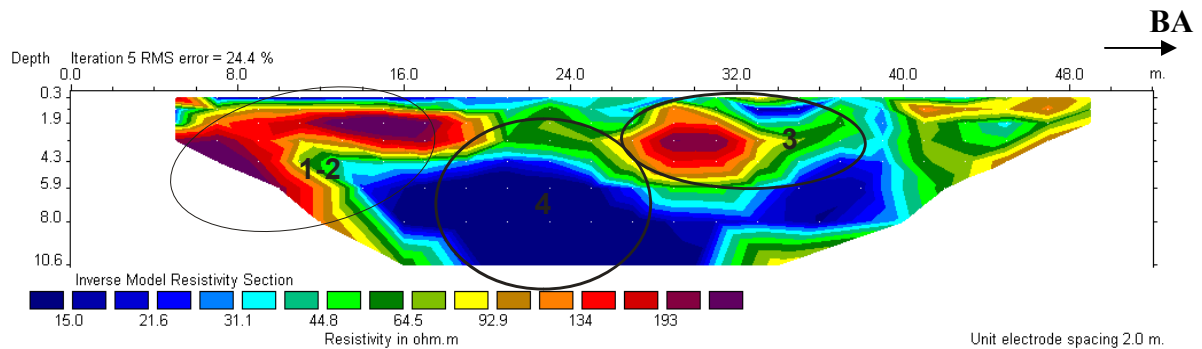
Σχήμα 4.15: Γεωηλεκτρική τομή 12 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1-2 ,3 και 4



Σχήμα 4.16: Γεωηλεκτρική τομή 14 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1-2 ,3 και 4

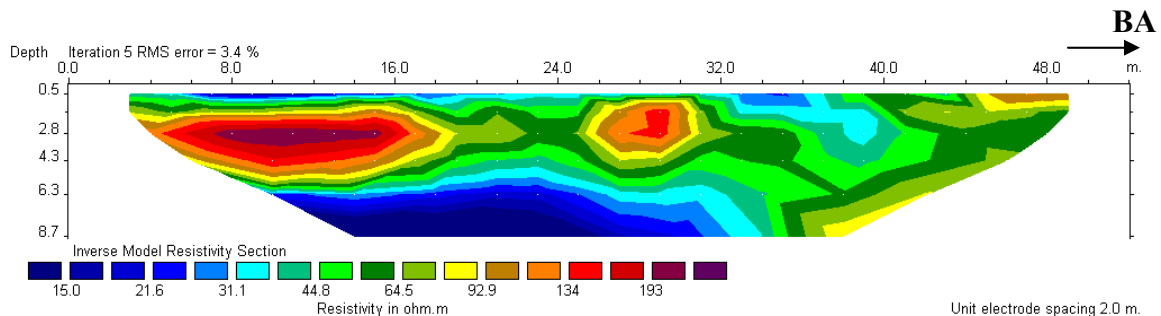


Σχήμα 4.17: Γεωηλεκτρική τομή 16 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1-2, 3 και 4



Σχήμα 4.18: Γεωηλεκτρική τομή 18 της περιοχής Α με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και οι σχηματισμοί 1-2, 3 και 4

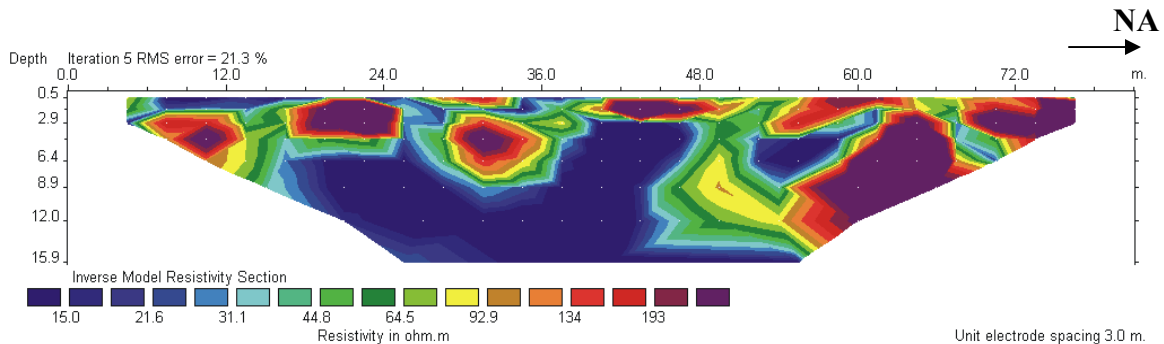
Σε αντίθεση με την διάταξη διπόλου-διπόλου της γραμμής μελέτης 18m η διάταξη Wenner-Schlumberger εμφανίζει ιδιαίτερα χαμηλό σφάλμα. Η γραμμή αυτή είναι η μόνη στην οποία διεξήχθησαν μετρήσεις με αυτή την μέθοδο. Έτσι, στη τομή παρουσιάζονται δυο στρώματα, ένα υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με δυο ζώνες και ένα σε μεγαλύτερο βάθος με χαμηλές τιμές αντίστασης.



Σχήμα 4.19: Γεωηλεκτρική τομή 18 της περιοχής Α με τη διάταξη Wenner-Schlumberger

Στη γεωηλεκτρική τομή της γραμμής T2 η οποία διασχίζει την περιοχή Α, παρατηρείται ένα στρώμα υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων κατά μήκος της

τομής, που κατά τόπους φτάνει και τα 400 Ωm και το βάθος ξεκινάει από μισό μέτρο και φτάνει σε κάποια σημεία τα 6,5 μέτρα. Στα 54 μέτρα από την αρχή της τομής έως το τέλος της, διακρίνεται ένας γεωηλεκτρικός σχηματισμός σε βάθος από 1 ως 12 μέτρα με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που ξεπερνούν και τα 400 Ωm . Τέλος, ένα στρώμα χαμηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων με τιμές από 5 έως 25 Ωm , υπάρχει σε βάθη από 3 έως 16 μέτρα σχεδόν σε όλο το μήκος της τομής.

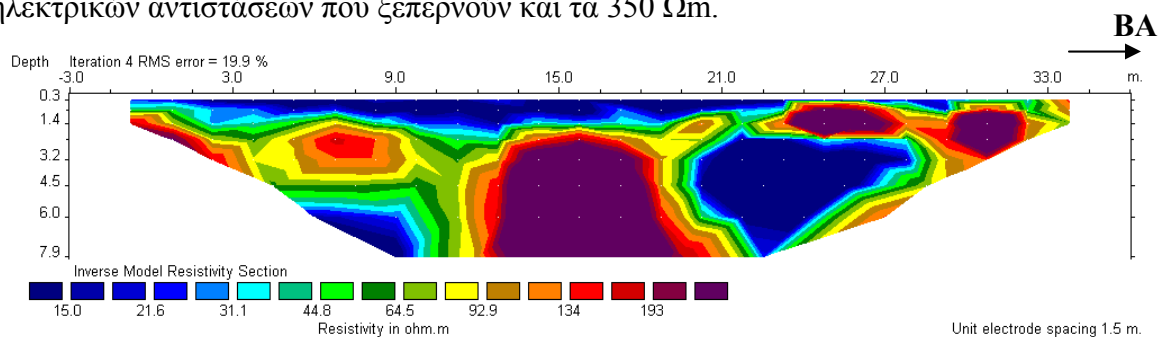


Σχήμα 4.20: Γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης T2, που διασχίζει διαγώνια την περιοχή A, με τη διάταξη διπόλου-διπόλου

4.3.2 Η Περιοχή B

Στην γεωηλεκτρική τομή της περιοχής B με τη διάταξη διπόλου-διπόλου το σφάλμα είναι αυξημένο. Παρατηρείται επιφανειακό στρώμα χαμηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων που φτάνουν και τα 10 Ωm , πάχους έως και 1,5 μέτρου το οποίο ξεκινάει από την αρχή της τομής και φτάνει μέχρι τα 23 μέτρα.

Στο κέντρο της τομής διακρίνεται μια αρκετά μεγάλη περιοχή μεγάλων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων που ξεπερνούν και τα 350 Ωm .



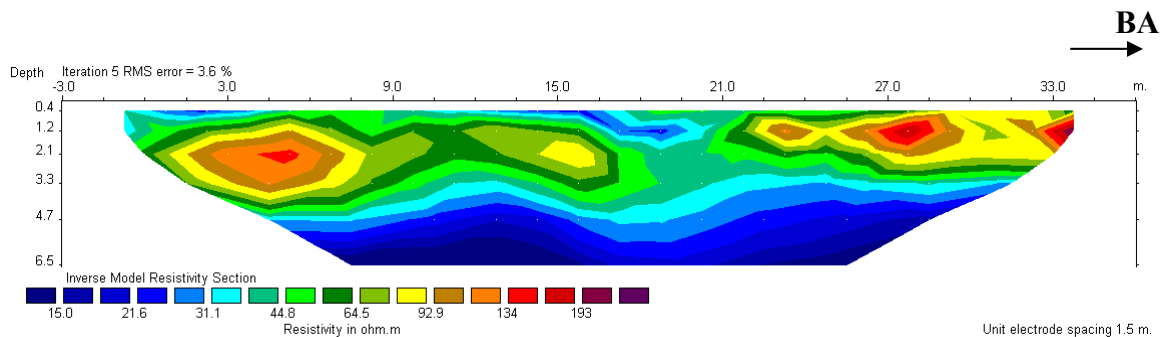
Σχήμα 4.21: Γεωηλεκτρική τομή της περιοχής B με τη διάταξη διπόλου-διπόλου

4.3.3 Η Περιοχή Γ

Στην τομή της περιοχής Γ με την μέθοδο Wenner-Schlumberger εμφανίζεται ένα επιφανειακό στρώμα χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της τάξης των 20 Ωm , πάχους μισού μέτρου το οποίο ξεκινάει από την αρχή της τομής και φτάνει μέχρι τα 20 μέτρα.

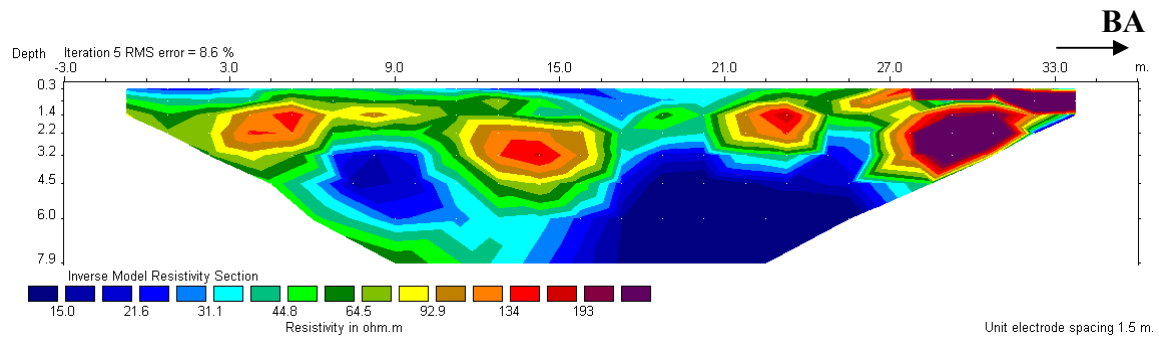
Ένα ακόμα στρώμα χαμηλής αντίστασης (μέχρι και 10 Ωm) βρίσκεται κατά μήκος ολόκληρης της τομής σε βάθος από 4 έως 6,5 μέτρα.

Τέλος εμφανίζονται δυο σχηματισμοί μεγάλων αντιστάσεων της τάξης των 190 Ωm . Ο πρώτος σε βάθος 0,5 με 2 μέτρα και σε μήκος 26 με 28,5 μέτρα και ο δεύτερος στο ίδιο βάθος στα 32,5 με 33,5 μέτρα.



Σχήμα 4.22: Γεωηλεκτρική τομή της περιοχής Γ με τη διάταξη Wenner-Schlumberger

Στην γεωηλεκτρική τομή της περιοχής Γ με τη διάταξη διπόλου-διπόλου, όπως και σε αυτήν με την διάταξη Wenner-Schlumberger φαίνεται ένα στρώμα υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως, με αυτή τη διάταξη, τονίζονται λεπτομέρειες στο επιφανειακό στρώμα οι οποίες δεν ήταν διακριτές με την διάταξη Wenner-Schlumberger. Το κατώτερο στρώμα χαμηλής αντίστασης υπάρχει και στις δυο τομές, ενώ στην διάταξη διπόλου-διπόλου είναι πιο εμφανή τα όρια του. Ομοίως, οι ζώνες μεγάλης αντίστασης φαίνονται στα ίδια σημεία αλλά με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σφάλμα είναι μεγαλύτερο στην τομή με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.



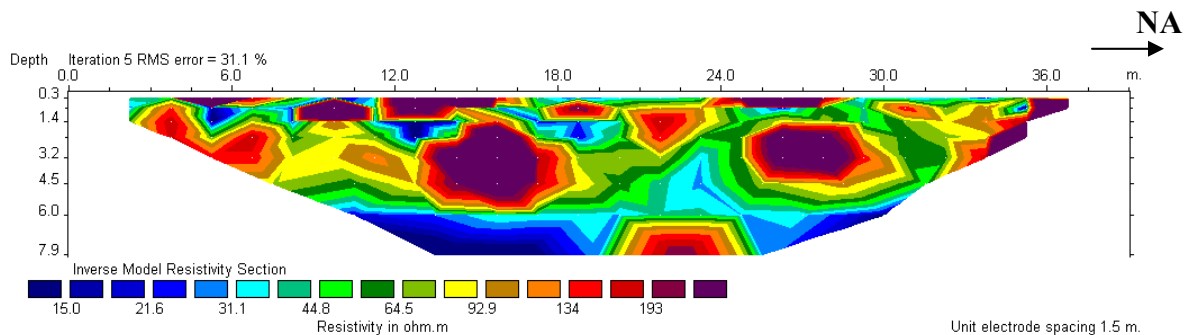
Σχήμα 4.23: Γεωηλεκτρική τομή της περιοχής Γ με τη διάταξη διπόλου-διπόλου

4.3.4 Η Περιοχή Δ

Στην γεωηλεκτρική τομή της γραμμής Δ1 της περιοχής Δ που πραγματοποιήθηκε με την διάταξη διπόλου-διπόλου παρατηρείται αρκετά μεγάλο σφάλμα (31,1%).

Γενικότερα, διακρίνονται δυο στρώματα. Επιφανειακά υπάρχει ένα ανομοιογενές στρώμα μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης το οποίο κατά τόπους φτάνει και τα 350 Ωm και εκτείνεται κατά μήκος της γραμμής σε βάθος ως και 6 μέτρων.

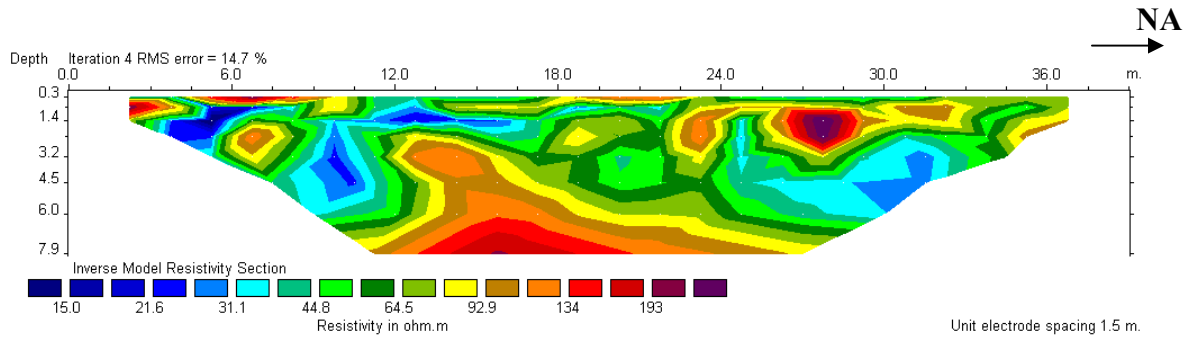
Σε πιο μεγάλο βάθος, (μεγαλύτερο των 6 μέτρων) παρατηρείται ένα στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης που φτάνει τα 10 Ωm σε όλο το μήκος της.



Σχήμα 4.24: Γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης Δ1 με την διάταξη διπόλου-διπόλου

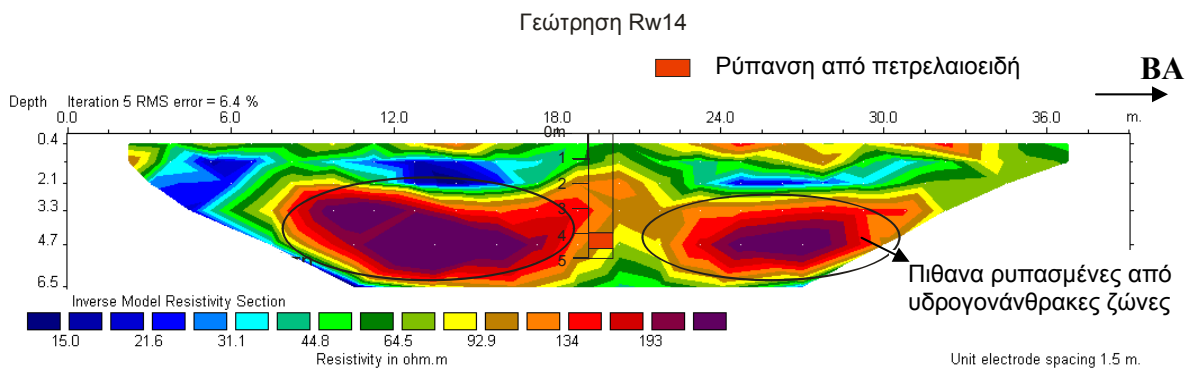
Στην γεωηλεκτρική τομή της γραμμής Δ2 που πραγματοποιήθηκε με την διάταξη διπόλου-διπόλου, παρατηρείται μικρότερο σφάλμα (14,7%) σε σύγκριση με την γεωηλεκτρική τομή Δ1. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι οι δυο τομές δεν σχετίζονται μεταξύ τους παρά την μικρή απόσταση που τις χωρίζει.

Εδώ γενικότερα παρουσιάζεται ένα στρώμα χαμηλών με μεσαίων αντιστάσεων ενώ σε μεγαλύτερο βάθος υπάρχουν μεγάλες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 4.25: Γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης Δ2 με την διάταξη διπόλου-διπόλου

Αντιθέτως, στην γεωηλεκτρική τομή της γραμμής Δ2 με την διάταξη Wenner-Schlumberger εμφανίζεται αποδεκτό σφάλμα 6,4 %. Παρατηρείται ένα στρώμα μικρών αντιστάσεων με τιμές 15 με 30 Ωm, σε βάθος μέχρι 2 μέτρα. Σε μεγαλύτερο βάθος, (2 έως 6 μέτρα) υπάρχουν δυο ζώνες μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τιμές κατά τόπους μέχρι 300 Ωm. Η πρώτη ξεκινάει στα 7,5 μέτρα και τελειώνει στα 19 μέτρα μήκος ενώ η δεύτερη παρουσιάζεται από 22,5 μέτρα έως τα 31 μέτρα από την αρχή της τομής. Οι δυο παραπάνω ζώνες πιθανόν οφείλονται στην ρύπανση από πετρελαιοειδή, όπως δείχνει και η γεώτρηση RW14. Η λίγο χαμηλότερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση στην περιοχή της γεώτρησης οφείλεται στην διαδικασία απορρύπανσης με άντληση της ελαιώδους φάσης.



Σχήμα 4.26: Γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης Δ2 με την διάταξη Wenner-Schlumberger και η γεώτρηση RW14.

4.4 Επεξεργασία δεδομένων με το πρόγραμμα RES3DINV

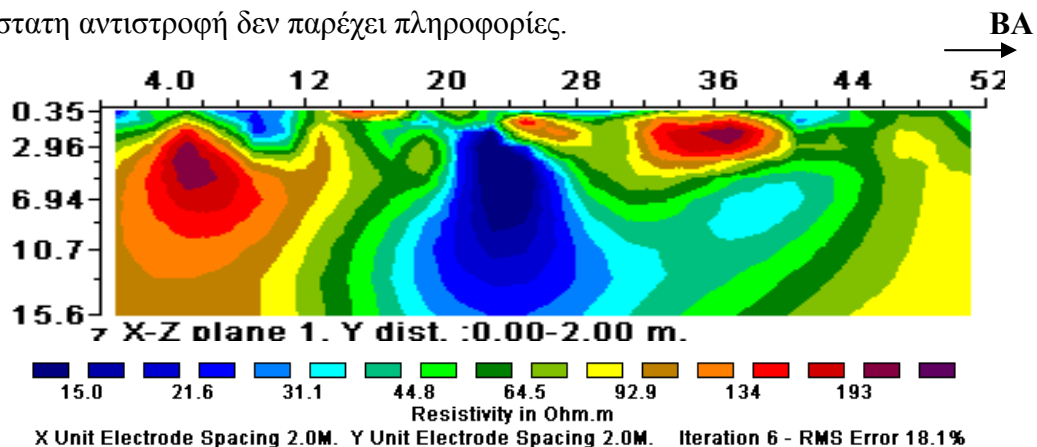
Στην περιοχή Α τα γεωηλεκτρικά δεδομένα συλλέχθηκαν σε 10 παράλληλες γραμμές μελέτης μήκους 52m και ισαπόστασης 2m με την διάταξη διπόλου-διπόλου. Χρησιμοποιήθηκαν όλες οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την δημιουργία γεωηλεκτρικού μοντέλου σε τρεις διαστάσεις. Έπειτα από επεξεργασία των μετρήσεων με το πρόγραμμα RES3DINV με το οποίο έγινε τρισδιάστατη αντιστροφή των παραπάνω δεδομένων σε έξι επαναλήψεις και σφάλμα RMS 18,1% προέκυψε τρισδιάστατη εικόνα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

4.4.1 Οι γεωηλεκτρικές τομές

Οι γεωηλεκτρικές τομές που προέκυψαν από την τρισδιάστατη αντιστροφή αντιστοιχούν σε κελιά μήκους 2m. Έχουν τις ίδιες x συντεταγμένες με τις τομές από την δισδιάστατη αντιστροφή ενώ παρέχουν πληροφορίες για μεγαλύτερα βάθη.

Είναι εμφανές πως με τις γεωηλεκτρικές τομές που προέκυψαν από την δισδιάστατη αντιστροφή στην περιοχή Α υπήρχε πληροφορία για την ειδική ηλεκτρική αντίσταση μέχρι τα 10,6m βάθους ενώ εδώ απεικονίζονται τιμές μέχρι 15,6 μέτρα βάθους. Αξίζει όμως να σημειωθεί πως στα μεγαλύτερα βάθη παρέχεται πληροφορία με μικρότερη όμως ακρίβεια από ότι σε μικρότερα βάθη της ίδιας τομής.

Ακόμα, με τη τρισδιάστατη αντιστροφή εκτιμάται η όπου η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στις περιοχές εκείνες που βρίσκονται στην αρχή και το τέλος κάθε τομής όπου η δισδιάστατη αντιστροφή δεν παρέχει πληροφορίες.

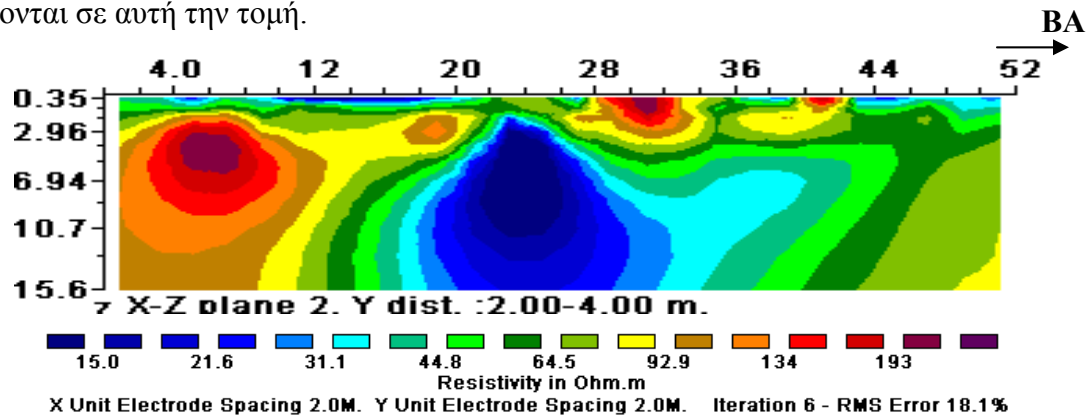


Σχήμα 4.27: Γεωηλεκτρική τομή 0-2m, της τρισδιάστατης αντιστροφής

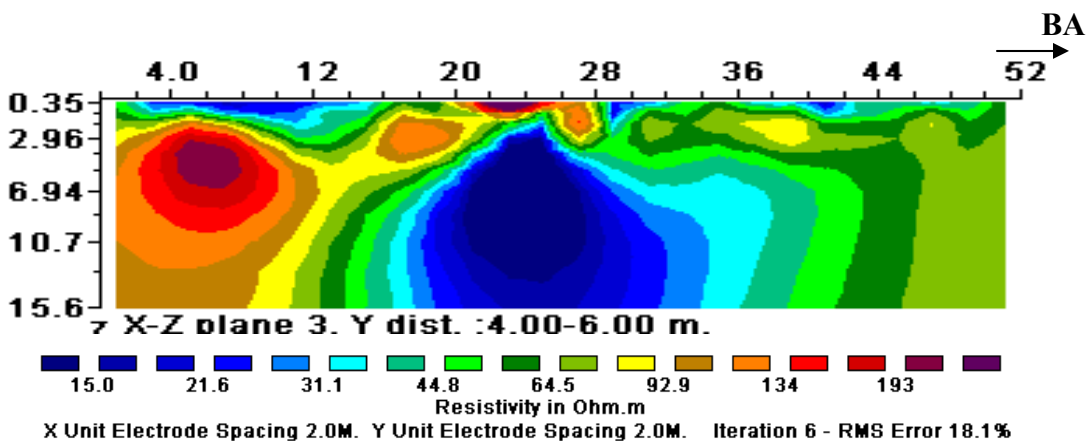
Η γεωηλεκτρική τομή των 0-2m που προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή, αντιστοιχεί σε κελί μήκους 2m και μπορεί να συγκριθεί με τις τομές 0m και 2m της δισδιάστατης αντιστροφής.

Το σφάλμα στην τομή 0m είναι ιδιαίτερα υψηλό (34,6%). Παρατηρείται πως η τομή 0m της δισδιάστατης αντιστροφής δεν συμβαδίζει με την τομή 0-2m της τρισδιάστατης αντιστροφής. Το σφάλμα στην τρισδιάστατη αντιστροφή (18,1%) είναι πολύ μικρότερο από αυτό της τομής 0m.

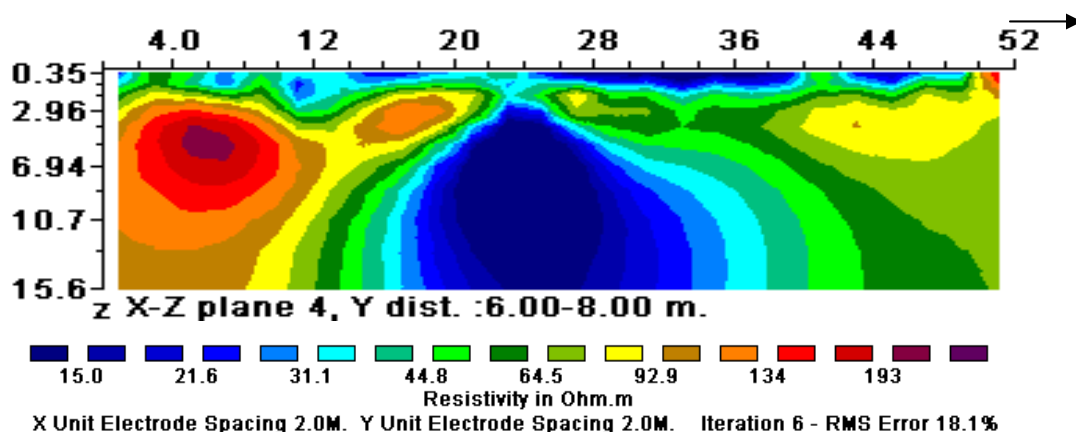
Αντιθέτως παρουσιάζεται ιδιαίτερη ομοιότητα μεταξύ των τόμων 0-2m της τρισδιάστατης αντιστροφής και 2m της δισδιάστατης αντιστροφής η οποία τυγχάνει μάλιστα να έχει μικρότερο σφάλμα από την πρώτη. Οι σχηματισμοί 1,3,4,5 της περιοχής Α φαίνονται σε αυτή την τομή.



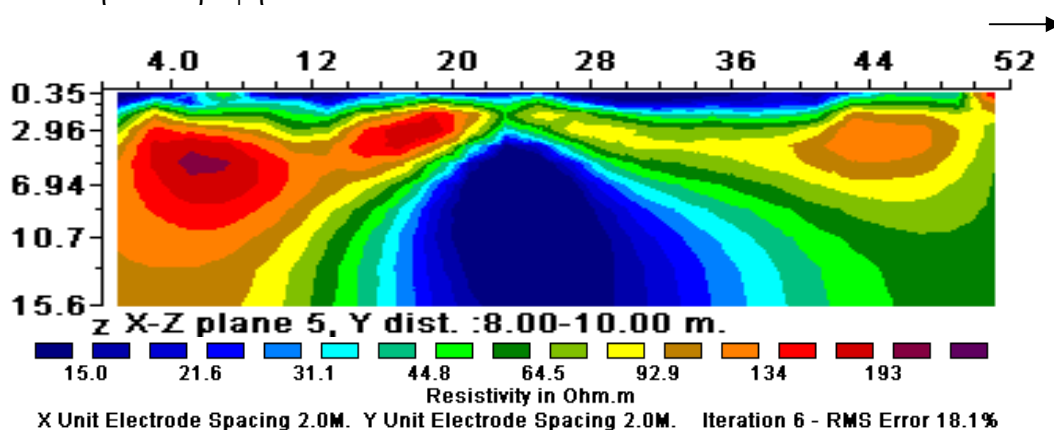
Σχήμα 4.28: Γεωηλεκτρική τομή 2-4m της περιοχής Α όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή



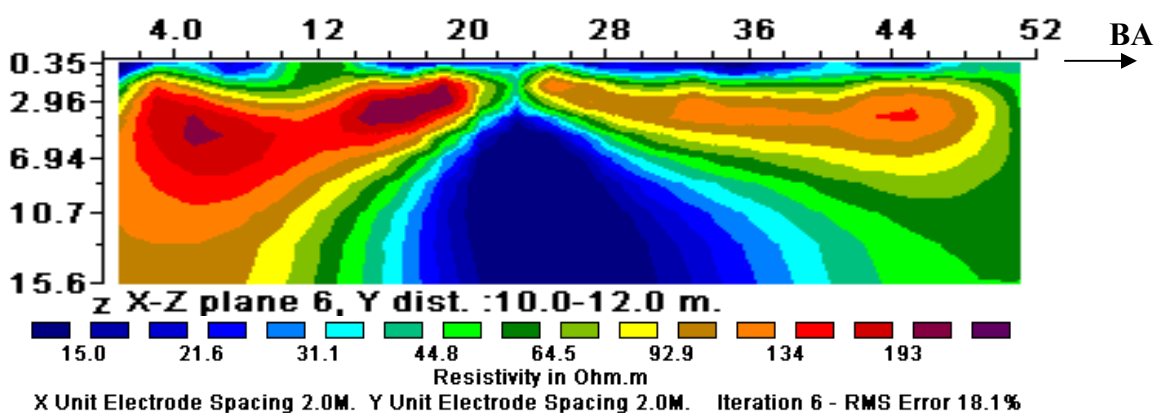
Σχήμα 4.29: Γεωηλεκτρική τομή 4-6m της περιοχής Α όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή



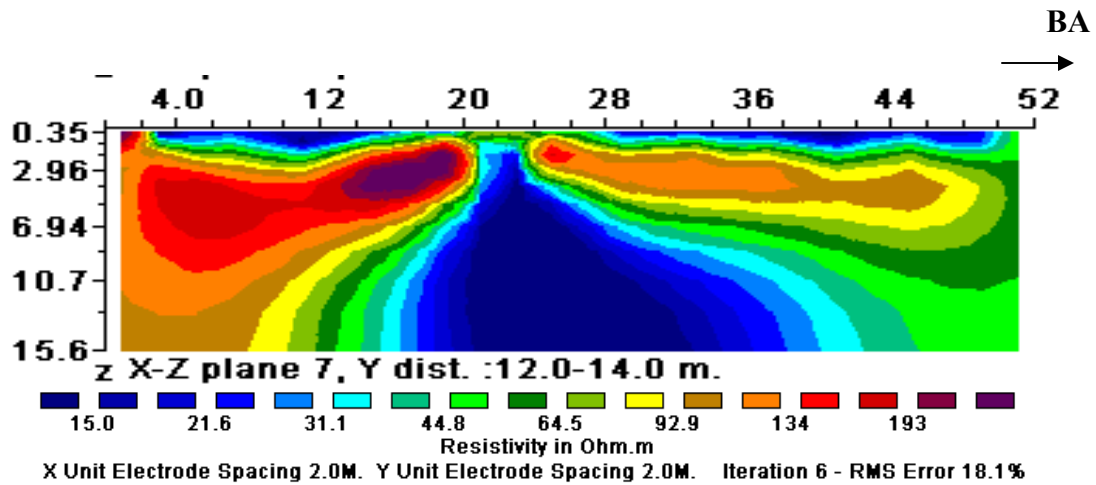
Σχήμα 4.30: Γεωηλεκτρική τομή 6-8m της περιοχής Α όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή



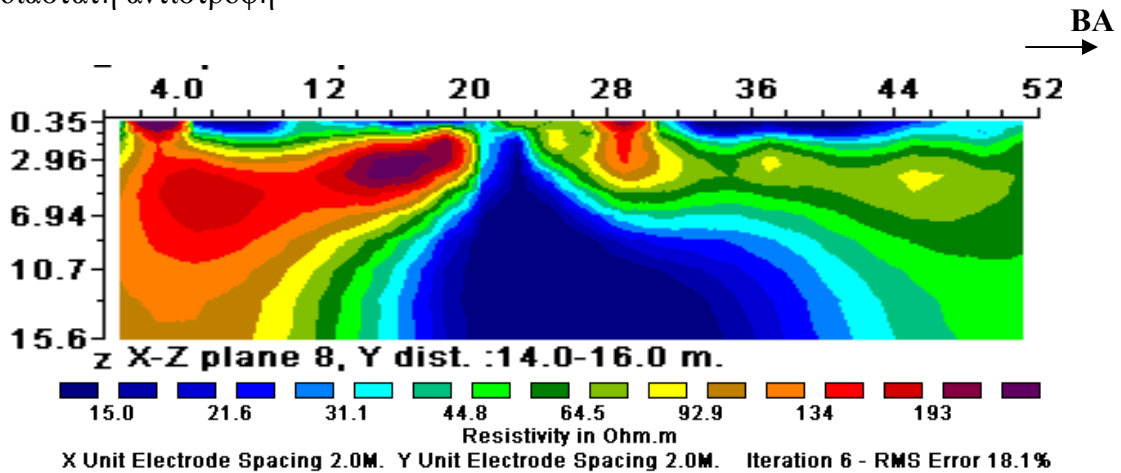
Σχήμα 4.31: Γεωηλεκτρική τομή 8-10m της περιοχής Α όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή



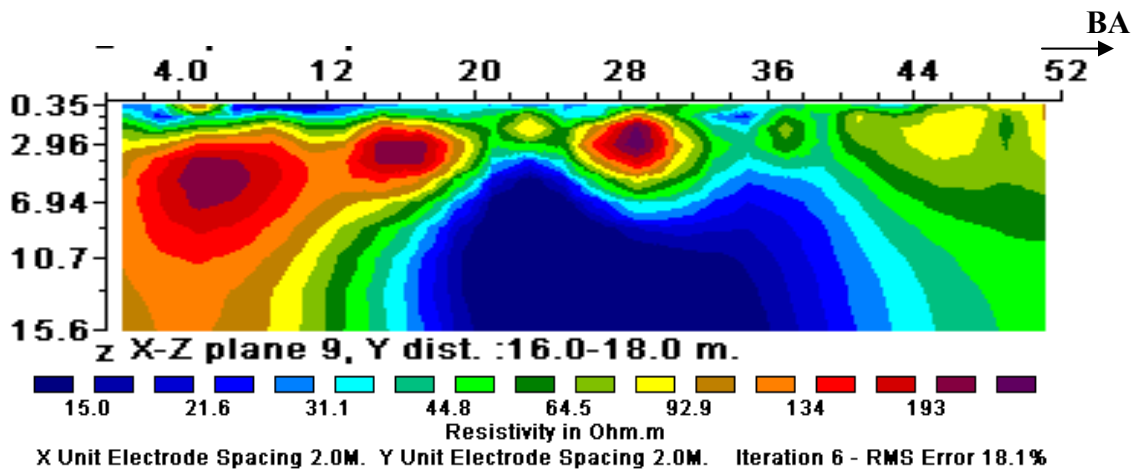
Σχήμα 4.32 Γεωηλεκτρική τομή 10-12m της περιοχής Α όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή



Σχήμα 4.33: Γεωηλεκτρική τομή 12-14m της περιοχής A όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή



Σχήμα 4.34: Γεωηλεκτρική τομή 14-16m της περιοχής A όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή



Σχήμα 4.35: Γεωηλεκτρική τομή 16-18m της περιοχής A όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη αντιστροφή

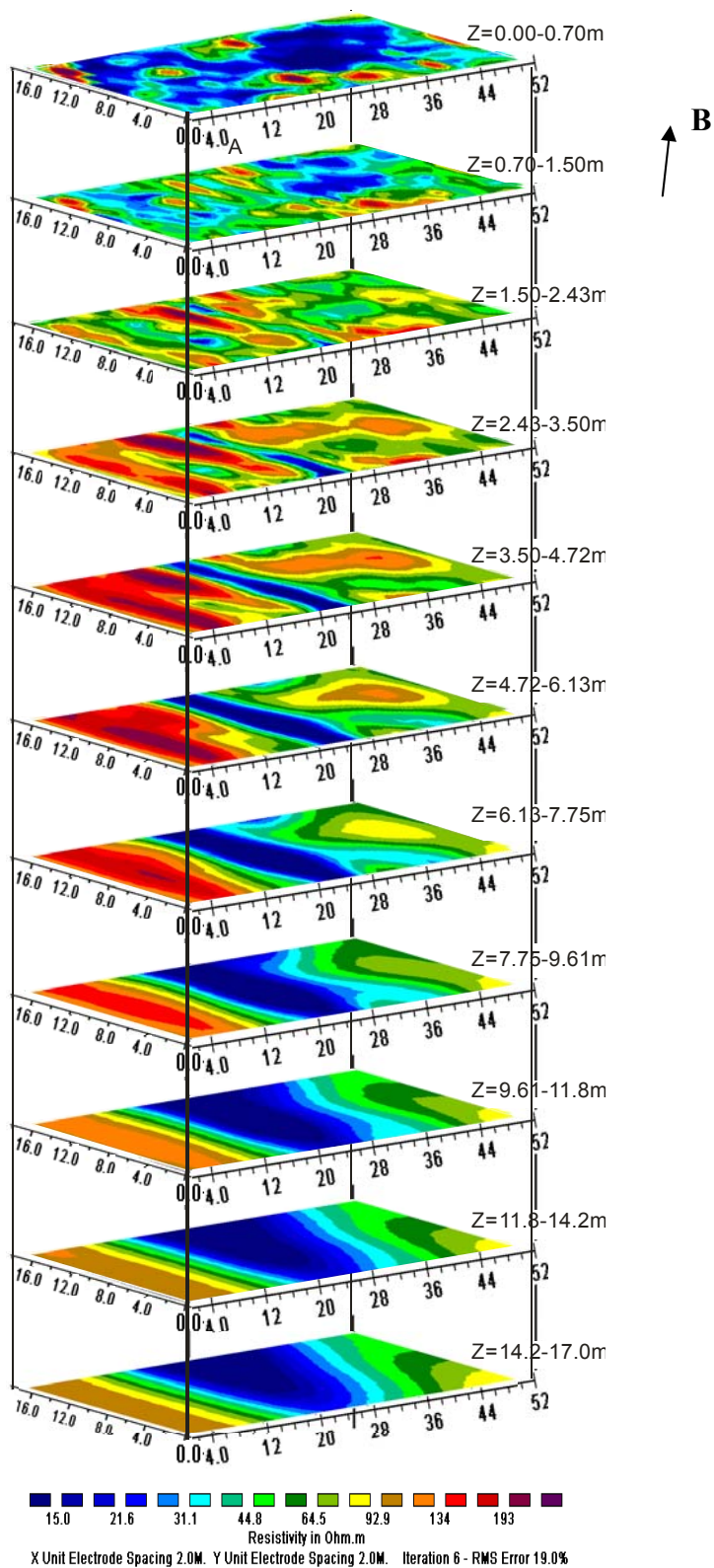
Γενικότερα σε όλες τις γεωηλεκτρικές τομές διακρίνεται ομοιότητα των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις αντίστοιχες τομές της δισδιάστατης αντιστροφής ενώ το σφάλμα είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με μερικές τομές της δισδιάστατης αντιστροφής.

Αξίζει να σημειωθεί πως το σφάλμα στην τρισδιάστατη αντιστροφή είναι άμεσα επηρεασμένο από τις μετρήσεις στην γραμμή μελέτης 0m οι οποίες έδωσαν πολύ μεγάλο σφάλμα στην δισδιάστατη αντιστροφή. Στην περίπτωση που εξαιρείτο αυτή η γραμμή μελέτης το σφάλμα θα μειωνόταν.

4.4.2 Οι οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τρισδιάστατης αντιστροφής είναι η δημιουργία οριζόντιων τομών. Το πλήθος των τομών που προέκυψαν είναι 11. Αντιστοιχούν σε οριζόντια στρώματα το πάχος των οποίων αυξάνει με το βάθος. Παρατηρείται έτσι μεγαλύτερη λεπτομέρεια της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε μικρότερο βάθος. Το πάχος ξεκινάει από 0,7m και καταλήγει στην τελευταία τομή τα 2,8 μέτρα,

Το βάθος στο οποίο φτάνουν αυτές οι τομές (17m) είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση το βάθος της δισδιάστατης αντιστροφής. Παρόλα αυτά όμως, οι λεπτομέρειες σε μεγάλο βάθος είναι ιδιαίτερα περιορισμένες.



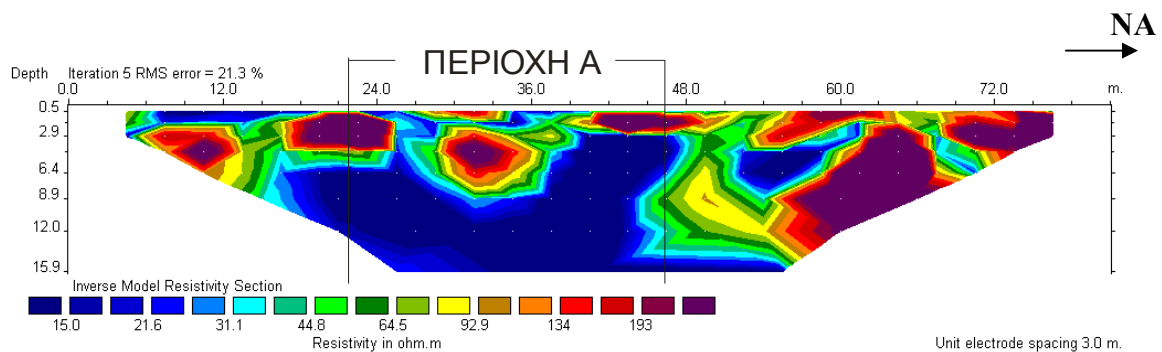
Σχήμα 4.36: Οριζόντιες γεωηλεκτρικές τομές τρισδιάστατης αντίστροφης σε βάθη 0-17m της περιοχής A.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Συνδυασμός ηλεκτρικών τομών περιοχής Α με τη γραμμή μελέτης T2

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.5 η γραμμή μελέτης T2 διασχίζει διαγώνια τον κανάβο της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή Α. Τα σημεία της γραμμής που συμπίπτουν με τον κανάβο της περιοχής Α, είναι από τα 18,6 μέτρα της έως τα 44 μέτρα από την αρχή της γραμμής. Συγκρίνοντας την τομή αυτή (σχήμα 5.1) με τις τομές από την τρισδιάστατη αντιστροφή (σχήμα 5.2), διακρίνονται ίδιοι γεωηλεκτρικοί σχηματισμοί. Πιο συγκεκριμένα, ο σχηματισμός μεγάλων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων σε βάθος μέχρι 5 μέτρων που φαίνεται από τα 17 μέχρι τα 26 μέτρα της τομής T2 και φτάνει σε βάθος μέχρι τα 5 μέτρα, ταυτίζεται απόλυτα με τον σχηματισμό που υπάρχει στα (y=8-16 μέτρα, x=20 μέτρα), των οριζοντίων τομών. Ακόμα ο σχηματισμός μικρών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που διακρίνεται στις οριζόντιες τομές σε βάθος άνω των 3,5 μέτρων στο κέντρο του κανάβου της περιοχής Α παρουσιάζεται και στην γραμμή T2. Τέλος ο γεωηλεκτρικός επιφανειακός σχηματισμός που φαίνεται στα 40 έως τα 48 μέτρα της τομής και φτάνει σε βάθος τα 3 μέτρα, συμπίπτει με αυτόν της τρισδιάστατης αντιστροφής, ο οποίος βρίσκεται στα ίδια βάθη και x=(30-38 μέτρα, y= 0-4 μέτρα).



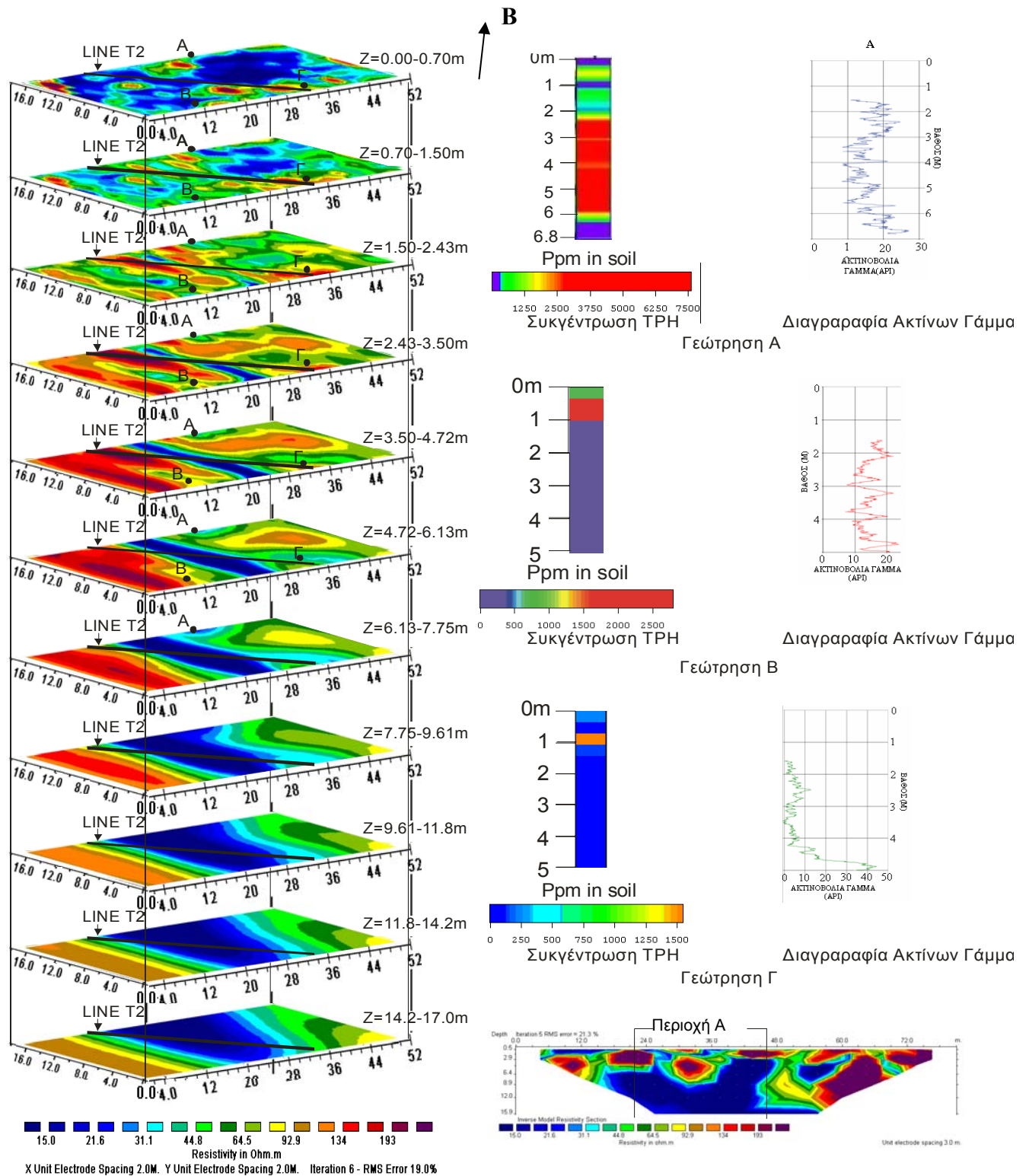
Σχήμα 5.1: Η γεωηλεκτρική τομή T2 η οποία διασχίζει διαγώνια την περιοχή Α

5.2 Συνδυασμός ηλεκτρικών τομών και γεωτρήσεων

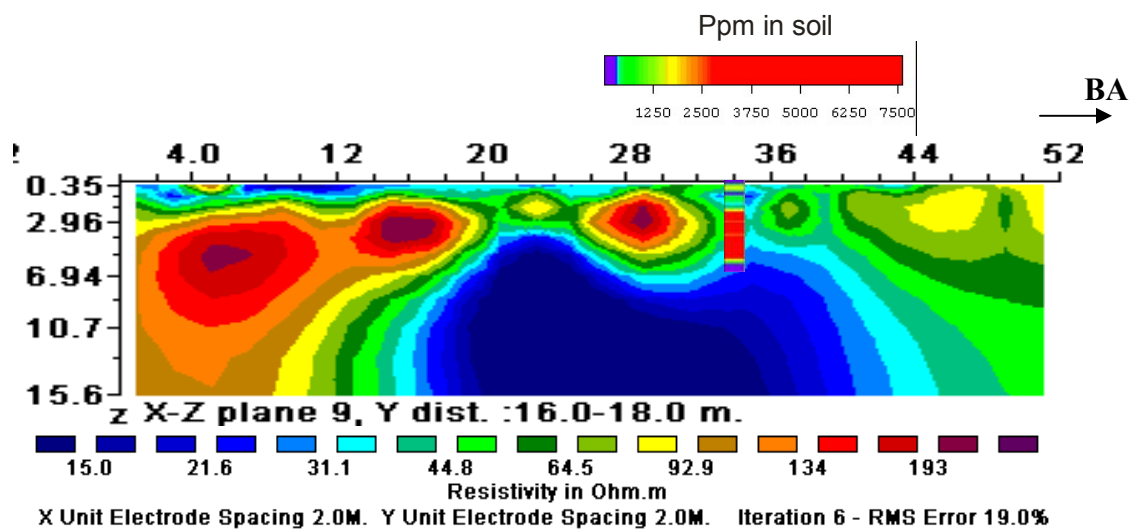
Στην τομή 18 (σχήματα 5.3-5.8) όπου βρίσκεται η γεώτρηση Α, παρατηρείται σε μικρό βάθος έως τα δυο περίπου μέτρα ζώνη χαμηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (5 με 25 Ωm), η οποία δικαιολογείται από τις αυξημένες τιμές υγρασίας που φτάνουν και τα 13,5 % κ.β. Επομένως η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από αυξημένη υγρασία.

Σε μεγαλύτερα βάθη της γεώτρησης από 3 έως 6 μέτρα, παρουσιάζεται σύμφωνα με τις διαγραφίες ακτίνων γάμμα μικρή πτώση των τιμών της ακτινοβολίας οπότε και διακρίνεται μειωμένη συγκέντρωση αργλικών ορυκτών. Στο ίδιο βάθος η υγρασία παρουσιάζει μικρότερες τιμές κάτω των 10 % κ.β. Επιπλέον, η συγκέντρωση ΤΡΗ είναι ιδιαίτερα αυξημένη και φτάνει μέχρι και τα 7500 ppm in soil. Στην τομή παρατηρείται μικρή αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μέχρι τα 70 Ωm . Ιδιαίτερα στα 26 με 32 μέτρα της τομής η αύξηση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη με τιμές μέχρι και 300 Ωm . Η ζώνη αυξημένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πιθανόν να σχετίζεται με τη ρύπανση των εδαφών από υδρογονάνθρακες.

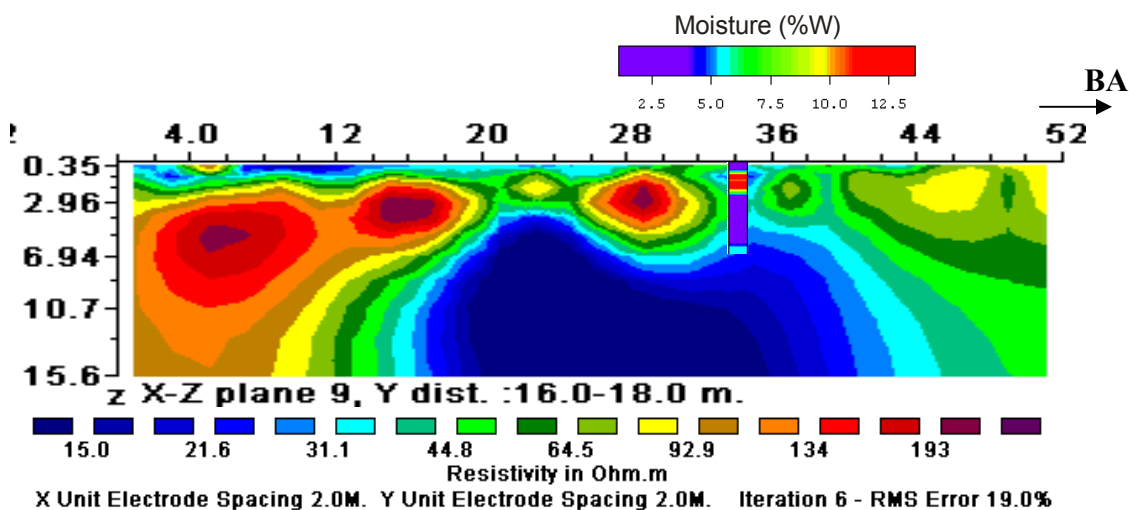
Σε βάθος 6 με 7 μέτρα της εμφανίζεται δραστική μείωση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της συγκέντρωσης ΤΡΗ, ενώ οι τιμές της ακτινοβολίας γάμμα δείχνουν να έχουν αυξητική τάση φτάνοντας τα 27 API, γεγονός που εξηγεί πως οι μικρές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των 5 με 30 Ωm αντιστοιχούν σε αργλικό σχηματισμό.



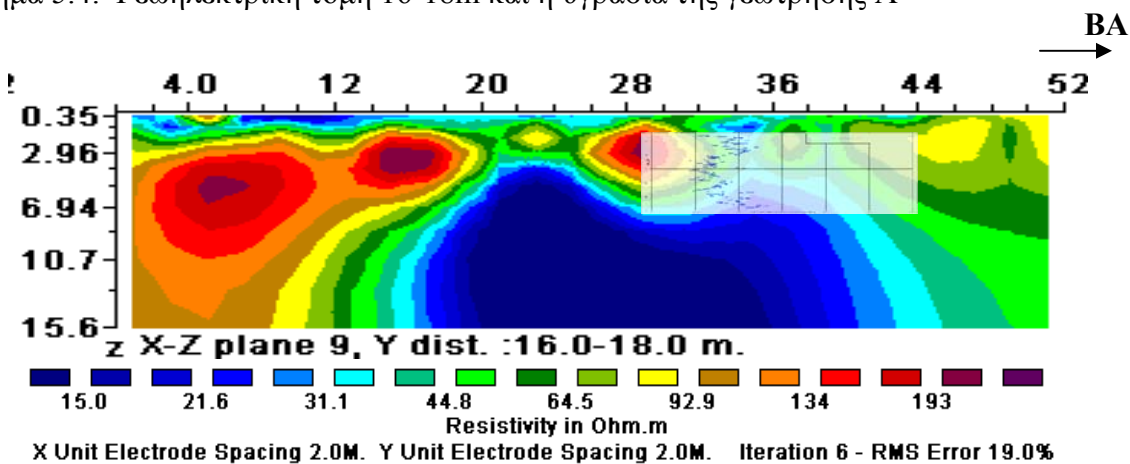
Σχήμα 5.2: Συνδυασμένη απεικόνιση των οριζοντίων τομών της περιοχής Α (αριστερά) με τη γεωηλεκτρική τομή T2 (κάτω δεξιά) και τις γεωτρήσεις Α, Β και Γ (συγκέντρωση ΤΡΗ και διαγραμφίες)



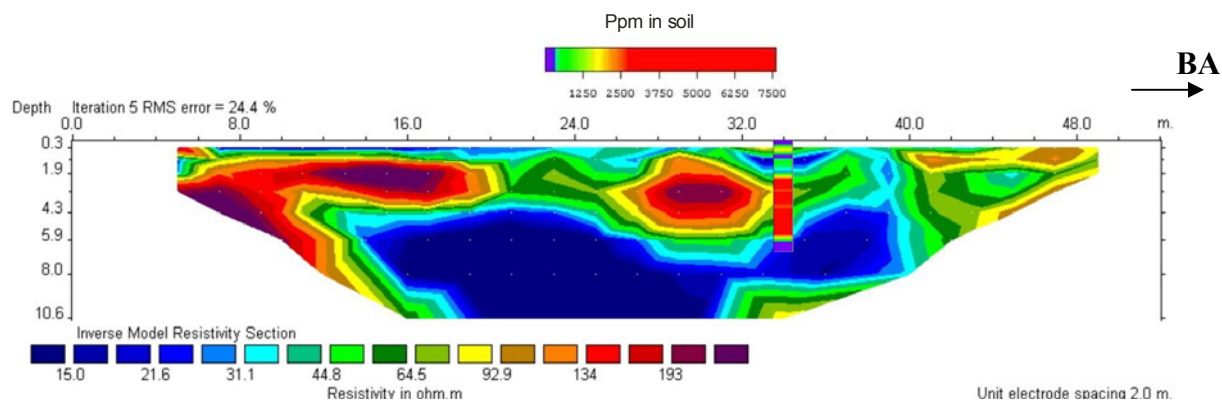
Σχήμα 5.3: Γεωηλεκτρική τομή 16-18m και η συγκέντρωση ΤΡΗ της γεώτρησης Α



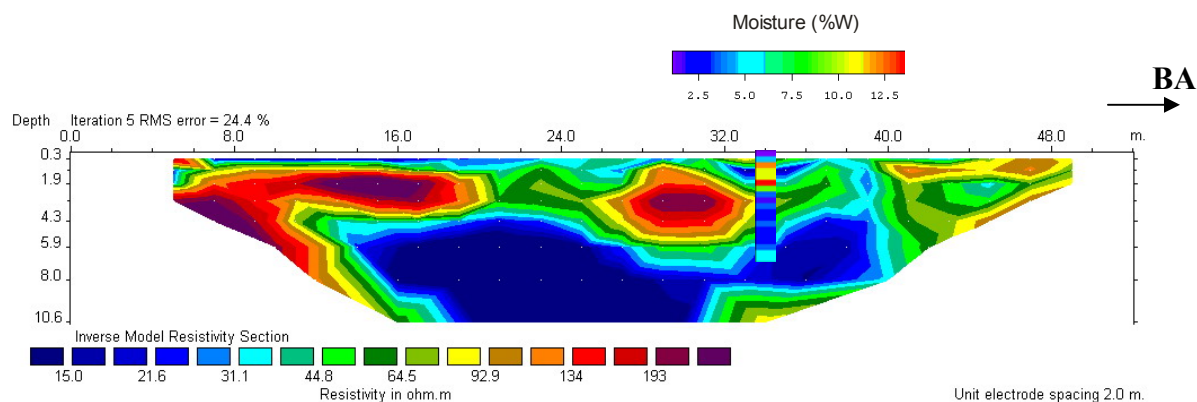
Σχήμα 5.4: Γεωηλεκτρική τομή 16-18m και η υγρασία της γεώτρησης Α



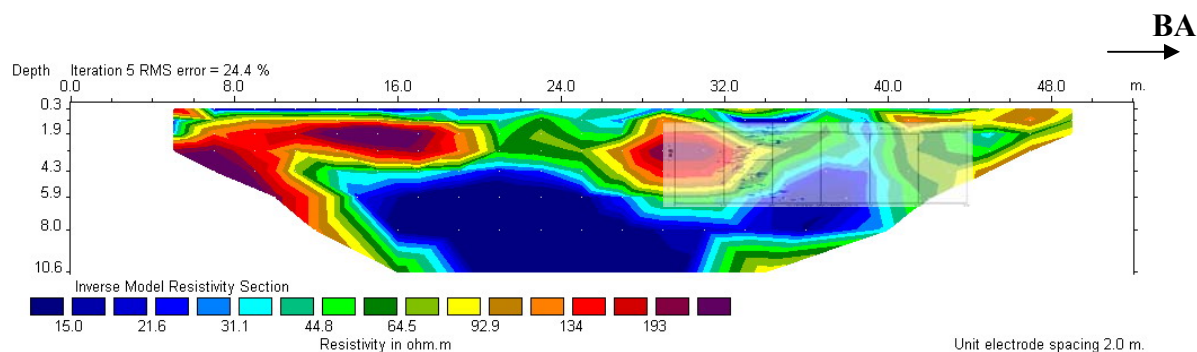
Σχήμα 5.5: Γεωηλεκτρική τομή 16-18m και η διαγραφή ακτίνων γάμμα της γεώτρησης Α



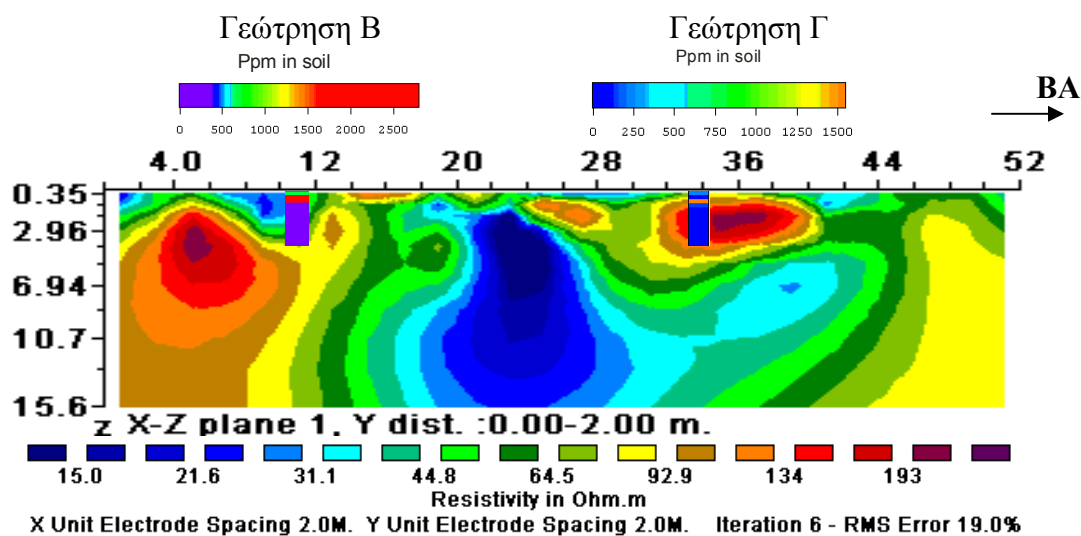
Σχήμα 5.6: Γεωηλεκτρική τομή 16m και η συγκέντρωση ΤΡΗ της γεώτρησης Α



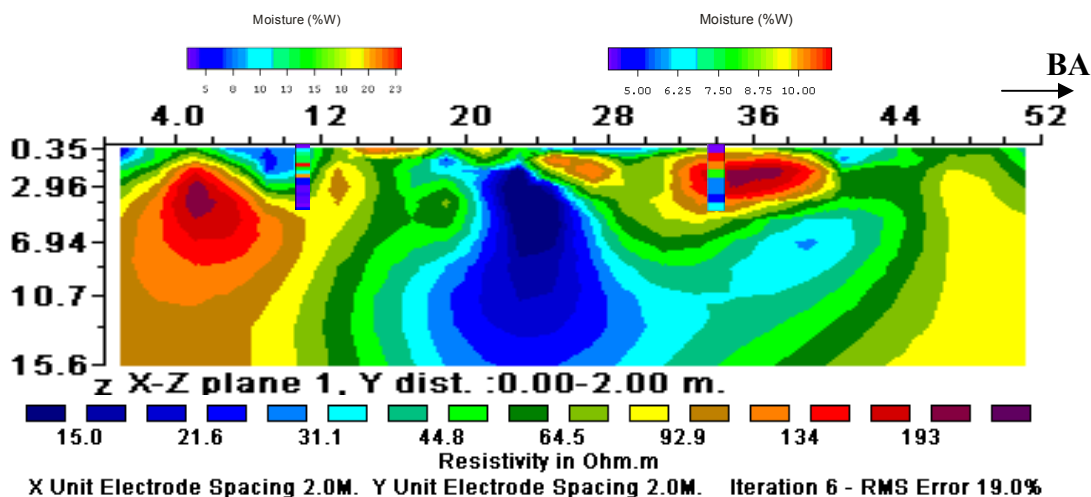
Σχήμα 5.7: Γεωηλεκτρική τομή 16m και η υγρασία της γεώτρησης Α



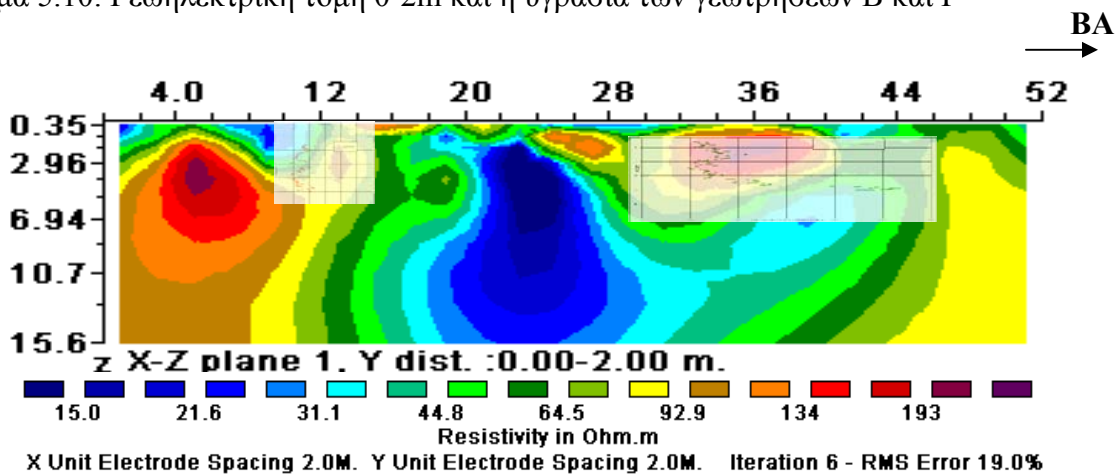
Σχήμα 5.8: Γεωηλεκτρική τομή 16m και η διαγραφή ακτίνων γάμμα της γεώτρησης Α



Σχήμα 5.9: Γεωηλεκτρική τομή 0-2m και η συγκέντρωση TPH των γεωτρήσεων B και Γ



Σχήμα 5.10: Γεωηλεκτρική τομή 0-2m και η υγρασία των γεωτρήσεων B και Γ



Σχήμα 5.11: Γεωηλεκτρική τομή 0-2m και η διαγραφία ακτίνων γάμμα των γεωτρήσεων B και Γ

Στη γεώτρηση Β μέχρι βάθος ενός μέτρου (σχήματα 5.2 και 5.9-5.14), παρατηρείται συγκέντρωση ΤΡΗ με τιμές κοντά στα 3000 ppm στο έδαφος η οποία όμως δεν φαίνεται να επηρεάζει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης καθώς δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή.

Σε βάθος μεγαλύτερο του ενός μέτρου οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συνεχίζουν να κυμαίνονται από 5 έως 30 Ωm . Στο βάθος αυτό η υγρασία είναι αυξημένη με τιμές από 10 έως 23 % κ.β., ενώ ρύπανση δεν υπάρχει εφόσον η συγκέντρωση ΤΡΗ βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως οι μετρήσεις της ακτινοβολίας γάμμα δεν παρουσιάζουν καμία ιδιαίτερη μεταβολή, οπότε η συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών στο συγκεκριμένο σημείο παραμένει σταθερή.

Στη γεώτρηση Γ έως τα 4.5 μέτρα βάθος (σχήματα 5.2 και 5.9-5.14), παρουσιάζεται ζώνη υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που φτάνει τα 250 Ωm . Η υγρασία στην ζώνη αυτή είναι σε χαμηλό επίπεδο (κάτω των 6 % κ.β.) και η ρύπανση μηδαμινή. Η συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών επίσης είναι μικρή (10 με 20%).

Σε βάθος από 4.5 έως 5 μέτρα παρατηρείται δραστική αύξηση της συγκέντρωσης αργιλικών ορυκτών στο 55% η οποία συμβαδίζει απόλυτα με την μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η αύξηση της συγκέντρωσης αργιλικών ορυκτών στο βάθος αυτό και η αντίστοιχη μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οδηγεί στο συμπέρασμα πως η ζώνη χαμηλών αντιστάσεων που εμφανίζεται στο κέντρο όλων των τομών του κανάβου σε βάθος κάτω των 2,5 μέτρων παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών.

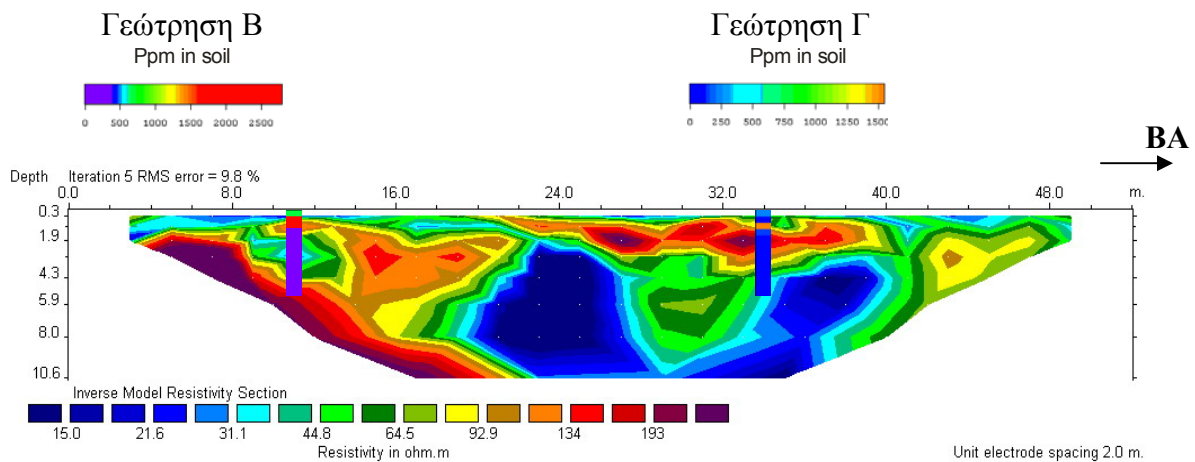
Γενικότερα λοιπόν, η ρύπανση παρουσιάζεται σε ζώνη μικρότερης συγκέντρωσης αργιλικών ορυκτών και αυξημένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Άρα οι ζώνες με υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχούν σε χαμηλή συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών, χαμηλή υγρασία ή/ και αυξημένη ρύπανση.

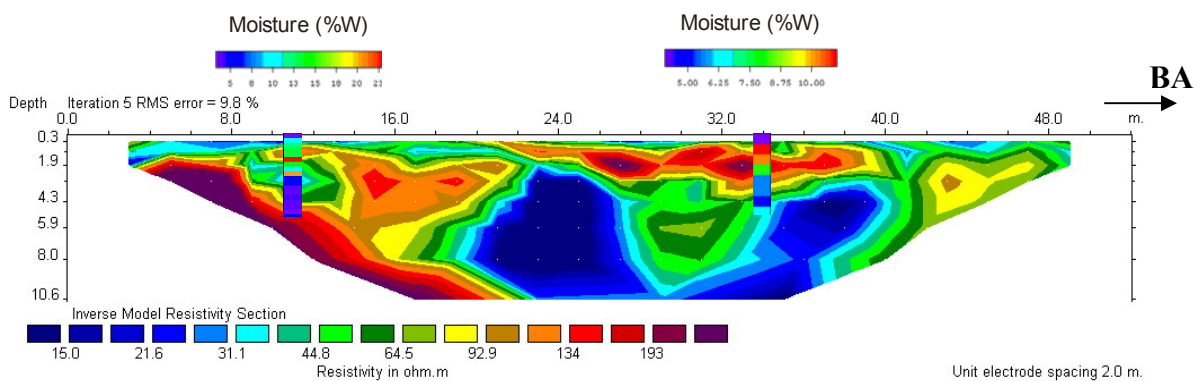
Αντιστρόφως οι χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχούν σε αυξημένη υγρασία ή/ και συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών καθώς και καθόλου ρύπανση.

Αν υπάρχει ρύπανση περιορίζεται σε στρώμα που αντιστοιχεί σε τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεγαλύτερες των 45 Ωm που κατά τόπους μπορεί να φτάνει και τα 300 Ωm .

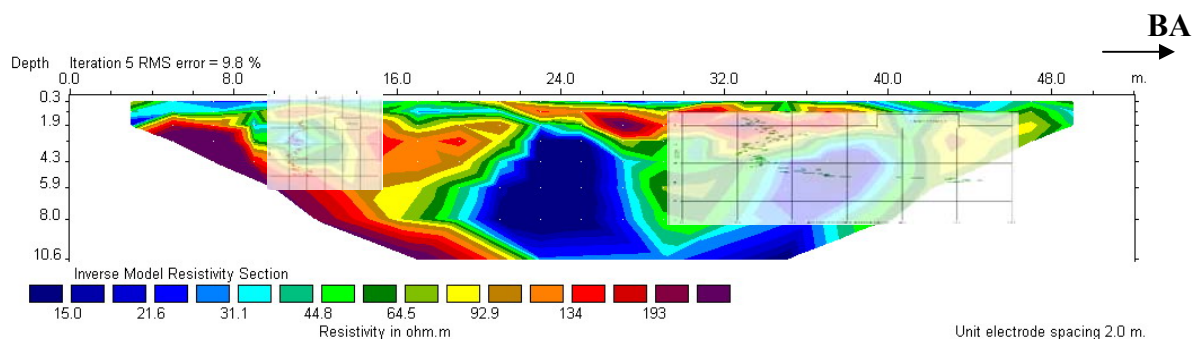
Ένα τέτοιο στρώμα είναι ο σχηματισμός 3 στις οριζόντιες τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής (σχήμα 5.15) και στις τομές τις δισδιάστατης αντιστροφής. Ο σχηματισμός αυτός βρίσκεται σε βάθος 2.5 με 6 μέτρα με ειδική ηλεκτρική αντίσταση που φτάνει τα 200 Ωm. Βρίσκεται ανάμεσα στις γεωτρήσεις Α και Γ οι οποίες στο συγκεκριμένο βάθος έχουν δείξει μειωμένη συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών. Παράλληλα, η γεώτρηση Α στο βάθος αυτό παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση ΤΡΗ που φτάνει και τα 7500 ppm in soil οπότε υπάρχει πιθανότητα ο σχηματισμός αυτός να σχετίζεται με ρύπανση.



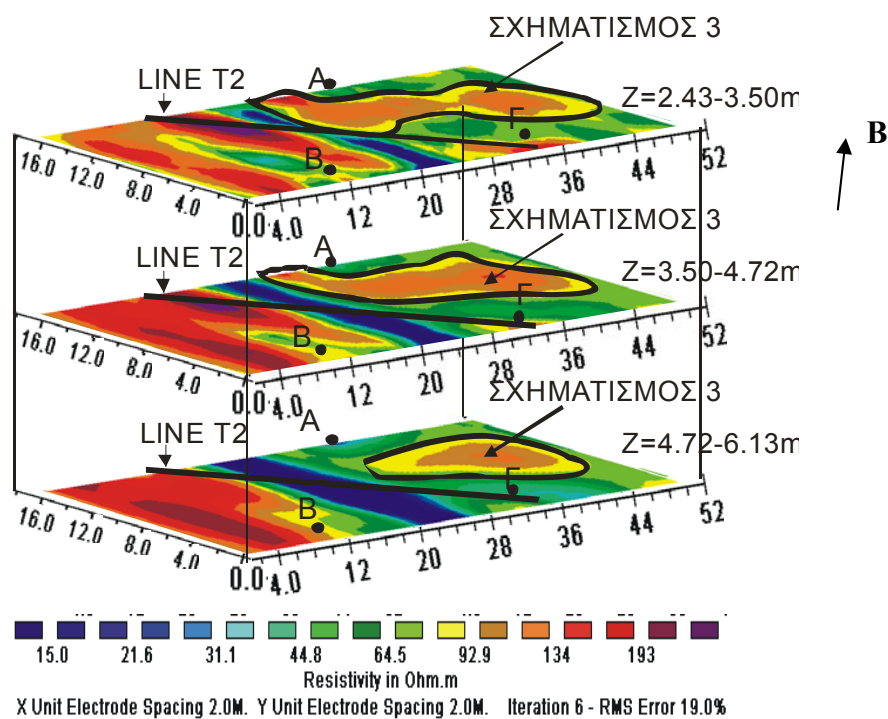
Σχήμα 5.12: Γεωηλεκτρική τομή 2m και η συγκέντρωση ΤΡΗ των γεωτρήσεων Β και Γ



Σχήμα 5.13: Γεωηλεκτρική τομή 2m και η υγρασία των γεωτρήσεων Β και Γ



Σχήμα 5.14: Γεωηλεκτρική τομή 2m και η διαγραφή ακτίνων γάμμα των γεωτρήσεων B και Γ



Σχήμα 5.15: Οι οριζόντιες τομές της τρισδιάστατης αντιστροφής για $z=2.43-6.13\text{m}$ και ο σχηματισμός 3.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορεί να γίνει αξιολόγηση και καταγραφή συμπερασμάτων που προκύπτουν σχετικά με τη συμβολή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας στην ανίχνευση της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών.

Η αποτελεσματικότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας στην μελέτη περιβαλλοντικών προβλημάτων εξαρτάται άμεσα από την διαφοροποίηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στους υπό μελέτη σχηματισμούς.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των εδαφών και των πετρωμάτων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως το πορώδες και ο βαθμός κορεσμού σε νερό, η αλατότητα του νερού, η συγκέντρωση υδρογονανθράκων στους πόρους του σχηματισμού καθώς και ο όγκος των αργιλικών προσμίξεων.

Με την διαδικασία της αντιστροφής των ηλεκτρικών δεδομένων παρέχεται η δυνατότητα απεικόνισης της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους σε δυο ή τρεις διαστάσεις. Από την τρισδιάστατη αντιστροφή δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας οριζοντίων τομών του υπεδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που οι μετρήσεις δεν έγιναν όπως απαιτεί μια καθεαυτού τρισδιάστατη έρευνα, πράγμα που είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, αλλά σε παράλληλες γραμμές δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, εντούτοις τα αποτελέσματα τα οποία συλλέχθηκαν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά.

Συνδυάζοντας την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων εδαφικών δειγμάτων από γεωτρήσεις και των διαγραφιών εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

Οι ζώνες με υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχούν σε περιοχές με χαμηλότερη συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών, χαμηλότερη υγρασία ή αυξημένη ρύπανση. Αντιθέτως, οι χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχετίζονται με αυξημένη υγρασία ή συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών και δεν αναμένεται να εμφανίζουν πρόσφατη ρύπανση από υδρογονάνθρακες.

Έτσι η αυξημένη ρύπανση που παρατηρείται στην γεώτρηση Α της τομής 18 σε βάθη 2,5 με 6 μέτρα συμπίπτει με ζώνη αυξημένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην

ίδια γεώτρηση και σε βάθος 1 με 2 μέτρα μετρήθηκαν αυξημένη υγρασία και μικρές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Στην γεώτρηση Γ σε βάθος 4,5 μέτρων παρατηρείται απότομη αύξηση της συγκέντρωσης αργιλικών ορυκτών και αντίστοιχα μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με βάση αυτή την παρατήρηση στην γεώτρηση Γ προκύπτει ότι η ζώνη αντίστοιχα που παρουσιάζεται στο κέντρο όλων των τομών της περιοχής Α σε βάθος κάτω των 2,5 μέτρων παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών.

Από τον συνδυασμό των οριζοντίων τομών και των γεωτρήσεων προκύπτει ότι η ζώνη υψηλότερης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που βρίσκεται ανάμεσα στις γεωτρήσεις Α και Γ (σχηματισμός 3) χαρακτηρίζεται από μειωμένη συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών ή από αυξημένη ρύπανση.

Άρα αν υπάρχει πρόσφατη ρύπανση αυτή περιορίζεται σε στρώμα που αντιστοιχεί σε τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεγαλύτερες των 45 Ωm που κατά τόπους μπορεί να φτάνει και τα 300 Ωm .

Επισημαίνεται η αναγκαιότητα της μελέτης της υγρασίας των δειγμάτων που συλλέγονται από τις γεωτρήσεις καθώς με αυτόν τον τρόπο εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μετά από την συνδυασμένη μελέτη των τομών της ηλεκτρικής τομογραφίας με τις γεωτρήσεις προκύπτει η αναγκαιότητα πραγματοποίησης επιπρόσθετων γεωτρήσεων σε επιλεγμένες θέσεις επιδιώκοντας έτσι την καλύτερη διασταύρωση των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας και μια πιο ολοκληρωμένη ερμηνεία. Προτείνεται η διάνοιξη γεωτρήσεων, σε θέσεις όπου εμφανίζεται τόσο ο σχηματισμός 3 όσο και ο σχηματισμός με αυξημένη συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών. Την ίδια χρονική περίοδο θα πρέπει να πραγματοποιηθούν συμπληρωματικές μετρήσεις με τη γεωηλεκτρική μέθοδο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Βαφείδης Α. (1994).** “Αξιολόγηση σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους ”, Χανιά
2. **Βαφείδης Α. (2001).** “ Εφαρμοσμενη Γεωφυσική ΙΙ”
3. **Κρητικάκης Γ. (2001)** “Συμβολή των σεισμικών μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης σε γεωτεχνικές και υδρολογικές μελέτες”. Εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού μαθήματος “Ειδικά Κεφάλαια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας”. Πολυτεχνείο Κρήτης , Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. **Παπαζάχος Β. (1986),** “Εισαγωγή Στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική”, Εκδόσεις “Ζήτη”, Θεσσαλονίκη
5. **Σπανουδάκης Ν. (2001).** “Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων”. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
6. **Hamdan H. (2002),** “Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του νομού Χανίων”. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

ΔΙΕΘΝΗΣ BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Batayneh A.T., Barjous M.O. (2005).** “Resistivity surveys near a waste-disposal site in the Qasr Tuba area of central Jordan”. Bull. Eng. Geol. Env. 64, 287-294
2. **Bavusi M., Rizzo E., Lapenna V. (2006).** “Electromagnetic methods to characterize the Savoia di Lucania waste dump (Southern Italy)”. Environ. Geol. 51, 301-308
3. **Bedient P.B., Rifai H.S., Newell C.J. (1994).** “Ground Water Remediation : Transport and Remediation”. Englewood Cliffs, New Jersey.
4. **Chambers J.E., Loke M.H., Ogilvy R.D., Meldrum P.I. (2004).** “Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography”. Journal of Contaminant Hydrology 68, 1-22

5. **Choudhury, K., Saha, D.K., Chakraborty, P., (2001).** “Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain”. *J. Appl. Geophys.* 46, 189–200.
6. **deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., (1990).** “Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data”. *Geophysics*, **55**, 1613-1624.
7. **Dobrin, M., (1976),** “Introduction to geophysical prospecting”, McGraw Hill Book Comp.Inc., New York, USA.
8. **Environmental Protection Agency (2004).** “Site Characterization Technology for DNAPL Investigation” , United States.
9. **Griffiths D.H. and Barker R.D.(1993).** “Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology”. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
10. **Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A., (1986).** “New prospects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological applications”. *Geophysics* 51, 585–594.
11. **Jackson, P.D., Northmore, K.J., Meldrum, P.I., Gunn, D.A., Hallam, J.R., Wambura, J., Wangusi, B., Ogutu, G., (2002).** “Non-invasive moisture monitoring within an earth embankment – a precursor to failure”. *NDT&E Int.* 35, 107–115.
12. **Karlık G., Kaya M. A. (2000).** “Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta”, Turkey. *Environmental Geology*, 40, 725-731
13. **Li Y. and Oldenburg D.W. (1992).** “Approximate inverse mappings in DC resistivity problems”. *Geophysical Journal International* **109**, 343-362.
14. **Loke M.H. and Barker R.D.,(1996).** “Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method”. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
15. **Newmark, R., W. Daly, K. Kyle, and A. Ramirez. (1998).** “Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques”. *JEEG*, Vol. 3, Issue 1, March 1998,p7-13

16. **Olayinka, A.I., Yaramanci, U., (2000).** “Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data”. *Geophys. Prospec.* 48, 293–316.
17. **Park, S., (1998).** “Fluid migration in the vadose zone from 3-D inversion of resistivity monitoring data”. *Geophysics* 63, 41–51.
18. **RES2DINV user’s manual version 3.4**
19. **RES3DINV user’s manual version 2.13**
20. **Robinson, E. S. and Coruh, C. (1988).** ‘Basic Exploration Geophysics’, New York : Johny Wily.
21. **Shaaban, F.F., Shaaban, F.A., (2001).** “Use of two-dimensional electric resistivity and ground penetrating radar for archaeological prospecting at the ancient capital of Egypt”. *J. Afr. Earth Sci.* 33, 661–671.
22. **Samouelian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G. (2004).** “Electrical resistivity survey in soil science: a review”.
23. **Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R., Sandberg, S.,(2002).** “A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank”. *J. Appl. Geophys.* 49, 211–229.
24. **Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A., Panissod, C., (2000).** “Soil resistivity: a noninvasive tool to map soil structure horizonation”. ***Geoderma* 97, 393–404.**