

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT	3
1. Εισαγωγή.....	4
2. Αρχές της Γεωφυσικής Τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε στην περιοχή ΦΡΕ του Δήμου ΦΡΕ (Χανιά)	7
2.1 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης.....	7
2.1.1 Μέθοδος Τελλουρικών Ρευμάτων	7
2.1.2 Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος Διασκόπησης	9
2.1.3 Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού	9
2.1.4 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης	10
2.1.4.1 Ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων	10
2.1.4.2 Χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων	11
2.1.4.3 Μέθοδοι έρευνας.....	14
2.1.4.4 Επιλογή διάταξης	17
2.1.4.5 Περιορισμοί εφαρμοσιμότητας ηλεκτρικής διασκόπησης.....	18
2.1.4.6 Ποιοτική ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης.....	18
2.1.4.7 Προβλήματα και τρόποι επίλυσης κατά την ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης.....	20
2.1.4.8 Εφαρμογές της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό υδατικών πόρων... ..	22
2.1.4.9 Εντοπισμός υπόγειων διόδων νερού (παλαιοκοίτες).....	22
2.1.4.10 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων	25
2.1.4.11 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στη χαρτογράφηση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού υδροφόρου ορίζοντα.....	26
2.1.4.12 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό και χαρτογράφηση της υπόγειας στάθμης νερών	29
2.1.4.13 Εφαρμογή των μονοδιάστατων (γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, VES) και δυσδιάστατων (γεωηλεκτρική τομογραφία) ηλεκτρικών διασκοπήσεων στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων	30
3. Μεθοδολογία	38
3.1 Γεωφυσικά όργανα	38
3.2 Μετρήσεις υπαίθρου	43
4. Διαδικασία και Στάδια Επεξεργασίας Γεωφυσικών Δεδομένων & Αποτελεσμάτων Ερευνών	46
4.1 Επεξεργασία τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων – Μέθοδος Αντιστροφής	46
4.2 Αποτελέσματα Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας-Δισδιάστατη Αντιστροφή.....	48
5. Βιβλιογραφία.....	59

ABSTRACT

This project was accomplished on behalf of Mr. Dimitris Kerasiotis in the urban area of Fre village. Four geoelectrical (ERTs) tomographies were collected for defining the possible location of the sewage system of an old house and the bedrock geometry. Three parallel geoelectrical profiles (lines 2–4). One more additional profile (lines 1) crossing the previous ones. The method which decided to apply is Electrical resistivity tomography (ERT), which belongs to non-destructive methods applying in urban (noisy) environment. These geophysical engineering tools provide valid information for bedrock profiles and yield a definite determination of the general subsurface structure including the depth of aquifers, subsurface in homogeneities and others. Electrical resistivity tomography data are collected along a line as a combined sounding–profiling survey, using a multi-electrode resistivity measurement system. The geoelectrical data were collected using an IRIS-Syscal Pro, Switch 48 instrument with an accuracy of 0.1 mV. The system features 48 electrodes, enabling fully automated measurements of the shallow subsurface apparent resistivity using the dipole–dipole configuration. The dipole–dipole spacing was 0.5 m, providing the possibility of detecting small bodies and/or structures up to 2 m depth, which may be considered satisfactory for the detection of near surface anomalies in the study area. The resistivity cross section data were processed and inverted using the commercial packages RES2DINV. This program uses an implementation of the smoothness constrained least-squares method based on the Gauss–Newton optimization technique. The results of the geoelectrical (ERTs) tomographies are for the line 1 shows that the bedrock is marly limestone, which is appearing after 5.5 meters from the begging of the transect. The line 2 ERT shows that the bedrock is depicted at the depth of about 1.2-2 meters but also one main resistive anomaly was defined from the surface till the depth of 0.90 meters from 4.00-5.50 meters along the profile. Two conductive zones, saturated by water, were identified from both sides of the aforementioned anomaly. The line 3 ERT shows that the bedrock along all the profile at the depth of about 1-2 meters. One more small resistive anomaly was defined at the begging of the transect. The line 4 ERT shows that the bedrock is defined at the depth of 1.6 meters and one main resistive anomaly with similar characteristics of the anomaly of Line 2, was depicted. This anomaly has a width of about 1 meter (4.5-5.5 meters along the profile) and was defined at the depth of 0.4 meters. The anomalies found in Line 2 and 4 can be safely associated. After all, the most possible location of the old sewage system in the area under investigation is along profiles 2 and 4, 4.5 meters from the begging. The measurements were collected by Pantelis Soupios Asc. Professor Technological Educational Institute (T.E.I.) of Crete, on graduate students Trochalaki Fotini, on graduate students Kuriakoulia Ioanna.

1. Εισαγωγή

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις στην περιοχή του Δήμου Φρε (Χανιά- Κρήτη) διενεργήθηκαν από το Εργαστήριο Γεωφυσικής και Γεωτεχνολογίας του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΑΤΕΙ Κρήτης, Χανιά. Το έργο αυτό πραγματοποιήθηκε για λογαριασμό του κ. Δημήτρη Κερασιώτη





Εικόνα 1.1: Η περιοχή Φρε

Οι γεωφυσικές έρευνες επικεντρώθηκαν κατά μήκος οδεύσεων σε συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής ενδιαφέροντος. Σκοπός των γεωφυσικών διασκοπήσεων ήταν να διερευνηθεί η γεωφυσική και γεωλογική δομή του υπεδάφους και σε πρώτη προσέγγιση να εκτιμηθούν οι εδαφικές συνθήκες της περιοχής και η εύρεση ακριβής θέσης παλιού φρέατος. Στην περιοχή εφαρμόστηκε η μέθοδος της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, πραγματοποιώντας τέσσερις γεωηλεκτρικές (ERTS) τομογραφίες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για τον καθορισμό της πιθανής θέσης του συστήματος αποχέτευσης του παλιού σπιτιού. Οι μετρήσεις συλλέχθηκαν σε μια μέρα από 4 άτομα (συμπεριλαμβανομένου του κ. Κερασιώτη που επόπτευε τις μετρήσεις πεδίου) για περισσότερο από 10 ώρες. Κατά μήκος όλων των τομών τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συλλέχθηκαν με τις διατάξεις Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου.

Στην εικόνα 1.2 φαίνεται λεπτομέρεια της περιοχής που διενεργήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες.



Εικόνα 1.2: Περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες

Η γεωφυσική χαρτογράφηση της περιοχής πραγματοποιήθηκε το Φεβρουάριο 2011 από το Εργαστήριο Γεωφυσικής και Γεωτεχνολογίας του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΑΤΕΙ Κρήτης, Χανιά. Τον συντονισμό των εργασιών υπαίθρου ανέλαβε ο Σουπιός Παντελής Γεωλόγος-Γεωφυσικός, Αν. Καθηγητής του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΑΤΕΙ Κρήτης, Χανιά σε συνεργασία με τον κ. Κερασιώτη Δημήτρη.

Συνολικά στις γεωφυσικές έρευνες συμμετείχαν οι παρακάτω ερευνητές:

- Σουπιός Παντελής Γεωλόγος-Γεωφυσικός, Αν. Καθηγητής του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΑΤΕΙ Κρήτης, Χανιά
- Κυριακούλια Ιωάννα Τελειόφοιτος τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΑΤΕΙ Κρήτης, Χανιά
- Τροχαλάκη Φωτεινή Τελειόφοιτος τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΑΤΕΙ Κρήτης, Χανιά

2. Αρχές της Γεωφυσικής Τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε στην περιοχή ΦΡΕ του Δήμου ΦΡΕ (Χανιά)

Κατά τη διάρκεια των γεωφυσικών ερευνών εφαρμόστηκε η τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η παραπάνω γεωφυσική τεχνική επιλέχθηκε ως η πλέον κατάλληλη για την επίτευξη των στόχων της έρευνας, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τα χαρακτηριστικά των υποψήφιων γεωλογικών στόχων, όσον αφορά στον εντοπισμό και τη χαρτογράφησή τους.

2.1 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης

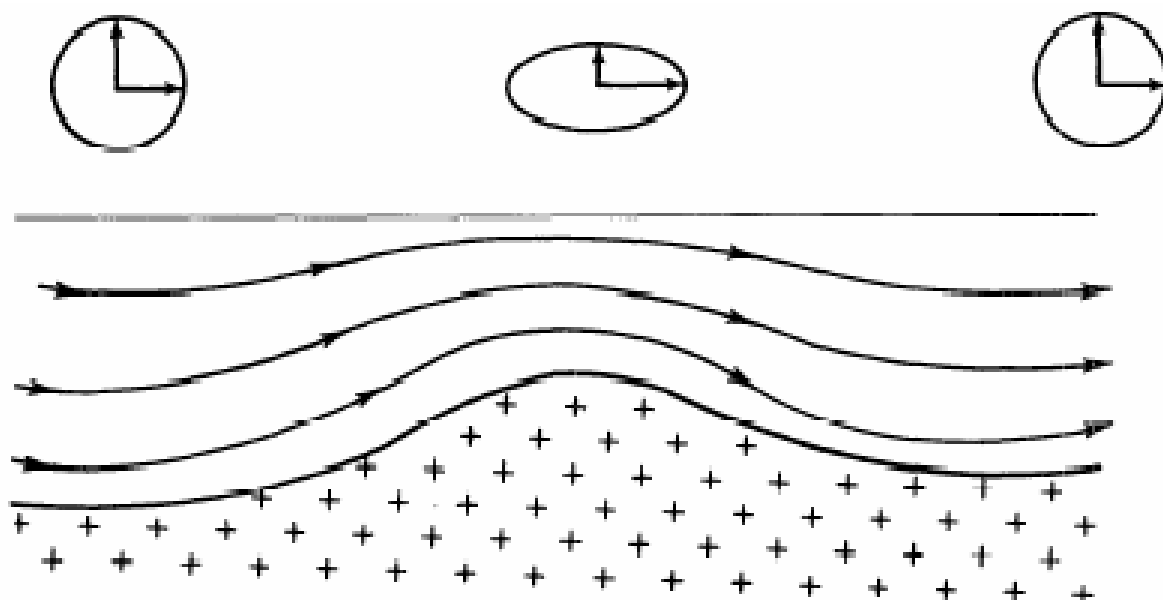
Η ποσότητα που μετράμε συνήθως είναι η ηλεκτρική τάση ενώ η ποσότητα που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός της και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής διασκόπησης μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες. Σε εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων (μέθοδος τελλουρικών ρευμάτων, μαγνητοτελλουρική και μέθοδος φυσικού δυναμικού) και σε εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία (μέθοδοι ειδικής αντίστασης, ισοδυναμικών γραμμών και επαγόμενης πολικότητας).

2.1.1 Μέθοδος Τελλουρικών Ρευμάτων

Τα τελλουρικά ρεύματα είναι φυσικά ρεύματα που κινούνται εντός του φλοιού της Γης υπό μορφή μετώπων (σεντονιών) και παρουσιάζουν διακυμάνσεις τόσο στη διεύθυνση τους όσο και στην ένταση. Ο εντοπισμός τους είναι σχετικά εύκολος καθώς απαιτείται η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού σε δύο ηλεκτρόδια που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη των 300 μέτρων. Ένα από τα μετρήσιμα μεγέθη κατά την εκτέλεση των τελλουρικών μεθόδων είναι η πυκνότητα ρεύματος. Η πυκνότητα ρεύματος ως διανυσματικό μέγεθος παρουσιάζει ομοιομορφία ή ανομοιομορφία εξαρτώμενη πάντα των γεωλογικών/τεκτονικών συνθηκών που επικρατούν στη περιοχή μελέτης. Έτσι σε μια περιοχή με οριζόντια στρωματογραφία παρουσιάζεται ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας ρεύματος σε αντίθεση με την κατανομή που παρουσιάζεται σε θέσεις όπου εντοπίζονται γεωλογικές δομές όπως, σύγκλινα, αντίκλινα και ρήγματα.

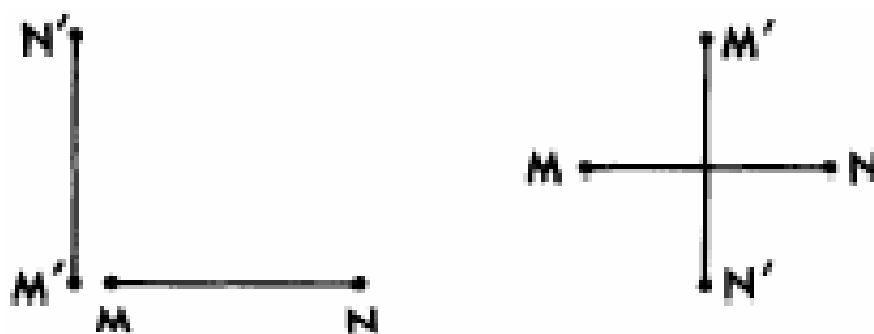
Το διάνυσμα πυκνότητας ρεύματος είναι μεγαλύτερο όταν το ρεύμα κινείται κάθετα στον άξονα της δομής (αντίκλινο), παρά όταν κινείται παράλληλα στον άξονα. Χαρτογραφώντας αυτά τα διανύσματα παρατηρείται ότι πάνω από οριζόντιες στρωματομένες δομές λαμβάνουμε ένα κύκλο ενώ στη περίπτωση συγκλίνων και αντικλίνων οδηγούμαστε σε ελλείψεις (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος πάνω από ένα αντίκλινο. Οι ελλείψεις και οι κύκλοι υποδηλώνουν την ένταση του τελλουρικού πεδίου ως συνάρτηση της κατεύθυνσης σε σχέση πάντα με τον άξονα της τεκτονικής δομής (αντίκλινο).

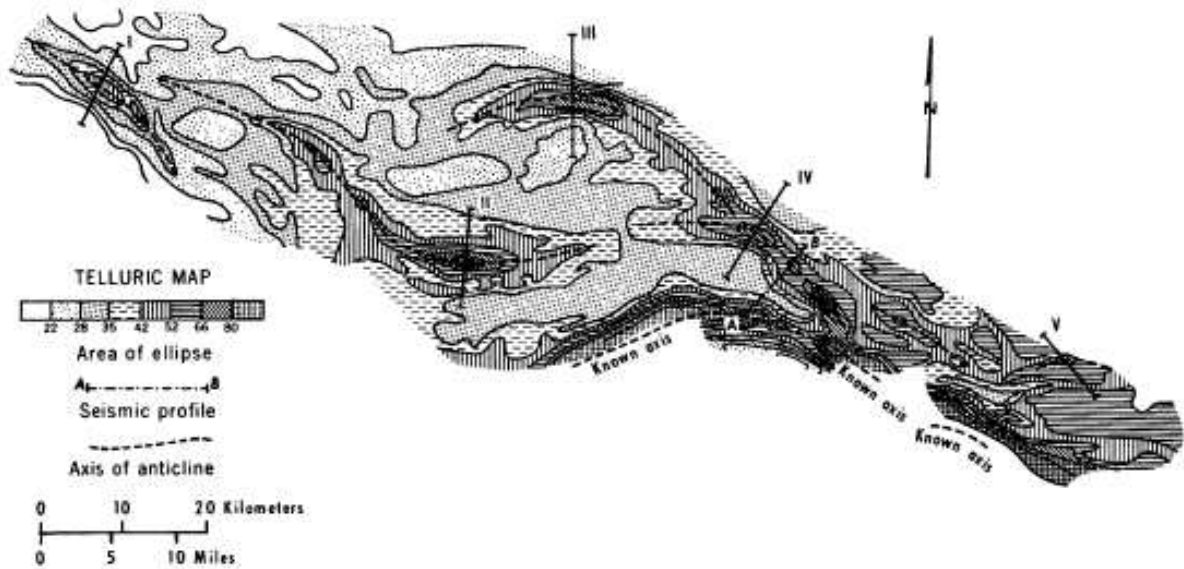
Οι μετρήσεις της μεθόδου εκτελούνται με μεγάλη ευκολία δεδομένου ότι τέσσερα ηλεκτρόδια, M, N, M' και N' εγκαθίστανται στο έδαφος σε διάταξη όπως αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα (2.2) και γίνεται συνεχής καταγραφή της διαφοράς δυναμικού στα ηλεκτρόδια.

Από τις μετρήσεις υπολογίζονται οι δύο συνιστώσες E_x και E_y του τελλουρικού πεδίου, ενώ το ολικό πεδίο ορίζεται από την συνισταμένη των δύο.



Σχήμα 2.2. Παραδείγματα διάταξης των ηλεκτροδίων για τη μέτρηση των X και Y συνιστωσών του τελλουρικού πεδίου. M, M', N και N' είναι τα ηλεκτρόδια δυναμικού.

Στην τέλος μιας μελέτης κατά την οποία εκτελούνται πλήθος μετρήσεων, αυτές τοποθετούνται στο χάρτη και παράγεται ένας χάρτης ισοκαμπύλων με ίσες ελλειπτικές περιοχές όπου παρουσιάζονται οι κύριες γεωλογικές δομές οι οποίες και αναγνωρίστηκαν από τις διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες των σχηματισμών (σχήμα 2.3).



Σχήμα 6.3. Τελλουρικός χάρτης της λεκάνης Aquitaine στη Γαλλία.

2.1.2 Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος Διασκόπησης

Η μαγνητοτελλουρική μέθοδος διασκόπησης παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά με τη μέθοδο των τελλουρικών ρευμάτων αλλά παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι επειδή μετρά τη μεταβολές πλάτους τόσο του ηλεκτρικού πεδίου E_x όσο και του μαγνητικού πεδίου H_y δίνεται η δυνατότητα του απευθείας υπολογισμού του μοντέλου αντιστάσεων με το βάθος.

Οι μετρήσεις της μαγνητοτελλουρικής μεθόδου λαμβάνονται για διάφορες συχνότητες και δεδομένου ότι το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι συνάρτηση της συχνότητας, είναι ευνόητο ότι τελικό προϊόν της εφαρμογής της μεθόδου είναι η κατανομή των αντιστάσεων με το βάθος.

Περιορισμοί εφαρμογής της μεθόδου, προέρχονται από την αδυναμία των οργάνων να καταγράψουν τις μικρές και απότομες διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου.

Η μέθοδος αρχικά εφαρμόστηκε κυρίως για τη διερεύνηση βαθιών δομών και κυρίως δομών πετρελαίου ενώ χρησιμοποιήθηκε για υδρογεωλογικές μελέτες στα πλαίσια αναγνωριστικών μελετών σε μεγάλες και βαθιές ιζηματογενής λεκάνες.

2.1.3 Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μετρήσεις του δυναμικού που οφείλονται σε φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα, τα οποία παράγονται με ηλεκτροχημική δράση μεταξύ μεταλλευμάτων και διαλυμάτων που βρίσκονται σε επαφή είτε λόγω ροής του υπεδάφιου νερού. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ίσως τη παλαιότερη μέθοδο ηλεκτρικής διασκόπησης για την εύρεση μεταλλοφόρων κοιτασμάτων τα οποία βρίσκονται σε μικρά βάθη.

Στη περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου για τον εντοπισμό υδατικών πόρων απαιτείται η μέτρηση του δυναμικού που παράγεται από τη ροή των υγρών στοιχείων διαμέσου του πορώδους των

πετρωμάτων. Αυτή η ποσότητα αναφέρεται ως δυναμικό ροής και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό διαρροών σε δεξαμενές, σε δίκτυα ύδρευσης και άρδευσης.

Οι μετρήσιμες ποσότητες του φυσικού δυναμικού ή του δυναμικού ροής δεν ξεπερνούν τις μερικές εκατοντάδες μιλλιβόλτ (mV) ενώ η χρησιμοποιούμενη οργανολογία είναι πολύ απλή. Η ερμηνεία των μετρήσεων του φυσικού δυναμικού γίνεται κυρίως με ποιοτικές αλλά και με ποσοτικές μεθόδους ανάλογες με αυτές που εφαρμόζονται στη μαγνητική διασκόπηση, καθώς και στις δύο περιπτώσεις τα μεγέθη που μετριοούνται αφορούν φυσικά διπολικά δυναμικά πεδία.

2.1.4 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η μελέτη και εφαρμογή της μεθόδου ξεκίνησε από το 1912 έως το 1914 από το Dobrin (1960). Κατόπιν η μελέτη της μεθοδολογίας συνεχίστηκε από τον Conrad Schlumberger (1963) και παρουσίασε τη μεγαλύτερη πρόοδο και τη διάρκεια του 2ου παγκοσμίου πολέμου όπου πολλοί γάλλοι, ρώσοι και γερμανοί γεωφυσικοί τέθηκαν υπεύθυνοι σε ευρωπαϊκό επίπεδο για τη διερεύνηση των υπόγειων υδροφορέων.

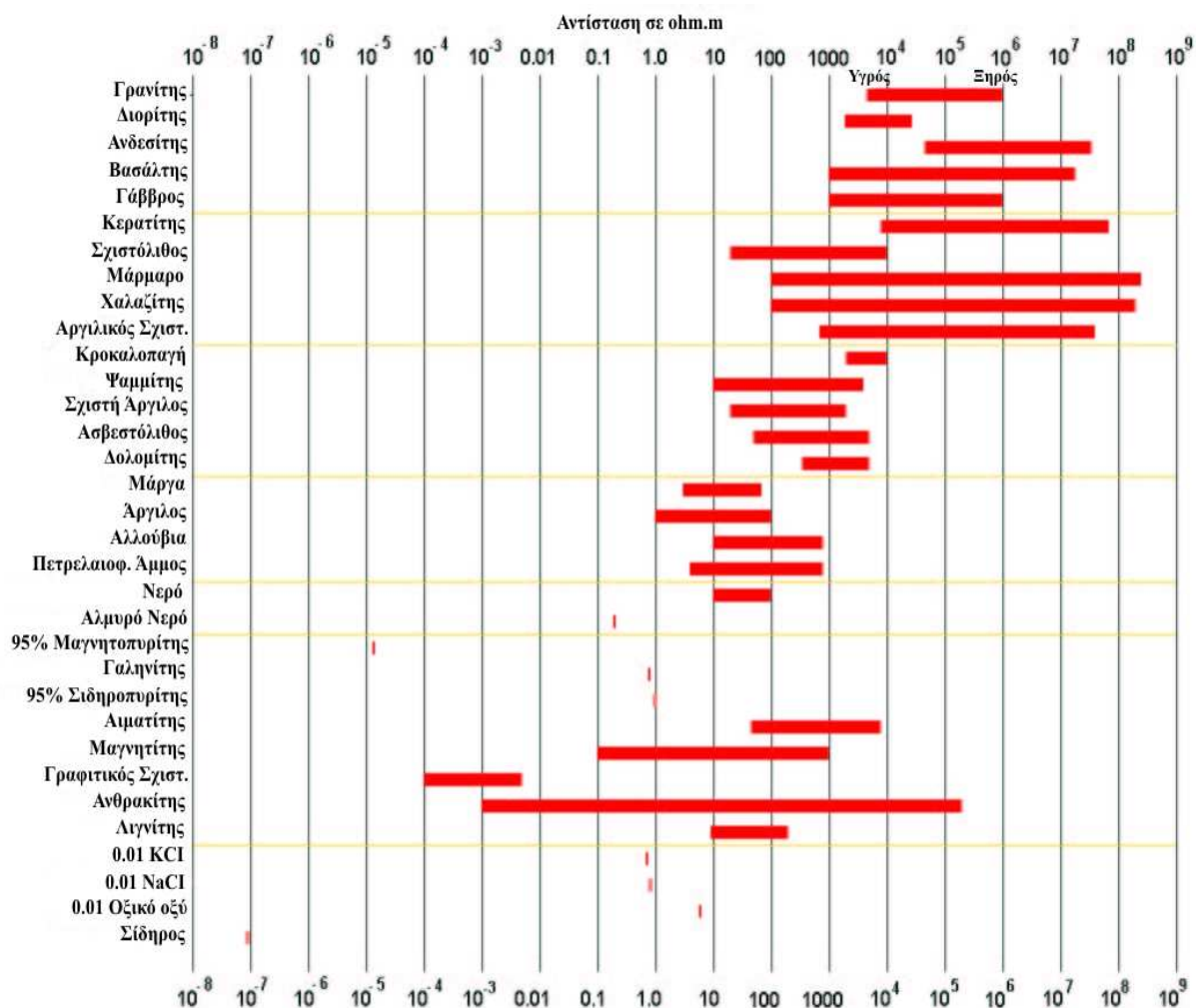
2.1.4.1 Ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων

Η αντίσταση ρ πετρωμάτων και ορυκτών παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση. Για παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί ότι η αντίσταση γραφιτικών πετρωμάτων είναι της τάξης των 10-6 ohm-m όταν η αντίσταση ξηρών χαλαζιτικών πετρωμάτων ξεπερνά τα 10¹² ohm-m. Πρέπει να σημειωθεί ότι καμιά άλλη φυσική ιδιότητα εδάφους ή πετρωμάτων δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη διακύμανση.

Στα περισσότερα πετρώματα το ρεύμα διέρχεται ηλεκτρολυτικά διαμέσου των υγρών των πόρων και η αντίσταση εξαρτάται περισσότερο από το πορώδες, την περιεκτικότητα σε νερό και τη ποιότητα αυτού παρά από τη δομή του πετρώματος. Παρόλα αυτά υπάρχουν πετρώματα όπως τα αργιλώδη – αργιλικά στα οποία το ρεύμα διέρχεται τόσο ηλεκτρονικά λόγω της δομής των πετρωμάτων όσο και ηλεκτρολυτικά. Η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους όπως είναι η ορυκτολογική σύσταση, το πορώδες, η θερμοκρασία καθώς και η γεωλογική ηλικία του πετρώματος.

Οι αντιστάσεις των πετρωμάτων είναι ενδεικτικές και όχι απόλυτες καθώς μπορεί σε μια περιοχή άμμος και κροκάλες κορεσμένες σε γλυκό νερό να παρουσιάζουν αντίσταση από 15 έως 40 ohm-m ενώ ο ίδιος σχηματισμός με τον ίδιο υδροφόρο σε άλλη γεωγραφική θέση να παρουσιάζουν αντιστάσεις από 100 έως 250 ohm-m. Είναι φανερό ότι ο γεωφυσικός πρέπει να είναι εξοικειωμένος με το φάσμα συχνοτήτων που απαντώνται στην εκάστοτε περιοχή μελέτης πριν αποφανθεί για τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

Στο παρακάτω σχήμα (6.4), δίνονται οι τιμές της αντίστασης διάφορων πετρωμάτων και χημικών στοιχείων (Keller and Frischknecht 1966, Daniels and Alberty 1966, Telford et al. 1990).



Σχήμα 6.4. Αντίσταση διάφορων πετρωμάτων και ορυκτών (Keller and Frischknecht 1966).

Τα μεταμορφωμένα και τα πυριγενή πετρώματα έχουν υψηλές τιμές αντίστασης. Η αντίσταση αυτών των πετρωμάτων εξαρτάται από το βαθμό ρωγμάτωσής τους και από το ποσοστό του νερού που περιέχουν στους πόρους τους. Τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία είναι συνήθως περισσότερο πορώδη και περιέχουν υψηλότερο ποσοστό νερού, έχουν χαμηλότερες αντιστάσεις.

2.1.4.2 Χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ρεύμα χαμηλής συχνότητας ($< 1\text{Hz}$) εισάγεται στο έδαφος διαμέσου δύο ηλεκτροδίων. Η διαφορά δυναμικού μετράται μεταξύ των άλλων δύο ηλεκτροδίων της διάταξης. Οι διατάξεις που συχνότερα χρησιμοποιούνται είναι,

A) Διάταξη Wenner, στην οποία τα τέσσερα ηλεκτρόδια A, B, M και N εγκαθίστανται στο έδαφος σε ευθεία γραμμή και είναι και ισαπέχοντα όπως φαίνεται στο σχήμα (6.5a). Στη περίπτωση αυτή η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση,

$$\rho_w = 2\pi \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

όπου παρατηρείται ότι η αντίσταση είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης a των ηλεκτροδίων μεταξύ τους.

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή για κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται σε σχέση με ορισμένο κέντρο με αύξηση της a κατά ορισμένη κάθε φορά απόσταση. Η διάταξη Wenner παρά τη γεωμετρική της απλότητα παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων κυρίως γιατί πρέπει να μετακινούμε όλα τα ηλεκτρόδια κατά την εκτέλεση μιας νέας μέτρησης.

Β) Διάταξη Schlumberger, στην οποία τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετούνται γραμμικά στο έδαφος ακολουθώντας την ίδια σειρά ηλεκτροδίων, AMNB, όπως και στη διάταξη Wenner αλλά με τη διαφορά ότι η απόσταση $AB \geq 5MN$ (σχήμα 6.5β). Αν ονομάσουμε την απόσταση $AB=2L$ και την $MN=2l$ τότε αποδεικνύεται ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\rho_s = \frac{\pi L^2}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger σε μια γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

Η μέθοδος Schlumberger εφαρμόζεται περισσότερο από όλες τις διατάξεις επειδή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως το ότι απαιτείται η μεταβολή της απόστασης μόνο των δύο ηλεκτροδίων κατά την εκτέλεση της βυθοσκόπησης. Επίσης, η χρησιμοποίηση σταθερού διπόλου τάσης περιορίζει τις ανεπιθύμητες επιδράσεις στις μετρήσεις που προκαλούνται από γεωλογικές πλευρικές ασυνέχειες.

Γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου, στην οποία τα τέσσερα ηλεκτρόδια δεν τοποθετούνται κατά ανάγκη στην ίδια ευθεία, όπως φαίνεται και στο σχήμα (6.5γ) αλλά η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, A και B, και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού, M και N είναι σημαντικά μικρότερη από την απόσταση r , μεταξύ των κέντρων των δύο διπόλων (σχήμα 6.5γ). Αποδεικνύεται ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\rho_d = 2\pi \cdot r \cdot (r+1) \cdot (r+2) \cdot l \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η απόσταση μεταξύ του διπόλου ρεύματος και του διπόλου δυναμικού μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και περιορίζεται μόνο από τον εδαφικό θόρυβο και από τη δυνατότητα των οργάνων να καταγράψουν την τάση και όχι από την απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων. Οι μετρήσεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής πραγματοποιούνται με αύξηση του r κατά βήματα.

Δ) Διάταξη Πόλου-πόλου. Η απλούστερη διάταξη είναι αυτή όπου ένα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος, B, και ένα από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού, N, είναι τοποθετημένα σε πολύ μεγάλη

απόσταση από τα άλλα δύο (A, M), έτσι ώστε να μπορέσει να θεωρηθεί ότι βρίσκονται στο άπειρο (σχήμα 6.5ε). Επομένως η φαινόμενη ειδική αντίσταση θα είναι,

$$\rho_a = 2\pi a$$

Εάν τα δύο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τα τοποθετήσουμε κοντά μεταξύ τους, τότε προκύπτει η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου (twin probe) (σχήμα 6.5στ), και η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

$$\rho_a = 2\pi \frac{ab}{a+b} \frac{\Delta V}{I}$$

όπου, a και b είναι οι αποστάσεις μεταξύ των A, M και B, N ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου $AM = BN = a$, η παραπάνω σχέση γίνεται,

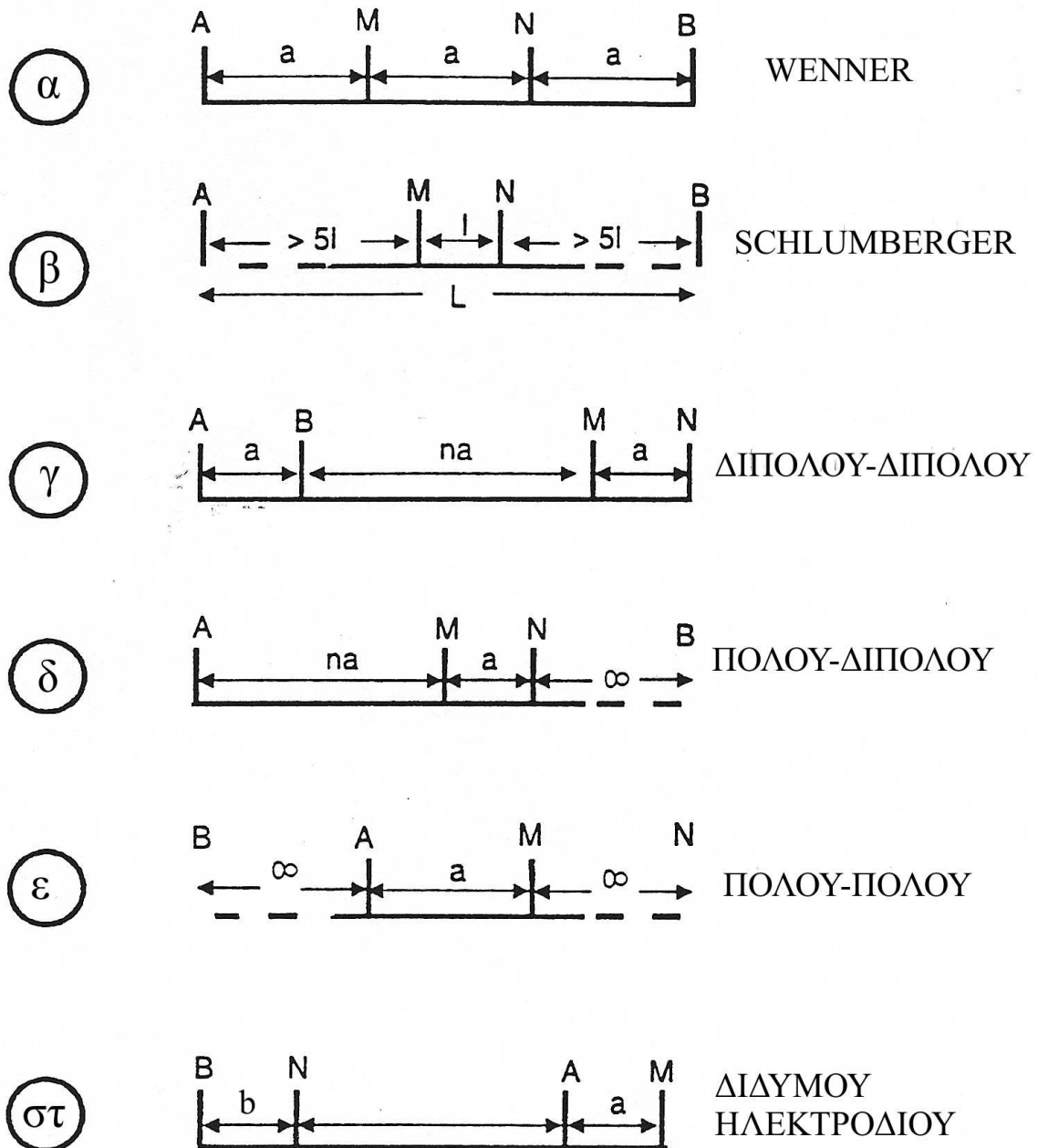
$$\rho_a = \pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Ε) Διάταξη Πόλου-διπόλου. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N, βρίσκονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος, A, B, ένα από τα οποία τοποθετείται στο άπειρο (σχήμα 6.5δ). Η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_a = 2\pi \frac{ab}{b-a}$$

Όταν η απόσταση b είναι πολλαπλάσια της απόστασης a ($b = na$), τότε η σχέση γίνεται

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

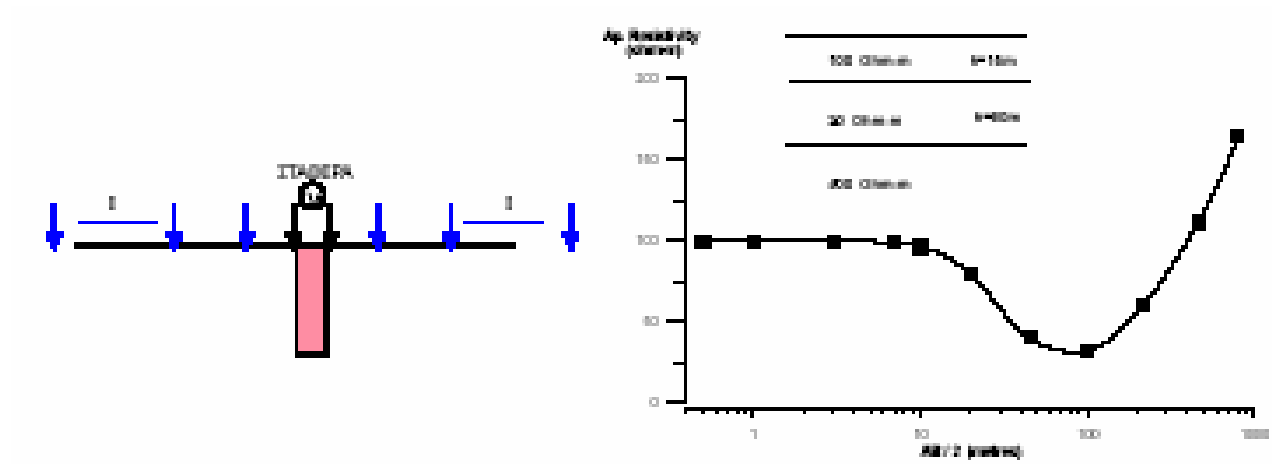


Σχήμα 2.5. Διάφορες διατάξεις: (α) Wenner (β) Schlumberger (γ) διπόλου-διπόλου (δ) πόλου-διπόλου (ε) πόλου-πόλου (στ) διδύμου ηλεκτροδίου (Διαμαντή, 2002).

2.1.4.3 Μέθοδοι έρευνας

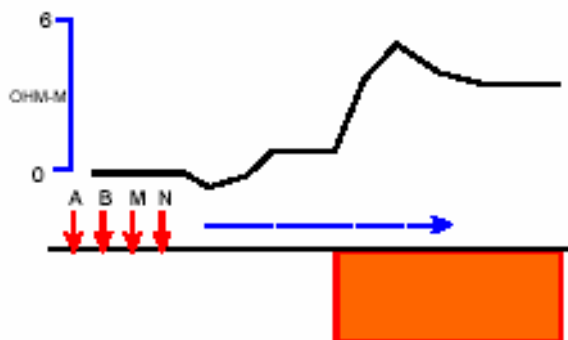
Βυθοσκόπηση (Sounding). Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε συνάρτηση με το βάθος. Το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και με την συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διεύθυνσης του ρεύματος και διαρρέονται βαθύτεροι σχηματισμοί. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η διάταξη Schlumberger. Έτσι, μετράται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής

ηλεκτρικής αντίστασης στο κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων. Η ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων γίνεται θεωρώντας ύπαρξη οριζόντιων στρωμάτων για αυτό και εφαρμόζεται κυρίως σε ιζηματογενείς λεκάνες (μονοδιάστατη γεωηλεκτρική δομή) (σχήμα 6.6). Κλασικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών.

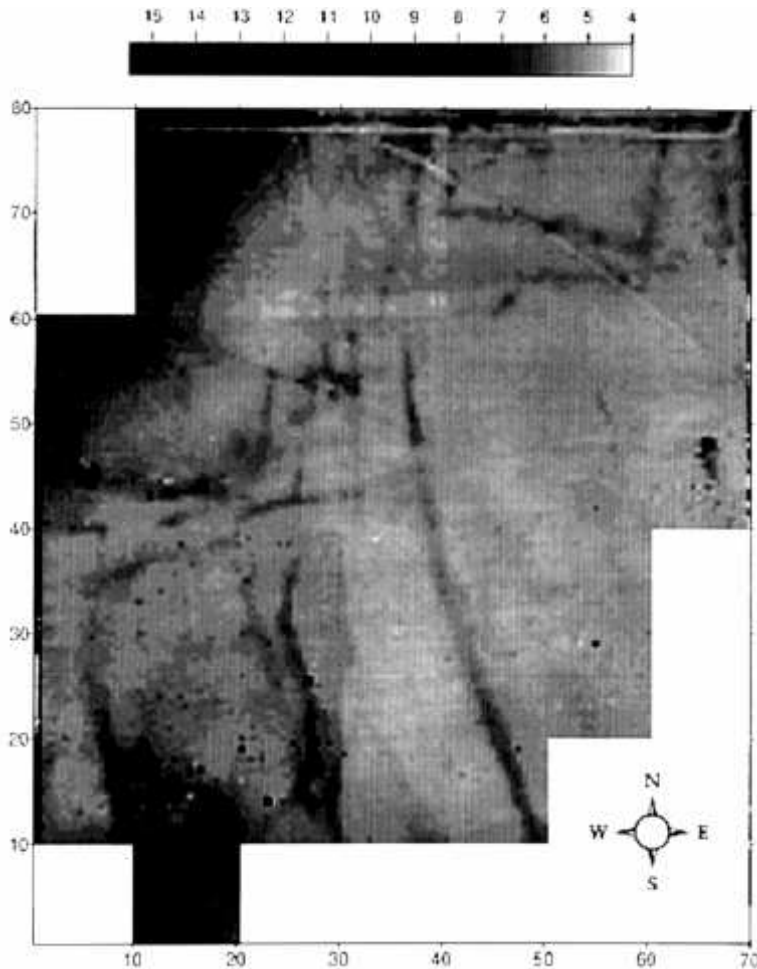


Σχήμα 6.6. Δεδομένα βυθοσκόπησης με διάταξη Schlumberger για ένα μοντέλο τριών στρωμάτων (Διαμαντή, 2002).

Όδευση (Profiling). Χρησιμοποιείται για να εντοπίζει πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό βήμα. Έτσι, χαρτογραφούνται οι μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος κατά μήκος μιας όδευσης και εντοπίζονται δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Στη γεωλογία χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρηγμάτων, φακών άμμου ή χαλικιών, επαφών, κενών κ.α. (σχήμα 6.7), ενώ η χρήση της είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη στην αρχαιομετρία (σχήμα 6.8).

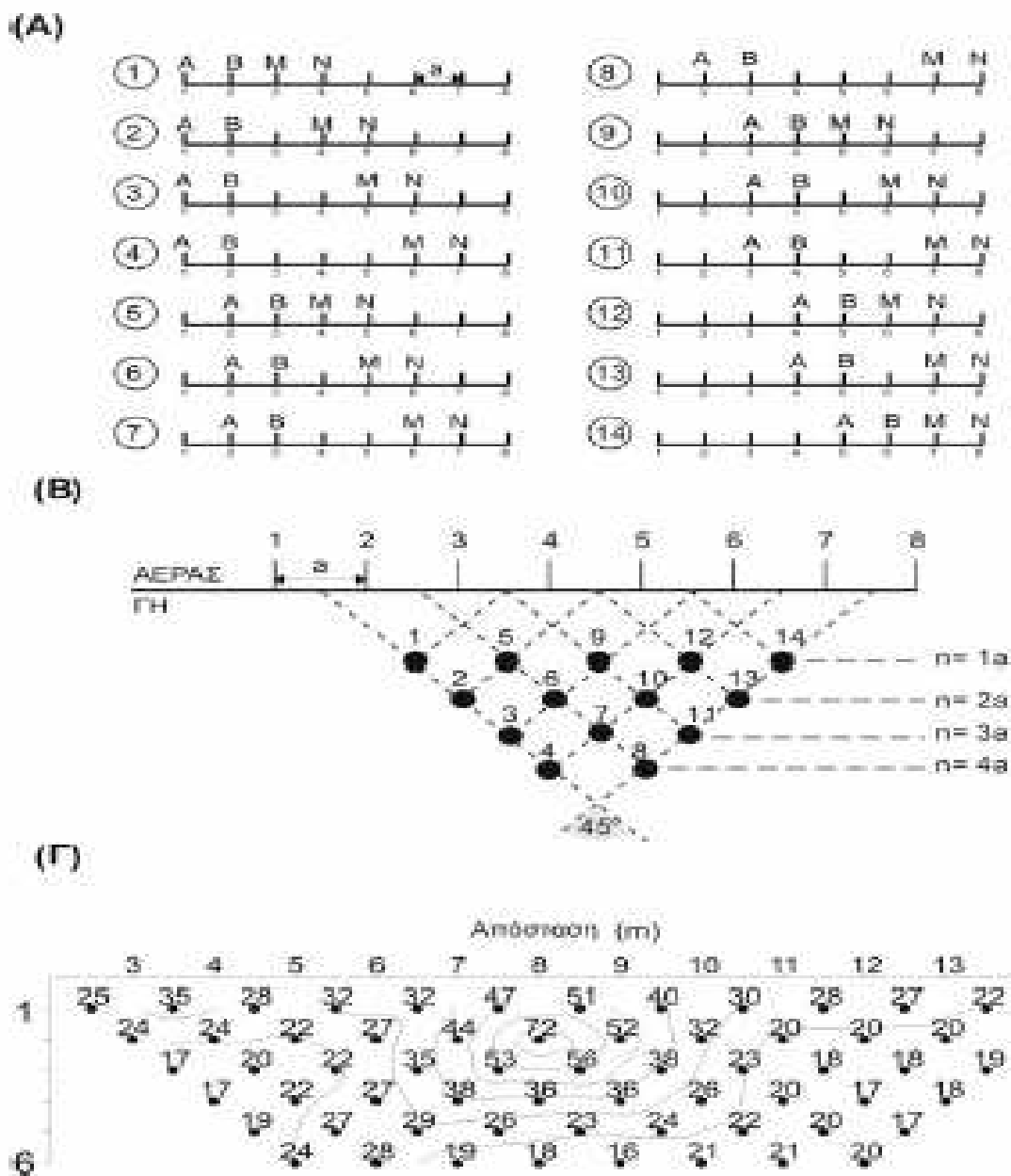


Σχήμα 6.7. Οριζοντιογραφία στον εντοπισμό ρήγματος (Διαμαντή, 2002).



Σχήμα 6.8. Οριζόντια κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή του ιερού της Εύκλειας στην ευρύτερη περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Βεργίνας. Παρατηρούνται διάφορα γραμμικά στοιχεία που αποτελούν ίχνη θεμελίων (Tsokas et al., 1999).

Δισδιάστατη διασκόπηση (Συνδυασμός sounding και profiling). Με την ηλεκτρική τομογραφία, (συνδυασμός όδευσης και βυθοσκόπησης), είναι δυνατό να πάρουμε πληροφορίες τόσο για την πλευρική όσο και για την σε βάθος μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό γίνεται για παράδειγμα, με διαδοχικές οδεύσεις πάνω από την περιοχή μελέτης, με συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων. Με τον τρόπο αυτό παίρνουμε μια δισδιάστατη εικόνα της ερευνηθείσας περιοχής. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνικές, η ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων, επομένως αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και η ανάλυση της ηλεκτρικής μεθόδου. Παράδειγμα εφαρμογής της δισδιάστατης διασκόπησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου, φαίνεται στο σχήμα (6.9) (Tsourlos 1995).



Σχήμα 6.9. Δυσδιάστατη διασκόπηση με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου (α) Τρόπος διάταξης ηλεκτροδίων κατά τη συλλογή των δεδομένων με 8 ηλεκτρόδια και μέγιστο $n=4$ (β) Τρόπος τοποθέτηση των μετρήσεων κατά την απεικόνιση με τη μέθοδο της ψευδοτομής (γ) Ψευδοτομή δεδομένων από τον αρχαιολογικό χώρο της Ευρωπού (Tsourlos 1995).

2.1.4.4 Επιλογή διάταξης

Ένα σημαντικό πρόβλημα πριν την διεξαγωγή μιας γεωφυσικής έρευνας, είναι η επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων η οποία θα χρησιμοποιηθεί. Παραπάνω περιγράφηκαν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας διάταξης είναι η ευαισθησία της διάταξης σε σχέση με τις κατά βάθος και οριζόντιες αλλαγές της αντίστασης του υπεδάφους (ανάλυση

σε κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές αντίστοιχα), και ο λόγος σήματος προς θόρυβο, δηλαδή το μέγιστο βάθος μέχρι το οποίο μπορεί να ανιχνευθεί μια ανωμαλία.

Ο Ward (1989) αξιολόγησε τις διάφορες διατάξεις και τα πιο σημαντικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα (6.2). Από τον πίνακα αυτό φαίνεται πως η διάταξη διπόλου-διπόλου, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των γεωηλεκτρικών δεδομένων στην παρούσα εργασία, έχει μια ικανοποιητική ανάλυση στις κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές της αντίστασης. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο φαίνεται πως έχει την μικρότερη τιμή για τη διάταξη αυτή, με την κατάλληλη επιλογή όμως των παραμέτρων διασκόπησης, η διάταξη αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Πίνακας 6.2. Αξιολόγηση διατάξεων (Ward 1989).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΛΟΓΟΣ S/N	ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ
Wenner	1	5	1
Schlumberger	2	4	1
Διπόλου-διπόλου	5	2	2
Πόλου-διπόλου	4	3	2
	1:καλύτερη	5:χειρότερη	

2.1.4.5 Περιορισμοί εφαρμοσιμότητας ηλεκτρικής διασκόπησης

Η ερμηνεία μιας γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης σε μια ιζηματογενής λεκάνη με πλήθος στρωμάτων δεν είναι μοναδική. Αυτό σημαίνει ότι μια καμπύλη γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης μπορεί να προκύψει από διαφορετικούς συνδυασμούς πάχους στρωμάτων και αντιστάσεων αυτών.

Επίσης πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι μια γεωλογική στήλη όπως αυτή θα προκύψει από μια γεώτρηση στη περιοχή έρευνας, θα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις από τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση που θα πραγματοποιηθεί στην ίδια περιοχή ως προς τα όρια των γεωλογικών και γεωηλεκτρικών σχηματισμών. Έτσι, μπορεί τα γεωηλεκτρικά όρια που διαχωρίζουν ενότητες με διαφορετικές αντιστάσεις να μη βρίσκονται σε συμφωνία με τα γεωλογικά όρια τα οποία διαχωρίζουν στρώματα διαφορετικής ηλικίας και λιθολογικής σύστασης. Για παράδειγμα, εάν ένας υδροφόρος ορίζοντας ο οποίος βρίσκεται εντός ενός ομογενούς σχηματισμού, παρουσιάζει διαφορετική υφαλμύρωση με το βάθος, τότε οι διάφορες γεωηλεκτρικές ενότητες οι οποίες θα αποδοθούν κατά την γεωηλεκτρική ερμηνεία δεν αντιστοιχούν με τη μία γεωλογική ενότητα.

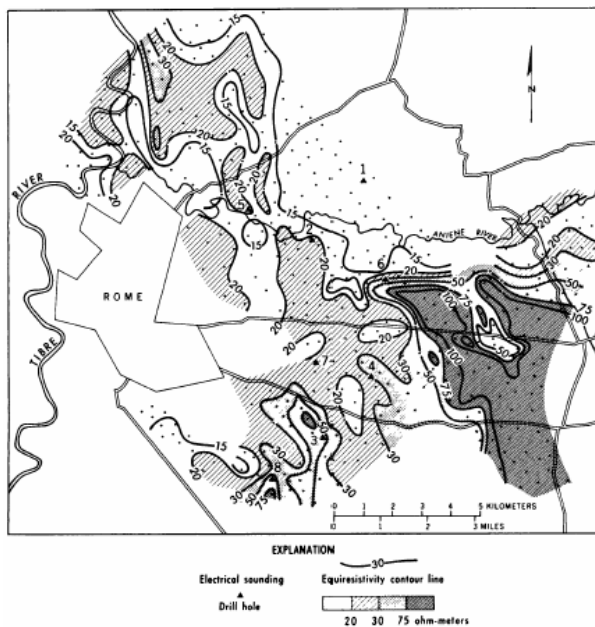
2.1.4.6 Ποιοτική ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης

Η ποιοτική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων περιλαμβάνει τα εξής:

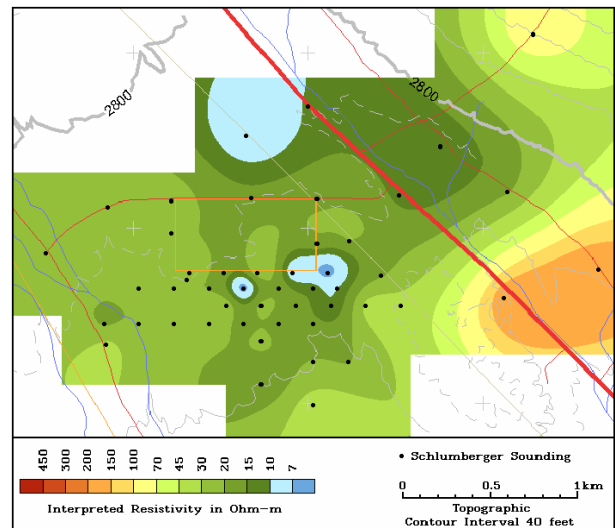
Μελέτη και ερμηνεία των καμπύλων των βυθοσκοπήσεων με βάση όλα τα διαθέσιμα στοιχεία της περιοχής έρευνας όπως, μητρώα γεωτρήσεων, στάθμες υδροφορέα, δεδομένα από γεωτεχνικές έρευνες στη περιοχή ενδιαφέροντος. Τοποθέτηση σε χάρτη όλων των διαθέσιμων πληροφοριών και των θέσεων των βυθοσκοπήσεων με την ερμηνεία τους.

Προετοιμασία χαρτών της χωρικής κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τη παρουσίαση των μετρήσεων της αντίστασης υπό μορφή ισοκαμπύλων (σχήμα 6.10 & 6.11).

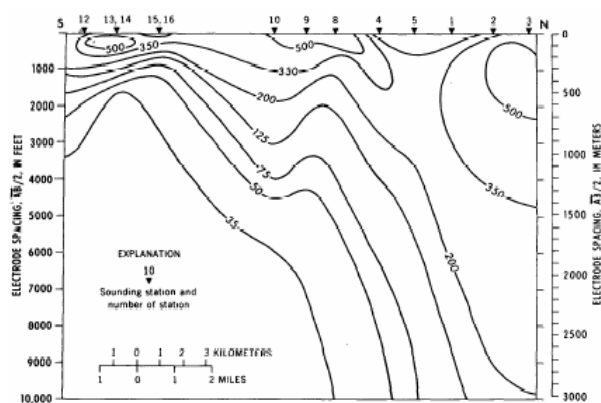
Παρουσίαση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε τομές. Για τη κατασκευή αυτών των χαρτών απαιτείται η χαρτογράφηση της ερμηνείας της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης και είτε ο απλός συσχετισμός των γεωηλεκτρικών ενοτήτων μεταξύ τους, είτε η γραμμική παρεμβολή στο επίπεδο του χάρτη από τις τιμές των αντιστάσεων των βυθοσκοπήσεων και τη δημιουργία των ισοκαμπύλων ίσης αντίστασης με το βάθος (σχήμα 6.12 & 6.13).



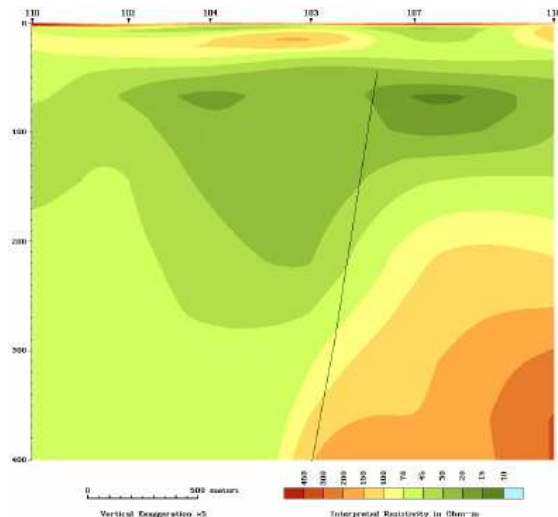
Σχήμα 6.10. Χάρτης οριζόντιας κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 6.11. Οριζόντια κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 97 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους (Bisdorf, 2002).



Σχήμα 6.12. Κατακόρυφη τομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης σε περιοχή πλησίον κοίτης ποταμού. Παρατηρείται ότι το υπόβαθρο της περιοχής παρουσιάζει μια πάχυνση προς το βορρά.



Σχήμα 6.13. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κατακόρυφη τομή. Με τρίγωνα παριστάνονται οι θέσεις στις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις Schlumberger (Bisdorf, 2002).

2.1.4.7 Προβλήματα και τρόποι επίλυσης κατά την ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης

Οι γεωηλεκτρικές καμπύλες μπορεί να παρουσιάζουν διάφορες "ανωμαλίες" λόγω της πλευρικής ανομοιογένειας του εδάφους, λόγω σφαλμάτων στις μετρήσεις ή λόγω σφαλμάτων του καταγραφικού οργάνου. Είναι πολύ σημαντικό να εντοπίζονται τα σφάλματα και να ερμηνεύονται ανάλογα. Κατά τη χαρτογράφηση των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το «άνοιγμα» των ηλεκτροδίων ρεύματος ($AB/2$) σε διλογαριθμικό χαρτί, παρουσιάζονται συνήθως τρεις διαφορετικού τύπου ανωμαλίες. Αυτές οι ανωμαλίες είναι οι,

A) Παρουσία μιας οξύληκτης άκρης στη καμπύλη συνήθως προέρχεται από πλευρικές εδαφικές ανομοιογένειες των σχηματισμών της περιοχής έρευνας, από διαρροή ρεύματος λόγω κακής μόνωσης των καλωδίων ρεύματος, λόγω σφαλμάτων στις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ή λόγω σφαλμάτων στους αριθμητικούς υπολογισμούς. Προτείνεται να χαρτογραφούνται οι τιμές των αντιστάσεων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των μετρήσεων διότι για παράδειγμα ένα επιφανειακό στρώμα χαλίκων ή ένας φακός άμμου μπορεί να αναγνωριστεί από την εμφάνιση των οξύληκτων άκρων όπως φαίνεται στο σχήμα (6.14).

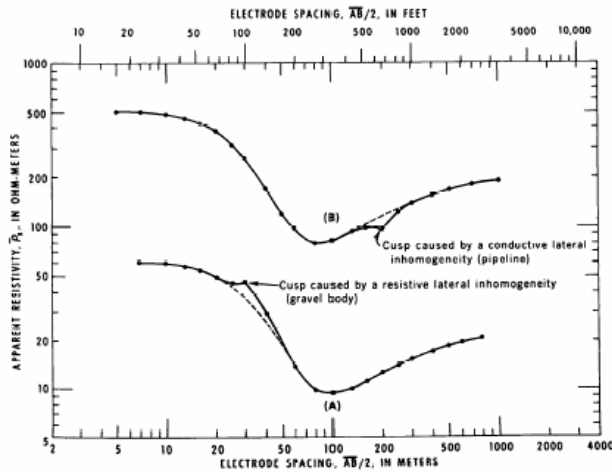
B) Ασυνέχειες στην καμπύλη γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους μπορεί να παρουσιαστεί ασυνέχεια στη καμπύλη των φαινόμενων αντιστάσεων. Έτσι, ασυνέχειες μπορεί να προέρχονται,

B1) λόγω αύξησης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού ($MN/2$) διατηρώντας τα ηλεκτρόδια ρεύματος ($AB/2$) σταθερά. Αν την επόμενη φορά που γίνει αλλαγή στα ηλεκτρόδια δυναμικού αυτή

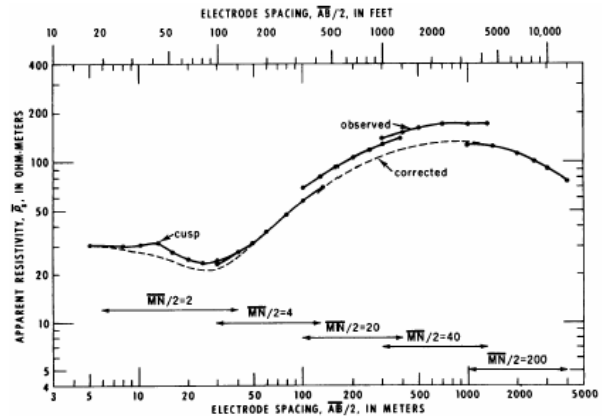
συνοδευτεί από ασυνέχεια στη καμπύλη, τότε αυτό αποτελεί ένδειξη πλευρικής ανομοιογένειας μεγάλων διαστάσεων.

B2) λόγω διαρροής ρεύματος ή λόγω σφαλμάτων στις αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

Παραδείγματα τέτοιων ασυνεχειών οι οποίες δεν βρίσκονται σε συμφωνία μια οριζόντια στρωματομένη ομογενής Γη, παρουσιάζονται στο σχήμα (6.14). Στην περίπτωση κατά την οποία οι ασυνέχειες δεν είναι πολύ έντονες μπορούν να υποστούν κάποια διόρθωση όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα (6.15), δηλαδή, γίνεται μεταφορά των κλάδων στις θέσεις όπου θα έπρεπε να βρίσκονταν.

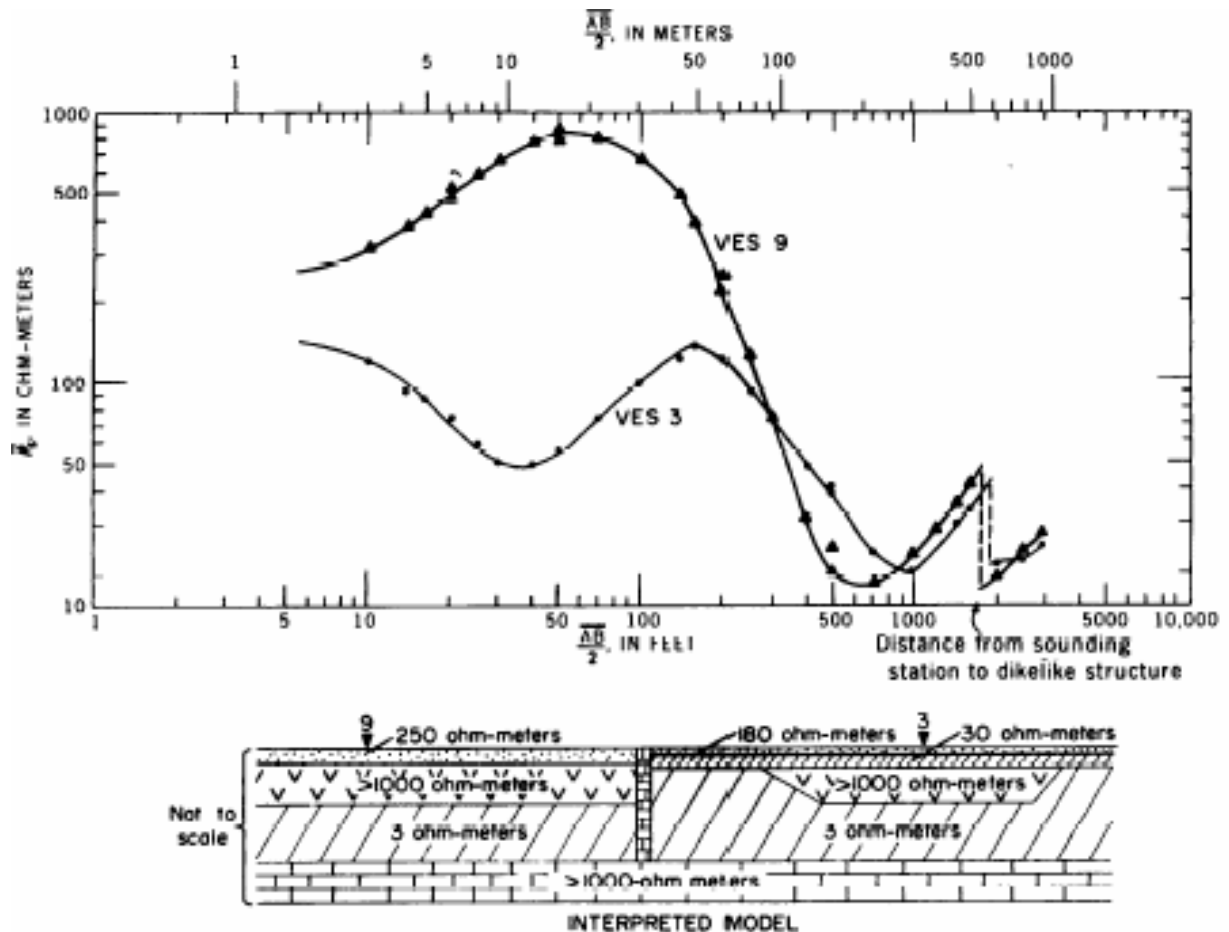


Σχήμα 6.14. Παραμόρφωση των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης λόγω πλευρικών εδαφικών ανομοιογενειών.



Σχήμα 6.15. Παράδειγμα μιας καμπύλης με «θορύβους» και η διαδικασία διόρθωσης αυτής.

B3) Η τελευταία περίπτωση κατά την οποία παρουσιάζεται ασυνέχεια στη καμπύλη (απότομη πτώση της καμπύλης) οφείλεται στη παρουσία μιας κατακόρυφης ανομοιογένειας. Συγκεκριμένα, αν κατά την εκτέλεση της μέτρησης και τη χαρτογράφηση των αντιστάσεων με την παράλληλη αύξηση της απόστασης $AB/2$, παρουσιαστεί μια απότομη μετάπτωση της καμπύλης των αντιστάσεων (σχήμα 6.16) αυτό μπορεί να ερμηνευτεί μόνο με τη παρουσία μιας στενής και ρηχής κατακόρυφης φλέβας η οποία ως περισσότερο αντιστατική με το περιβάλλον πέτρωμα, οδηγεί σε αυτό το αποτέλεσμα (σχήμα 6.16). Η τετμημένη στην οποία παρουσιάστηκε η ασυνέχεια κατά τη χαρτογράφηση της καμπύλης των αντιστάσεων, μας προσδιορίζει και την απόσταση της δομής (φλέβας) από το κέντρο της διάταξης.



Σχήμα 6.16. Παράδειγμα παρουσίας ασυνεχειών σε καμπύλη γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης με τη μέθοδο Schlumberger, που προέρχονται από κατακόρυφη δομή υπό μορφή φλέβας.

2.1.4.8 Εφαρμογές της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό υδατικών πόρων

Κατά τη διεξαγωγή έρευνας σε περιοχές όπου αντιμετωπίζονται υδρογεωλογικά προβλήματα, η πιο συχνά προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι άλλες μέθοδοι, όπως σεισμικά, μαγνητικά ή βαρυτικά, αδυνατούν να αναγνωρίσουν χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Για παράδειγμα στη περίπτωση όπου ζητείται ο εντοπισμός του βάθους της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού – αλμυρού νερού, μόνο οι ηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες. Ένα παχύ στρώμα αργίλου το οποίο διαχωρίζει δύο υδροφορείς, μπορεί με ευκολία να εντοπιστεί με τη χρήση ηλεκτρικών μεθόδων, ενώ με την εφαρμογή σεισμικών μεθόδων διασκόπησης το στρώμα αυτό αποτελεί στρώμα χαμηλής ταχύτητας που θα οδηγήσει σε εσφαλμένο προσδιορισμό του βάθους του στρώματος.

2.1.4.9 Εντοπισμός υπόγειων διόδων νερού (παλαιοκοίτες)

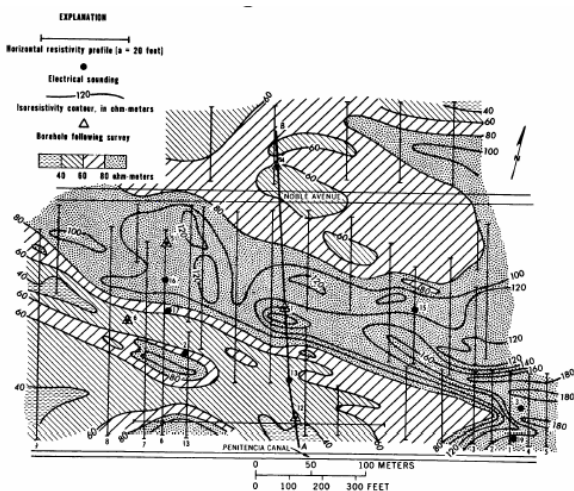
Μια από τις πιο επιτυχημένες μεθόδους εντοπισμού υπόγειων διόδων νερού είναι η ηλεκτρική

μέθοδος διασκόπησης υπό τη μορφή γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και ηλεκτρικής χαρτογράφησης του χώρου μελέτης.

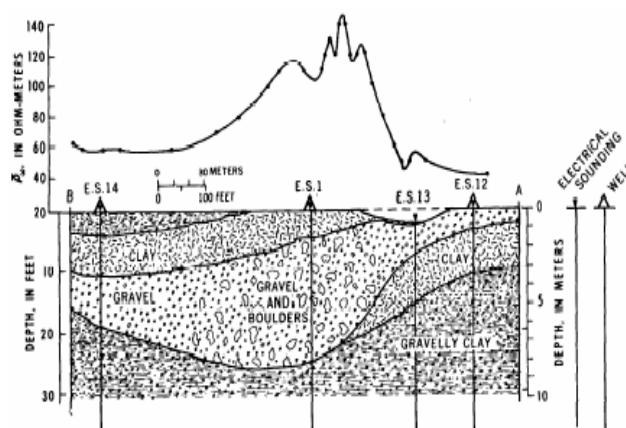
Στην περιοχή του San Hose στη California εφαρμόστηκαν όλες οι δυνατές μέθοδοι-διατάξεις ηλεκτρικών διασκοπήσεων με σκοπό τον εντοπισμό ενός ρηχού υδροφορέα και την εκμετάλλευσή του με υδρογεωτρήσεις. Έτσι στη περιοχή ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμένες μέθοδοι ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και οριζόντιας χαρτογράφησης των αντιστάσεων τόσο με την διάταξη Schlumberger όσο και με τη Wenner. Σε μερικές θέσεις εφαρμόστηκε και η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας.

Στη περιοχή του Penitencia εντοπίστηκε μια υπόγεια κοίτη εκτελώντας μερικές ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις οι οποίες παρουσίαζαν κάποιο θόρυβο λόγω έντονων πλευρικών ανομοιογενειών. Στην ίδια περιοχή εκτελέστηκαν επικουρικά και μετρήσεις οριζόντιας ηλεκτρικής χαρτογράφησης με τη διάταξη Wenner και με απόσταση ηλεκτροδίων $a=6.1$ μέτρα. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάστηκαν σε χάρτη με τη μορφή ισοκαμπύλων αντίστασης (σχήμα 6.17).

Στο σχήμα (6.18) παρουσιάζεται η γεωλογική τομή όπως αυτή προέκυψε από την παράλληλη ερμηνεία των τεσσάρων βυθοσκοπήσεων που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και επιπλέον στοιχεία που προήλθαν από μεταγενέστερη της μελέτης, γεώτρηση.



Σχήμα 6.17. Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή Penitencia στη California



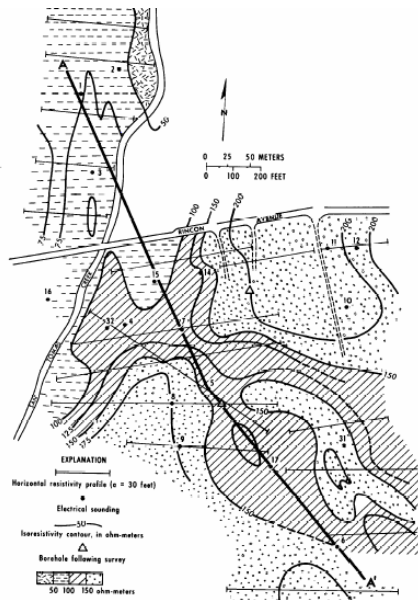
Σχήμα 6.18. Γεωλογική τομή της περιοχής έρευνας όπως υπολογίστηκε από την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων.

Στην περιοχή Campbell στη California εκτελέστηκε μελέτη με εφαρμογή της οριζόντιας χαρτογράφησης των αντιστάσεων, εφαρμόζοντας τη διάταξη Wenner με απόσταση ηλεκτροδίων $a=10$ μέτρα (σχήμα 6.19). Στο χάρτη εμφανίζεται μια ρηχή αντιστατική ζώνη χωρίς όμως να είναι τόσο ευδιάκριτη όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο παράδειγμα.

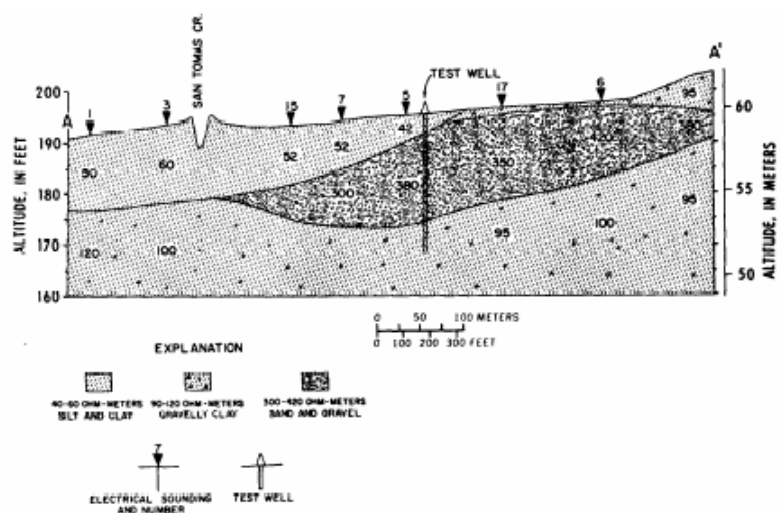
Στο σχήμα (6.20) παρουσιάζεται η γεωλογική τομή όπως αυτή προήλθε από το συσχετισμό των βυθοσκοπήσεων μεταξύ τους. Επίσης, εκτελέστηκε μια γεώτρηση η οποία απλά επιβεβαίωσε την

ακρίβεια στην ερμηνεία της ηλεκτρικής διασκόπησης και τη συμφωνία των γεωηλεκτρικών ενοτήτων με τις παρατηρούμενες γεωλογικές ενότητες.

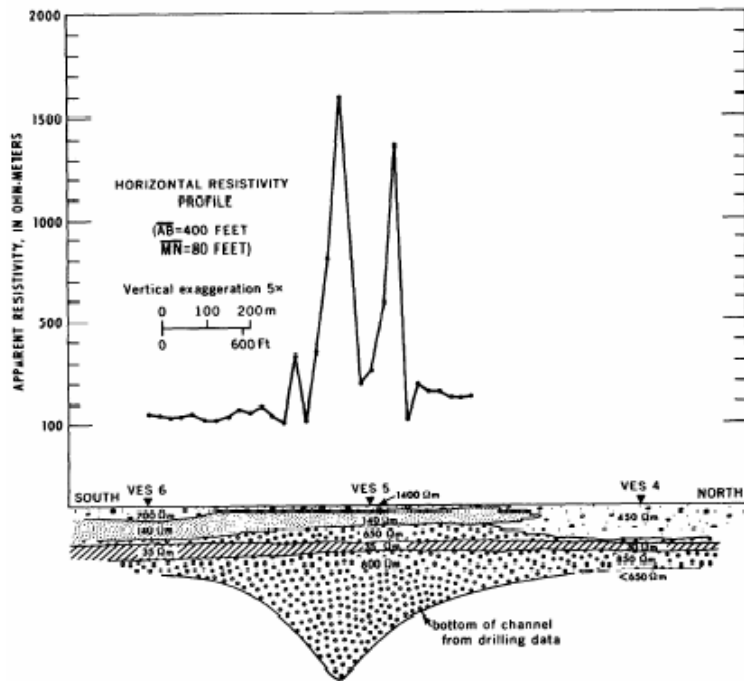
Σε μια παρόμοια περίπτωση με την εκτέλεση γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και οριζόντιας χαρτογράφησης με τη μέθοδο Schlumberger εντοπίστηκε υπόγεια κοίτη ποταμού η οποία και επιβεβαιώθηκε με στοιχεία γεωτρήσεων (σχήμα 6.21).



Σχήμα 6.19. Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή Campbell, όπως μετρήθηκε με την εφαρμογή της διάταξης Wenner.

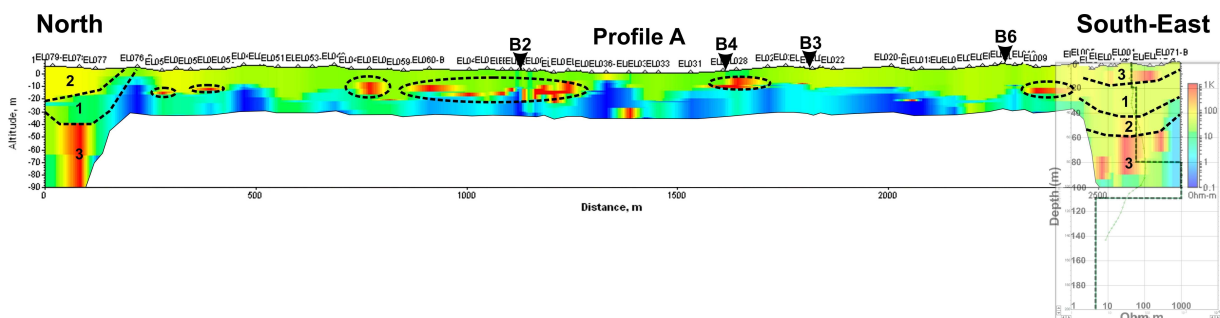


Σχήμα 6.20. Γεωλογική τομή και προφίλ αντιστάσεων για τη περιοχή έρευνας (Campbell – California).



Σχήμα 6.21. Γεωλογική τομή και προφίλ αντιστάσεων για τη περιοχή έρευνας (Salisbury – California).

Στο σχήμα (6.22) παρουσιάζεται μια υψηλής διακριτικής ικανότητας σε μικρά βάθη, εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων με σκοπό τον εντοπισμό παλαιοκοίτων και χαρακτηριστικών πλημμυρικών αποθέσεων στη περιοχή της Αρχαίας Ελίκης. Παρατηρείται ότι στις περιοχές εντός των διακεκομμένων ελλείψεων, εμφανίζονται συγκεντρώσεις υλικών υψηλής αντίστασης (κροκάλες και χαλίκια), η παρουσία των οποίων επιβεβαιώθηκε από γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν στις θέσεις B2, B4, B3 και B6.



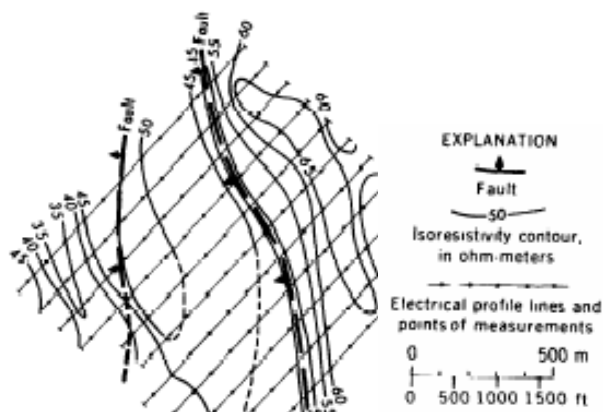
Σχήμα 6.22. Διδιάστατο μοντέλο κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος στη περιοχή της Αρχαίας Ελίκης με σκοπό τον εντοπισμό πλημμυρικών αποθέσεων (Koutsios et al. 2010).

2.1.4.10 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων

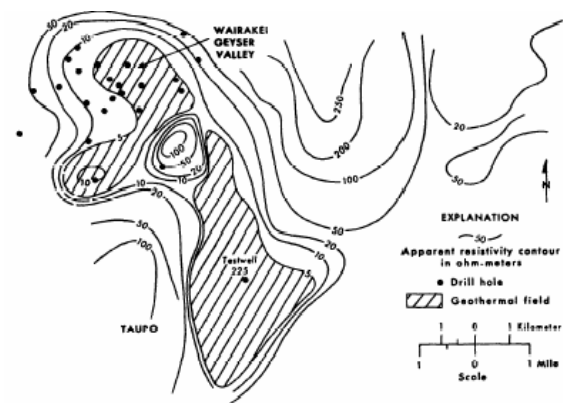
Οι μέθοδοι ηλεκτρικής διασκόπησης εφαρμόζονται με επιτυχία και στη περίπτωση εντοπισμού και οργάνωσης εκμετάλλευσης γεωθερμικών πεδίων. Στη Γερμανία εκτελέστηκαν ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και οριζόντια ηλεκτρική χαρτογράφηση με σκοπό τον εντοπισμό του

ρήγματος μέσω του οποίου γίνεται η κίνηση των γεωθερμικών υγρών για την εκμετάλλευση του πεδίου. Στο σχήμα (6.23) παρουσιάζεται χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όπως προέκυψε από την ερμηνεία οριζόντιας χαρτογράφησης με τη διάταξη Schlumberger και άνοιγμα ηλεκτροδίων 4000 μέτρα σε καθορισμένο κάρναβο. Με βάση το χάρτη που παρουσιάστηκε χαρτογραφήθηκαν τα δύο ρήγματα της περιοχής.

Στη Ν. Ζηλανδία εφαρμόστηκε επιτυχώς η διάταξη Wenner εκτελώντας τόσο γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις όσο και οριζόντια χαρτογράφηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε περιοχή εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου. Στο σχήμα (6.24) χαρτογραφήθηκε η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τη μέθοδο Wenner και απόσταση ηλεκτροδίων $a=550$ μέτρα. Οι δύο περιοχές χαμηλής αντίστασης (≤ 5 ohm-m) ορίζει και τις περιοχές αυξημένης θερμοβαθμίδας. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την δοκιμαστική γεώτρηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια εκμετάλλευσης του πεδίου.



Σχήμα 6.23. Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για έρευνα σε γεωθερμικό πεδίο της Γερμανίας.

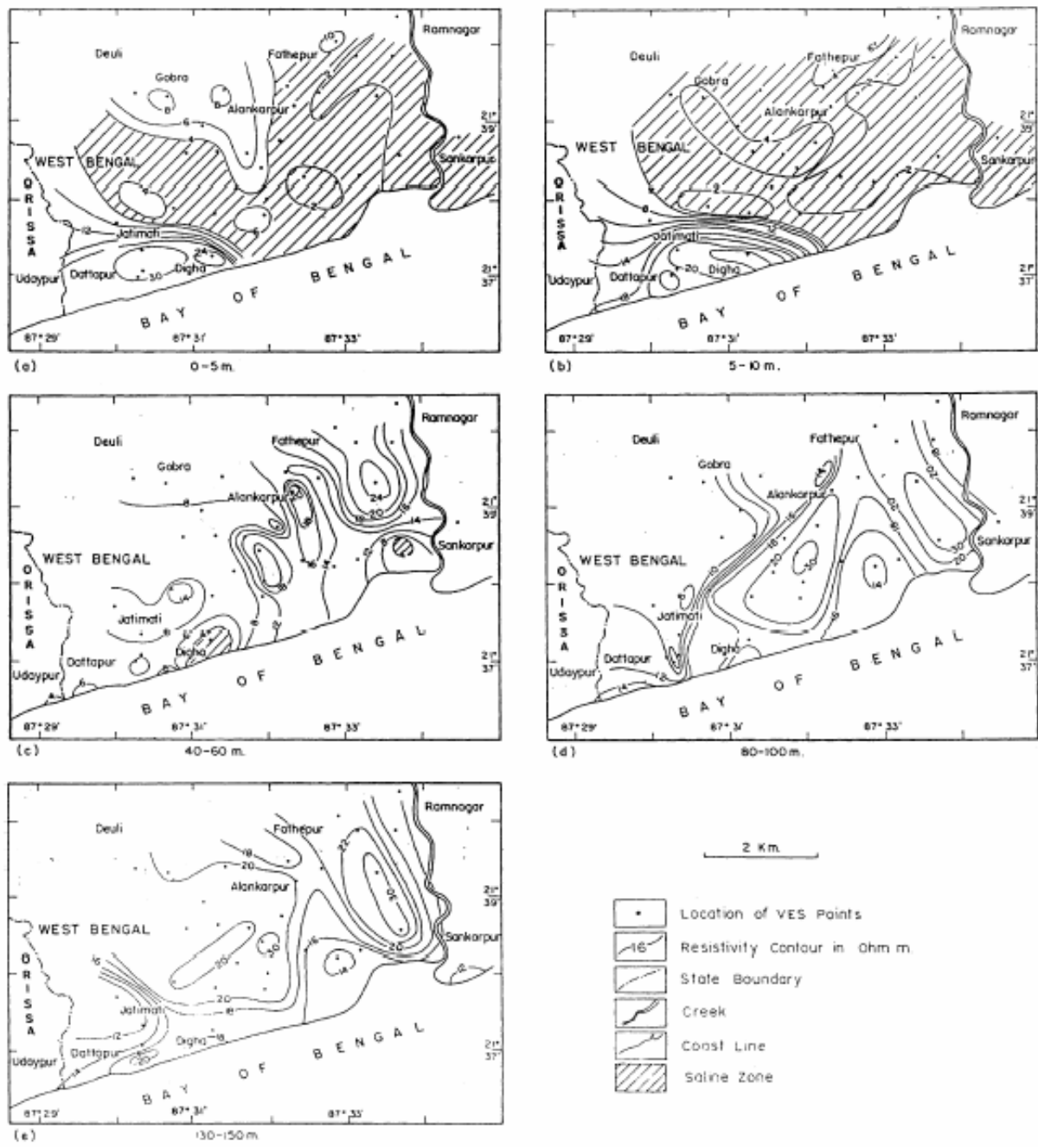


Σχήμα 6.24. Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε περιοχή γεωθερμικού πεδίου στη Ν. Ζηλανδία.

2.1.4.11 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στη χαρτογράφηση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού υδροφόρου ορίζοντα

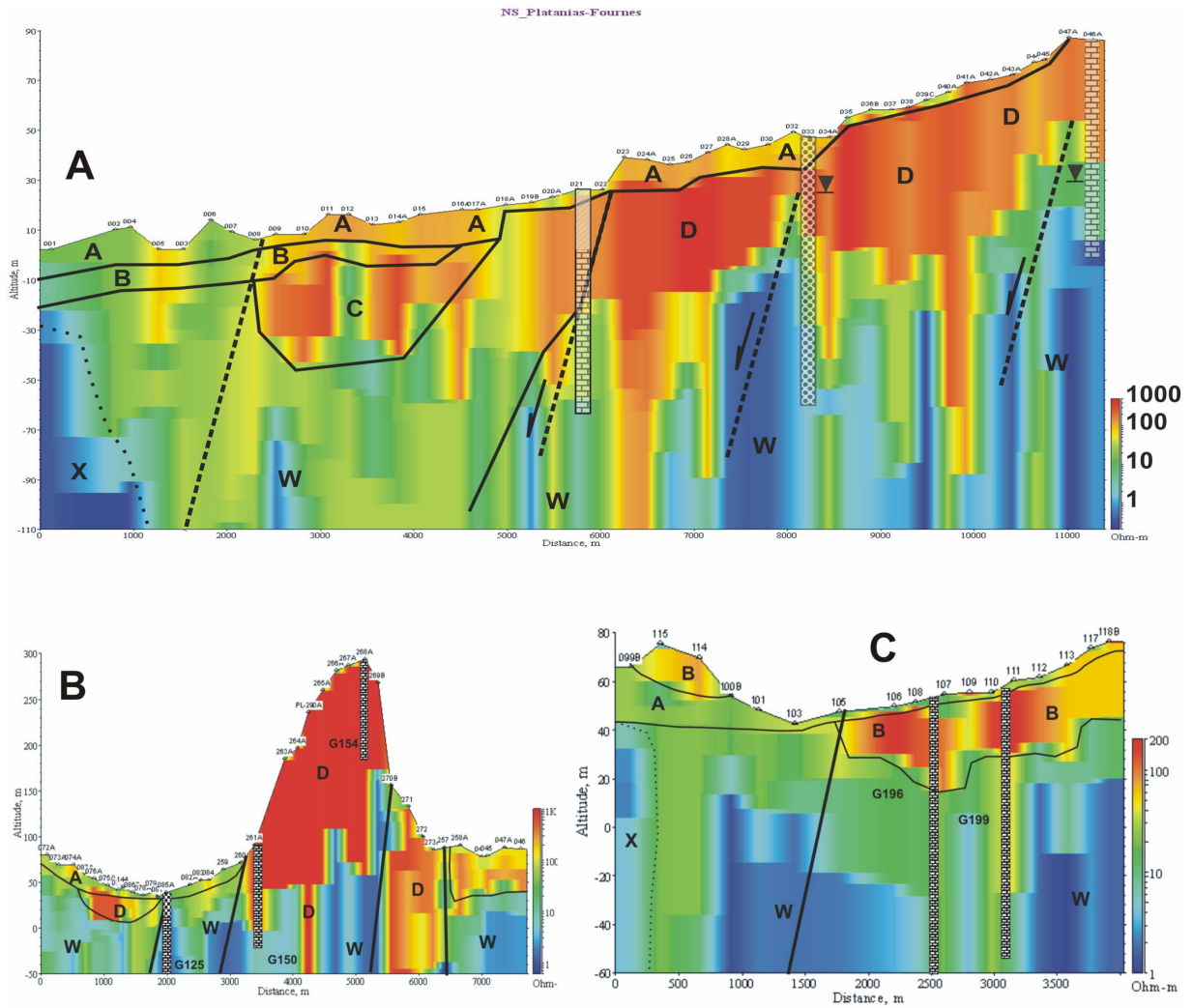
Με σκοπό τον εντοπισμό της ύπαρξης υφάλμυρου ορίζοντα σε περιοχή εκμετάλλευσης με γεωτρήσεις υπόγειου υδροφορέα (west Bengal – India) εκτελέστηκαν πλήθος βυθοσκοπήσεων με στόχο αφενός τη χωρική παρακολούθηση του υφάλμυρου υδροφορέα και αφετέρου τις προτάσεις για την ορθολογικότερη εκμετάλλευση των προϋπαρχόντων γεωτρήσεων.

Έτσι εκτελέστηκαν 45 βυθοσκοπήσεις μέχρι το βάθος των 250 μέτρων και τα αποτελέσματα αυτών εμφανίζονται στο σχήμα (6.25) όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των αντιστάσεων για διάφορα βάθη.



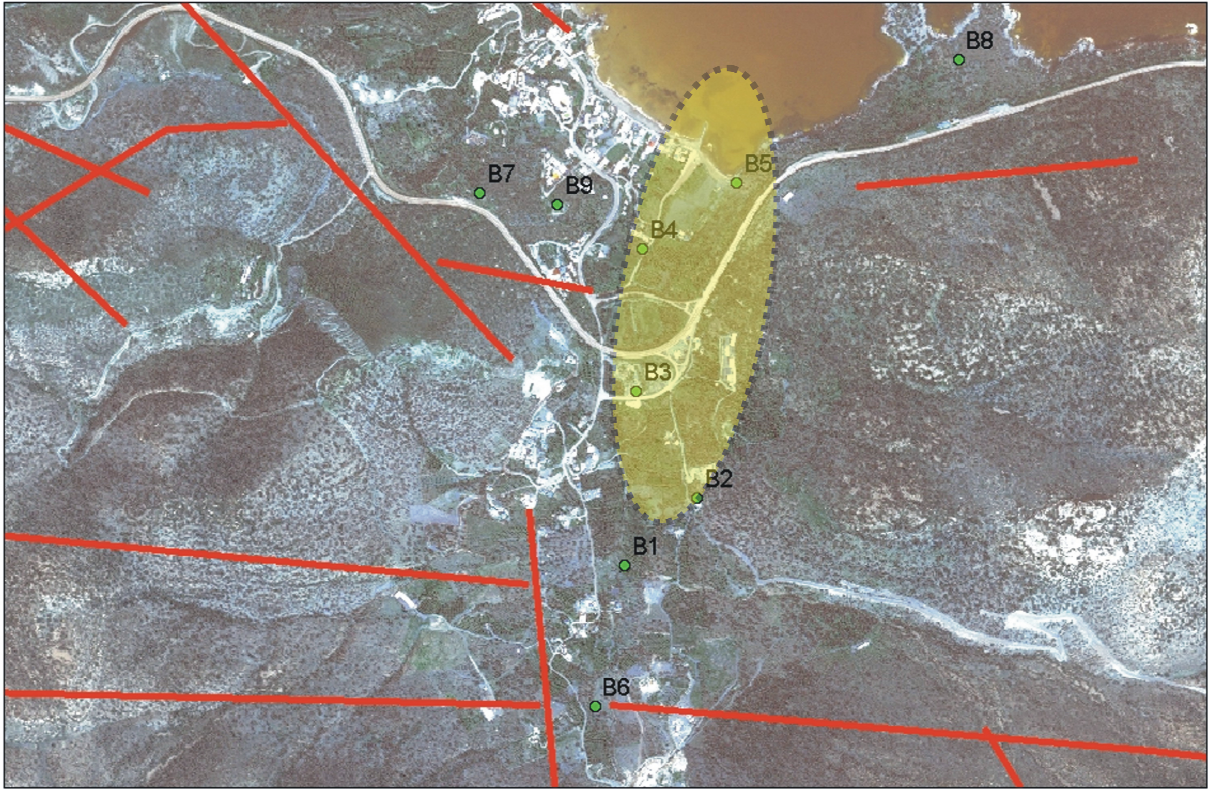
Σχήμα 6.25. Χάρτες οριζόντιας κατανομής της αντίστασης για διαφορετικά βάθη.

Στο σχήμα (6.26) εικονίζεται η διδιάστατη κατανομή των αντιστάσεων μέχρι και το βάθος των 180 μέτρων. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν κατά μήκος του ποταμού Κερίτη στα Χανιά (Kanta 2010, Kanta et al. 2011). Το μοντέλο απεικονίζει τις διαφορετικές γεωλογικές ενότητες (A, B, C, D) καθώς και τις ρηξιγενείς (γνωστές και μη) ζώνες. Επιπλέον, περιοχές υδροφορίας (W) και ζώνες υφαλμύρυνσης (X) εντοπίστηκαν από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Όλα τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από δεδομένα γεωτρήσεων στις περιοχές ενδιαφέροντος.

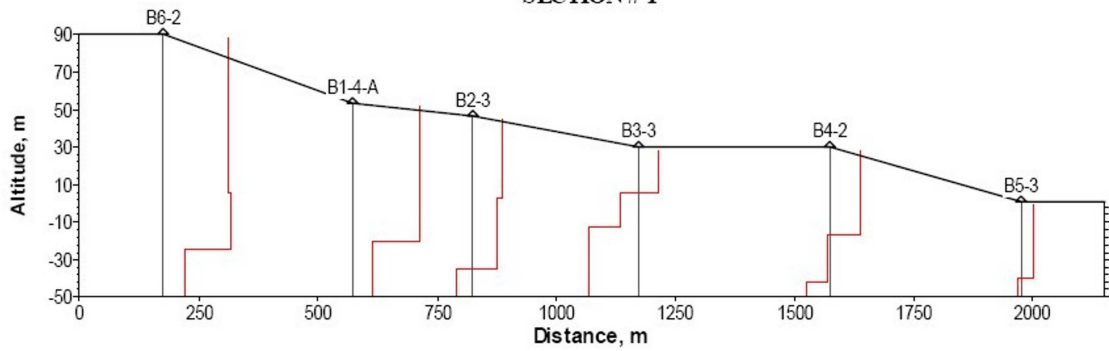


Σχημα 6.26. Διδιάστατο μοντέλο κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη στα Χανιά (Kanta 2010, Kanta et al. 2011).

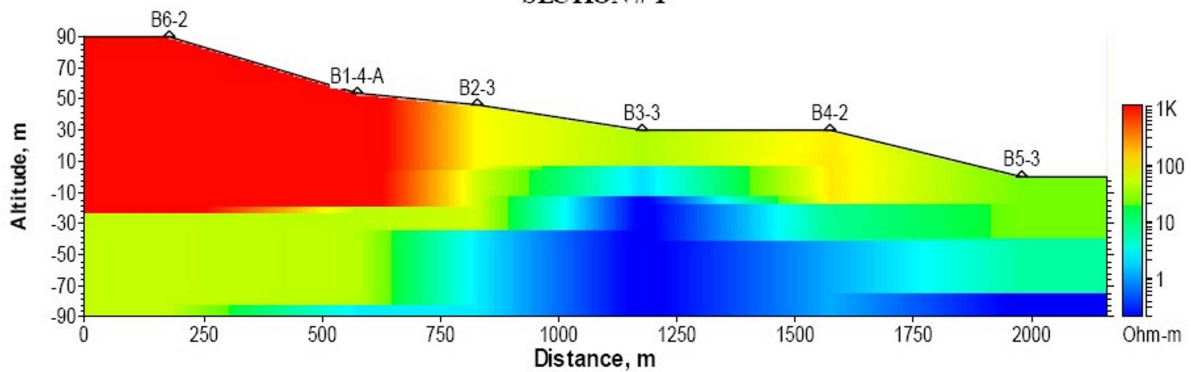
Το σχήμα (6.27) παρουσιάζει την εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων στην περιοχή του Μπαλί στο Ρέθυμνο-Κρήτης. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, η υφαλμύριση έχει προχωρήσει περί τα 1000 μέτρα εντός της ενδοχώρας από την ακτογραμμή. Ειδικότερα, εμφανίζονται οι μετρήσεις B5, B4, B3 και B2 (σε μεγαλύτερο βάθος) να έχουν αντιστάσεις ανάλογες της ύπαρξης υφάλμυρου νερού (0.5-4 Ohm.m).



SECTION # 1



SECTION # 1



Σχήμα 6.27 Διδιάστατο μοντέλο κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος στο Μπαλί Ρεθύμνου (Σουπιός και συνεργάτες 2007).

2.1.4.12 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό και

χαρτογράφηση της υπόγειας στάθμης νερών

Σε αντίθεση με το παράδειγμα που αναφέρθηκε προηγουμένως, δηλαδή τον εντοπισμό της διεπιφάνειας αλμυρού και πόσιμου νερού, όπου αυτός αποτελεί μια εύκολη εφαρμογή της μεθόδου, στη περίπτωση εντοπισμού της υπόγειας στάθμης εμφανίζονται πολλά και δύσκολα προβλήματα.

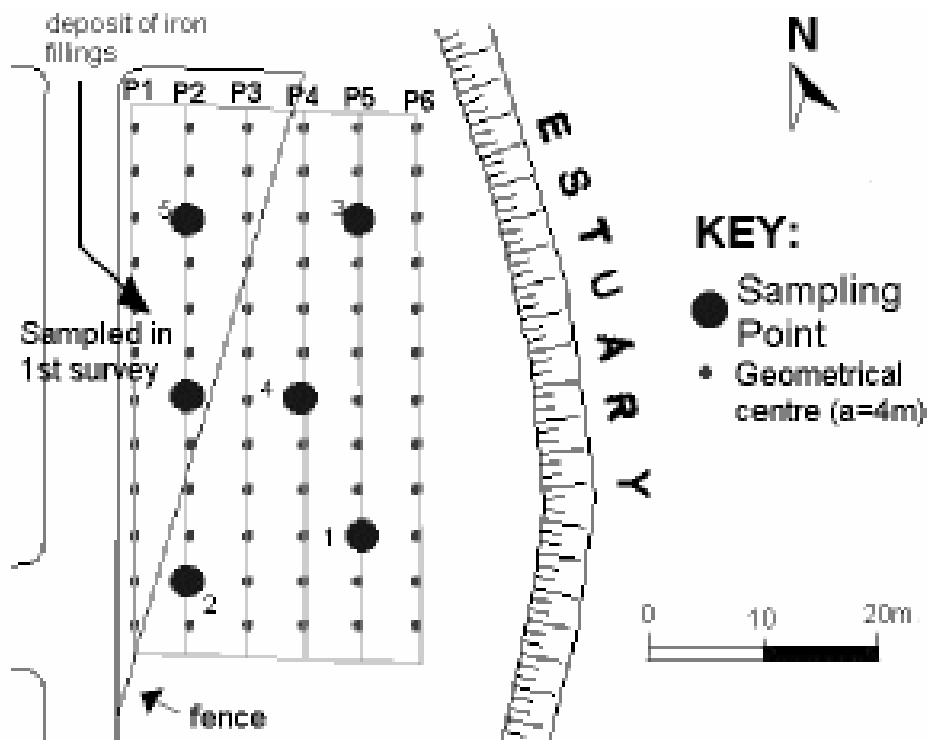
Στη περίπτωση κατά την οποία η υπόγεια στάθμη βρίσκεται υποκείμενη και υπερκείμενη πολλών στρωμάτων διαφορετικής αντίστασης, τότε ο εντοπισμός της είναι σχεδόν αδύνατη. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες η υπόγεια στάθμη μπορεί να εντοπιστεί ως ένα αγωγίμο στρώμα.

2.1.4.13 Εφαρμογή των μονοδιάστατων (γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, VES) και δυσδιάστατων (γεωηλεκτρική τομογραφία) ηλεκτρικών διασκοπήσεων στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων

Σε πολλές περιπτώσεις οι γεωφυσικές μέθοδοι εμφανίστηκαν ικανές να δώσουν λύση σε διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα που προήλθαν από τη βιομηχανική δραστηριότητα σε μια περιοχή. Άλλες φορές επενέβησαν έμμεσα σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α) όπου διαπιστώθηκαν ύστερα από γεωφυσικές διασκοπήσεις, εκτεταμένες διαρροές στον υπεδάφειο υδροφόρο ορίζοντα. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διάφορα παραδείγματα εφαρμογής των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων.

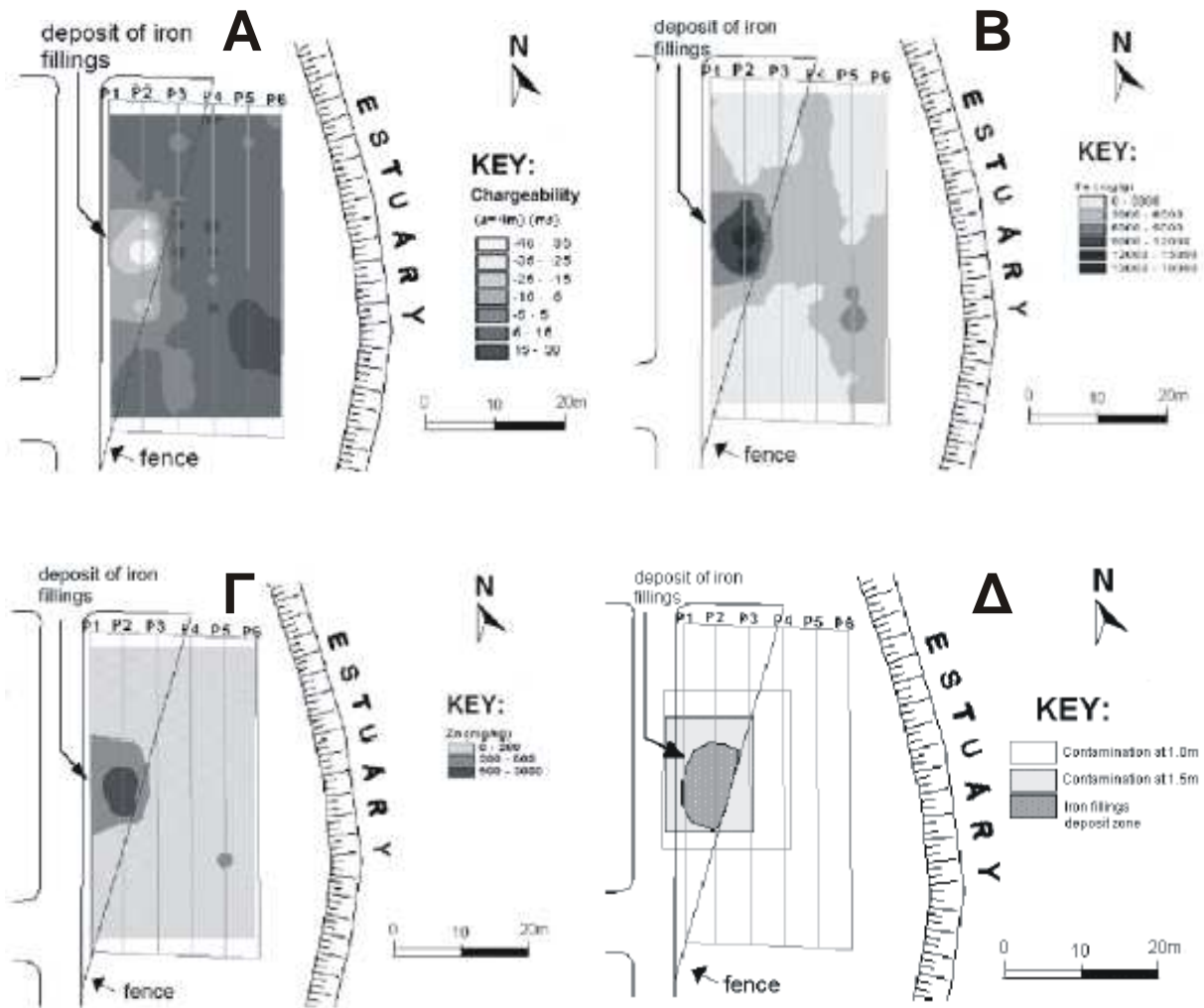
Περίπτωση 1: Στη περιοχή Setubal στην Πορτογαλία εντοπίστηκε μια θέση που στο παρελθόν και για πολλά χρόνια γινόταν απόθεση υπολειμμάτων σιδήρου και ορυκτών ελαίων πλούσιων σε Zn. Για την αναμόρφωση του χώρου εκείνου ζητήθηκε η έκταση της μόλυνσης και προτάσεις για αντιμετώπιση του προβλήματος.

Εκτελέστηκαν γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και χημικές αναλύσεις δειγμάτων εδάφους όπως φαίνεται στο σχήμα (6.28).



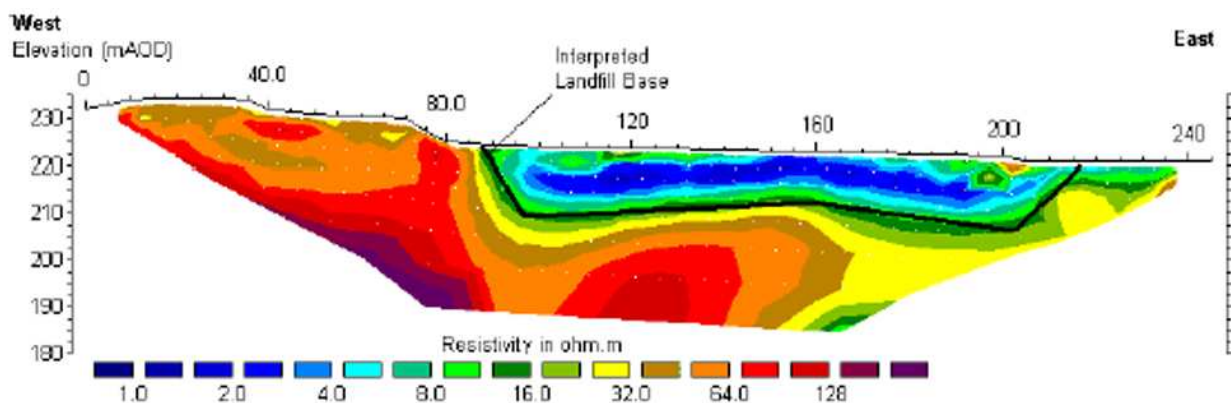
Σχήμα 6.28. Θέσεις γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και δειγμάτων εδάφους για χημική ανάλυση.

Δεδομένου ότι η υψηλή περιεκτικότητα ενός εδάφους σε σίδηρο (Fe) και ψευδάργυρο (Zn) συσχετίζεται με την φορτιστικότητα (chargeability) όπως αυτή υπολογίζεται από μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας, μπόρεσε να γίνει κοινή ερμηνεία των μετρήσεων φορτιστικότητας, αντίστασης και συγκέντρωσης στοιχείων για τον εντοπισμό των πιο βεβαρημένων από την μόλυνση θέσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 6.29)

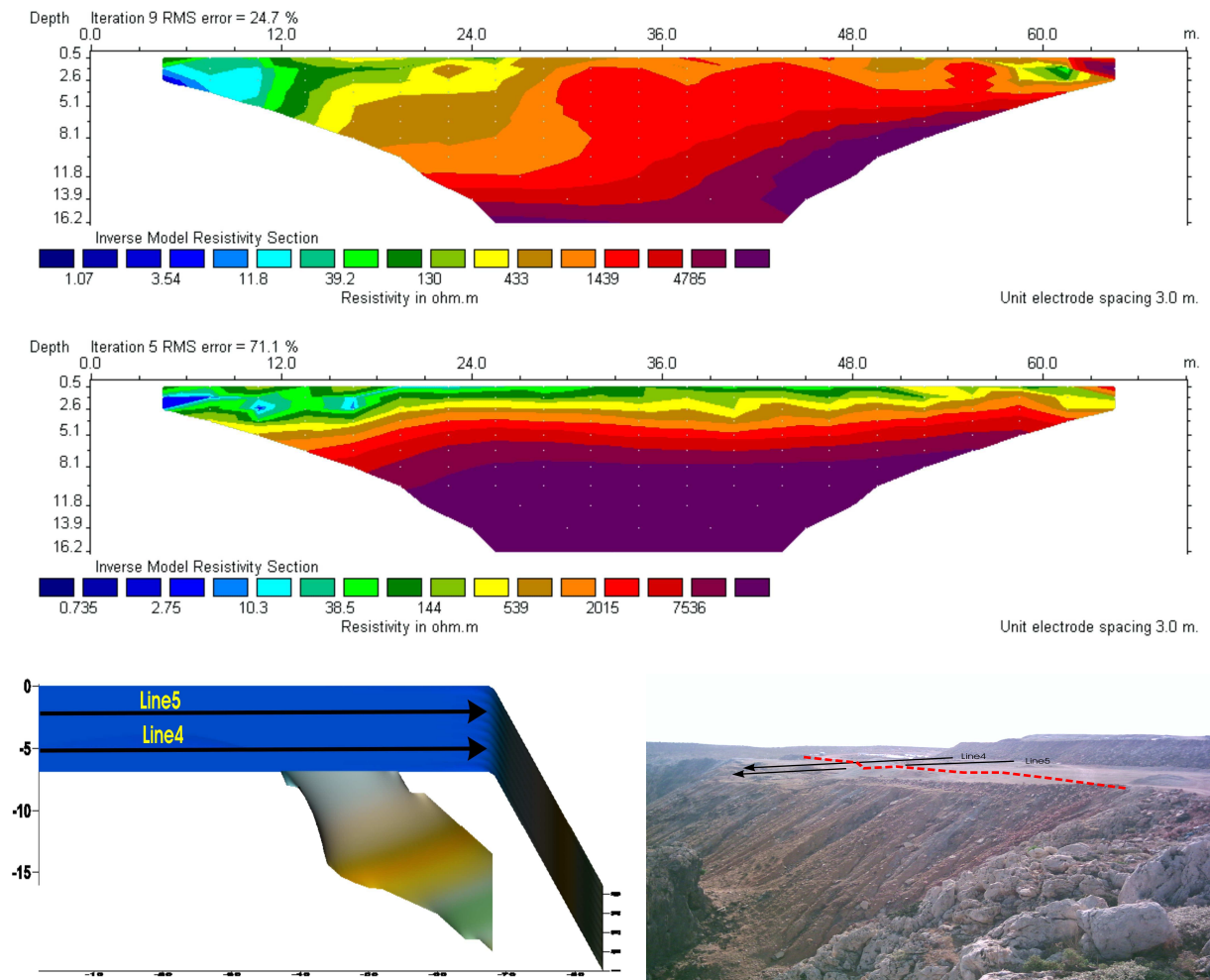


Σχήμα 6.29. α) Χάρτης κατανομής της Φορτιστικότητας, β) Χάρτης συγκέντρωσης Fe, γ) Χάρτης συγκέντρωσης Zn, δ) Μολυσμένη περιοχή στην οποία πρέπει ή να απομακρυνθούν υλικά ή να γίνει αποκατάσταση του χώρου.

Περίπτωση 2: Εντοπισμός της έκτασης ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (σχήμα 6.30, 6.31 και 6.32) και του πιθανών θέσεων διαρροής σε υπεδάφειους ορίζοντες με τη χρήση της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (σχήμα 6.33).



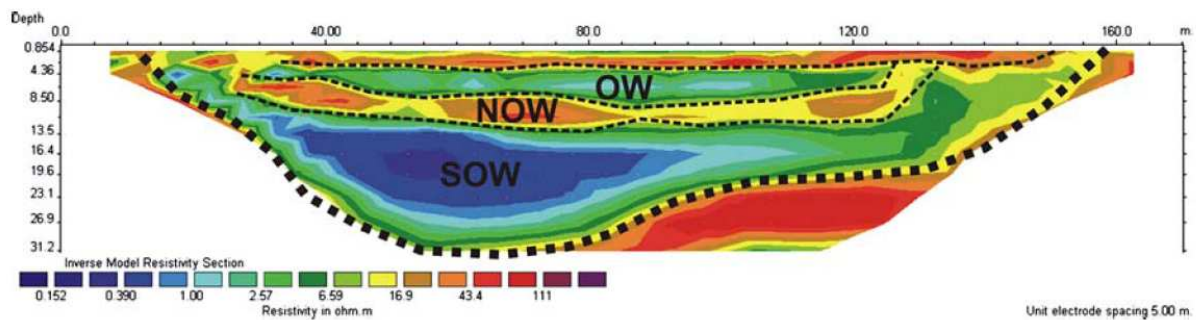
Σχήμα 6.30. Εντοπισμός της έκτασης και του πάχους απόθεσης απορριμμάτων σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Με συνεχή μαύρη γραμμή παρουσιάζεται το όριο μεταξύ απορριμμάτων και υγιούς υποβάθρου.



Σχήμα 6.31. Τριδιάστατη απεικόνιση της κατανομής των αντιστάσεων στη χαράδρα του Κουρουπητού στα Χανιά Κρήτης. Τα πρώτα 2 σχήματα (line 4, 5) απεικονίζουν τη διδιάστατη κατανομή των αντιστάσεων με το βάθος. Από την ερμηνεία τους δημιουργήθηκε στο 3διάστατο ανάγλυφο της χαράδρας από το οποίο μπορεί να εκτιμηθεί ο όγκος των απορριμμάτων που έχουν παρανόμως αποτεθεί από την έναρξη απόθεσης των σκουπιδιών στην περιοχή έρευνας (Soupios et al. 2007).

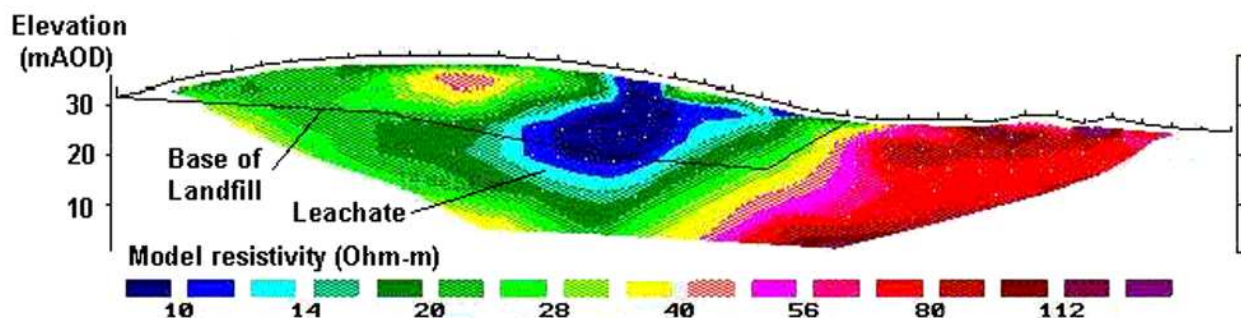
Στο σχήμα (6.32) παρουσιάζεται η διδιάστατη ερμηνεία γεωηλεκτρικών δεδομένων που ελήφθησαν τη περίοδο 2005-2007 στη χωματερή των Πέρα Γαλήνων στο Ηράκλειο Κρήτης. Από την ερμηνεία μπορεί να προσδιοριστεί με υψηλή ακρίβεια η κατά βάθος διαφοροποίηση των σκουπιδιών καθώς και οι φάσεις απόθεσης. Συγκεκριμένα, επιφανειακά εντοπίστηκε ένα στρώμα υψηλών αντιστάσεων (στρώση αδρανών υλικών με σκοπό τη κάλυψη των απορριμμάτων, NOW-Non Organic Wastes). Βαθύτερα, εντοπίστηκε μια στρώση οργανικών υλικών (Organic Wastes). Ακολουθεί μια στρώση αδρανών υλικών όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς λειτουργίας χώρων απόθεσης

απορριμμάτων. Βαθύτερα, σε βάθος 13.5 έως 30 μέτρα, εντοπίστηκε μια κορεσμένη ζώνη οργανικών απορριμμάτων (SOW-Saturated Organic Wastes), η οποία επικάθεται πάνω στο αδιαπέρατο υπόβαθρο της περιοχής έρευνας.



Σχήμα 6.32. Διδιάστατη απεικόνιση των απορριμμάτων στη χωματερή των Πέρα Γαλήνων στο Ηράκλειο Κρήτης με βάση την ερμηνεία γεωηλεκτρικών δεδομένων (Georgaki et al. 2008).

Στην περίπτωση κατά την οποία παρουσιάζεται διαρροή από τον χώρο αυτό και μόλυνση των υπεδάφειων σχηματισμών ή/και υδροφόρων οριζόντων τότε κατά την εκτέλεση και ερμηνεία των μετρήσεων παρουσιάζεται η ακόλουθη εικόνα (σχήμα 6.33)

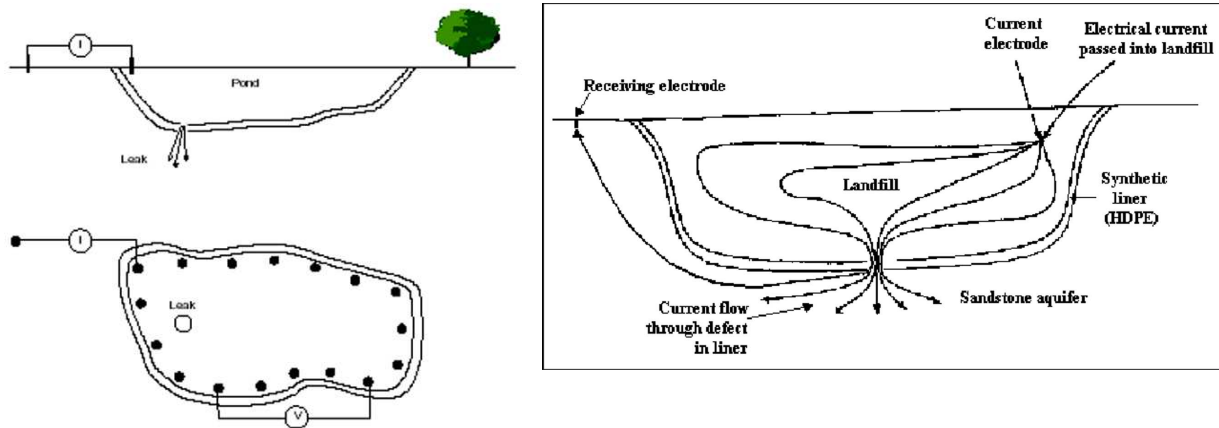


Σχήμα 6.33. Εντοπισμός της θέσης διαρροής από χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων με την εκτέλεση γεωηλεκτρικής τομογραφίας.

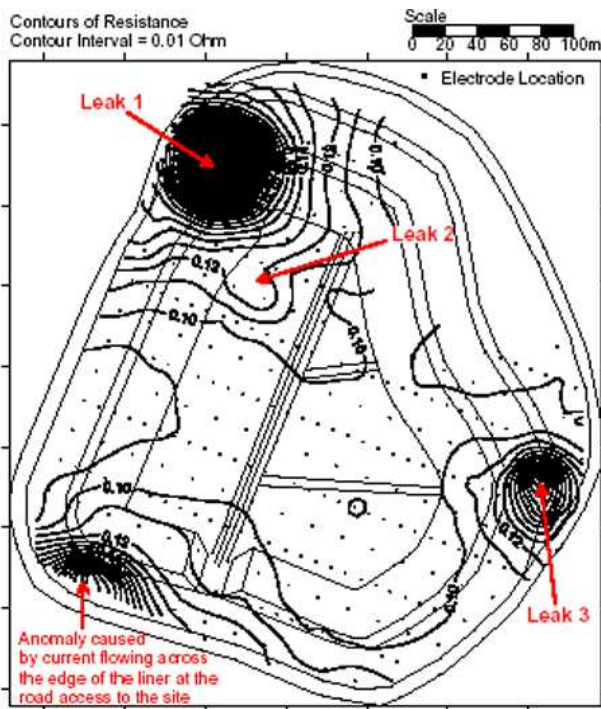
Περίπτωση 3: Εντοπισμός θέσεων διαρροής σε λιμνοδεξαμενές με σκοπό την εξάλειψη προβλημάτων που έχουν να κάνουν με αλόγιστη "σπατάλη" υδατικών πόρων. Σε πολλές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί έλλειμμα στο ισοζύγιο μιας λιμνοδεξαμενής. Δηλαδή, το νερό που αποθηκεύεται δεν ισούται με το νερό που καταναλίσκεται και αυτού που παραμένει εντός της λιμνοδεξαμενής. Τέτοιου είδους προβλήματα οφείλονται αποκλειστικά και μόνο σε διαρροές.

Στις περιπτώσεις αυτές και με τη χρήση γεωηλεκτρικών μεθόδων είναι δυνατός ο εντοπισμός τυχόν υπάρχουσας διαρροής (σχήμα 6.34). Η δυνατότητα εντοπισμού των διαρροών με τη χρήση ηλεκτρικών μεθόδων οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα που διαβιβάζεται εντός της δεξαμενής διατρέχει όλη τη δεξαμενή και διαφεύγει-καταγράφεται (από τα ηλεκτρόδια δυναμικού) από το σημείο στο οποίο γίνεται η διαρροή (σχήμα 6.35)

Με τη μέτρηση όλων των θέσεων στα οποία έχει εγκατασταθεί ηλεκτρόδιο δυναμικού και τη χαρτογράφηση με ισοκαμπύλες των αντιστάσεων σε κάθε θέση μέτρησης, είναι δυνατή η εύρεση της θέσης διαρροής (σχήμα 6.36)



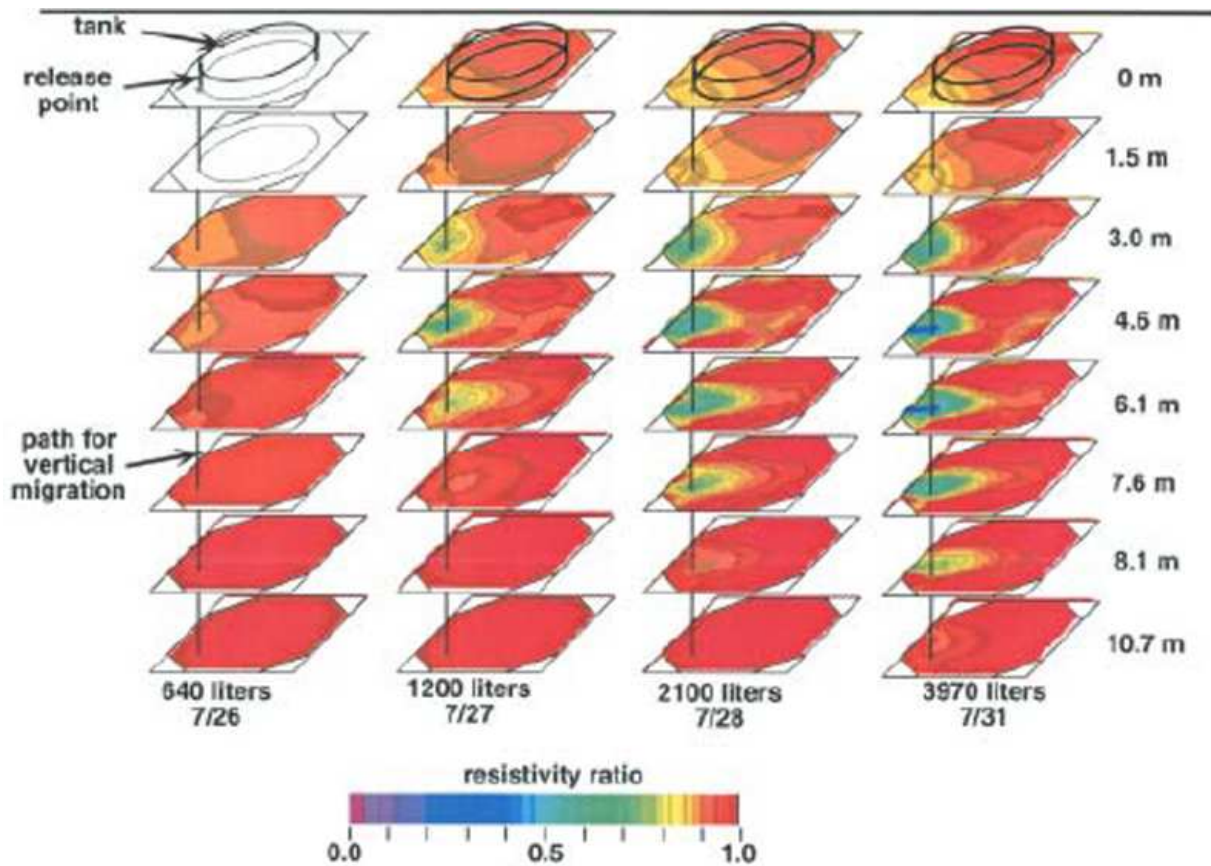
Σχήμα 6.34. Διάταξη ηλεκτροδίων εντός και εκτός της δεξαμενής με σκοπό τον εντοπισμό υπόγειας διαρροής. Σχήμα 6.35. Θεωρητική ερμηνεία εφαρμογής της μεθόδου στη περίπτωση διαρροών από λιμνοδεξαμενές.



Σχήμα 6.36. Εντοπισμός τριών θέσεων διαρροής σε λιμνοδεξαμενή με τη διεξαγωγή μετρήσεων αντίστασης.

Περίπτωση 4: Εντοπισμός θέσεων διαρροής σε δεξαμενές υγρών καυσίμων με την εκτέλεση

γεωηλεκτρικών τομογραφιών στο χρόνο. Πολλές φορές οι δεξαμενές υγρών καυσίμων παρουσιάζουν διαρροές οι οποίες μολύνουν τόσο τον υδροφόρο ορίζοντα όσο και τους υπεδάφειους σχηματισμούς. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου γεωηλεκτρικών τομογραφιών στο χρόνο, με μετρήσεις που εκτελέστηκαν σε δεξαμενές υγρών καυσίμων και για χρονικό διάστημα 4 ημερών όπου και εμφανίζεται η διάχυση των υγρών στο υπέδαφος (σχήμα 6.37).



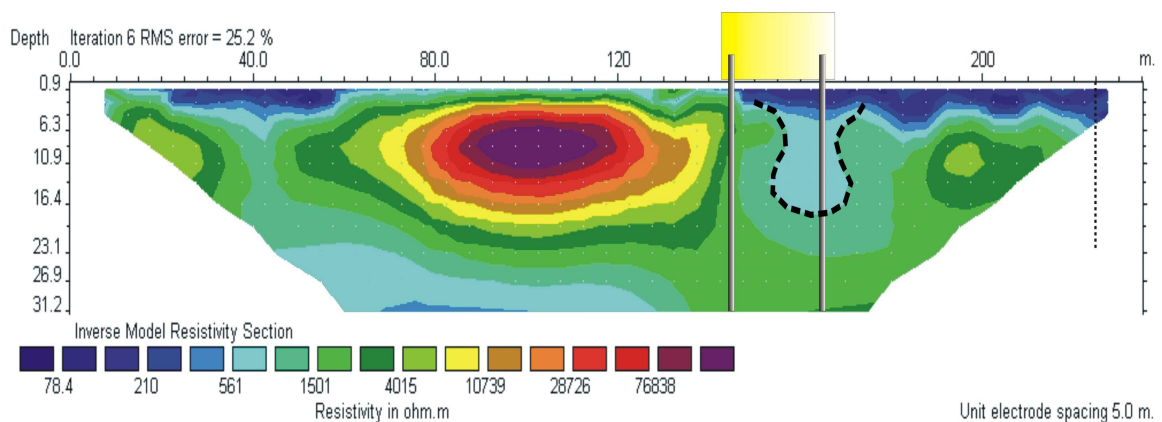
Σχήμα 6.37. Εντοπισμός της διάχυσης των υγρών καυσίμων από μια δεξαμενή αποθήκευσης αυτών, στον υπεδάφειο χώρο.

Το 2006-2007 πραγματοποιήθηκε λεπτομερής διασκόπηση στο χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων πλησίον της χαράδρας του Κουρουπητού στα Χανιά της Κρήτης. Όλα τα διασταλλάζοντα υγρά των απορριμμάτων οδηγούνταν εντός των δεξαμενών (σχήμα 6.38) με σκοπό να βιοαποικοδομηθούν ακολουθώντας μια πορεία ανακύκλωσης.



Σχήμα 6.38. Περιοχή έρευνας κατάντη του ΧΥΤΑ στον Κουρουπητό στα Χανιά.

Στην περιοχή έρευνας εκτελέστηκαν διάφορες γεωφυσικές διασκοπήσεις με σκοπό την διερεύνηση του υπεδάφους και την πιθανή περιβαλλοντική υποβάθμιση του χώρου, μία εκ των οποίων παρουσιάζεται στο σχήμα (6.39). Η διατομή είχε μήκος 235 μέτρα. Με κίτρινο παραλληλόγραμο εντοπίζεται η θέση της μίας εκ των τριών δεξαμενών που εικονίζονται στο σχήμα (6.38). Κατάντη της δεξαμενής υπάρχουν γεωτρήσεις παρακολούθησης με σκοπό τη συχνή παρακολούθηση τυχόν διαρροής ρύπων. Η ερμηνεία της γεωηλεκτρικής τομογραφίας απεικονίζει την διαρροή ρύπων στο υπέδαφος μέχρι και το βάθος των 17 μέτρων και για μια έκταση των 35 μέτρων (Soupios et al. 2007).



Σχήμα 6.39. Εντοπισμός διαρροής ρύπων από δεξαμενή συλλογή υγρών αποβλήτων με τη χρήση γεωηλεκτρικής τομογραφίας (Soupios et al. 2007).

3. Μεθοδολογία

3.1 Γεωφυσικά όργανα

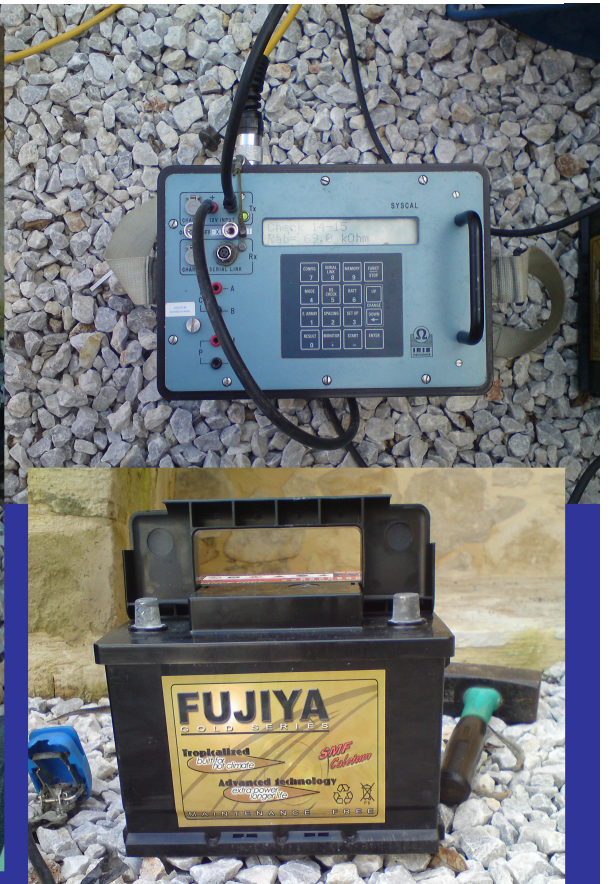
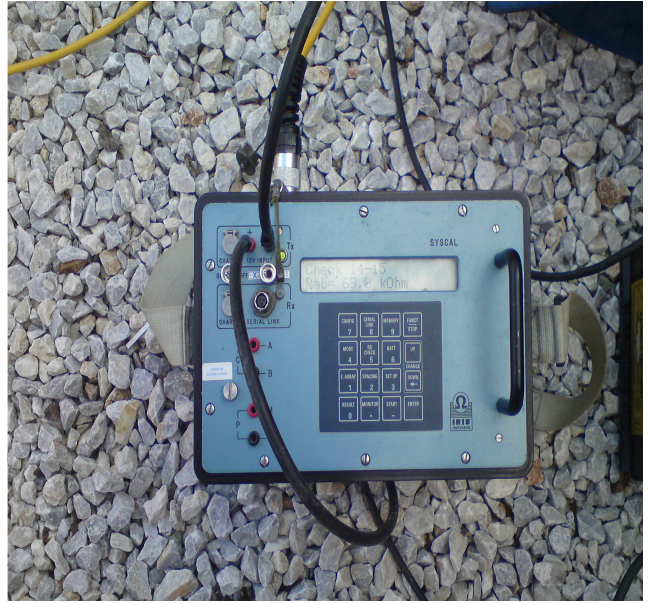
Στις γεωφυσικές έρευνες στην περιοχή Φρέ χρησιμοποιήθηκε το δεκακάναλο όργανο IRIS-Syscal Pro, Switch 48 μέσο με ακρίβεια 0,1 mV. Το σύστημα διαθέτει 48 ηλεκτρόδια, που επιτρέπει πλήρως αυτοματοποιημένη μέτρηση της ρηχό υπεδάφος εμφανής αντίσταση χρησιμοποιώντας το δίπολο-δίπολο. Το όργανο αυτό είναι πλήρως αυτοματοποιημένο, με αυτονομία και αρκετή εσωτερική μνήμη ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Στο όργανο μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα μέχρι 96 ηλεκτρόδια. Η αυτόματη πραγματοποίηση των μετρήσεων της αντίστασης του υπεδάφους ελέγχεται από τον πολυπλέκτη (Switch Pro), που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης (Syscal Pro), μέσω ενός ειδικού αρχείου που εισάγεται στο όργανο και περιλαμβάνει την γεωμετρία της διάταξης που χρησιμοποιείται. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η συλλογή πολλών δεδομένων υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον το όργανο έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει και να αποθηκεύσει ταυτόχρονα μέχρι δέκα μετρήσεις, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο περίπου κατά δέκα φορές τον χρόνο συλλογής των δεδομένων.

Για παράδειγμα μία τομογραφία που απαιτούσε την συλλογή πάνω από 1000 μετρήσεις ολοκληρώθηκε σε περίπου 15 λεπτά, ενώ ένα απλό μονοκάναλο όργανο θα χρειαζόταν πάνω από 90 λεπτά.





Εικόνα 4.1: Φωτογραφία του οργάνου μέτρησης της αντίστασης του εδάφους SYSCAL Pro (αριστερά πάνω) και του πολυπλέκτη SYSCAL Switch Pro (δεξιά πάνω). Τρόπος σύνδεσης του οργάνου SYSCAL Pro με τον πολυπλέκτη για την αυτόματη μέτρηση και καταγραφή της φαινόμενης αντίστασης του υπεδάφους (κάτω).



Όργανο παραγωγής δονήσεων. Μπαταρία και συνδεσμολογία

Εικόνα 4.2: Λεπτομέρειες από την διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή Φρε.



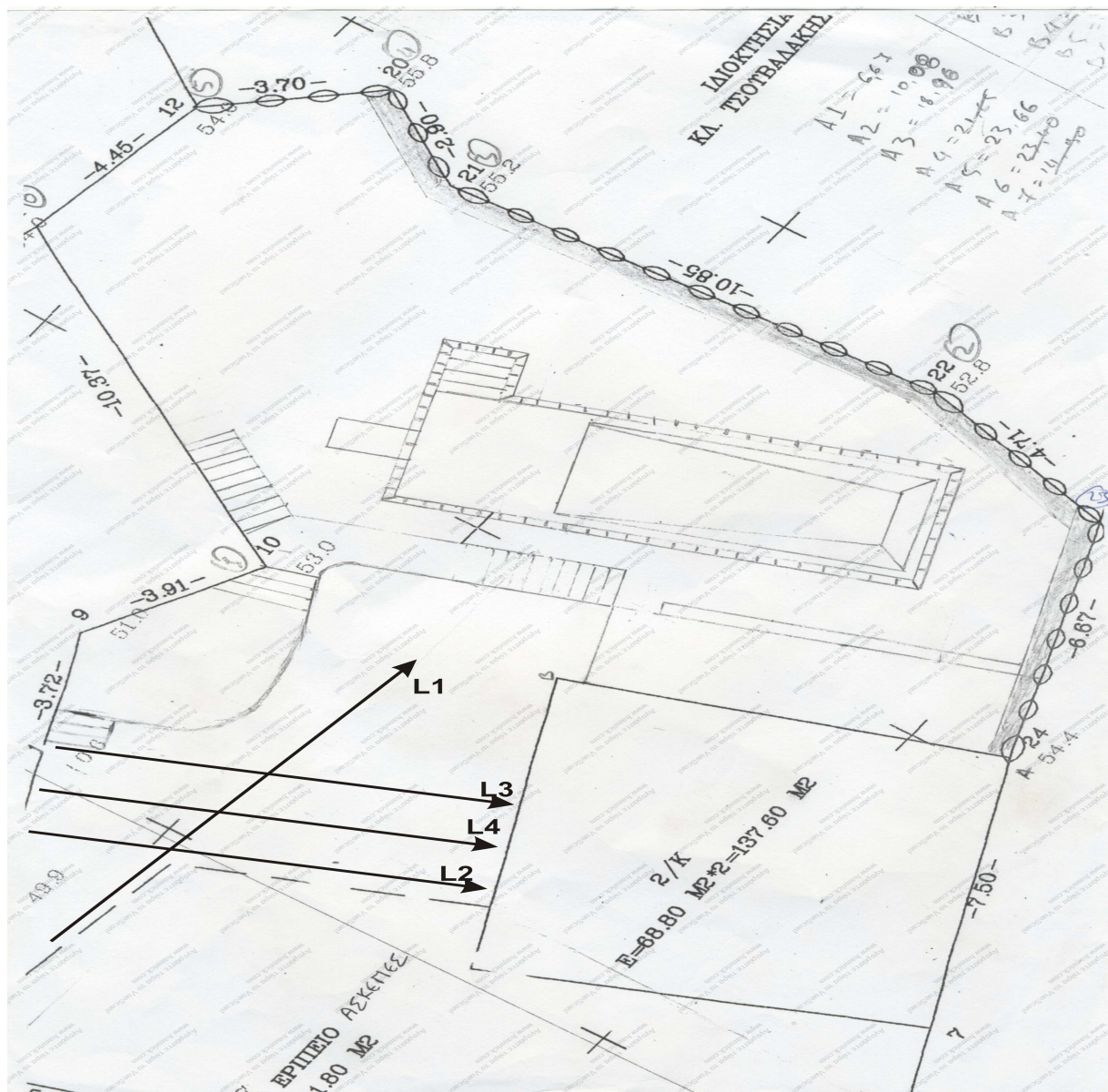
3.2 Μετρήσεις υπαίθρου

Οι εργασίες πεδίου διήρκεσαν μία μέρα. Ο χώρος που πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις οριοθετήθηκε και καθορίστηκαν από την διάταξη των οικίας και τη διαμόρφωση του περιβάλλοντα χώρου της.

Βασικός στόχος της γεωηλεκτρικής διασκόπησης αποτελούσε ο προσδιορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και η ακριβή θέση παλαιού πηγαδιού.

Στην περιοχή επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος της δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας, που είχε στόχο την απεικόνιση της στρωματογραφίας του υπεδάφους κατά μήκος των συγκεκριμένων οδούσεων. Τα γεωηλεκτρικών δεδομένων συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας ένα IRIS-Syscal Pro, Switch 48 μέσο με ακρίβεια 0,1 mV. Το σύστημα διαθέτει 48 ηλεκτρόδια, που επιτρέπει πλήρως αυτοματοποιημένη μέτρηση του ρηχού υπεδάφους εμφανής αντίσταση χρησιμοποιώντας το δίπολο-δίπολο διαμόρφωση. Η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα της πολύ καλής οριζόντια ανάλυση, αλλά βασικό μειονέκτημα του είναι η σχετικά χαμηλή ισχύ του σήματος. Τρεις παράλληλες γεωηλεκτρικές τομές πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ηλεκτροδίων σε απόσταση 0,5 m (σχήμα 2, γραμμές 2-4). Μία ακόμα κάθετη τομή (γραμμή 1) που διασχίζει τις προηγούμενες τομές, η οποία έγινε με σκοπό την επαλήθευση των εικόνων και είχε ως αποτέλεσμα να επαληθεύσει τη βασική υπόθεση για την πιθανή τοποθεσία του αποχετευτικού συστήματος και του γεωλογικού υποβάθρου. Η μεταξύ τους απόσταση (α) ήταν 0,5 m, παρέχοντας τη δυνατότητα ανίχνευσης των δομών έως 2 m βάθος, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ικανοποιητική για την ανίχνευση των ανωμαλιών κοντά στην επιφάνεια της περιοχής μελέτης.

Τα στοιχεία αντίστασης διατομής υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με το πρόγραμμα RES2DINV. Αυτό το πρόγραμμα βασίζεται στη τεχνική βελτιστοποίησης Gauss-Newton. Κάθε αντίσταση διατομής υποβλήθηκε σε ξεχωριστή επεξεργασία. Πανομοιότυπες παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για να επεξεργαστούν όλες οι διατομές, ώστε να μειωθούν οι ανωμαλίες όσο το δυνατόν περισσότερο. Η καλή ποιότητα των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν οδήγησαν σε αρκετά χαμηλά σφάλματα RMS.



Εικόνα 4.3: Διεύθυνση των οδεύσεων κατά μήκος των οποίων πραγματοποιηθήκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες

Σε όλες τις τομογραφίες εφαρμόστηκαν οι διατάξεις Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου για την συλλογή των δεδομένων. Οι δύο αυτές διατάξεις θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες για την πραγματοποίηση της έρευνας καθώς είναι δυνατό να συλλεχθούν αξιόπιστα δεδομένα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Το όργανο προγραμματίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε σημείο μέτρησης της αντίστασης να δειγματοληπτείται τουλάχιστον τρεις φορές. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατό να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα αλλά και να καταγραφεί το σφάλμα της κάθε μέτρησης.

Η συλλογή δεδομένων φαινόμενης αντίστασης κάνοντας χρήση διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων βοηθάει στην βελτιστοποίηση της ποιότητας της παραγόμενης εικόνας κατανομής των αντιστάσεων του υπεδάφους. Κάθε διάταξη έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και είναι δυνατό να δώσει επιπλέον πληροφορίες για την δομή του υπεδάφους.

Γενικά, ο συνδυασμός δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές διατάξεις μπορεί να βοηθήσει στην παραγωγή ενός αξιόπιστου γεωηλεκτρικού μοντέλου, ειδικά στις περιπτώσεις που η γεωλογία της εκάστοτε περιοχής είναι εξαιρετικά πολύπλοκη ή δεν υπάρχει καμία εκ των προτέρων πληροφορία.

4. Διαδικασία και Στάδια Επεξεργασίας Γεωφυσικών Δεδομένων & Αποτελεσμάτων Ερευνών

4.1 Επεξεργασία τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων – Μέθοδος Αντιστροφής

Η εφαρμογή της θεωρίας της αντιστροφής στην γεωηλεκτρική διασκόπηση προσπαθεί να βρει ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης του οποίου η απόκριση θα είναι παρόμοια ή σχεδόν ίδια με τις μετρούμενες (παρατηρούμενες) τιμές της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Το μοντέλο αυτό είναι ουσιαστικά μία ιδανική μαθηματική αναπαράσταση της γης. Αποτελείται από παραμέτρους, οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύουν την κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Η απόκριση του μοντέλου δίνει τις υπολογιζόμενες (συνθετικές) ειδικές φαινόμενες αντιστάσεις οι οποίες υπολογίζονται με βάση πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις.

Βασικό στοιχείο κάθε μεθόδου αντιστροφής αποτελεί η εύρεση ενός τρόπου υπολογισμού της απόκρισης του γεωηλεκτρικού μοντέλου, δηλαδή των φαινομένων ειδικών αντιστάσεων που θα προκαλέσει μία γνωστή κατανομή αντιστάσεων του υπεδάφους. Η διαδικασία αυτή είναι και γνωστή ως επίλυση του Ευθέως Προβλήματος. Με άλλα λόγια, το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα περιλαμβάνει την λύση της διαφορικής εξίσωσης που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα ανομοιογενές υπέδαφος, για μία συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων, τέτοιας ώστε να μπορεί να καθοριστεί η κατανομή του δυναμικού. Εφ' όσον το δυναμικό είναι γνωστό τότε με βάση τη σχέση (2) είναι πολύ εύκολο να υπολογιστούν οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις.

Υπάρχουν δύο τρόποι για να επιλυθεί το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα, οι αναλυτικές και οι αριθμητικές μέθοδοι. Με τις αναλυτικές μεθόδους επιλύεται απευθείας η εξίσωση Poisson που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στην γη. Οι μέθοδοι αυτές είναι ακριβείς που όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για απλά γεωμετρικά σχήματα όπως για παράδειγμα σφαίρες θαμμένες μέσα σε ομογενή γη.

Για να αντιμετωπιστεί η έντονη ανομοιογένεια και ετερογένεια που παρουσιάζει η γη, το πρόβλημα προσεγγίζεται με την χρήση των αριθμητικών μεθόδων. Το πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι μπορούν να ενσωματώσουν μία οποιαδήποτε τυχαία κατανομή της αντίστασης, δηλαδή μπορούν να προσεγγίσουν περισσότερο τις πραγματικές υπεδάφεις συνθήκες. Οι πιο διαδεδομένες αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του Ευθέως Προβλήματος είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method). Με βάση αυτές τις μεθόδους το υπέδαφος χωρίζεται σε διακεκριμένες και πεπερασμένες περιοχές, που ονομάζονται παράμετροι οι οποίες η κάθε μία μπορεί να έχει διαφορετική τιμή της αντίστασης. Έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παρασταθεί οποιαδήποτε κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης, όσο πολύπλοκη και να είναι.

Ο τελικός σκοπός της γεωηλεκτρικής διασκόπησης είναι να βρεθεί ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης στηριζόμενοι στις πραγματικές μετρήσεις της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Κατά

την διάρκεια της διαδικασίας της ανακατασκευής του υπεδάφους, αυτό θεωρείται ότι χωρίζεται σε ανεξάρτητα τμήματα (παράμετροι) τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν την τιμή της αντίστασής τους ανεξάρτητα το ένα με το άλλο. Ο στόχος είναι να υπολογιστεί μία εκτίμηση της κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, για την οποία η διαφορά μεταξύ των πραγματικών (μετρούμενων) δεδομένων της φαινόμενης αντίστασης και των υπολογιζόμενων (συνθετικών) τιμών της φαινόμενης αντίστασης να είναι ελάχιστη. Τα συνθετικά δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης θα υπολογιστούν μέσω της επίλυσης του ευθέως προβλήματος.

Επειδή όμως το γεωηλεκτρικό πρόβλημα είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα, η παραπάνω διαδικασία πρέπει να είναι επαναληπτική. Δηλαδή η διαδικασία της αντιστροφής ξεκινάει με ένα αρχικό ηλεκτρικό μοντέλο γης (συνήθως ομογενή γη) και σε κάθε επανάληψη βρίσκεται μία διόρθωση του μοντέλου, η οποία διόρθωση προστίθεται στο προηγούμενο μοντέλο. Έτσι λοιπόν στο τέλος κάθε αντιστροφής λαμβάνεται ένα αναβαθμισμένο μοντέλο γης και τελικά η διαδικασία θα σταματήσει όταν θα ανακατασκευαστεί ένα τέτοιο μοντέλο του οποίου η απόκριση, δηλαδή οι υπολογιζόμενες συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις θα διαφέρουν ελάχιστα από τις πραγματικές φαινόμενες αντιστάσεις.

Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων είναι ένα “νοσηρό” (ill-conditioned) πρόβλημα, δηλαδή μεγάλες αλλαγές στην πραγματική ειδική αντίσταση του υπεδάφους μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μικρές μεταβολές στα παρατηρούμενα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Έτσι λοιπόν η διαδικασία της αντιστροφής μπορεί να καταστεί εξαιρετικά ασταθής και να δώσει λύσεις που δεν έχουν κανένα φυσικό νόημα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες. Αυτή που ευρύτατα χρησιμοποιείται σήμερα είναι η λεγόμενη εξομαλυμένη εξαναγκασμένη αντιστροφή (smoothness constrained inversion ή Occam’s inversion). Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι να βρεθεί το πιο απλό και ομαλό ηλεκτρικό μοντέλο γης η απόκριση του οποίου να μπορεί να προσεγγίσει τα δεδομένα. Η αντιστροφή αυτή δεν ψάχνει απαραίτητα να βρει την πιο “καλή” λύση, αλλά επιδιώκεται η παραγωγή ενός απλοποιημένου μοντέλου το οποίο θα αποτελεί λογική αναπαράσταση του υπεδάφους. Δηλαδή η εξομαλυμένη εξαναγκασμένη αντιστροφή εγγυάται την σταθερότητα της λύσης και επίσης παράγεται ένα μοντέλο τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν επιλεγεί από τον χρήστη (ομαλότητα μοντέλου) και όχι τυχαία.

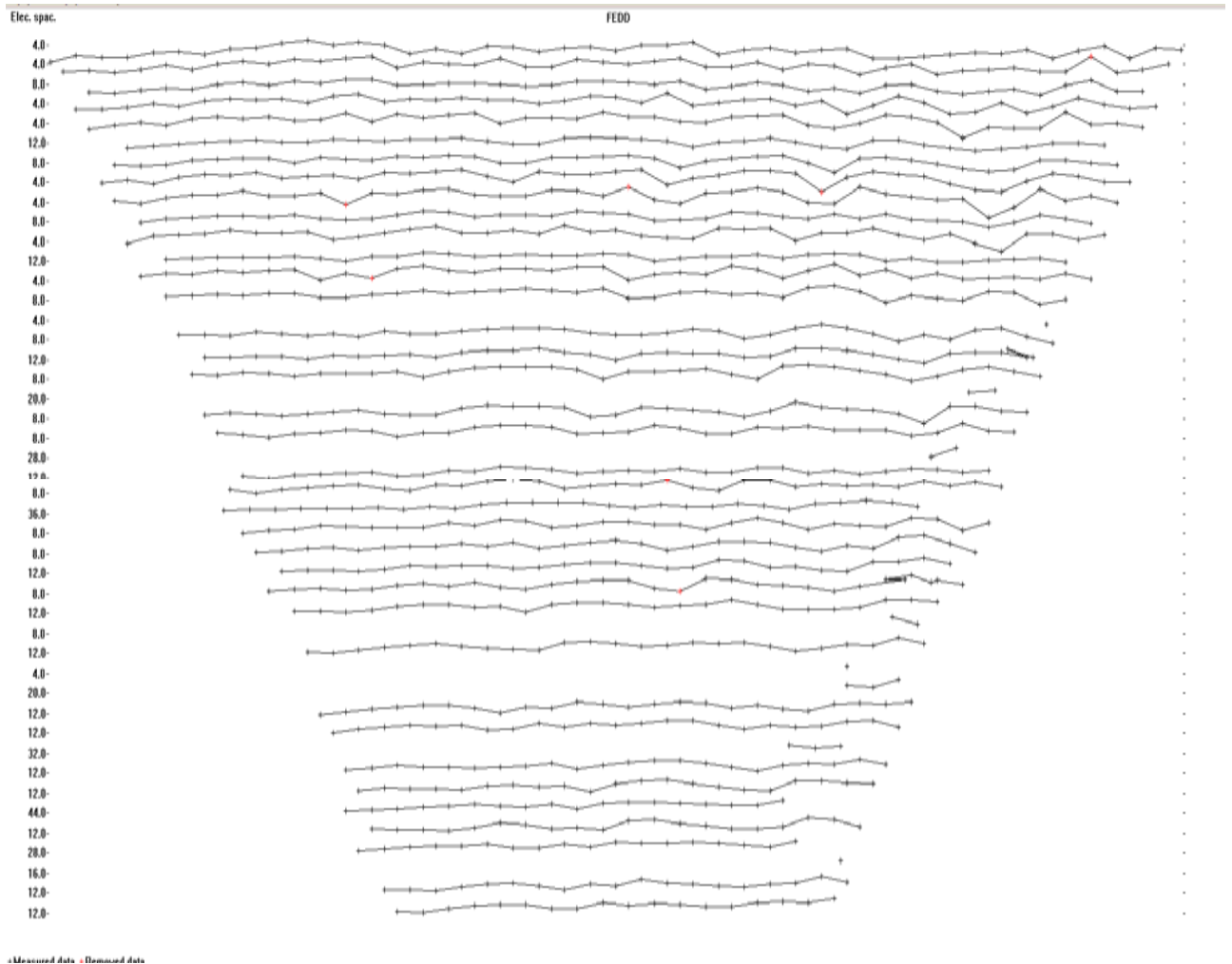
Για την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2DINV, το οποίο μπορεί αυτόματα να καθορίσει ένα διδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο της γης, με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τις υπαίθριες εργασίες και μπορεί να αντιστρέψει ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων. Η γη θεωρείται ότι αποτελείται από ορθογώνια τμήματα (παράμετροι), τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν την αντίστασή τους ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Η κατανομή και το μέγεθος των τμημάτων αυτών δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό και το βάθος κάθε σειράς αυτών των τμημάτων θεωρείται περίπου ίσο με το “μέσο βάθος διεύθυνσης” (Edwards, 1977). Η επεξεργασία κάθε γεωηλεκτρικής τομογραφίας ξεχωριστά είχε ως βασικούς σκοπούς να

αξιολογηθεί η ποιότητα των δεδομένων αλλά και να ληφθεί μία πρώτη εικόνα για την κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης.

Το πρόγραμμα RES2DINV χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση του ευθέως ηλεκτρικού προβλήματος και τον υπολογισμό των τιμών των φαινόμενων αντιστάσεων. Η διαδικασία της αντιστροφής στηρίζεται σε μία επαναληπτική μη-γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων (deGroot-Heldin and Constable, 1990).

4.2 Αποτελέσματα Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας-Δισδιάστατη Αντιστροφή

Για την επεξεργασία όλων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε ένας ενιαίος τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Στο αρχικό στάδιο αποκόπηκαν τα δεδομένα που παρουσίαζαν σφάλμα στην μέτρηση πάνω από 3%. Στην συνέχεια έγινε ένα επιπλέον φιλτράρισμα των δεδομένων εξαλείφοντας πολύ υψηλές και χαμηλές ακραίες τιμές, που οφείλονταν σε εξωγενείς πηγές όπως για παράδειγμα κακή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος ή ελαττωματική σύνδεση των καλωδίων ρεύματος με το ηλεκτρόδιο

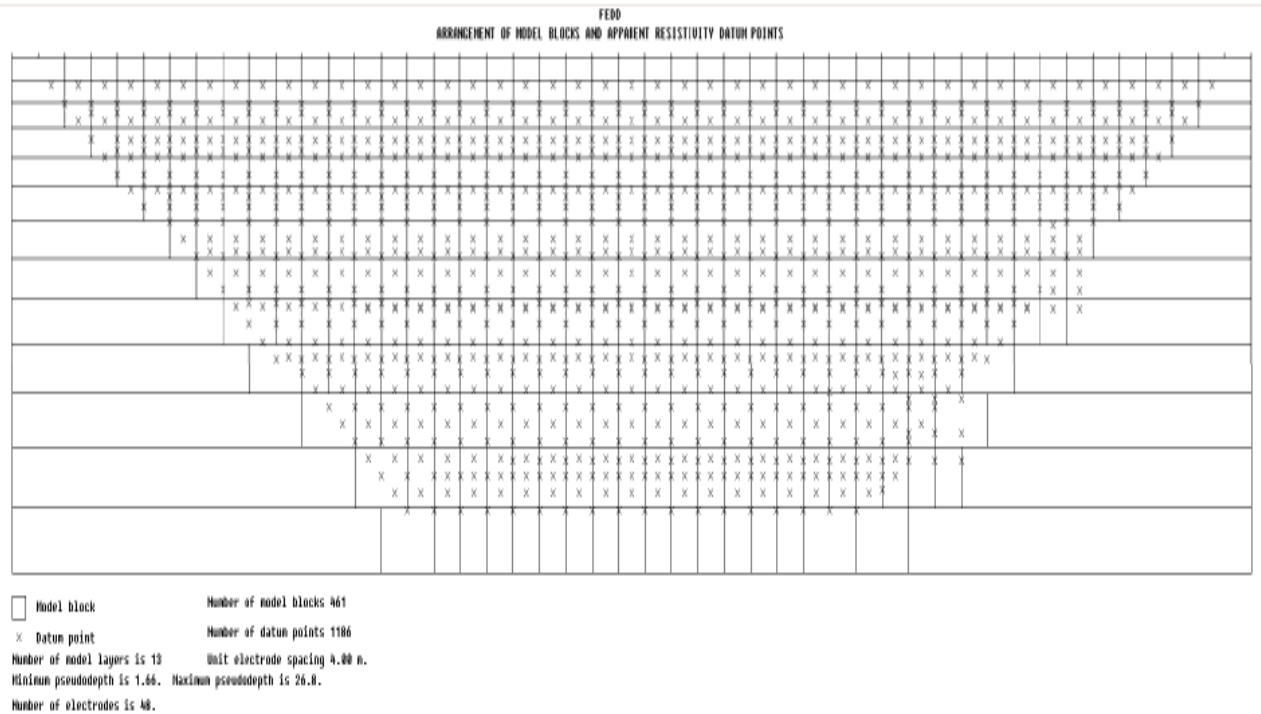


Εικόνα 5.1: Παράδειγμα δεδομένων μιας ηλεκτρικής τομογραφίας (FE, Διπόλου-Διπόλου) που περιέχει κάποιες πολύ ακραίες τιμές, οι οποίες σημειώνονται με τον κόκκινο σταυρό. Οι τιμές αυτές απομακρύνθηκαν από τα δεδομένα καθώς αποτελούν θόρυβο που επηρεάζει την τελική εικόνα του υπεδάφους.

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα RES2DINV. Οι παράμετροι του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ταυτόσημοι για όλες τις τομογραφίες, έτσι ώστε να υπάρχει μία ενιαία και συνολική διαχείριση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάστηκε από ένα σύνολο τραπεζοειδών στοιχείων, τα οποία μεταξύ τους ενώνονταν σε συγκεκριμένα σημεία που λέγονται κόμβοι.

Για την ανακατασκευή του γεωηλεκτρικού μοντέλου της γης με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, το υπέδαφος διακριτοποιείται σε ένα σύνολο πεπερασμένων ορθογώνιων παραμέτρων, των οποίων η αντίσταση μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα η μία σε σχέση με την άλλη. Το μήκος κάθε

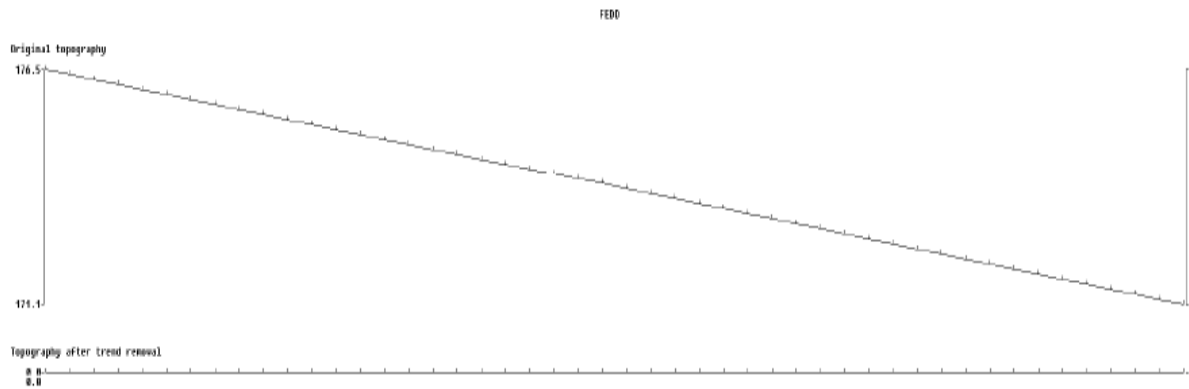
παραμέτρου ισούται με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων (Εικ. 5.2). Ως μέγιστο βάθος διασκόπησης θεωρήθηκε το “μέσο βάθος διείσδυσης” (Edwards, 1977).



Εικόνα 5.2: Χωρική κατανομή των ορθογώνιων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του γεωηλεκτρικού μοντέλου της γης. Με τους κεκλιμένους σταυρούς φαίνεται η θέση των φαινομένων αντιστάσεων που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο για μία τυπική ηλεκτρική τομογραφία (FE, Διπόλου-Διπόλου, Μέγιστο βάθος διείσδυσης 30 μέτρα).

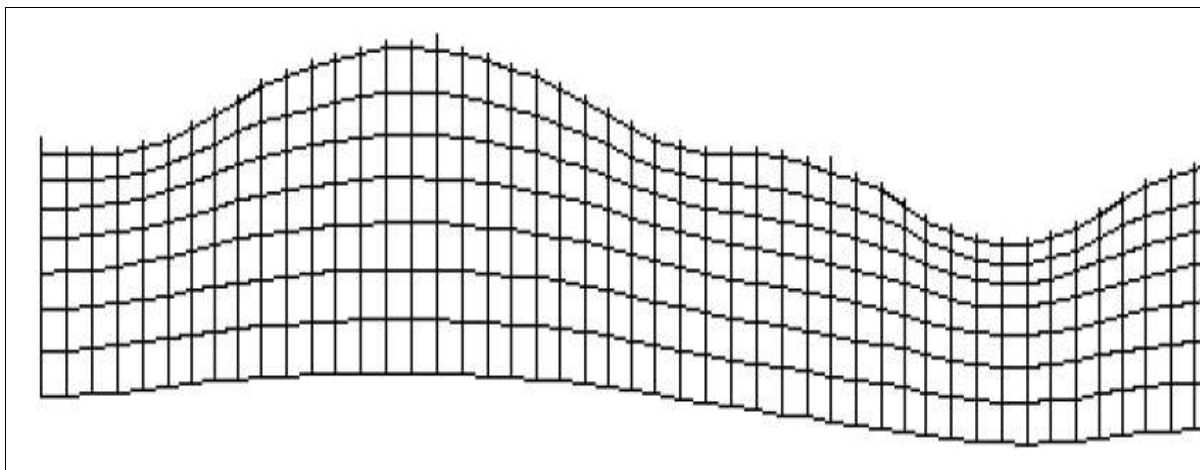
Για την ανακατασκευή της αντίστασης του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκε ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εξομαλυμένης αντιστροφής. Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή για τον πολλαπλασιαστή Lagrangian, ο οποίος καθορίζει το ποσοστό ομαλότητας του τελικού μοντέλου. Όταν το σχετικό σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων κατά την διάρκεια της αντιστροφής ήταν μικρότερο του 3%, τότε η διαδικασία αυτόματα σταματούσε καθώς το παραγόμενο ηλεκτρικό μοντέλο δεν επιδεχόταν επιπλέον βελτίωση. Για την έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένα αρχικό μοντέλο γης με ομογενή αντίσταση. Ο Ιακωβιανός πίνακας (δείχνει το ποσοστό της μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης εάν μεταβληθεί η αντίσταση κάποιας παραμέτρου) επαναυπολογιζόταν σε κάθε επανάληψη της αντιστροφής με σκοπό την μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Είναι γνωστό ότι η επιφανειακή τοπογραφία μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης (Tsouflos, et al, 1999) οπότε σε αυτή την περίπτωση θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη κατά την επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων.



Εικόνα 5.3: Τυπική μεταβολή του τοπογραφικού ανάγλυφου κατά μήκος των τομών.

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα μοντέλο του οποίου οι επιφανειακοί κόμβοι να έχουν την δυνατότητα να μετατοπίζονται πάνω ή κάτω κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση της τοπογραφίας κατά μήκος μία τομής. Με αυτόν τον τρόπο η επίδραση της τοπογραφίας ενσωματώνεται απ' ευθείας στην επαναληπτική διαδικασία της αντιστροφής (Εικ. 5.4). Σε κάθε ένα αρχείο, που αντιπροσώπευε τα δεδομένα μιας συγκεκριμένης διάταξης και τομής, ενσωματώθηκε η τοπογραφία κατά μήκος της γραμμής με την μορφή υψομέτρων σε συγκεκριμένα σημεία και εν συνεχεία τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα RES2DINV.



Εικόνα 5.4: Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού δισδιάστατου μοντέλου που περιλαμβάνει τοπογραφία (Loke, 2000).

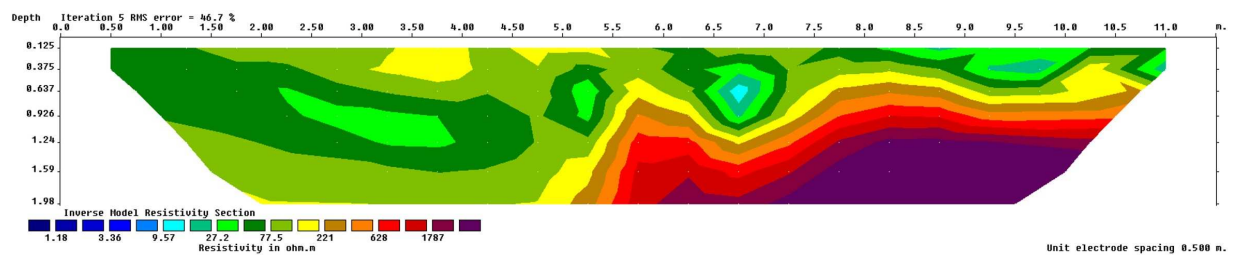
Σε γενικές γραμμές, οι διατάξεις ηλεκτροδίων (Dipole-Dipole,) που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των δεδομένων κατά μήκος των γραμμών, προέκυψαν δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα και αποτελούν μία αρκετά πιστή αναπαράσταση της πραγματικής γεωλογικής δομής της περιοχής.

Στις Εικόνες 5.5 έως 5.9 φαίνονται τα δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα της γης, τα οποία

προέκυψαν από την δισδιάστατη αντιστροφή των τομών Τα θερμά χρώματα (αποχρώσεις του κόκκινου) αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους ενώ αντίθετα τα ψυχρά χρώματα (αποχρώσεις του μπλε) δηλώνουν περιοχές με μικρές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

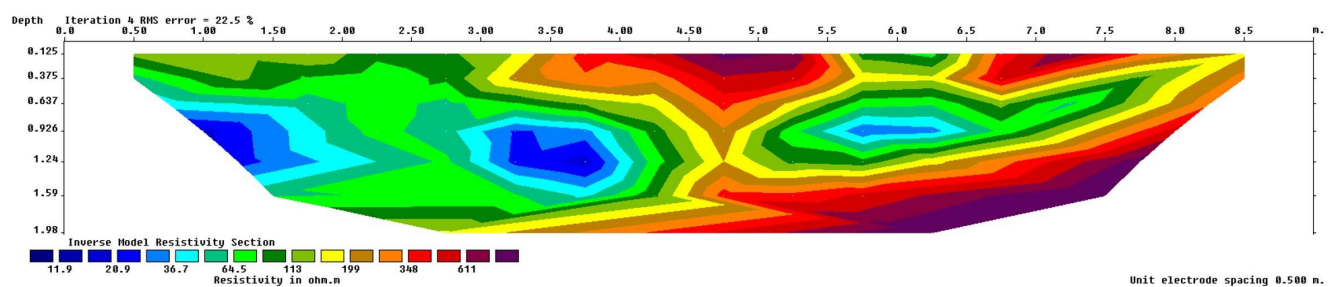
Σε γενικές γραμμές τα γεωηλεκτρικά μοντέλα κατά μήκος όλων των τομών, που προήλθαν από την επεξεργασία των ανεξάρτητων δεδομένων Διπόλου-Διπόλου παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες ως προς τους εδαφικούς σχηματισμούς που εντοπίζονται. Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψη ότι τα τελικά μοντέλα αντιστροφής αντικατοπτρίζουν σε σημαντικό βαθμό την τοπική γεωλογική πραγματικότητα.

Σχήμα (4) παρουσιάζει την τελική 2D Τομογραφία της γραμμής 1. Η μέτρηση αυτή έχει σχεδιαστεί από την παραδοχή ότι το βραχώδες υπόστρωμα θα πρέπει να εμφανιστεί και σε μικρά βάθη κοντά στο τέλος της τομής (κάτω από την πισίνα) και εξαφανίζεται κοντά στην έξοδο του σπιτιού. Αυτή η υπόθεση ήταν σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα της ανασκαφής. Η τελική εικόνα τομογραφικής δείχνουν ότι το μητρικό πέτρωμα (Marly ασβεστόλιθο, αντίσταση περίπου 1800 Ohm.m) εμφανίζεται μετά από 5,5 μέτρα από την αρχή της διατομής.



Σχήμα 4. Το αποτέλεσμα 2D γεωηλεκτρικών Τομογραφίας για τη Γραμμή 1 παρουσιάζεται.

Σχήμα (6) παρουσιάζει το τελικό 2D ανεστραμμένη εικόνα τομογραφικής αντίστασης του υπεδάφους κατά μήκος του προφίλ 2. Η εικόνα δείχνει ότι το βραχώδες υπόστρωμα απεικονίζεται σε βάθος περίπου 1,2 έως 2 μέτρα, αλλά και μία κύρια ανωμαλία αντίστασης ορίστηκε από την επιφάνεια έως το βάθος των 0,90 μ. 4,00 - 5,50 μ. κατά μήκος του προφίλ. Δύο αγώγιμες ζώνες (κορεσμένες από νερό, 12-40 Ohm.m) εντοπίστηκαν από τις δύο πλευρές της ανωτέρω ανωμαλίας.



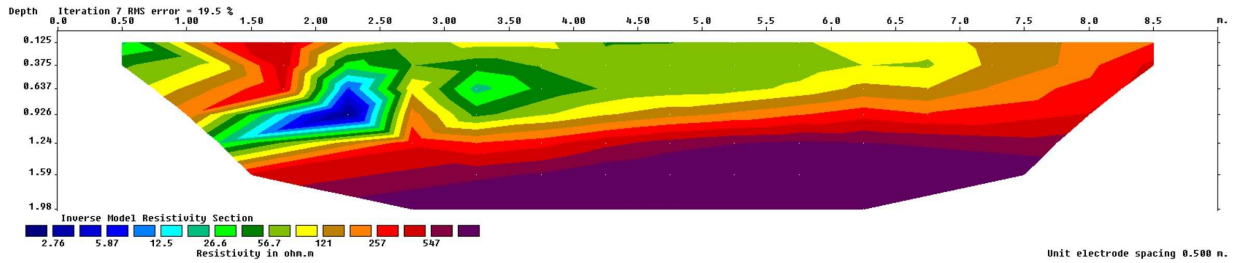
Εικόνα 6. Το αποτέλεσμα 2D γεωηλεκτρικών Τομογραφίας για τη Γραμμή 2





. Σχήμα 7. Η τοποθεσία όπου πραγματοποιήθηκε η Γραμμή 3.

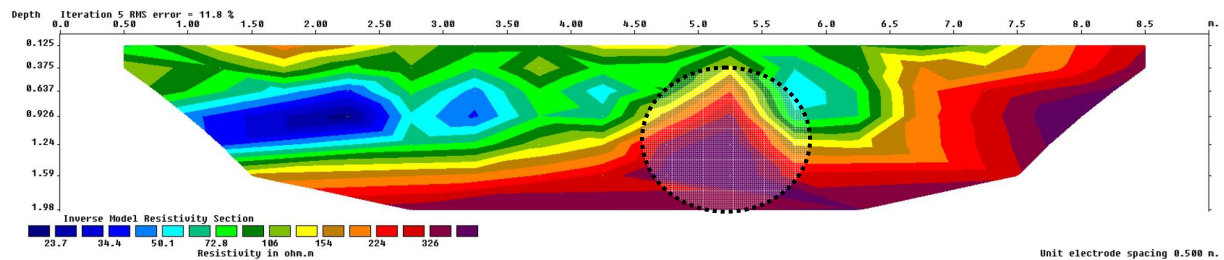
Σχήμα (8), παρουσιάζει το αποτέλεσμα της τομογραφικής ERT κατά μήκος του προφίλ 3. Το τελικό αποτέλεσμα τομογραφικής εικόνας δείχνει το βραχώδες υπόστρωμα κατά μήκος όλων των προφίλ σε βάθος περίπου 1-2 μέτρων. Μια πιο μικρή ανωμαλία αντίστασης καταγράφεται στην αρχή της διατομής (λίγα εκατοστά από τις σκάλες, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες της εικ. 7).



Σχήμα 8. Το αποτέλεσμα 2D γεωηλεκτρικών Τομογραφίας για τη γραμμή 3

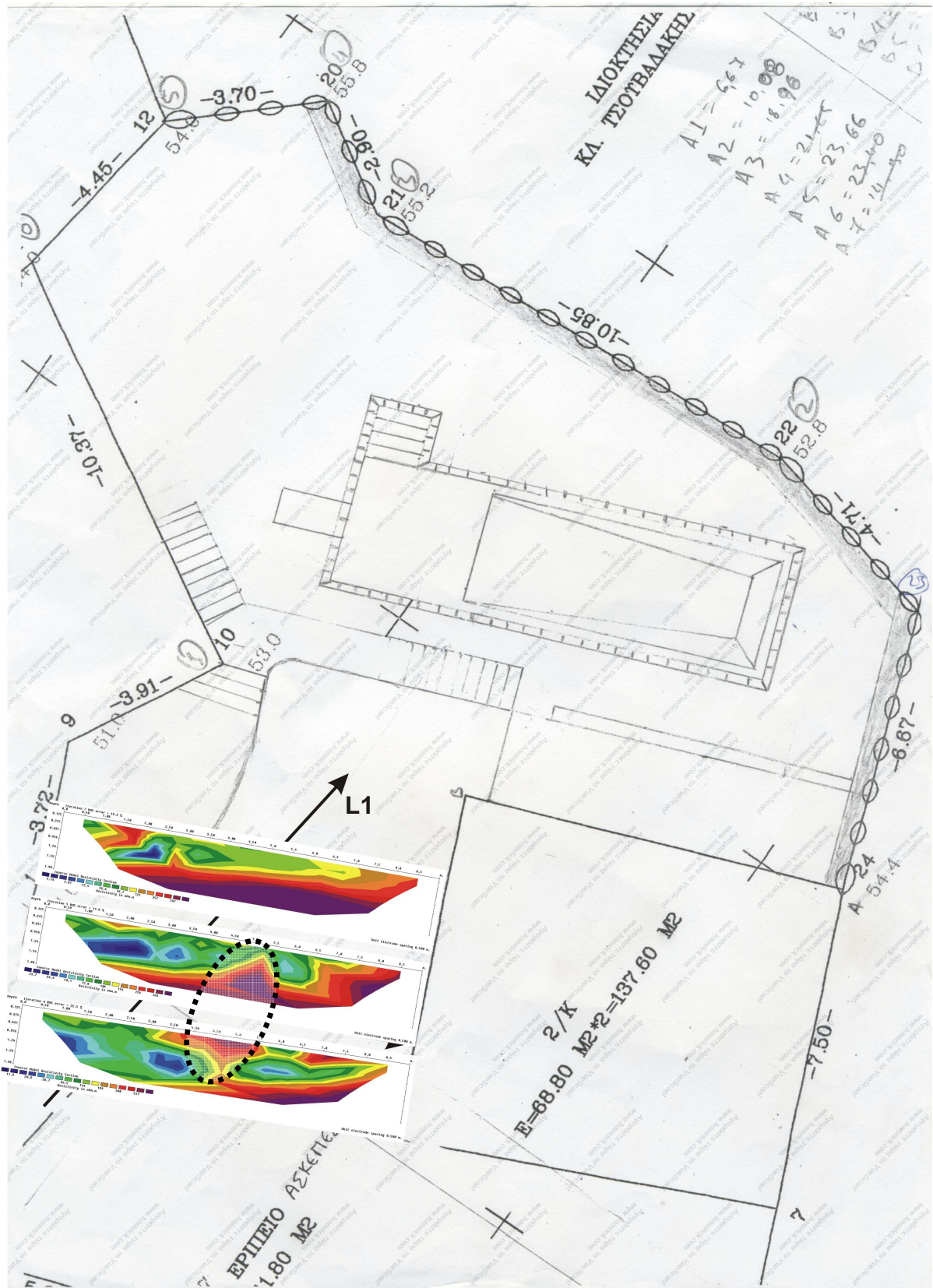


Δεδομένου ότι οι τελικές τομές των γραμμών 2 και 3 ήταν διαφορετικές (σχήματα 6 και 8), μία ακόμη ERT συλλέχθηκε παράλληλα με τις γραμμές 2 και 3 και στο μέσο της απόστασης μεταξύ τους για τον καθορισμό πιθανής υπόγειας ανωμαλίας αντίστασης που μπορεί να σχετίζεται με το στόχο του έργου (το αποχετευτικό σύστημα του παλιού σπιτιού).



Σχήμα 10. Το αποτέλεσμα 2D γεωηλεκτρικών Τομογραφίας για τη Γραμμή 4

Το βραχώδες υπόστρωμα ορίζεται σε βάθος 1,6 μέτρων και μία κύρια ανωμαλία αντίστασης με παρόμοια χαρακτηριστικά της ανωμαλίας της Γραμμής 2, εικονίζεται. Αυτή η ανωμαλία έχει πλάτος περίπου 1 μέτρο (4.05 - 5.05 μ. κατά μήκος του προφίλ) και ορίστηκε σε βάθος 0,4 μέτρα. Οι ανωμαλίες που βρέθηκαν στη Γραμμή 2 και 4 μπορεί να έχουν σίγουρη συσχέτιση και παρουσιάζεται στο σχήμα (11).



Σχήμα 11. Σύγκριση των τομών που προέκυψαν

Μετά από όλα, η πιο πιθανή τοποθεσία του παλιού αποχευτικού συστήματος στην υπό έρευνα περιοχή κατά μήκος προφίλ 2 και 4, 4,5 μέτρα από την αρχή του προφίλ, όπως φαίνεται στο

σχήμα 11 (διακεκομμένη έλλειψη).

5. Βιβλιογραφία

- Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας. 1972 Φύλλο Γρεβενά, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- deGroot-Hedlin, C., and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, twodimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55:1613-1624.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Loke, M.H. 2000. Topographic modelling in electrical imaging inversion. EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition, Glasgow, Scotland, 29 May-2 June 2000.
- Nishimura, Y., 2001. Geophysical prospection in Archaeology in D. R. Brothwell and A. M. Pollard (eds.), *Handbook of Archaeological Sciences*, pp.543-553, New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Sarris, A.. 1992, "Shallow Depth Geophysical Investigation Through the Application of Magnetic and Electric Resistance Techniques". A Ph.D. Dissertation, U. of Nebraska-Lincoln, Dept. of Physics and Astronomy, Lincoln, U.S.A. (U.M.I. Dissertation Services, A Bell & Howell Company).
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press.
- Tsourlos P. 1995. Modelling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Unpublished D. Phil. Thesis, University of York.
- Tsourlos, P., Symanski, J.E. and Tsokas, G.N. 1999. The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, 64, 1357-1363.