



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

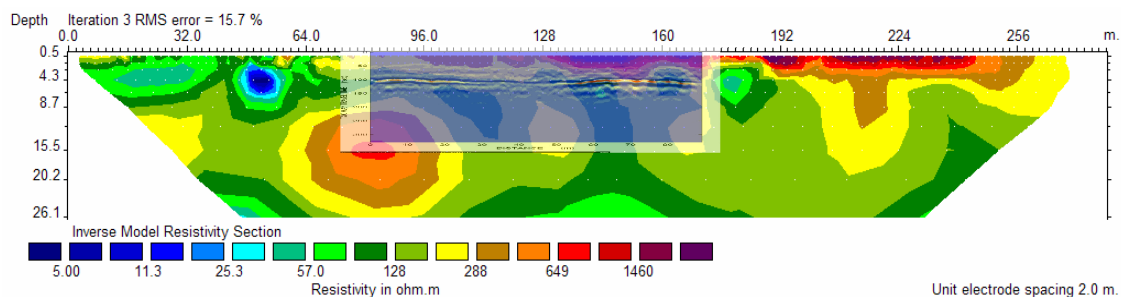
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***‘ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΤΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΕ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΧΛΩΡΙΟΜΕΝΟΥΣ
ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ ’***

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΥΛΑ

ΜΠΟΤΩΝΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



Εξεταστική επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ. (επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ Επίκουρος καθηγητής Π.Κ.

Πασαδάκης Νικόλαος, Λέκτορας Π.Κ.

ΧΑΝΙΑ

Ιούνιος 2006

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Ειδικότερα, εξετάζεται η συμβολή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ στην προσπάθεια για εντοπισμό και οριοθέτηση της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών.

Περιγράφεται ο τρόπος εξάπλωσης της ρύπανσης μέσα στο υπέδαφος, προκειμένου να γίνει κατανοητή η εφαρμογή των γεωφυσικών τεχνικών στην ανίχνευσή της χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες γεωλογικές παραμέτρους.

Ως εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα, εξετάζεται η περίπτωση ρύπανσης στην περιοχή ‘Weert’ της Ολλανδίας, όπου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα.

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε: Τον κ. Αντώνιο Βαφείδη επιβλέποντα Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ανάθεση της εργασίας, τη διαρκή καθοδήγησή του καθ’ όλα τα στάδια της εκπόνησής της και τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη.

Τους κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ Επίκουρο καθηγητή και κ. Νικόλαο Πασαδάκη Λέκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή όπου με τις επισημάνσεις και παρατηρήσεις τους συνέβαλαν στην τελική μορφή της εργασίας αυτής.

Τον υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Hamdan Hamdan για το χρόνο, την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Σπανουδάκη Ν. και στον Μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Αντωνίου Α. για τη βοήθεια που μας προσέφεραν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που ελήφθησαν κατά την διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Weert και πιο συγκεκριμένα έξι γραμμές μελέτης ηλεκτρικής τομογραφίας (ER1 – ER6) και έξι γραμμές μελέτης γεωραντάρ (GPR1 – GPR6). Η διασκόπηση πραγματοποιήθηκε το Δεκέμβριο του 2002 και το Φεβρουάριο του 2003, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος HYGEIA.

Τα δεδομένα αυτά επιδέχτηκαν επεξεργασία με τα λογισμικά πακέτα RES2DINV και GPRProV5. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών διασκοπήσεων με γεωτρήσεις οι οποίες είχαν πραγματοποιηθεί νωρίτερα στην περιοχή.

Επιδιώκεται ο προσδιορισμός της γεωλογικής στρωμάτωσης της περιοχής, η ύπαρξη τυχόν ασυνεχειών καθοριστικής σημασίας για την εξάπλωση της ρύπανσης σε μεγαλύτερα βάθη καθώς και η οριοθέτηση των πιθανών ρυπασμένων ζωνών και η ανάδειξη των περιοχών που αποτελούν τις πιθανές εστίες ρύπανσης.

Συμπεράσματα εξάγονται σχετικά με την εφαρμογή των προαναφερθέντων γεωφυσικών μεθόδων, την αποτελεσματικότητά τους στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων και το πόσο αξιόπιστα μπορεί να είναι τα αποτελέσματα αυτά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	II
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	IV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	1
1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ	2
1.3 ΜΕΛΕΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	2
1.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΝΕΡΟ.....	3
1.5 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	4
1.6 ΑΝΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	5
1.6.1 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	5
1.6.2 Γεωραντάρ	6
1.6.3 Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	6
1.6.4 Σεισμική Ανάκλαση.....	7
1.6.5 Σεισμική Διάθλαση.....	7
1.6.6 Μαγνητομετρία	7
1.6.7 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού	8
1.6.8 Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας.....	8
1.6.9 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος Γωνίας Κλίσης.....	8
1.7 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
1.8 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΤΟ WEERT	12
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12

2.2 ΣΤΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	13
2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	13
2.4 ΔΙΚΤΥΟ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	14
2.5 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	16
2.6 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	16
2.7 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ WEERT.....	26
2.8 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ UNICRE.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΑΝ ΣΤΟ WEERT ..	30
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	30
3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	30
3.2.1 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	31
3.2.2 Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος σε Ομοιογενή και Ισότροπη Γη.....	32
3.2.3 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση.....	36
3.2.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων.....	36
3.2.5 Παράγοντες Επιλογής της Κατάλληλης Διάταξης των Ηλεκτροδίων	41
3.2.6 Ηλεκτρική Τομογραφία	42
3.2.6.1 Εισαγωγή.....	42
3.2.6.2 Θεωρία.....	43
3.2.6.3 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων.....	43
3.2.6.4 Αντιστροφή των Δεδομένων	45
3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	47
3.3.1 Ιστορία του Γεωραντάρ	47
3.3.2 Εφαρμογές.....	48
3.3.3 Αρχή Λειτουργίας του Γεωραντάρ	50
3.3.4 Σχεδιασμός Διασκόπησης.....	52
3.3.5 Αξιολόγηση του Πεδίου Έρευνας.....	53
3.3.5.1 Βάθος Διείσδυσης Ακτινοβολίας και Βάθος Στόχου	53
3.3.5.2 Γεωμετρία Στόχου	54
3.3.5.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Στόχου και Μέσου Διάδοσης	55
3.3.5.4 Περιβάλλον Διασκόπησης.....	56
3.3.6 Επιλογή της Μεθόδου Διασκόπησης	57

3.3.7 Προσδιορισμός των Παραμέτρων της Διασκόπησης.....	59
3.3.7.1 Συχνότητα Εκπομπής.....	60
3.3.7.2 Ολικός Χρόνος Καταγραφής.....	61
3.3.7.3 Διάστημα Δειγματοληψίας.....	61
3.3.7.4 Βήμα Διασκόπησης.....	62
3.3.7.5 Απόσταση Κεραιών.....	62
3.3.7.6 Προσανατολισμός Κεραιών.....	63
3.3.7.7 Κατακόρυφη υπέρθεση.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	66
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	66
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	66
4.2.1 Φίλτρα.....	67
4.2.1.1 Φίλτρα Διόρθωσης ίχνους.....	67
4.2.1.2 Φίλτρο Αποκοπής Σημάτων Υποβάθρου.....	67
4.2.2 Ενίσχυση του Σήματος.....	68
4.2.2.1 Αυτόματος έλεγχος Ενίσχυσης (AGC).....	68
4.2.2.2 Εκθετική ενίσχυση σήματος λόγω απωλειών διασποράς (SEC).....	69
4.2.3 Στιγμιαία Μιγαδικά Χαρακτηριστικά των Σημάτων.....	70
4.2.3.1 Στιγμιαίο πλάτος.....	71
4.2.3.2 Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα ‘decibel’.....	71
4.2.3.3 Στιγμιαία φάση.....	71
4.2.3.4 Συνάφεια.....	72
4.2.4 Ταξινόμηση.....	72
4.2.5 Αυτόματη Ταξινόμηση.....	73
4.2.5.1 Αλγόριθμοι Αυτόματης Ταξινόμησης.....	74
4.2.6 Ταξινόμηση Κ-μέσων Τιμών.....	74
4.2.6.1 Συνένωση, Απαλοιφή και Κατάτμηση Ομάδων.....	77
4.2.7 Χάρτες Αυτοδιοργάνωσης (SOM).....	77
4.2.8 Το Λογισμικό Πακέτο GPRProV5.....	79
4.2.9 Απαιτήσεις Συστήματος - Εγκατάσταση.....	80
4.2.10 Εισαγωγή Δεδομένων – Ορισμός Παραμέτρων.....	80
4.2.11 Περιγραφή των Βημάτων που Ακολουθήθηκαν Κατά την Ταξινόμηση.....	82
4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	83

4.3.1 Γενικά.....	83
4.3.2 Το Λογισμικό Πακέτο RES2DINV.....	84
4.3.3 Εγκατάσταση.....	84
4.3.4 Περιγραφή Βημάτων	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ WEERT	88
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	88
5.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	89
5.3 ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	109
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	109
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΕΙΚΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	109
6.3 ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	127
6.3.1 Εισαγωγή.....	127
6.3.2 Εικόνες υπέρθεσης - ερμηνεία.....	128
6.4 ΧΑΡΤΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΩΝ ΖΩΝΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	146
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	146
7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	146
7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	149
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	157
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	170
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	174

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 παρατηρήθηκε αξιόλογη ανάπτυξη στις ήδη υπάρχουσες τεχνικές που εφαρμόζονταν για τη μελέτη και περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών. Αρχικά χρησιμοποιούνταν περιορισμένος αριθμός συστημάτων απεικόνισης του υπεδάφους, χαμηλής μάλιστα ποιότητας, τα οποία δεν προσέδιδαν επαρκείς πληροφορίες. Το υψηλό κόστος και τα μακροχρόνια προγράμματα οδήγησαν στην ανάπτυξη πρωτοποριακών μεθόδων στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων.

Οι γεωφυσικές τεχνικές τα τελευταία χρόνια παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση με αποτέλεσμα να εφαρμοστούν στην απεικόνιση του υπεδάφους. Το μειωμένο κόστος που χαρακτηρίζει τις μεθόδους αυτές, αλλά και το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον των εταιρειών για μελέτη των γεωλογικών δομών, κατέστησαν τις έρευνες γεωφυσικής διασκόπησης αναπόσπαστο τμήμα μεγάλων ερευνητικών προγραμμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παραδοσιακές γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονταν στην ανίχνευση μεταλλευμάτων και πετρελαίου, βρίσκουν πλέον πρόσφορο έδαφος στον εντοπισμό της υπεδάφειας ρύπανσης. Έτσι, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται ένας καινούριος κλάδος της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ο οποίος πραγματεύεται κατά κύριο λόγο περιβαλλοντικά προβλήματα και συμβάλλει στην ανίχνευση και χαρτογράφηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά.

1.2 Αποτελεσματικότητα γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα

Οι ρυπογόνες ουσίες συνήθως κατεισδύουν στα κατώτερα γεωλογικά στρώματα του υπεδάφους. Από τη στιγμή που θα ξεκινήσει η αποκατάσταση του εδάφους και αρχίσει σταδιακά η απορρύπανση, ο βαθμός και η αποτελεσματικότητα του καθαρισμού πρέπει να ελέγχονται σε τακτά διαστήματα. Οι γεωφυσικές τεχνικές επιτρέπουν την απεικόνιση του υπεδάφους, προκειμένου να διαπιστώσουν την περαιτέρω ρύπανση. Με τις πληροφορίες παράλληλα που προσδίδουν, μειώνουν αισθητά το κόστος των γεωτρήσεων, καθώς με τη διεξαγωγή τους στο αρχικό στάδιο της μελέτης διαφωτίζουν τόσο την κατάσταση της υπεδάφειας ρύπανσης, όσο και το χαρακτήρα στρωμάτωσης του υπεδάφους.

Περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως ο εντοπισμός διαρροών καυσίμου από υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, η ανίχνευση και οριοθέτηση εγκαταλελειμμένων χωματερών, η εύρεση θαμμένων απορριμμάτων, η μελέτη και κατανομή ρύπανσης (contaminant plumes) στο υπόγειο νερό, η χαρτογράφηση ρυπογόνων περιοχών και η παρακολούθηση μέτρων αποκατάστασης, αντιμετωπίζονται πλέον με μεγαλύτερη ευκολία, μειωμένο κόστος και ασφαλή αποτελέσματα με τη βοήθεια της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

1.3 Μελέτη ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών με την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων

Οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται στην ανίχνευση της υπεδάφειας ρύπανσης και τον έλεγχο της ποιότητας των υπογείων υδάτων ποικίλουν. Η επιλογή τους εξαρτάται κάθε φορά από τον επιθυμητό στόχο και τη φύση του προβλήματος που μελετάται.

Ειδικότερα, οι μέθοδοι της ηλεκτρικής αντίστασης και του γεωραντάρ είναι σε θέση να ανιχνεύσουν άμεσα την παρουσία ρύπανσης στο υπέδαφος, μετρώντας τη μεταβολή στην αγωγιμότητα του εδάφους, η οποία προκαλείται από τους ρυπογόνους παράγοντες. Αντίθετα, άλλες γεωφυσικές τεχνικές, όπως η σεισμική ανάκλαση και διάθλαση, η μαγνητομετρία και η φυσική ραδιενέργεια, δεν είναι κατάλληλα εργαλεία για την “άμεση” ανίχνευση της ρύπανσης. Εντούτοις, προσδίδουν πληροφορίες στην αναγνώριση των γεωλογικών σχηματισμών, οι οποίοι με τη σειρά τους παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της ρύπανσης.

Στις περιπτώσεις αυτές, η γεωφυσική χρησιμοποιείται ως εργαλείο “έμμεσης” ανίχνευσης της υπεδάφειας ρύπανσης. Ενδεικτικά αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις στις οποίες η ρύπανση υπογείου νερού είτε ανιχνεύεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, ώστε να μη μπορεί να επηρεάσει την ηλεκτρική αντίσταση του νερού, είτε δεν επηρεάζει αισθητά καμία από τις φυσικές ιδιότητες του πετρώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η οργανική ρύπανση υπό μορφή διαλυμένης φάσης (π.χ. υγρό πετρέλαιο, βενζίνη, τετραχλωράνθρακας). Έτσι συμβάλλουν στον εντοπισμό της ρύπανσης υπογείου νερού με έναν πιο έμμεσο τρόπο ή τουλάχιστον εξασφαλίζεται καλύτερη καθοδήγηση ως προς τη θέση εγκατάστασης των γεωτρήσεων παρακολούθησης.

1.4 Παρουσία οργανικών ρύπων στο νερό

Το νερό που βρίσκεται στο υπέδαφος αποτελεί πολύτιμη φυσική πηγή πλούτου. Ο έλεγχος τόσο της ποιότητας, όσο και της ποσότητάς του μέσα στους υπόγειους ταμιευτήρες είναι πολύ σημαντικός.

Η λειτουργία βαριάς βιομηχανίας, στρατιωτικών βάσεων και διυλιστηρίων πετρελαίου συχνά οδηγεί σε συσσώρευση ρυπαντών (π.χ. υδρογονανθράκων) στο υπέδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ρύπανση του υπεδάφους, καθώς και την «υποβάθμιση» της αξίας του υπογείου νερού. Για το λόγο αυτό, καθίσταται ζωτικής σημασίας η συνέχεια της θεμελιώδους έρευνας των υπογείων υδάτων και του ρόλου τους στις γεωλογικές διαδικασίες (Meju, 2000).

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 η βενζίνη.
- 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.

Αν και αυτό το απλό σύστημα ταξινόμησης βασίζεται αποκλειστικά στην πυκνότητα του ρυπαντή, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο όσον αφορά την εκτίμηση της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων (βλέπ. Παράρτημα Α).

1.5 Γεωφυσική και περιβάλλον

Ατυχήματα ή ανεξέλεγκτη απόρριψη των αποβλήτων μπορούν να προκαλέσουν σημαντική συγκέντρωση ρύπανσης στο υπέδαφος. Το γεγονός αυτό θέτει αυστηρή απειλή για τους υπόγειους υδροφορείς. Η ρύπανση LNAPL και DNAPL εμφανίζεται στο υπέδαφος ως καθαρά υγρή οργανική φάση (*pure-phase organic liquid*), ως φάση ατμών (*vapor phase*) στην ακόρεστη ζώνη (*vadose zone*), καθώς και σε μικρές συγκεντρώσεις υπό μορφή διαλυμένης φάσης (*dissolved phase*) (Meju, 2000). Η παρουσία διαλυμένων οργανικών φάσεων στο πόσιμο νερό, ακόμα και σε πολύ χαμηλά επίπεδα (ppb), είναι εξαιρετικά επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι έχουν καθιερωθεί πλέον στην έρευνα ταμιευτήρων νερού. Η περιβαλλοντική γεωφυσική εμφανίζει τεράστια δυνατότητα στη γρήγορη, μη-καταστρεπτική αξιολόγηση των ορίων ρυπασμένης περιοχής, καθώς επίσης και στη χαρτογράφηση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους.

Καινούρια επιτεύγματα στην ψηφιακή τεχνολογία και τη μαθηματική μοντελοποίηση έχουν οδηγήσει σε βελτιωμένες τεχνικές απόκτησης δεδομένων και στην άριστη ερμηνεία τους. Συγκεκριμένα, καινούριες εφαρμοζόμενες τεχνικές συλλογής και επεξεργασίας στις μεθόδους του γεωραντάρ, της ρηχής σεισμικής ανάκλασης, της επαγόμενης πόλωσης, της ηλεκτρικής αντίστασης και των παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κατάφεραν να ενισχύσουν τη διακριτική τους ικανότητα στην ανίχνευση υπόγειων στόχων βελτιώνοντας, έτσι, θεαματικά τα αποτελέσματα (Meju, 2000).

Οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να απεικονίσουν το υπέδαφος στην περιοχή ανάμεσα από γεωτρήσεις παρακολούθησης και να προσθέσουν πολύτιμες στρωματογραφικές πληροφορίες πάνω σε οποιοδήποτε γεωλογικό μοντέλο της ρυπασμένης περιοχής. Σε συνδυασμό δε με γεωχημικές μετρήσεις, υπάρχει άριστη δυνατότητα για την καλύτερη επιλογή της θέσης των γεωτρήσεων και των συνθηκών πραγματοποίησής τους. Οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν πλέον αυτοτελή τμήματα των προγραμμάτων αποκατάστασης του περιβάλλοντος και πολύτιμα εργαλεία γι' αυτήν.

1.6 Αναφορά και συνοπτική περιγραφή των γεωφυσικών μεθόδων

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται για την ανίχνευση και οριοθέτηση περιοχών ρύπανσης. Αυτές περιλαμβάνουν:

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

Θα πρέπει να σημειωθεί, βέβαια, ότι σκοπός της παρούσας αναφοράς δεν είναι η εκτενής παρουσίαση των γεωφυσικών μεθόδων, αλλά μία συνοπτική περιγραφή τους προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει τις βασικές αρχές λειτουργίας τους. Η τεχνική του Γεωραντάρ και της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

1.6.1 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους. Το μέγεθος που μετράται είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η κατανομή των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γής (γεωηλεκτρική δομή). Η ανάλυση αυτή επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διαβιβάζεται 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 που εφαρμόζονται είναι αυτές των ‘διπόλου-διπόλου’, ‘Schlumberger’ και ‘Wenner’ (Hamdan, 2002).

1.6.2 Γεωραντάρ

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 του πομπού.

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)

1.6.3 Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Η μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων βασίζεται στη μέτρηση της απόκρισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το οποίο δημιουργείται 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 και μετράει τη χρονική μεταβολή της έντασής του (Σπανουδάκης, 2001).

1.6.4 Σεισμική Ανάκλαση

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, τα οποία παράγονται τεχνητά στην επιφάνεια της γης. Τα κύματα κατά τη διαδρομή τους μέσα 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).

1.6.5 Σεισμική Διάθλαση

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).

1.6.6 Μαγνητομετρία

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 κτίρια, σιδερένιες κατασκευές, οχήματα κτλ (Σπανουδάκης, 2001).

1.6.7 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού

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 κατάλληλα βολτόμετρα ή γαλβανόμετρα.

Οι μετρήσεις της τάσης πραγματοποιούνται με δύο βασικούς τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, η τάση υπολογίζεται κατά μήκος γραμμής μελέτης. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων διατηρείται σταθερή και στο τέλος υπολογίζεται η βαθμίδα του δυναμικού. Εναλλακτικά, 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).

1.6.8 Μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης

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).

1.6.9 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος Γωνίας Κλίσης

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. Ο δέκτης VLF είναι ένα

εύχρηστο όργανο μικρών διαστάσεων. Αποτελείται από δέκτη ο οποίος συντονίζεται στις συχνότητες των πομπών. (Παπαζάχος, 1986).

1.7 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- Η παρουσίαση αποτελεσμάτων γεωφυσικών μελετών που σχετίζονται με τον εντοπισμό και την οριοθέτηση της ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών.
- Η επεξεργασία των δεδομένων της διασκόπησης στο Weert με τα εξής λογισμικά πακέτα: α)το πρόγραμμα RES2DINV για την επεξεργασία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας για τη δημιουργία τομών του υπεδάφους, β)το σύστημα pulseEKKO1000 για την καταγραφή των τομών του γεωραντάρ και το MATLAB για την εφαρμογή φίλτρων στις προκύπτουσες τομές.
- Η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων και η σύγκριση των μεθόδων της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ καθώς και η δυνατότητα παροχής συνδυασμένων αποτελεσμάτων.

Επιδιώκονται:

- Η περιγραφή της μετανάστευσης των οργανικών ρύπων μέσα στο υπέδαφος.
- Η κατανόηση και ανάδειξη της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα.
- Η βελτίωση της απεικόνισης των αρχικών καταγραφών του γεωραντάρ και η βελτιστοποίηση των πληροφοριών που παρέχουν οι αντίστοιχες εικόνες της ηλεκτρικής τομογραφίας.
- Η ερμηνεία των καταγραφών για την οριοθέτηση περιοχών ισχυρών ανακλάσεων.
- Ο προσδιορισμός των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους, όπως στρωμάτωση και βάθος υδροφόρου ορίζοντα.
- Η οριοθέτηση του αργιλικού στρώματος και ο εντοπισμός πιθανών ασυνεχειών του δηλαδή αν το συγκεκριμένο στρώμα είναι συνεχές.
- Η ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και η συσχέτισή τους με πιθανές αιτίες ρύπανσης .
- Ο προσδιορισμός μιας δεύτερης πιθανής θέσης ρύπανσης εκτός εργοστασίου.

- Η συσχέτιση των συμπερασμάτων που απορρέουν από την παρούσα γεωφυσική έρευνα με στοιχεία που προκύπτουν από άλλες έρευνες και πραγματοποιήθηκαν στον ίδιο χώρο μελέτης.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση των μεθόδων του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων.

1.8 Δομή διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1: Το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται τις εφαρμογές των γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα. Αναφέρεται η συνεισφορά παραδοσιακών γεωφυσικών τεχνικών στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων και στην ανίχνευση ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτονται όλα τα γεωτρητικά στοιχεία που συλλέχθηκαν κι επεξεργάστηκαν καθώς και η ερμηνεία τόσο αυτών των στοιχείων όσο και των γεωφυσικών στοιχείων από παλαιότερες εκθέσεις που υπήρχαν προς διάθεση από τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από τα ινστιτούτα που συμμετείχαν στο χώρο εργασίας της περιοχής.

Κεφάλαιο 3: Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στη θεωρία των γεωφυσικών μεθόδων δηλαδή περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του γεωραντάρ.

Κεφάλαιο 4: Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι μέθοδοι, η επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ και τα λογισμικά πακέτα RES2DINV και GPRProV5 αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων από την ηλεκτρική τομογραφία και το γεωραντάρ. Επίσης πραγματοποιήθηκε ένας πρώτος σχολιασμός των γεωφυσικών εικόνων.

Κεφάλαιο 6: Με το συνδυασμό των αποτελεσμάτων έγινε η ερμηνεία των γεωφυσικών εικόνων και εξήχθησαν κρίσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη γεωλογία

της περιοχής, την συνέχεια του στρώματος αργίλου, καθώς και τις πιθανές θέσεις ρύπανσης..

Κεφάλαιο 7: Το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τα συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή της τεχνικής της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων εδαφών και υπογείων νερών και πιο συγκεκριμένα με τη συνεισφορά των μεθόδων αυτών στην επίλυση του προβλήματος της ρύπανσης στην υπό μελέτη περιοχή Weert της Ολλανδίας.

Πίνακας 1.1 Συμβολισμοί

ΤΕΧΝΙΚΗ	Συμβολισμός	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
Electrical Resistivity	ER	Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης
Ground Penetrating Radar	GPR	Μέθοδος Γεωραντάρ
Spectral Analysis of Surface Waves	SASW	Φασματική Ανάλυση Κυμάτων Επιφάνειας
Self Potential	SP	Φυσικό Δυναμικό
Gas Analysis		Μέθοδος Ανάλυσης αερίου (μέσω χρωματογράφου)

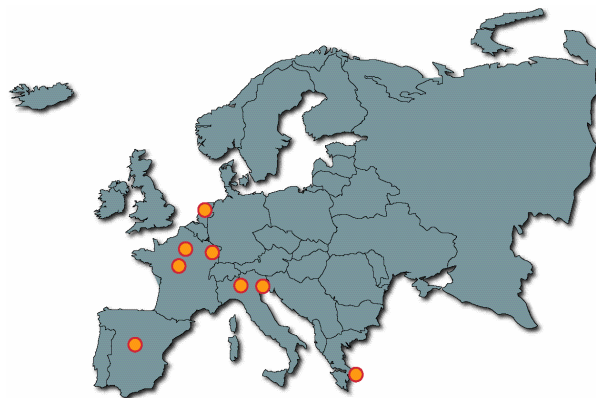
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ & ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΤΟ ‘WEERT’

2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε επεξεργασία δεδομένων από μελέτη που έλαβε χώρα στην Ολλανδία. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των εργασιών του ερευνητικού προγράμματος HYGEIA (HYbrid Geophysical technology for the Evaluation of Insidious contaminated Areas). Οι φορείς του προγράμματος HYGEIA που συνεργάστηκαν στην γεωφυσική έρευνα της περιοχής μελέτης του Weert είναι οι ακόλουθοι:

- Πανεπιστήμια: UNICRE (Πολυτεχνείο Κρήτης, Ελλάδα, Γεωφυσική Ερμηνεία Δεδομένων), Πολυτεχνείο Μιλάνου (Ιταλία), Πανεπιστήμιο Τεργέστης (Ιταλία), Πανεπιστήμιο Στρασβούργου (Γαλλία).
- Δημόσια Ερευνητικά Ιδρύματα: BRGM (Γαλλικό Ινστιτούτο Γεωλογικών Ερευνών, ER, SP, SASW, Gas Analysis), TNO (Ολλανδία, συντονισμός, GPR, ER), Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (Ιταλία).
- Βιομηχανία / Τελικοί χρήστες: URS (Ισπανία), Consorzio per lo Sviluppo industriale di Monfalcone (Ιταλία).



Σχήμα 2.1 Η συνεργασία του προγράμματος HYGEIA.

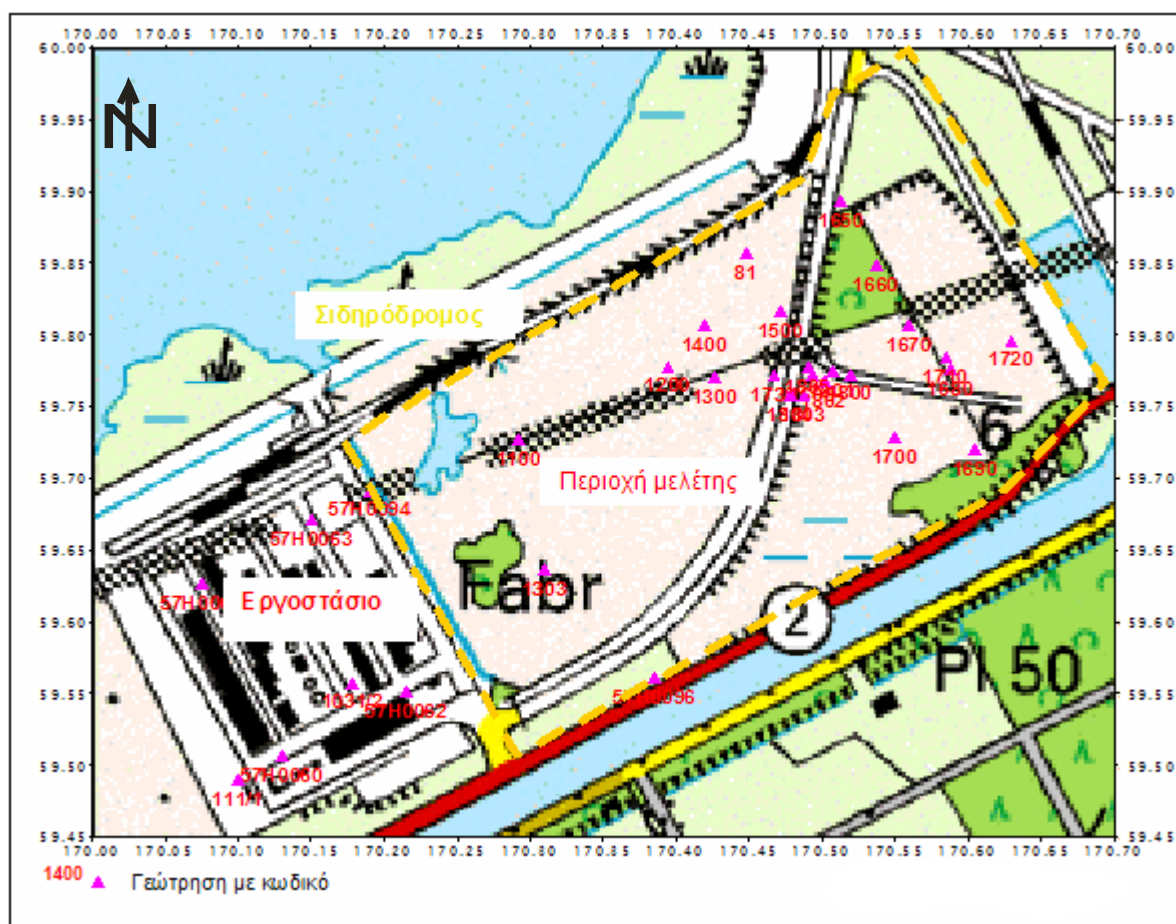
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο προέρχονται από τις τεχνικές εκθέσεις για το Weert των Δημόσιων Ερευνητικών Ιδρυμάτων TNO, BRGM και του πολυτεχνείου Κρήτης (UNICRE). Επίσης η ανάλυση των γεωτρήσεων (λιθολογία και εντοπισμός ρύπων από τη δειγματοληψία) προέρχεται από την τεχνική έκθεση της εταιρείας Tauw η οποία και πραγματοποίησε τις γεωτρήσεις.

2.2 Στόχος μελέτης

Ο στόχος της μελέτης ήταν να απεικονιστεί με τη χρήση γεωφυσικών τεχνικών το στρώμα αργίλου κάτω από πλούμιο ρύπανσης και επίσης να προσδιοριστεί και να οριοθετηθεί πιθανή δεύτερη πηγή ρύπανσης έξω από το εργοστάσιο.

2.3 Περιγραφή περιοχής

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται περίπου 6 χλμ. νοτιοδυτικά του Weert στο νότιο μέρος των Κάτω Χωρών κοντά στα σύνορά τους με το Βέλγιο (Σχήμα 2.2). Η περιοχή μελέτης είναι κατά προσέγγιση 600 μ. X 250 μ. Στο νοτιοανατολικό όριό της βρίσκεται εργοστάσιο και στα νοτιοδυτικά δίπλα στο εργοστάσιο υπάρχει μεταλλικός φράκτης. Η περιοχή καλύπτεται από θάμνους (~70%) και έλη (~10%). Από τη περιοχή διέρχονται μικροί δρόμοι και σιδηροδρομική γραμμή (βορειοδυτικά). Υπάρχουν υπόγεια καλώδια τροφοδοσίας ρεύματος που βρίσκονται κυρίως κατά μήκος του φράκτη, των δρόμων και της σιδηροδρομικής γραμμής. Επιπλέον, υπάρχει μεταλλικός σωλήνας μεταφοράς αερίου, υψηλής πίεσης του οποίου η θέση δεν είναι γνωστή.



Σχήμα 2.2 Χάρτης της περιοχής μελέτης όπου εμφανίζονται το δίκτυο των γεωτρήσεων και το εργοστάσιο.

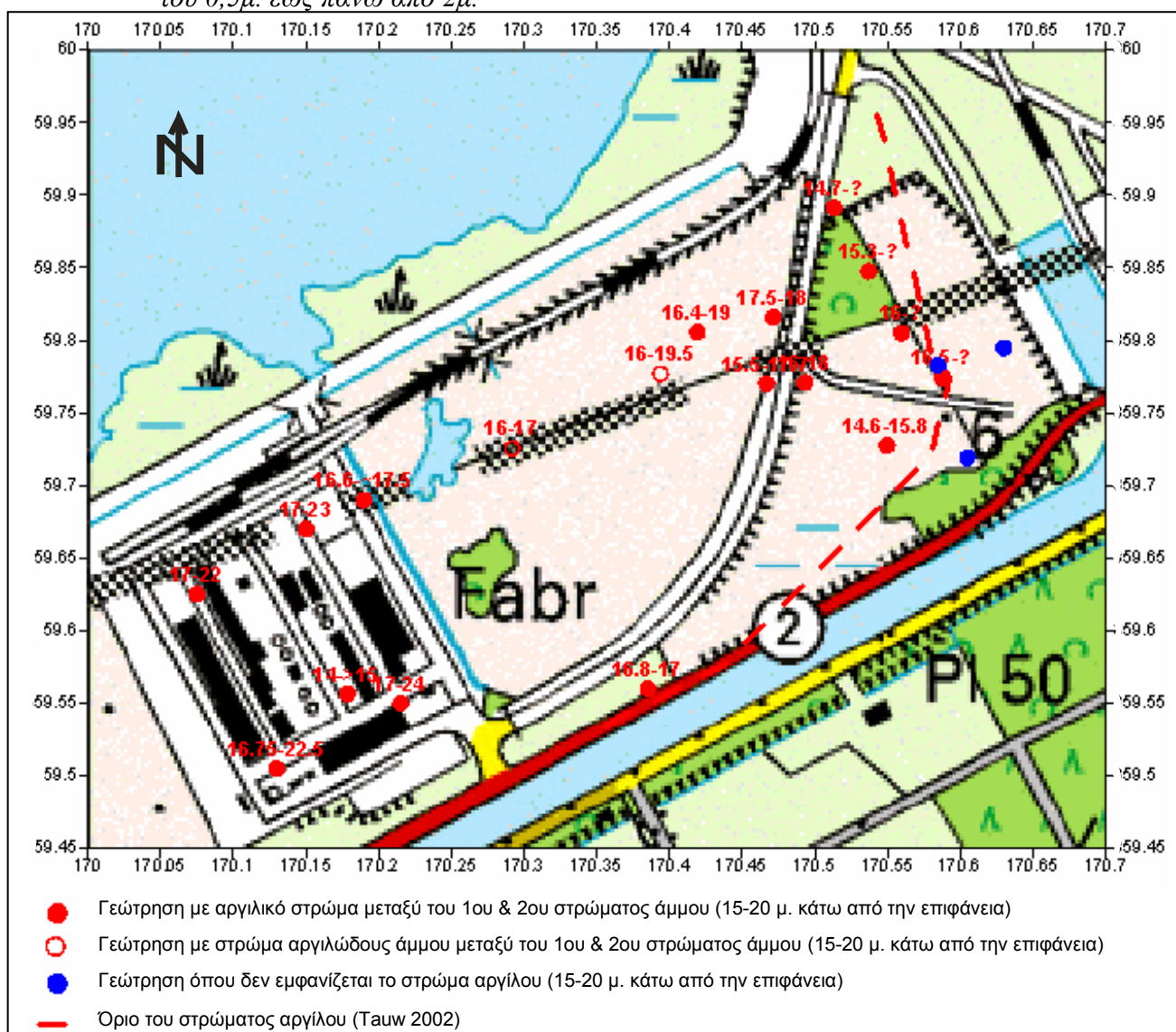
2.4 Δίκτυο γεωτρήσεων

Το δίκτυο των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων περιλαμβάνει περισσότερες από 20 γεωτρήσεις (Σχήμα 2.2). Περίπου 15 από αυτές περιέχουν φίλτρα από τις οποίες έχουν ληφθεί δείγματα νερού. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται πληροφορίες για τους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίες προέκυψαν από τις γεωτρήσεις. Το στρώμα αργίλου (σε βάθος 16-19 μ.) μεταξύ του πρώτου και δεύτερου στρώματος άμμου εμφανίζεται κατά τόπους στην περιοχή μελέτης. Πιθανότατα να υπάρχουν φακοί αργίλου πλάτους μέχρι 100 μ. (Hetterschijt et. al. 2001). Τα διαθέσιμα στοιχεία των γεωτρήσεων δεν είναι αρκετά ώστε να χαρτογραφήσουν τους μεμονωμένους φακούς αργίλου. Το σχήμα 2.3 δείχνει, τις γεωτρήσεις, στις οποίες εμφανίζεται το αργλικό στρώμα.

Πίνακας 2.1 Πληροφορίες για τους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίες προέκυψαν από τις γεωτρήσεις (Hetterschijt et.al. 2001).

Βάθος [m]	Λιθολογία	Περιγραφή
0-5	Άμμος, αργιλώδης άμμος, τοπικά στρώματα αργίλου	Επιφανειακό Στρώμα
5-16	Χονδρόκοκκη άμμος, τοπικά λεπτό στρώμα αργίλου	1 ^ο Στρώμα Άμμου
16-19	Αργίλος	Στρώμα Αργίλου ¹
> 19	Χονδρόκοκκη άμμος με αμμοχάλικο	2 ^ο Στρώμα Άμμου

¹ Το στρώμα αργίλου εμφανίζεται κατά τόπους και το πάχος ποικίλλει από λιγότερο του 0,5μ. έως πάνω από 2μ.



Σχήμα 2.3 Όρια του αργιλικού στρώματος που παρεμβάλλεται μεταξύ του 1ου και 2ου στρώματος άμμου και βρίσκεται σε βάθος 16-19 μ.

2.5 Υδρογεωλογικά στοιχεία

Στη συγκεκριμένη περιοχή ο φρεάτιος ορίζοντας βρίσκεται αρκετά ρηχά, σχεδόν προσεγγίζει την επιφάνεια της γής. Όμως το πόσιμο νερό προέρχεται από τον υδροφόρο ορίζοντα που βρίσκεται σε βάθος 19μ. Το υπερκείμενο αυτού στρώμα αργίλου είναι υδατοστεγανό πράγμα πολύ σημαντικό γιατί παρεμποδίζει την προς τα κάτω εξάπλωση της ρύπανσης.

Παρατηρούνται επομένως δύο υδροφόρα στρώματα. Το πρώτο εκτείνεται από τα 5-16 μ. και αποτελεί το ρηχό υδροφορέα, ενώ το δεύτερο βρίσκεται στα 19 μ. και αποτελεί τον βαθύτερο υδροφορέα. Ο πρώτος βρίσκεται μεταξύ του ανώτερου αργλικού στρώματος (2-5 μ.) που εμφανίζεται με τη μορφή φακών και ενός σχεδόν συνεχούς αργλικού στρώματος (16-19 μ.).

2.6 Καθορισμός Προβλήματος

Κοντά στο εργοστάσιο δημιουργήθηκε πλούσιο ελαφρώς ρυπασμένων υπόγειων νερών (πάνω από τα επιτρεπτά όρια που ισχύουν στην Ολλανδία) (Σχήμα 2.4). Σύμφωνα με τα δείγματα υπόγειου νερού που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις στην υπό μελέτη περιοχή, βρέθηκε ότι οι κύριοι ρύποι είναι τριχλωρομεθάνιο (TRI) γνωστό και ως χλωροφόρμιο, του οποίου ο μοριακός τύπος είναι CHCl_3 και τετραχλωροαιθένιο (PCE ή PER) με μοριακό τύπο C_2Cl_4 . Αναλυτική περιγραφή της λιθολογικής σύστασης των δειγμάτων από τις γεωτρήσεις παρατίθεται στον πίνακα 2.2 ο οποίος προέρχεται από τις τεχνικές εκθέσεις των Tauw και TNO. Τα δείγματα αυτά ταξινομήθηκαν σε έξι στρώματα ανάλογα με την λιθολογική σύσταση και το βάθος που εμφανίζονται.

Πίνακας 2.2 Λιθολογική σύσταση των δειγμάτων και περιεκτικότητα σε ρύπους των δειγμάτων νερού

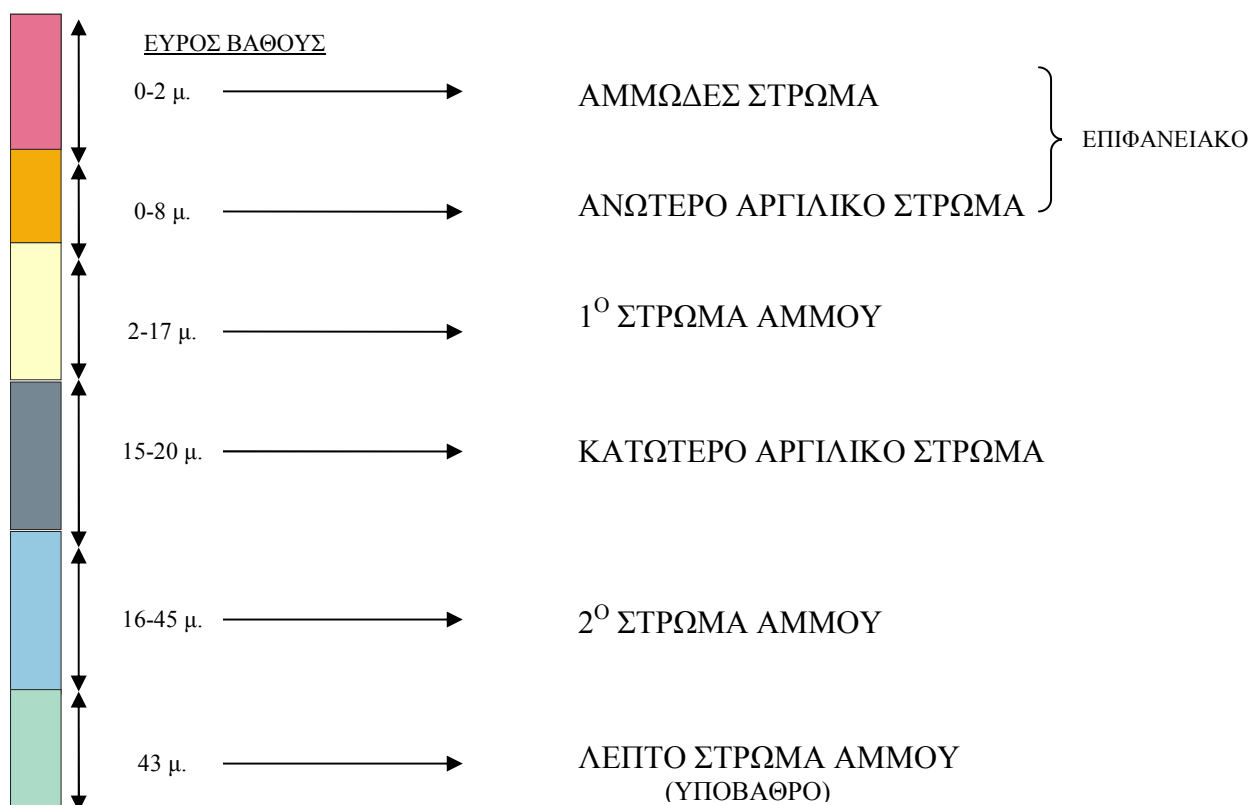
Description	Pollution							
	PER [ug/l]				TRI [ug/l]			
	05/02/02	08/12/02	09/02/02	30/09/02	05/02/02	08/12/02	9/2/2002	30/09/02
grinded tar	0,5				12			
sd, brown	<0,1				0,1			
sd, green								
clayey sd, green								
sd + brown coal								
loamy sd								
moderate fine sd								
coarse sd with moderate fine gravel								
moderate fine sd								
moderate coarse sd with moderate fine gravel								
moderate coarse sd								
moderate coarse sd with moderate coarse gravel								
moderate coarse sd with moderate fine gravel								
clay								
black earth								
sd								
clayey sd								
moderate coarse sd with gravel								
coarse sd with gravel								
fine sd, clayey								
moderate coarse sd								
fine sd, clayey								
fine sd								
black earth	<0,1				<0,1			
sd	14	0,8			2000	19		
clayey sd	3,1	<0,1			35	<0,4		
sd								
moderate coarse sd with gravel								
coarse sd with gravel								
fine sd, clayey								
fine sd								
fine sd with stones								
fine sd, clayey								
fine sd with stones								
moderate fine sd, silty	<0,1				<0,1			
sandy loam								
moderate coarse sd, silty								
sd								
silty sd								
coarse sd								
fine sd								
silty clay								
moderate fine sd, some gravel								
coarse sd, some gravel								
fine sd, silty								
antropogenic soil								
fine sd								
silty clay								
moderate coarse sd								
fine sd								
antropogenic soil								
fine sd								
moderately coarse sd								
silty clay								
coarse sd, some gravel								
moderately fine sd								
moderately coarse sd								
fine silty sd								
antropogenic soil								
moderately coarse sd								
moderately coarse sd, some gravel								
silty clay								
sd with gravel								
moderately coarse sd								
coarse sd with some gravel								

borehole code	borehole no	depth top [m]	depth bottom [m]	Description	Pollution							
					PER [ug / l]				TRI [ug / l]			
					05/02/02	08/12/02	09/02/02	30/09/02	05/02/02	08/12/02	9/2/2002	30/09/02
57H0063	8	44,5	46,0	silty sd	NO DATA AVAILABLE							
57H0094	9	0,0	2,2	clayey sd								
		2,2	2,6	silty clay								
		2,6	3,4	silty sd								
		3,4	5,8	silty clay								
		5,8	16,6	sd with some gravel and silt								
		16,6	17,3	clay								
		17,3	18,3	silty sd,some clay								
		18,3	18,8	silty clay								
		18,8	23,0	moderately coarse sd								
57H0096	10	0,0	2,4	moderately coarse sd								
		2,4	6,3	loam								
		6,3	7,6	moderately coarse sd								
		7,6	8,6	sandy gravel								
		8,6	16,2	sd with gravel								
		16,2	16,8	sandy gravel								
		16,8	17,0	silty clay								
		17,0	20,9	silty sd								
		20,9	23,0	moderately coarse sd								
1400	11	0,0	1,0	moderately fine sd	0,2				4,7			
		1,0	2,5	silty clay	0,4				9,1			
		2,5	10,4	silty sd	0,5				14			
		10,4	16,5	silty sd with gravel								
		16,5	19,0	silty clay								
		19,0	21,0	silty sd								
		21,0	25,5	silty sd with gravel								
1300	12	0,0	0,5	moderately fine sd	2,1				43			
		0,5	2,4	silty clay	24	<0,1			4300	<0,4		
		2,4	6,0	moderate fine sd, silty		1,7				5,5		
		6,0	15,5	silty sd with gravel								
1500	13	0,0	9,1	silty fine sd	1,5				12			
		9,1	17,5	moderately fine sd, silty with gravel	7,3				150			
		17,5	18,0	silty clay	4,3				30			
		18,0	23,1	silty sd								
		23,1	25,0	coarse sd, silty with some gravel								
1600	14	0,0	16,0	silty sd	13		0,1		190		1,8	
		16,0	18,0	silty clay	220	8,7	9,1	300	6900	22	23	8400
		18,0	23,0	silty sd	23	200	5,2	180	3100	3500	36	3800
		23,0	23,5	silty sd with gravel								
1650	15	0,0	8,2	fine silty sd	<0,1				<0,1			
		8,2	14,2	coarsy silty sd with gravel								
		14,2	14,7	silty clay								
1660	16	0,0	1,3	silty fine sd	<0,1				<0,1			
		1,3	1,8	silty clay	<0,1				<0,1			
		1,8	8,4	silty sd								
		8,4	14,7	coarse silty sd with some gravel								
		14,7	15,3	silty sd								
		15,3	15,5	silty clay								
1680	17	0,0	1,1	fine silty sd	<0,1				<0,1			
		1,1	3,7	silty clay	<0,1	<0,1			<0,1	<0,1		
		3,7	5,8	sandy clay								
		5,8	8,4	silty sd								
		8,4	16,5	coarse silty sd with some gravel								
		16,5	16,7	silty clay								
1670	18	0,0	1,2	silty sd	<0,1				<0,1			
		1,2	3,4	silty clay	5,2				130			
		3,4	5,2	sandy clay								
		5,2	8,7	silty coarse sd								
		8,7	16,0	silty coarse sd with gravel								
		16,0	16,2	silty clay								
1690	19	0,0	1,2	fine silty sd	<0,1				<0,1			
		1,2	1,7	sandy clay	<0,1				<0,1			
		1,7	8,1	silty sd								
		8,1	17,8	silty sd with gravel								
		17,8	20,0	silt coarse sd								

borehole code	borehole no	depth top [m]	depth bottom [m]	Description	Pollution							
					PER [ug / l]				TRI [ug / l]			
					05/02/02	08/12/02	09/02/02	30/09/02	05/02/02	08/12/02	9/2/2002	30/09/02
1700	20	0,0	1,8	fine silty sd	<0,2				<0,5			
		1,8	2,0	silty clay	0,2				<0,1			
		2,0	7,8	fine silty sd	0,5				0,4			
		7,8	13,0	silt y sd with gravel								
		13,0	14,6	coarse silty sd								
		14,6	15,8	silty clay								
		15,8	17,0	coarse silty sd with some gravel								
		17,0	20,0	silty sd								
1710	21	0,0	1,2	fine silty sd	<0,1			<0,1	<0,1	0,3		
		1,2	3,7	silty clay								
		3,7	8,5	sandy clay								
		8,5	16,5	silty sd with gravel								
		16,5	16,6	sandy clay								
		16,6	20,0	silty sd								
1720	22	0,0	1,6	fine silty sd	<0,1				<0,1			
		1,6	3,8	silty clay	<0,1				<0,1			
		3,8	7,6	silty sd	0,4				0,4			
		7,6	18,5	coarse silty sd with some gravel								
		18,5	20,0	silty sd								
81	23			no description made	<0,1				<0,1			

Υψηλές τιμές ρύπανσης, Πολύ υψηλές τιμές ρύπανσης

Στην 5^η στήλη του πίνακα 2.2 και σύμφωνα με τη λιθολογική σύσταση τα δείγματα ταξινομήθηκαν στα παρακάτω εδαφικά στρώματα (χρωματική κλίμακα αλλά και εύρος βάθους κάθε στρώματος):



Είναι παραδεκτό πως είναι δύσκολο να γίνει κατανοητή η διαφορά μεταξύ "αμμώδους αργίλου" και "ιλυώδους άμμου" ή μεταξύ "συγκρατημένα χονδροειδούς άμμου" και "συγκρατημένα χονδροειδούς άμμου με αμμοχάλικο". Επίσης μερικά από τα προαναφερθέντα στρώματα είναι πάρα πολύ λεπτά για να διακριθούν και απεικονιστούν με γεωφυσικές μεθόδους. Τελικά, καθορίστηκαν τα παρακάτω στρώματα:

- 1) Ένα επιφανειακό αμμώδες στρώμα το οποίο εμφανίζεται σε βάθος έως 2 μ. (με ροζ στον πίνακα 2.2)
- 2) Ένα επιφανειακό αργιλικό στρώμα με άμμο ορατό στα έλη. Εμφανίζεται σε βάθος έως 8 μ (με πορτοκαλί στον πίνακα 2.2)
- 3) Ένα στρώμα άμμου με χαλίκια (1^ο στρώμα άμμου) που αποτελεί το ανώτερο υδροφόρο στρώμα. Βάθος από 2 μ.έως το μέγιστο 17 μ (με κίτρινο στον πίνακα 2.2)
- 4) Ένα βαθύτερο αργιλικό στρώμα. Βάθος μεταξύ 15 μ. έως 20 μ (με γκρι στον πίνακα 2.2)
- 5) Ένα βαθύτερο αμμώδες στρώμα (2^ο στρώμα άμμου). Αυτό το στρώμα αποτελείται μερικές φορές από αμμοχάλικο. Αυτό είναι το δεύτερο υδροφόρο στρώμα που πρέπει να προστατευθεί από τη ρύπανση. Το βάθος του κυμαίνεται από 16 μ. έως 45 μ. (με γαλάζιο στον πίνακα 2.2)
- 6) Ένα λεπτό στρώμα άμμου το οποίο εμφανίζεται σε βάθος περίπου 43 μ. (με πράσινο στον πίνακα 2.2)

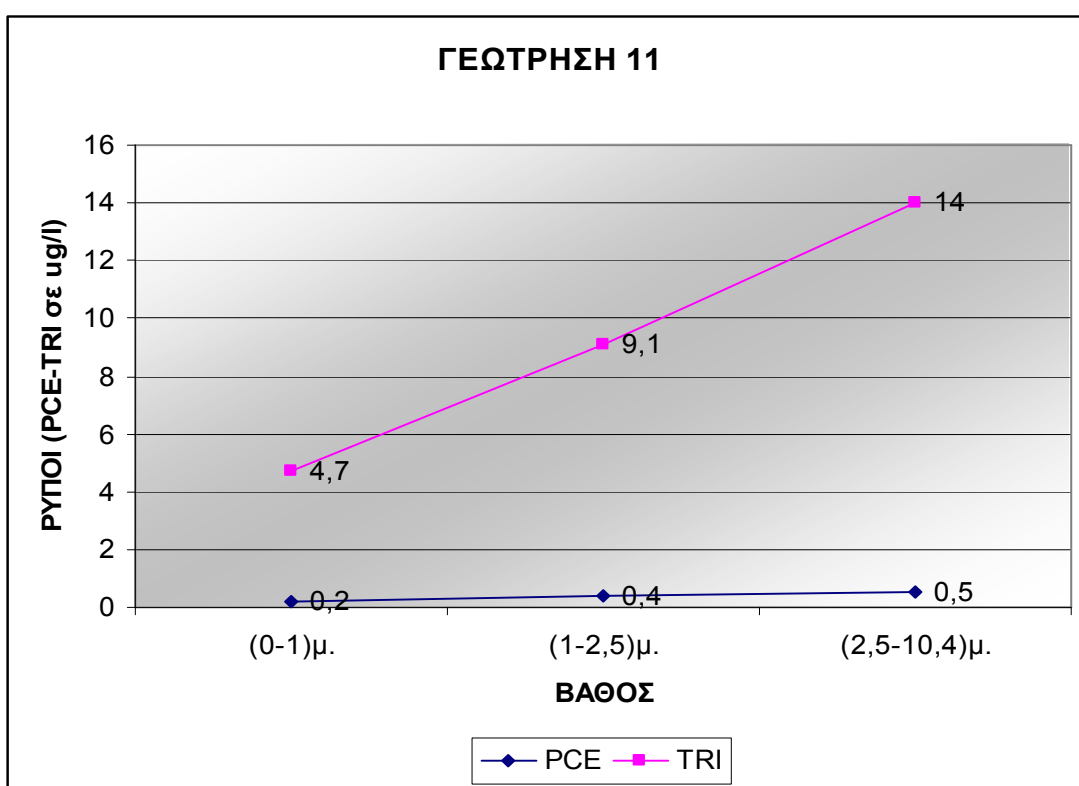
Στις περισσότερες γεωτρήσεις διατρήθηκαν μόνο τα 4 ανώτερα στρώματα (πίνακας 2.2)

Στον πίνακα αυτό εκτός από την λιθολογική σύσταση, φαίνονται και οι περιεκτικότητες των ρύπων PCE και TRI σε ug/l (1 ug = 28,349 g) από την χημική ανάλυση των δειγμάτων νερού της κάθε γεώτρησης. Δείγματα νερού ελήφθησαν σε τέσσερα διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Για να κατανοηθούν καλύτερα οι διακυμάνσεις των τιμών των προαναφερθέντων ρύπων μέσα στο συνολικό χρονικό διάστημα που διεξήχθησαν οι δειγματοληψίες (από 5/2/2002 έως 8/12/2002),

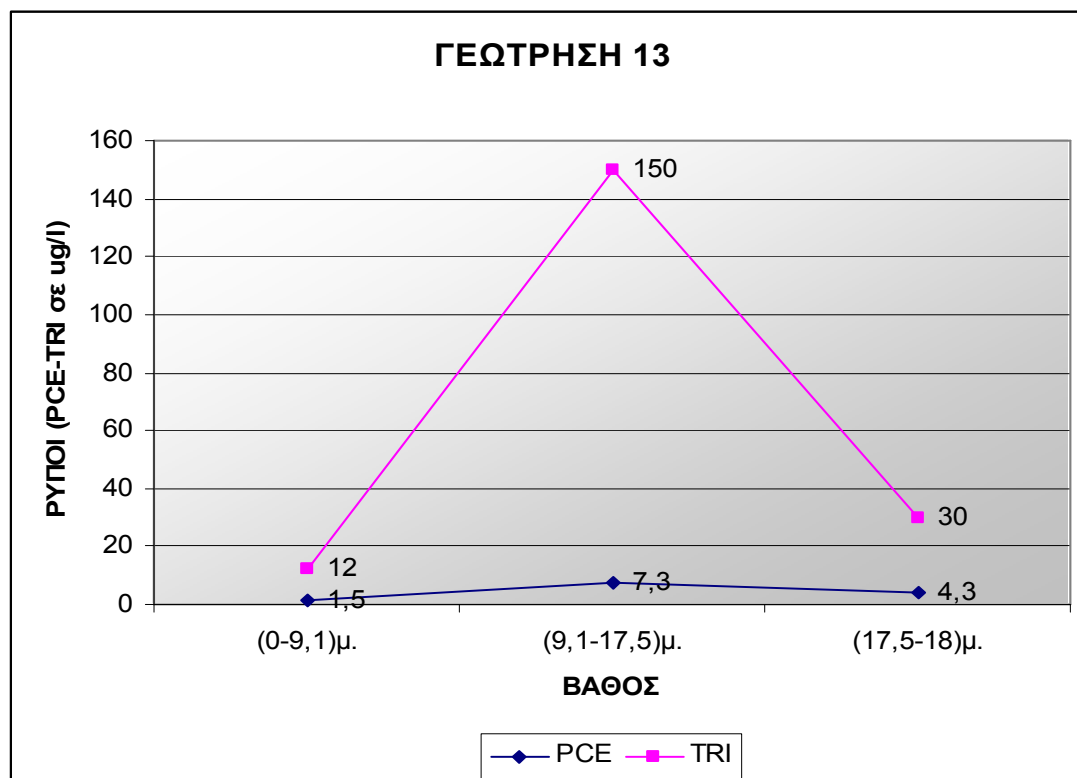
παρουσιάζονται τα διαγράμματα για επιλεγμένες γεωτρήσεις. Το κριτήριο βάσει του οποίου επιλέχθηκαν οι γεωτρήσεις ήταν η θέση τους σε σχέση με την ύπαρξη δεύτερης πηγής ρύπανσης για την οποία γίνεται λόγος παρακάτω.

Στα διαγράμματα 2.1 και 2.2 (γεωτρήσεις 11 και 13) φαίνονται οι διακυμάνσεις των τιμών και των δύο ρύπων (PCE, TRI) σε συνάρτηση με το βάθος.

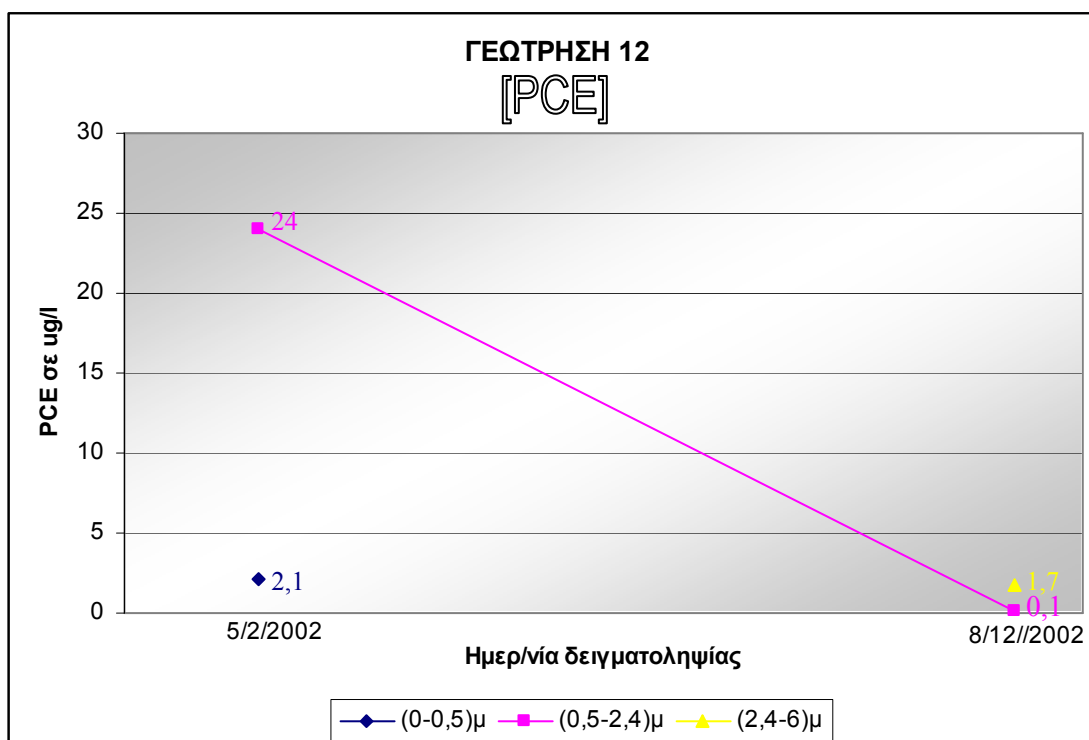
Στα διαγράμματα 2.3 και 2.4, (γεωτρήσεις 12 και 14) απεικονίζονται οι μεταβολές της περιεκτικότητας κάθε ρύπου, σε διαφορετικό διάγραμμα, συναρτήσει της ημερομηνίας δειγματοληψίας. Εδώ δίνεται δηλαδή έμφαση στη διακύμανση των τιμών της ρύπανσης σε σχέση με το χρόνο.



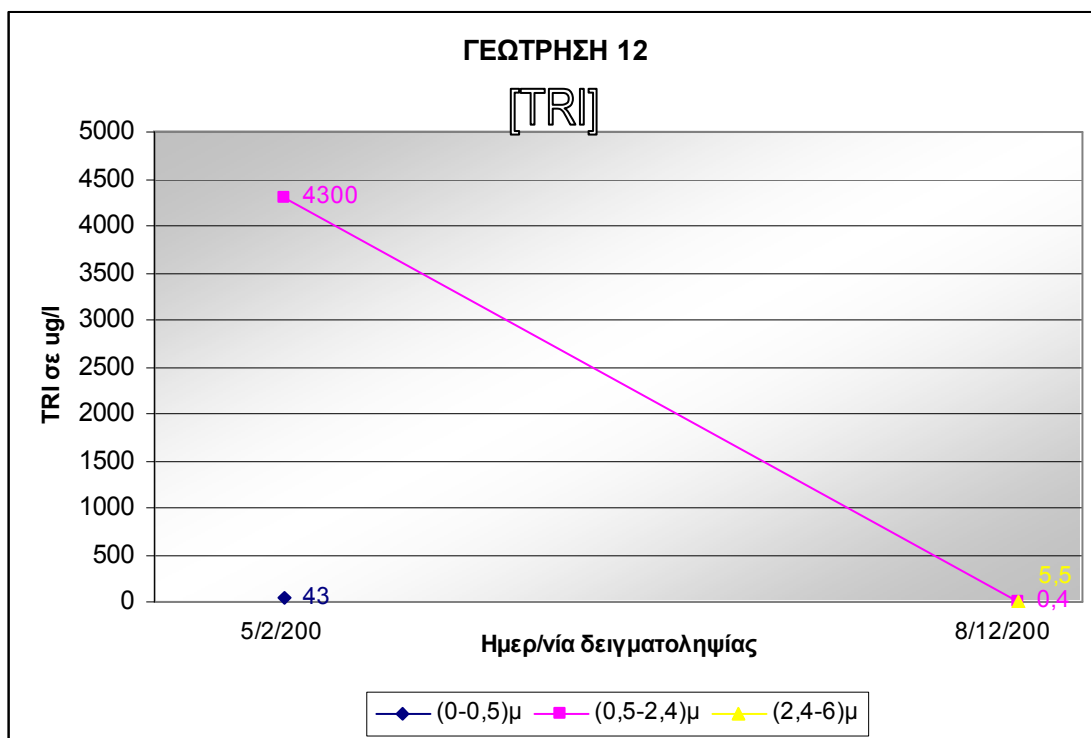
***Διάγραμμα 2.1** Στη γεώτρηση 11 στοιχεία υπάρχουν μόνο για τις 5/2/2002. Οι τιμές περιεκτικότητας σε [ug/l] του PCE, TRI παρατίθενται στο παραπάνω διάγραμμα σε σχέση με το βάθος.*



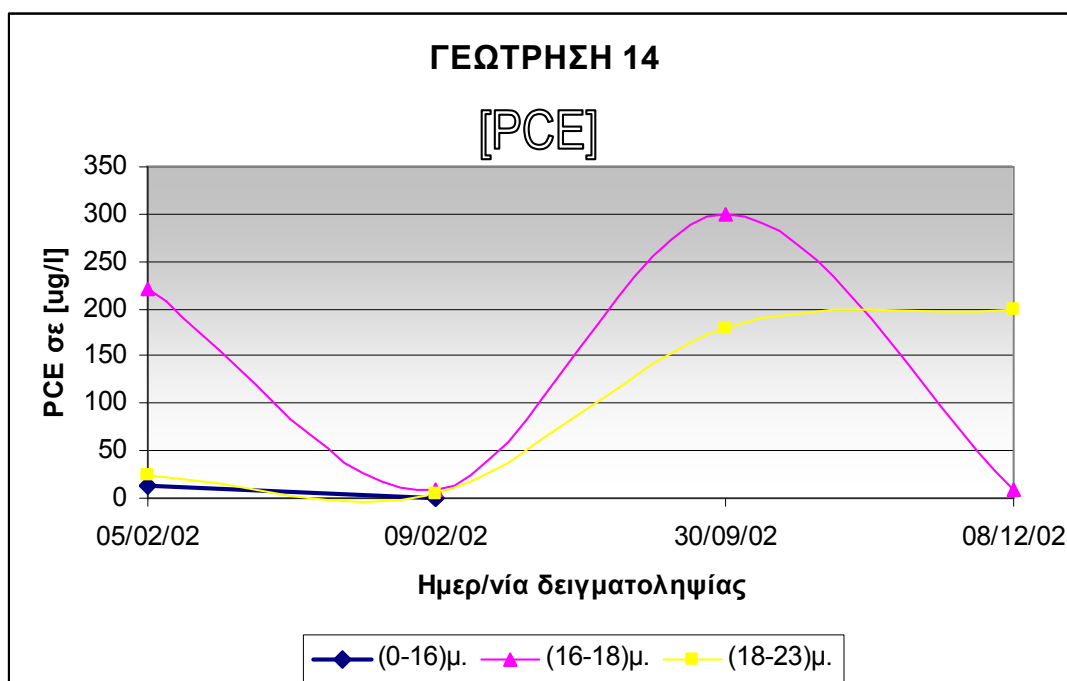
Διάγραμμα 2.2 Ομοίως στη γεώτρηση 13 στοιχεία για το PCE, TRI υπάρχουν μόνο για τις 5/2/2002. Το διάγραμμα δείχνει τις τιμές των ρύπων σε σχέση με το βάθος.



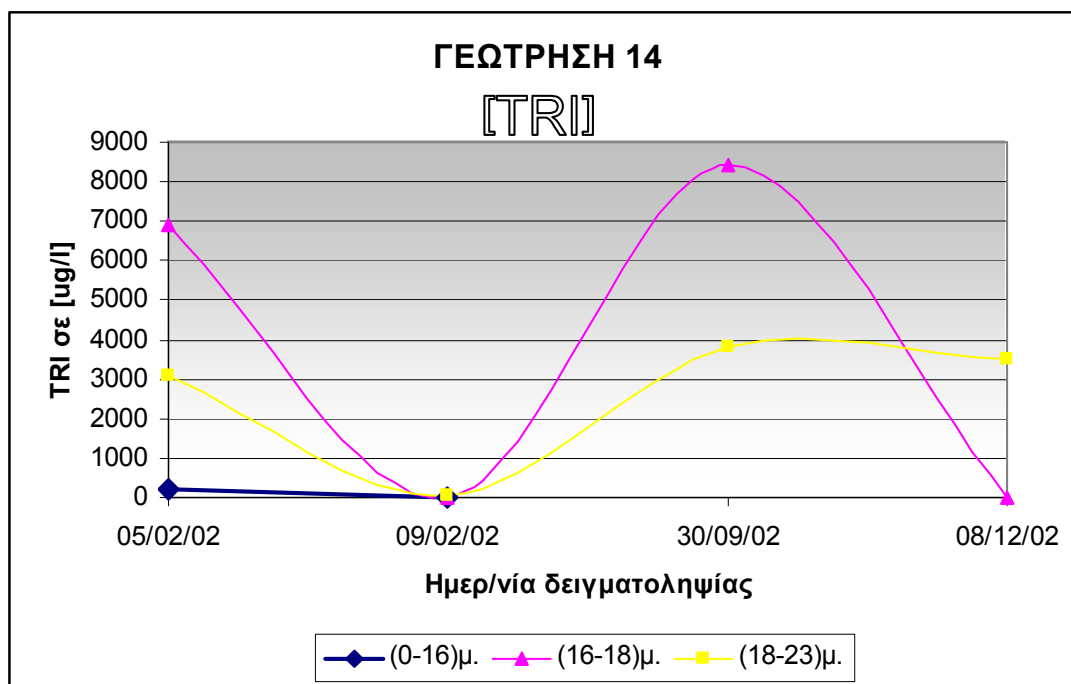
Διάγραμμα 2.3 Στο παραπάνω διάγραμμα της γεώτρησης 12 περιλαμβάνονται δειγματοληπτικά στοιχεία της συγκέντρωσης του PCE για τις 5/2/2002 και 8/12/2002 και σε 3 διαφορετικά βάθη (μπλε, ροζ και κίτρινο).



Διάγραμμα 2.4 Τα αντίστοιχα αποτελέσματα με το διάγραμμα 2.3 για τη συγκέντρωση TRI σε [ug/l].



Διάγραμμα 2.5 Στη γεώτρηση 14 δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στις 5/2/2002, 9/2/2002, 30/9/2002 και 8/12/2002. Οι τιμές περιεκτικότητας σε [ug/l] του PCE αντιστοιχούν σε 3 διαφορετικά βάθη.



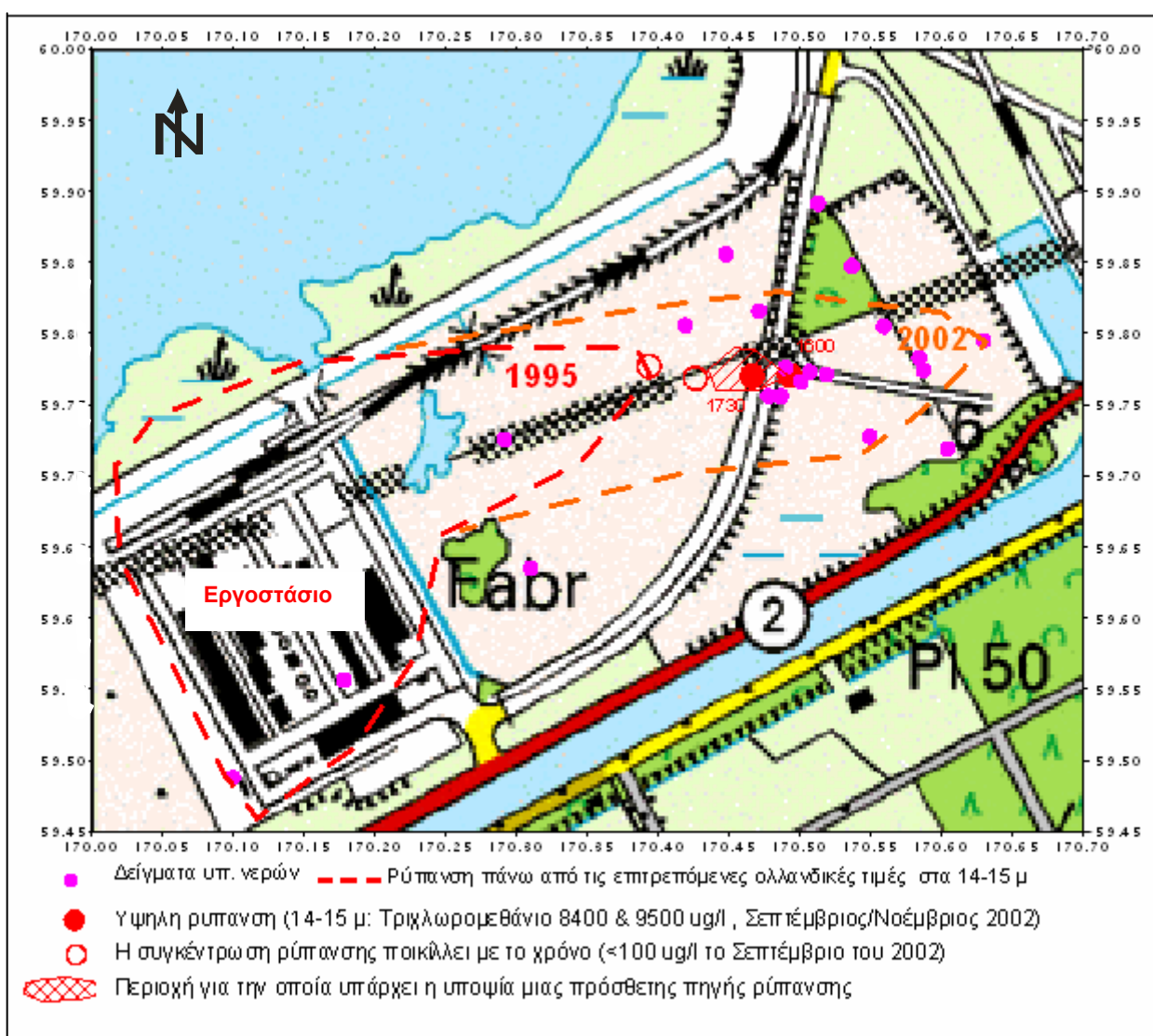
Διάγραμμα 2.6 Τα αντίστοιχα αποτελέσματα με το διάγραμμα 2.5 για τη συγκέντρωση TRI.

Όσον αφορά τις περιεκτικότητες των προαναφερθέντων ρύπων στα δείγματα, η Tauw δίνει την παρακάτω ερμηνεία.

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις (PCE: 0,2-240 µg/l, TRI: 1-2000 µg/l) έχουν βρεθεί στα φίλτρα στο βαθύτερο σημείο του πρώτου στρώματος άμμου ακριβώς επάνω από το στρώμα αργίλου (14-15 µ, Tauw 2002). Μερικά από τα φίλτρα σε βάθος 4-5 µ επίσης περιέχουν το ρύπους αλλά οι συγκεντρώσεις είναι γενικά χαμηλότερες. Η ταχύτητα της διάδοσης του πλουμίου των ρύπων είναι περίπου ίση με 20 µ/έτος.

Κοντά στα πιεζόμετρα 1600 (No14) και 1730 έχει μετρηθεί πολύ υψηλή ρύπανση (TRI: 8400 και 9500 µg/l αντίστοιχα, στα 14-15µ, Σχήμα 2.4). Τα πιεζόμετρα πιο κοντά στο εργοστάσιο (π.χ. 1100 και 1200) παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερη συγκέντρωση κι έτσι υποδεικνύουν ότι υπάρχει άλλη πηγή ρύπανσης έξω από το εργοστάσιο (Tauw, 2002). Έξι νέα πιεζόμετρα εγκαταστάθηκαν ρηχά (5 έως 6 µ) ακριβώς νότια και ανατολικά του πιεζομέτρου 1600, τον Αύγουστο του 2003 με στόχο να βρεθεί η πηγή ρύπανσης. Δείγματα από τα 6 νέα πιεζόμετρα δεν έδειξαν ρύπανση. Άρα η πηγή ρύπανσης είναι πιθανώς βόρεια ή δυτικά της πιεζομετρικής 1600. Η έναρξη της απορύπανσης της περιοχής καθυστέρησε λόγω της υποψίας της νέας πηγής ρύπανσης καθώς και των συζητήσεων σχετικά με την ιδιοκτησία αυτής της πηγής.

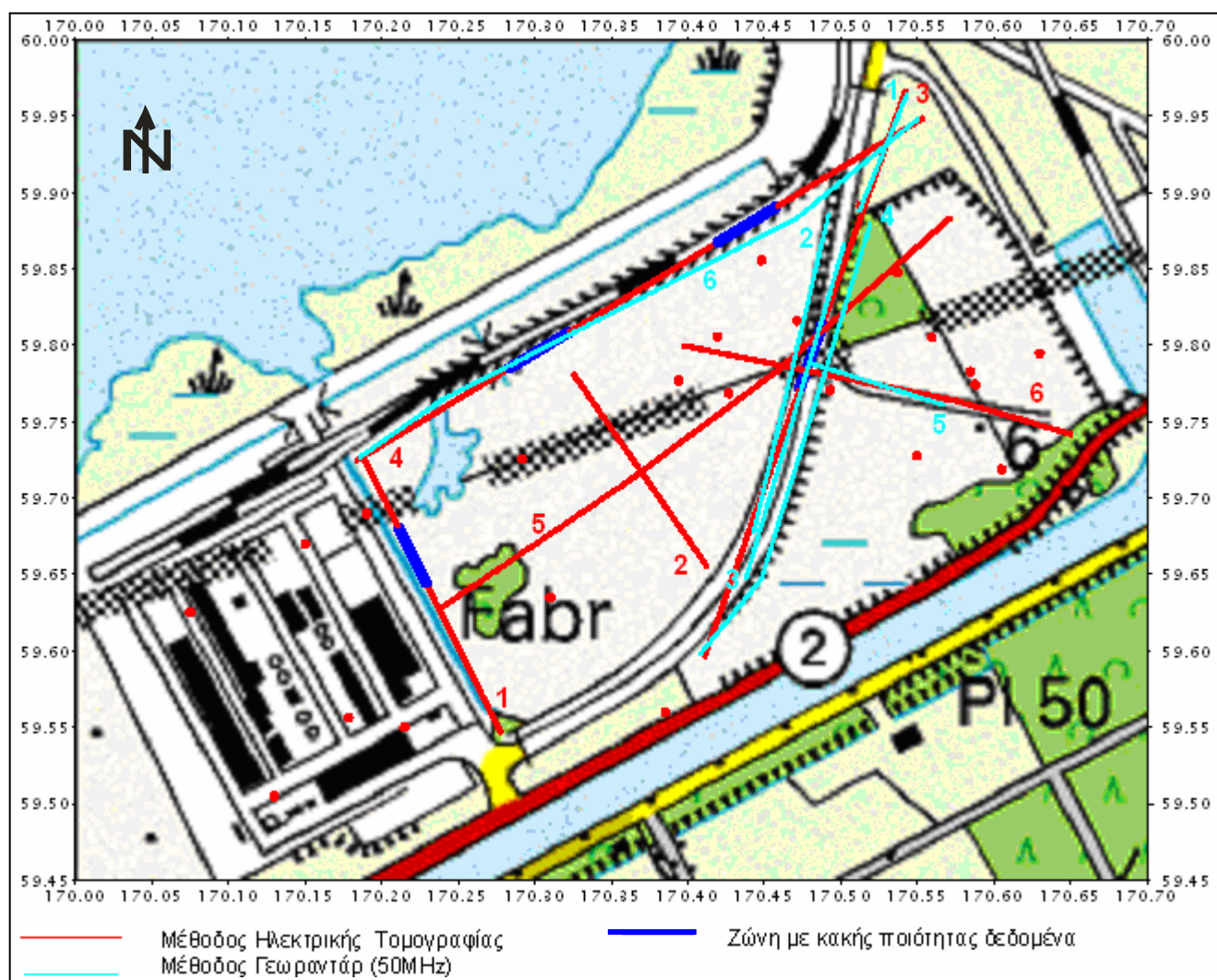
Σε μία από τις δύο γεωτρήσεις με υψηλή ρύπανση (συγκεκριμένα στην No14 με κωδ. 1600, Σχήματα 2.2 & 2.4) υψηλή συγκέντρωση TRI (3800 ug/l TRI) μετρήθηκε επίσης, στο δεύτερο στρώμα άμμου κάτω από το στρώμα αργίλου (πίνακας 2.1). Για να εξεταστεί η προέλευση της βαθιάς ρύπανσης, τοποθετήθηκε άλλο πιεζόμετρο στο δεύτερο στρώμα άμμου (κωδ. 1740). Επειδή το νέο πιεζόμετρο παρουσίασε πολύ χαμηλότερη συγκέντρωση TRI (63 ug/l) η ισχυρή υποψία είναι ότι η ρύπανση στο δεύτερο στρώμα άμμου στο πιεζόμετρο 1600 έχει προκληθεί από τη διαγώνια ρύπανση (Tauw, 2002). Έτσι στο δεύτερο στρώμα άμμου οι συγκεντρώσεις των ρύπων είναι ακόμα σχετικά χαμηλές.



Σχήμα 2.4 Επέκταση της ρύπανσης υπόγειων νερών το 1995 και το 2002 (Tauw, 2002)

2.7 Γεωφυσική Διασκοπήση στην Περιοχή Weert

Οι γραμμές μελέτης της γεωφυσικής διασκοπήσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5. Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε από την TNO τον Δεκέμβριο 2002 και τον Φεβρουάριο 2003 (Πίνακας 2.3). Συμπεριλαμβάνει τις μεθόδους γεωραντάρ (GPR) και ηλεκτρικής τομογραφίας (ER).



Σχήμα 2.5 Μετρήσεις υπαίθριας εργασίας που εκτελέστηκαν με τις μεθόδους ER και GPR (TNO).

Πίνακας 2.3 Επισκόπηση της γεωφυσικής υπαίθριας εργασίας που εκτελέστηκε στο Weert.

Τεχνική	No.	Μήκος καταγραφής [m]	Ιδιότητες	Ημερ/νία	Εκτελεσμένη από:
GPR	GPR1	82.5	50 MHz	12/12/02	TNO
	GPR2	210		12/12/02	TNO
	GPR3	225		12/12/02	TNO
	GPR4	305		12/12/02	TNO
	GPR5	90		12/12/02	TNO
	GPR6	427		12/12/02	TNO
ER	ER1	207	a=2 to 52 m	Δεκ.02	TNO
	ER2	157		Δεκ.02	TNO
	ER3	395		Δεκ.02	TNO
	ER4	430		Δεκ.02, Φεβ.03	TNO
	ER5	425		Δεκ.02	TNO
	ER6	275		Δεκ.02, Φεβ.03	TNO

2.8 Ερμηνεία δεδομένων & συμπεράσματα από το Πολυτεχνείο Κρήτης (UNICRE)

Μετρήσεις GPR

Οι μετρήσεις GPR (50 MHz) δεν έχουν ικανοποιητική διείσδυση (5 έως 7 μ) για να χαρτογραφήσουν το στρώμα αργίλου (17 έως 20 μ).

Μετά από την επεξεργασία των δεδομένων GPR, δύο ζώνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά σήματος διακρίθηκαν (2 πιθανές ζώνες ρύπανσης).

- Ζώνη Α στην οποία θεωρείται ότι υπάρχει χαμηλή ρύπανση
- Ζώνη Β στην οποία θεωρείται ότι υπάρχει υψηλή ρύπανση

Από τα στιγμιαία χαρακτηριστικά των καταγραφών GPR που παρατηρούνται ξαφνικές αλλαγές της φάσης και αύξηση του αριθμού ανακλαστήρων στις ρυπασμένες περιοχές. Αυτή η ερμηνεία είναι βασισμένη στα στοιχεία GPR μόνο τα οποία υποδεικνύουν περιοχές που πρέπει να μελετηθούν πιο προσεκτικά προκειμένου να αναζητηθεί η δεύτερη πιθανή πηγή ρύπανσης.

Οι ζώνες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6. Η θέση της δεύτερης πηγής ρύπανσης πρέπει να είναι μέσα στην ζώνη Β (Σχήμα 2.5).

Μετρήσεις Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (ER)

Το υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (1000-1200 Ohm-m) επιφανειακό στρώμα υποβάθμισε την ποιότητα των δεδομένων (γραμμές μελέτης 1-4). Οι γραμμές 5 και 6 παρουσιάζουν καλύτερης ποιότητας δεδομένα.

Οι γραμμές 5 και 6 (Σχ.2.5) δείχνουν ζώνη με σχετικά υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση, σε μικρό βάθος (0-3μ.). (γραμμή 6: x: 125 έως 240 μ, γραμμή 5: x = 175 έως 295 μ, Σχ.2.6).

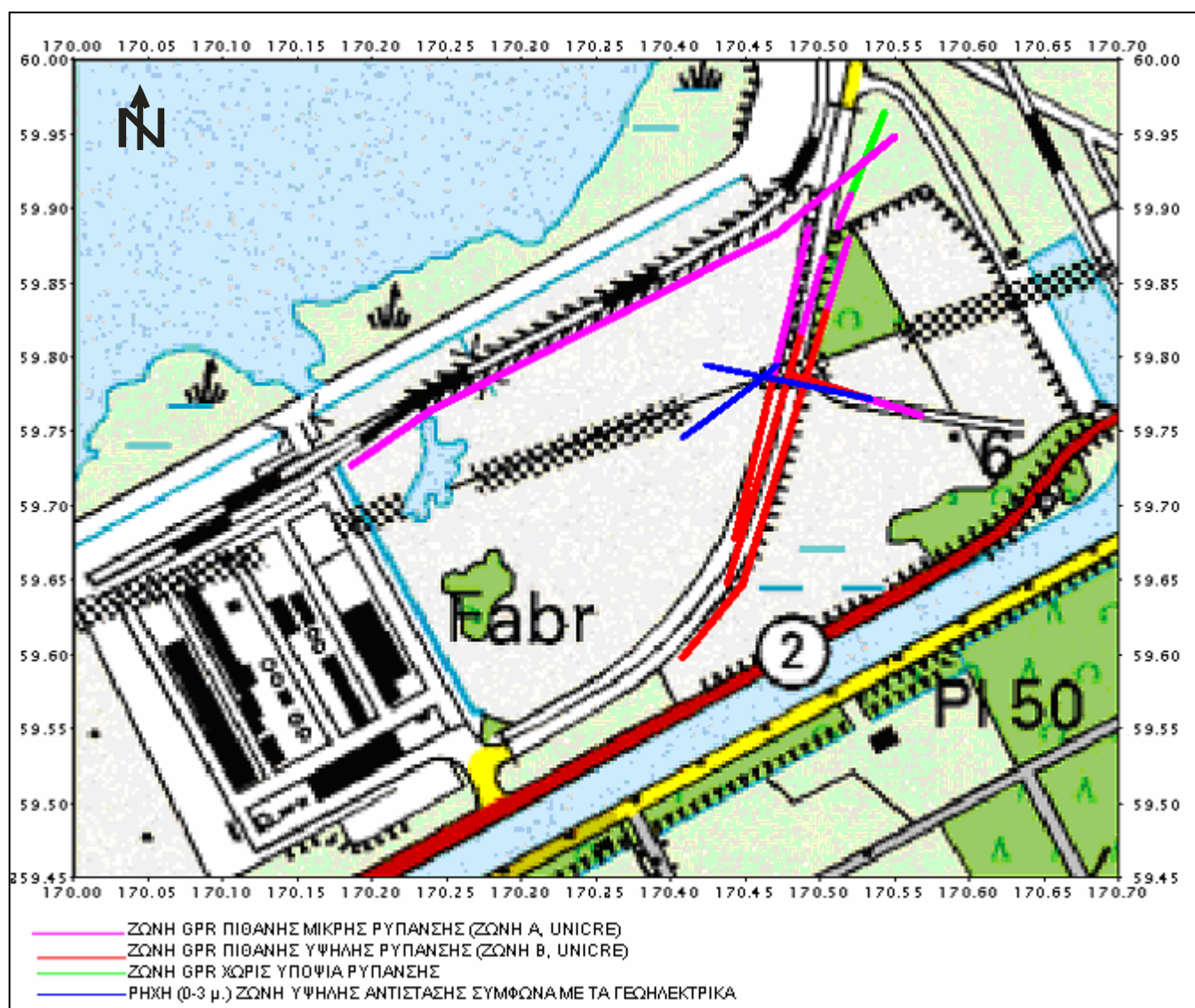
Η θέση της δεύτερης πηγής ρύπανσης εικάζεται πως είναι ανάμεσα από γραμμές αυτής της ζώνης (Σχήμα 2.6) όπου τα DNAPL's αυξάνουν την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η περιοχή αυτή συμπίπτει με την ζώνη B του GPR.

Συμπεράσματα

Οι γεωφυσικές μετρήσεις συναντούν δύο κύριες δυσκολίες:

- Το πλούμιο ρύπανσης βρίσκεται σχετικά βαθιά (14 έως 15 μ) για να ανιχνευθεί με τη μέθοδο γεωραντάρ.
- Η πηγή ρύπανσης μακριά από το εργοστάσιο, που αναμένεται να είναι ρηχή, δημιουργεί μικρών διαστάσεων πλούμιο.

Σύμφωνα με τα προκαταρκτικά αποτελέσματα, οι περιοχές όπου είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να επιμείνει η γεωφυσική προκειμένου να αναζητηθεί η δεύτερη πηγή ρύπανσης είναι γύρω από τη γραμμή 6 (ER 6) και κοντά στα πιεζόμετρα 1730 και 1600. Αυτές είναι επίσης μέσα στη ζώνη που θεωρείται ύποπτη από την ανάλυση των στοιχείων GPR.



Σχήμα 2.6 Πιθανές περιοχές ρύπανσης σύμφωνα με τις έρευνες από μετρήσεις ER και GPR.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΑΝ ΣΤΟ WEERT

3.1 Εισαγωγή

Συνολικά οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ρύπανσης (πετρέλαιο, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, μεταλλικά συντρίμια, χώροι υγειονομικής ταφής κ.ά.), εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία και είναι σε θέση να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες. Παράλληλα, πρόσφατες δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, που πραγματοποιήθηκαν την τελευταία δεκαετία πάνω σε μελέτες Περιβαλλοντικής Γεωφυσικής, παρουσιάζουν βελτιωμένες τεχνικές απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων, που οδηγούν στην άριστη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στις μεθόδους της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και του Γεωραντάρ. Αυτές ήταν κάποιες από τις τεχνικές που εφαρμόστηκαν στο Weert οι οποίες επιδέχτηκαν περαιτέρω επεξεργασία βάσει προγραμμάτων και προέκυψε η τελική ερμηνεία.

3.2 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης άρχισαν να εφαρμόζονται στη μελέτη του υπεδάφους με την αρχή του εικοστού αιώνα. Πρωτοπόροι στην έρευνα υπήρξαν ο Wenner και ιδιαίτερα ο Schlumberger που το βιβλίο του «Etude sur la Prospection Electrique du Sous-Sol» συνέβαλε σημαντικά στη διάδοση των ηλεκτρικών μεθόδων. Με τη χρησιμοποίηση των μεθόδων αυτών εντοπίστηκε φυσικό αέριο το 1923 στη Ρουμανία, αλατούχος δόμος το 1926 στη Γαλλία, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες της

Αμερικής τέτοιες εφαρμογές άρχισαν το 1925 (Yungul, 1996). Η συστηματική όμως εφαρμογή των ηλεκτρικών διασκοπήσεων άρχισε μετά το 1970 εκμεταλλευόμενη την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών που πρόσφεραν σημαντική βοήθεια τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων, και περιλαμβάνει:

- Μέθοδο του φυσικού δυναμικού
- Μέθοδο των τελλουρικών ρευμάτων

Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία, και περιλαμβάνει:

- Μέθοδο της ειδικής αντίστασης
- Μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας
- Μέθοδο των ισοδυναμικών γραμμών

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία, στη Γεωθερμία, στην Κοιτασματολογία, στην Τεχνική Γεωλογία και στην Αρχαιολογία.

3.2.1 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Είναι μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους της γεωφυσικής διασκόπησης. Ο όρος Γεωφυσική Διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων, στην άμεση παρατήρηση, στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με εφαρμογή των νόμων της Φυσικής, και έχει σαν στόχο της τον εντοπισμό περιοχών με οικονομική σημασία.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα για την λύση α) τεκτονικών, β) υδρογεωλογικών, γ) κοιτασματολογικών, δ) γεωθερμικών, ε) αρχαιολογικών προβλημάτων. Ένα παράδειγμα είναι η εφαρμογή της μεθόδου για την λύση τεκτονικού προβλήματος. Τα ρήγματα συνδέονται πάντα με την υψηλή τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η εφαρμογή σε γεωθερμικό πρόβλημα όπου οι μικρότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βρέθηκαν σε περιοχή γνωστού γεωθερμικού πεδίου της Μήλου. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ελαττώνεται πολύ όταν βρεθεί σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές που

εξατμίζουν το νερό. Επιπλέον η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκει εφαρμογή στα εξής: α) αναζήτηση νερών, β) αρχαία, γ) ρύπανση περιβάλλοντος, δ) γεωθερμία, ε) τεχνικά έργα (απεικόνιση ζώνης αποσάθρωσης και υπογειων εγκοίλων).

Με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παράγεται στο έδαφος, με τεχνητό τρόπο, ηλεκτρικό πεδίο. Οι ιδιότητες του πεδίου διαμορφώνονται από τη δομή του υπεδάφους. Συνεπώς ο καθορισμός των ιδιοτήτων του πεδίου οδηγεί στον καθορισμό της δομής του υπεδάφους. Η ποσότητα που μετριέται είναι η ηλεκτρική τάση και τελικός σκοπός είναι ο εντοπισμός δομών, οι οποίες παρουσιάζουν αντίθεση αντίστασης, δηλαδή διαφορετική ειδική ηλεκτρική αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα.

3.2.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη.

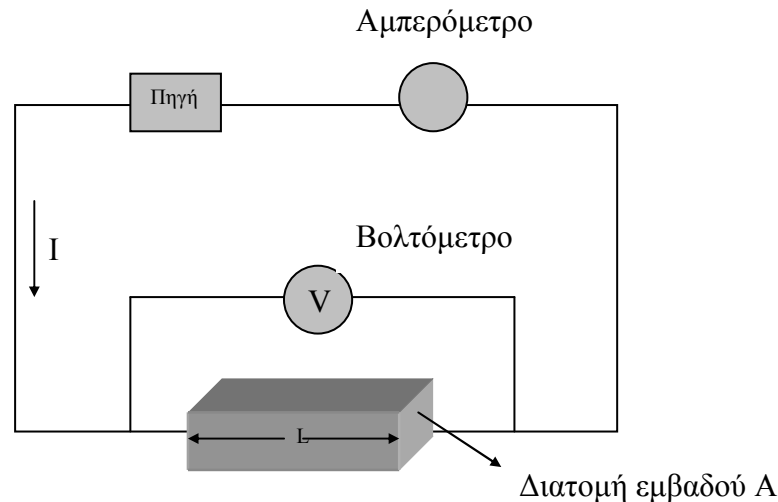
Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm (Robinson, 1988), σύμφωνα με τον οποίο αντίσταση R (σε Ohm) ενός αγωγού ονομάζεται ο σταθερός λόγος της διαφοράς δυναμικού ΔV (σε Volt) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση I (σε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

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) μονάδα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το $1 \Omega\text{m}$. Πολλές φορές όμως χρησιμοποιείται και η μονάδα $1\Omega\text{cm}$ και είναι $1 \Omega\text{m} = 100 \Omega\text{cm}$. 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 των πετρωμάτων, β) το πορώδες των πετρωμάτων, γ) η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων, 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. Το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον θετικό πόλο, ονομάζεται πηγή, ενώ το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο, ονομάζεται γείωση. Επειδή ο αέρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, όλο το ρεύμα από το ηλεκτρόδιο μπαίνει 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 σημεία, δηλαδή οι εξισώσεις που προκύπτουν, ισχύουν για σημειακή πηγή και σημειακή γείωση.

Αρχικά η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων θεωρείται πολύ μεγάλη, ώστε να μπορεί να μελετηθεί το κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Το ηλεκτρόδιο πηγή είναι θετικά φορτισμένο, με αποτέλεσμα η κίνηση των θετικών φορτίων να είναι από το ηλεκτρόδιο προς τη γη. Επειδή η γη θεωρείται ομοιογενής το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και οι γραμμές που απεικονίζουν τη ροή (γραμμές ρεύματος) μπορούν να θεωρηθούν ως ακτίνες ημισφαιρικών επιφανειών που έχουν κέντρο την πηγή. Η αντίσταση R στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που παρουσιάζει μία ημισφαιρική δομή ακτίνας d , δίνεται σύμφωνα με τη σχέση (3.2) από το γινόμενο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ με τον λόγο της ακτίνας d προς το εμβαδόν $2\pi d^2$ της ημισφαιρικής επιφάνειας.

$$R = \rho \frac{d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad 3.3$$

Η διαφορά ΔV_d του δυναμικού V_0 της πηγής από το δυναμικό V_d όλων των σημείων που απέχουν απόσταση d από την πηγή που προκαλείται από τη ροή ρεύματος, έντασης I , μέσα από την ημισφαιρική δομή είναι:

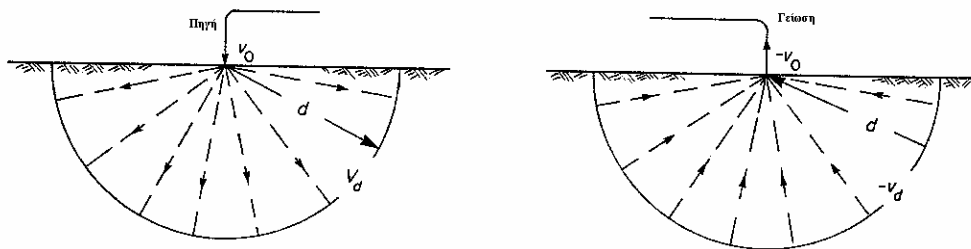
$$\Delta V_d = V_d - V_0 = IR = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad 3.4$$

Η επιφάνεια που περιλαμβάνει όλα τα σημεία με το ίδιο δυναμικό ονομάζεται ισοδυναμική επιφάνεια.

Το δυναμικό στη γείωση, το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής είναι $-V_0$. Το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο έλκει τα θετικά ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα οι γραμμές ρεύματος να συγκλίνουν προς αυτό από όλες τις διευθύνσεις. Μία ημισφαιρική δομή ακτίνας d με κέντρο τη γείωση θα παρουσιάζει αντίσταση R στη ροή του ρεύματος σύμφωνα με τη σχέση (3.3). Η διαφορά μεταξύ του δυναμικού $-V_d$ όλων των σημείων που απέχουν απόσταση d από τη γείωση και του δυναμικού της γείωσης $-V_0$ θα είναι:

$$-\Delta V_d = -V_d - (-V_0) = V_0 - V_d = -IR = -\frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad 3.5$$

Στην περίπτωση λοιπόν 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.

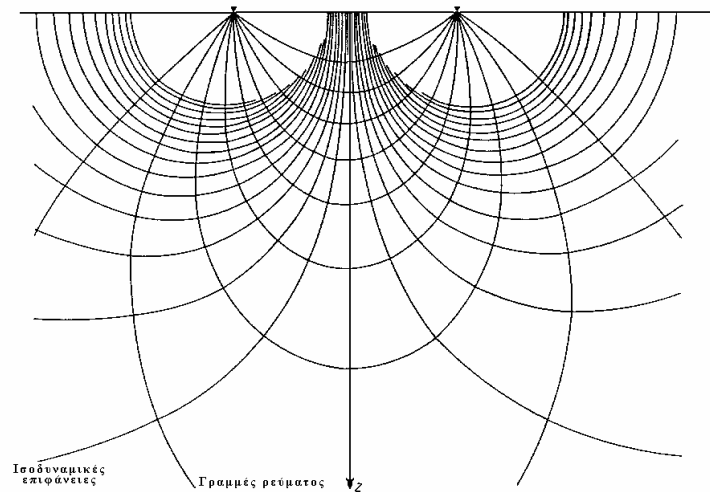


Σχήμα 3.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη στην περίπτωση που δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Όταν η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων θεωρηθεί μικρή, το ηλεκτρικό πεδίο του ενός ηλεκτροδίου αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο του άλλου ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα το δυναμικό σε ένα σημείο του υπεδάφους να ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών των ηλεκτρικών πεδίων 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_{d_1} που οφείλεται στην πηγή, με το δυναμικό V_{d_2} που οφείλεται στη γείωση:

$$V = V_{d_1} + V_{d_2} = V_{d_1} - V_0 + V_0 + V_{d_2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad 3.6$$

Με βάση τη σχέση (3.6) 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.

3.2.3 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Η αντίσταση που υπολογίζεται από τη σχέση 3.2 εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής 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 χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων που περιγράφονται παρακάτω.

3.2.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων, το σχήμα 3.4 δείχνει τις τρεις πιο σημαντικές 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, έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho_a = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I} \quad 3.7$$

Η ποσότητα

$$2\pi \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = 2\pi a \quad 3.8$$

ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής και συμβολίζεται με K . Η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί αν οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι γνωστές.

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση που δίνει την δομή του υπεδάφους, τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται κάθε φορά συμμετρικά ως προς ένα σημείο, που θεωρείται κέντρο της διασκόπησης με αύξηση του a κατά ορισμένη κάθε φορά απόσταση.

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής χαρτογράφησης, δηλαδή οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση με μετρήσεις σε μια γραμμή, το a παραμένει σταθερό και τα τέσσερα ηλεκτρόδια μεταφέρονται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης.

Η διάταξη Wenner παρά τη γεωμετρική της απλότητα παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, αφού κατά την πραγματοποίηση κάθε νέας μέτρησης πρέπει να μετακινούνται όλα τα ηλεκτρόδια.

β) Διάταξη Schlumberger

Στη διάταξη Schlumberger, τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N είναι ανάμεσα στα A και B και σε απόσταση b από το κέντρο της διάταξης. Έτσι είναι $AB = 2L$ και $MN = 2b = I$ (σχήμα 3.4.β), η απόσταση $2b$ μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση $2L$

μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Έτσι ο γεωμετρικός συντελεστής K θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$K=2\pi \left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} + \frac{1}{L-b} \right)^{-1} = (L^2 - b^2) \frac{\pi}{2b} \quad 3.9$$

Επειδή όμως ($L \gg b$) τότε $(L^2 - b^2) \sim L^2$, και έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i} \quad 3.10$$

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά. Αντίθετα η απόσταση για τα ηλεκτρόδια ρεύματος αυξάνεται σταδιακά.

Στην ηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στη διάταξη Wenner.

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρό χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων, επειδή αντίθετα με τις άλλες διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει επίσης στον περιορισμό των ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές γεωλογικές ασυνέχειες.

γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Από τις παραπάνω διατάξεις, η πιο σημαντική είναι αυτή του διπόλου-διπόλου, όπου 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 ($n \gg 1$), όπως φαίνεται στο σχήμα (3.4.γ).

Ο γεωμετρικός συντελεστής K για την διάταξη διπόλου-διπόλου και για $n \gg 1$, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \pi n a(n+1)(n+2) \quad 3.11$$

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από την σχέση:

$$\rho_a = \pi n a(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{i} \quad 3.12$$

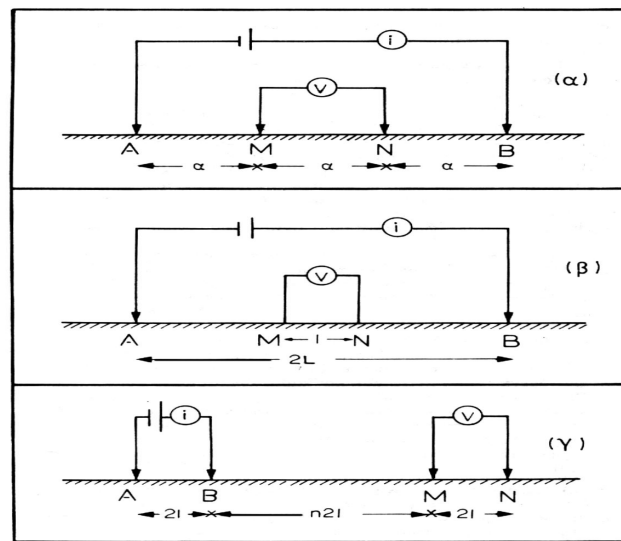
Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διάταξης αποτελεί η απόσταση $2na$, ανάμεσα στα δίπολα ρεύματος και δυναμικού, που μπορεί να αυξηθεί αρκετά χωρίς να χρειάζονται μεγάλα μήκη καλωδίων. Η διάταξη περιορίζεται μόνο από τη δυνατότητα των καταγραφικών οργάνων και από τον εδαφικό θόρυβο.

δ) Τετραγωνική διάταξη

Στη διάταξη αυτή τα τέσσερα ηλεκτρόδια βρίσκονται στις κορυφές τετραγώνου και αποτελούν τη βάση, πάνω στην οποία βρίσκεται το όργανο μέτρησης.

ε) Διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου

Μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από τη Wenner, αν τα ηλεκτρόδια N και B τοποθετηθούν σε απόσταση από τα άλλα δύο. Το ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων, τα A και M, παραμένει σταθερό και το άλλο, τα N και B, μετακινείται στην περιοχή μελέτης. Θεωρώντας σταθερό το ηλεκτρικό πεδίο μεγάλες μεταβολές στη μετρούμενη τάση οφείλονται σε δομές που παρουσιάζουν αντίθεση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τα περιβάλλοντα πετρώματα, βρίσκονται κοντά στο κινούμενο ζευγάρι και ο εντοπισμός τους αποτελεί τον στόχο της μεθόδου.



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

Κάθε διάταξη παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τη θέση και τον σκοπό, για τον οποίο εφαρμόζεται. Η διάταξη Wenner δίνει την πιο έντονη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά παρουσιάζει το φαινόμενο της διπλής κορυφής, δηλαδή μεγάλη τιμή πριν και μετά τη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα, ενώ δίνει μικρή τιμή ακριβώς πάνω από τη δομή. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που η δομή έχει μικρότερη αντίσταση. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζει και η διάταξη Schlumberger με το επιπλέον πρόβλημα του μικρού σήματος, δηλαδή δε δίνει έντονα τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης. Το πρόβλημα της διπλής κορυφής δεν εμφανίζεται στις διατάξεις διπόλου – διπόλου και διδύμου ηλεκτροδίου. Η διάταξη διπόλου – διπόλου δίνει καθαρά τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι, επειδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι μικρή περιορίζεται το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως και η ευαισθησία της μεθόδου με την αύξηση του βάθους. Η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου έχει πλευρική διακριτική ικανότητα α , δηλαδή για να ξεχωρίσει δύο δομές πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά την οριζόντια διεύθυνση απόσταση α , με α να είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων κάθε ζευγαριού και απαιτεί τη μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων για κάθε μέτρηση. Όμως η εύκολη και γρήγορη εφαρμογή της και η έντονη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης που δίνει, την έχουν κάνει μια από τις πιο διαδεδομένες διατάξεις.

3.2.5 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων

Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση των γεωφυσικών διασκοπήσεων είναι πολύ σημαντική και επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Έτσι, η επιλογή πρέπει να γίνει ανάλογα με τον σκοπό της γεωφυσικής διασκόπησης σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

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 αγώγιμου στρώματος (Επίδραση του επιδερμικού φαινομένου)

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

5. Βάθος διασκόπησης

Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται κυρίως από το 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 έντονου ανάγλυφου του γεωλογικού υποβάθρου.

7. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

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

3.2.6 Ηλεκτρική Τομογραφία

3.2.6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι μετρήσεις της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης βρήκαν εφαρμογή στη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας που μαζί με τη μέθοδο του Γεωραντάρ αποτέλεσαν τις σημαντικότερες τεχνικές μελέτης της συγκεκριμένης περιοχής στο Weert της Ολλανδίας.

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

3.2.6.2. Θεωρία

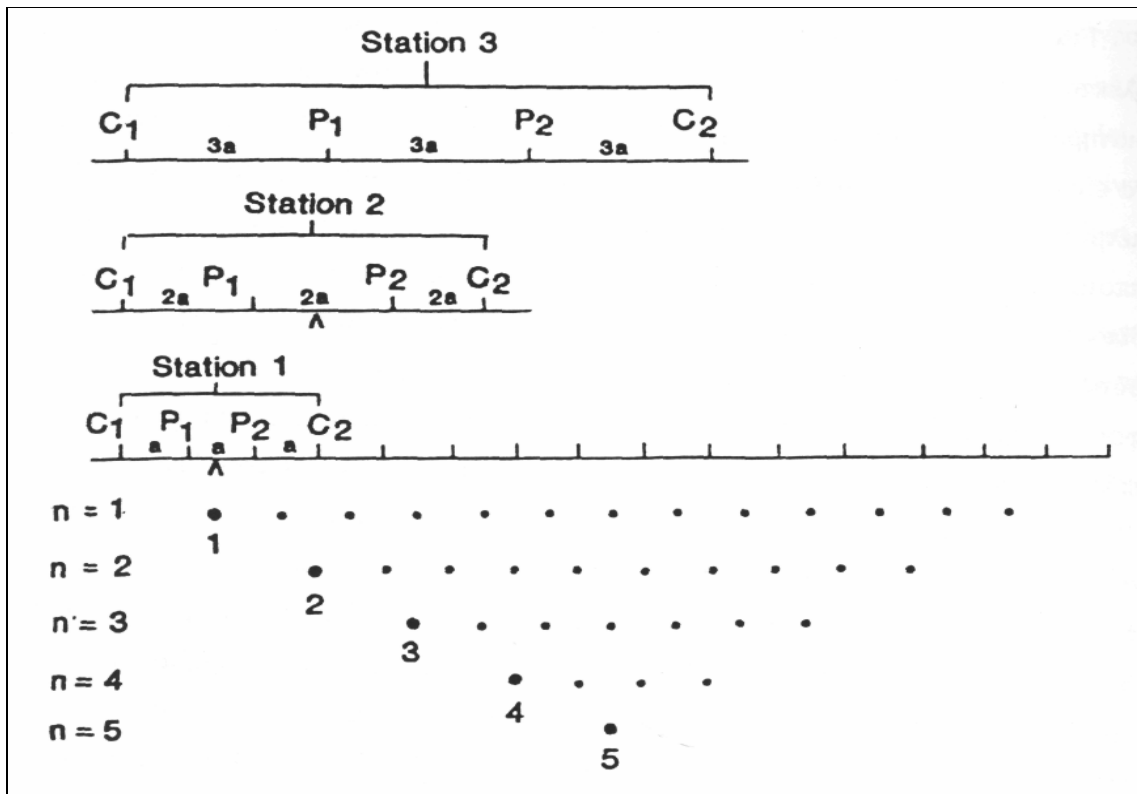
Με την ηλεκτρική τομογραφία επιδιώκεται ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, δηλαδή η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

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 ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , σε αντίθεση με τη φαινόμενη που είναι φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα, είναι ιδιότητα των πετρωμάτων και των ορυκτών.

3.2.6.3 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων

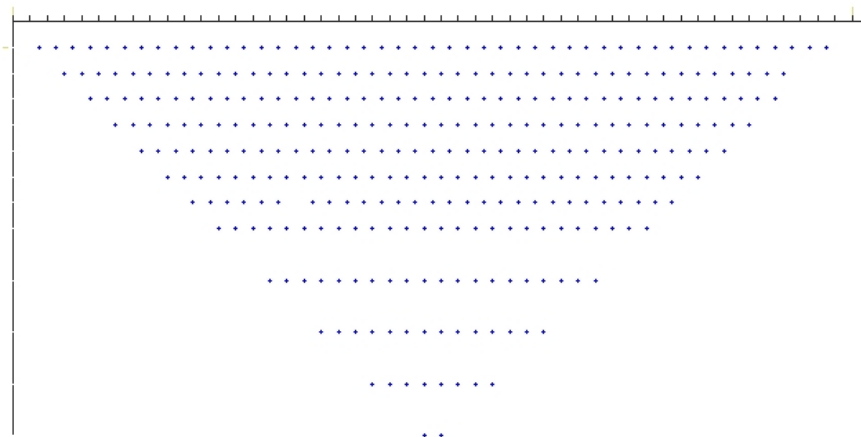
Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Wenner. Στη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα βάθη, αυξάνεται σταδιακά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απόσταση a σε 2 a , 3 a κ.ο.κ.

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους (Σχ.3.6). Στην ψευδοτομή (pseudosection) οι φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι σχεδιασμένες σε μία τομή κατά τέτοιο τρόπο όπως οι πραγματικές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις σε σημεία ακριβώς κάτω από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και σε βάθος που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διάταξη (Σχ.3.5).



Σχήμα 3.5 Ψευδοτομή (pseudosection) φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

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



Σχήμα 3.6 Διάταξη των δεδομένων στην ψευδοτομή του υπεδάφους (manual Res2dinv).

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.

3.2.6.4 Αντιστροφή των δεδομένων

Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις. Στα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα που χρησιμοποιείται η αντιστροφή, τα δεδομένα συνδέονται με 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:

$$d_i = f_i(m_1, m_2, \dots, m_M) + e \quad 3.13$$

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:

$$f_i(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, \dots, m_M^0 + \delta m_M) \quad 3.14$$

Το σφάλμα από τη σχέση (3.13) είναι:

$$e_i = d_i - f_i(m) \approx d_i - f_i(m^0) - \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \right\}_{m_j=m_j^0} \cdot \delta m_j \quad 3.15$$

Αν $\Delta d = d_i - f_i(m^0)$ είναι το διάνυσμα 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:

$$e_i \approx \Delta d - Ax \quad 3.16$$

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

$$q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad 3.17$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το q ως προς x και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων επιβάλλεται

περιορισμός στον πίνακα x με στόχο να μην αυξάνονται απότομα οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε γειτονικές θέσεις. Η λύση x προστίθεται στο αρχικό μοντέλο m^0 και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο m^1

$$m^1 = m^0 + x \quad 3.18$$

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),

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad 3.19$$

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.

3.3 Μέθοδος του Γεωραντάρ

3.3.1 Ιστορία του γεωραντάρ

Η τεχνολογία του ραντάρ (*Radio Detection And Ranging – R.A.D.A.R*) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά με σκοπό τον εντοπισμό και προσδιορισμό της θέσης κινητών και ακίνητων αντικειμένων από μεγάλες αποστάσεις. Οι πρώτοι σταθμοί ραντάρ κατασκευάστηκαν το 1930, ταυτόχρονα σχεδόν, στις Ηνωμένες Πολιτείες, Βρετανία, Γερμανία και πρώην ΕΣΣΔ. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε πολύ κατά το Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο για τη ραδιοανίχνευση εχθρικών πλοίων και αεροπλάνων, αλλά και

μεταπολεμικά σε ειρηνικούς τομείς, όπως η πλοήγηση πλοίων, αεροπλάνων και πυραύλων, στους τεχνητούς δορυφόρους, στη μετεωρολογία, στη ραδιοαστρονομία κ.α.

Αν και η ιδέα της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την έρευνα του υπεδάφους ξεκίνησε στις αρχές του αιώνα, η τεχνολογία του γεωραντάρ (*Ground Penetrating Radar – G.P.R*) εισήχθη για πρώτη φορά το 1940. Η ανάπτυξη των συστημάτων ραδιοανίχνευσης και εντοπισμού, από το 1940 και έπειτα, οδήγησε στη δημιουργία αυτόνομων συστημάτων για τους σκοπούς της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

Στα τέλη του 1950 οι σταθμοί ραντάρ των Η.Π.Α. ήταν σε θέση να παρακολουθούν τα αεροπλάνα που προσγειώνονταν στο αεροδρόμιο της Γροιλανδίας, τα οποία λόγω λανθασμένων ενδείξεων του υψομέτρου συντρίβονταν στον πάγο. Το γεγονός αυτό έδωσε την αφορμή για τη διεξαγωγή ερευνών και για εκτενή μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο έδαφος.

Παρόλα αυτά, γεωφυσικές διασκοπήσεις με τη χρήση του γεωραντάρ γίνονται μόλις τη δεκαετία του 1970. Σε αυτό συνέβαλε η ανάπτυξη της τεχνολογίας, οπότε και κατασκευάστηκαν φορητά και χαμηλότερου κόστους όργανα. Τη δεκαετία του 1980 η τεχνολογία του γεωραντάρ γνωρίζει μεγάλη άνθιση με την εισαγωγή των ψηφιακών συστημάτων, τα οποία έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην επεξεργασία του σήματος και στην ανάπτυξη καινούργιων εφαρμογών.

3.3.2 Εφαρμογές

Η ραγδαία εξέλιξη στην ηλεκτρονική τεχνολογία μετά το 1970 έδωσε σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη του γεωραντάρ, έτσι ώστε σήμερα να κατατάσσεται στις σύγχρονες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών.

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν ουσιαστικά να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, βασιζόμενες στην κεντρική συχνότητα εκπομπής του:

- Για γεωλογικούς σκοπούς, όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από τη διακριτική ικανότητα του ραντάρ. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως κεραίες συχνότητας 50MHz.
- Για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (*Non Destructive Testing – NDT*). Σε αυτή την κατηγορία το ζητούμενο είναι η

διακριτική ικανότητα του συστήματος και επομένως οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz.

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες εφαρμογές του γεωραντάρ.

Πίνακας 3.1 Εφαρμογές γεωραντάρ

(Reynolds 1998), (Mellet 1995), (Al-Dajani 1990), (Toshioka 1995), (Tsoflias 1999), (Al-Nuaimy 2000), (Hugenschmidt 1998), (Σπανουδάκης 2001)

Γεωλογικές

Ανίχνευση εγκοίλων και ασυνεχειών
 Χαρτογράφηση βυθισμάτων
 Χαρτογράφηση επιφανειακών κοιτασμάτων
 Έρευνα κοιτασμάτων και αξιολόγηση ορυκτών πόρων
 Πάχος στρωμάτων τύρφης και αξιολόγηση της
 Θέση σφηνών πάγου
 Χαρτογράφηση ρωγμών σε ορυκτό αλάτι
 Χαρτογράφηση προσχώσεων, επιπέδων ασυνεχειών κλπ
 Χαρτογράφηση γεωλογικών δομών
 Χαρτογράφηση λιμνιαίων και ποτάμιων ιζημάτων

Περιβαλλοντικές

Χαρτογράφηση ρυπασμένων περιοχών
 Χαρτογράφηση ρύπων στο υπόγειο νερό
 Έρευνες σε χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής
 Εντοπισμός θαμμένων βυτίων και βαρελιών
 Εντοπισμός διαρροής αερίων
 Έρευνες για νερό

Επιστήμη μελέτης παγετώνων

Χαρτογράφηση του πάχους των πάγων
 Προσδιορισμός εσωτερικής δομής των παγετώνων
 Μελέτη κίνησης των πάγων
 Ανίχνευση ρωγμών στη βάση των παγετώνων
 Χαρτογράφηση καναλιών ροής νερού στους παγετώνες
 Μελέτη της ισορροπίας της μάζας κάτω από τον παγετώνα
 Χαρτογράφηση της στρωματογραφίας του χιονιού

Κατασκευές

Ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους
Ανίχνευση αστοχιών / κενών
Προσδιορισμός οπλισμού στο τσιμέντο
Προσδιορισμός σωλήνων, καλωδίων
Μελέτη ακεραιότητας κατασκευαστικών υλικών
Δοκιμές στο τσιμέντο (concrete testing)

Αρχαιολογία

Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών
Εντοπισμός αρχαίων τάφων
Χαρτογράφηση πριν την εκσκαφή
Εντοπισμός, χαρτογράφηση αρχαίων δρόμων

Δικανικές επιστήμες

Εντοπισμός θαμμένων στόχων (πτώματα, μπάρες χρυσού κλπ)

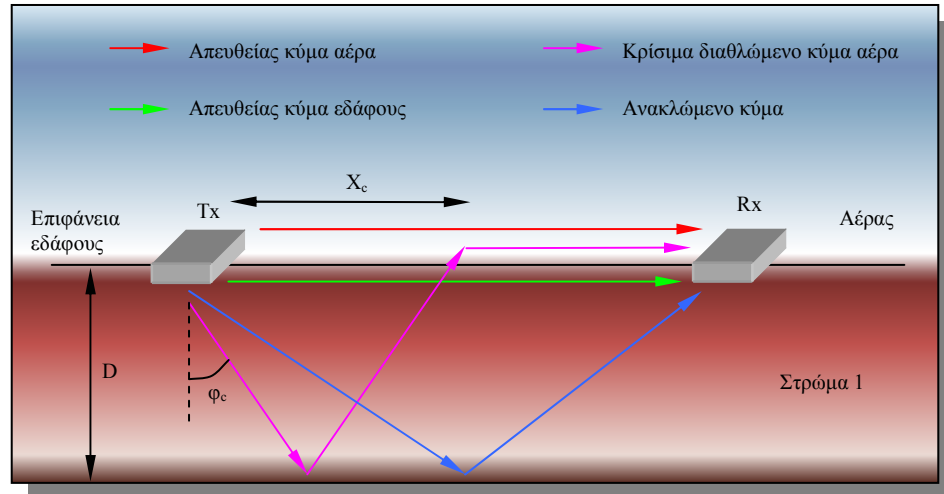
3.3.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνοτήτων από 1 έως 1200 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων.

Το σύστημα του γεωραντάρ εκπέμπει έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπό έρευνα υλικό. Ο παλμός, που διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec), «ταξιδεύει» στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Ένα μέρος της ενέργειας του παλμού διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα και ένα μέρος ανακλάται στην επιφάνεια, οπότε και επιστρέφει στην κεραία του δέκτη. Στη συνέχεια το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης προωθείται στη μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του κύματος. Η διάδοση του παλμού στο υπέδαφος είναι συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και της συχνότητας εκπομπής της κεραίας του πομπού. Η εκπομπή και λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από την ίδια κεραία ή από δύο διαφορετικές κεραίες (μία για την εκπομπή και μία για τη λήψη).

Εκτός από τα ανακλώμενα κύματα η κεραία του δέκτη κατοπτρεύει και τα απευθείας κύματα ή πρώτες αφίξεις. Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στον

δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια διεπιφάνεια. Εξαιτίας της μικρής διαδρομής που διανύουν καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη σε πολύ μικρούς χρόνους και πριν από όλα τα ανακλώμενα κύματα. Οι απώλειες σε ενέργεια των κυμάτων αυτών είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα.



Σχήμα 3.7 Γεωμετρία διάδοσης των κυριότερων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Πουλιούδης, 1999).

Τα απευθείας κύματα είναι δύο ειδών: αυτά που διαδίδονται στον αέρα και αυτά που διαδίδονται στο υπέδαφος. Τα απευθείας κύματα του αέρα καταφθάνουν πρώτα στον δέκτη, ενώ ακολουθούν τα απευθείας του εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα στον αέρα παρά σε ένα γεωλογικό σχηματισμό.

Όταν η απόσταση των κεραιών πομπού - δέκτη υπερβεί μία κρίσιμη τιμή X_c (π.χ. σε μία διασκόπηση κοινού ενδιαμέσου σημείου) τότε ο δέκτης κατοπτρεύει και τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα. Τα κύματα αυτά ανακλώνται στην πρώτη διεπιφάνεια που θα συναντήσουν, διαθλώνται στην επιφάνεια του εδάφους και τελικά διαδίδονται στον αέρα. Η διάθλαση των κυμάτων αυτών στην επιφάνεια του εδάφους προϋποθέτει ότι η γωνία πρόσπτωσης του ανακλώμενου κύματος είναι ίση με την οριακή γωνία φ_c . Επομένως, τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα διαδίδονται εν μέρει στο έδαφος και εν μέρει στον αέρα. Συνεπώς, καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη πριν από τα απευθείας κύματα του εδάφους και μετά από τα απευθείας κύματα του αέρα.

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το χρόνο t_r που χρειάζεται ο παλμός για να ταξιδέψει από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής του ανακλώμενου κύματος t_r ισούται με:

$$t_r = \frac{(4D_r^2 + X^2)^{1/2}}{v} \Leftrightarrow t_r^2 = \frac{4D_r^2}{v^2} + \frac{X^2}{v^2} \quad 3.20$$

που δίδει:

$$D_r = \frac{[(t_r v)^2 - X^2]^{1/2}}{2} \quad 3.21$$

όπου X είναι η οριζόντια απόσταση πομπού - δέκτη, D_r το βάθος της επιφάνειας ανάκλασης και v η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο διάδοσης. Το βάθος του ανακλαστήρα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί εφόσον γνωρίζουμε το χρόνο διαδρομής t_r και την ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος v στο μέσο διάδοσης.

3.3.4 Σχεδιασμός διασκόπησης

Πριν ξεκινήσει η πραγματοποίηση της έρευνας, θεωρείται σκόπιμο να μελετηθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που θα καθορίσουν την επιτυχή έκβαση της. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο και πρέπει να πραγματοποιηθεί προσεκτικά, έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι ακριβείς και να αποφευχθούν σφάλματα τα οποία θα δώσουν λανθασμένες πληροφορίες. Ο ερευνητής, επομένως, καλείται πριν αρχίσει οποιαδήποτε εργασία, να αποσαφηνίσει πλήρως το πρόβλημα και να σχεδιάσει τη διασκόπηση με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται πριν από την διασκόπηση και αποτελείται από τρία βασικά στάδια:

- Αξιολόγηση του πεδίου έρευνας
- Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης
- Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης

3.3.5 Αξιολόγηση του πεδίου έρευνας

Οι πληροφορίες και τα δεδομένα που συλλέγονται στο στάδιο της αυτοψίας αξιολογούνται, έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι εφικτό ή όχι να εφαρμοστεί η μέθοδος του γεωραντάρ κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες που διέπουν τη διασκόπηση. Προκειμένου να δοθεί επομένως απάντηση σε αυτό το ερώτημα, είναι καθοριστική η μελέτη των παρακάτω σημείων:

- Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου
- Γεωμετρία στόχου
- Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης
- Περιβάλλον διασκόπησης

Μία σωστή αξιολόγηση προϋποθέτει την πραγματοποίηση διασκόπησης με τη μέθοδο του κοινού ενδιάμεσου σημείου, η οποία θα έχει προηγηθεί και θα συμβάλλει στον προσδιορισμό της ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο προσδιορισμός της ταχύτητας και κατ' επέκταση της διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου διάδοσης¹, θα οδηγήσουν σε έναν πιο ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων διασκόπησης. Διαφορετικά ο υπολογισμός των διαφόρων παραμέτρων πρέπει να βασιστεί σε εκτιμήσεις, γεγονός, που ίσως οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα.

3.3.5.1 Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου

Είναι αυτονόητο, ότι εάν το βάθος του στόχου είναι μεγαλύτερο από το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ο στόχος δεν θα μπορέσει να εντοπιστεί. Το μέγιστο βάθος διείσδυσης ή διαφορετικά η ακτίνα δράσης του γεωραντάρ, εξαρτάται άμεσα από την εξασθένιση και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των σχηματισμών στους οποίους διαδίδεται. Όταν η εξασθένιση και η αγωγιμότητα των σχηματισμών είναι μεγάλη, το βάθος διείσδυσης είναι μικρό.

¹ Η ταχύτητα διάδοσης v του Η/Μ κύματος σε μέσο διαφορετικό του κενού δίδεται: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$, όπου ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του μέσου διάδοσης και c η ταχύτητα διάδοσης του Η/Μ κύματος στο κενό. Είναι: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o}}$, όπου ϵ_o , μ_o η ηλεκτρική και η μαγνητική διαπερατότητα αντίστοιχα του κενού (Πουλιούδης, 1999).

Το βάθος του στόχου μελετάται πάντα σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διακριτική τους ικανότητα (Bernabini 1995, Jol 1995, Hamran 1995). Το πρόβλημα που τίθεται είναι ότι το βάθος διείσδυσης επιδρά σε βάρος της διακριτικής ικανότητας. Για αυτόν ακριβώς το λόγο ο ερευνητής πρέπει να αναλογίζεται κάθε φορά σε ποιον παράγοντα θα δώσει πρωταρχική σημασία. Αν δηλαδή προτεραιότητά του είναι να φτάσει σε μεγάλα βάθη, χωρίς όμως να ανιχνεύσει το στόχο ή να πετύχει υψηλή διακριτική ικανότητα, χωρίς όμως τελικά το σήμα να φτάσει μέχρι το επιθυμητό βάθος.

Επειδή η ανάλυση αυτή είναι επίπονη, οι Annan και Cosway (1975) προτείνουν τρεις εμπειρικές σχέσεις, εκ των οποίων οι δυο πρώτες προσδιορίζουν το μέγιστο βάθος διείσδυσης d_{max} , ενώ η τρίτη τη διακριτική ικανότητα ΔR :

$$d_{max} = \frac{35}{\sigma} \quad (3.22)$$

$$d_{max} < \frac{30}{\alpha} \quad (3.23)$$

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4} \quad (3.24)$$

όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης (S/m), α ο συντελεστής εξασθένισης (dB/m) και λ το μήκος κύματος. Η εξίσωση 3.23 ισχύει για μέσες και υψηλές τιμές εξασθένισης ($<0,1$ dB/m) (Πουλιούδης, 1999).

3.3.5.2 Γεωμετρία στόχου

Είναι γεγονός ότι ο στόχος πρέπει να περιγράφεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η πιο σημαντική παράμετρος του είναι το μέγεθος (ύψος, πλάτος, μήκος). Στην περίπτωση που ο στόχος δεν είναι σφαιρικός, θα πρέπει να προσδιοριστεί και ο προσανατολισμός του (κλίση, διεύθυνση, βάθος), ο οποίος είναι και ο παράγοντας που καθορίζει τη διεύθυνση των γραμμών μελέτης. Εντούτοις, δεν είναι δυνατόν πάντα να είναι γνωστές οι διαστάσεις και η κύρια διεύθυνση του στόχου.

3.3.5.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης, που ενδιαφέρουν την τεχνική του γεωραντάρ, είναι η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα (ϵ_r , σ). Η γνώση τους επιτρέπει στο χρήστη να διαπιστώνει κάθε φορά εάν η αντίθεση μεταξύ τους είναι σημαντική, ώστε να υπάρξει μετρήσιμη ανάκλαση. Εξαιτίας της ανομοιογένειάς του το μέσο διάδοσης μπορεί να παρουσιάσει διαφορές στις ηλεκτρικές ιδιότητες στα διάφορα τμήματά του. Όταν οι διαφορές αυτές είναι ίδιες με την διαφορά των ηλεκτρικών ιδιοτήτων στόχου και μέσου διάδοσης, τότε ο στόχος δύσκολα αναγνωρίζεται.

Μέτρο της ενέργειας που ανακλάται από το στόχο είναι ο συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας P_r ο οποίος δίδεται από τη σχέση:

$$P_r = \left[\frac{(\epsilon_{r1}^{1/2} - \epsilon_{r2}^{1/2})}{(\epsilon_{r1}^{1/2} + \epsilon_{r2}^{1/2})} \right]^2 \quad (3.25)$$

όπου ϵ_{r1} και ϵ_{r2} είναι οι διηλεκτρικές σταθερές του μέσου διάδοσης και του στόχου αντίστοιχα.

Στόχος	ϵ_r	P_r
Πλαστικός σωλήνας	3	0,071
Φύλλο αλουμινίου	8,8	0,24
Ασβεστόλιθος	9	0,25
Σιδερένιος σωλήνας	16	0,36
Φύλλο μολύβδου	6	0,17

Πίνακας 3.2 Συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας για διάφορα υλικά, όταν το μέσο διάδοσης είναι ο αέρας (Σπανουδάκης, 2001).

<i>Στόχος</i>	ε_r	P_r
Οπλισμός από σίδηρο	16	0,01
Αέρας (ρωγμή)	1	0,1

Πίνακας 3.3 Συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας για διάφορα υλικά, όταν το μέσο διάδοσης είναι τσιμέντο (Σπανουδάκης, 2001).

3.3.5.4 Περιβάλλον διασκόπησης

Η μέθοδος του γεωραντάρ είναι ευάλωτη στο περιβάλλον υπό το οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Η χρήση του δεν ενδείκνυται σε περιοχές όπου υπάρχουν εγκατεστημένοι μεταδότες ραδιοκυμάτων και αυτό διότι οι ευαίσθητες κεραίες του γεωραντάρ κατοπτρεύουν, τόσο τα ισχυρά ραδιοκύματα όσο και τον ανακλώμενο από το στόχο παλμό, με αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των μετρήσεων.

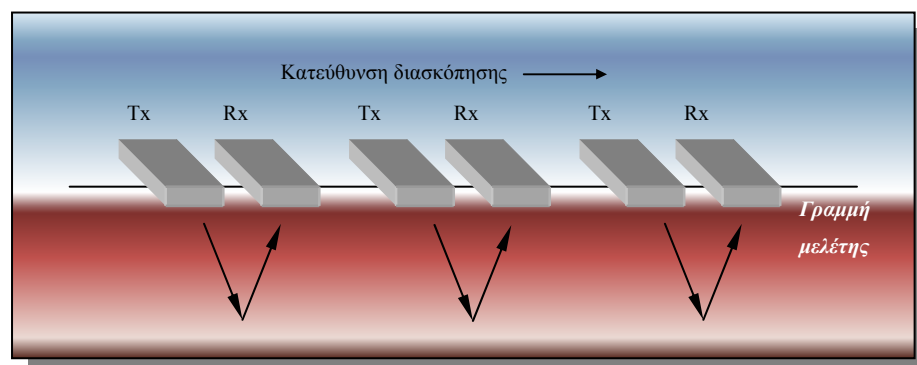
Περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές στο υπέδαφος ή στην επιφάνεια είναι επίσης ακατάλληλες για τη διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Οι ισχυρότατες ανακλάσεις που προέρχονται από τις κατασκευές αλλοιώνουν την ποιότητα των μετρήσεων.

Οι κλιματικές συνθήκες αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για τη λειτουργία του γεωραντάρ. Για τεχνικούς λόγους το ραντάρ δεν μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία και βρόχινες συνθήκες. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις κάτω από συνθήκες υψηλής εδαφικής υγρασίας ενδέχεται να παρουσιάσουν διαφοροποίηση σε σχέση με δεδομένα που συλλέγονται υπό φυσιολογικές (ξηρές) συνθήκες στον ίδιο χώρο, εξαιτίας της μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και του στόχου.

3.3.6 Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης

Το γεωραντάρ είναι δυνατόν να χρησιμοποιεί διαφορετική μέθοδο κάθε φορά για τη συλλογή των δεδομένων, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε διασκόπησης. Τέσσερις από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους που εφαρμόζονται είναι οι εξής:

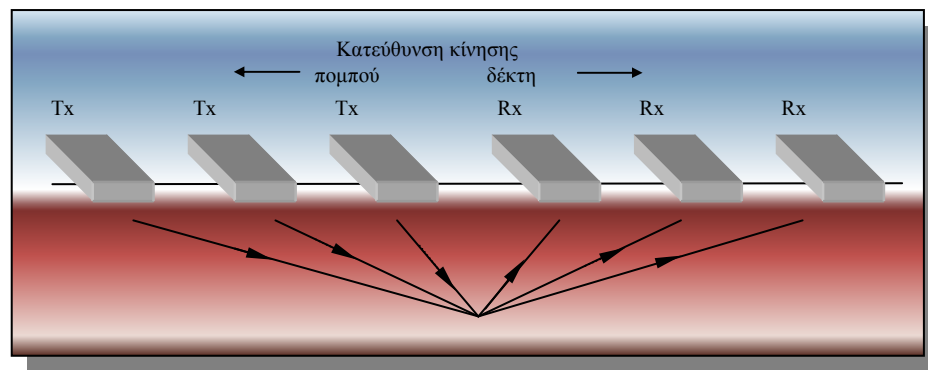
- **Μέθοδος της ανάκλασης (Reflection):** Είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος και εφαρμόζεται στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων. Για το σκοπό αυτό οι κεραίες του πομπού και του δέκτη κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης, διατηρώντας συγκεκριμένο προσανατολισμό και σταθερή απόσταση (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Διασκόπηση με τη μέθοδο της ανάκλασης, όπου T_x είναι η κεραία του πομπού και R_x του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).

- **Μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Midpoint):** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος. Για το λόγο αυτό οι δύο κεραίες απομακρύνονται από σταθερό σημείο κατά μήκος της γραμμής μελέτης και παράλληλα καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής του κύματος για τον ίδιο ανακλαστήρα (Σχήμα 3.9).

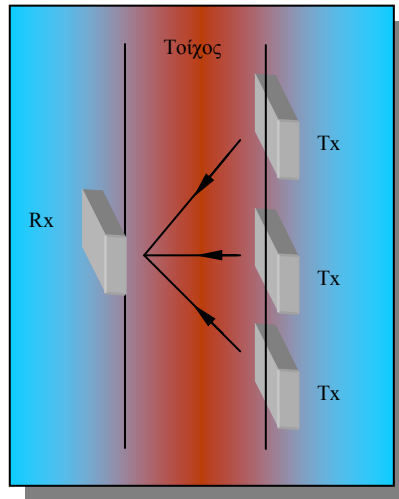
Η βέλτιστη διάταξη των κεραιών απαιτεί τα ηλεκτρικά τους πεδία να είναι παράλληλα ενώ οι κεραίες κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης, η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου, όπου Tx είναι η κεραία του πομπού και Rx του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).

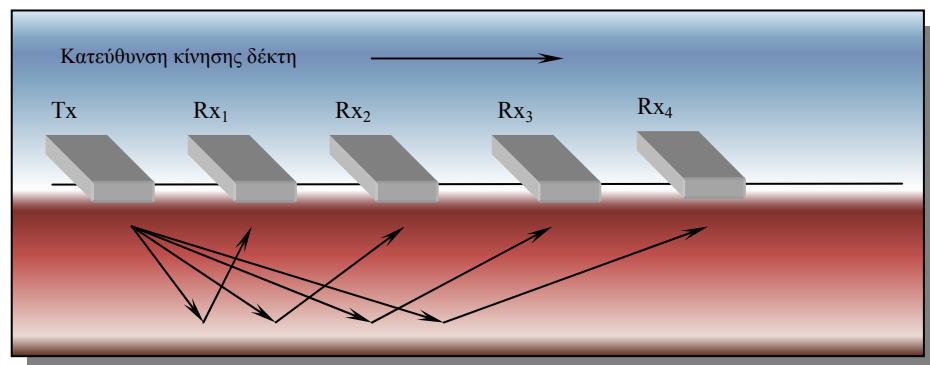
Η διαδικασία μίας διασκόπησης κοινού ενδιάμεσου σημείου είναι απλή. Σε πρώτο στάδιο προσδιορίζεται ένας ανακλαστήρας με τη βοήθεια της μεθόδου της ανάκλασης. Στη συνέχεια επιλέγεται σημείο της επιφάνειας του εδάφους ακριβώς επάνω από τον ανακλαστήρα, το οποίο θα αποτελέσει το κοινό ενδιάμεσο σημείο. Εκατέρωθεν του σημείου αυτού και στην ελάχιστη απόσταση πομπού – δέκτη τοποθετούνται οι κεραίες. Συνήθως, η αρχική ελάχιστη απόσταση είναι ίση με το βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x , το οποίο επιλέχθηκε για τη διασκόπηση ανάκλασης που προηγήθηκε. Κατά τη διάρκεια της διασκόπησης η κάθε κεραία απομακρύνεται από το κοινό ενδιάμεσο σημείο κατά $n_x/2$ και η απόσταση πομπού - δέκτη αυξάνει σε ακέραια πολλαπλάσια του n_x . Η μέγιστη απόσταση πομπού – δέκτη δεν πρέπει να υπερβαίνει μία με δύο φορές το βάθος του ανακλαστήρα. Εάν η εξασθένιση του μέσου διάδοσης είναι υψηλή, η ενέργεια του παλμού αποσβένει πριν επιτευχθεί η μέγιστη απόσταση.

- **Μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination):** Η μέθοδος αυτή δεν στηρίζεται στην ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως οι προηγούμενες, αλλά στη διέλευση του μέσα από τη μάζα του υλικού μελέτης. Οι κεραίες τοποθετούνται στις δύο απέναντι πλευρές του υλικού, με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικρίζει η μία την άλλη (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 Διασκόπηση διαπερατής ακτινοβολίας, όπου Tx είναι η κεραία του πομπού και Rx του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).

- **Μέθοδος σταθερού πομπού - κινούμενου δέκτη (Wide angle reflection and refraction):** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των Η/Μ κυμάτων στο υπέδαφος. Η διαφορά της από τη μέθοδο του κοινού ενδιαμέσου σημείου έγκειται στο γεγονός ότι ο πομπός παραμένει σταθερός σε κάποιο σημείο, ενώ ο δέκτης κινείται πάνω στη γραμμή μελέτης με σταθερό βήμα (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11 Η μέθοδος σταθερού πομπού - κινούμενου δέκτη, όπου Tx είναι η κεραία του πομπού (σταθερή) και Rx_i του δέκτη (κινούμενη) (Σπανουδάκης, 2001).

3.3.7 Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης

Πριν ξεκινήσει η διασκόπηση είναι πρωταρχικής σημασίας να ρυθμιστούν όλοι εκείνοι οι παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με την επιτυχή έκβαση του πειράματος. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να συνοψιστούν στους παρακάτω:

- *συχνότητα εκπομπής*

- ολικός χρόνος καταγραφής
- διάστημα δειγματοληψίας
- βήμα διασκόπησης
- απόσταση κεραιών
- προσανατολισμός κεραιών
- υπέρθεση

3.3.7.1 Συχνότητα εκπομπής

Η συχνότητα εκπομπής (*operating frequency*) συνδέεται άμεσα με τη διακριτική ικανότητα και το βάθος διείσδυσης του παλμού του γεωραντάρ. Αυτοί οι δύο παράγοντες καθορίζουν τελικά την επιλογή της συχνότητας. Η επιλογή όμως δεν είναι πάντα εύκολη. Στις υψηλές συχνότητες εκπομπής το βάθος διείσδυσης είναι μικρό, ενώ η διακριτική ικανότητα μεγάλη. Στις χαμηλές συχνότητες συμβαίνει το αντίστροφο. Επομένως για τη βέλτιστη επιλογή της συχνότητας οι δύο παράγοντες θα πρέπει να σταθμιστούν ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε διασκόπησης. Συνήθως είναι προτιμότερο ένα μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης, διότι είναι ανώφελη μία πολύ καλή διακριτική ικανότητα όταν ο στόχος δεν μπορεί να εντοπιστεί.

Μία διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος αποτελεί ο υπολογισμός της συχνότητας (σε MHz) από την εξίσωση:

$$f = \frac{150}{x \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.26)$$

όπου το x συμβολίζει τη χωρική διακριτική ικανότητα (σε m).

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της συχνότητας είναι η χρήση του πίνακα 3.4. Οι τιμές του πίνακα βασίζονται στην πρακτική εμπειρία και με την υπόθεση ότι η απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα είναι περίπου το 25% του βάθους του στόχου. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας αυτός δεν θα πρέπει να αντικαταστήσει μία προσεκτική μελέτη του προβλήματος, αλλά απλά να αποτελέσει ένα πρόχειρο οδηγό αναφοράς.

<i>Βάθος (m)</i>	<i>0.5</i>	<i>1.0</i>	<i>2.0</i>	<i>5.0</i>	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>50</i>
<i>Κεντρική συχνότητα (MHz)</i>	<i>1000</i>	<i>500</i>	<i>200</i>	<i>100</i>	<i>50</i>	<i>25</i>	<i>10</i>

Πίνακας 3.4 Ενδεικτικές τιμές του βάθους διασκόπησης συναρτήσει της συχνότητας, υποθέτοντας ότι η χωρική διακριτική ικανότητα είναι το 25% του βάθους του στόχου (Πουλιούδης, 1999).

3.3.7.2 Ολικός χρόνος καταγραφής

Ο υπολογισμός του ολικού χρόνου καταγραφής (*time window*) στηρίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$W = 1.3 \frac{2d_{\max}}{v_{\min}} \quad (3.27)$$

όπου W είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής, d_{\max} το μέγιστο βάθος διεξόδου και v_{\min} η ελάχιστη ταχύτητα του παλμού στο μέσο διάδοσης. Η παραπάνω εξίσωση αυξάνει τον ολικό χρόνο κατά 30%, έτσι ώστε να είναι σε θέση να προβλέπει σφάλματα του υπολογισμού που οφείλονται σε πιθανές διακυμάνσεις της ελάχιστης ταχύτητας και του μέγιστου βάθους διασκόπησης.

Μία διασκόπηση χαρακτηρίζεται αποτυχημένη εάν ο ολικός χρόνος καταγραφής δεν είναι αρκετά μεγάλος για να καταγραφούν τα ανακλώμενα κύματα που προέρχονται από το στόχο. Αντίστροφα, ένας πολύ μεγάλος χρόνος καταγραφής θα είχε σαν συνέπεια μεγάλο όγκο των δεδομένων με ταυτόχρονη μείωση της παραγωγικότητας.

3.3.7.3 Διάστημα δειγματοληψίας

Μία από τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη λήψη των δεδομένων είναι το διάστημα δειγματοληψίας (*sampling interval*). Η παράμετρος αυτή εκφράζει το χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δύο σημείων μίας καταγραφείσας κυματομορφής, όπου κάθε σημείο αντιπροσωπεύει δεδομένη χρονική στιγμή κατά την οποία λαμβάνεται η μέτρηση.

Το διάστημα δειγματοληψίας εξαρτάται από την συχνότητα “*Nyquist*” και πρέπει να είναι πάντα μικρότερο από το μισό της περιόδου του κύματος της μέγιστης συχνότητας εκπομπής. Η συχνότητα *Nyquist* f_N ορίζεται ως η υψηλότερη συχνότητα του

φάσματος εκπομπής του γεωραντάρ και είναι διαφορετική για κάθε κεραία. Τα περισσότερα συστήματα γεωραντάρ εκπέμπουν σε ένα εύρος συχνοτήτων που κυμαίνεται από $0,5f$ έως $1,5f$ (η f συμβολίζει την κεντρική συχνότητα εκπομπής). Τελικά, για συντελεστή ασφάλειας ίσο με δύο, το διάστημα δειγματοληψίας δίνεται από την σχέση:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \rightarrow 1.5f = \frac{1}{2\Delta t} \xrightarrow{\text{συντ.ασφάλειας 2}} \Delta t = \frac{1}{6f} \quad (3.28)$$

όπου f_N είναι η συχνότητα Nyquist (Hz) και Δt το διάστημα δειγματοληψίας (sec).

Εάν η ταχύτητα λήψης και ο όγκος των δεδομένων θεωρηθούν πρωταρχικής σημασίας συγκριτικά με την ποιότητα των δεδομένων, τότε σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατόν το διάστημα δειγματοληψίας να αυξηθεί (ελαφρώς) σε σχέση με το προτεινόμενο.

3.3.7.4 Βήμα διασκόπησης

Το βήμα διασκόπησης ορίζει την απόσταση δύο διαδοχικών σημείων πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Ένα μεγάλο βήμα διασκόπησης δεν δίνει επαρκή αποτελέσματα. Ειδικότερα όταν αυτό είναι μεγαλύτερο από το διάστημα δειγματοληψίας Nyquist, οι απότομες μεταβολές στις κλίσεις των ανακλαστήρων δεν μπορούν να περιγραφούν επαρκώς και μεμονωμένοι στόχοι είναι δυνατόν να μην εντοπιστούν. Αντίθετα, αν το βήμα είναι υπερβολικά μικρό, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων επιβαρύνει την παραγωγικότητα. Για αυτόν το λόγο προτείνεται βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x το οποίο ισούται με:

$$n_x = \frac{\lambda}{4} = \frac{75}{(\epsilon_r)^{\frac{1}{2}} f} \quad (3.29)$$

3.3.7.5 Απόσταση κεραίων

Τα συστήματα γεωραντάρ προσφέρουν στο χρήστη τη δυνατότητα να μεταβάλλει, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, την απόσταση των κεραίων προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Αύξηση της απόστασης των κεραίων

συνεπάγεται αύξηση της εξασθένισης του κύματος, αφού αυτό αναγκάζεται να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Μία εκτίμηση της βέλτιστης απόστασης των κεραιών S αποτελεί η ακόλουθη έκφραση:

$$S = \frac{2 \times d_{\sigma\tau\acute{o}\chi\omicron\upsilon}}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (3.30)$$

όπου ϵ_r είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου διάδοσης και $d_{\sigma\tau}$ το βάθος του στόχου.

Όταν οι πληροφορίες που αφορούν την περιοχή διασκόπησης είναι λιγοστές (άγνωστο ϵ_r), ένας ασφαλής κανόνας προσδιορισμού της απόστασης είναι η εξίσωση που ακολουθεί:

$$S = 0,2 * d_{\sigma\tau\omicron\chi\omicron\upsilon} \quad (3.31)$$

Ελάχιστη απόσταση κεραιών (m)	0.17	0.25	0.5	1	2	4	8
Κεντρική συχνότητα (MHz)	900	450	225	110	50	25	12.5

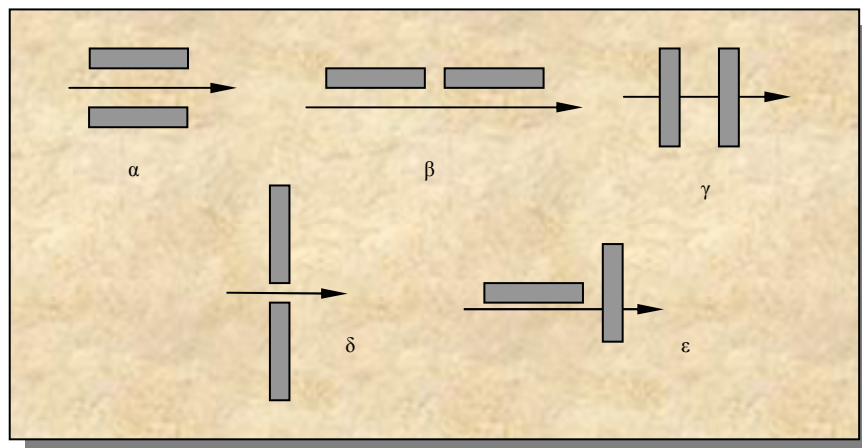
Πίνακας 3.5 Συνοπτικός πίνακας κεντρικών συχνοτήτων εκπομπής και προτεινόμενης ελάχιστης απόστασης κεραιών (Πουλιούδης, 1999).

3.3.7.6 Προσανατολισμός κεραιών

Η παράμετρος που μελετάται στην παράγραφο αυτή είναι ο προσανατολισμός των κεραιών, δηλαδή η σχετική θέση μεταξύ τους και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης. Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γεωραντάρ είναι ωμικές, διπολικές και ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός για την επιτυχή έκβαση των πειραμάτων. Η πιο συνηθισμένη διάταξη είναι αυτή κατά την οποία το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται παράλληλα με το μεγάλο άξονα των κεραιών (πομπού και δέκτη) και κάθετα ή παράλληλα με τη διεύθυνση της γραμμής μελέτης (Σχήμα 3.6α και 3.6γ). Εάν οι κεραίες χρησιμοποιούν κυκλικά πολωμένο σήμα, ο προσανατολισμός των κεραιών είναι ασήμαντος. Τα περισσότερα όμως συστήματα γεωραντάρ του εμπορίου χρησιμοποιούν γραμμικώς πολωμένες κεραίες, οπότε ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός.

Όπως προαναφέρθηκε, ο προσανατολισμός των κεραιών περιλαμβάνει τόσο τη μεταξύ τους διάταξη όσο και τη σχετική τους θέση ως προς τη διεύθυνση της γραμμής μελέτης. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί προσανατολισμοί.

Η σπουδαιότητα του προσανατολισμού των κεραιών φαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα. Έστω γραμμή μελέτης η οποία διασχίζει κάθετα ένα θαμμένο μεταλλικό σωλήνα. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται παράλληλα με τον άξονα του σωλήνα (διάταξη Σχήματος 3.6γ), τότε ο σωλήνας εμφανίζεται στα δεδομένα με τη μορφή υπερβολής σαν ένας εξαιρετικός ανακλαστήρας. Όταν οι κεραιές περιστραφούν κατά 90° ο σωλήνας δύσκολα μπορεί να εντοπιστεί. Η διάταξη των παράλληλων ηλεκτρικών πεδίων (Σχήμα 3.6α και 3.6γ) έχει καλύτερη εφαρμογή στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων.



Σχήμα 3.6 Δυνατές διατάξεις των κεραιών πομπού και δέκτη με τη διεύθυνση διασκόπησης. Το ηλεκτρικό πεδίο θεωρείται παράλληλο στο μεγάλο άξονα των κεραιών (Πουλιούδης, 1999).

Οι δύο κεραιές μπορούν να τοποθετηθούν και σε κάθετη διάταξη (κάθετα ηλεκτρικά πεδία), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6ε. Στην περίπτωση αυτή, το γεωραντάρ γίνεται περισσότερο ευαίσθητο σε σκεδαστές, όπως οι σωλήνες, χωρίς όμως η σχετική θέση σκεδαστή - κεραιών να επηρεάζει το αποτέλεσμα της καταγραφής. Η τελευταία διάταξη έχει φτωχά αποτελέσματα στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων.

3.3.7.7 Κατακόρυφη υπέρθεση

Σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο η βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων επιτυγχάνεται με επαναλαμβανόμενες καταγραφές σε κάθε σημείο της γραμμής μελέτης. Τα πλάτη των ιχνών των πολλαπλών καταγραφών, που λαμβάνονται στο ίδιο σημείο, αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται αυτόματα από το γεωραντάρ και είναι γνωστή ως υπέρθεση (*stacking*). Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης είναι ένα ίχνος στο οποίο τα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων έχουν ενισχυθεί, ενώ ο θόρυβος εξαλείφεται.

Είναι γεγονός ότι με τη διαδικασία αυτή βελτιώνεται η ποιότητα των δεδομένων, επιβραδύνεται όμως σημαντικά η διασκόπηση. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός υπέρθεσης, τόσο αυξάνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη διεκπεραίωση της διασκόπησης. Ο αριθμός επαναλαμβανόμενων μετρήσεων λαμβάνει τιμές στο διάστημα 1 έως 2048. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι κατάλληλη μία από τις τιμές 16, 32, 64.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφονται οι τεχνικές επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας και της μεθόδου του γεωραντάρ καθώς και λογισμικά πακέτα RES2DINV και GPRProV5 που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία αυτή.

4.2 Επεξεργασία μετρήσεων του γεωραντάρ

Η επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ σχετίζεται με τεχνικές της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας. Σκοπός είναι η απεικόνιση των δεδομένων με ευκρίνεια, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα κατά την ερμηνεία και αξιολόγησή τους. Συγκεκριμένα, η μαθηματική επεξεργασία του αρχικού σήματος επιδιώκει τον τονισμό ορισμένων χαρακτηριστικών, τα οποία δε γίνονται άμεσα αντιληπτά (όπως οριζόντιοι και κεκλιμένοι ανακλαστήρες), την απαλοιφή του θορύβου και τη γενικότερη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των δεδομένων.

Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται σε θεωρητικό υπόβαθρο τα φίλτρα (*filters*) και οι τύποι ενίσχυσης (*gains*) καθώς και τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (*instantaneous attributes*), που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτή στο αρχικό σήμα του γεωραντάρ. Επίσης εκτενής αναφορά γίνεται για τη μέθοδο της ταξινόμησης, η οποία αποτελεί και την κύρια επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ.

4.2.1 Φίλτρα

Η δειγματοληψία και καταγραφή των μετρήσεων γεωραντάρ πραγματοποιείται ανά προκαθορισμένα τακτά χρονικά διαστήματα για κάθε ίχνος (*sample interval*) και αποστάσεις μεταξύ γειτονικών-διαδοχικών ιχνών (*trace interval*)¹. Η λειτουργία των αλγορίθμων στηρίζεται σε μαθηματικές πράξεις μεταξύ των σημείων του ίδιου ίχνους ή μεταξύ γειτονικών ιχνών.

4.2.1.1 Φίλτρα διόρθωσης ίχνους

Η ηλεκτρομαγνητική κεραία του γεωραντάρ μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία κυμάτων χαμηλής συχνότητας, τα οποία διαχέονται στο έδαφος και υπερτίθενται στα κύματα ανάκλασης υψηλών συχνοτήτων, αλλοιώνοντας έτσι την καταγραφή. Το πλήθος των κυμάτων χαμηλής συχνότητας και ο τρόπος που εμφανίζονται στα δεδομένα, εξαρτώνται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης (έδαφος) και την απόσταση των κεραιών. Εδώ χρησιμοποιήθηκε το εξής φίλτρο διόρθωσης:

➤ **Φίλτρο διόρθωσης Dewow:**

Πρόκειται για φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (*High pass filter*). Η λειτουργία του φίλτρου στηρίζεται στη δημιουργία νοητού παραθύρου σε κάθε σημείο του ίχνους. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η μέση τιμή των σημείων που ανήκουν στο παράθυρο, η οποία αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου. Στη συνέχεια το παράθυρο μετατοπίζεται κατά ένα σημείο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

4.2.1.2 Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου

Πολλές φορές λόγω του φαινομένου της αντήχησης των κεραιών, εμφανίζονται στα δεδομένα οριζόντιοι ανακλαστήρες. Για παράδειγμα ο χειριστής του γεωραντάρ, τα ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες και δέκτες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και οι μεταλλικές κατασκευές επηρεάζουν σημαντικά το σήμα. Το φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (*Background noise removal*) εφαρμόζεται για να εξαλειφθούν τα παραπάνω φαινόμενα. Για να υλοποιηθεί αυτό υπολογίζεται ένα νέο ίχνος το οποίο αποτελεί το μέσο όρο όλων των ιχνών της τομής γεωραντάρ. Κατόπιν το μέσο ίχνος αφαιρείται από κάθε ίχνος και προκύπτει νέα εικόνα απαλλαγμένη από τα παραπάνω φαινόμενα.

¹ Σημειώνεται ότι τα δεδομένα γεωραντάρ είναι ένας πίνακας, του οποίου κάθε στήλη είναι ένα ίχνος ενώ κάθε γραμμή του αντιστοιχεί σε καταγραφές με ίδιο χρόνο άφιξης (Σπανουδάκης, 2002).

4.2.2 Ενίσχυση του σήματος

Η ενίσχυση (Gain) εφαρμόζεται στα δεδομένα για την καλύτερη παρουσίαση ισχυρών και ασθενικών ανακλάσεων, που λόγω της απορρόφησης των κυμάτων δεν διακρίνονται καθαρά στα αρχικά δεδομένα (Σπανουδάκης 2002).

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ενίσχυσης (Πουλιούδης, 1999):

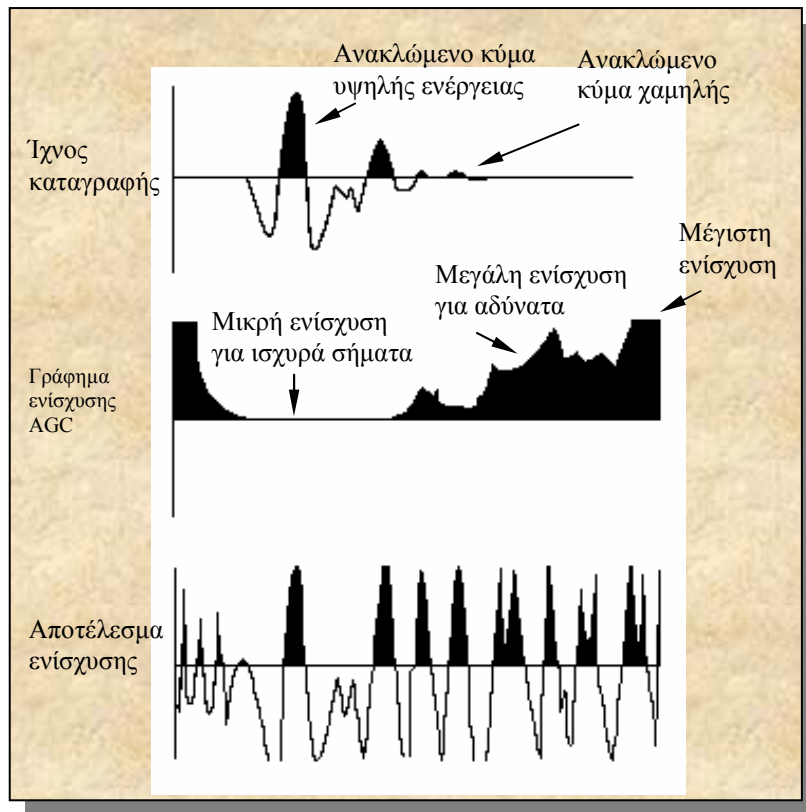
1. Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC)
2. Εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (Spreading and Exponential Compensation - SEC)
3. Σταθερή ενίσχυση

Σ' αυτή την εργασία εφαρμόστηκαν οι 2 πρώτοι τύποι ενίσχυσης οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά.

4.2.2.1 Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC)

Ο αλγόριθμος αυτός έχει σκοπό να ενισχύσει τα ασθενή σήματα που προκύπτουν λόγω της εξασθένισης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος. Ουσιαστικά επιτυγχάνει την ισοστάθμιση του σήματος καταγραφής, την ανάδειξη της συνέχειας των κυμάτων ανάκλασης και την καλύτερη παρουσίαση ασθενικών ανακλάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας στο σήμα ενίσχυση, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ενέργειά του. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι από τη στιγμή που θα εφαρμοστεί ο τύπος ενίσχυσης AGC, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα από τη συσχέτιση των πλατών των κυμάτων που προέρχονται από διαφορετικούς ανακλαστήρες.

Η ενίσχυση του σήματος πραγματοποιείται σε κάθε σημείο του ίχνους χωριστά. Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει τη μέση τιμή (ή μέση ενέργεια) γύρω από το κεντρικό σημείο του παραθύρου και ακολούθως πολλαπλασιάζει τα αρχικά δεδομένα με τον αντίστροφο της μέσης τιμής. Έτσι, τα μεγάλα πλάτη ενισχύονται λίγο ή και καθόλου, ενώ στα μικρά πλάτη εφαρμόζεται μεγάλη ενίσχυση (Σχήμα 4.1).



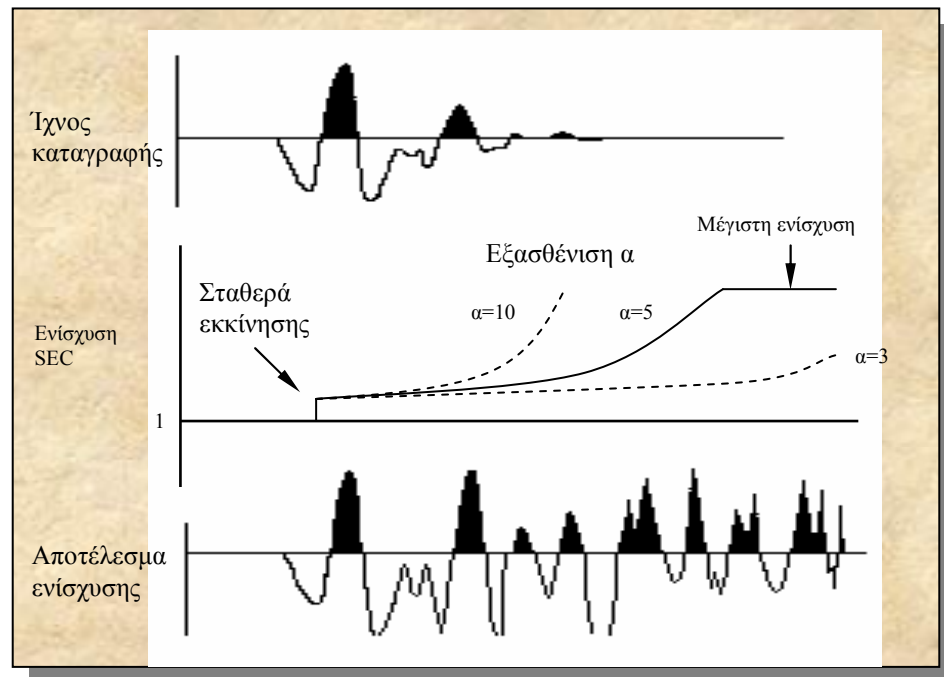
Σχήμα 4.1 Απεικόνιση της ενίσχυσης AGC και της επίδρασής της στο σήμα καταγραφής (Πουλιούδης, 1999).

4.2.2.2 Εκθετική ενίσχυση σήματος λόγω απωλειών διασποράς (SEC)

Η ενίσχυση SEC (*Spreading and Exponential Compensation*) αποτελεί σύνθεση γραμμικής και εκθετικής ενίσχυσης που εξαρτάται από το χρόνο (PulseEKKO 1000Run User Guide). Ο σκοπός της ενίσχυσης αυτής είναι η αναπλήρωση της ενέργειας των σημάτων από απώλειες που οφείλονται στην γεωμετρική διασπορά και την εκθετική εξασθένιση της ενέργειας των κυμάτων. Η ενίσχυση SEC μέχρι να προσεγγίσει την μέγιστη τιμή της πραγματοποιείται με εκθετικούς ρυθμούς, ενώ στη συνέχεια γραμμικά² (Σχήμα 4.2).

² Η συνάρτηση που περιγράφει την ενίσχυση SEC είναι: $g(t) = C + \left(1 + \frac{t - (\tau_w + t_o)}{\tau_w}\right) e^{bt}$, όπου C

είναι η σταθερά εκκίνησης, t_o ο χρόνος άφιξης του πρώτου σήματος (timezero), τ_w το εύρος του παλμού και $\beta = (\text{εξασθένιση } \alpha \text{ σε dB/m επί ταχύτητα παλμού } 0,1\text{m/ns}) / 8,69$ (Πουλιούδης, 1999).



Σχήμα 4.2 Η ενίσχυση SEC (Πουλιούδης, 1999).

4.2.3 Στιγμαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων

Το σήμα που στέλνει και λαμβάνει το γεωραντάρ είναι πραγματικός αριθμός. Για μεγαλύτερη όμως ακρίβεια και ευκολία στους υπολογισμούς, το σήμα μετατρέπεται σε μιγαδικό αριθμό³. Το λογισμικό του γεωραντάρ συνδυάζει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του αναλυτικού σύνθετου σήματος (Σπανουδάκης, 2002), με αποτέλεσμα να ανακτώνται επιπλέον πληροφορίες του αρχικού σήματος, πολύ χρήσιμες για την αξιολόγηση και ερμηνεία των δεδομένων.

Τα στιγμαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (*instantaneous attributes*) εκφράζουν τις στιγμαίες μεταβολές ποικίλων παραμέτρων. Οι στιγμαίες τιμές των μιγαδικών χαρακτηριστικών (όπως το στιγμαίο πλάτος και οι παράγωγοί του, η στιγμαία φάση και η στιγμαία συχνότητα) μπορούν να προσδιοριστούν από τα αναλυτικά σύνθετα σήματα (Taner et al., 1992-2001).

³ Το αναλυτικό σύνθετο σήμα $F(t)$ μπορεί να γραφτεί: $F(t) = f(t) + ig(t)$, όπου $f(t)$ το πραγματικό μέρος (δεδομένα καταγραφής γεωραντάρ) και $g(t)$ το φανταστικό μέρος του σήματος (Taner et al., 1992-2001). Το φανταστικό μέρος (quadrature) είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά 90° πραγματικό μέρος και προκύπτει με μετασχηματισμό *Hilbert* στο πραγματικό μέρος.

4.2.3.1 Στιγμιαίο πλάτος

Το στιγμιαίο πλάτος (*Instantaneous Envelope*) $E(t)$ εκφράζει την ανακλώμενη ισχύ, η οποία είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ολικής ενέργειας του σήματος σε δεδομένη χρονική στιγμή. Αποτελεί το μέτρο του αναλυτικού σύνθετου σήματος (σχέση 4.1) και χρησιμοποιείται κυρίως για να τονίσει αλλαγές στη λιθολογία και τις γεωλογικές ανομοιομορφίες (ασυνέχειες κτλ).

$$E(t) = \sqrt{[f^2(t) + g^2(t)]} \quad (4.1)$$

4.2.3.2 Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα ‘decibel’

Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα ‘decibel’ (*dB Instantaneous Envelope*) δίδεται από τη σχέση: $20\log E(t)$. Η κλίμακα dB χρησιμοποιείται συνήθως στο πεδίο των συχνοτήτων για τη απεικόνιση του φάσματος ισχύος. Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB. Η κλασματική ανάλυσή του δίδει πληροφορίες σχετικά με στρωματογραφικές σειρές και ανωμαλίες λόγω της ύπαρξης υδρογονανθράκων.

4.2.3.3 Στιγμιαία φάση

Η στιγμιαία φάση (*Instantaneous Phase*) $Ph(x,t)$ επιτυγχάνει τη συνεχή απεικόνιση της φάσης του σήματος σε σχέση με το χρόνο. Χρησιμοποιείται κυρίως για να δώσει έμφαση στην πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων, αφού μπορεί να κάνει τα αδύναμα σήματα να διακρίνονται. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη γεωλογική χαρτογράφηση, αφού αναδεικνύει τους ανακλαστήρες και τις αλλαγές στη λιθολογία, ενώ δεν παρέχει πληροφορίες για την ισχύ των ανακλάσεων. Αποτελεί το τόξο εφαπτομένης του αναλυτικού σύνθετου σήματος:

$$Ph(x,t) = \arctan \left[\frac{g(x,t)}{f(x,t)} \right] \quad (4.2)$$

4.2.3.4 Συνάφεια

Η συνάφεια (semblance) είναι ένα μέτρο της ομοιότητας μεταξύ διάφορων ιχνών. Με τιμή 1 υποδεικνύονται παρόμοια ίχνη, ενώ με τιμή 0 υποδεικνύονται ανόμοια ίχνη. Υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο (Taner 1992-2000):

$$Semblance(t) = \frac{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \left\{ \sum_{m=1}^M f_m(t+\tau) \right\}^2 - \sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \left\{ \sum_{m=1}^M f_m^2(t+\tau) \right\}}{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \left\{ \sum_{m=1}^M f_m^2(t+\tau) \right\}} \quad (4.3)$$

όπου f_m είναι το m ίχνος και το N είναι το πλήθος των μετρήσεων στο χρονικό παράθυρο.

4.2.4 Ταξινόμηση

Η ταξινόμηση είναι κυρίως μέθοδος της πολυδιάστατης Στατιστικής και αφορά στο διαχωρισμό αντικειμένων και την καταχώρισή τους σε δύο ή περισσότερες ομάδες ή τάξεις. Πρώτος στόχος της ταξινόμησης είναι η περιγραφή της ‘διαφοροποίησης’ των αντικειμένων. Δεύτερος στόχος είναι η επιλογή ενός ‘κανόνα’ (κατάλληλου αλγορίθμου) ώστε να διαχωριστούν τα αντικείμενα σε δύο ή περισσότερες ομοειδείς τάξεις.

Η ταξινόμηση των δεδομένων του γεωραντάρ είναι η διαδικασία αντιστοίχισης ή τοποθέτησης των μιγαδικών χαρακτηριστικών των δεδομένων σε ομάδες που παρουσιάζουν την ίδια μορφή, τις ίδιες περίπου ιδιότητες.

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες ταξινόμησης, η μία αναφέρεται ως **αυτόματη ταξινόμηση** (unsupervised classification) και η δεύτερη ως **καθοδηγούμενη ταξινόμηση** (supervised classification). Η αυτόματη ταξινόμηση είναι η διαδικασία εκείνη κατά την οποία τα δεδομένα διαχωρίζονται σε τάξεις χωρίς ο χρήστης να γνωρίζει εκ των προτέρων τίποτα για την ύπαρξη ή το είδος της πληροφορίας που περιέχεται σε κάθε τάξη. Αντίθετα η καθοδηγούμενη ταξινόμηση προϋποθέτει αρχικά την ύπαρξη δειγμάτων γνωστής ταυτότητας και στη συνέχεια αφού υπολογιστούν τα

στατιστικά χαρακτηριστικά των γνωστών αυτών δειγμάτων, καταχωρούνται τα υπόλοιπα αταξινόμητα δεδομένα σε τάξεις (Μερτίκας, 1999, Richards 1993).

4.2.5 Αυτόματη Ταξινόμηση

Μια τυπική διαδικασία αυτόματης ταξινόμησης αρχίζει με τον καθορισμό του ελάχιστου και του μέγιστου αριθμού των τάξεων που πρόκειται να δημιουργηθούν από τον αλγόριθμο ταξινόμησης. Η ταξινόμηση ξεκινά με την αυθαίρετη επιλογή ενός συνόλου στοιχείων που θεωρούνται ως κέντρα συγκέντρωσης παρόμοιων δεδομένων. Η επιλογή αυτή συχνά είναι τυχαία, ώστε να διασφαλιστεί η αμεροληψία του αναλυτή στην ταξινόμηση και επιπλέον τα επιλεγμένα δεδομένα να είναι αντιπροσωπευτικά.

Κατόπιν ο αλγόριθμος της ταξινόμησης προσδιορίζει τις ‘αποστάσεις’ μεταξύ των δεδομένων. Επίσης, προσδιορίζονται τα πρωτογενή κέντρα συγκέντρωσης ομοειδών δεδομένων. Πολλές φορές, η τάξη μπορεί να αντιπροσωπευτεί από ένα μοναδικό σημείο, που θεωρείται ως το κέντρο συγκέντρωσης για συγκεκριμένη ομάδα δεδομένων.

Σε αυτό το αρχικό στάδιο, οι ομάδες ή τάξεις περιέχουν μόνο τα αρχικά επιλεγμένα δεδομένα που θεωρούνται ως πρωτογενείς πυρήνες συγκέντρωσης και δημιουργίας μιας τάξης. Στο επόμενο βήμα, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα προσαρτώνται στην πλησιέστερη και πιο ομοειδή ομάδα δεδομένων (δημιουργία τάξης). Με αυτή τη διαδικασία ολοκληρώνεται η ταξινόμηση των δεδομένων. Το στάδιο, όμως, αυτό της πρώτης ταξινόμησης αποτελεί μόνο αρχική προσέγγιση στο τελικό αποτέλεσμα, καθώς οι ομάδες που δημιουργήθηκαν από την πρώτη προσπάθεια είναι μάλλον απίθανο να αποτελούν και τη βέλτιστη λύση.

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος προσδιορίζει νέα κέντρα για κάθε ομάδα, καθώς η προσθήκη νέων δεδομένων συνεπάγεται και αλλαγή της αρχικής θέσης του κέντρου κάθε ομάδας. Κατόπιν όλα τα δεδομένα ταξινομούνται εκ νέου με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων ομάδων. Αν οι νέες ομάδες διαφέρουν από εκείνες που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Κατά αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η διαδικασία της αυτόματης ταξινόμησης.

4.2.5.1 Αλγόριθμοι αυτόματης ταξινόμησης

Ομαδοποίηση είναι η διαδικασία της αυτόματης ταξινόμησης των δεδομένων με συγγενή χαρακτηριστικά. Ως μέτρα ομαδοποίησης χρησιμοποιούνται οι αποστάσεις του κάθε στοιχείου $x=(x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ από το κέντρο $\mu_i=(\mu_{i,1}, \mu_{i,2}, \dots, \mu_{i,p})^T$ συσσώρευσης της τάξης, όπως η Ευκλείδεια απόσταση :

$$d_e(x, \mu_i) = [(x - \mu_i)^T (x - \mu_i)]^{(1/2)} = [(x_1 - \mu_{i,1})^2 + (x_2 - \mu_{i,2})^2 + \dots + (x_p - \mu_{i,p})^2]^{1/2} \quad (4.4)$$

και η απόσταση της διαφοράς των απόλυτων τιμών :

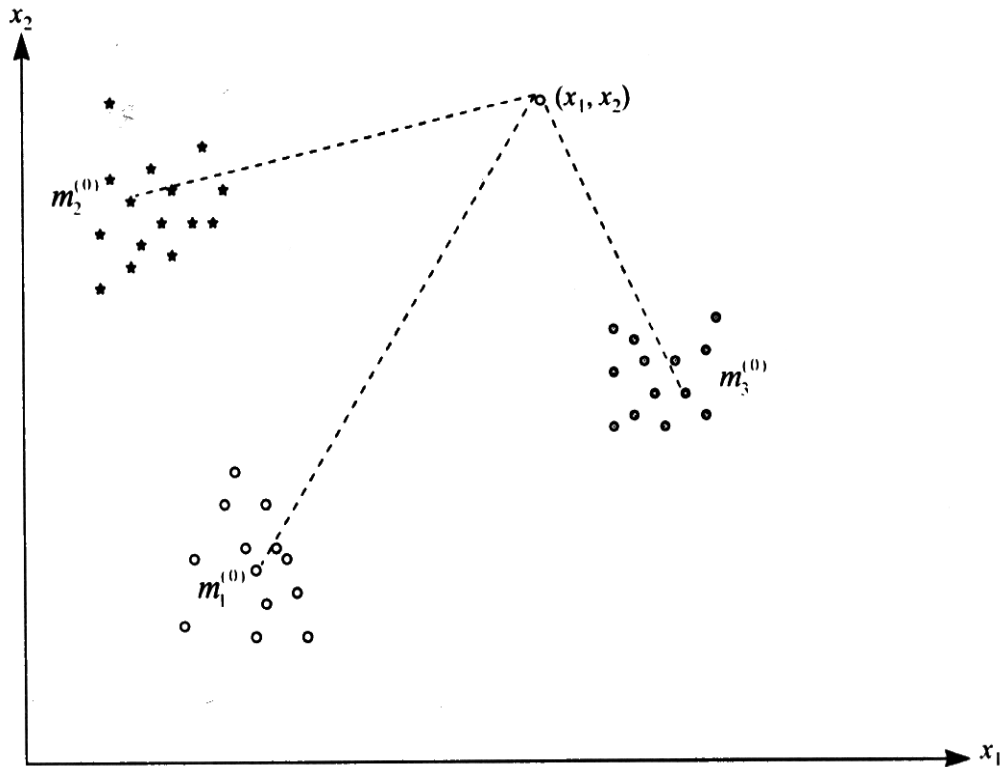
$$d_a(x, \mu_i) = [|x_1 - \mu_{i,1}| + |x_2 - \mu_{i,2}| + \dots + |x_p - \mu_{i,p}|] \quad (4.5)$$

Τα στοιχεία του διανύσματος x εκφράζουν στιγμιαία χαρακτηριστικά του ίχνους. Σαφώς η απόσταση της διαφοράς των απόλυτων τιμών είναι υπολογιστικά γρηγορότερο να καθοριστεί, εντούτοις μπορεί να θεωρηθεί λιγότερο ακριβής από την Ευκλείδεια απόσταση.

4.2.6 Ταξινόμηση K- Μέσων Τιμών (k-Means Clustering)

Η διαδικασία ταξινόμησης επαναλαμβανόμενης βελτιστοποίησης, αποκαλείται επίσης και τεχνική K-μέσων τιμών, (αλγόριθμος ISODATA). Ο βασικός αλγόριθμος των K-μέσων τιμών αποτελείται από τα εξής βήματα υπολογισμού :

1. Η διαδικασία αρχίζει με την επιλογή C σημείων στο χώρο που χρησιμεύουν ως τα πιθανά κέντρα συσσώρευσης των υποψήφιων τάξεων. Έστω ότι τα σημεία αυτά είναι: $m_i', i=1, 2, 3, \dots, C$. (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3 Η διαδικασία της ομαδοποίησης των K -μέσων τιμών στην αυτόματη ταξινόμηση (Richards, 1993).

Η επιλογή του m_i' σε αυτή τη φάση είναι αυθαίρετη και ο μόνος περιορισμός είναι ότι δεν πρέπει να υπάρχουν δύο ίδια.

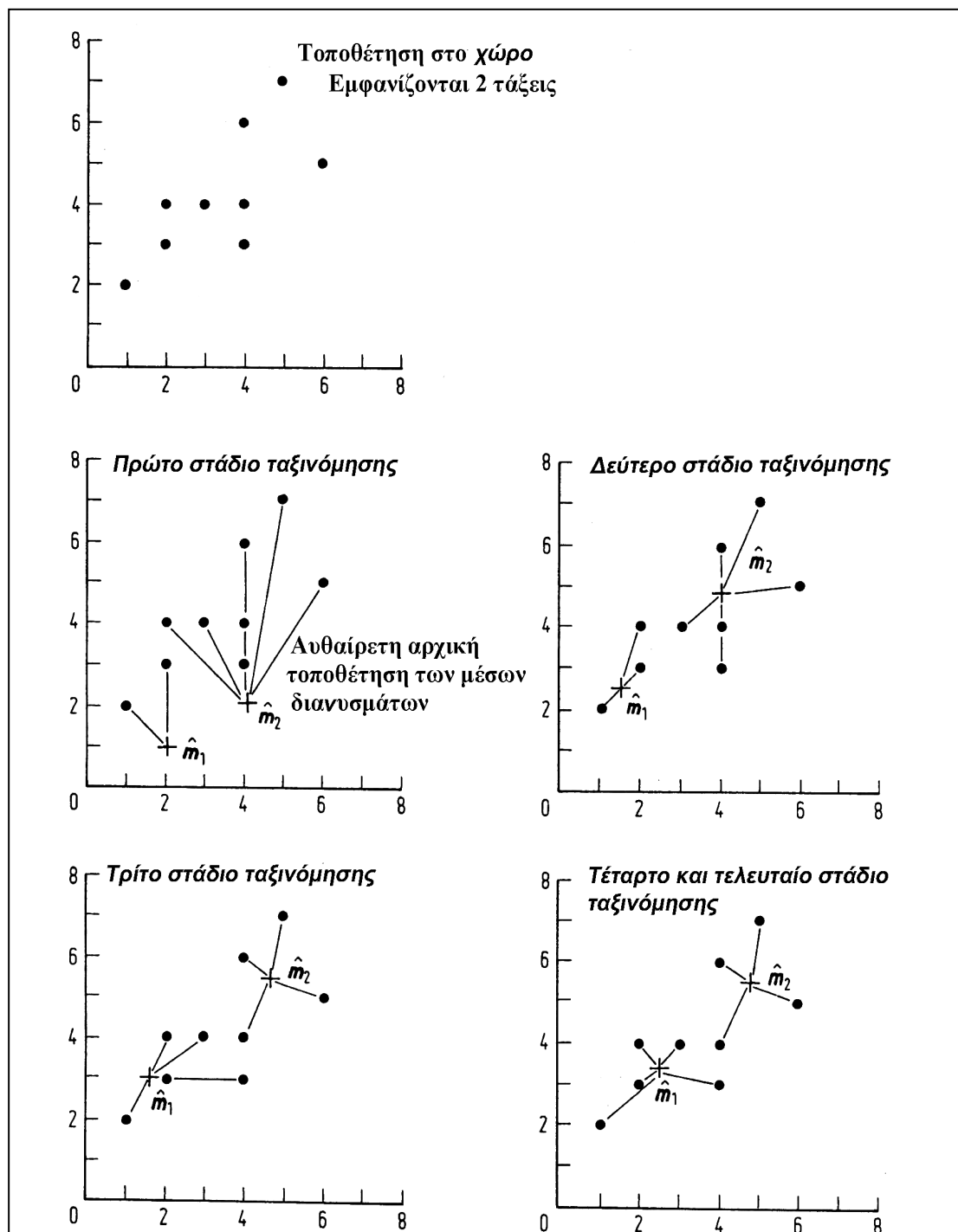
Εκτός από την επιλογή του m_i' και ο αριθμός των τάξεων C πρέπει να καθοριστεί εκ των προτέρων.

2. Η θέση x κάθε στοιχείου στο χώρο (x_1, x_2, \dots, x_p) εξετάζεται και το στοιχείο καταχωρείται στο πλησιέστερο κέντρο συσσώρευσης. Αυτή η καταχώρηση γίνεται βάσει της Ευκλείδειας απόστασης ή της απόστασης της διαφοράς των απόλυτων τιμών που δόθηκαν παραπάνω.

3. Δημιουργείται νέο σύνολο κέντρων συσσώρευσης των στοιχείων από την ομαδοποίηση του βήματος 2, το οποίο είναι: $m_i, i=1, 2, 3, \dots, C$

4. Αν ισχύει $|m_i - m_i'| < \epsilon$ όπου ϵ ένας μικρός αριθμός, τότε η διαδικασία τερματίζεται. Διαφορετικά τίθεται $m_i = m_i'$ και επαναλαμβάνονται τα βήματα 2, 4.

Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία ταξινόμησης για απλό σύνολο δύο στιγμιαίων χαρακτηριστικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία ταξινόμησης για δύο στιγμιαία χαρακτηριστικά (Richards, 1993).

4.2.6.1 Συνένωση, απαλοιφή και κατάτμηση ομάδων

Βασιζόμενοι στον προηγούμενο αλγόριθμο, οι Ball και Hall (Ball and Hall 1965) προσθέτουν δύο επιπλέον βήματα ώστε να βελτιωθεί η διαδικασία ομαδοποίησης των στοιχείων. Τα βήματα αυτά αφορούν τη συνένωση ή απαλοιφή ομάδων και την κατάτμηση ομάδων.

Σε ότι αφορά τη συνένωση και απαλοιφή ομάδων μόλις ολοκληρωθεί η ταξινόμηση, ή σε οποιοδήποτε ενδιάμεσο στάδιο, οι τάξεις εξετάζονται για να διαπιστωθεί εάν:

- i. Κάποια τάξη περιέχει μικρό αριθμό στοιχείων έτσι ώστε να μην έχει νόημα, οπότε καταργείται.
- ii. Κάποιες ομάδες είναι τόσο κοντά ώστε δεν είναι απαραίτητο να υπάρχουν και για αυτό το λόγο πρέπει να συγχωνευθούν.

Ένα δεύτερο στάδιο που μπορεί να παρεμβληθεί στον αλγόριθμο ISODATA είναι να διαχωριστούν οι πολύ μεγάλες ομάδες. Συνήθως αυτό γίνεται με τον καθορισμό τιμής τυπικής απόκλισης πέρα από την οποία μια ομάδα πρέπει να διχοτομηθεί. Αυτό μπορεί να γίνει μετά από καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

Τα δύο βήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω από τη μια μεριά αυξάνουν την ικανότητα προσαρμογής του, από την άλλη όμως αυξάνουν την πολυπλοκότητα των υπολογισμών. Ο αλγόριθμος ISODATA απαιτεί να καθοριστούν περισσότερες παράμετροι κατά την ταξινόμηση (απαλοιφή ή συνένωση) καθώς και να υπολογίζονται τα όρια της διασποράς.

Στον αλγόριθμο των K-μέσων τιμών, η ταξινόμηση μπορεί να μην ολοκληρωθεί, επειδή η διαδικασία της ομαδοποίησης ενδέχεται να μη συγκλίνει. Επομένως θα πρέπει να καθοριστεί μέγιστος αριθμός διαδοχικών προσεγγίσεων, ώστε να τερματίζεται η διαδικασία ταξινόμησης.

4.2.7 Χάρτες αυτοδιοργάνωσης (Self Organizing Map)

Οι χάρτες αυτοδιοργάνωσης είναι ειδικές περιπτώσεις νευρωνικών δικτύων που βασίζονται στην ανταγωνιστική μάθηση. Τα νευρώνια σε αυτή την περίπτωση είναι τοποθετημένα στους κόμβους πλέγματος, δύο διαστάσεων. Τα νευρώνια εκπαιδεύονται βάσει των δειγμάτων εισόδου σύμφωνα με τους κανόνες της ανταγωνιστικής μάθησης, δηλαδή μόνο ένα νευρώριο νικάει κάθε φορά τον ανταγωνισμό. Στη συνέχεια

διατάσσονται στον χάρτη το ένα σε σχέση με το άλλο και σχηματίζεται ένας τοπολογικός χάρτης όπου η πλευρική διάταξή τους είναι ενδεικτική των φυσικών χαρακτηριστικών που περιέχονται στα δεδομένα. Δηλαδή τα νευρώνια που βρίσκονται κοντά στον χάρτη εκτελούν παρόμοιες λειτουργίες.

Ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται δημιουργεί αποτύπωση των χαρακτηριστικών (των γνωρισμάτων) προσαρμόζοντας τους συντελεστές βάρους από τους κόμβους εισόδου στους κόμβους εξόδου σε δίκτυο δύο επιπέδων. Το πρώτο επίπεδο αποτελεί το στρώμα εισόδου και το δεύτερο το ανταγωνιστικό στρώμα. Τα δύο επίπεδα είναι πλήρως διασυνδεδεμένα και κάθε νευρώνιο στο πρώτο επίπεδο έχει τόσες εισόδους όσα είναι και τα μιγαδικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στην ταξινόμηση (Kulkarni A., 1998).

Ο αλγόριθμος της αυτοδιοργάνωσης ξεκινάει ορίζοντας τα διανύσματα συναπτικών βαρών. Αυτό γίνεται προσδίδοντας μικρές τιμές στο δίκτυο, από γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Με αυτό τον τρόπο δεν υπάρχει οργανωμένη διάταξη από την αρχή. Οι θεμελιώδεις λειτουργίες ενός χάρτη αυτοδιοργάνωσης είναι οι ακόλουθες :

- **Ανταγωνισμός:** Τα νευρώνια ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιο ανταποκρίνεται καλύτερα στα διανύσματα εισόδου. Για κάθε νέα είσοδο μόνο ένα νευρώνιο ανακηρύσσεται νικητής.
- **Συνεργασία:** Το νευρώνιο νικητής καθορίζει τοπολογική γειτονία μέσα στην οποία τα νευρώνια συνεργάζονται.
- **Προσαρμογή συναπτικών βαρών:** Σε αυτό το στάδιο διορθώνεται όχι μόνο το διάνυσμα συναπτικών βαρών του νευρωνίου νικητή, ώστε να έρθει πιο κοντά στο διάνυσμα εισόδου, αλλά και τα διανύσματα συναπτικών βαρών της γειτονιάς του σε μικρότερο βαθμό. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχει τοπολογική συνέχεια.

Τα βασικά βήματα του αλγόριθμου μετά την επιλογή αρχικών τιμών στα συναπτικά βάρη είναι:

1. **Επιλογή αρχικών τιμών στα συναπτικά βάρη (initialization).** Επιλέγονται τυχαίες τιμές για τα διανύσματα συναπτικών βαρών $w_j(0)$. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι αυτές οι τιμές πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους για κάθε νευρώνιο

$j = 1, 2, \dots, l$ όπου l , ο αριθμός των νευρώνων στο πλέγμα. Καλό είναι οι τιμές να είναι μικρές. Ένας τρόπος καθορισμού αρχικών τιμών στα συναπτικά βάρη $\{\mathbf{w}_j(0)\}_{j=1}^l$ είναι να επιλεγθούν τυχαία δείγματα από το εύρος τιμών των διανυσμάτων εισόδου $\{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^N$.

2. Επιλέγεται ένα δείγμα \mathbf{x} από τα δεδομένα.
3. Υπολογίζεται το νευρόνιο νικητής $i(\mathbf{x})$ για συγκεκριμένο δείγμα \mathbf{x} από τα δεδομένα με κριτήριο την ελάχιστη Ευκλείδεια απόσταση:

$$i(\mathbf{x}) = \arg \min_j \|\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j\|, j = 1, 2, \dots, l \quad (4.6)$$

4. Τα συναπτικά βάρη όλων των νευρώνων χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + \eta(n)h_{j,i(\mathbf{x})}(n)(\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j(n)), \quad (4.7)$$

όπου $\eta(n)$ η παράμετρος ρυθμού εκμάθησης και $h_{j,i(\mathbf{x})}$ η τοπολογική γειτονιά γύρω από το νευρόνιο νικητή $i(\mathbf{x})$. Και οι δυο παραπάνω παράμετροι μεταβάλλονται κατά τη διαδικασία της μάθησης.

5. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 2 ωσότου δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στον χάρτη.

4.2.8 Το λογισμικό πακέτο GPRProV5

Το λογισμικό πακέτο με την ονομασία GPRProV5 έχει αναπτυχθεί στη Matlab R13 για δισδιάστατη και τρισδιάστατη επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων. Το πρόγραμμα αυτό περιέχει τα παρακάτω εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων:

1. Ανάγνωση (για SEG-Y, PulseEkko, Ramac, και Matlab files) και καταγραφή (για SEG-Y και Matlab Files).
2. Μονοδιάστατα και δισδιάστατα φίλτρα (Time Domain - Distance Domain).

3. Μιγαδικά χαρακτηριστικά (Instantaneous, Window Instantaneous, Wavelet or Response and Geometrical).
4. Στατιστικά εργαλεία πολλών μεταβλητών.
5. Εργαλεία ταξινόμησης νευρωνικών δικτύων.
6. Ανάλυση ταχύτητας.

4.2.9 Απαιτήσεις συστήματος - Εγκατάσταση

Αφού εγκατασταθεί το Matlab, το GPRProV5 πρέπει να μεταφερθεί στον φάκελο “work” του Matlab (C:/MatlabR13/work). Από τον κατάλογο (μενού), File > Set Path > Add with Subfolders, ορίζεται η διαδρομή μέσα από την οποία θα εκτελούνται οι αλγόριθμοι. Επίσης πρέπει να δημιουργηθεί φάκελος δεδομένων (π.χ. Data), μέσα στον “work”, και να οριστεί η αντίστοιχη διαδρομή του. Η διαδικασία του ορισμού της διαδρομής πρέπει να γίνεται κάθε φορά που προστίθενται νέα δεδομένα μέσα στον φάκελο “work”, ενώ επισημαίνεται ότι μόνο μέσα σε αυτόν επιτρέπεται να βρίσκονται δεδομένα και αλγόριθμοι.

Αφού γίνουν τα παραπάνω, ο χρήστης δεν έχει παρά να πληκτρολογήσει στο παράθυρο εντολών (Command Window) την εντολή, >>GPRProV5 ώστε να ξεκινήσει η εφαρμογή.

4.2.10 Εισαγωγή δεδομένων – Ορισμός παραμέτρων.

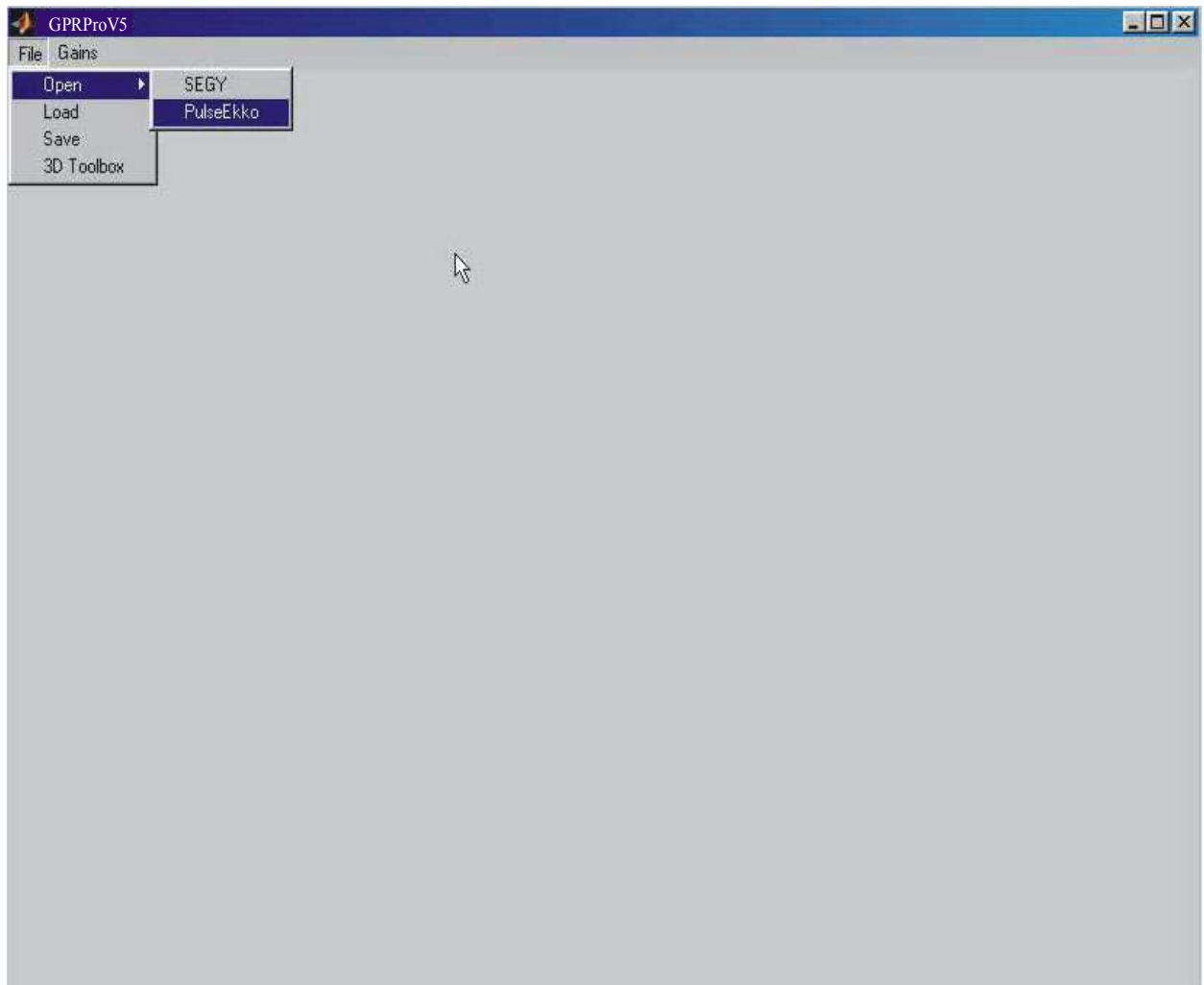
Το πρώτο βήμα κατά την επεξεργασία σεισμικών δεδομένων και δεδομένων γεωραντάρ είναι η εισαγωγή τους στο λογισμικό MATLAB. Τα βήματα που έγιναν για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

Κατ’ αρχάς γίνεται η εισαγωγή-ανάγνωση των δεδομένων. Η εισαγωγή αρχείων Pulse Ekko γίνεται από τον κατάλογο File > Open > PulseEkko ή από το κουμπί με τίτλο “Open PulseEkko”. Τότε ανοίγει το παράθυρο διαλόγου “Open PulseEkko Files” και ανατρέχοντας με το ποντίκι στον σχετικό φάκελο επιλέγεται το αρχείο. Αν τα δεδομένα έχουν ήδη αποθηκευτεί σε αρχείο Matlab (*.mat), ο χρήστης μπορεί να τα εισάγει επιλέγοντας File > Load ή το κουμπί με τίτλο Load.

Στα αρχεία PulseEkko, οι παράμετροι που αφορούν τη συλλογή των δεδομένων, όπως το διάστημα δειγματοληψίας και το βήμα διασκόπησης βρίσκονται στο αρχείο

επικεφαλίδας και ορίζονται από τον χειριστή κατά τη διάρκεια συλλογής των μετρήσεων.

Αφού επιλεγεί το κατάλληλο αρχείο από τα δεδομένα, επιλέγοντάς το και πατώντας “Άνοιγμα” εμφανίζεται καινούριο παράθυρο, όπου σε διάγραμμα “Distance (m)” και “Two Way Travel Time (nsec)” απεικονίζονται τα δεδομένα. Από τις διάφορες επιλογές που υπάρχουν σε αυτό το παράθυρο, είναι δυνατή η μεγέθυνση ή σμίκρυνση, η αλλαγή της κλίμακας χρωμάτων, ο σχεδιασμός γραμμών ή πολυγώνων σε αυτήν, η μεταβολή της αναλογίας μεγέθους μεταξύ των αξόνων και η αποθήκευση της εικόνας σε μορφή *.jpg, *.tif κ.τ.λ.



Σχήμα 4.5 Εισαγωγή – ανάγνωση δεδομένων.

4.2.11 Περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν κατά την ταξινόμηση

Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία της ακατέργαστης εικόνας με τη βοήθεια των φίλτρων και των μιγαδικών χαρακτηριστικών ξεκινά η διαδικασία ταξινόμησης ακολουθώντας κατά σειρά τα εξής βήματα:

1. Στην κύρια οθόνη του GPRProV5 υπάρχει αριστερά παράθυρο (workflow) στο οποίο φαίνονται αρχεία με τα επεξεργασμένα δεδομένα. Σε όλα αυτά εφαρμόζεται φίλτρο μέσης τιμής που αποτελείται από 3 στοιχεία (2D filtering > Average filter).
2. Εν συνεχεία επιλέχτηκαν όλες οι φιλτραρισμένες εικόνες που δημιουργήθηκαν. Συγκεκριμένα πατώντας το κουμπί stats και με πατημένο το control μαρκάρονται όλες οι εικόνες.
3. Από το μενού Multivariate Statistics επιλέχθηκε η εντολή Principal component και προέκυψε γράφημα (Multivariate statistics > Principal component).
4. Από το γράφημα αυτό, επιλέγονται οι 3 ή 4 πρώτες στήλες οι οποίες δίνουν το 87% περίπου της συνολικής πληροφορίας.
5. Κατόπιν, από το μενού Cluster Analysis επιλέχθηκε η εντολή unsupervised classification > k-means (Cluster Analysis > unsupervised classification > k-means).
Εμφανίζεται παράθυρο στο οποίο ζητείται α) ο αριθμός των αντίγραφων όπου ορίστηκε ίσος με 1, β) ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων όπου ορίστηκε ίσος με 100 και γ) ο αριθμός των τάξεων (Number of clusters). Εδώ επιλέχθηκαν οι τιμές 10 και 100 διαδοχικά, κάνοντας 2 διαφορετικές ταξινομήσεις. Προέκυψαν 2 αρχεία: k-means_10 και k-means_100.
6. Στην κύρια οθόνη εκτός από το παράθυρο workflow, υπάρχει δεξιά το παράθυρο cluster analysis στο οποίο φαίνονται τα αρχεία με τα ταξινομημένα δεδομένα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση εμφανίζονται τα αρχεία k-means_10 και k-means_100. Κάνοντας κλικ στο αρχείο 'k-means_100' (100 clusters)

επιλέγεται στην συνέχεια από το μενού Cluster Analysis η εντολή ‘unsupervised classification’ και από εκεί η ‘Self Organizing Map’ (Cluster Analysis > unsupervised classification > SOM).

7. Εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου ‘Training Samples Viewer – Employer’ το οποίο δείχνει προεπισκόπηση της εικόνας. Με κλικ στην επιλογή ‘Employ’ δίνεται θετική απάντηση στην ερώτηση για κανονικοποίηση των δεδομένων (Normalize data > Yes).
8. Εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου ‘Kohonen Self Organizing Network’ στο οποίο επιλέγονται οι εξής παράμετροι: α) Number of epochs:500 και β) Dimension:1 by 10. Οι υπόλοιπες παράμετροι αφήνονται ως έχουν οριστεί από το πρόγραμμα. Στη συνέχεια με κλικ στην επιλογή ‘Training’ και ‘Simulation’ δημιουργείται η ταξινομημένη εικόνα με τη χρήση της μεθόδου χαρτών αυτοδιοργάνωσης (τελική εικόνα SOM).

4.3 Επεξεργασία ηλεκτρικών μετρήσεων

4.3.1 Γενικά

Η επεξεργασία μέτρησης της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα RES2DINV ξεχωριστά για κάθε γραμμή μελέτης. Σύμφωνα με το πρόγραμμα αυτό εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο dat (βλέπε κεφ. 3^ο). 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 στο μενού Display ρυθμίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής. Οι γεωηλεκτρικές τομές για τις έξι γραμμές της περιοχής μελέτης περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.3.2 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 (από 100 έως 5000) τα οποία συλλέχθηκαν με τη χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων (από 25 έως 650 ηλεκτρόδια περίπου)

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.

Ο σκοπός αυτού του προγράμματος είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε ορθογώνια παραλληλόγραμμα του δισδιάστατου μοντέλου που δημιουργεί ψευδοτομή ειδικής αντίστασης η οποία συμφωνεί με αυτή τη μέτρηση.

4.3.3 Εγκατάσταση

Μετά από την εγκατάσταση του προγράμματος RES2DINV.EXE, ο χρήστης πρέπει να τρέξει το πρόγραμμα JACOBWIN.EXE για να δημιουργήσει διάφορα αρχεία υποστήριξης.

Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με το πρόγραμμα εγκατάστασης SETUP.EXE, και το JACOBWIN. EXE. Το κύριο πρόγραμμα RES2DINV. EXE και τα αρχεία υποστήριξης (GRADWEN, GRADTWO και GRADDIP) πρέπει να είναι στον ίδιο υποκατάλογο στο σκληρό δίσκο.

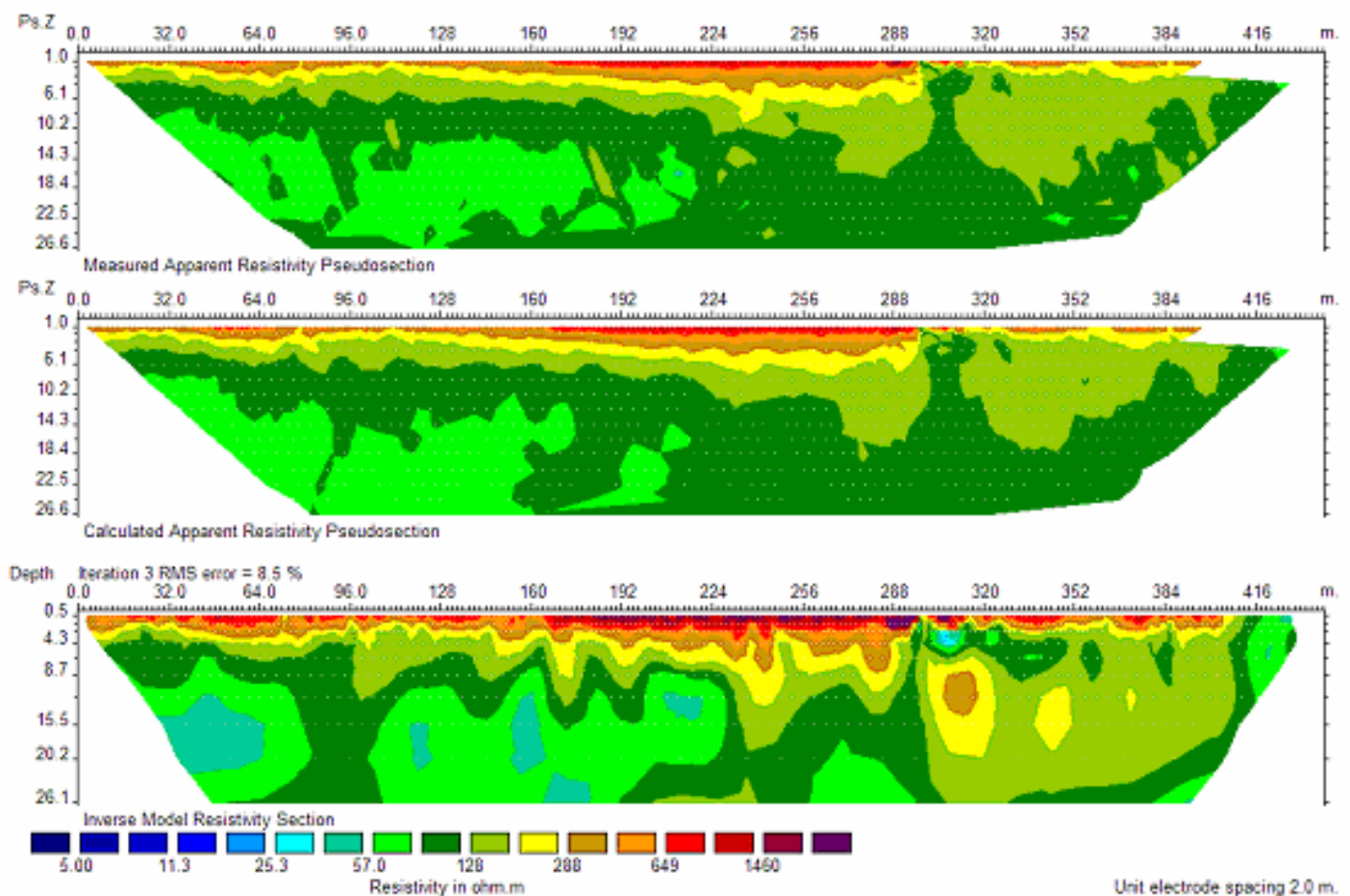
4.3.4 Περιγραφή των βημάτων

1. Αρχικά εισάγονται τα δεδομένα μορφής *.dat τα οποία βρίσκονται στον φάκελο Weert tomography raw data (File > Read data file > *.dat)

2. Στο παραπάνω αρχείο, αναγράφονται λεπτομερώς και οι παράμετροι της επιλεγμένης γραμμής μελέτης. (διάταξη ηλεκτροδίων, μήκος γραμμής, αριθμός ηλεκτροδίων κ.λ.π.)
3. 1^η αντιστροφή: Επιλέγεται από το μενού Inversion η εντολή Least-squares inversion (Inversion > Least-squares inversion) και γίνεται η αντιστροφή.
Ζητείται πρώτα το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα της αντιστροφής (*.inv).
Εδώ πρέπει να καθοριστούν 2 παραμέτροι του προγράμματος:
 - α) **Αριθμός επαναλήψεων:** Επιτρέπει στο χρήστη να θέσει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων της ρουτίνας της αντιστροφής. Εξ' ορισμού ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων όπως αυτός έχει οριστεί από το πρόγραμμα είναι το 5. Αυτό συνήθως κρίνεται ικανοποιητικό. Όταν οι επαναλήψεις φτάσουν το μέγιστο όριο, ο χρήστης θα ερωτηθεί αν επιθυμεί να συνεχίσει τη διαδικασία της αντιστροφής. Συνήθως δε χρειάζεται να γίνουν παραπάνω από δέκα επαναλήψεις. Η έκδοση demo έχει ως μέγιστο όριο τις τρεις (3) επαναλήψεις.
 - β) **Όριο σύγκλισης:** Θέτει το όριο για τη σχετική αλλαγή (μείωση) στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων. Εξ' ορισμού χρησιμοποιείται η τιμή 5%. Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μείωση σαν κριτήριο σύγκλισης στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων αντί της τιμής RMS.
4. Πιθανόν να εμφανιστεί μήνυμα πως η μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMS στις 2 τελευταίες επαναλήψεις ήταν μικρότερη του 5%. Ο χρήστης ρωτάται αν θα συνεχίσει την αντιστροφή και αν ναι, τότε αυτός πρέπει να θέσει νέο όριο.
5. Από το μενού Edit > Exterminate bad datum points.
Σε αυτήν την επιλογή, ο χρήστης μπορεί να αφαιρέσει από τα δεδομένα τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με μεγάλο σφάλμα στη μέτρηση. Ο κύριος σκοπός αυτής της επιλογής είναι να αφαιρεθούν δεδομένα με μη αποδεκτές τιμές ειδικής αντίστασης. Μεγάλο σφάλμα οφείλεται στην αποτυχημένη λειτουργία των έξυπνων ηλεκτροδίων, στη φτωχή επαφή ηλεκτροδίων με το έδαφος ή στα καλώδια λόγω των συνθηκών υψηλής

υγρασίας του υπεδάφους. Για αυτά τα δεδομένα συνήθως η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει πάρα πολύ μεγάλες ή πάρα πολύ μικρές τιμές έναντι των γειτονικών δεδομένων. Για να αφαιρεθεί μια μη αποδεκτή τιμή, αρκεί αριστερό κλικ με το ποντίκι στο αντίστοιχο σημείο. Το χρώμα του σημείου αλλάζει από μαύρο σε κόκκινο. Η επιλογή του πλήκτρου q διακόπτει την παραπάνω διαδικασία.

6. 2^η αντιστροφή: Αφού αποθηκευτεί το παραπάνω διορθωμένο αρχείο με επέκταση ονόματος dat, ξεκινάει η 2^η αντιστροφή κατά τον ίδιο τρόπο με το βήμα 3.
7. Τα τελικά αποτελέσματα που είναι της μορφής του Σχήματος 4.6 αποθηκεύονται ως BMP files.



Σχήμα 4.6 Παράδειγμα αντιστροφής δεδομένων γραμμής ηλεκτρικής τομογραφίας. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Για την επιλογή της κατάλληλης χρωματικής κλίμακας η οποία εκφράζει το λογάριθμο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έγιναν δύο προσπάθειες. Στην πρώτη η κατώτερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίστηκε στα 5 ohm.m και το βήμα ίσο με 1,5. Στην δεύτερη η κατώτερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίστηκε στα 10 ohm.m και το βήμα είναι 1,6.

Τελικά επιλέχθηκαν οι εικόνες της πρώτης κλίμακας γιατί ήταν πιο ρεαλιστικό το εύρος τιμών των αντιστάσεων, αφού η κλίμακα αυτή παρείχε περισσότερες λεπτομέρειες για τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους στις τιμές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

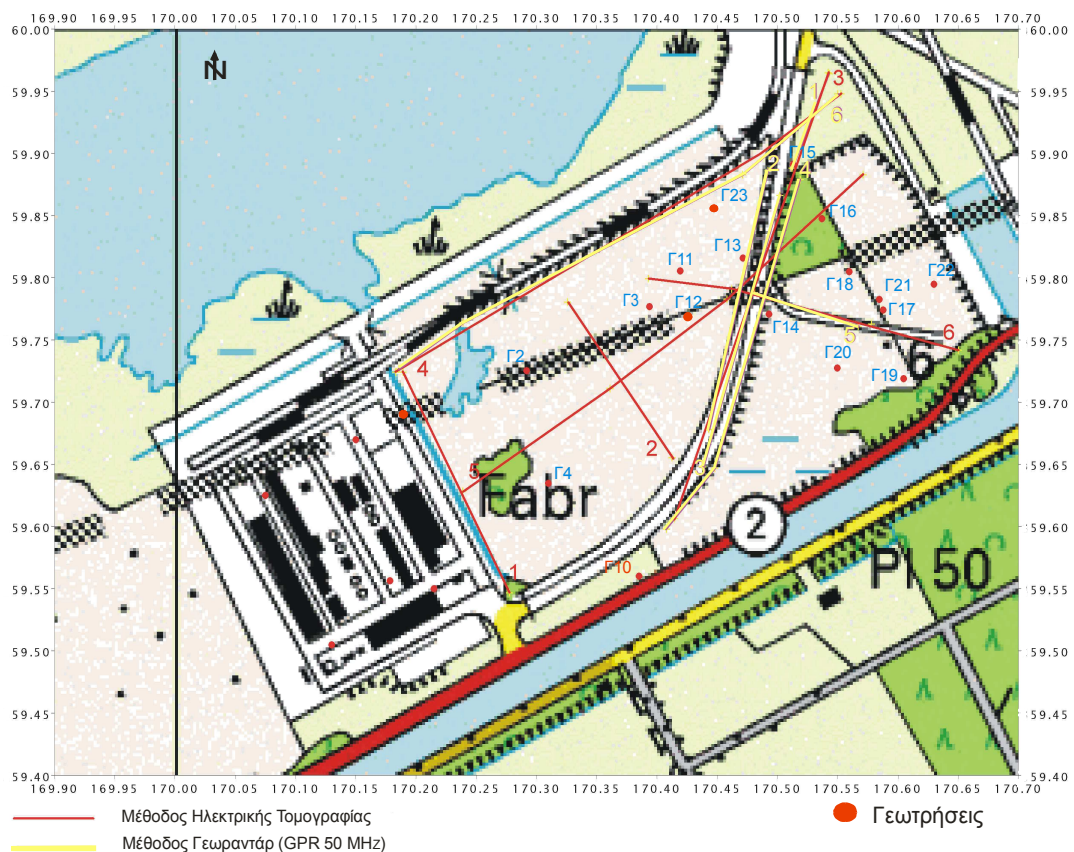
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ WEERT

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία με τα προγράμματα RES2DINV και GPRProV5 (η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων μελετήθηκε στο κεφ 4). Επίσης παρουσιάζονται όλα εκείνα τα στοιχεία που κρίνονται απαραίτητα για τη σύγκριση και ερμηνεία και τα οποία συλλέχθηκαν από αναφορές των ιδρυμάτων που συμμετείχαν στην γεωφυσική αυτή έρευνα στην περιοχή του Weert.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ



Χάρτης 5.1

Στο χάρτη 5.1 απεικονίζονται οι γραμμές μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ που δημιουργήθηκαν στην περιοχή.

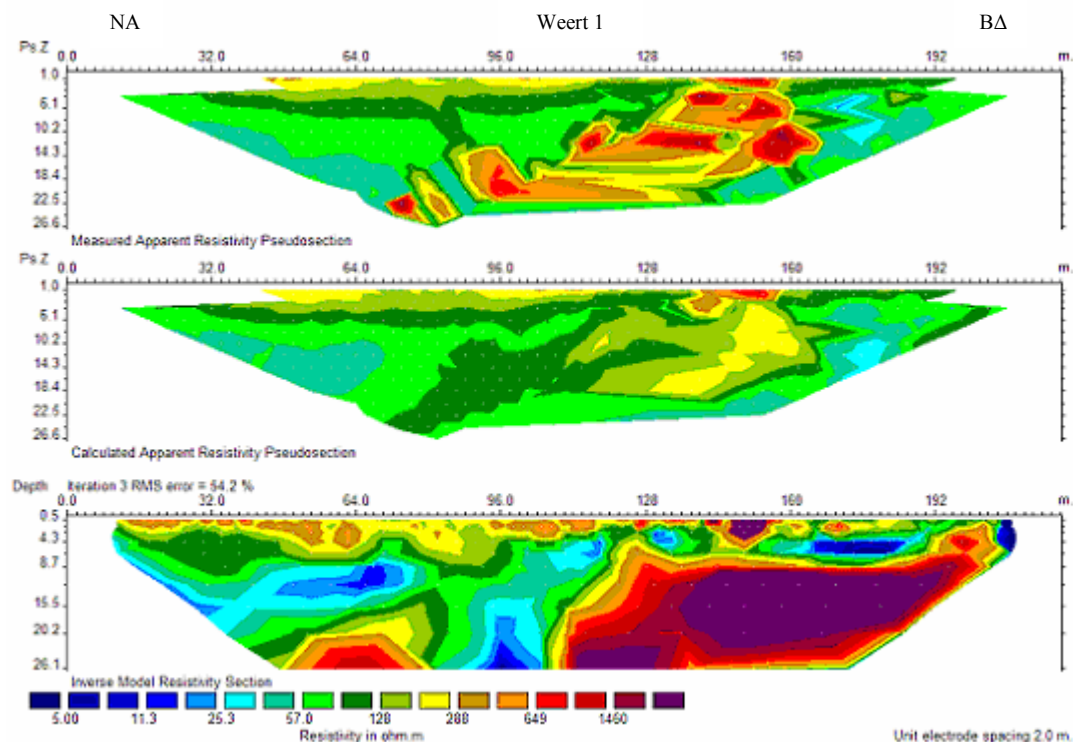
5.2 Ηλεκτρική τομογραφία

Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας. Δημιουργήθηκαν 6 γραμμές μέτρησης τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Wenner με ισαπόσταση a των ηλεκτροδίων ίση με 2μ. Σε κάθε γραμμή χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια αυτά συνδέονται με καλώδια με το μηχάνημα Sting, το οποίο μετράει το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα που στέλνει στο έδαφος. Δηλ. το μέγεθος $\Delta V / I$.

Γραμμή μελέτης	Διάταξη ηλεκτροδίων	Ισαπόσταση ηλεκτροδίων (μ)	Μήκος γραμμής μελέτης (μ)	Αριθμός Ηλεκτροδίων
1	Wenner	2-52	222	111
2	Wenner	2-52	160	81
3	Wenner	2-52	398	200
4	Wenner	2-52	440	221
5	Wenner	2-52	440	221
6	Wenner	2-52	280	141

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών τομογραφιών

Τα δεδομένα των παραπάνω 6 γραμμών μελέτης μετά από την σχετική επεξεργασία έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

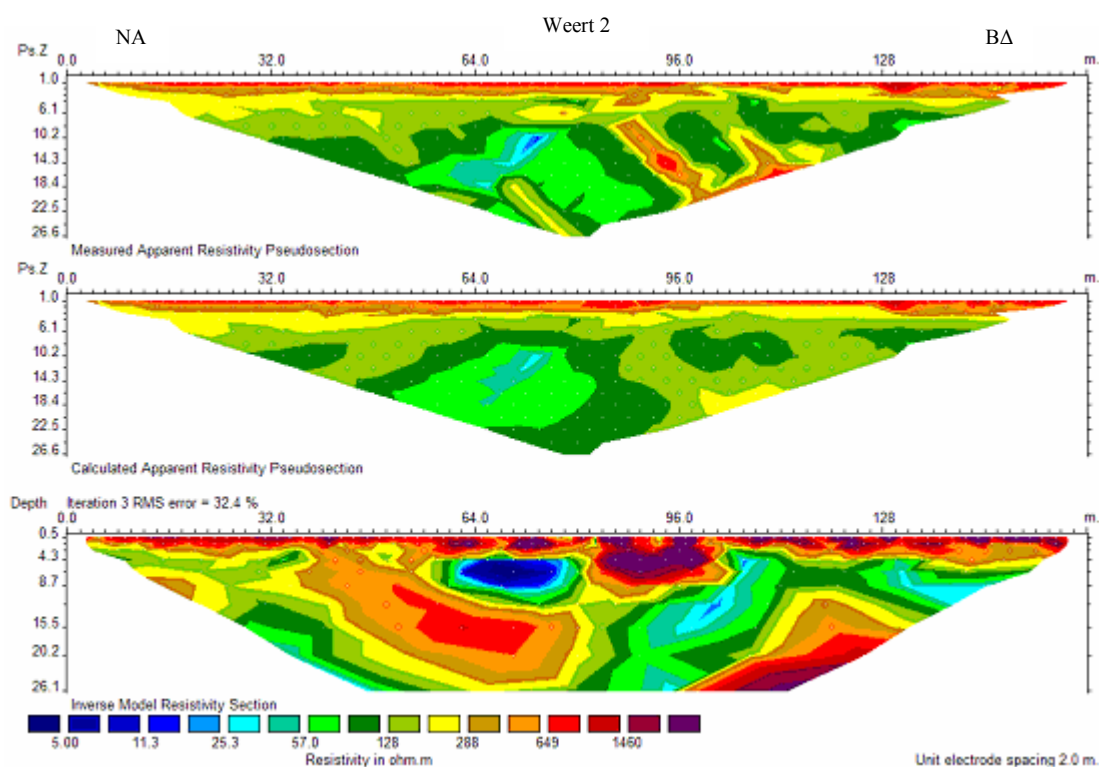


Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της πρώτης γραμμής μελέτης. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Όπως προκύπτει από την γεωηλεκτρική τομή της πρώτης γραμμής μελέτης, υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης που εκτείνεται από την αρχή της γραμμής μελέτης έως τα 190 μέτρα. Αυτό το στρώμα φαίνεται να φτάνει κατά τόπους μέχρι βάθους 12 μέτρων. Δημιουργούνται έτσι ζώνες χαμηλών αντιστάσεων που σύμφωνα με τη γεωλογία της περιοχής αποδίδονται σε αργίλους. Επίσης παρατηρούνται δύο ζώνες πολύ υψηλής αντίστασης. Η πρώτη εντοπίζεται σε βάθος 20 μέτρων και εκτείνεται κατά μήκος 48-80 μέτρων της γραμμής μελέτης, ενώ η δεύτερη ζώνη ξεκινάει από βάθος 7 μέτρων κι εκτείνεται από τα 106 έως τα 208 μέτρα της γραμμής. Συμπερασματικά εντοπίζονται 2 ανωμαλίες (υψηλές αντιστάσεις) εκ των οποίων η μία δεν είναι ευδιάκριτη λόγω της αδυναμίας για παρατήρηση σε βάθος μεγαλύτερο των 26 μέτρων.

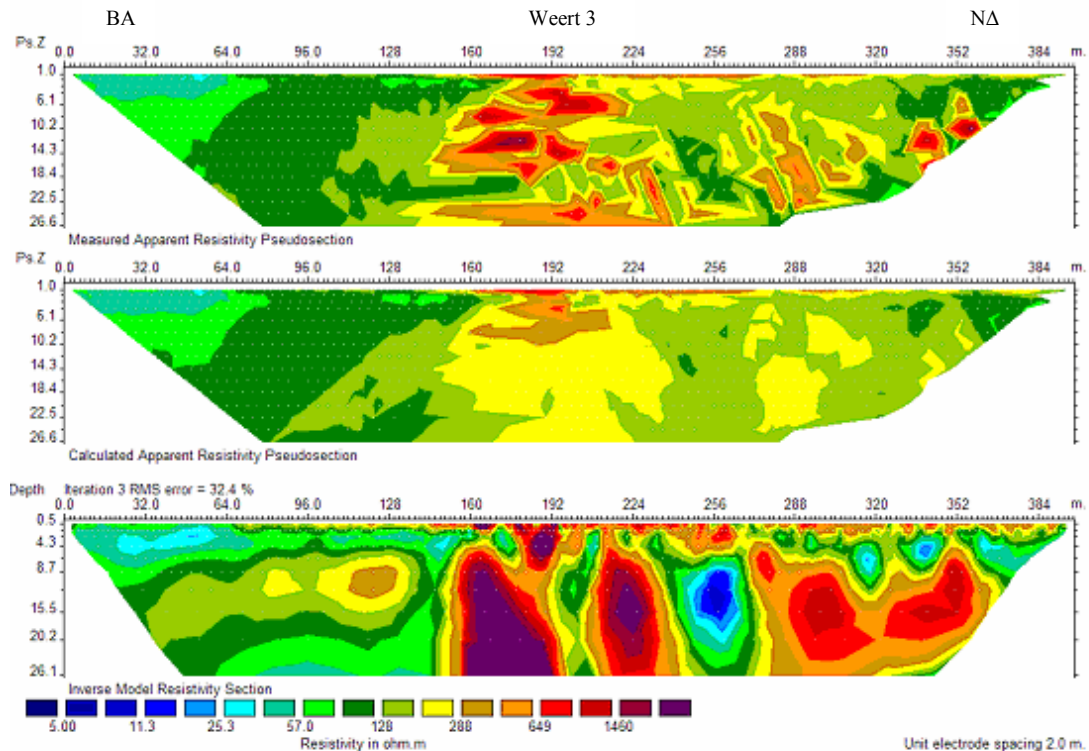
Πρέπει να σημειωθεί ότι το σφάλμα που προέκυψε κατά την αντιστροφή είναι ιδιαίτερα υψηλό με αποτέλεσμα να είναι μειωμένη η αξιοπιστία της γεωηλεκτρικής

τομής. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι η ερμηνεία της πρέπει να βασιστεί και σε στοιχεία από τις γεωτρήσεις. Το ίδιο ισχύει και για τις γραμμές 2, 3 και 4.



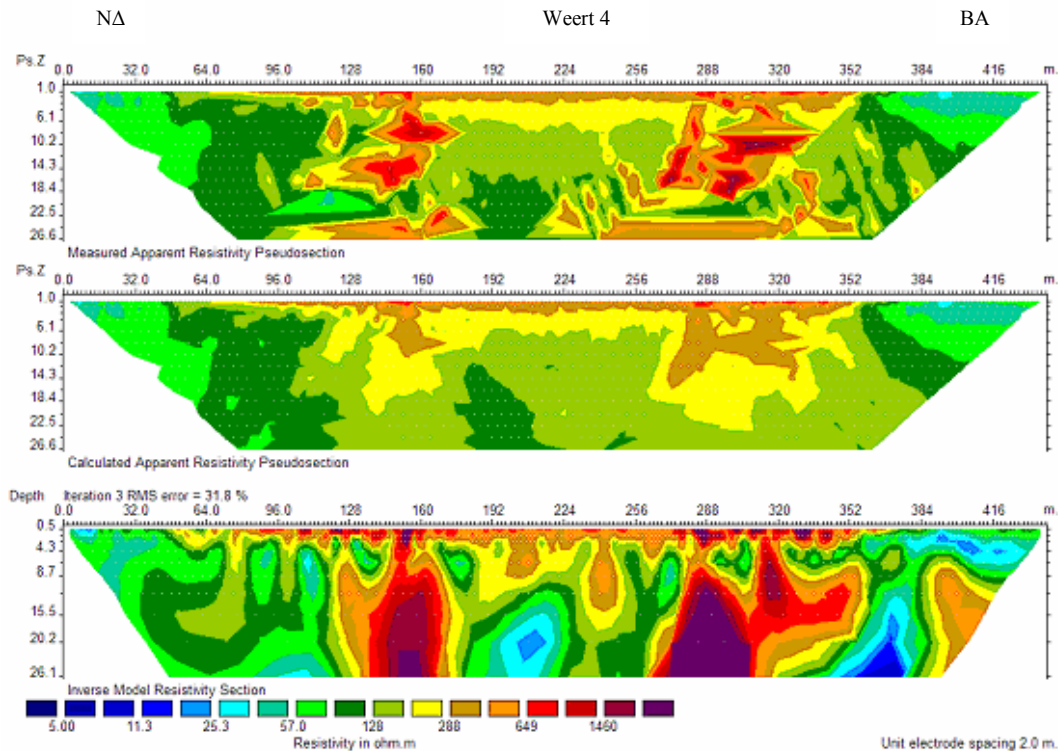
Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της δεύτερης γραμμής μελέτης. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Στο Σχ.5.2 παρατηρείται ένα επιφανειακό στρώμα υψηλής ειδικής αντίστασης που εκτείνεται κατά τόπους μέχρι βάθος 9 μέτρων (από 84-104 μέτρα κατά μήκος της γραμμής μελέτης) ενώ παρατηρούνται και δύο σχηματισμοί πολύ υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ο πρώτος ξεκινά από βάθος 4 μέτρων έως τα 26 μέτρα και από 36 έως 84 μέτρα κατά μήκος της γραμμής μελέτης, ενώ ο δεύτερος σχηματισμός εντοπίζεται σε βάθος 12 μέτρων και από τα 96-138 μέτρα κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Τέλος, παρουσιάζονται ξανά κάποιες ζώνες ιδιαίτερα χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλον τους και μπορούν να χαρακτηριστούν ως πιθανές εμφανίσεις αργίλου.



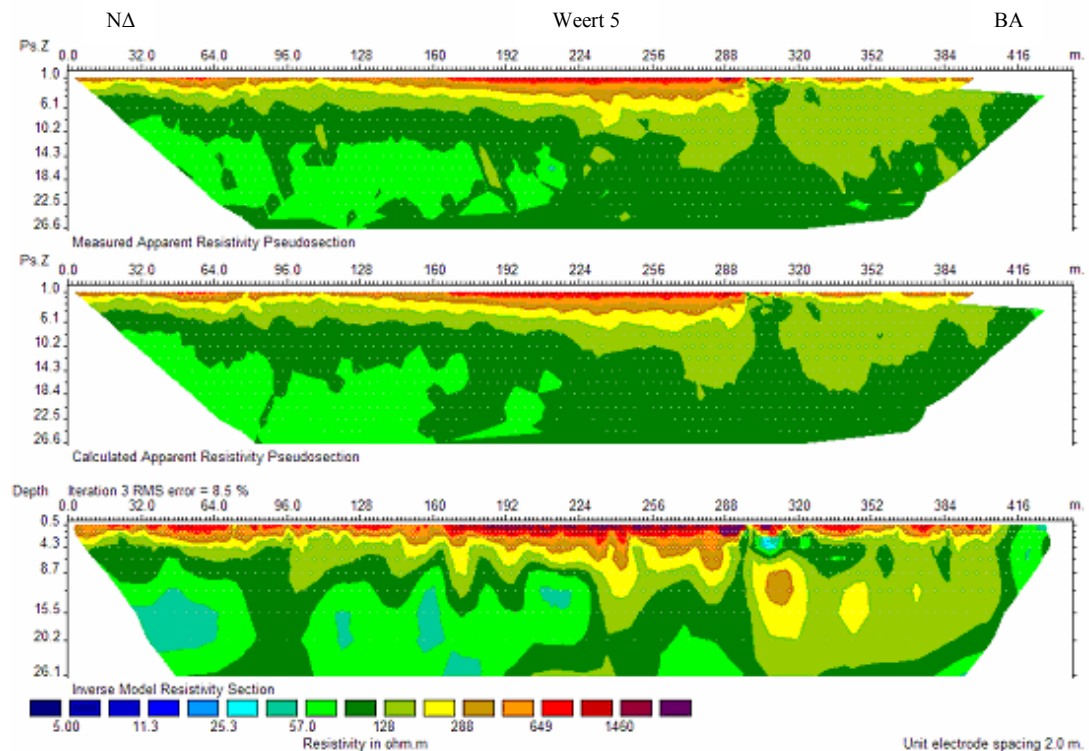
Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της τρίτης γραμμής μελέτης. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Στην τρίτη γεωηλεκτρική τομή παρατηρούνται 3 έντονες ανωμαλίες με αντιστάσεις πολύ υψηλότερες των γειτονικών περιοχών και οι οποίες ξεκινούν σχεδόν από την επιφάνεια και εκτείνονται σε βάθος μεγαλύτερο των 26 μέτρων. Η πρώτη ζώνη υψηλής αντίστασης οριοθετείται από τα 150-198 μέτρα πάνω στη γραμμή και εντοπίζεται σε βάθος μεγαλύτερο από τα 4,5 μέτρα. Η δεύτερη ζώνη εμφανίζεται από τα 208-244 μέτρα και σε βάθος παρόμοιο με την πρώτη. Τέλος η τρίτη ζώνη εκτείνεται από τα 270-370 μέτρα και σε βάθος από τα 4-30 μέτρα περίπου. Μεταξύ των ζωνών 2 και 3 και σε βάθος από 7-20 μέτρα παρατηρείται ζώνη πολύ χαμηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (5-40 ohm.m). Η απότομη αυτή μεταβολή οφείλεται στην εμφάνιση διαφορετικού γεωλογικού στρώματος (πιθανόν αργιλικού).



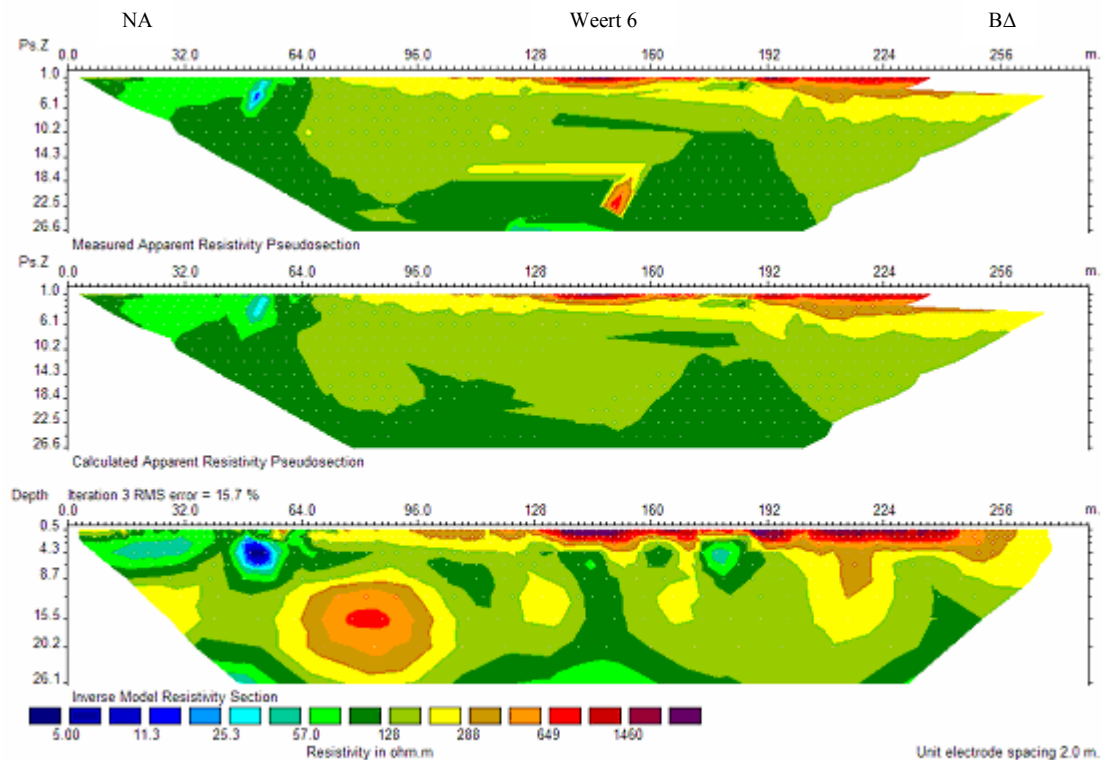
Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της τέταρτης γραμμής μελέτης. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Στην τέταρτη γεωηλεκτρική τομή παρατηρείται ένα επιφανειακό στρώμα υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εκτείνεται από τα 50 έως τα 374 μέτρα κατά μήκος της γραμμής και φτάνει σε βάθος 4,5 μέτρων. Τέτοιοι σχηματισμοί υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρατηρούνται και σε μεγαλύτερα βάθη. Ο πρώτος σχηματισμός εκτείνεται από τα 120-186 μέτρα, σε βάθος μεγαλύτερο από τα 4 μ. Ένας δεύτερος παρόμοιος σχηματισμός μήκους από 180-268 μ. και σε βάθος 4-20 μ. είναι επίσης ορατός στην γεωηλεκτρική τομή. Μια τρίτη ζώνη υψηλών αντιστάσεων από τα 274-366 μ. ξεκινά από τα 4 μ. βάθος. Τέλος στο άκρο της τομής φαίνεται μια τέταρτη ζώνη υψηλής αντίστασης που ξεκινά από τα 5 μ. βάθος. Υπάρχουν όμως και 2 ζώνες πολύ χαμηλής ειδικής αντίστασης σε βάθος 12 μ. με την πρώτη να εκτείνεται από τα 198-226 μ. ενώ τη δεύτερη, από τα 348-388 μ.



Σχήμα 5.5: Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της πέμπτης γραμμής μελέτης. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Στο Σχήμα 5.5 δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές αντιστάσεις πέρα από το επιφανειακό στρώμα και είναι σαφές ότι στη συγκεκριμένη περιοχή δεν υφίσταται η ύπαρξη κάποιας ανωμαλίας. Η εικόνα οδηγεί σε ασφαλέστερα συμπεράσματα, αφού το σφάλμα επεξεργασίας είναι μικρό (8,5%).



Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της έκτης γραμμής μελέτης. Η 1^η εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η 2^η αποτελεί ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η 3^η είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Στην έκτη γεωηλεκτρική τομή παρουσιάζονται μεσαίες έως και υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τα 66 μέτρα της γραμμής έως και το τέλος της. Το πάχος αυτού του επιφανειακού στρώματος αυξάνει σταδιακά προς τα βορειοδυτικά (BA). Επίσης παρατηρείται μια υψηλής αντίστασης ζώνη από τα 58-106 μέτρα και σε βάθος από τα 8-26,5 μέτρα η οποία παρουσιάζει μια βαθμιαία αύξηση της αντίστασης προς το κέντρο της και πιθανότατα οφείλεται είτε σε συσσώρευση ρύπων υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είτε σε γεωλογικό σχηματισμό μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

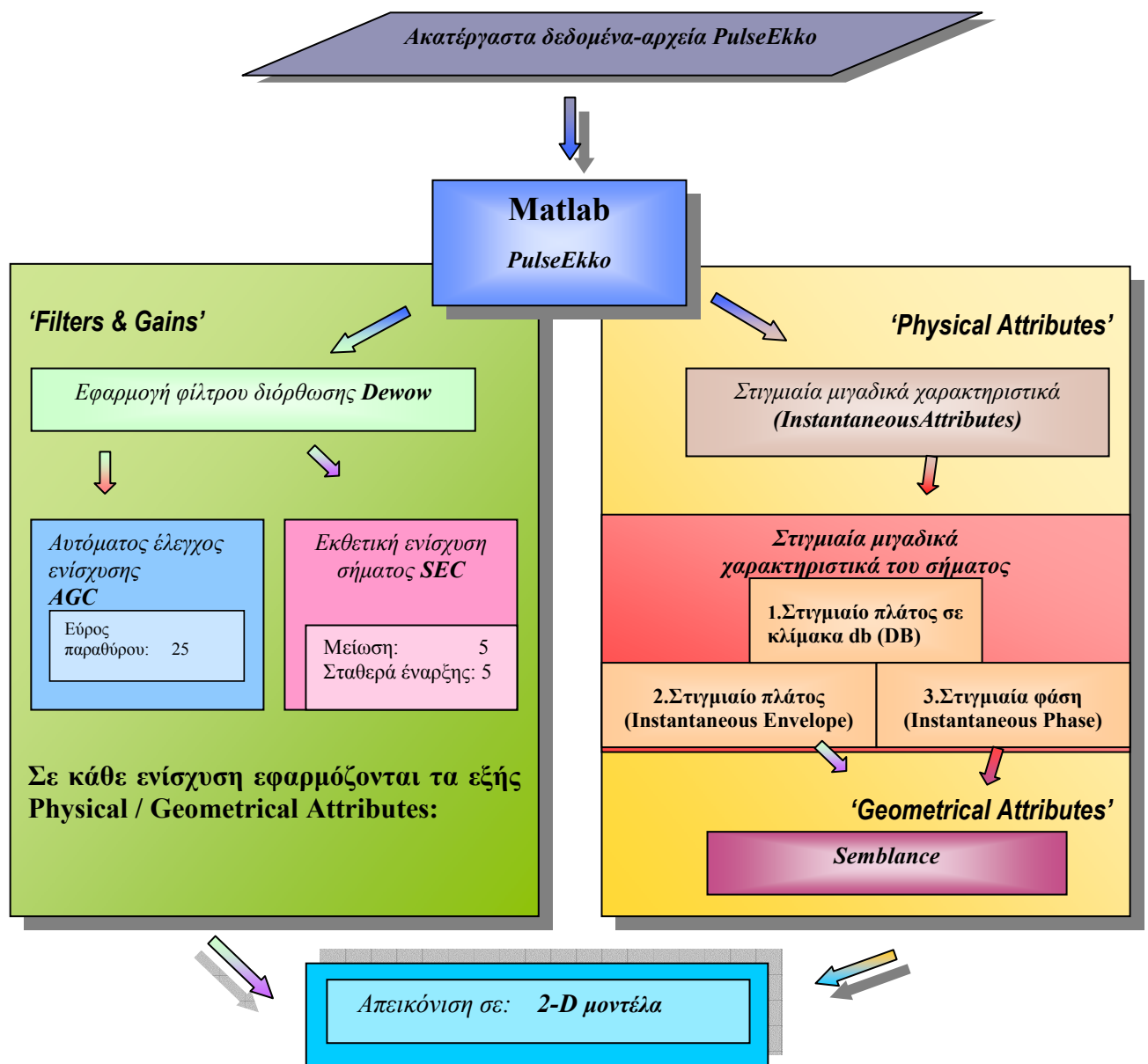
5.3 Γεωραντάρ

Στην ίδια περιοχή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το γεωραντάρ. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν πλησίον των αντίστοιχων γραμμών της ηλεκτρικής τομογραφίας με σκοπό την σύγκριση και τη βέλτιστη ερμηνεία των συνδυασμένων αποτελεσμάτων. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων με γεωραντάρ

χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ανάκλασης και το σύστημα pulseEkko1000. Αναλυτικά οι παράμετροι του πειράματος με τη μέθοδο γεωραντάρ, δίνονται στον πίνακα 5.2.

Γραμμή μελέτης	Μήκος γραμμής μελέτης [m]	Βήμα διασκόπησης [cm]	Διάστημα δειγματοληψίας [nsec]	Ονομαστική συχνότητα [MHz]	Συνολικός χρόνος καταγραφής [nsec]
1	82,5	25	1,6	50	600
2	210,3	25	1,6	50	400
3	225,3	25	1,6	50	400
4	305,5	25	1,6	50	400
5	89	25	1,6	50	400
6	427,5	25	1,6	50	400

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά μετρήσεων γεωραντάρ



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα Ροής της μαθηματικής επεξεργασίας των δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ μπορεί να διακριθεί σε δύο στάδια:

- Στο πρώτο στάδιο εφαρμόστηκε φίλτρο διόρθωσης Dewon για τη διέλευση υψηλών συχνοτήτων και πραγματοποιήθηκε α) αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης του σήματος (AGC) και β) εκθετική ενίσχυση σήματος (SEC) στα ακατέργαστα δεδομένα. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν διάφοροι συνδυασμοί μιγαδικών χαρακτηριστικών (attributes) σε κάθε μία από τις παραπάνω ενισχύσεις.
- Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η κύρια επεξεργασία των δεδομένων με δύο μεθόδους ταξινόμησης, των K-μέσων τιμών και SOM, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη γεωλογία και τη ρύπανση της περιοχής.

Επιλέχθηκε ενδεικτικά η γραμμή μελέτης 3 για λεπτομερή παρουσίαση όλων των εικόνων που προέκυψαν κατά την επεξεργασία της. Δηλαδή για την γραμμή 3, παρατίθενται οι επεξεργασμένες εικόνες καθώς και εκείνες της ταξινόμησης. Για τις υπόλοιπες γραμμές μελέτης παρουσιάζονται επιλεγμένες εικόνες.

Αναλυτικότερα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των δεδομένων των 6 γραμμών μελέτης του γεωραντάρ είναι τα εξής:

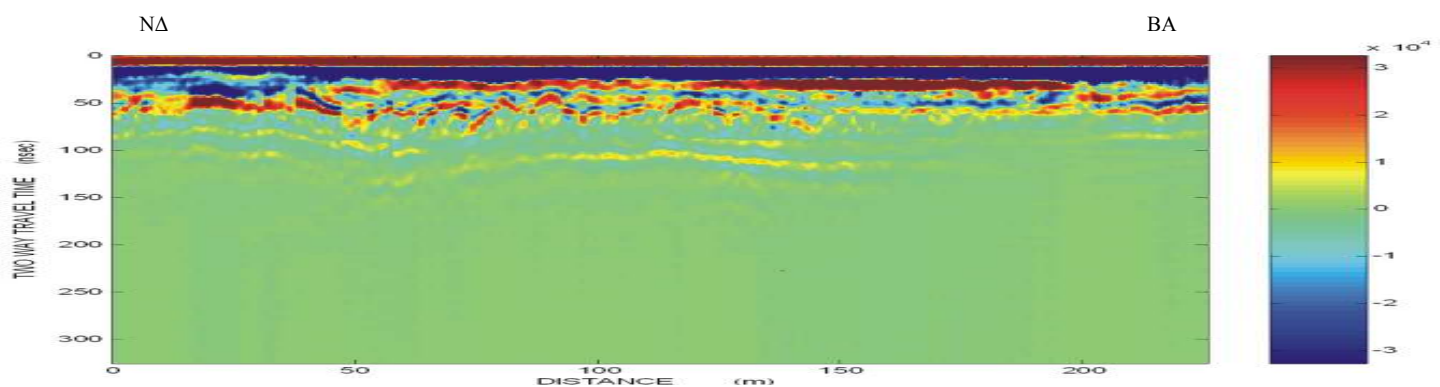
- Για τη γραμμή 1, παρουσιάζονται δύο καταγραφές, αυτή της στιγμιαίας φάσης (Σχ.5.21) και του στιγμιαίου πλάτους (Σχ.5.22) στις οποίες φαίνεται μια έντονη διαταραχή από τα 60-80 μέτρα και σε χρόνο 150 nsec.
- Για τη γραμμή 2, επιλέχθηκαν επίσης δύο εικόνες, η στιγμιαία φάση (Σχ.5.23) και η ταξινόμηση 10 τάξεων (Σχ.5.24). Σ' αυτές εντοπίζονται ισχυρή ανάκλαση από τα 100-210 μέτρα της γραμμής στα 150 nsec και η έντονη αυτή διαταραχή κινούμενη νοτιοδυτικά εκτείνεται σε μεγαλύτερα βάθη.
- Στην 3^η γραμμή του γεωραντάρ που αναλύεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, ως η πλέον χαρακτηριστική, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Φαίνεται να υπάρχουν έντονες διαταραχές ως τα 150 nsec, ενώ ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η ισχυρή ανάκλαση που καταγράφεται από τα 110-120 nsec κι εκτείνεται από τα 50-200 μέτρα κατά μήκος της γραμμής (Σχ.5.9-5.17). Τόσο η έντασή της όσο και η ασυνέχειά της προξενούν το ενδιαφέρον για ανάλυση και ερμηνεία. Μάλιστα με την

ταξινόμηση επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των ανακλώμενων σημάτων που πιθανότατα εκφράζουν εναλλαγή των γεωλογικών σχηματισμών. Επειδή στη συγκεκριμένη γραμμή παραθέτονται όλες οι επεξεργασμένες εικόνες, μπορεί να γίνει σύγκριση αυτών που παρέχουν κοινές πληροφορίες ώστε να γίνει κατανοητή η χρήση και η σημασία της εκάστοτε επεξεργασίας. Ειδικότερα η ταξινόμηση 10 τάξεων (Σχ.5.18) δίνει τις περισσότερες πληροφορίες για τις ισχυρές ανακλάσεις, ενώ συγχρόνως αναδεικνύει τις θέσεις που παρουσιάζουν έντονη διαταραχή. Η συγκεκριμένη ταξινόμηση πλεονεκτεί των 100 τάξεων αφού στην καταγραφή αυτή (Σχ.5.19) ο μεγάλος αριθμός των τάξεων δυσκολεύει την ερμηνεία. Αντίθετα ο χάρτης αυτοδιοργάνωσης (Σχ.5.20) παρέχει πληροφορίες όσον αφορά τη θέση του ισχυρού ανακλαστήρα από τα 110-130 nsec, αλλά δεν είναι τόσο ξεκάθαρες οι εναλλαγές των γεωλογικών στρωμάτων όπως αυτές γίνονται φανερές κατά την ταξινόμηση των 10 τάξεων.

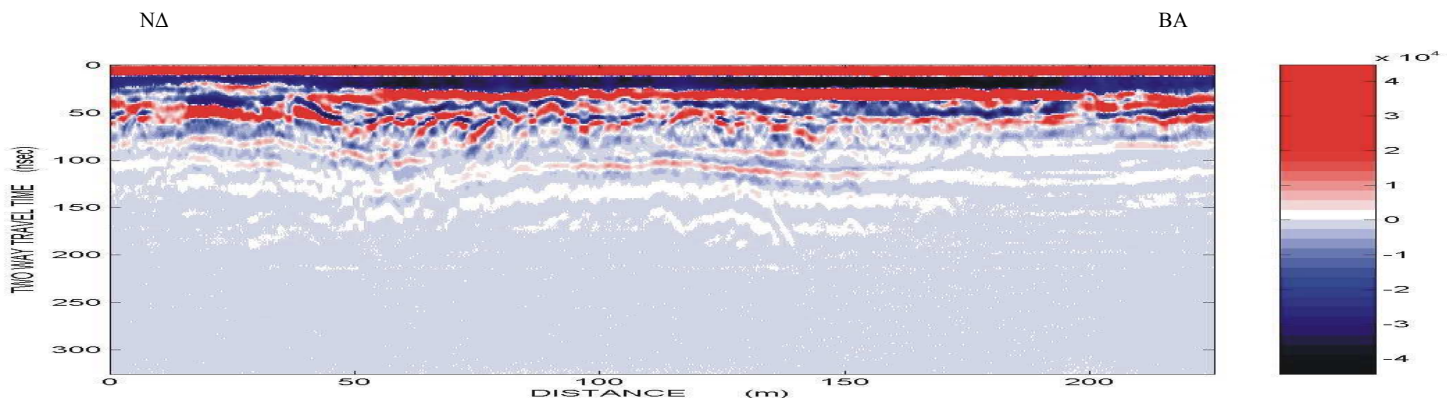
- Στην 4^η γραμμή μελέτης επιλέχθηκαν οι εικόνες της ταξινόμησης των 10 τάξεων (Σχ.5.26) και της ενίσχυσης SEC (Σχ.5.25). Η ενίσχυση SEC αποκάλυψε τη θέση ισχυρού ανακλαστήρα από τα 50-300,5 μέτρα της γραμμής η συνέχεια του οποίου διακόπτεται από τα 150-200 μέτρα. Ο διπλός χρόνος καταγραφής της συγκεκριμένης ανάκλασης είναι περίπου 110 nsec. Η παραπάνω καταγραφή απεικονίζεται έντονα και κατά την ταξινόμηση στην οποία όμως διακρίνονται περισσότερες ανακλάσεις.
- Για την 5^η γραμμή του γεωραντάρ παρουσιάζονται το Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db ή Instantaneous db (Σχ.5.27), η ενίσχυση SEC (Σχ.5.28) και η ταξινομημένη εικόνα από χάρτη αυτοδιοργάνωσης ή SOM (Σχ.5.29). Στα Σχήματα 5.27 και 5.28 εμφανίζεται ισχυρή ανάκλαση στα 100 nsec καθ' όλο το μήκος της γραμμής. Η ανάκλαση αυτή εξασθενεί στιγμιαία από τα 30-50 μ. Στο Σχήμα 5.29 (SOM) η παραπάνω ανάκλαση απεικονίζεται με χαρακτηριστική λεπτομέρεια ενώ καταγράφονται κι άλλες ανακλάσεις μικρότερης ισχύος. Η χρωματική κλίμακα της συγκεκριμένης καταγραφής βοηθά στο να αντιληφθεί κανείς ότι η ισχυρή αυτή ανάκλαση αποτελεί σημαντικό στοιχείο προς διερεύνηση και ερμηνεία.
- Τέλος, για την 6^η γραμμή μελέτης παρουσιάζονται εικόνες με ενίσχυση SEC (Σχ.5.30), το Στιγμιαίο πλάτος (Σχ.5.31) και την Ταξινόμηση 10 τάξεων (Σχ.5.32).

Στις δύο πρώτες εικόνες (Σχ.5.30 και Σχ.5.31) δίνεται έμφαση στη θέση ισχυρού ανακλαστήρα που εκτείνεται από τα 70-350 μ. της γραμμής. Στην τρίτη εικόνα (Σχ.5.32) προκύπτει η θέση και το εύρος του προαναφερθέντος ανακλαστήρα, ενώ είναι ευδιάκριτες κι άλλες ανακλάσεις διευκολύνοντας την απεικόνιση της εναλλαγής των στρωμάτων.

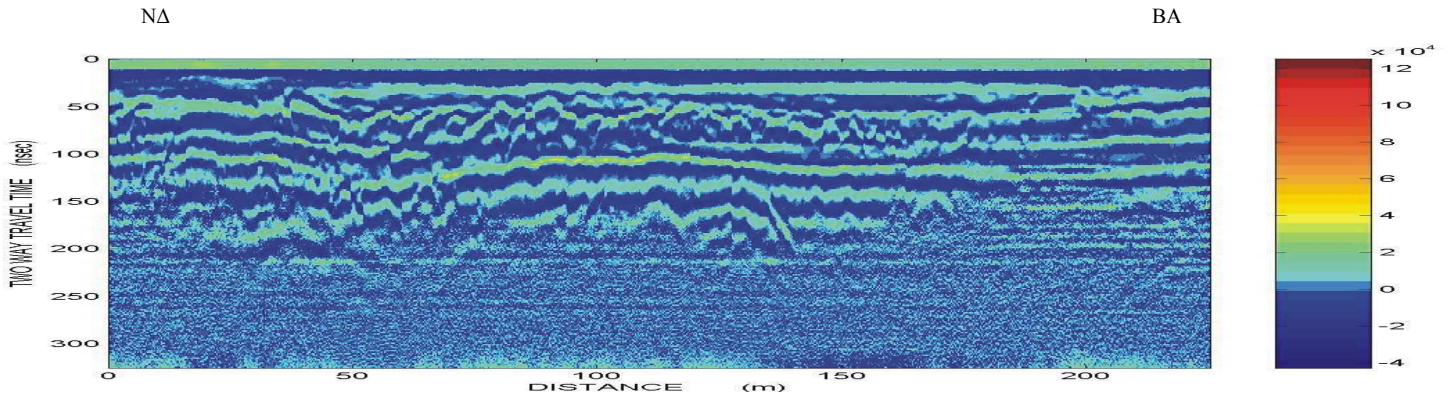
Γραμμή μελέτης 3:



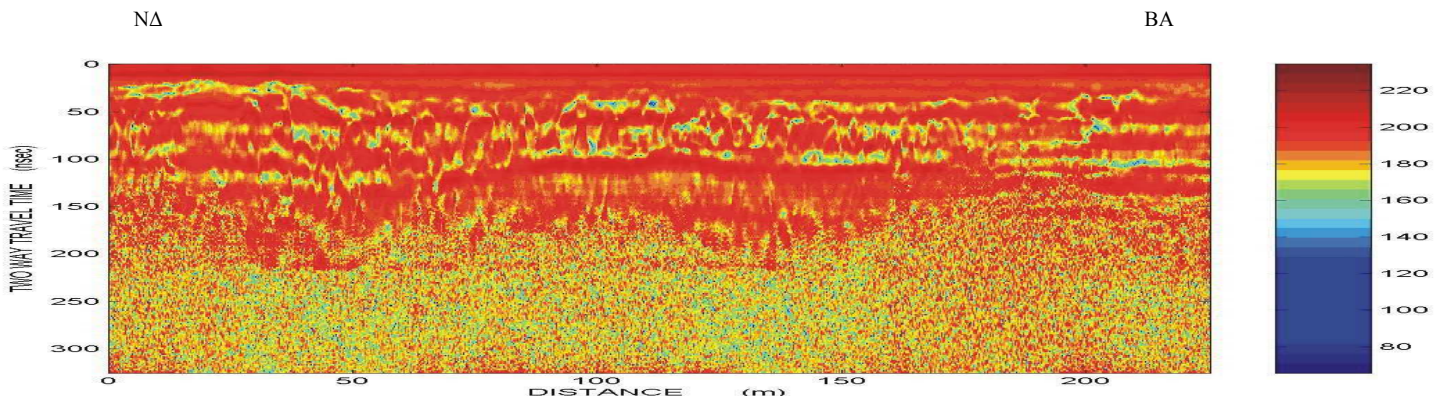
Σχήμα 5.8: Ακατέργαστα δεδομένα (Raw data)



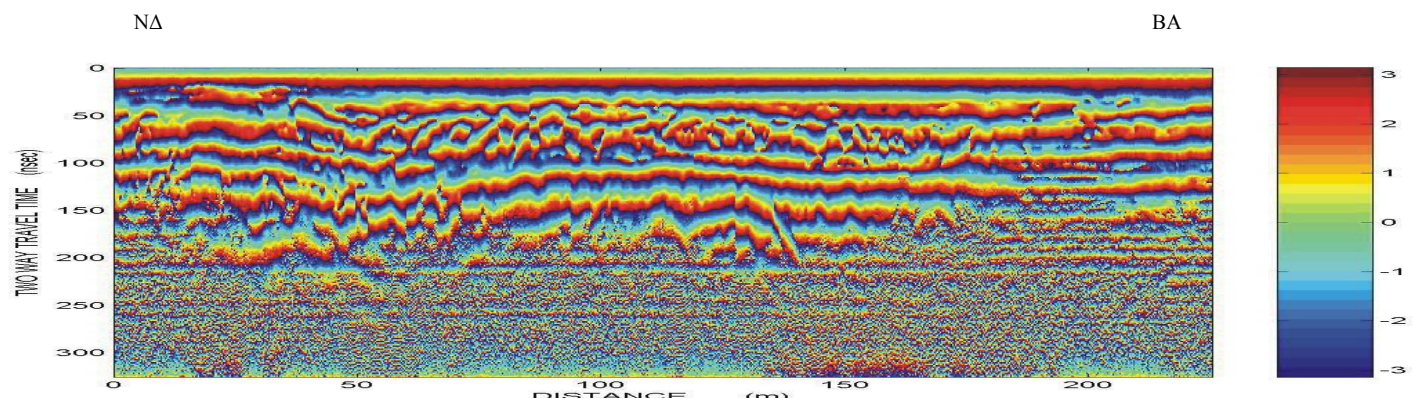
Σχήμα 5.9: Φίλτρο διόρθωσης Dewow. Παρατηρούνται έντονες καταγραφές στα πρώτα 150 nsec, ενώ κυριαρχεί η ένδειξη ενός ισχυρού ανακλαστήρα στα 110-120 nsec {Raw data > Dewow}



Σχήμα 5.10: Φίλτρο Αυτόματης Ενίσχυσης (AGC). Με το φίλτρο ενίσχυσης AGC η εικόνα εμφανίζει μεγαλύτερη λεπτομέρεια μέχρι τα 200 nsec. Φαίνεται ισχυρός ανακλαστήρας στα 110-120 nsec που εκτείνεται από τα 50-200 m της γραμμής μελέτης. Παρατηρείται επίσης ενίσχυση των ασθενικών ανακλάσεων {Raw data > Dewow > AGC Gain (window: 25)}



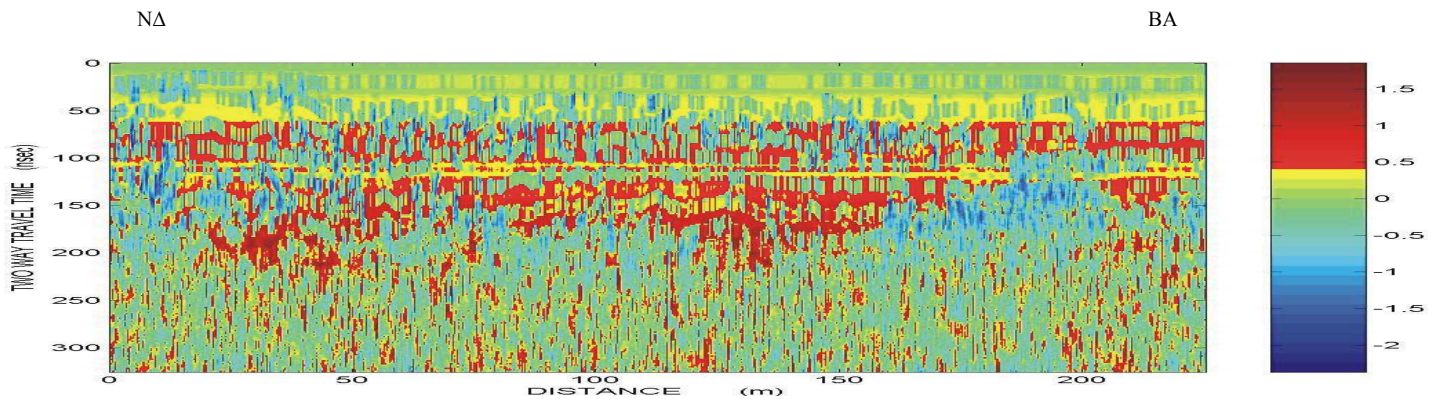
Σχήμα 5.11 : Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB στην ενίσχυση AGC. Η εικόνα δε δίνει περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με αυτή του Σχ.5.10, είναι όμως διακριτή η παρουσία ισχυρού ανακλαστήρα κατά μήκος της γραμμής στα 110-120 nsec {Raw data > Dewow > AGC Gain > Instantaneous db}



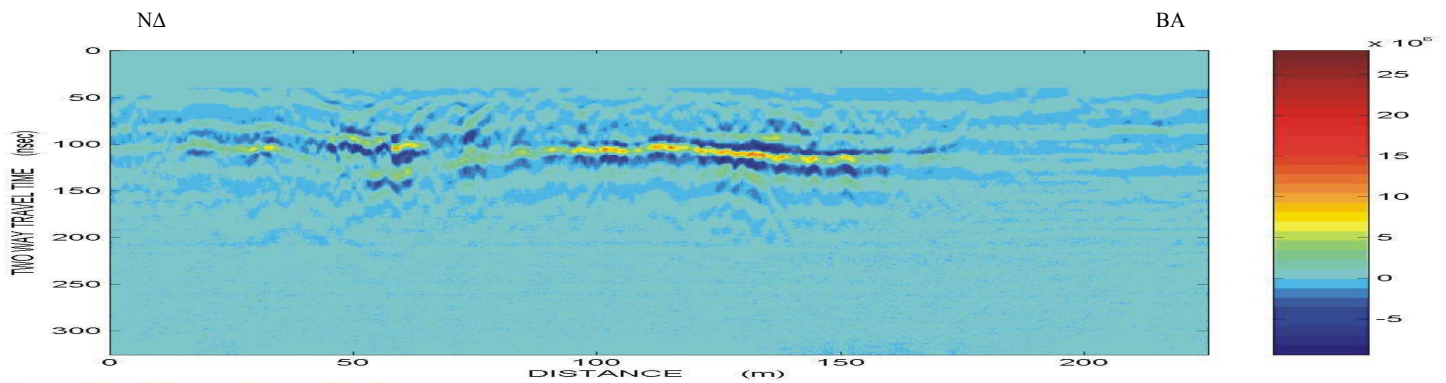
Σχήμα 5.12 : Στιγμιαία φάση (Instantaneous Phase) στην ενίσχυση AGC.

Στην παραπάνω εικόνα εντοπίζονται κεκλιμένοι ανακλαστήρες σε χρόνο μεγαλύτερο από τα 100 nsec για τα πρώτα 50 m. Επίσης ορατή είναι και η έντονη ανάκλαση που εντοπίστηκε και στις

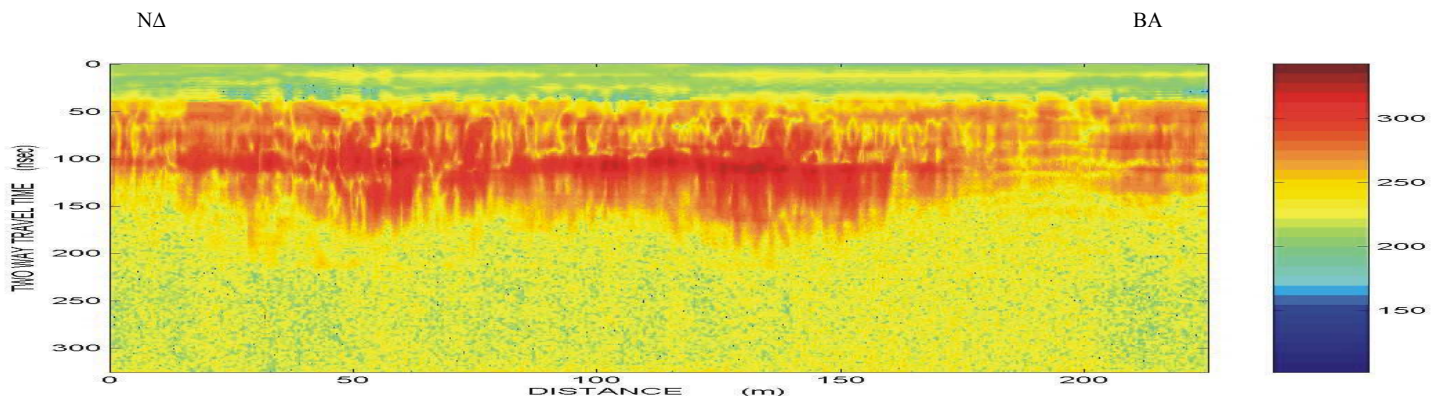
προηγούμενες εικόνες. Στη συγκεκριμένη εικόνα είναι πιο ευδιάκριτη η εναλλαγή των γεωλογικών στρωμάτων {Raw data>Dewow>AGC Gain >Instantaneous Phase}



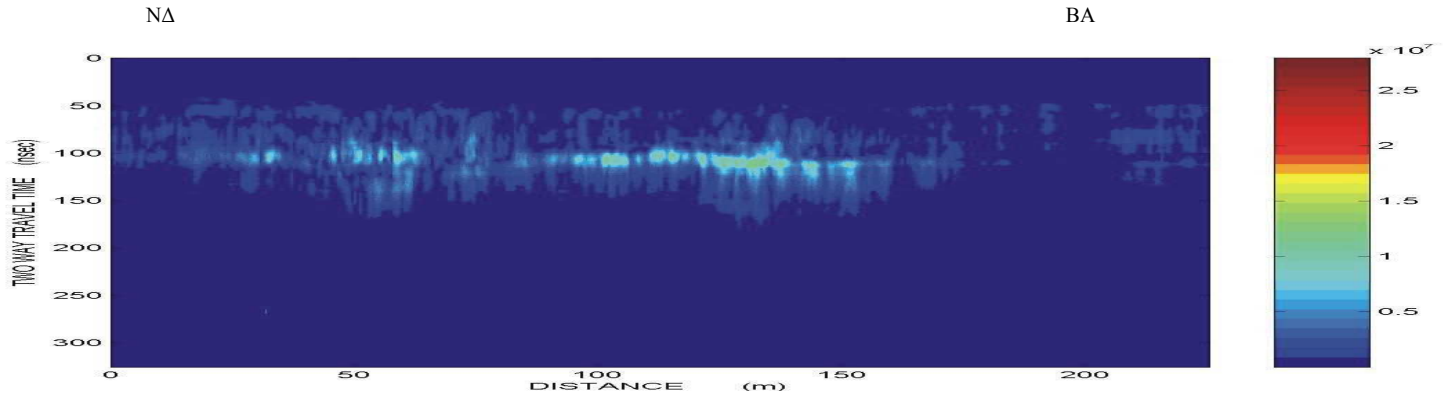
Σχήμα 5.13: Εφαρμογή φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (*Background noise removal*) και εκτίμηση της συνάφειας *semblance*. {Raw data>Dewow>AGC Gain >Instantaneous Phase>semblance>background noise removal}



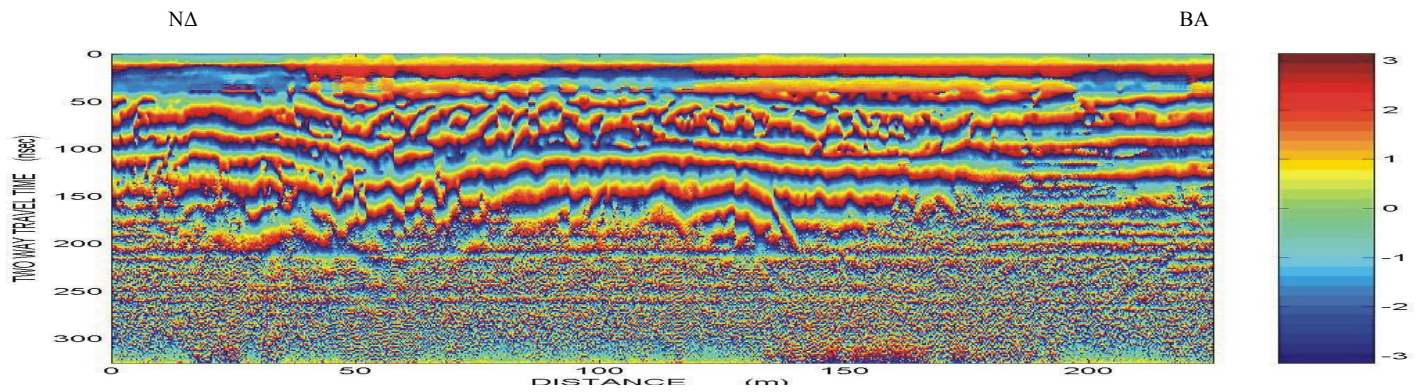
Σχήμα 5.14: Φίλτρο Εκθετικής Ενίσχυσης (*SEC*). Στην εικόνα εμφανίζεται ο κύριος αντιδραστήρας που έχει ήδη εντοπιστεί κι από τις προηγούμενες εικόνες {Raw data>Dewow>SEC Gain}



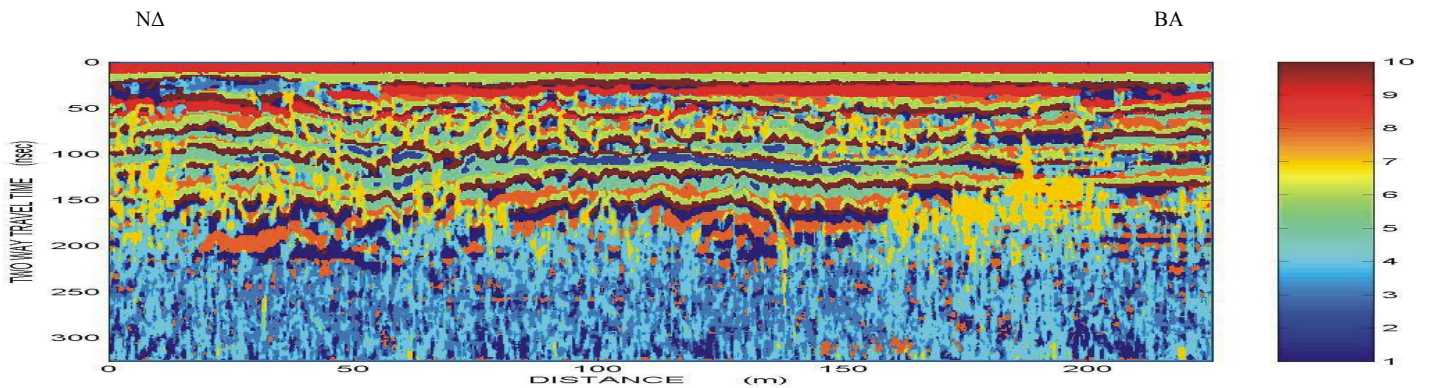
Σχήμα 5.15: Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB. {Raw data>Dewow>SEC Gain >Instantaneous db}



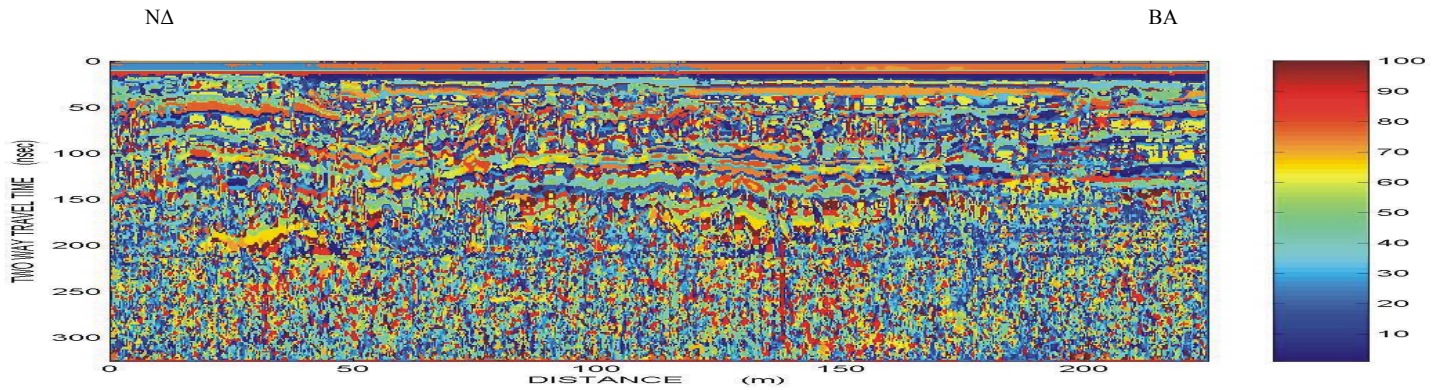
Σχήμα 5.16: Στιγμιαίο πλάτος (Instantaneous Envelope). {Raw data>Dewow>SEC Gain >Instantaneous Envelope}



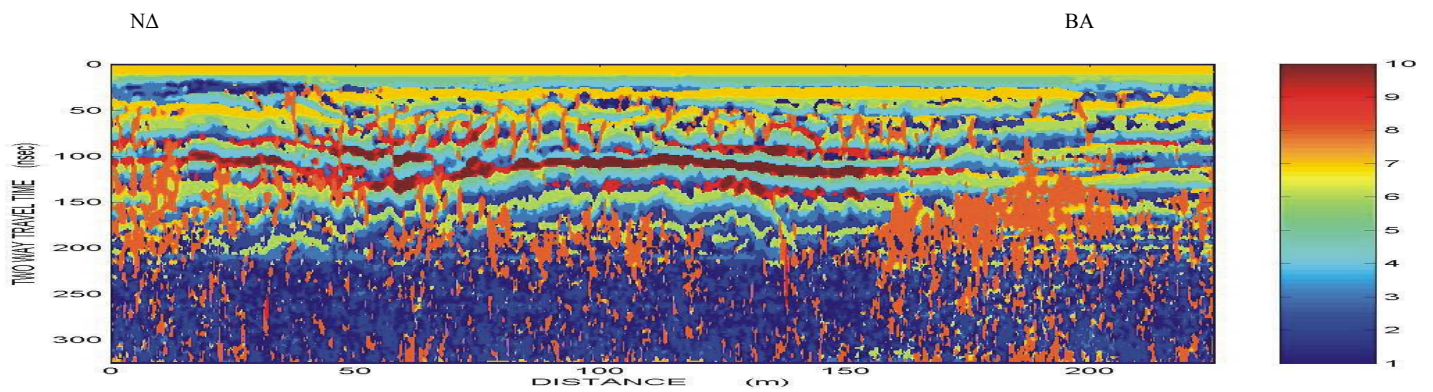
Σχήμα 5.17: Στιγμιαία φάση (Instantaneous Phase). Στην εικόνα αυτή παρουσιάζεται η πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων ενώ χαρακτηριστικότερη είναι η ανάκλαση και πάλι στα 110 nsec και συμπεραίνεται ότι η στιγμιαία φάση στην ενίσχυση SEC παρέχει σχεδόν ταυτόσιμες πληροφορίες με τη στιγμιαία φάση στην ενίσχυση AGC (βλέπ. Σχήμα 5.12) {Raw data>Dewow>SEC Gain >Instantaneous Phase}



Σχήμα 5.18: k-means_10. Ταξινόμηση σε 10 τάξεις. Με την ταξινόμηση επιτεύχθηκε ο καλύτερος διαχωρισμός των ανακλαστήρων {k-means_10}

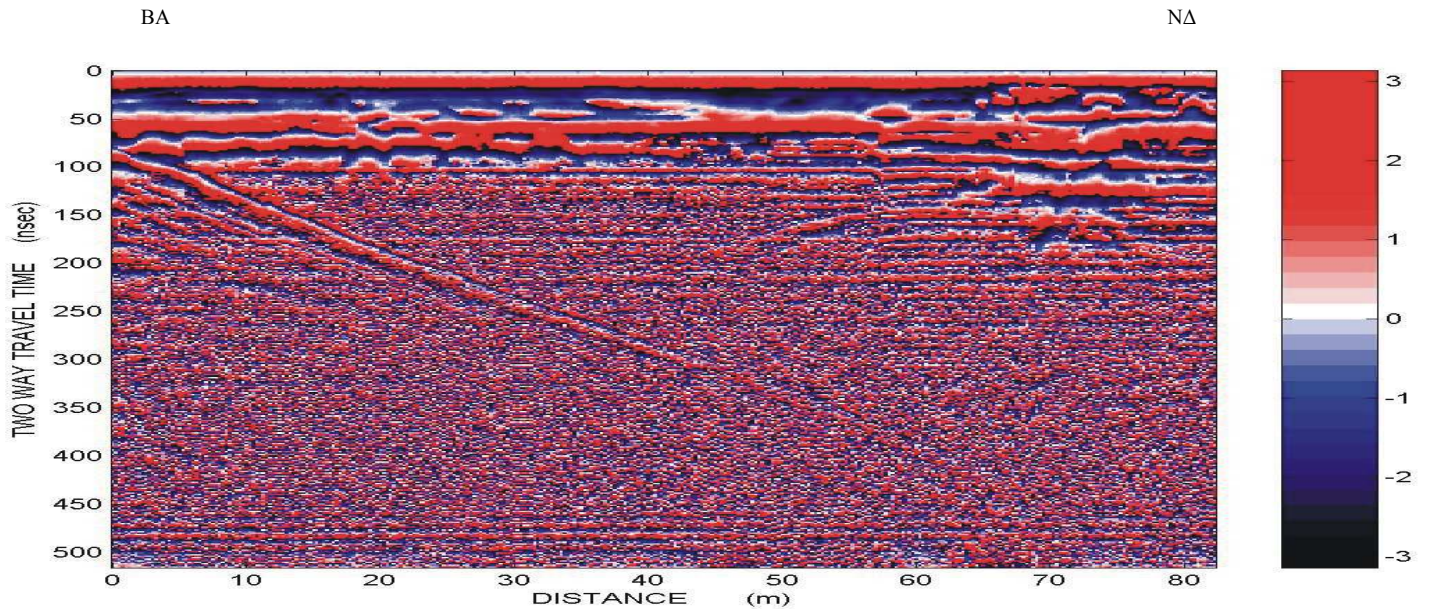


Σχήμα 5.19: *k-means_100*. Ταξινόμηση σε 100 τάξεις $\{k\text{-means}_{100}\}$

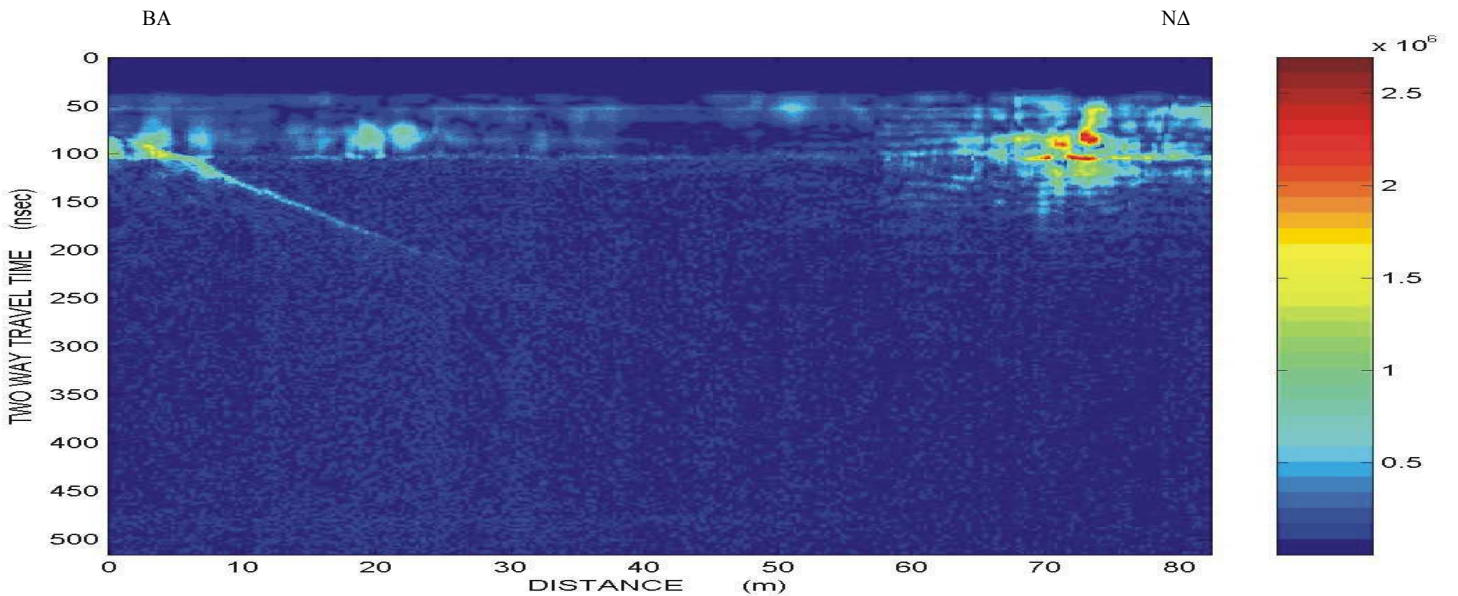


Σχήμα 5.20: Εφαρμογή χάρτη αυτοδιοργάνωσης στην ταξινομημένη εικόνα του Σχ.5.19. Εμφανίζονται καθαρά από τα 110-130 nsec έντονες ανακλάσεις σε συμφωνία με το Σχ.5.18 $\{k\text{-means}_{100} > SOM\}$

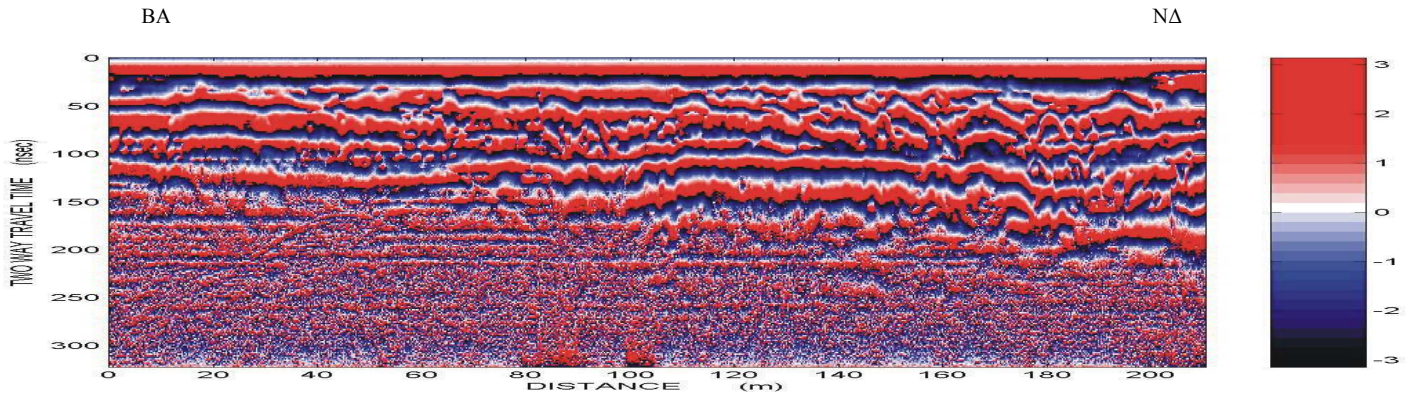
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο χαρακτηριστικές εικόνες των υπολοίπων γραμμών μελέτης ενώ αναλυτικά όλες οι εικόνες που προέκυψαν από την επεξεργασία των γραμμών (1, 2, 4, 5 και 6) παρατίθενται στο παράρτημα Β.

Γραμμή μελέτης 1:

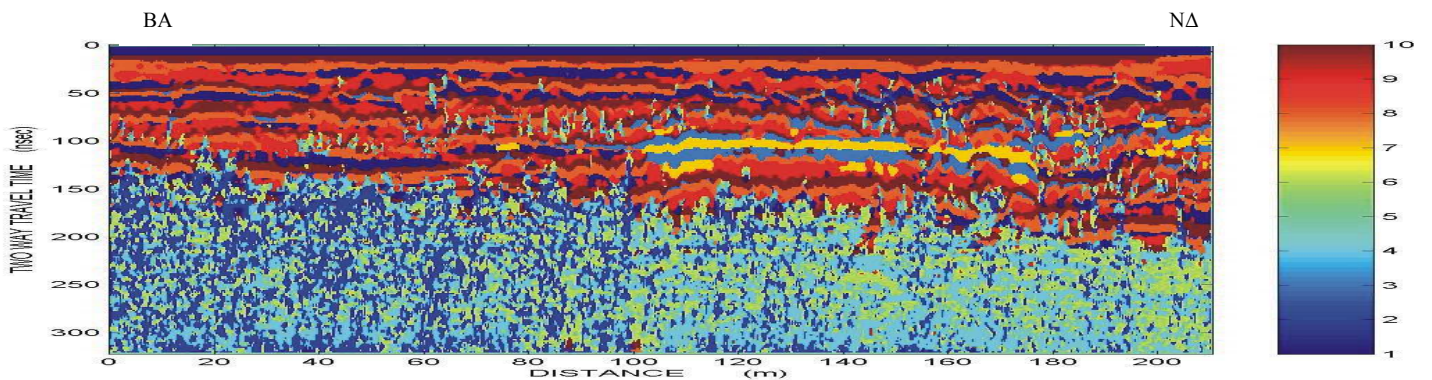
Σχήμα 5.21: {Raw data>Dewow>AGC Gain>Instantaneous Phase}. Η στιγμιαία φάση δεν παρέχει πληροφορίες για μεγάλο βάθος, όμως είναι χαρακτηριστική η θέση μιας διαταραγμένης ζώνης από τα 60-80 μέτρα στα 150 nsec που χρίζει παρατήρησης και ερμηνείας. Η κεκλιμένη χαρακτηριστική γραμμή από τα 100 nsec δεν λαμβάνεται υπόψη αλλά ερμηνεύεται ως ανάκλαση των κυμάτων από κάποιο εμπόδιο που βρίσκεται στην αρχή της γραμμής.



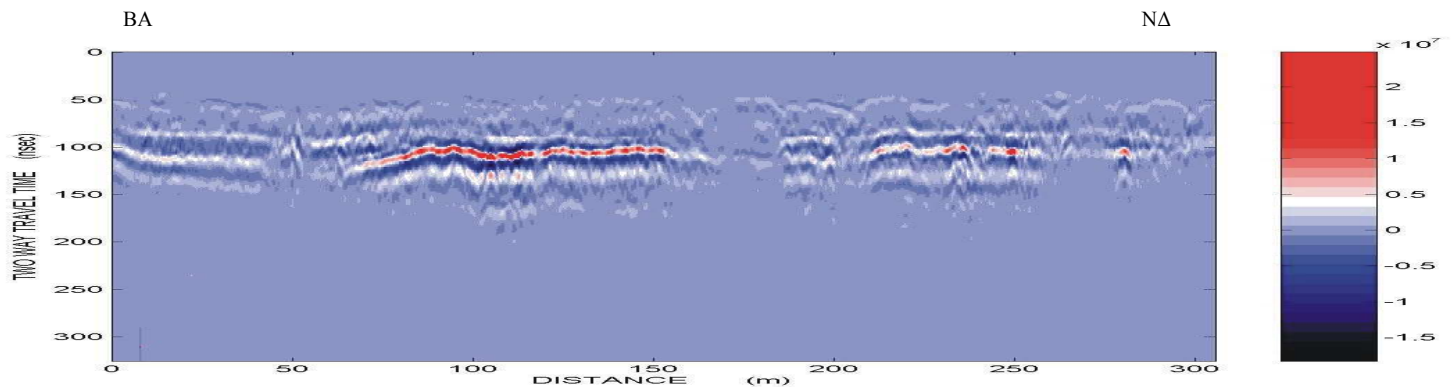
Σχήμα 5.22: {Raw data>Dewow>SEC Gain>Instantaneous Envelope}. Στην εικόνα στιγμιαίου πλάτους δόθηκε έμφαση στην ανακλώμενη ισχύ και φαίνεται μια ισχυρή ανάκλαση από τα 60-80 μέτρα της γραμμής όπως παρατηρήθηκε και με την ενίσχυση AGC.

Γραμμή μελέτης 2:

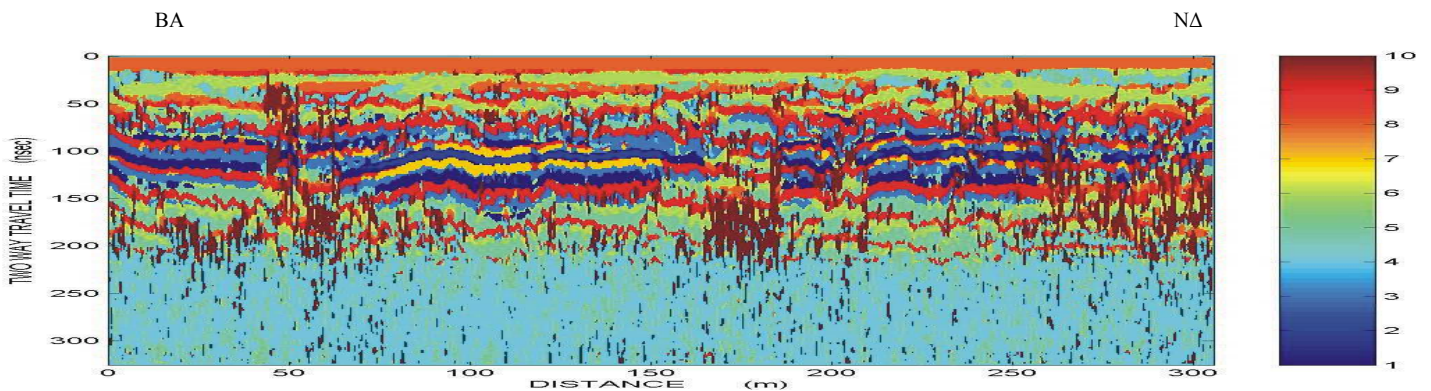
Σχήμα 5.23: *{Raw data>Dewow>AGC Gain>Instantaneous Phase}*. Σ' αυτή την εικόνα της στιγμιαίας φάσης όπως φαίνεται χαρακτηριστικά από την εικόνα υπάρχει μια έντονη ανάκλαση από τα 100-210 μέτρα (τέλος γραμμής) που ξεκινά σε βάθος που αντιστοιχεί στα 150 nsec και εκτείνεται προς τα κάτω. Επίσης είναι ευδιάκριτες άλλες ανακλάσεις σε μικρότερους χρόνους καταγραφής.



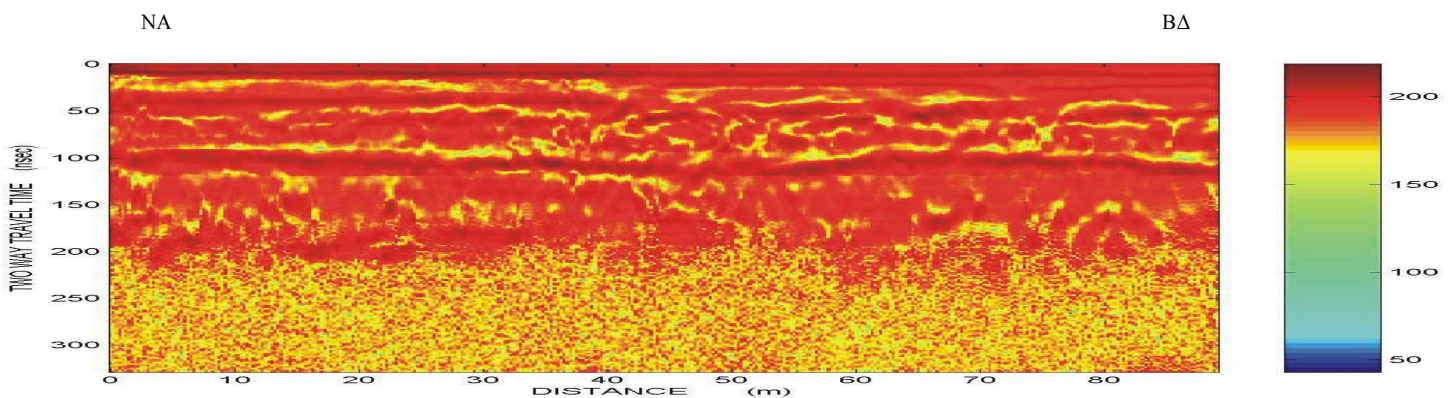
Σχήμα 5.24: *{k-means_10}*. Με την ταξινόμηση σε 10 τάξεις επιτεύχθηκε η ακριβής απεικόνιση της θέσης που προαναφέρθηκε και στην οποία εντοπίζεται μια ισχυρή ανάκλαση, που βάσει της εναλλαγής των χρωμάτων καθιστά αναγκαία την προσοχή μας για τη θέση αυτή.

Γραμμή μελέτης 4:

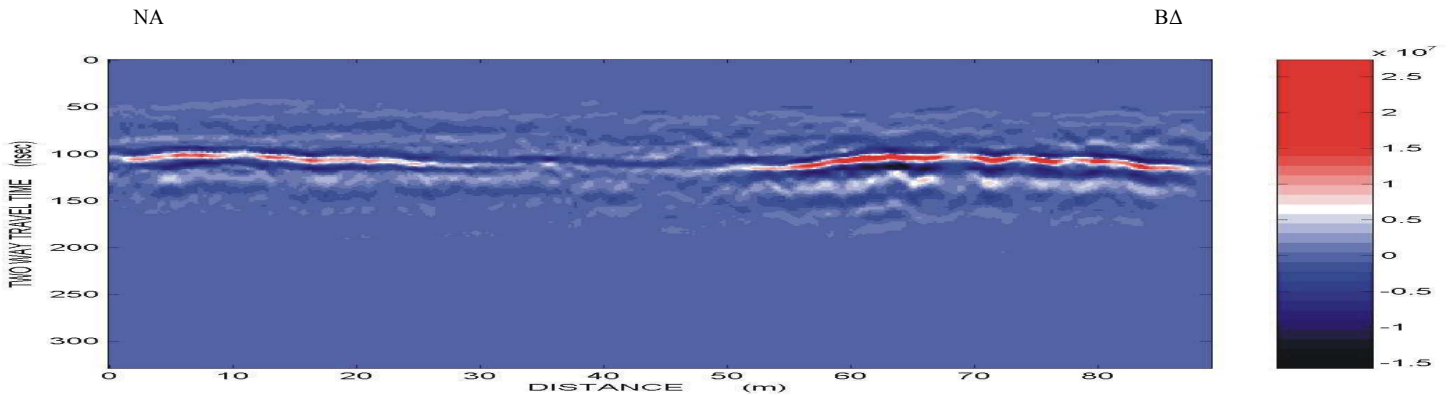
Σχήμα 5.25: {Raw data>Dewow>SEC Gain}. Με την ενίσχυση SEC του σήματος της 4^{ης} γραμμής μελέτης επιτεύχθηκε η απεικόνιση ισχυρού ανακλαστήρα από τα 50-300,5 μέτρα ο οποίος διακόπτεται μεταξύ των 150 – 200 μέτρων.



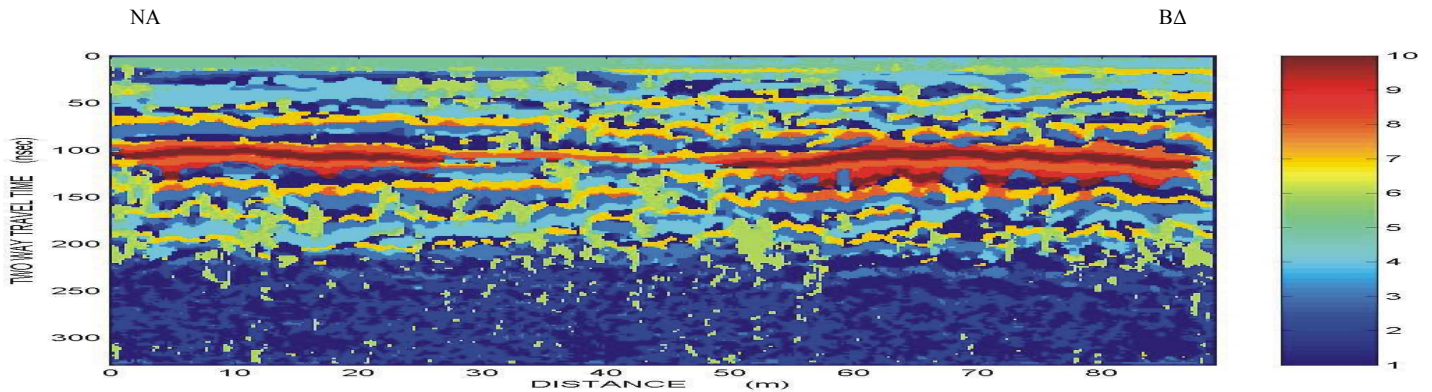
Σχήμα 5.26: {k-means_10}. Με την επιλογή 10 τάξεων απεικονίζεται ανακλαστήρας (από 50-300,5 μέτρα), ενώ παρουσιάζεται ξεχωριστή τάξη από τα 50 – 150 μέτρα της γραμμής μελέτης.

Γραμμή μελέτης 5:

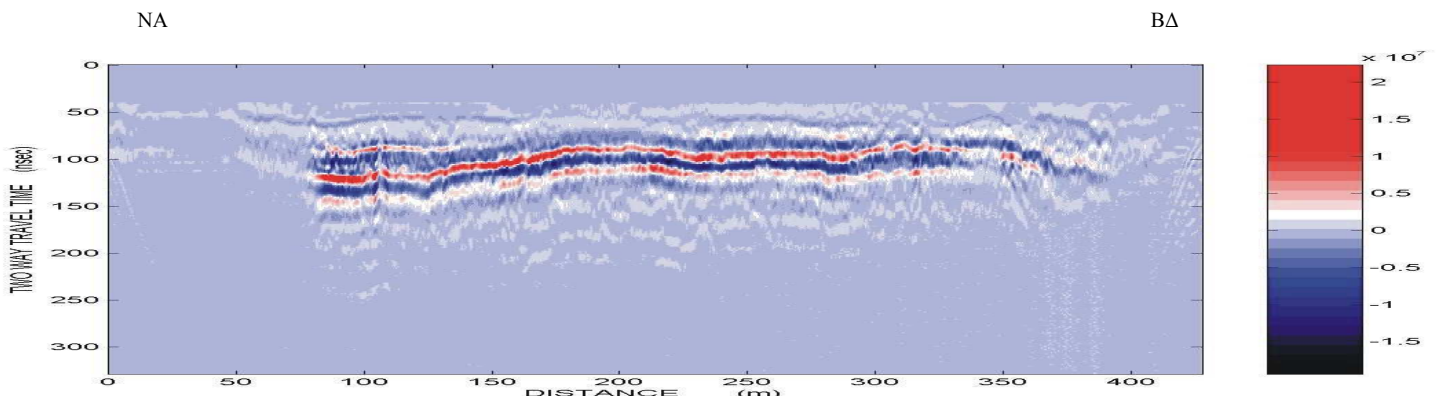
Σχήμα 5.27: *{Raw data>Dewow>AGC Gain >Instantaneous db}*. Δίνοντας έμφαση στην ισχύ, το στιγμιαίο πλάτος αναδεικνύει ισχυρότατη ανάκλαση καθ' όλο το μήκος της γραμμής στα 100 nsec. Η εν λόγω διαταραχή είναι αξιοπρόσεκτη και χρίζει ερμηνείας που θα είναι πιο ακριβής σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα δεδομένα (γεωτρήσεις και τομογραφίες).



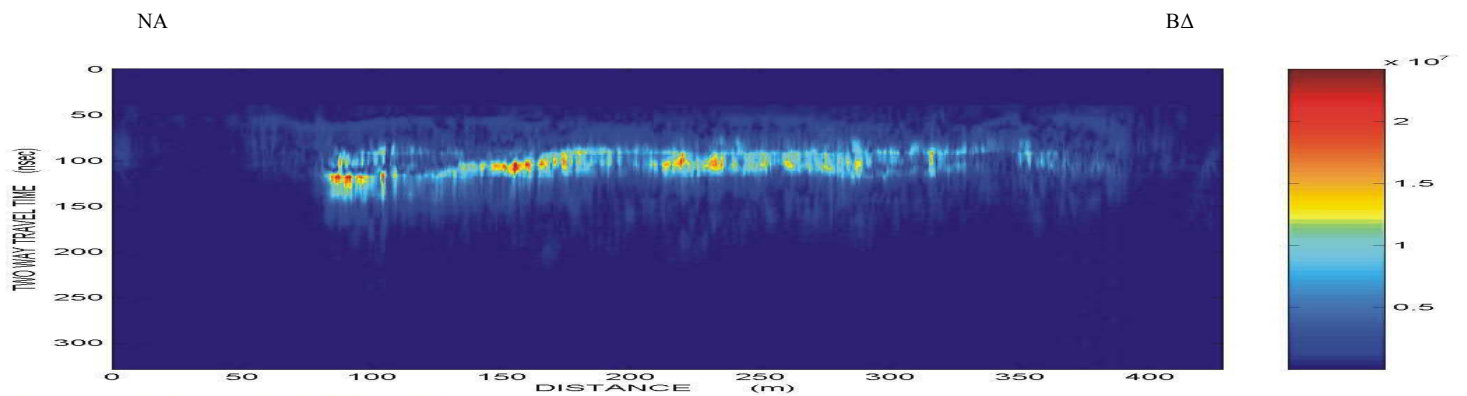
Σχήμα 5.28: *{Raw data>Dewow>SEC Gain}*. Με την ενίσχυση SEC παρατηρείται ότι το πλάτος της παραπάνω ανάκλασης μειώνεται από τα 30 – 50 μέτρα.



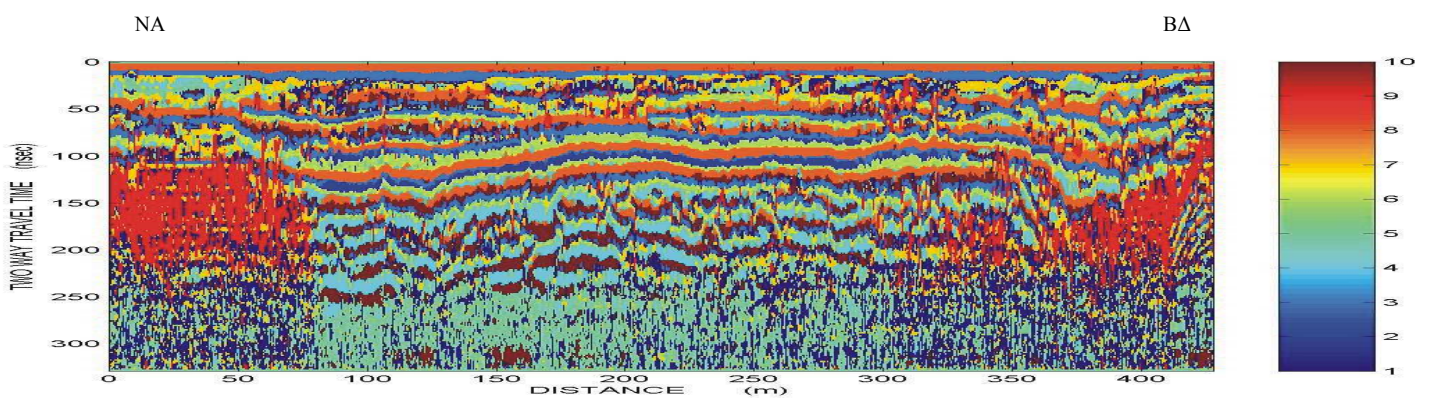
Σχήμα 5.29: *{k-means_100 > SOM}*. Με την ταξινόμηση των 100 τάξεων διαχωρίζεται η ανάκλαση στα 100 nsec σε τρία τμήματα.

Γραμμή μελέτης 6:

Σχήμα 5.30: {Raw data>Dewow>SEC Gain}. Με την ενίσχυση SEC του σήματος φαίνεται καθαρά έντονη ανάκλαση των κυμάτων από τα 70 - 350 μέτρα της γραμμής σ τα 100 – 150 nsec. Η καταγραφή αυτή, για να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα, πρέπει να ερμηνευτεί συνδυαστικά με τα υπόλοιπα δεδομένα (γεωτρήσεις, τομογραφίες).



Σχήμα 5.31: {Raw data>Dewow>SEC Gain>Instantaneous Envelope}. Σ' αυτή την εικόνα στιγμιαίου πλάτους, δίνοντας έμφαση στην ισχύ του ανακλώμενου σήματος, αποκαλύπτεται ξανά η θέση ανακλαστήρα όπως αυτός οριοθετήθηκε από την προηγούμενη εικόνα.



Σχήμα 5.32: {k-means_10}. Με την ταξινόμηση των 10 τάξεων επιτεύχθηκε η καλύτερη απεικόνιση ενώ αποκαλύπτεται και η έντονη ανάκλαση που εντοπίστηκε στα Σχήματα 5.30 και 5.31.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται προσπάθεια συνδυασμού των δεδομένων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία με απώτερο σκοπό την καλύτερη δυνατή εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την γεωλογική δομή του υπεδάφους, όσο και για τις θέσεις πιθανής ρύπανσης. Με τα δεδομένα των γεωτρήσεων όπως αυτά προέκυψαν από τις μετρήσεις της $Tauw$ στο χώρο του εργοστασίου, τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, καθώς και τις εικόνες γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλοι συνδυασμοί που παρατίθενται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Οι συνδυασμοί αυτοί συνέβαλαν στην καλύτερη ερμηνεία και αποσαφήνιση της κατάστασης που επικρατεί στην περιοχή μελέτης. Τέλος δημιουργήθηκαν 2 χάρτες στους οποίους αποτυπώνονται οι ζώνες της βαθιάς και της ρηχής ρύπανσης στην περιοχή μελέτης σύμφωνα με τις ερμηνείες που προέκυψαν.

6.2 Συμπεράσματα για τη ρύπανση από το συνδυασμό εικόνων ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωτρήσεων.

Στην ενότητα αυτή εντοπίστηκαν και επιλέχθηκαν οι χαρακτηριστικότερες γεωτρήσεις που βρίσκονται πλησιέστερα στις γραμμές της ηλεκτρικής τομογραφίας προκειμένου να συνδυαστούν τα αποτελέσματά τους και να προκύψουν πιο ασφαλή συμπεράσματα για την ρύπανση στην περιοχή αυτή.

Σύμφωνα με τις συντεταγμένες των γεωτρήσεων τοποθετήθηκαν στις τομές των γραμμών της ηλεκτρικής τομογραφίας οι προβολές των γεωτρήσεων αυτών. Επιλέχθηκαν εκείνες οι γεωτρήσεις οι οποίες κρίθηκαν ικανοποιητικά κοντά στις γραμμές της τομογραφίας για τη βαθμονόμηση των γεωηλεκτρικών τομών.

Η ερμηνεία γίνεται βάσει α) των τιμών των ρύπων TRI και PCE και της γεωλογικής στρωμάτωσης, όπως αυτή προκύπτει από τις γεωτρήσεις και β) τις εικόνες της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι στις εικόνες που ακολουθούν (Σχ.6.1 έως Σχ.6.6) πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός των γεωλογικών στρωμάτων, με βάση τη διαφορετική τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στη δεξιά τμήμα των εικόνων τοποθετήθηκε κλίμακα που φανερώνει τη γενικότερη γεωλογική στρωμάτωση της περιοχής μελέτης. Η κλίμακα αυτή δημιουργήθηκε σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 2.1(βλεπ.κεφ.2) και δεν ταυτίζεται πάντα με τα δεδομένα της εκάστοτε γεώτρησης που έχουν τοποθετηθεί πάνω στις τομογραφίες.

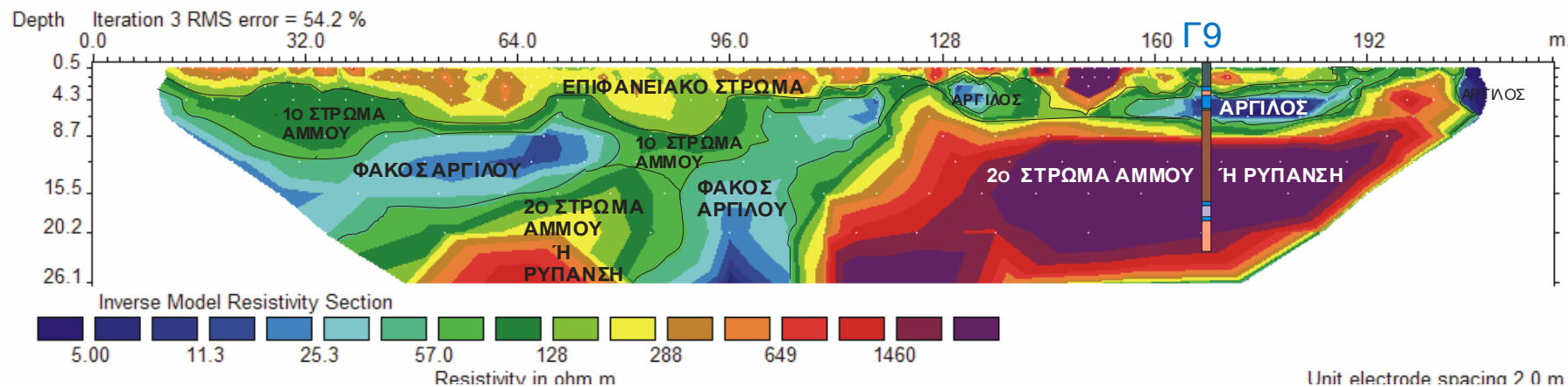
Ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζει τα προσδοκώμενα εύρη τιμών των αντιστάσεων των διάφορων γεωλογικών σχηματισμών, που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης, ώστε να συγκριθούν με τις τιμές της εκάστοτε ηλεκτρικής τομογραφίας και να μπορούν να αξιολογηθούν.

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (ohm.m)
Επιφανειακές προσχώσεις	80-250
Άργιλοι	2-60
Άμμοι και χαλίκια κορεσμένα	50-500

Πίνακας 6.1: Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων

Γραμμή Μελέτης 1 (ER 1)

Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης: Δεκέμβριος 2002.



Σχήμα 6.1

- ΑΡΓΙΛΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ
- ΑΡΓΙΛΟΣ / ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΡΓΙΛΟΣ
- ΛΑΣΠΩΔΗΣ/ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΗ ΑΜΜΟΣ
- ΑΜΜΟΣ ΜΕ ΧΑΛΙΚΙΑ & ΛΑΣΠΗ
- ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ & ΛΙΓΗ ΑΡΓΙΛΟΣ

Δεν υπάρχουν στοιχεία για έλεγχο ρύπανσης.

Γραμμή μελέτης 1:

Η γεώτρηση Νο 9 η οποία αποτελεί και τη μοναδική κοντινή γεώτρηση στη γραμμή 1 απέχει 16 μέτρα από αυτή και τοποθετείται στα 170 μέτρα από την αρχή της. Για τη γεώτρηση Νο 9 δεν υπάρχουν στοιχεία για την περιεκτικότητα των ρύπων TRI και PCE.

Ερμηνεία Σχήματος 6.1:

Στην εικόνα αυτή παρατηρείται έντονη πλευρική μεταβολή αφού από τα 100 μέτρα της γραμμής μελέτης και μετά παρουσιάζεται μεγάλη μεταβολή των τιμών των αντιστάσεων κι αυτό γίνεται φανερό από την έντονη διαφοροποίηση της χρωματικής κλίμακας. Έτσι παρατηρούνται δύο ανωμαλίες που χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης και οι οποίες απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή.

Η πρώτη ανωμαλία ταυτίζεται γεωλογικά με το 2^ο στρώμα άμμου και ίσως έτσι εξηγείται η υψηλή τιμή της αντίστασης χωρίς όμως να αποκλεισθεί η πιθανότητα ύπαρξης ρυπασμένης ζώνης στη θέση αυτή. Η συγκεκριμένη ζώνη εντοπίζεται σε βάθος 20 μέτρων από τα 52 έως τα 80 μέτρα της γραμμής μελέτης.

Η δεύτερη ανωμαλία ξεκινάει περίπου από τα 6 μέτρα βάθος και εκτείνεται από τα (108 – 204) μέτρα της γραμμής μελέτης. Αυτή η ζώνη υψηλής αντίστασης σύμφωνα και με τα δεδομένα της γεώτρησης 9 αποτελεί το 2^ο στρώμα άμμου αποτελούμενο από χαλίκια που πιθανόν να ευθύνονται για τις υψηλές τιμές αντίστασης. Παρ' όλα αυτά η πιθανότερη εκδοχή είναι να πρόκειται για ρυπασμένη περιοχή αφού οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θεωρούνται ανεξήγητα υψηλές.

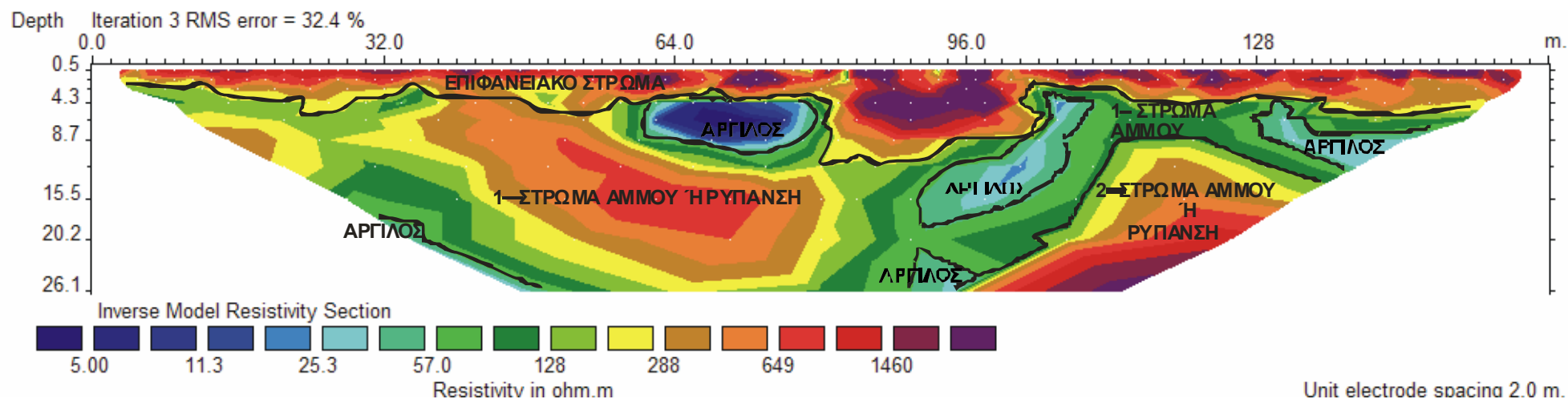
Στην εικόνα αυτή σε συνδυασμό με τα γεωλογικά στοιχεία από την γεώτρηση Νο 9 φαίνεται ξεκάθαρα το επιφανειακό στρώμα που αποτελείται από προσχώσεις γεγονός που δικαιολογεί αντιστάσεις μεταξύ (80 – 250) ohm.m και μόνο κατά τόπους παρατηρούνται ζώνες πιθανής ρύπανσης μικρού εύρους με υψηλές τιμές αντιστάσεων. Επίσης γίνεται εμφανής η παρουσία ενός πρώτου στρώματος άμμου με αντιστάσεις από (50 – 150) ohm.m που θεωρούνται αναμενόμενες, ενώ εμφανίζονται και ορισμένοι αργιλοκοί φακοί που διαχωρίζουν το 1^ο από το 2^ο στρώμα άμμου χωρίς όμως να μπορεί να χαρακτηριστεί συνεχές το αργιλικό αυτό στρώμα, αφού διακόπτεται κατά τόπους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το σφάλμα επεξεργασίας της γραμμής 1 ανέρχεται στο 54,2 %, γεγονός που καθιστά αμφισβητίσιμα τα αποτελέσματα της τομογραφίας και διατηρούνται επιφυλάξεις όσον αφορά την ερμηνεία που πραγματοποιήθηκε παραπάνω.

Επίσης, στη γεωηλεκτρική τομή δεν κατέσται δυνατή η διάκριση του λεπτού αργιλικού στρώματος που εμφανίζεται στην γεώτρηση 9 μεταξύ πρώτης και δεύτερης στρώσης άμμου.

Γραμμή Μελέτης 2 (ER 2)

Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης: Δεκέμβριος 2002.



Σχήμα 6.2

Δεν υπάρχει γεώτρηση κοντά στην συγκεκριμένη γραμμή μελέτης.

Γραμμή μελέτης 2:

Η δεύτερη γραμμή μελέτης βρίσκεται αρκετά μακριά από οποιαδήποτε γεώτρηση ώστε να μπορέσουν να εξαχθούν συνδυαστικά συμπεράσματα. Επομένως η ερμηνεία περιορίζεται στα δεδομένα που προκύπτουν από την εικόνα της ηλεκτρικής τομογραφίας και μόνο.

Ερμηνεία Σχήματος 6.2:

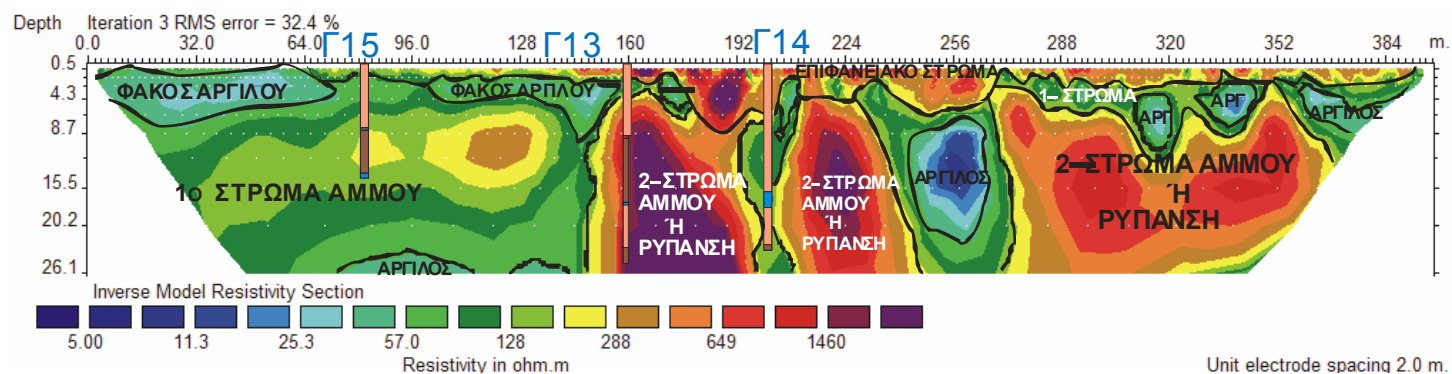
Το επιφανειακό στρώμα που κατά τόπους φτάνει και τα 8 μέτρα παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που δεν εξηγούνται από την παρουσία επιχωματώσεων, αλλά προϋποθέτουν πιθανή ρύπανση όπως στη ζώνη από τα (82 – 102) μέτρα. Επίσης χαρακτηριστική είναι η εμφάνιση 2 ζωνών υψηλών αντιστάσεων που γεωλογικά οριοθετούνται από το 1^ο και 2^ο στρώμα άμμου. Η πρώτη ζώνη ξεκινά από τα 4 μ., εκτείνεται σε βάθος 24 μ. και τοποθετείται από τα 36 έως τα 82 μέτρα της γραμμής μελέτης. Οι αντιστάσεις σε αυτό σχηματισμό αυξάνουν προοδευτικά προς το κέντρο και φτάνουν σε τιμές που ξεπερνούν τα 750 ohm.m. επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως πιθανή ρυπασμένη ζώνη.

Αντίστοιχα παρατηρείται μια δεύτερη ζώνη υψηλών αντιστάσεων που οριοθετείται από τα 96 – 136 μέτρα της γραμμής μελέτης και εκτείνεται από τα 15 μέτρα βάθος και κάτω. Οι αντιστάσεις που παρατηρούνται στη ζώνη αυτή ξεπερνούν τα 1500 ohm.m. κατά τόπους γεγονός που δε δικαιολογείται από τη γεωλογία της περιοχής, αφού οι αντιστάσεις αυτές θεωρούνται ιδιαίτερα υψηλές ακόμα και στην περίπτωση που το στρώμα αυτό χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη άμμου κορεσμένη με χαλίκια.

Τέλος, παρατηρούνται κάποιες περιοχές ιδιαίτερα χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αποδίδονται σε στρώσεις αργίλου. Αυτές εντοπίζονται μεταξύ του επιφανειακού στρώματος και του 1^{ου} στρώματος άμμου, καθώς και κάτω από το 1^ο στρώμα άμμου τεκμηριώνοντας την άποψη ύπαρξης δύο ζωνών, του ανώτερου και του κατώτερου στρώματος αργίλου.

Γραμμή Μελέτης 3 (ER 3)

Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης: Δεκέμβριος 2002.



- ΛΕΠΤΗ ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ
- ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΗ Ή ΛΕΠΤΗ ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ ΜΕ ΧΑΛΙΚΙΑ
- ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΡΓΙΛΟΣ

Σχήμα 6.3

Γραμμή μελέτης 3:

Στην εικόνα αυτή τοποθετήθηκαν 3 γεωτρήσεις. Η γεώτρηση Νο 13 απέχει 18 μέτρα από τη γραμμή 3 και τοποθετήθηκε 160 μέτρα από την αρχή της. Αντίστοιχα η γεώτρηση Νο 14 απέχει 20 μέτρα από τη γραμμή μελέτης και τοποθετήθηκε στα 210 μέτρα απ' την αρχή της. Τέλος η γεώτρηση Νο 15 απέχει μόλις 2 μέτρα από τη γραμμή 3 και τοποθετήθηκε στα 82 μέτρα από την αφετηρία. Αναλυτικότερα για την κάθε γεώτρηση παρατίθενται τα εξής στοιχεία:

➤ Για τη γεώτρηση 13 παρατηρήθηκαν πολύ μικρές ποσότητες PCE (1,5-7,3 ug/l), σε βάθος από 0 έως 18 μ., μεγαλύτερες περιεκτικότητες TRI (εύρους 12-150 ug/l), στο ίδιο βάθος, βάσει των οποίων μπορεί να θεωρηθεί ότι στην περιοχή υπάρχει χαμηλή ρύπανση.

Ημερομηνία ελέγχου: 5/2/2002.

➤ Για τη γεώτρηση 14 παρατηρήθηκε για τα πρώτα 16 μέτρα: [PCE]= 13 ug/l η οποία είναι μικρή και [TRI]=190 ug/l η οποία είναι πολύ μεγάλη. Στα 16-18 μ. παρατηρήθηκαν τα εξής: πολύ μεγάλη συγκέντρωση PCE (=220 ug/l) και ομοίως πάρα πολύ μεγάλη συγκέντρωση TRI(=6900 ug/l). Δηλαδή στο συγκεκριμένο στρώμα η συγκέντρωση DNAPL ήταν μεγαλύτερη απ' ότι στο υπερκείμενο στρώμα.

Βαθύτερα, στα 18-23 μ., παρατηρήθηκε [PCE]=23 ug/l και [TRI]=3100 ug/l. Εδώ παρατηρήθηκε μειωμένη συγκέντρωση DNAPL σε σχέση με το υπερκείμενο στρώμα.

Ημερομηνία ελέγχου: 5/2/2002.

-Λίγες μέρες αργότερα, 9/2/2002, πάρθηκαν ξανά δείγματα υπόγειων νερών από την ίδια γεώτρηση.

Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

α) 0-16 μ.~[PCE]= 0,1 ug/l, [TRI]= 1,8 ug/l.

β) 16-18 μ.~[PCE]= 9,1 ug/l, [TRI]= 23 ug/l.

γ) 18-23 μ.~[PCE]= 5,2 ug/l, [TRI]= 36 ug/l.

Και στις 3 περιπτώσεις παρατηρήθηκε μείωση της περιεκτικότητας και των 2 ρυπαντών σε σχέση με εκείνες της 5ης/2/2002 στα αντίστοιχα βάθη.

-Στις 30/9/2002 επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία λήψης δειγμάτων για έλεγχο ρύπανσης και βρέθηκε:

α) 16-18 μ.~[PCE]= 300 ug/l, [TRI]= 8400 ug/l.

β) 18-23 μ.~[PCE]= 180 ug/l, [TRI]= 3800 ug/l.

Εδώ υπήρχε μια πολύ μεγάλη αύξηση της περιεκτικότητας και των 2 ρυπαντών, στα αντίστοιχα βάθη, σε σχέση με εκείνες της προηγούμενης ημερ/νίας λήψης δειγμάτων (9/2/2002).

-Η τελευταία δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στις 8/12/2002 και έδειξε:

α) 16-18 μ.~[PCE]= 8,7 ug/l, [TRI]= 22 ug/l. Παγδαία μείωση σχετικά με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις του Σεπτεμβρίου 2002.

β) 18-23 μ.~[PCE]= 200 ug/l, [TRI]= 3500 ug/l. Ελάχιστη μείωση σχετικά με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις του Σεπτεμβρίου 2002.

- Για τη γεώτρηση 15, ο έλεγχος έδειξε ότι οι συγκεντρώσεις TRI, PCE είναι <0,1ug/l στα πρώτα 8 μ. της γεώτρησης. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ρύπανση. Ημερομηνία ελέγχου: 5/2/2002.

Ερμηνεία Σχήματος 6.3:

Στη γεωηλεκτρική τομή ER(3) παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της πλευρικής μεταβολής, αφού κοντά στη γεώτρηση 13 και συγκεκριμένα στα 150 μέτρα από την αρχή της γραμμής παρουσιάζεται απότομη αύξηση της τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης φτάνοντας σε κρίσιμες τιμές που μπορούν να αποδοθούν μόνο στη λιθολογική σύσταση των εδαφών. Στη γεώτρηση Νο15 που βρίσκεται 82 μέτρα από την αρχή της γραμμής δεν βρέθηκε ρύπανση. Στην αντίστοιχη θέση παρατηρούνται φυσιολογικές αντιστάσεις για αμμώδη εδάφη. Μάλιστα σε βάθος από τα (9 – 15) μέτρα στη γεώτρησης οριοθετείται στρώμα ιλυώδους άμμου με χαλίκια που παρουσιάζει αντιστάσεις κοντά στα 250 ohm.m δικαιολογώντας έτσι τις αντίστοιχες ζώνες (κίτρινες έως καφέ της χρωματικής κλίμακας) που φαίνονται στη γεωηλεκτρική τομή.

Αντιθέτως οι γεωτρήσεις 13 και 14 (που απέχουν 18-20 μ. από την τρίτη γραμμή μελέτης) παρουσίασαν ρύπανση, γεγονός που επαληθεύεται μέσω της τομογραφίας, αφού οι δύο γεωτρήσεις διέρχονται μέσα από δύο ζώνες ιδιαίτερα υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που δεν δικαιολογούνται από τη λιθολογία της περιοχής κι ερμηνεύονται ως πιθανές ρυπασμένες ζώνες. Αυτές ξεκινούν από τα 150 μ. και φτάνουν στα 250 μ. της γραμμής κι εκτείνονται σε βάθος μεγαλύτερο των 26 μέτρων.

Ακολούθως στα 250 μέτρα εμφανίζεται απότομη μεταβολή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, προσεγγίζοντας τιμές που φτάνουν και τα 10 ohm.m οι οποίες

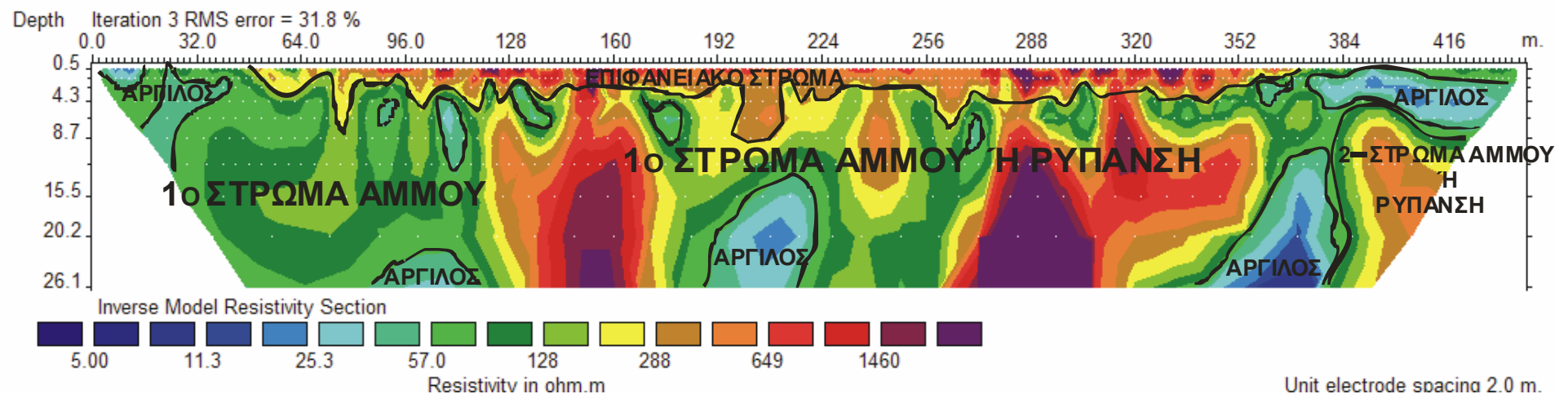
αποδίδονται σε πολύ υψηλή συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών που δημιουργεί στεγανό στρώμα για τη διείσδυση της ρύπανσης στην περιοχή αυτή.

Από τα 270 μέτρα έως το τέλος της γραμμής μελέτης, παρατηρείται ξανά απότομη αύξηση των τιμών της αντίστασης και εντοπίζεται μια τρίτη ζώνη πιθανόν ρυπασμένη με σημαντικά υψηλές αντιστάσεις που δεν δικαιολογούνται από την παρουσία απλά ενός 2^{ου} στρώματος άμμου.

Τέλος, εμφανίζονται σε μικρότερο βάθος μικρών διαστάσεων ζώνες χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αποδίδονται στο ανώτερο αργιλικό στρώμα (σχεδόν συνεχές). Για το κατώτερο αργιλικό στρώμα δεν έχουμε ξεκάθαρη εικόνα, αφού είναι συνήθως πολύ λεπτό και το πάχος του είναι μικρότερο από τη διακριτική ικανότητα της γεωηλεκτρικής τομής σε αυτά τα βάθη (σε βάθος 15 μ., η διακριτική ικανότητα είναι 3,5-4,7 μ.).

Γραμμή Μελέτης 4 (ER 4)

Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης: Φεβρουάριος 2003.



Δεν υπάρχει γεώτρηση κοντά στην συγκεκριμένη γραμμή μελέτης.

Σχήμα 6.4

Γραμμή μελέτης 4:

Η τέταρτη γραμμή μελέτης, όπως και η δεύτερη, βρίσκεται μακριά από κάποια γεώτρηση οπότε η ερμηνεία περιορίζεται στα δεδομένα που προκύπτουν από την εικόνα της ηλεκτρικής τομογραφίας και μόνο.

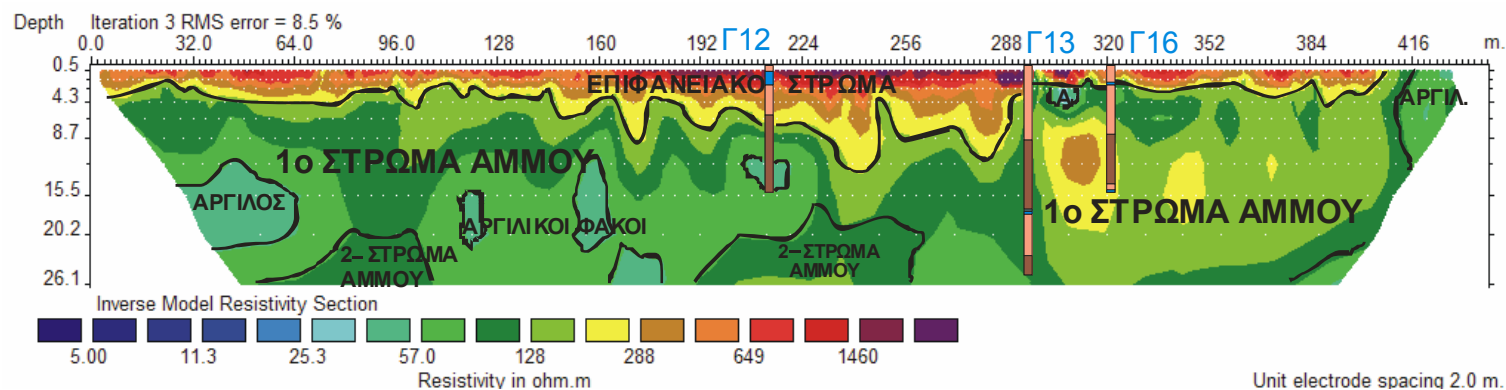
Ερμηνεία Σχήματος 6.4:

Με μοναδικό κριτήριο την τομογραφία τα δεδομένα που προκύπτουν από την εξέταση της τέταρτης γραμμής μελέτης είναι τα ακόλουθα:

Παρατηρείται ότι το επιφανειακό στρώμα από τα 48 έως τα 372 μέτρα της γραμμής παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, μεγαλύτερες από τις προσδοκούμενες για επιφανειακές προσχώσεις. Έτσι κρίνεται ότι το επιφανειακό στρώμα πιθανόν είναι ρυπασμένο ενώ αυτή η ρύπανση φαίνεται να διεισδύει και σε κατώτερα βάθη προκαλώντας την ύπαρξη άλλων 2 ζωνών αδικαιολόγητα υψηλών τιμών αντιστάσεων με τιμές που ξεπερνούν τα 700 και κατά περιοχές τα 1400 ohm.m και σε καμία περίπτωση δεν αιτιολογούνται από την γεωλογία της περιοχής. Οι παραπάνω ζώνες οριοθετούνται από τα 124 μ. – 178 μ. η πρώτη και από τα 262 μ. – 360 μ. η δεύτερη κατά μήκος της γραμμής μελέτης, ενώ εκτείνονται σε βάθος μεγαλύτερο από 4 μέτρα. Οι τιμές των αντιστάσεων σ' αυτές τις δύο ζώνες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ρύπανση και μάλιστα δε φαίνεται να περιορίζεται και να παρεμποδίζεται από το ανώτερο αργιλικό στρώμα, αφού οι εντοπισμένοι φακοί αργίλου είναι μικροί σε εύρος και απόμακροι μεταξύ τους καθιστώντας εύκολη τη διείσδυση των ρύπων σε κατώτερα βάθη. Μονο κάποιοι φακοί αργίλου, σε βάθος από τα 15 μέτρα και κάτω, που δε φαίνεται όμως να δημιουργούν ένα συνεχές στρώμα, περιορίζουν σε ένα βαθμό την εξάπλωση της ρύπανσης σε όλη την έκταση της γραμμής.

Γραμμή Μελέτης 5 (ER 5)

Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης: Δεκέμβριος 2002.



- ΛΕΠΤΗ ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ
- ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΡΓΙΟΣ
- (ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΗ) ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ ΜΕ ΧΑΛΙΚΙΑ

Σχήμα 6.5

Γραμμή μελέτης 5:

Στην εικόνα αυτή τοποθετήθηκαν 3 γεωτρήσεις. Η γεώτρηση Νο 12 απέχει 9 μέτρα από τη γραμμή 5 και τοποθετήθηκε 214 μέτρα από την αρχή της. Αντίστοιχα η γεώτρηση Νο 13 απέχει 22 μέτρα από τη 5^η γραμμή μελέτης και τοποθετήθηκε στα 216 μέτρα απ' την αρχή της. Τέλος η γεώτρηση Νο 16 απέχει 6 μέτρα μόνο από τη γραμμή 5 και τοποθετήθηκε στα 322 μέτρα από την αρχή της. Αναλυτικότερα:

- Για τη γεώτρηση 12 παρατηρήθηκε πολύ μικρή συγκέντρωση PCE (2,1 ug/l) στο πρώτο μισό μέτρο. Αντίθετα η περιεκτικότητα σε TRI ήταν πολύ μεγαλύτερη (43 ug/l) για το ίδιο βάθος. Για τα επόμενα 2 περίπου μέτρα, δηλαδή 0,5-2,4 μ., τα ληφθέντα δείγματα έδειξαν αύξηση της συγκέντρωσης DNAPL (PCE, TRI). Πιο συγκεκριμένα η περιεκτικότητα PCE ανήλθε στα 24 ug/l και αντίστοιχα η περιεκτικότητα TRI αυξήθηκε στα 4300 ug/l.

Ημερομηνία ελέγχου: 5/2/2002.

Επίσης ξανάγινε έλεγχος για το βάθος 0,5-2,4 μ., πολύ αργότερα, στις 8/12/2002.

Οι τιμές συγκέντρωσης των PCE και TRI ήταν <0,1ug/l και <0,4ug/l αντίστοιχα. Δηλ. κατά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της 5ης Φεβρουαρίου 2002. Ο έλεγχος αυτός έδειξε επίσης ότι σε βάθος 2,4-6 μ. οι περιεκτικότητες PCE και TRI ήταν πολύ χαμηλές και ίσες με 1,7ug/l και 5,5ug/l αντίστοιχα.

- Για τη γεώτρηση 13 παρατηρήθηκαν πολύ μικρές ποσότητες PCE (1,5-7,3 ug/l), σε βάθος από 0 έως 18 μ., μεγαλύτερες περιεκτικότητες TRI (εύρους 12-150 ug/l), στο ίδιο βάθος, βάσει των οποίων μπορεί να θεωρηθεί ότι στην περιοχή υπάρχει χαμηλή ρύπανση.

Ημερομηνία ελέγχου: 5/2/2002.

- Για τη γεώτρηση 16, ο έλεγχος έδειξε ότι δεν υπάρχει ρύπανση στα πρώτα 2 περίπου μέτρα της γεώτρησης, (Συγκεντρώσεις TRI, PCE<0,1ug/l). Ημερομηνία ελέγχου: 5/2/2002.

Ερμηνεία Σχήματος 6.5:

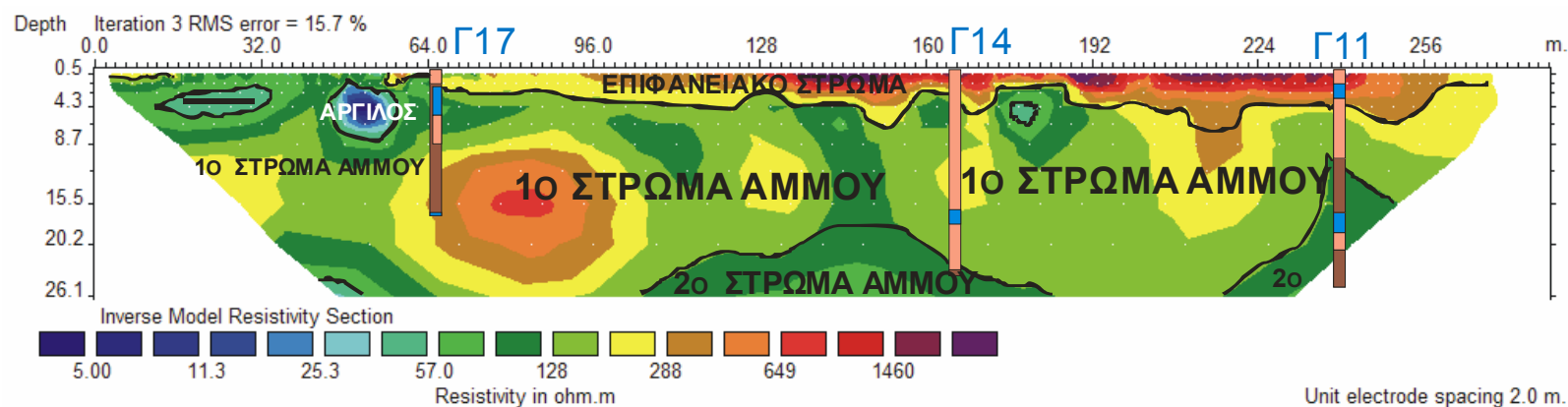
Στην 5η γραμμή μελέτης δεν προκύπτουν εμφανείς θέσεις ρυπασμένες με χλωριομένους υδρογονάνθρακες πράγμα που επαληθεύεται από τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων. Μόνο η γεώτρηση Νο 13 δείχνει μια σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε τριχλωρομεθάνιο το οποίο δεν φαίνεται ξεκάθαρα στην εικόνα της τομογραφίας πιθανόν εξαιτίας του γεγονότος ότι η γεώτρηση Νο 13 απέχει 22 μέτρα από τη γραμμή μελέτης.

Αντιθέτως η γεώτρηση Νο 12 μόνο όμως για τα πρώτα 2,4 μέτρα τεκμηριώνει τις ενδείξεις της τομογραφίας, αφού είναι φανερό ότι υπάρχουν υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης καθ' όλη την έκταση του επιφανειακού στρώματος της γραμμής μελέτης που μπορεί να οφείλονται σε υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών ρύπων.

Κατά τα άλλα η συγκεκριμένη περιοχή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ρυπασμένη, αφού πέρα από τις επιφανειακές προσχώσεις, τα υπόλοιπα γεωλογικά στρώματα δε φαίνεται να είναι ρυπασμένα.

Γραμμή Μελέτης 6 (ER 6)

Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης: Δεκέμβριος 2002.



- ΛΕΠΤΗ ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ
- ΛΑΣΠΩΔΗΣ / ΑΜΜΩΔΗΣ ΑΡΓΙΛΟΣ
- ΛΑΣΠΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ ΜΕ ΧΑΛΙΚΙΑ

Σχήμα 6.6

Γραμμή μελέτης 6:

Κι εδώ τοποθετήθηκαν, όπως προηγουμένως, 3 γεωτρήσεις. Η γεώτρηση No 11 απέχει 10 μέτρα από τη γραμμή και τοποθετήθηκε 240 μέτρα από την αρχή της. Η γεώτρηση No 14 απέχει 13 μέτρα από τη 6^η γραμμή μελέτης και τοποθετήθηκε στα 166 μέτρα απ' την αρχή της. Τέλος η γεώτρηση No 17 απέχει 14 μέτρα μόνο από τη γραμμή 6 και τοποθετήθηκε στα 68 μέτρα από την αρχή της. Συγκεκριμένα:

- Για τη γεώτρηση 11 ο έλεγχος έδειξε πολύ μικρές περιεκτικότητες PCE (0,2-0,5 ug/l), στα πρώτα 10,4 μέτρα. Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα όσον αφορά την περιεκτικότητα σε TRI για το ίδιο βάθος. Συγκεκριμένα αυτές κυμαίνονται από 4,7 έως 14ug/l. Εδώ δεν υπήρχε δηλαδή ένδειξη ρύπανσης κατά τη μέτρηση στις 5/2/2002.
- Για τη γεώτρηση 14 τα αποτελέσματα προαναφέρθηκαν στη γραμμή μελέτης 3 (βλέπ.σελ.117)
- Για τη γεώτρηση 17 ο έλεγχος έδειξε ότι οι συγκεντρώσεις TRI, PCE είναι <0,1ug/l στα πρώτα 3,7 μ. της γεώτρησης. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ρύπανση, τουλάχιστον στο αναφερόμενο βάθος και ημερομηνία,που ελέγχθηκαν τα δείγματα (5/2/2002). Ο έλεγχος επαναλήφθηκε στις 8/12/2002 και τα αποτελέσματα ήταν τα ίδια για το στρώμα που βρίσκεται σε βάθος 1,1-3,7 μ.

Ερμηνεία Σχήματος 6.6:

Οι γεωτρήσεις No 11 και No 17 δε φανερώνουν ρύπανση και φαίνεται να συμφωνούν με την εικόνα της ηλεκτρικής τομογραφίας, αφού πέρα από την πιθανή επιφανειακή ρύπανση δεν παρατηρούνται άλλες ζώνες υψηλών τιμών αντιστάσεων στα κατώτερα βάθη.

Παρόλα αυτά παρατηρείται ζώνη υψηλών αντιστάσεων σε βάθος από 8 έως 26 μέτρα μέσα από την οποία διέρχεται η γεώτρηση No 17. Στη ζώνη αυτή οι σχετικά υψηλές αντιστάσεις ερμηνεύονται σύμφωνα και με τη γεώτρηση 17 από την ύπαρξη στρώματος άμμου με χαλίκια.

Στο Σχήμα 6.6 ο συνδυασμός των δεδομένων της εικόνας της τομογραφίας και της γεώτρησης No 14 οδηγεί σε αδιέξοδο, αφού το αποτέλεσμα είναι αντιφατικό. Τα δείγματα νερού της γεώτρησης No 14 φανερώνουν την παρουσία υψηλών

περιεκτικότητων σε TRI και PCE γεγονός που δεν επιβεβαιώνεται από την εικόνα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Συγκεκριμένα η γεώτρηση No 14 δείχνει ρύπανση από τα 18-23 μέτρα. Η διαφοροποίηση της ένδειξης αυτής με την τομογραφία πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη γεώτρηση απέχει από τη γραμμή μελέτης 13 μέτρα κι επομένως πολλές μεταβολές μπορεί να έχουν προκύψει στην ενδιάμεση απόσταση.

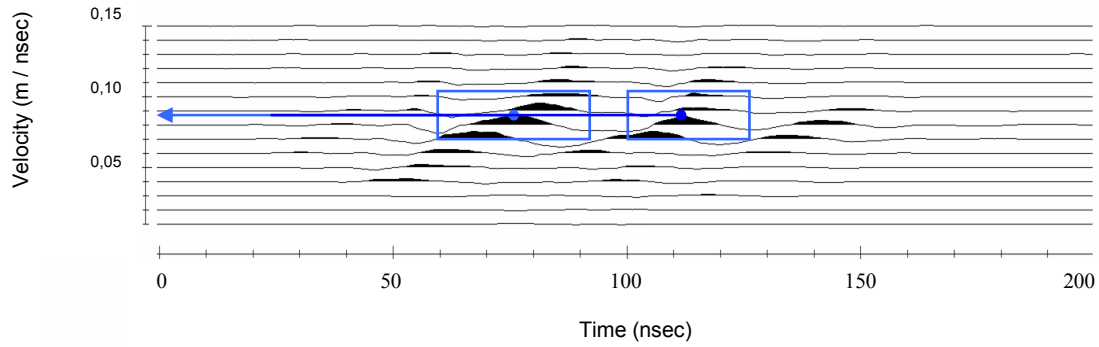
Τέλος, είναι φανερό τόσο από τις γεωτρήσεις όσο και από την ηλεκτρική τομογραφία ότι το ανώτερο αργιλικό στρώμα περιορίζεται στα πρώτα 70 μέτρα της γραμμής ενώ το κατώτερο ή κύριο αργιλικό στρώμα δεν κάνει καθόλου την εμφάνισή του στα πρώτα 26 μέτρα βάθος.

6.3 Υπέρθεση εικόνων ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ

6.3.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή επιχειρήθηκε η συνδυαστική ερμηνεία των εικόνων της ηλεκτρικής τομογραφίας σε σχέση με τις εικόνες γεωραντάρ. Επιλέχθησαν 3 γραμμές μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας και οι αντίστοιχες γραμμές του γεωραντάρ πάνω στις τομογραφίες ή βρίσκονταν αρκετά κοντά σε αυτές. Για το συνδυασμό των εικόνων από τις 2 μεθόδους πραγματοποιήθηκε υπέρθεση με τη χρήση του προγράμματος Corel DRAW 10.

Πριν γίνει η υπέρθεση των εικόνων πραγματοποιήθηκε μετατροπή του κατακόρυφου άξονα του διπλού χρόνου (nsec) των εικόνων του γεωραντάρ σε βάθος (m) αφού αξιοποιήθηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων, όπως αυτές προέκυπταν από τη μελέτη των αρχείων κοινού ενδιαμέσου σημείου (CMP files). Παράδειγμα εύρεσης της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων φαίνεται στο Διάγραμμα 6.1. Ο σκοπός αυτής της μετατροπής ήταν να αναχθεί ο χρόνος καταγραφής σε βάθος, ώστε οι εικόνες γεωραντάρ να τοποθετηθούν στη σωστή κλίμακα πάνω στις αντίστοιχες εικόνες της ηλεκτρικής τομογραφίας. Έτσι τα δεδομένα που παρείχαν οι εικόνες της τομογραφίας και του γεωραντάρ ήταν συγκρίσιμα και η υπέρθεση οδήγησε στην καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία τους στην υπο μελέτη περιοχή.



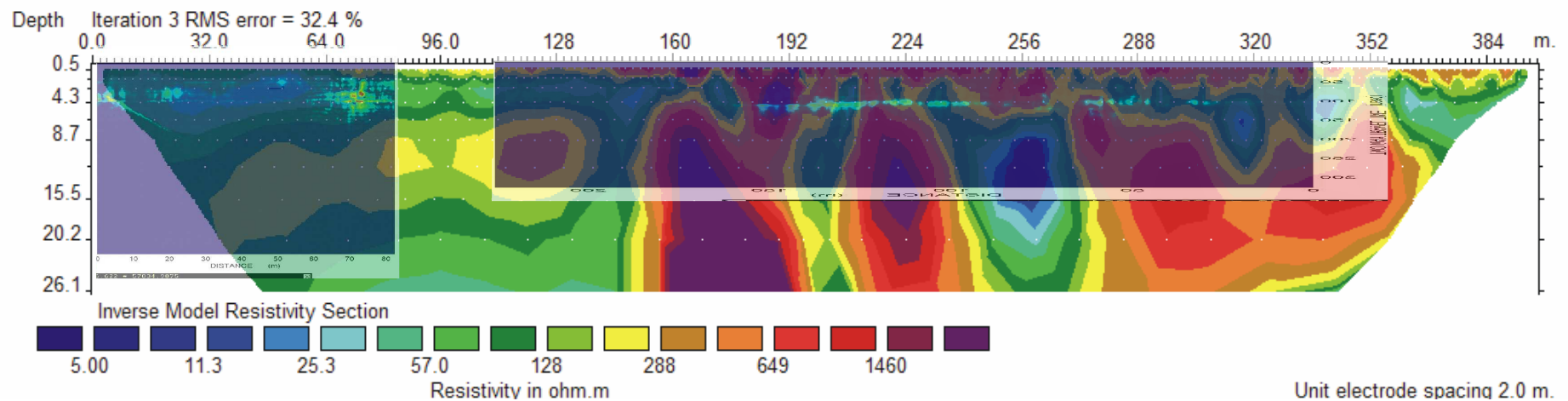
Διάγραμμα 6.1 Μέθοδος Κοινού Ενδιάμεσου Σημείου και εύρεση της ταχύτητας

Από τις παραβολές που φαίνονται στο Διάγραμμα 6.1, σχεδιάζεται η προβολή στον άξονα των ταχυτήτων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις κύριες χαρακτηριστικές καμπύλες. Ο μέσος όρος των τιμών, αποτελεί την επιλεγμένη μέση ταχύτητα η οποία τελικά υπολογίστηκε $u_{\text{μέση}} = 0,085 \text{ m / nsec}$.

6.3.2 Εικόνες υπέρθεσης - ερμηνεία

Στην παράγραφο αυτή παραθέτονται οι συνδυασμένες εικόνες που προέκυψαν και ακολουθεί η προσπάθεια ερμηνείας τους.

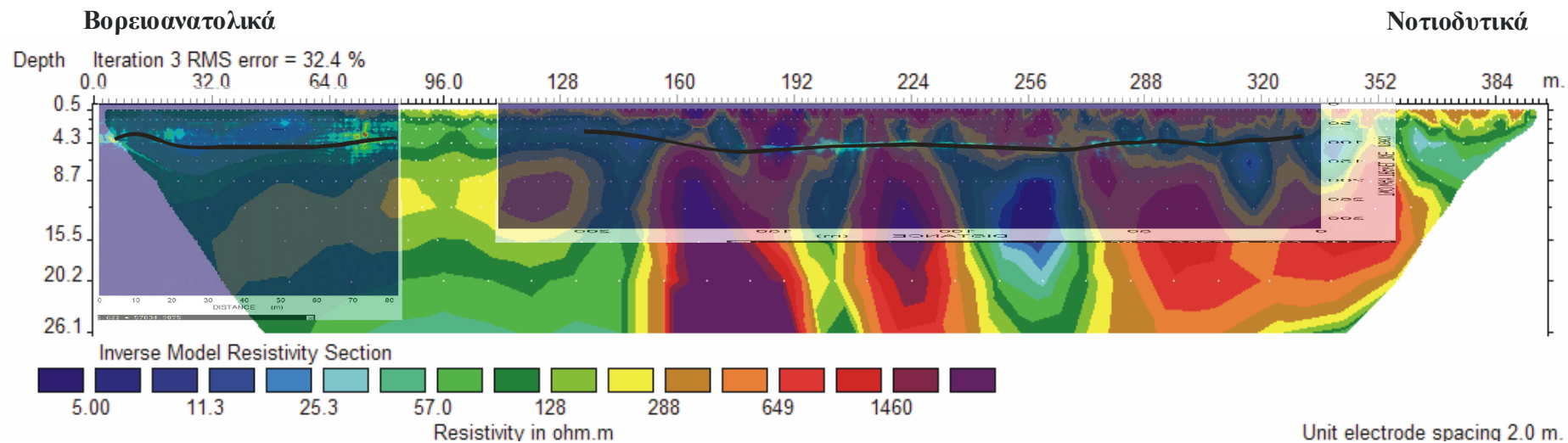
Γραμμή μελέτης 3 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμές 1, 3 γεωραντάρ (DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 3 ηλεκτρικής τομογραφίας & των γραμμών 1,3 γεωραντάρ :
Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.7

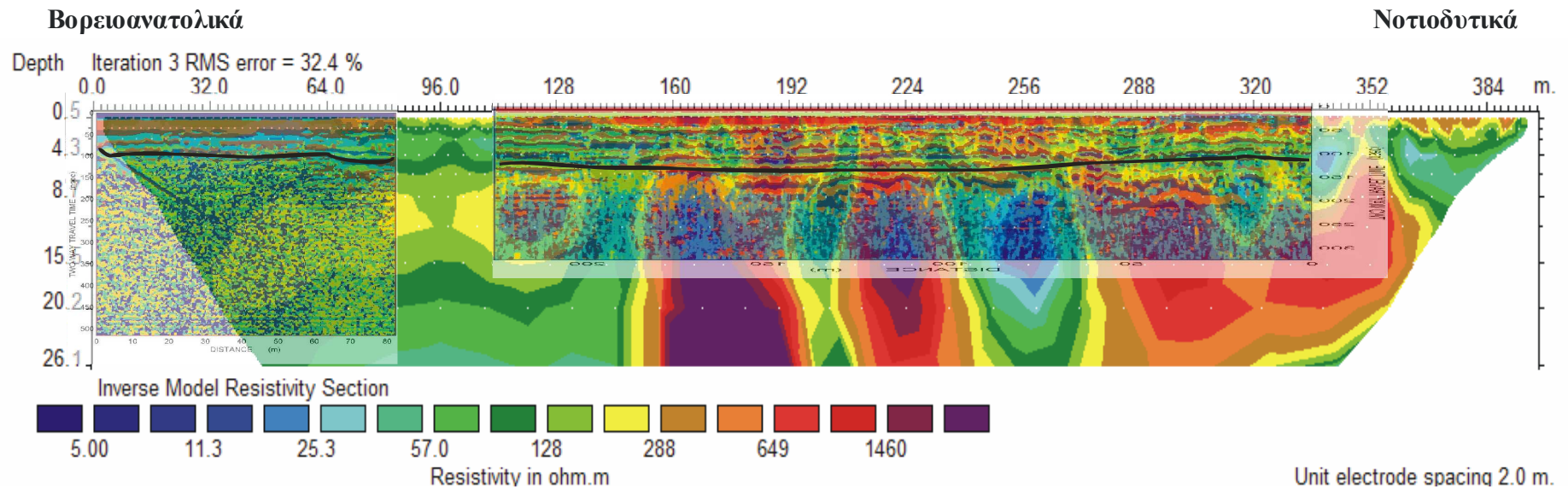
Γραμμή μελέτης 3 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμές 1, 3 γεωραντάρ (DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 3 ηλεκτρικής τομογραφίας & των γραμμών 1,3 γεωραντάρ :
Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.8

Γραμμή μελέτης 3 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμές 1, 3 γεωραντάρ (k-means_10)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 3 ηλεκτρικής τομογραφίας & των γραμμών 1,3 γεωραντάρ :
Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.9

Η 3η γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας συνδυάστηκε με τις γραμμές 1 και 3 του γεωραντάρ, και προέκυψαν 3 χαρακτηριστικές υπερθέσεις. Αυτές απεικονίζονται στα Σχήματα 6.7, 6.8 και 6.9. Μάλιστα στα Σχήματα 6.8 και 6.9 έχει σχεδιαστεί ανακλαστήρας στην εικόνα του γεωραντάρ, ο οποίος αντιστοιχεί στο κάτω όριο του ανομοιογενούς επιφανειακού στρώματος που εμφανίζεται στη γεωηλεκτρική τομή.

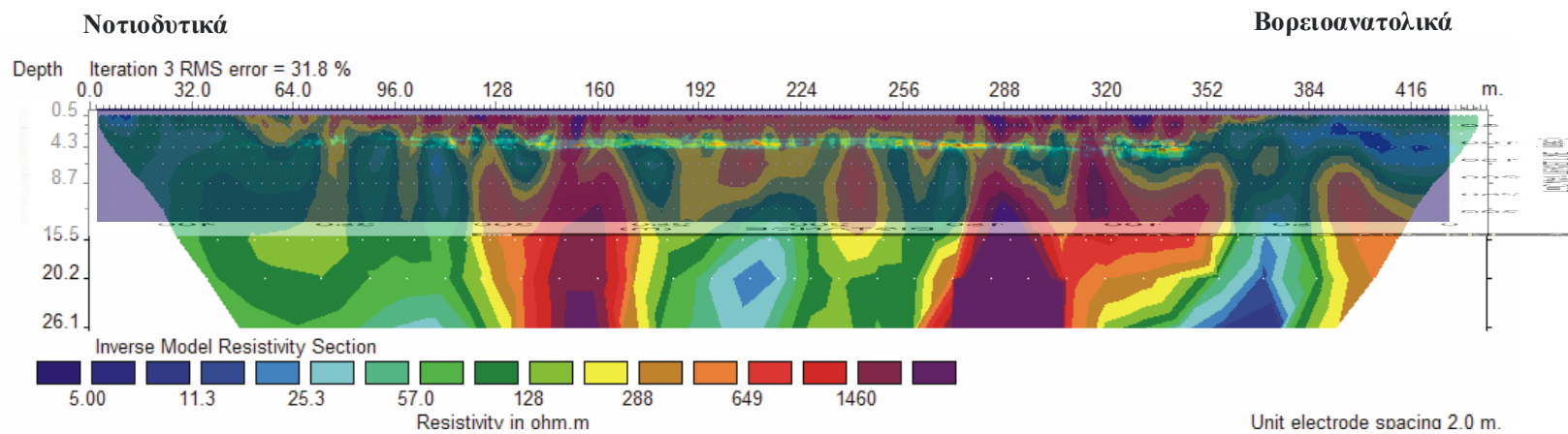
Ο ανακλαστήρας στο βάθος των 4 μέτρων εμφανίζει πλευρική μεταβολή του πλάτους του ανακλώμενου σήματος κατά μήκος της 3^{ης} τομής του γεωραντάρ που τοποθετείται στα 110-300 μέτρα της 3^{ης} γραμμής μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στο Σχήμα 6.7 παρατηρείται αυξημένο το πλάτος στα 60 - 84 μέτρα, 178-246 μέτρα και 274-334 μέτρα κατά μήκος της γραμμής 3 της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στην πρώτη περιοχή (60-84 μ.) δεν υπάρχουν ενδείξεις ρύπανσης από τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Στη δεύτερη όμως περιοχή (178-246 μ.) υπάρχει απόλυτη εναρμόνιση των δεδομένων του γεωραντάρ και της εικόνας της τομογραφίας, αφού φαίνεται να οριοθετείται το υπόβαθρο του επιφανειακού στρώματος προσδιορίζοντας επίσης τις θέσεις εκείνες που οι τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων είναι ιδιαίτερα υψηλές. Μάλιστα το πλάτος της ανάκλασης μειώνεται στις περιοχές εκείνες που κινούμενοι πλευρικά το υποκείμενο γεωλογικό στρώμα εμφανίζει χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντιθέτως μεγάλα πλάτη παρατηρούνται στις θέσεις εκείνες που από την ηλεκτρική τομογραφία προκύπτει η σε βάθος επέκταση των πιθανών ζωνών ρύπανσης. Οι ίδιες παρατηρήσεις γίνονται και για το τρίτο τμήμα της γραμμής (274-300 μ.) όπου δίνεται έμφαση στις θέσεις εξασθένισης του σήματος οι οποίες ερμηνεύονται ως πιθανοί φακοειδείς σχηματισμοί αργίλου.

Η υπέρθεση του Σχήματος 6.9 δίνει βαρύτητα στη θέση της ισχυρής ανάκλασης και στις περιοχές που εντοπίζεται υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε βάθη μεγαλύτερα των 6 μέτρων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.9 τα δεδομένα της ταξινόμησης των 10 τάξεων σε συνδυασμό με την εικόνα της ηλεκτρικής τομογραφίας επιβεβαιώνουν την ύπαρξη 3 ζωνών πιθανής ρύπανσης που εκτείνονται σε μεγαλύτερα βάθη. Επίσης στην υπέρθεση αυτή παρουσιάζεται με έντονα χρώματα πέρα των 3 ζωνών και το επιφανειακό στρώμα που φανερώνει έντονη διαταραχή στα πρώτα 2 μέτρα ενισχύοντας έτσι την υποψία πιθανής ρύπανσης στη θέση αυτή.

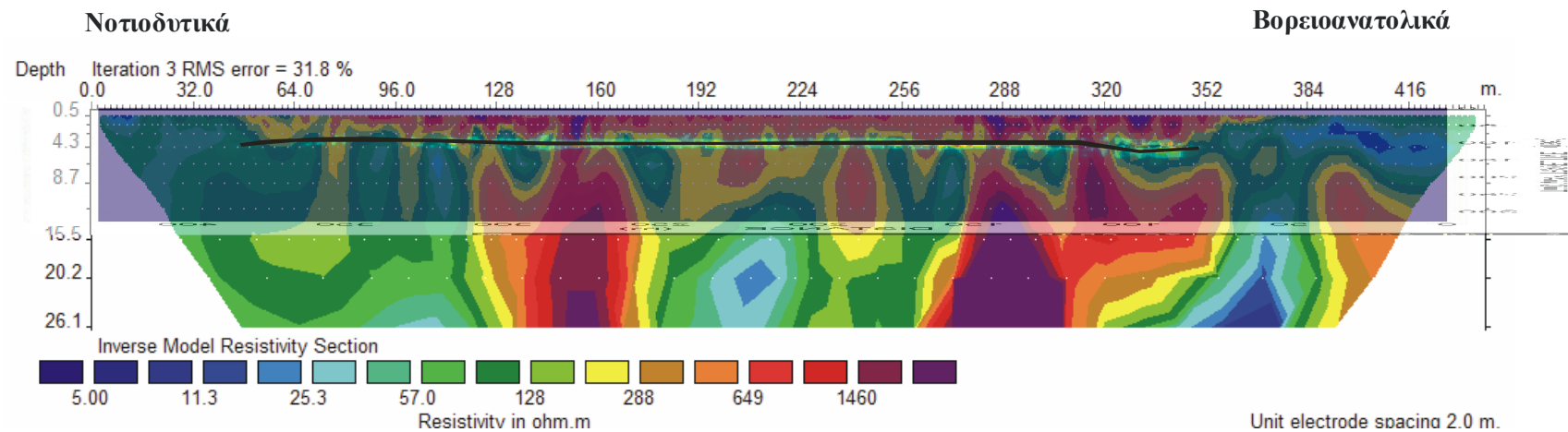
Γραμμή μελέτης 4 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 6 γεωραντάρ (DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 4 ηλεκτρικής τομογραφίας: Φεβρουάριος 2003.
 Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 6 γεωραντάρ : Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.10

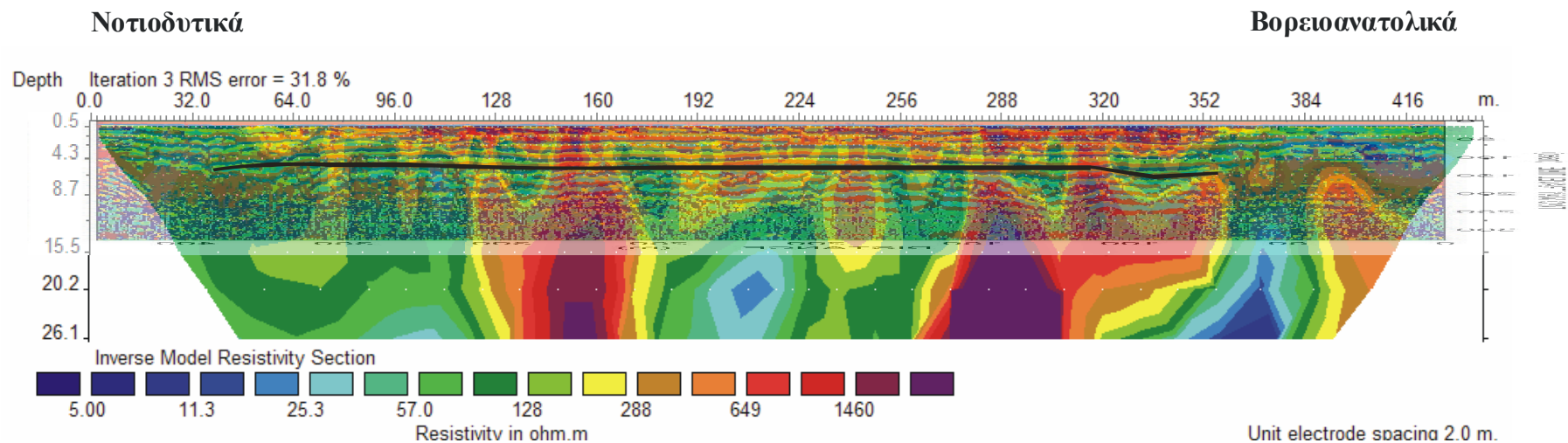
Γραμμή μελέτης 4 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 6 γεωραντάρ (DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 4 ηλεκτρικής τομογραφίας: Φεβρουάριος 2003.
 Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 6 γεωραντάρ : Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.11

Γραμμή μελέτης 4 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 6 γεωραντάρ (k-means_10)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 4 ηλεκτρικής τομογραφίας: Φεβρουάριος 2003.
 Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 6 γεωραντάρ: Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.12

Πάνω στην 4^η γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας έγινε η υπέρθεση 2 χαρακτηριστικών εικόνων γεωραντάρ, της εικόνας DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope και της k-means_10. Η πρώτη υπέρθεση παρατίθεται στα Σχήματα 6.10 και 6.11.

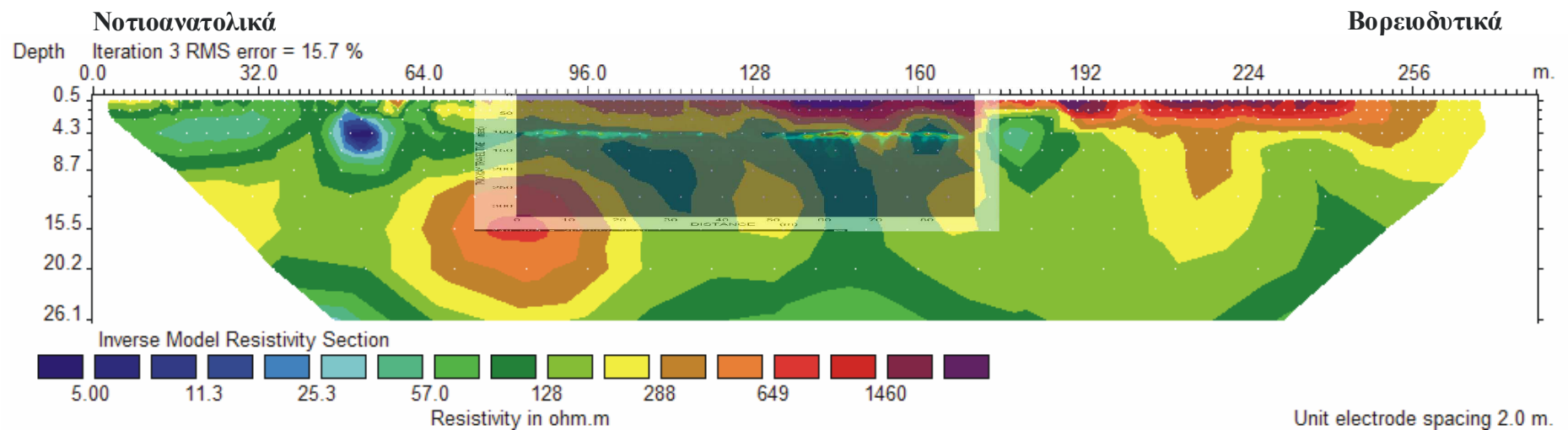
Στο Σχήμα 6.10 δίνεται έμφαση στην πλευρική μεταβολή του πλάτους της κύριας ανάκλασης στην τομή του γεωραντάρ η οποία οριοθετείται από τα 64-350 μέτρα της γραμμής της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η υπέρθεση επιβεβαιώνει την πλήρη συμβατότητα των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ. Η έντονη αυτή ανάκλαση στα 4 περίπου μέτρα, όπως αυτό επαληθεύεται και από την τομογραφία, συμπίπτει με το κατώτερο όριο του επιφανειακού στρώματος, το οποίο είναι έντονα ρυπασμένο. Επίσης ορατή είναι η εξασθένιση του ανακλώμενου σήματος σε θέσεις όπου εμφανίζεται το πρώτο στρώμα άμμου καθώς και κάποιος περιορισμένης έκτασης αργιλικός σχηματισμός, τα οποία δε φαίνεται να είναι ρυπασμένα.

Ιδιαίτερα έντονη γίνεται η ανάκλαση σε θέσεις που σύμφωνα και με την ηλεκτρική τομογραφία τα υποκείμενα στρώματα δείχνουν να είναι ρυπασμένα. Επομένως όπως και στις υπερθέσεις της 3^{ης} γραμμής της τομογραφίας έτσι κι εδώ η έντονη ανάκλαση μπορεί να ερμηνευτεί ως η απαρχή νέας ρυπασμένης ζώνης που εκτείνεται σε κατώτερα βάθη και δεν έχει περιοριστεί μονάχα στο επιφανειακό στρώμα.

Ακολουθώντας την ισχυρή αυτή ανάκλαση που φανερώνεται στο Σχήμα 6.10, σχεδιάστηκε ανακλαστήρας (βλέπ.Σχήματα 6.11, 6.12) που εκφράζει το υπόβαθρο του ρυπασμένου επιφανειακού στρώματος και αποτελεί τη διαχωριστική επιφάνεια του ανώτερου ρυπασμένου στρώματος από τις κατώτερες γεωλογικές στρωματώσεις.

Τέλος στο Σχήμα 6.12 η ταξινόμηση των 10 τάξεων σε συνδυασμό με την εικόνα της τομογραφίας φανέρωσαν για ακόμα μια φορά τη θέση ισχυρού ανακλαστήρα στη θέση που προαναφέρθηκε. Χαρακτηριστικές είναι και η ανά περιοχές διαταραγμένες ζώνες που συμπίπτουν ως επί το πλείστον με τις ζώνες υψηλής αντίστασης και οι οποίες εκτείνονται σε μεγάλα βάθη και μπορούν να χαρακτηριστούν ως ρυπασμένες. Η ταξινόμηση παρέχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια κάνοντας εμφανείς αρκετές ανακλάσεις πέρα της κύριας ισχυρής ανάκλασης που εντοπίστηκε νωρίτερα και η συχνότητα εμφάνισης των γραμμών ανάκλασης φανερώνει τις περιοχές εκείνες με το μεγαλύτερο πρόβλημα ρύπανσης.

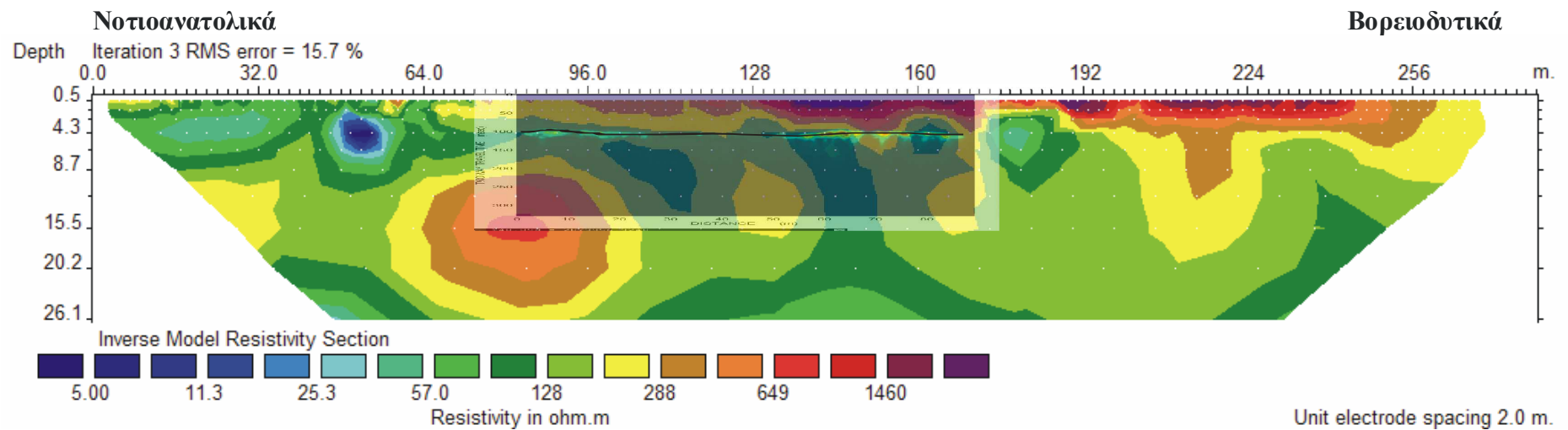
Γραμμή μελέτης 6 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 5 γεωραντάρ (DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 6 ηλεκτρικής τομογραφίας & της γραμμής 5 γεωραντάρ : Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.13

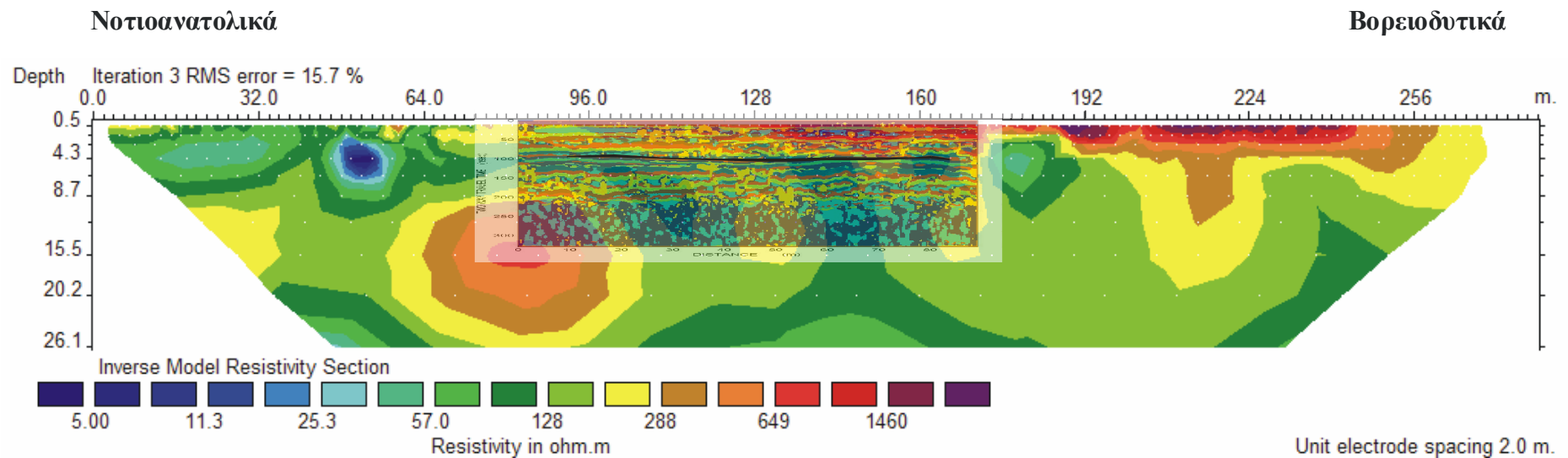
Γραμμή μελέτης 6 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 5 γεωραντάρ (DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 6 ηλεκτρικής τομογραφίας & της γραμμής 5 γεωραντάρ : Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.14

Γραμμή μελέτης 6 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 5 γεωραντάρ (k-means_10)



Ημερομηνία μέτρησης κατά μήκος της γραμμής 6 ηλεκτρικής τομογραφίας & της γραμμής 5 γεωραντάρ :
Δεκέμβριος 2002.

Σχήμα 6.15

Όπως και στις προηγούμενες υπερθέσεις έτσι και εδώ ο συνδυασμός της γραμμής 6 της ηλεκτρικής τομογραφίας με τις εικόνες DEWOW>SEC>Instantaneous Envelope και k-means_10 της γραμμής 5 του γεωραντάρ αποτέλεσαν την τελική επιλογή στην προσπάθεια ερμηνείας. Παρατίθενται 3 εικόνες στα Σχήματα 6.13, 6.14 και 6.15 και ακολουθώντας τη λογική των προηγούμενων υπερθέσεων σχεδιάστηκε ανακλαστήρας στην προσπάθεια διαχωρισμού του υποφαινόμενου ρυπασμένου στρώματος από τα υποκείμενα μη ρυπασμένα γεωλογικά στρώματα.

Συγκεκριμένα στο Σχήμα 6.13 η γραμμή 5 του γεωραντάρ έχει τοποθετηθεί από τα 82-170 μέτρα της τομογραφίας δίνοντας έμφαση στην ένταση του κύματος ανάκλασης του σήματος του γεωραντάρ που επαληθεύεται με τα δεδομένα της τομογραφίας. Χαρακτηριστική είναι η ταύτιση της εικόνας του γεωραντάρ με την αντίστοιχη της τομογραφίας από τα 136-168 μέτρα της γραμμής μελέτης, αφού η έντονη ανάκλαση χαρακτηρίζει και τις αντίστοιχα υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που γίνονται ορατές στην τομογραφία. Όπως φαίνεται από την τομογραφία δεν παρατηρούνται πιθανές ρυπασμένες ζώνες σε μεγαλύτερα βάθη.

Αντιθέτως επιφανειακή ρύπανση διακρίνεται από την τομογραφία από τα 184-252 μέτρα της γραμμής χωρίς όμως να υπάρχουν δεδομένα γεωραντάρ για την εν λόγω θέση, ώστε να διασταυρωθούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

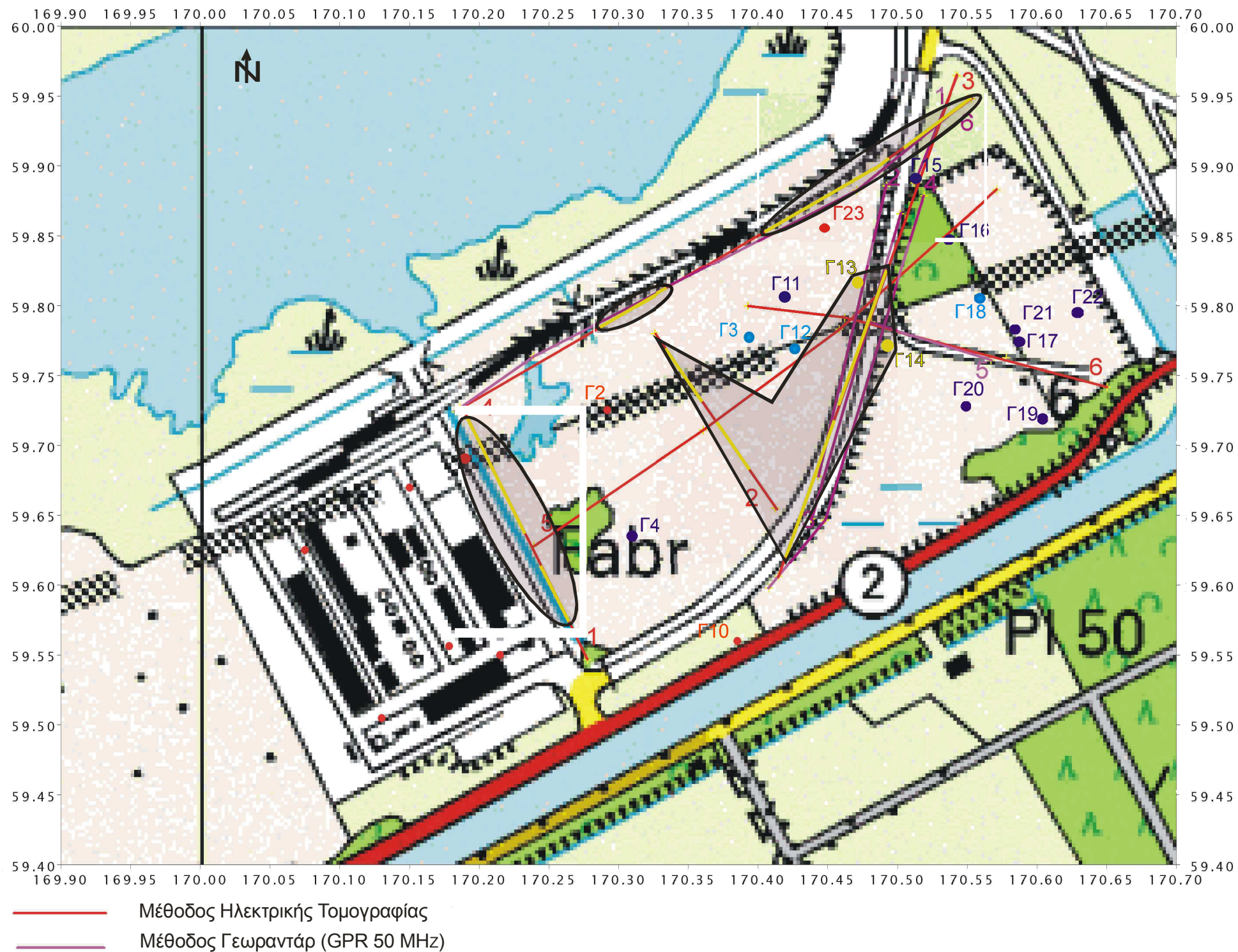
Αντίστοιχα είναι και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την υπέρθεση στο Σχήμα 6.15 στο οποίο διακρίνεται μια ισχυρή ανάκλαση αμέσως μετά το τέλος του στρώματος επιχωματώσεων, ενώ και η ένταση στη χρωματική κλίμακα παρουσιάζει πιο έντονη διαταραχή στα πρώτα 3 μέτρα βάθος τεκμηριώνοντας την υπόθεση για επιφανειακή ρύπανση στην περιοχή αυτή.

Κατά την πραγματοποίηση των υπερθέσεων δημιουργήθηκαν κι άλλες εικόνες οι οποίες παραθέτονται στο Παράρτημα Γ.

6.4 Χάρτες απεικόνισης των πιθανών ζωνών ρύπανσης

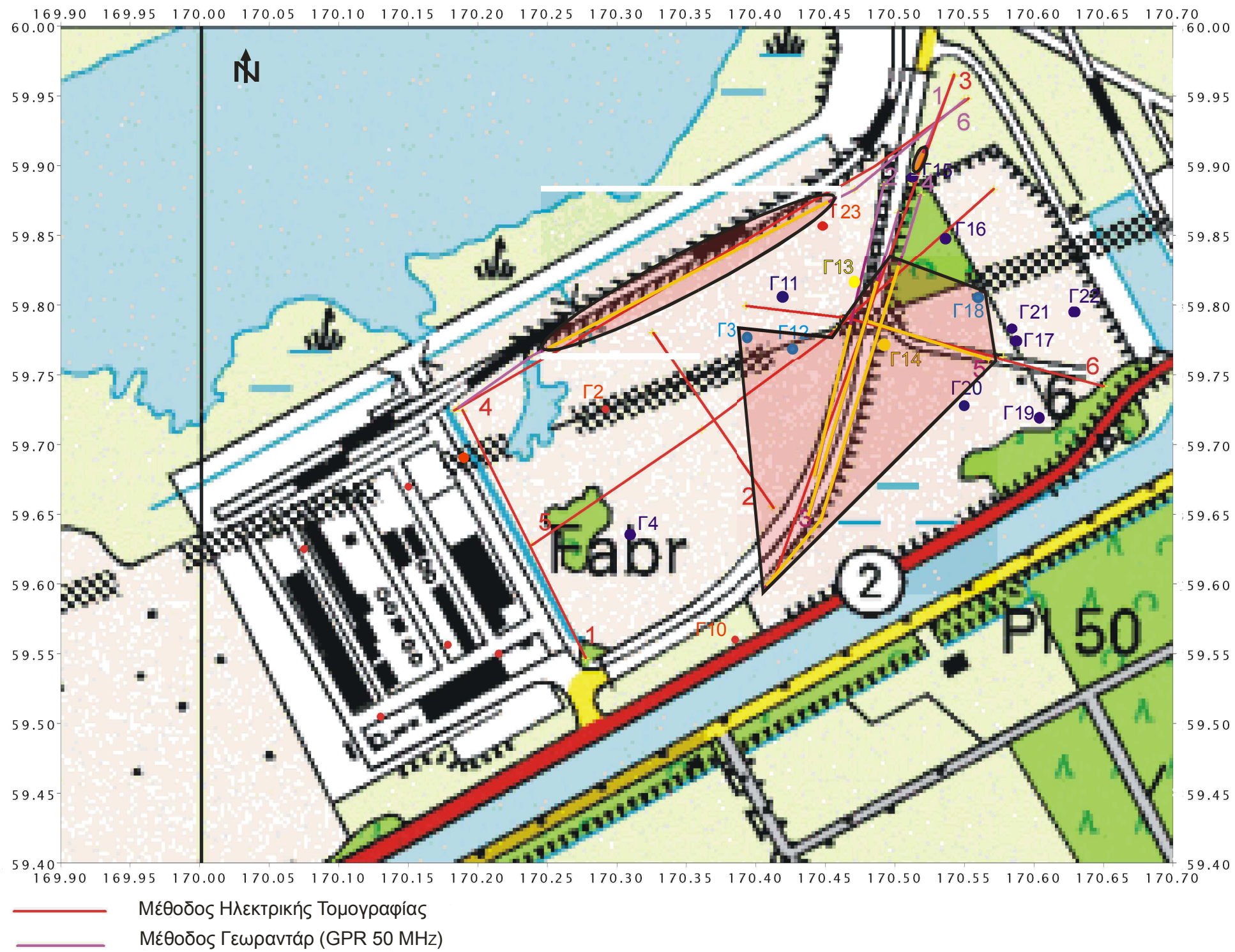
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται 2 χάρτες που απεικονίζουν τη βαθιά και τη ρηχή ρύπανση αντίστοιχα όπως αυτή εντοπίστηκε και οριοθετήθηκε μετά την επεξεργασία όλων των δεδομένων. Συγκεκριμένα λήφθησαν υπόψιν α) οι περιεκτικότητες των ρύπων όπως αυτές προέκυψαν από τις γεωτρήσεις, β) οι εικόνες γεωραντάρ που εστιάζουν στον εντοπισμό και οριοθέτηση της ρηχής ρύπανσης και γ) οι γραμμές της ηλεκτρικής τομογραφίας που παρέχουν πληροφορίες για μεγαλύτερα βάθη οδηγώντας σε συμπεράσματα τόσο για τη ρηχή όσο και για τη βαθιά ρύπανση σε συνδυασμό πάντα με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ



Χάρτης 6.1

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ



Χάρτης 6.2

Στο χάρτη 6.2 η ρηχή ρύπανση σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εικόνων γεωραντάρ και των γειτονικών γεωτρήσεων οι οποίες αποκάλυπταν ρύπανση στα πρώτα 6 μέτρα περίπου (ρηχά). Σημαντικές ήταν και οι πληροφορίες που αντλήθηκαν από τις υπερθέσεις, αφού τα δεδομένα των εικόνων γεωραντάρ επαληθεύτηκαν και επιβεβαιώθηκαν και από τα δεδομένα της τομογραφίας. Αναλυτικότερα εντοπίστηκαν οι εξής ζώνες πιθανής ρύπανσης σε καθε μία από τις εικόνες γεωραντάρ.

- Στην 1^η γραμμή η ρύπανση οριοθετήθηκε από τα 60-80 μέτρα της γραμμής. Η έντονη διαταραχή που πιθανολογείται ως ρύπανση είναι φανερή στα Σχήματα 5.21 και 5.22 κοντά στο τέλος των αντίστοιχων γραμμών.
- Στη 2^η γραμμή παρατηρήθηκε έντονη ρύπανση από τα 100 έως τα 210 μέτρα και μάλιστα φαίνεται να γίνεται εντονότερη κατευθυνόμενη προς τα νότια. Χαρακτηριστικά σχήματα που παρουσιάζεται το παραπάνω φαινόμενο είναι τα Σχήματα 5.23 και 5.24.
- Στην 3^η γραμμή εντοπίστηκε επίσης έντονη ρύπανση από την αρχή της γραμμής έως τα 175 μέτρα. Το φαινόμενο παρατηρείται με ευκρίνεια στα Σχήματα 5.18 και 5.20 όπου η διαταραχή είναι έντονη κοντά στην επιφάνεια.
- Αντίστοιχα έντονη διαταραχή γίνεται εμφανής στην 4^η γραμμή του γεωραντάρ από τα 50 έως τα 300,5 μέτρα. Σχηματικά η παραπάνω διαπίστωση παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.25 και 5.26.
- Η 5^η γραμμή παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη ρύπανση στα πρώτα μέτρα βάθους (επιφανειακό στρώμα) καθ' όλη την έκτασή της ενώ το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο από τα 40 μέτρα και μετά. Τα σχήματα που υποδεικνύουν την παραπάνω ρυπασμένη ζώνη του επιφανειακού στρώματος είναι τα 5.28 και 5.29.
- Τέλος η 6^η γραμμή παρουσιάζει μια μικρή διαταραχή στα 60 μέτρα της γραμμής που μπορεί όμως να οφείλεται στη σιδηροδρομική γραμμή που βρίσκεται πλησίον. Στην ίδια γραμμή από τα 70-350 μέτρα της, παρατηρείται εκ νέου μια διαταραχή που ενδεχομένως να πρόκειται για ρύπανση, γεγονός που επαληθεύεται και από την

υπέρθεση της γραμμής αυτής με την αντίστοιχη της τομογραφίας (βλέπ.Σχήμα 6.10). στα 360 μέτρα της γραμμής εντοπίζεται νέα διαταραχή που πιθανόν να οφείλεται στο δρόμο που βρίσκεται κοντά στη θέση αυτή. Η κύρια ρυπασμένη ζώνη πάντως είναι εμφανής και στις εικόνες του γεωραντάρ του 5^{ου} κεφαλαίου (βλέπ.Σχήματα 5.30 και 5.32)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Εισαγωγή

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μπορεί να γίνει αξιολόγηση και καταγραφή των συμπερασμάτων που προκύπτουν σχετικά με τη συμβολή του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας στην ανίχνευση ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών και την ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Παράλληλα, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του γεωραντάρ. Σημαντικό κομμάτι της συγκεκριμένης εργασίας αποτέλεσε και η σύγκριση των γεωφυσικών μεθόδων καθώς επίσης και η προσπάθεια συνδυασμού των δεδομένων τους με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Με βάση την εγκυρότητα και την ακρίβεια των συμπερασμάτων που προέκυψαν ακολουθεί αξιολόγηση της διπλωματικής επεξεργασίας και παράθεση ορισμένων προτάσεων που θα βοηθούσαν στη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών μεθόδων και στην ανάδειξη ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

7.2 Συμπεράσματα

Η αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στη μελέτη περιβαλλοντικών προβλημάτων εξαρτάται άμεσα από την αντίθεση στις φυσικές ιδιότητες που δημιουργείται μεταξύ των εδαφικών και γεωλογικών σχηματισμών με ή χωρίς ρύπανση. Μόνο όταν διαπιστώνεται αξιόλογη αντίθεση ανάμεσα στις φυσικές ιδιότητες που

εξετάζονται, είναι δυνατόν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα. Επομένως ακόμη και στην περίπτωση που εφαρμόζεται η κατάλληλη τεχνική, εάν διαπιστώνεται μικρή διαφορά μεταξύ των ιδιοτήτων, είναι πολύ πιθανόν να μην προκύψουν αξιόλογες μετρήσεις. Η συνδυασμένη εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης πλεονεκτεί, καθώς με τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων από την καθεμία ξεχωριστά, προκύπτουν ασφαλέστερα συμπεράσματα.

Ακολουθώντας την παραπάνω λογική του συνδυασμού διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων συμπεραίνεται ότι για τη διασκόπηση και απεικόνιση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους καθώς και για την ανίχνευση πιθανών εστιών ρύπανσης, κάθε μια από τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν έχει διακριτό αλλά ουσιώδη ρόλο στην γεωφυσική έρευνα. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι η επεξεργασία με τη βοήθεια του γεωραντάρ οδηγεί σε καταγραφή και απεικόνιση των δεδομένων σε λίγα μέτρα βάθος. Αναλόγως της συχνότητας των κεραιών που χρησιμοποιούνται, μπορούν να προκύψουν πληροφορίες μεγάλης ευκρίνειας για μικρό βάθος με χαρακτηριστική μείωση της διακριτικής ικανότητας κινούμενοι σε κατώτερα βάθη. Η διεισδυτική ικανότητα του σήματος του γεωραντάρ μπορεί να αυξηθεί με την κατάλληλη επιλογή κεραίας, όμως η εφαρμογή της μεθόδου δεν εστιάζει στην έρευνα μεγάλου βάθους, οπότε εφαρμόζονται άλλες μέθοδοι όπως αυτή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Για την απεικόνιση του υπεδάφους σε μεγαλύτερα βάθη υπερέχει η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με την ηλεκτρική τομογραφία αξιολογούνται πιθανές ρυπασμένες ζώνες, ενώ συγχρόνως επαληθεύεται η ακολουθία των γεωλογικών στρωμάτων, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων.

Γίνεται σαφές ότι σε οποιαδήποτε διασκόπηση σημαντική είναι η συμβολή των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από δίκτυο γεωτρήσεων, οι οποίες αποτελούν τον κύριο οδηγό στην προσπάθεια κατανόησης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών μεθόδων. Η χρησιμότητα των γεωτρήσεων βασίζεται στη συγκέντρωση δεδομένων ικανών να οδηγήσουν στη διαμόρφωση μιας αρχικής εικόνας του υπεδάφους, ενώ ταυτόχρονα η λήψη και χημική ανάλυση δειγμάτων νερού είναι επιβεβλημένη για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση πιθανών ζωνών ρύπανσης.

Το γεγονός ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι εστιάζουν σε διαφορετικές αντίστοιχα φυσικές ιδιότητες των εδαφών και πετρωμάτων, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα επιβάλλει τη συνδυασμένη εφαρμογή τους.

Συγκεκριμένα κατά τη γεωφυσική διασκόπηση που διεξήχθη με τις προαναφερθείσες γεωφυσικές μεθόδους και τις γεωτρήσεις στην περιοχή Weert της

Ολλανδίας, επιχειρήθηκε η εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Η ερμηνεία οδηγεί στην υπόδειξη κάποιων πιθανών ρυπασμένων ζωνών τόσο επιφανειακά όσο και σε μεγαλύτερα βάθη. Δε μπορούν όμως να οριοθετηθούν με ασφάλεια οι ζώνες αυτές, λόγω των σφαλμάτων που προέκυψαν κατά τη λήψη των αρχικών καταγραφών (κακής ποιότητας δεδομένα) και εξαιτίας των περιορισμένων πληροφοριών που διατέθηκαν όσον αφορά την πηγή ρύπανσης.

Παρόλο που υπάρχει αμφιβολία για το τί συμβαίνει στις παραπάνω ζώνες, οι καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διασκόπηση στην περιοχή φανερώουν ομοιότητα στα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, γεγονός που δε μπορεί να μη ληφθεί υπόψη. Οι διαταραχές και οι ανωμαλίες που εντοπίζονται αξιολογούνται κατά κύριο λόγο ως ρυπογόνες περιοχές.

Κοντά στην 6^η γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας (ER 6) και πλησίον των γεωτρήσεων Νο14 και Νο13 εντοπίστηκε έντονα ρυπασμένη ζώνη εκτός του χώρου του εργοστασίου για την οποία δε μπορεί με βεβαιότητα να εντοπιστεί η πηγή προέλευσής της. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη κάλυψη της περιοχής με γραμμές μελέτης και στην έλλειψη ικανού αριθμού γεωτρήσεων.

Πέρα από τον εντοπισμό ζωνών ρύπανσης στην παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψαν κρίσιμα συμπεράσματα για τη γεωλογική στρωμάτωση της περιοχής. Εντοπίστηκε η παρουσία ενός μη συνεχούς αργιλικού στρώματος το οποίο εκτείνεται μεταξύ του επιφανειακού στρώματος και του 1^{ου} στρώματος άμμου. Το γεγονός ότι παρουσιάζει αυτή την ασυνέχεια καθιστά σχετικά εύκολη τη διείσδυση ρυπογόνων ουσιών στα κατώτερα στρώματα θέτοντας σε κίνδυνο τον βαθύτερο υδροφόρο ορίζοντα. Από τις καταγραφές επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη κατώτερου αργιλικού στρώματος με πάχος σαφώς μεγαλύτερο του ανώτερου αργιλικού. Όμως αμφισβητείται έντονα η στεγανότητά του, καθώς διακόπτεται η συνέχειά του σε πολλές θέσεις θέτοντας σε κίνδυνο τον κύριο υδροφόρο ορίζοντα.

Κρίσιμα συμπεράσματα για τη σημασία της παρουσίας του αργιλικού στρώματος στην παρεμπόδιση της ρύπανσης, προκύπτουν από το Σχήμα 2.3 και το Χάρτη 6.1, όπου για τα ανατολικά και βορειοανατολικά της περιοχής παρατηρούνται τα εξής:

Οι γεωτρήσεις στη συγκεκριμένη περιοχή δεν παρουσίασαν ρύπανση σε μεγάλο βάθος, ενώ ακόμα και στην επιφάνεια η ρύπανση δεν είναι ανησυχητική. Όλες οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις παρουσιάζουν ανώτερο αργιλικό στρώμα σχεδόν αδιαπέρατο. Αντιθέτως οι ίδιες γεωτρήσεις δεν υποδεικνύουν την ύπαρξη κατώτερου αργιλικού στρώματος (15-20 μ.) γεγονός που θέτει σε μεγάλο κίνδυνο τον υδροφόρο

ορίζοντα. Επομένως η αντίφαση που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη περιοχή (ανώτερο αργιλικό στρώμα – σχεδόν ανύπαρκτο κατώτερο αργιλικό στρώμα) αποτελεί εμπόδιο για την εξάπλωση της ρύπανσης στο χώρο αυτό.

Εν κατακλείδι προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για τη διασκόπηση της περιοχής συνέβαλαν στη δημιουργία μιας πιο ολοκληρωμένης άποψης για τη ρύπανση του υπεδάφους. Προκύπτουν επίσης σαφή συμπεράσματα για τη γεωλογία της περιοχής, τη συνέχεια του αργιλικού στρώματος, τη χρησιμότητά του και τον κίνδυνο που ελλοχεύει για πιθανή ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα. Επομένως ο συνδυασμός των μεθόδων κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμος, δε μπορεί όμως να αποτελέσει κανόνα για το τί συμβαίνει στην περιοχή και καθιστά απαραίτητες τις επιπρόσθετες ενέργειες βελτιστοποίησης της έρευνας. Για το σκοπό αυτό παραθέτονται ορισμένες προτάσεις που αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

7.3 Προτάσεις

Από τη γεωφυσική διασκόπηση στο χώρο του εργοστασίου στην περιοχή Weert προκύπτει ότι πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στον επανασχεδιασμό της γεωφυσικής έρευνας. Δεδομένης της αποτελεσματικότητας του συνδυασμού των γεωφυσικών μεθόδων, όπως αυτό προέκυψε από την παρούσα διπλωματική εργασία, πρέπει να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον δύο διαφορετικές γεωφυσικές μέθοδοι.

Οι γραμμές μελέτης των γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας πρέπει να βρίσκονται πλησιέστερα ούτως ώστε να χαρτογραφούν τις ίδιες ζώνες και τα αποτελέσματά τους να είναι συγκρίσιμα. Επίσης θα μπορούσε να γίνει μια πιο λεπτομερής χαρτογράφηση της περιοχής του εργοστασίου, τόσο με τη μέθοδο του γεωραντάρ, όσο και με την αντίστοιχη της ηλεκτρικής τομογραφίας. Έτσι στις περιοχές για τις οποίες δεν υπάρχουν πληροφορίες η γεωφυσική έρευνα θα μπορούσε να δώσει χρήσιμα στοιχεία. Σημαντική επίσης είναι η ταυτόχρονη συλλογή μετρήσεων, ούτως ώστε οι γεωφυσικές μέθοδοι να αναφέρονται στις ίδιες χρονικές περιόδους. Οι μετρήσεις αυτές θα πρέπει να επαναλαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα δίνοντας έμφαση στην εξέλιξη του φαινομένου.

Ταυτόχρονα με την αύξηση των γραμμών μελέτης πρέπει να πραγματοποιηθούν επιπρόσθετες γεωτρήσεις σε επιλεγμένες θέσεις, επιδιώκοντας την καλύτερη διασταύρωση των δεδομένων με τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους, αφού παρατηρείται έλλειψη γεωτρητικών δεδομένων σε περιοχές που οι γεωφυσικές μέθοδοι παρέχουν

ενδείξεις ρύπανσης. Πρέπει, δηλαδή, να επαληθευτούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ με την προσεκτική και περιορισμένη επιλογή γεωτρήσεων στις ζώνες έντονης ρύπανσης που φανερώνονται στους χάρτες 6.1 και 6.2.

Συμπερασματικά η βελτίωση των αποτελεσμάτων απαιτεί συνδυασμό και συνεργασία των μεθόδων με έμφαση στη θέση και το χρόνο μέτρησης, με σκοπό την καλύτερη τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους, που θα βοηθήσει στην κατανόηση του φαινομένου και στον ακριβή εντοπισμό των ρυπασμένων ζωνών και της κύριας πηγής προέλευσής τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

A.1 Ρύποι NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids)

Η κατηγοριοποίηση των οργανικών ρύπων στο νερό (*Non-Aqueous Phase Liquids*) είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με ένα απλό σύστημα ταξινόμησης, το οποίο χρησιμοποιεί ως μοναδική παράμετρο την πυκνότητα του ρυπαντή. Η ταξινόμηση αυτή αποτελεί σημαντικό εργαλείο όσον αφορά την κατανόηση και την εκτίμηση της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων (Bedient et al., 1994).

Μελέτες αναφέρουν ότι κύριοι τύποι ρύπανσης που απαντώνται στο υπέδαφος είναι οι ακόλουθοι:

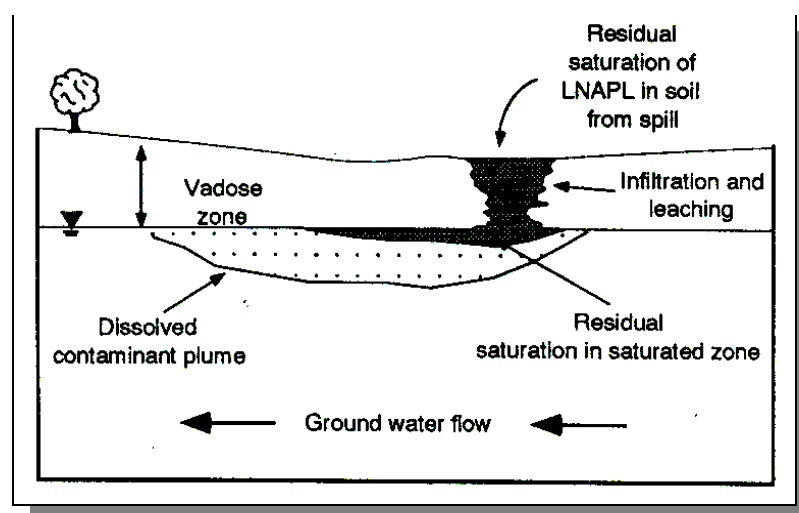
- *LNAPL* (Light Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού, όπως είναι η βενζίνη που βασίζεται σε βενζόλιο, τολουόλιο ή ξυλόλιο.
- *DNAPL* (Dense Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού, όπως το τριχλωροαιθυλένιο ή τα βαριά πετρέλαια.
- Άλλοι ανόργανοι ρύποι, όπως λευκόχρυσος ή νικέλιο προστιθέμενοι στη βενζίνη.

A.1.1 Ρύποι LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids)

Η ρύπανση αυτού του είδους σχετίζεται κυρίως με την παραγωγή, διύλιση και κατανομή των προϊόντων του πετρελαίου. Οι κυριότερες πηγές ρύπανσης LNAPL που απαντούν στο υπόγειο νερό είναι οι διαρροές βενζίνης, κηροζίνης και πετρελαίου ντίζελ. Όταν υπάρχει διαρροή αυτής της ρυπογόνου ουσίας στο έδαφος, αρχικά υπό την

επίδραση της βαρύτητας, διηθείται προς τα κάτω διαμέσου της ακόρεστης ζώνης. Είναι πιθανόν, όμως, κατά την κατακόρυφη πορεία της να συναντήσει κάποιον υδροφόρο ορίζοντα, οπότε και σχηματίζει ένα στρώμα στη ζώνη των τριχοειδών αγγείων, ακριβώς επάνω από την κορεσμένη ζώνη (εικόνα Α.1). Στη συνέχεια, τα συστατικά του LNAPL αρχίζουν να διαλύονται στο υπόγειο νερό δημιουργώντας μία ζώνη ρύπανσης γνωστή και ως «πλουμίδιο» ή «πλούμιο» (Bedient et al., 1994).

Επειδή το LNAPL δεν εισχωρεί πολύ βαθιά μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα και είναι σχετικά βιοδιασπάσιμο, κάτω από κανονικές συνθήκες, αποτελεί ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα, που όμως μπορεί να αντιμετωπιστεί καλύτερα σε σχέση με τη ρύπανση DNAPL.

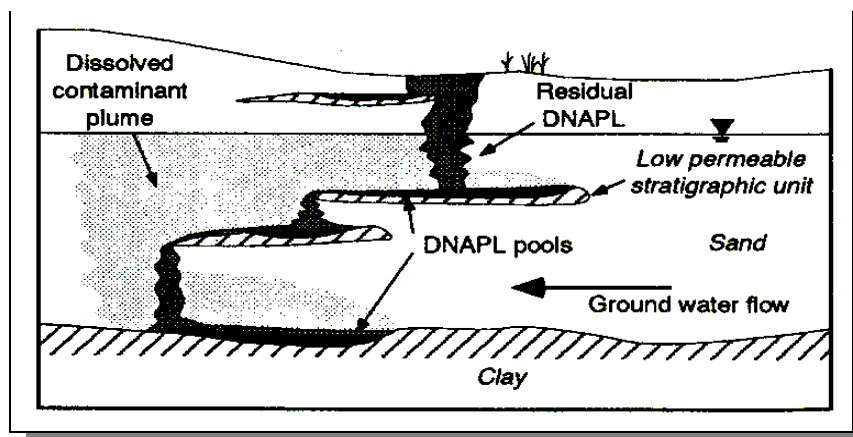


Εικόνα Α.1: Σχεδιάγραμμα κατανομής ρύπανσης LNAPL μέσα στο υπέδαφος (Bedient et al., 1994).

A.1.2 Ρύποι DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquids)

Το DNAPL σχετίζεται με μία ευρεία ποικιλία βιομηχανικών δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένων σχεδόν όλων των διαδικασιών που αφορούν την επεξεργασία χλωριωμένων διαλυτών. Παράλληλα, σχετίζεται με τη βιομηχανία επεξεργασίας ξύλου και πιθανές διαρροές πετρελαίου.

Κατά τη διαρροή DNAPL στο έδαφος, παρατηρείται μία κάθετη κίνησή των προς τα κάτω διαμέσου της ακόρεστης ζώνης (*vadose zone*). Εάν έχουν ελευθερωθεί μεγάλες ποσότητες DNAPL, συνεχίζουν την κατακόρυφη μετανάστευση μέχρις ότου είτε εγκλωβιστούν εντός των εδαφικών πόρων, με τη μορφή παραμένουσας φάσης (*residual phase*), είτε έως ότου συναντήσουν χαμηλής διαπερατότητας στρώματα, οπότε και σχηματίζονται λίμνες DNAPL (*pool phase*) μέσα στο σύστημα εδάφους-ταμιευτήρα (εικόνα Α.2).



Εικόνα Α.2: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την κατανομή της ρύπανσης DNAPL. Στο σχήμα παριστάνεται ένα στρώμα χαμηλής διαπερατότητας το οποίο υπερχειλίζει από DNAPL. Το σημείο υπερχείλισης μπορεί να βρίσκεται πιο μακριά από την αρχική πηγή ρύπανσης, περιπλέκοντας με τον τρόπο αυτό την ανίχνευση των DNAPL (Bedient et al., 1994).

Η απορρύπανση DNAPL κυρίως των χλωριωμένων διαλυτών είναι δυσκολότερη σε σύγκριση με την LNAPL. Μελέτες αναφέρουν ότι ταμειυτήρες μολυσμένοι με μεγάλες ποσότητες DNAPL είναι σχεδόν αδύνατον να αποκατασταθούν, χρησιμοποιώντας ακόμα και τις καλύτερες μεθόδους καθαρισμού του υπογείου νερού. Αυτό συμβαίνει κυρίως για τους ακόλουθους λόγους:

- Οι χλωριωμένοι διαλύτες δεν βιοδιασπούνται γρήγορα με αποτέλεσμα να παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο υπέδαφος.
- Η μεγαλύτερη πυκνότητα του DNAPL προκαλεί βαθύτερη εξάπλωση της ρυπογόνου ζώνης σε σχέση με το LNAPL.
- Οι χλωριωμένοι διαλύτες εμφανίζουν φυσικές ιδιότητες, οι οποίες επιτρέπουν τόσο την κίνηση διαμέσου μικρών ρωγμών του εδάφους όσο και την εξάπλωσή τους σε μεγάλες αποστάσεις.

A.2 Κατακόρυφη μετανάστευση DNAPL μέσα στην κορεσμένη ζώνη

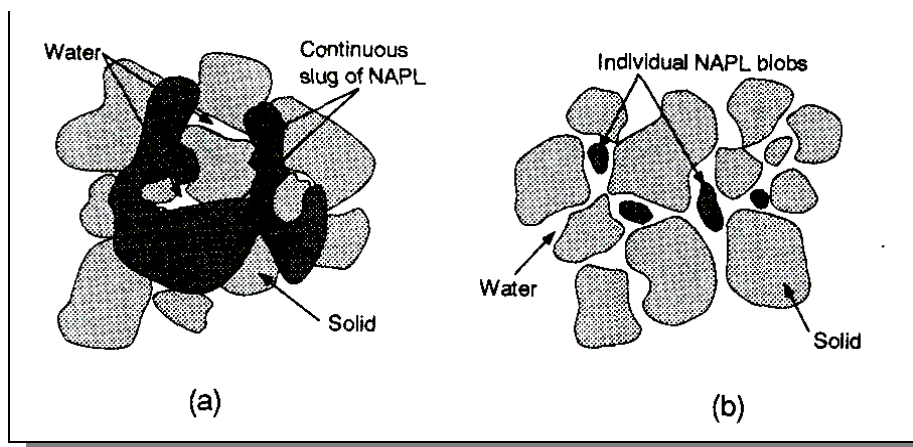
Όταν η ρύπανση DNAPL μεταναστεύει διαμέσου της κορεσμένης ζώνης σχηματίζεται ένα σύστημα τριών φάσεων που αποτελείται από το έδαφος, το νερό και το ρυπαντή. Το DNAPL λειτουργεί στο σύστημα αυτό ως μη-διαβρέχουσα φάση, η οποία πρέπει να υπερνικήσει τις δυνάμεις των τριχοειδών φαινομένων προκειμένου να εισχωρήσει εντός πόρου κορεσμένου με νερό (διαβρέχουσα φάση). Η τριχοειδής πίεση, η οποία πρέπει να υπερνικηθεί καλείται «πίεση εισόδου». Εάν οι δυνάμεις που προέρχονται από το συνδυασμό των δυνάμεων βαρύτητας και των δυνάμεων πίεσης (κατευθυντήριες δυνάμεις) του ρυπαντή DNAPL είναι μεγαλύτερες από την πίεση

εισόδου, τότε το DNAPL θα διεισδύσει εντός του πόρου. Αντίθετα, εάν οι κατευθυντήριες δυνάμεις συμμετέχουν σε μικρότερο βαθμό, τότε η μάζα του DNAPL θα διασπαστεί σε αναρίθμητες, μεμονωμένες σταγόνες παραμένουσας φάσης, οι οποίες θα βρίσκονται κυρίως στους μεγάλους πόρους του ταμιευτήρα.

A.3 Κίνηση NAPL διαμέσου της ακόρεστης ζώνης (vadose zone)

Η διήθηση NAPL μέσα στην ακόρεστη ζώνη προκαλεί το σχηματισμό ενός συστήματος τεσσάρων φάσεων: αέρα, νερό, έδαφος και τις διάφορες φάσεις του NAPL. Το νερό λειτουργεί ως μία διαβρέχουσα φάση πάνω στο έδαφος, ενώ ο ρυπαντής λειτουργεί με τη σειρά του και ως διαβρέχουσα φάση σε σχέση με τον αέρα και ως μη-διαβρέχουσα σε σχέση με το νερό. Εντούτοις, το NAPL διεισδύει σχετικά εύκολα σε στρώματα των οποίων οι πόροι είναι σε μεγάλο βαθμό κορεσμένοι με νερό. Αυτό συμβαίνει επειδή το NAPL, ως εν μέρει διαβρέχουσα φάση, δεν αντιμετωπίζει αντιστάσεις από τις τριχοειδείς πιέσεις. Εάν η ρύπανση καθίσταται σημαντική, τότε παρατηρείται περαιτέρω μετανάστευση του ρυπαντή σχηματίζοντας είτε μεμβράνες ανάμεσα στην αέρια και υγρή φάση είτε/και σταγόνες NAPL, οι οποίες αντικαθιστούν νερό ή αέρα μέσα στους πόρους (οι χλωριωμένοι διαλύτες δε σχηματίζουν μεγάλες μεμβράνες).

Από τη στιγμή που σταματήσει η τροφοδοσία της ρύπανσης, το 10%-20% των πόρων που βρίσκονται στην ακόρεστη ζώνη καταλαμβάνονται από την παραμένουσα φάση του NAPL με τη μορφή μεμβράνης ή σταγόνων (εικόνα A.3).



Εικόνα A.3: (a) Ρύπανση NAPL με τη μορφή ελεύθερης φάσης (free phase).
(b) Παραμένουσα φάση NAPL (residual phase) (Bedient et al., 1994).

Ο βαθμός κορεσμού μίας παραμένουσας φάσης (*residual saturation*) LNAPL ή DNAPL στην κορεσμένη ζώνη είναι συνήθως μεγαλύτερος από αυτόν της μη-κορεσμένης. Οι λόγοι που οδηγούν σε μία υψηλότερη συγκέντρωση της παραμένουσας NAPL μέσα σε εδάφη μπορούν να συνοψιστούν στους εξής:

- Το NAPL συμπεριφέρεται ως μη-διαβρέχον υγρό μέσα στην κορεσμένη ζώνη και επομένως εγκλωβίζεται στους μεγαλύτερους πόρους.
- Το NAPL εμφανίζει την τάση να εξαπλώνεται περισσότερο μέσα στην ακόρεστη ζώνη λόγω των ευνοϊκών συνθηκών που επικρατούν με τις τριχοειδείς πιέσεις.

A.4 Ερμηνεία της συμπεριφοράς LNAPL πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού, αέρα και LNAPL καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη όταν το NAPL πλησιάζει τον υδροφόρο ορίζοντα. Σε ένα ολοκληρωτικά κορεσμένο σύστημα το νερό είναι το διαβρέχον υγρό και το LNAPL η μη-διαβρέχουσα φάση, της οποίας η κίνηση απωθείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις. Τα τριχοειδή αγγεία αποτελούν τη μεταβατική ζώνη μεταξύ ενός συστήματος εν μέρει διαβρέχουσας φάσης NAPL (ακόρεστη ζώνη) και μη-διαβρέχουσας φάσης (κορεσμένη ζώνη).

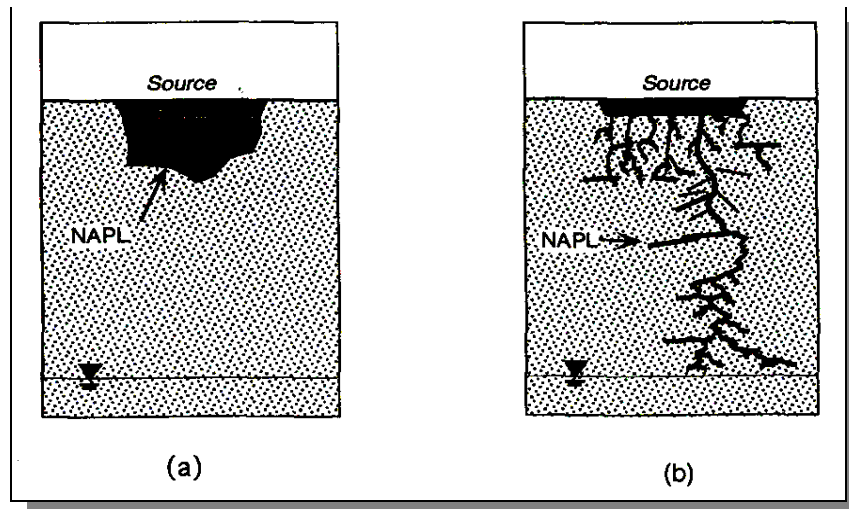
Εάν η πυκνότητα του NAPL είναι μικρότερη από αυτή του νερού, τότε η ρύπανση συσσωρεύεται στην κορυφή των τριχοειδών αγγείων και τελικά θα αρχίσει να ρέει σε πολύ λεπτές φέτες. Αντιθέτως, εάν ο ρυθμός ροής του LNAPL μέσω της ακόρεστης ζώνης είναι αρκετά γρήγορος, τα τριχοειδή αγγεία καταστρέφονται και το LNAPL επιπλέει επάνω στον υδροφόρο ορίζοντα.

A.5 Κίνηση NAPL διαμέσου ρωγμών και ετερογενειών

Πρόσφατες μελέτες επισημαίνουν έναν άλλο τρόπο διόδου της ρύπανσης μέσα στο υπέδαφος, διαφορετικό από τον κενό χώρο που αφήνουν οι πόροι μεταξύ τους. Τη δίοδο αυτή αποτελούν οι μικρορωγμές και οι διάφορες ετερογένειες που παρατηρούνται σε πορώδη μέσα (Bedient et al., 1994). Στις περισσότερες περιπτώσεις το NAPL «προτιμά» τη μετανάστευση διαμέσου του δευτερογενούς πορώδους. Γενικά, πάντως, οι ετερογένειες που παρουσιάζονται στο έδαφος προκαλούν τα ακόλουθα αποτελέσματα στην κίνηση του NAPL:

1. *Αύξηση στο μέγεθος της NAPL ζώνης.* Ακόμα και μικρά ποσά αργίλου (2% κατά βάρος) μπορούν να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην μετανάστευση της ρύπανσης δημιουργώντας πολύπλοκες διόδους.

2. *Επιτρέπουν βαθύτερη διείσδυση μέσα στο υπέδαφος.* Μελέτες αναφέρουν ότι ακόμα και μικρά ποσά DNAPL μπορούν να εισχωρήσουν εκατοντάδες πόδια διαμέσου της ακόρεστης ζώνης προτού φτάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα (εικόνα Α.4b).
3. *Επιδρούν αναποτελεσματικά στην κίνηση της ρύπανσης.* Ταμιευτήρες οι οποίοι υπό κανονικές συνθήκες εμποδίζουν τη ροή της ρύπανσης, χάνουν την αποτελεσματικότητά τους όταν περιέχουν στη μάζα τους ακόμα και μικροσκοπικές ετερογένειες (εικόνα Α.4b).



Εικόνα Α.4: (α) Σχηματική αναπαράσταση μετανάστευσης NAPL διαμέσου πρωτογενούς πορώδους. (β) Εξάπλωση ρύπανσης όταν επικρατεί δευτερογενές πορώδες στον σχηματισμό (Bedient et al., 1994).

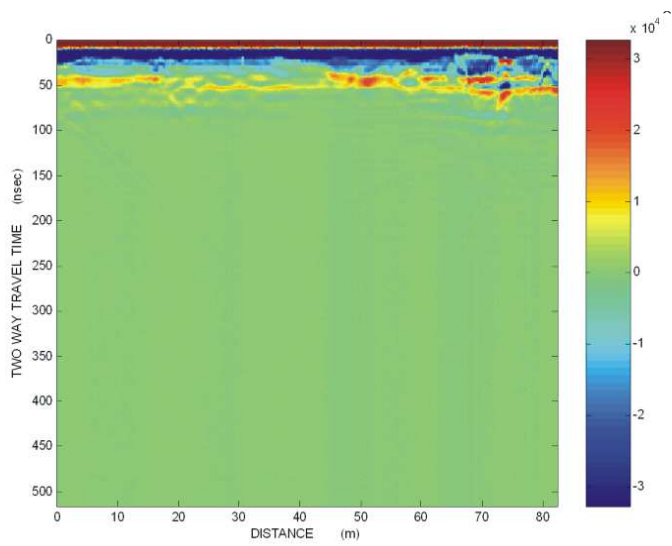
Η διαδρομή που ακολουθείται από ρυπαντή NAPL, επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων σχετικούς με τις φυσικές ιδιότητες του ρυπαντή και τη γεωλογία της περιοχής όπως:

- Ο όγκος των NAPL's.
- Οι ιδιότητες του συστήματος έδαφος-ταμιευτήρα, όπως το μέγεθος των πόρων και η διαπερατότητα.
- Οι μικροσκοπικές δομές και ρωγμές που εμφανίζονται σε στρώματα αργίλου και ιλύος.
- Η παρουσία στρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας.
- Οι ιδιότητες του ρυπαντή, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, η διαβρεχτότητα και η επιφανειακή τάση.
- Ο χρόνος που διήρκεσε το συμβάν.
- Η περιοχή διήθησης, από το σημείο εισόδου της ρύπανσης μέχρι το υπέδαφος.

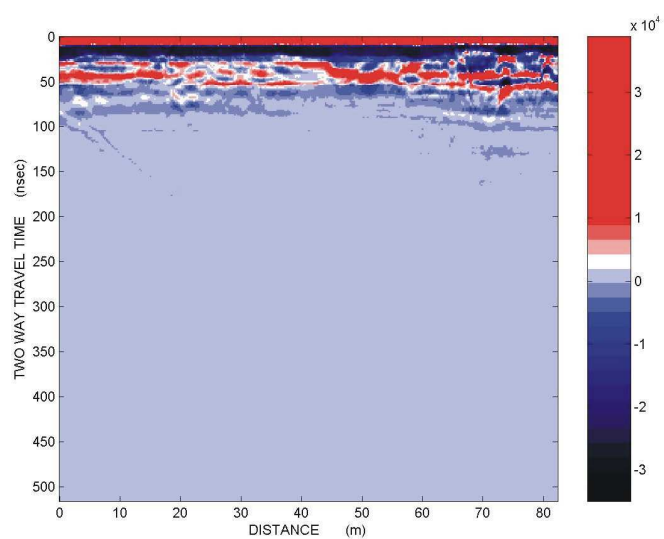
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

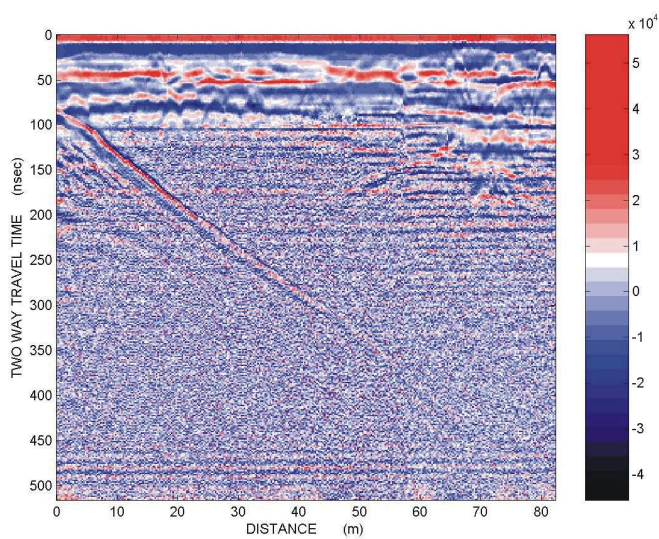
Γραμμή μελέτης 1 (Προσανατολισμός: Βορειοανατολικά→Νοτιοδυτικά)



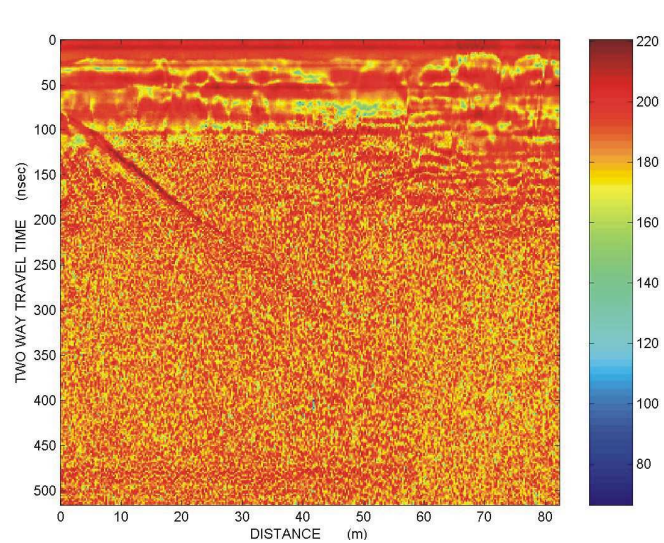
B.1.1: Ακατέργαστα δεδομένα



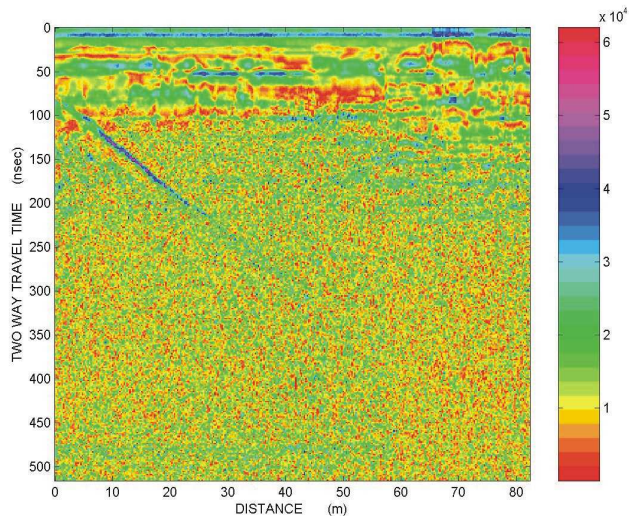
B.1.2: Dewow



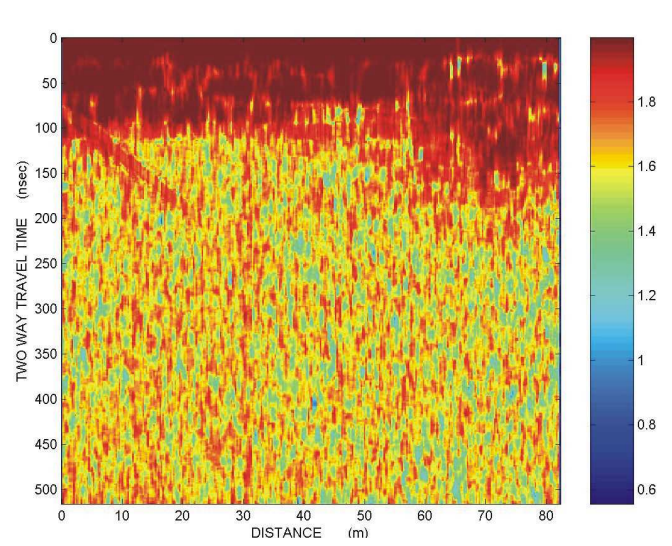
B.1.3: Dewow_AGC



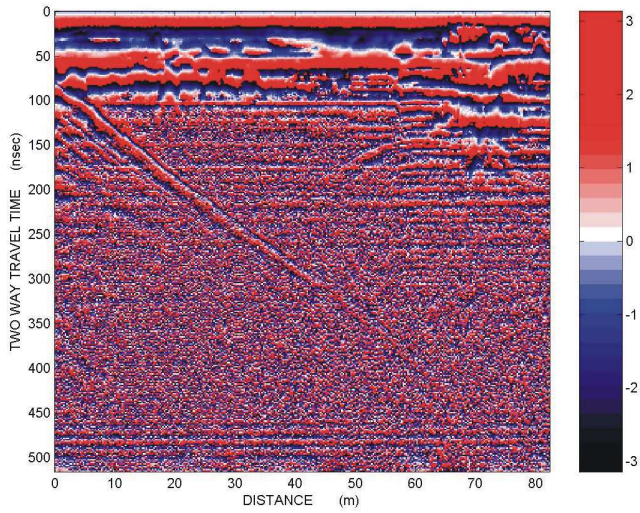
B.1.4: Dewow_AGC_db



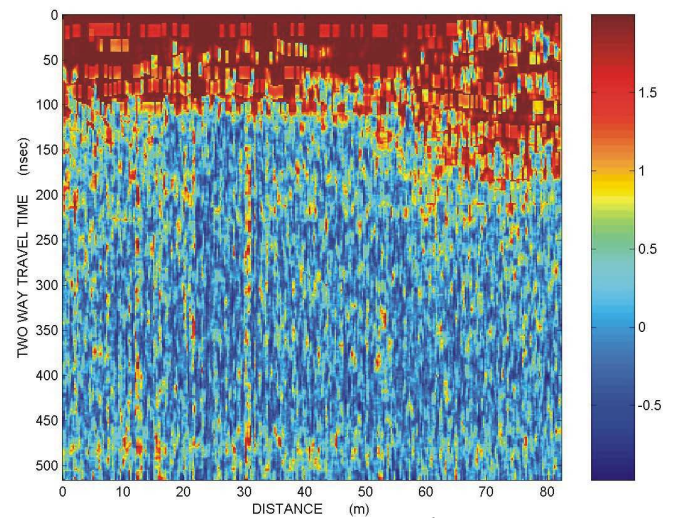
B.1.5: Dewow_AGC_Instantaneous Envelope



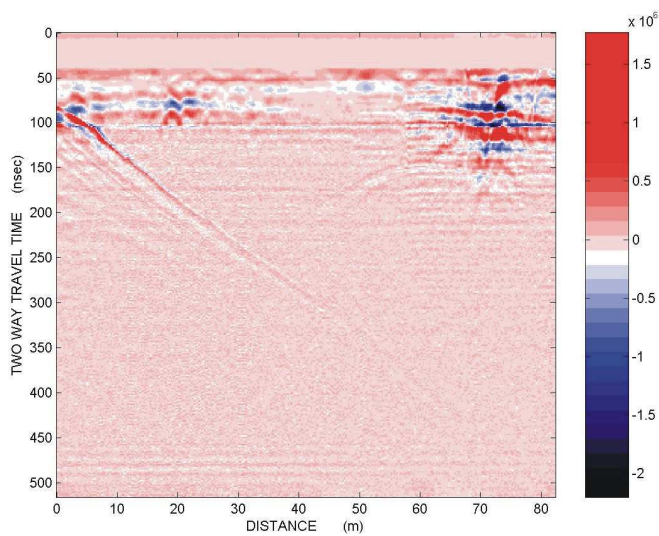
B.1.6: Dewow_AGC_Inst.Envelope-semblance



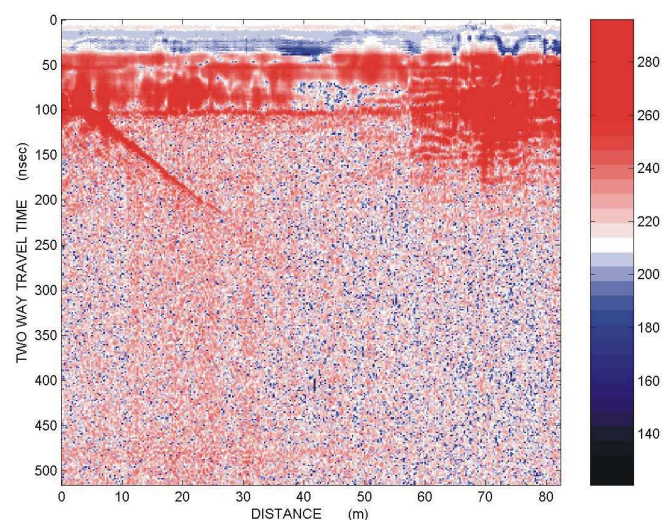
B.1.7: Dewow_AGC_Instantaneous Phase



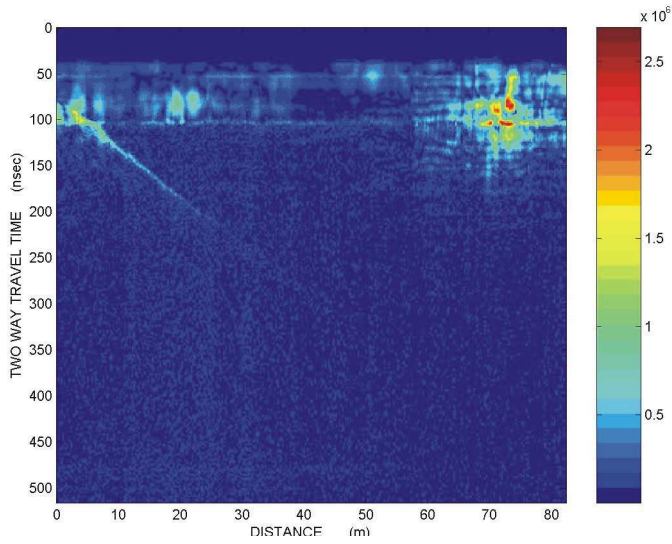
B.1.8: Dewow_AGC_Inst. Phase-semblance



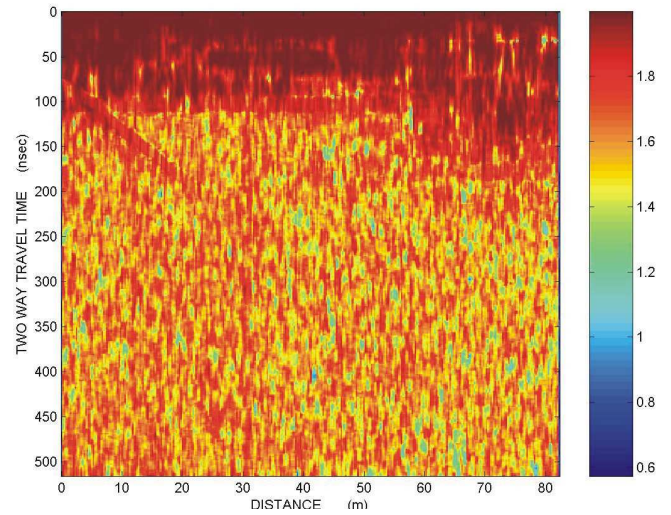
B.1.9: Dewow_SEC



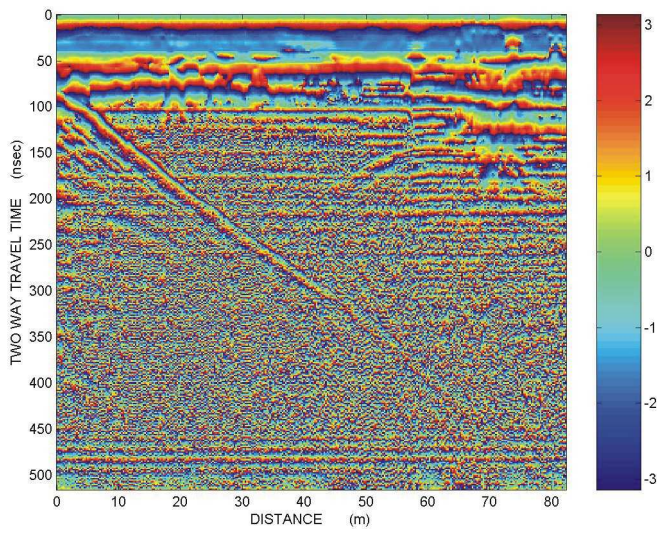
B.1.10: Dewow_SEC_db



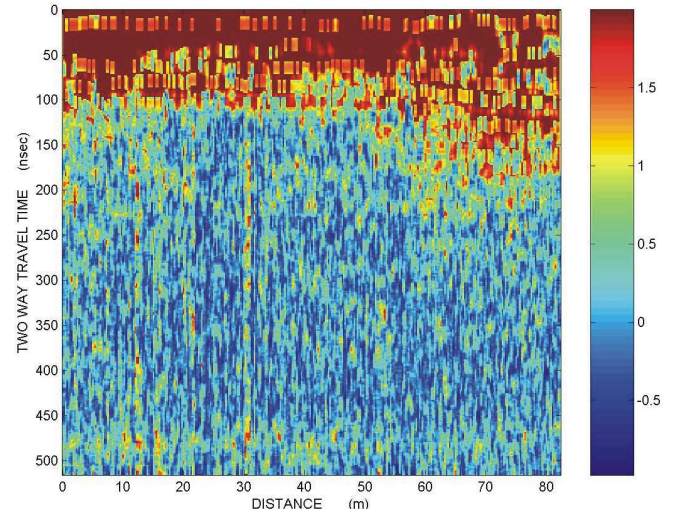
B.1.11: Dewow_SEC_Instantaneous Envelope



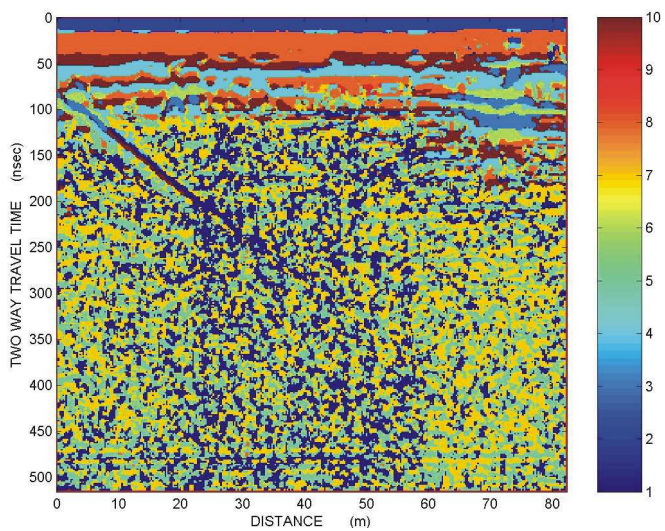
B.1.12: Dewow_SEC_Inst.Envelope-semblance



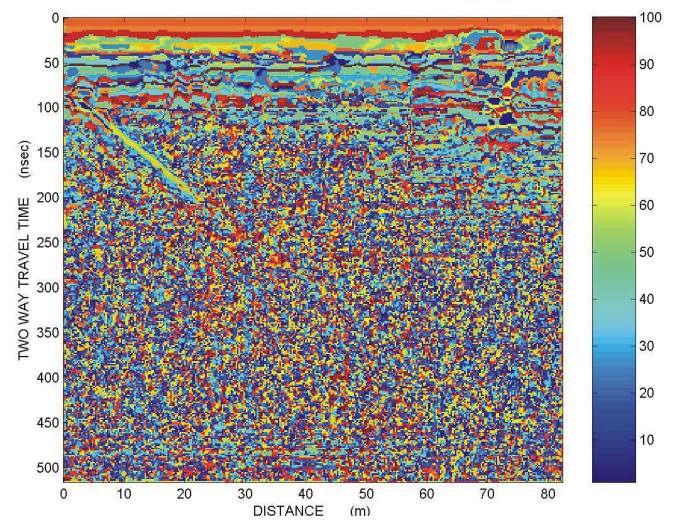
B.1.13: Dewow_SEC_Instantaneous Phase



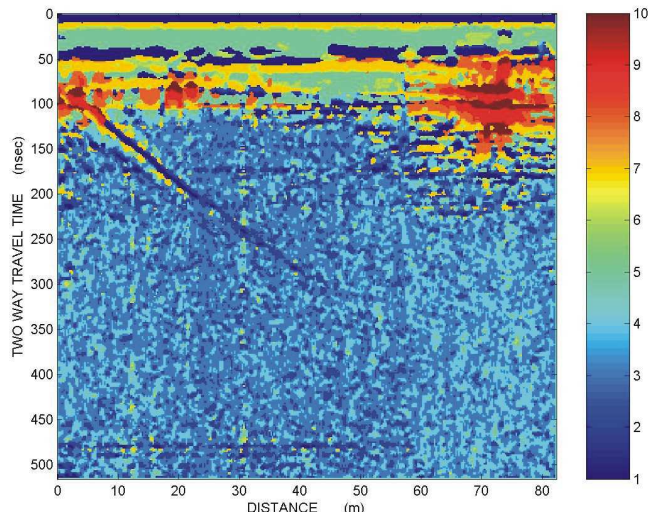
B.1.14: Dewow_SEC_Inst.Phase-semblance



B.1.15: k-means_10

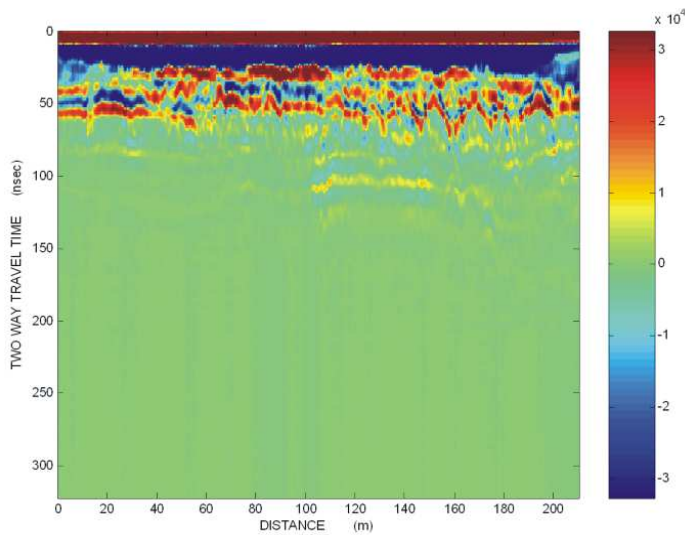


B.1.16: k-means_100

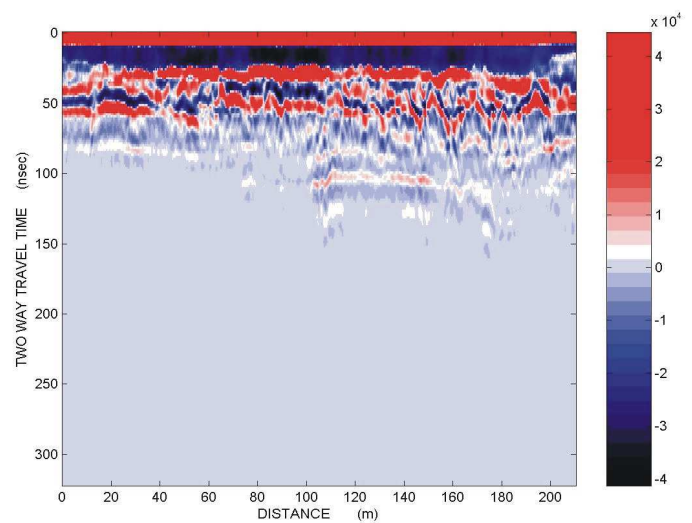


B.1.17: SOM

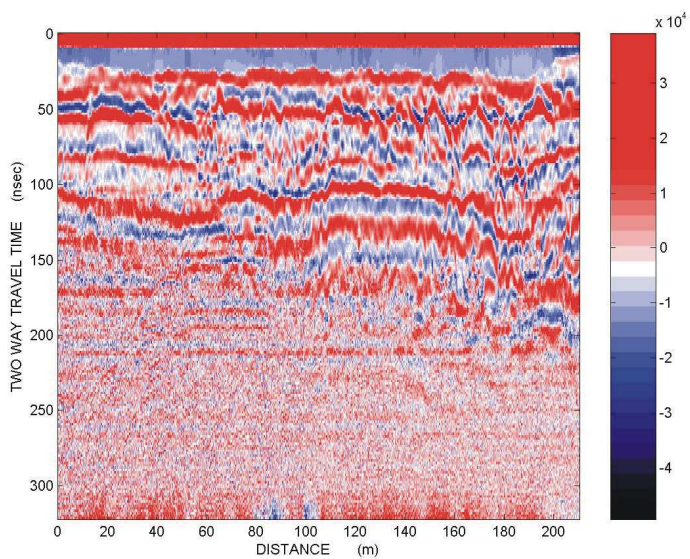
Γραμμή μελέτης 2 (Προσανατολισμός: Βορειοανατολικά→Νοτιοδυτικά)



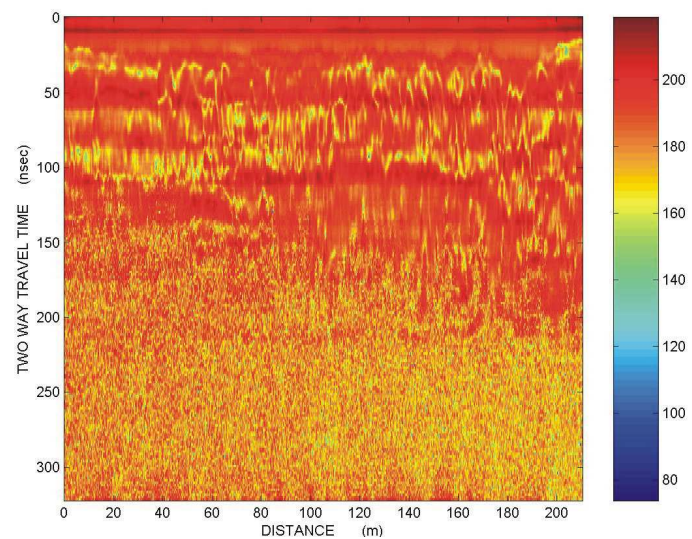
B.2.1: Ακατέργαστα δεδομένα



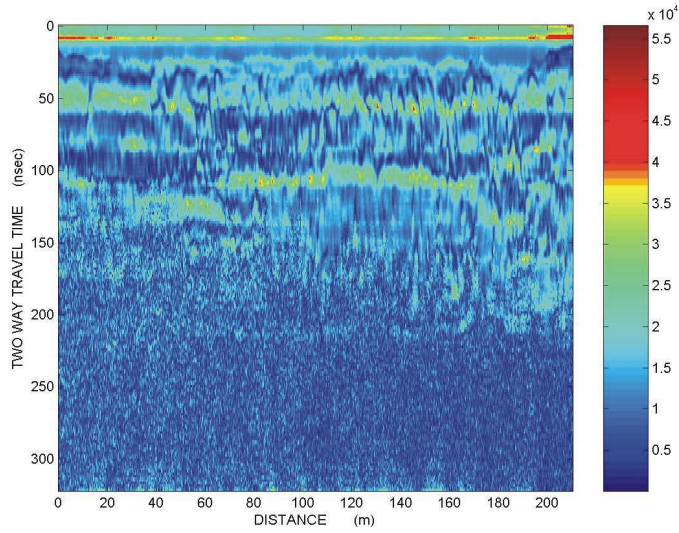
B.2.2: Dewow



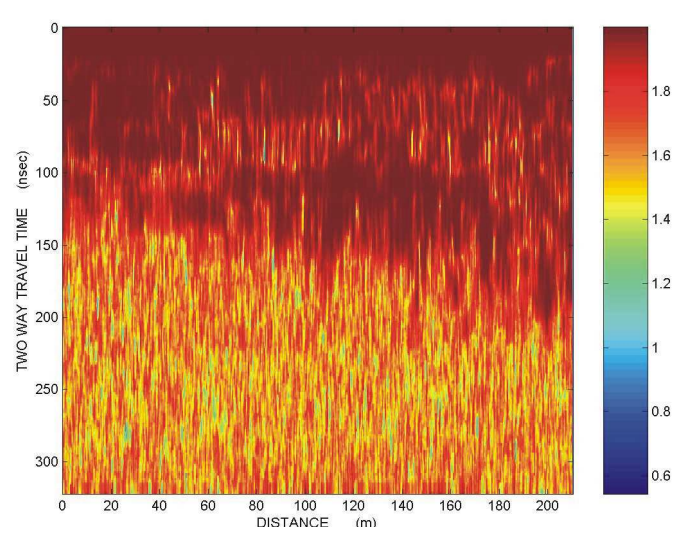
B.2.3: Dewow_AGC



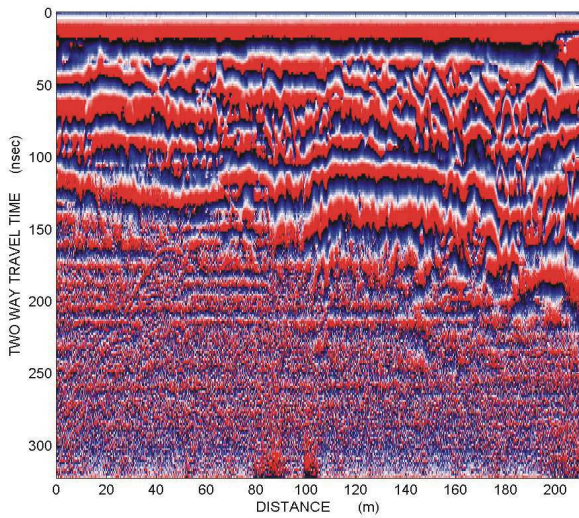
B.2.4: Dewow_AGC_db



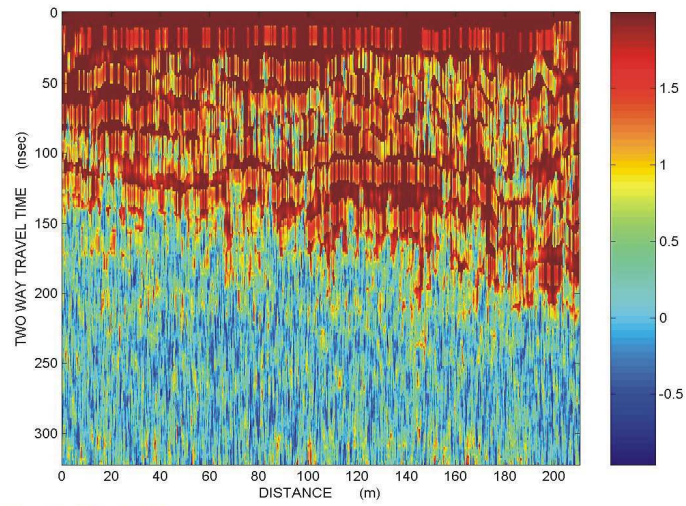
B.2.5: Dewow_AGC_Instantaneous Envelope



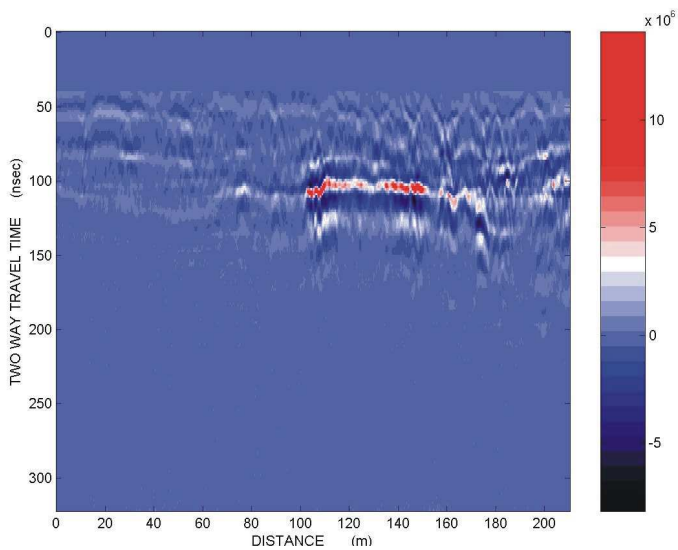
B.2.6: Dewow_AGC_Inst.Envelope-semblance



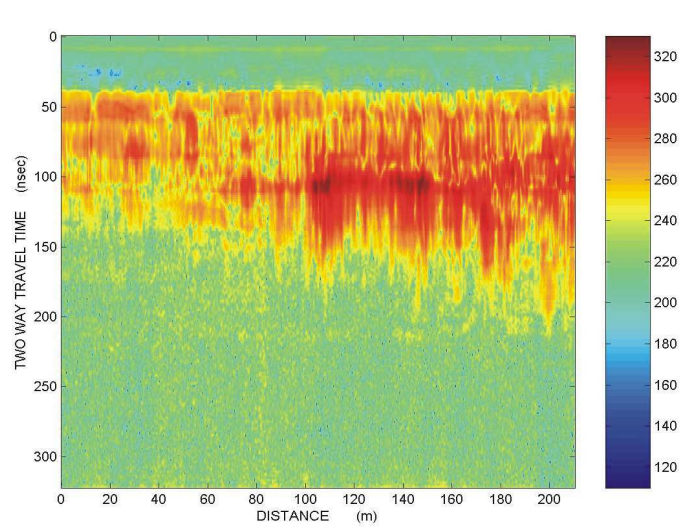
B.2.7: Dewow_AGC_Instantaneous Phase



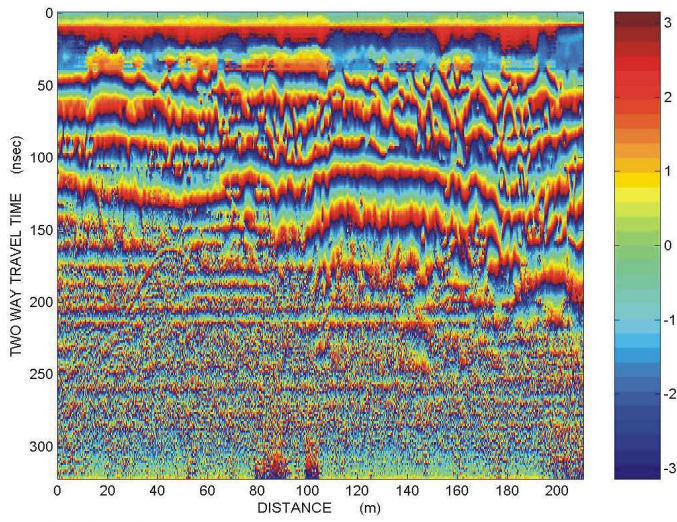
B.2.8: Dewow_AGC_Inst. Phase-semblance



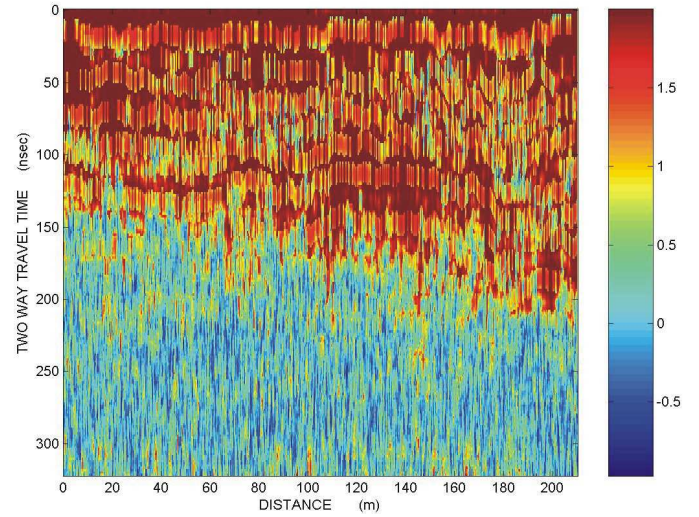
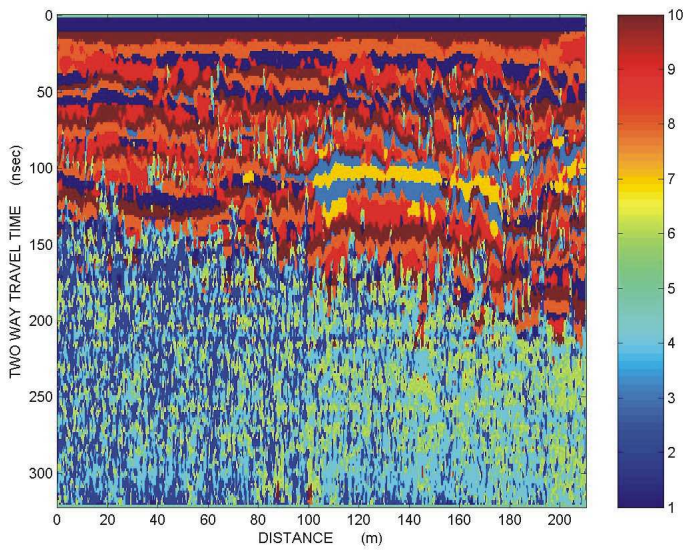
B.2.9: Dewow_SEC



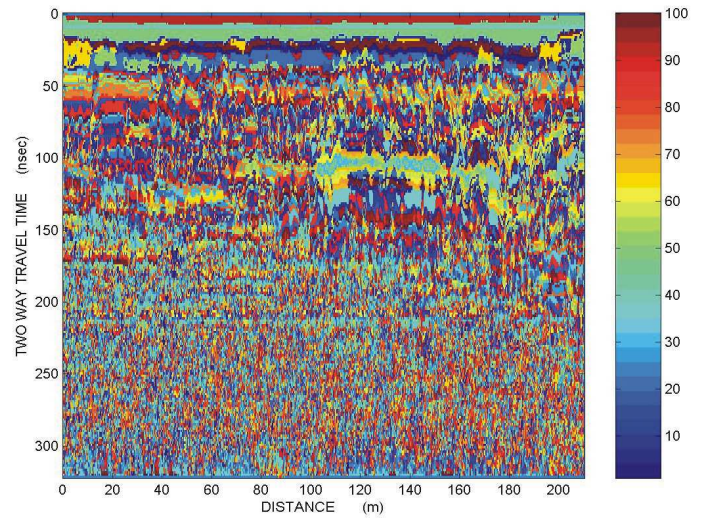
B.2.10: Dewow_SEC_db



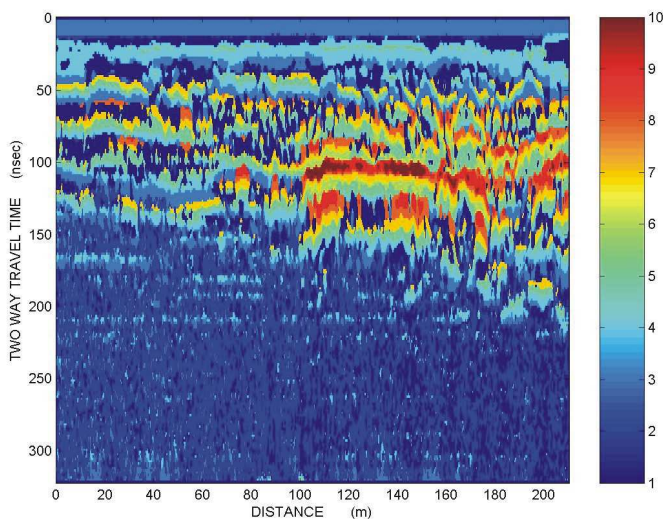
B.2.11: Dewow_SEC_Instantaneous Phase

B.2.12: Dewow_SEC_Inst.Phase -
semblance

B.2.13: k-means_10

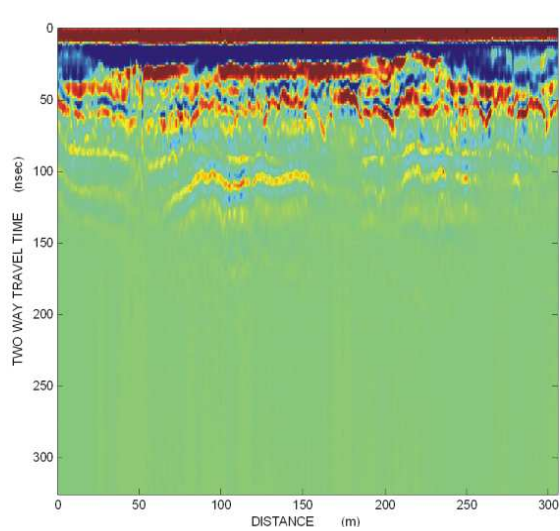


B.2.14: k-means_100

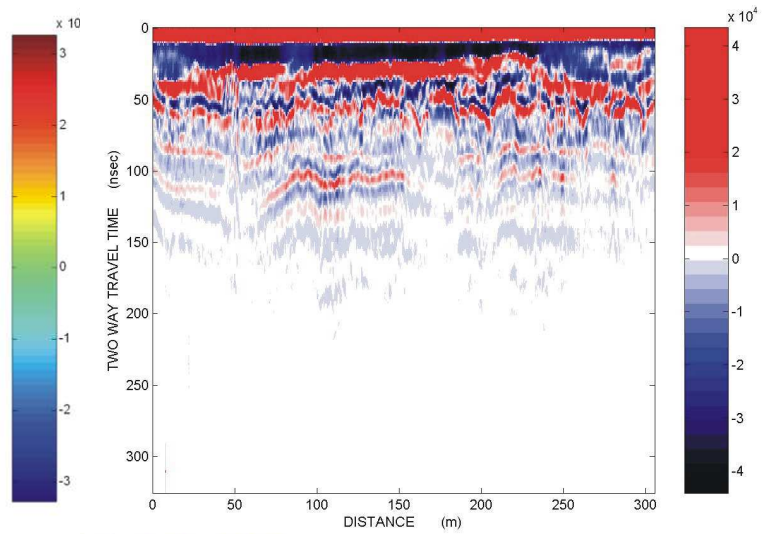


B.2.15: SOM

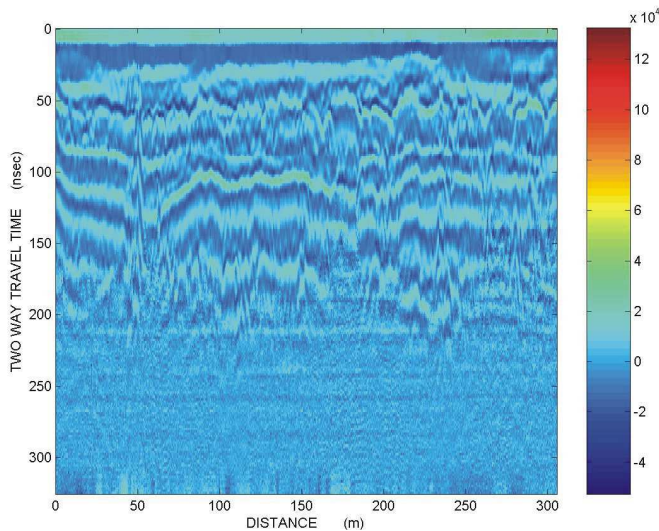
Γραμμή μελέτης 4 (Προσανατολισμός: Βορειοανατολικά→Νοτιοδυτικά)



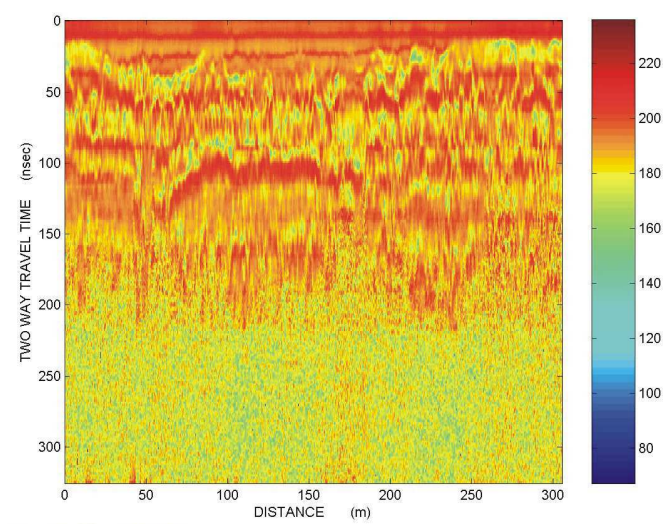
B.4.1: Ακατέργαστα δεδομένα



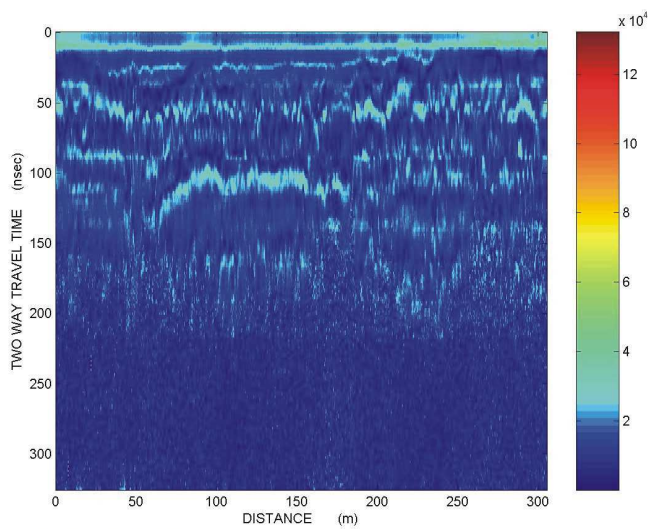
B.4.2: Dewow



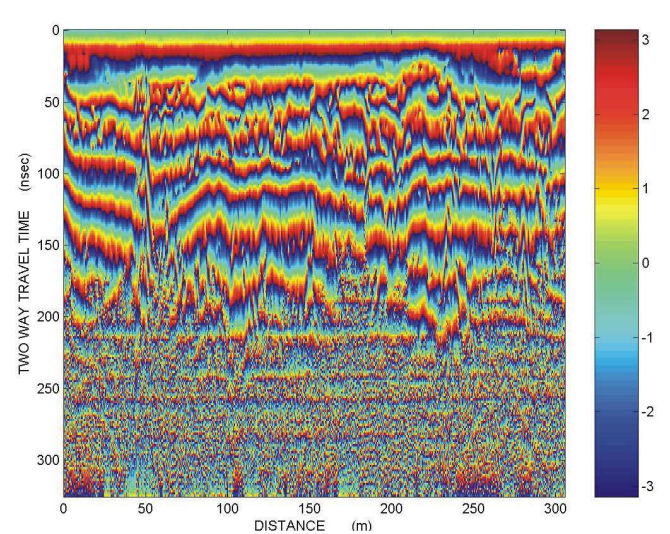
B.4.3: Dewow_AGC



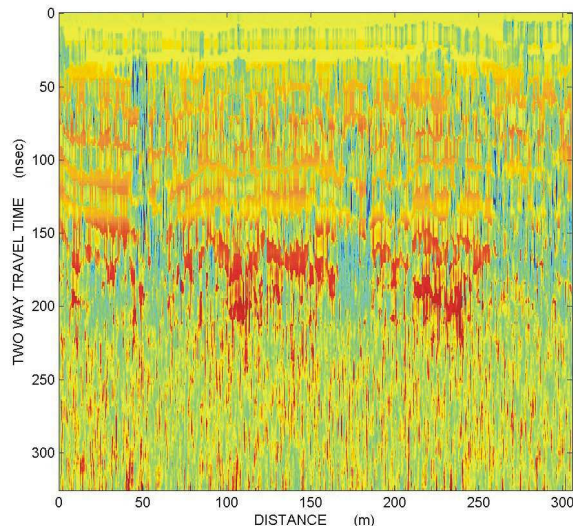
B.4.4: Dewow_AGC_db



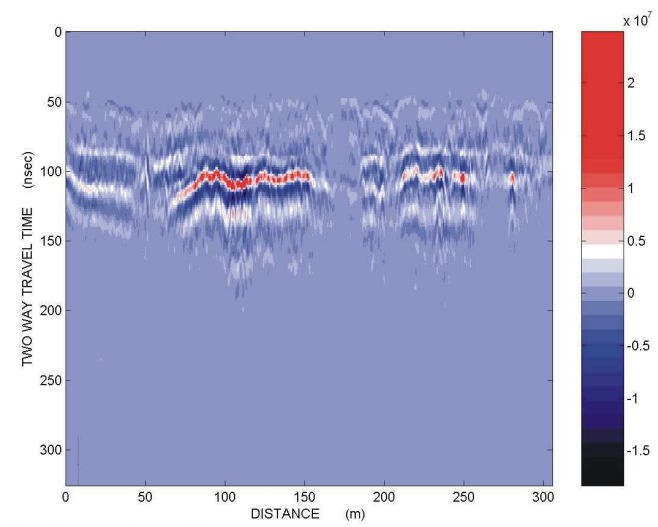
B.4.5: Dewow_AGC_Instantaneous Envelope



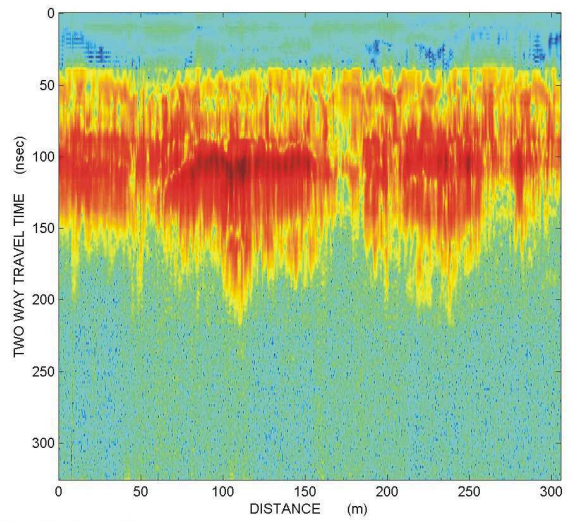
B.4.6: Dewow_AGC_Instant.Phase



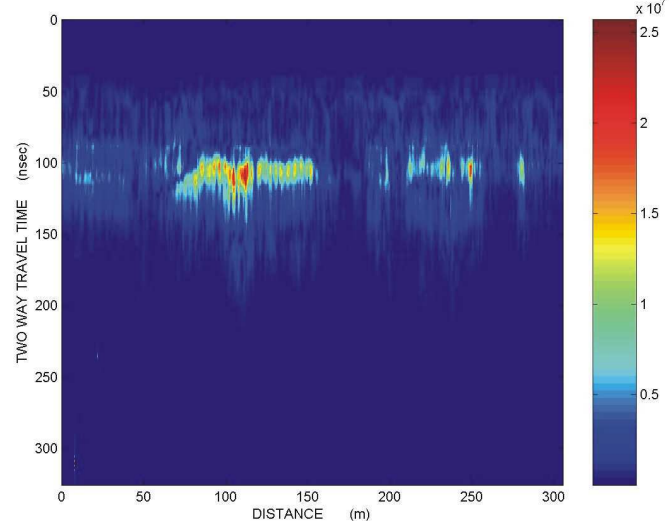
B.4.7: Dewow AGC_Inst.Phase-semblance



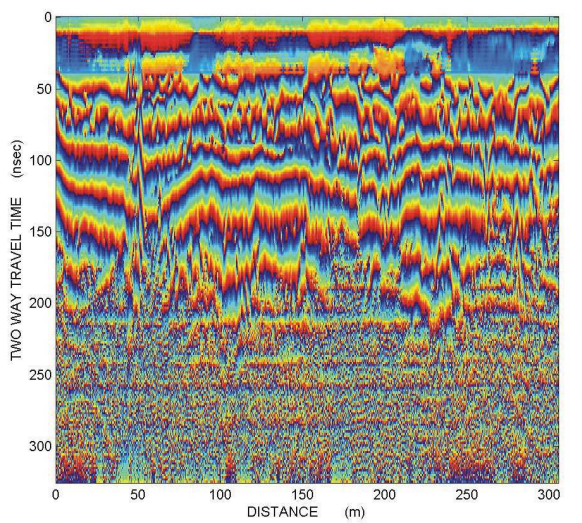
B.4.8: Dewow_SEC



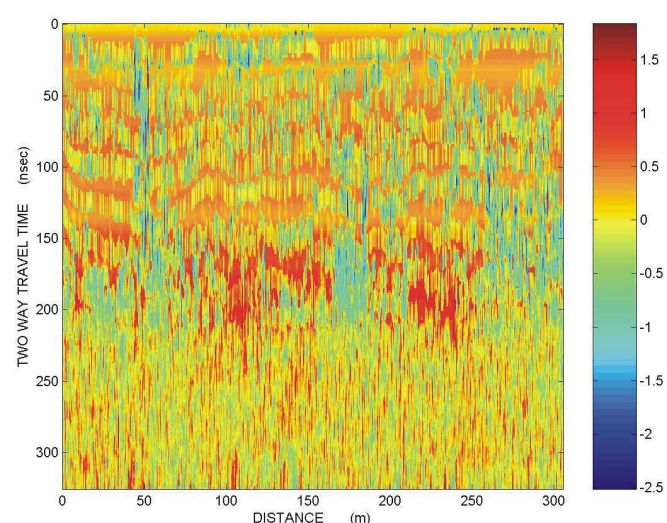
B.4.9: Dewow_SEC_db



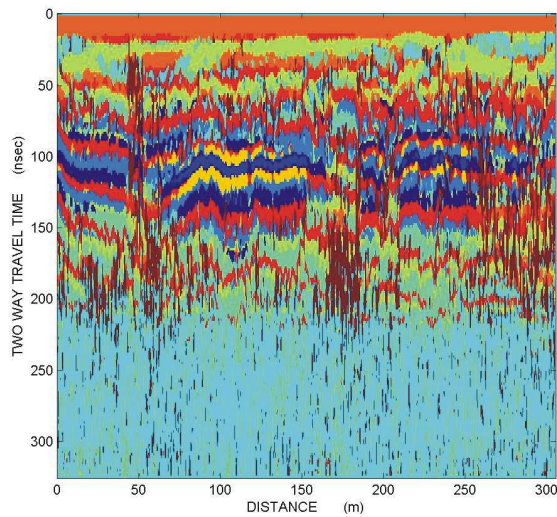
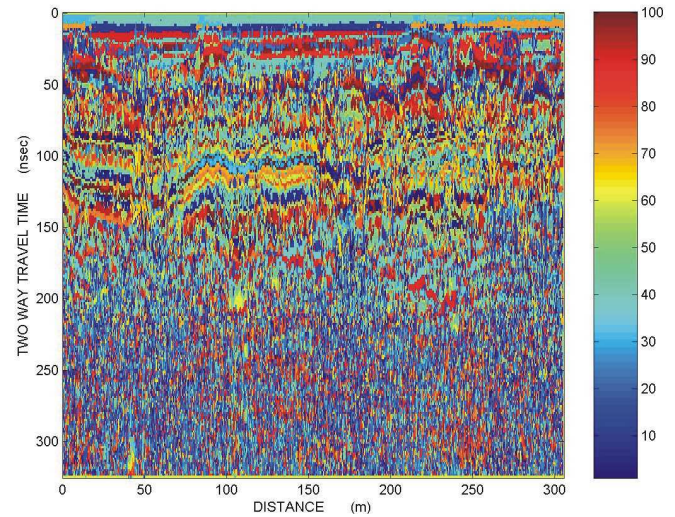
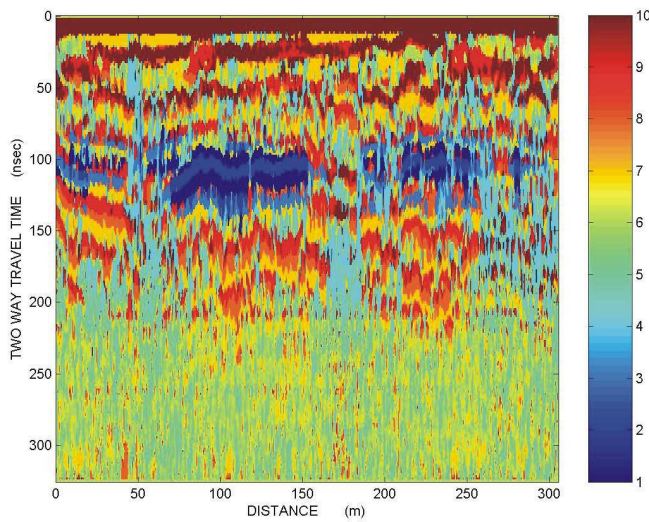
B.4.10: Dewow_SEC_Instantaneous Envelope



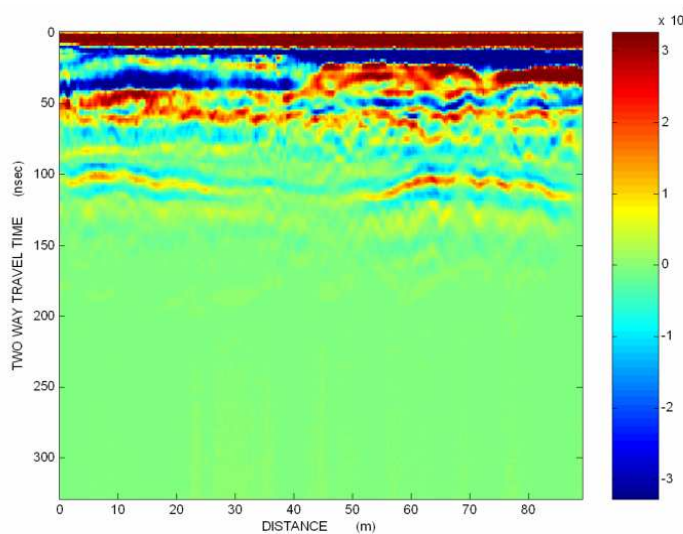
B.4.11: Dewow_SEC_Instantaneous Phase



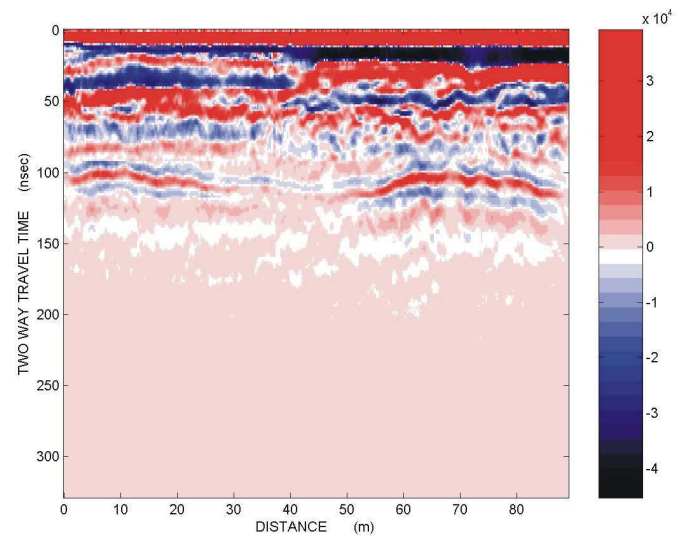
B.4.12: Dewow_SEC_Instantaneous Phase -semblance_background noise removal

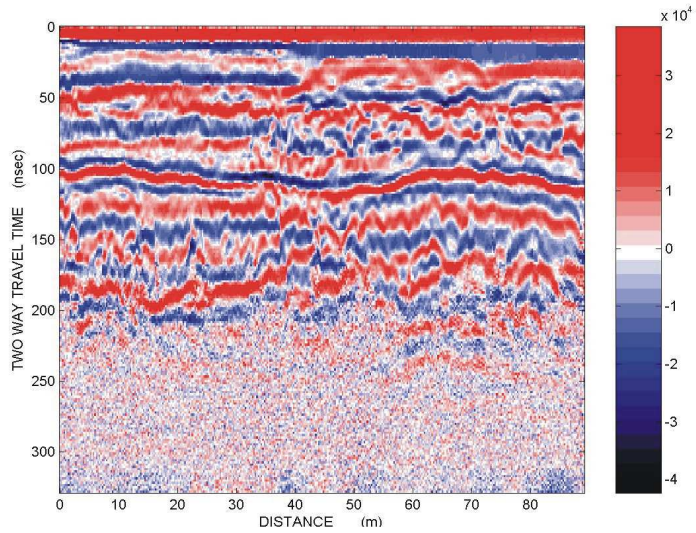
B.4.13: *k-means*_10B.4.14: *k-means*_100B.4.15: *SOM*

Γραμμή μελέτης 5 (Προσανατολισμός: Νότιοανατολικά→Βορειοδυτικά)

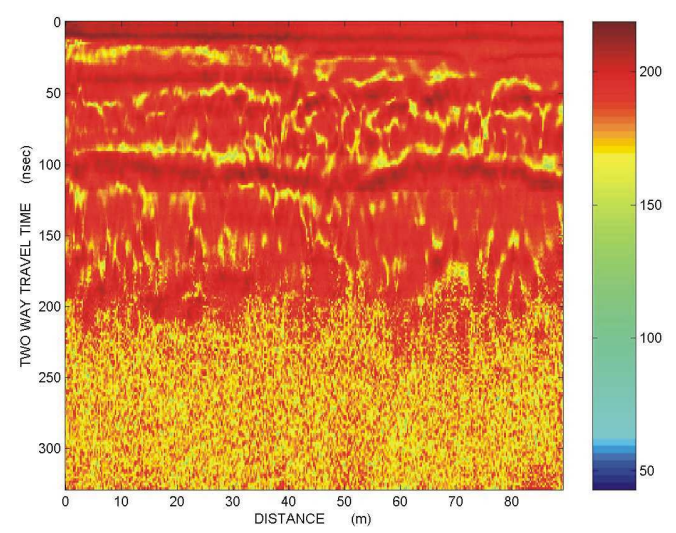


B.5.1: Ακατέργαστα δεδομένα

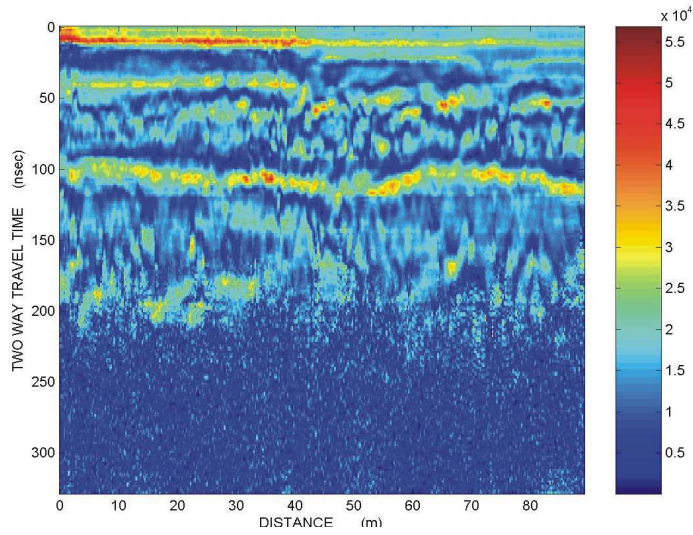
B.5.2: *Dewow*



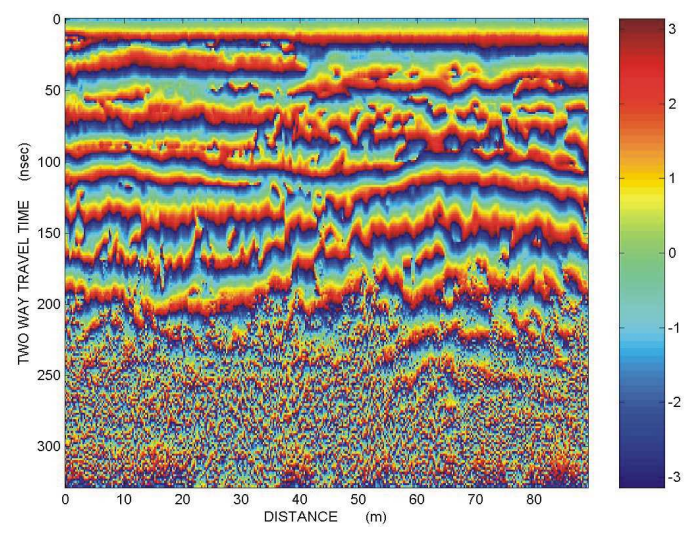
B.5.3: Dewow_AGC



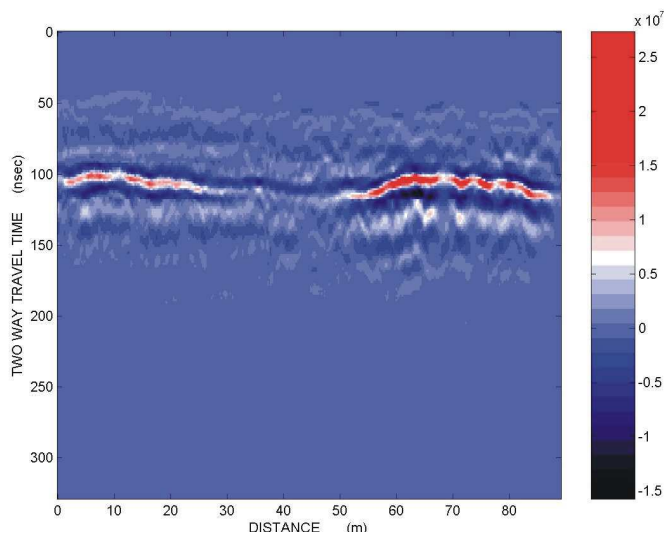
B.5.4: Dewow_AGC_db



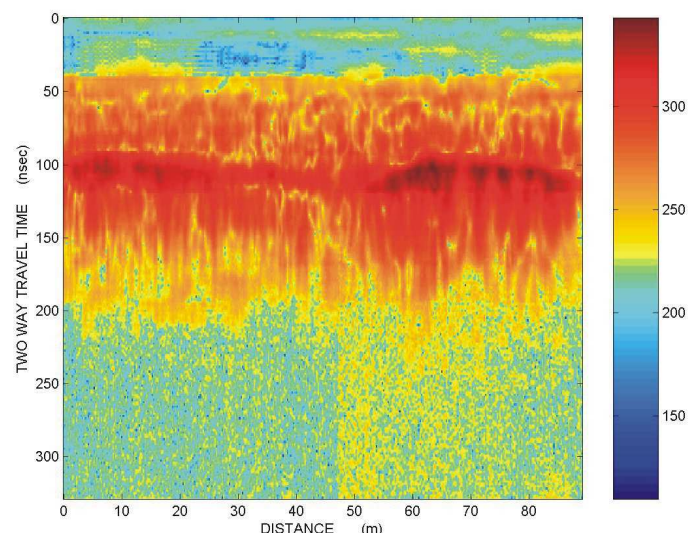
B.5.5: Dewow_AGC_Instantaneous Envelope



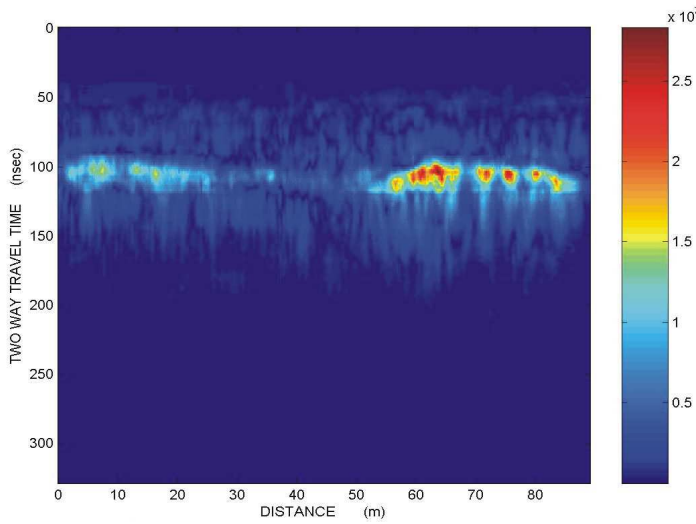
B.5.6: Dewow_AGC_Instant.Phase



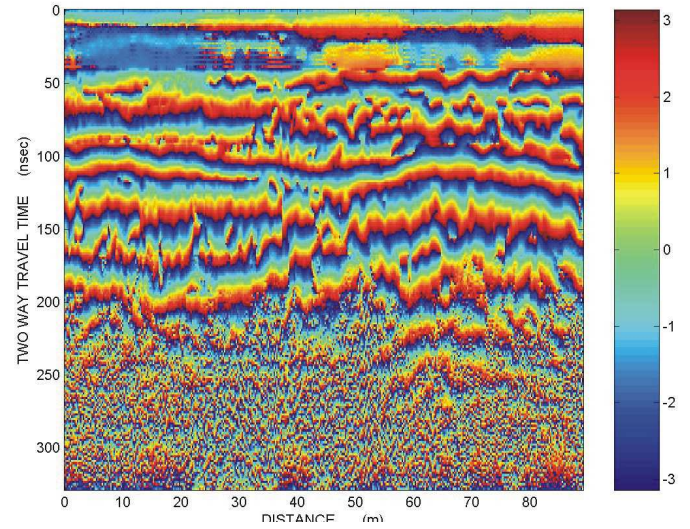
B.5.7: Dewow_SEC



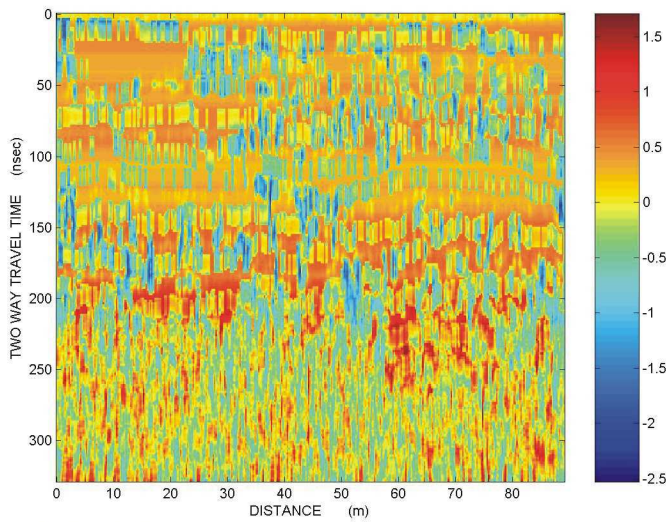
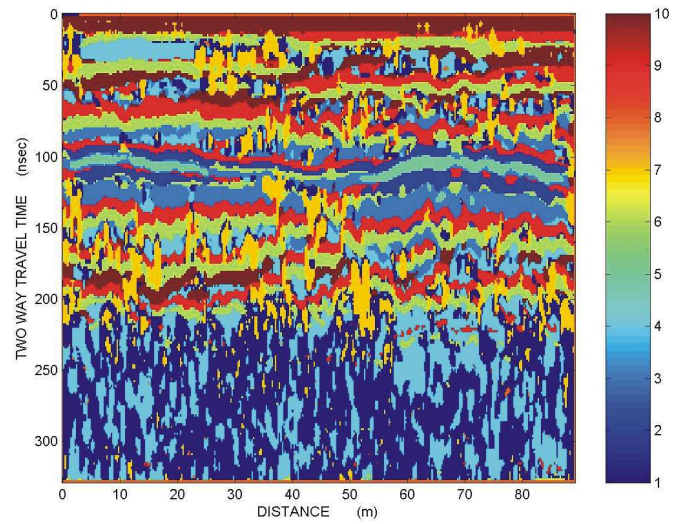
B.5.8 :Dewow_SEC_db



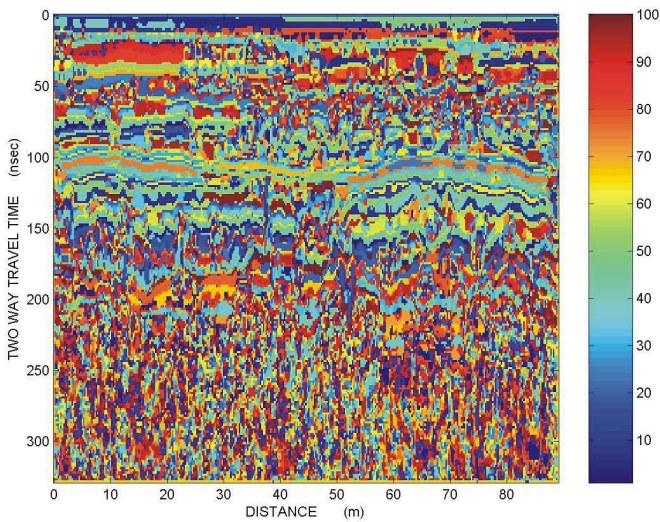
B.5.9: Dewow_SEC_Instantaneous Envelope



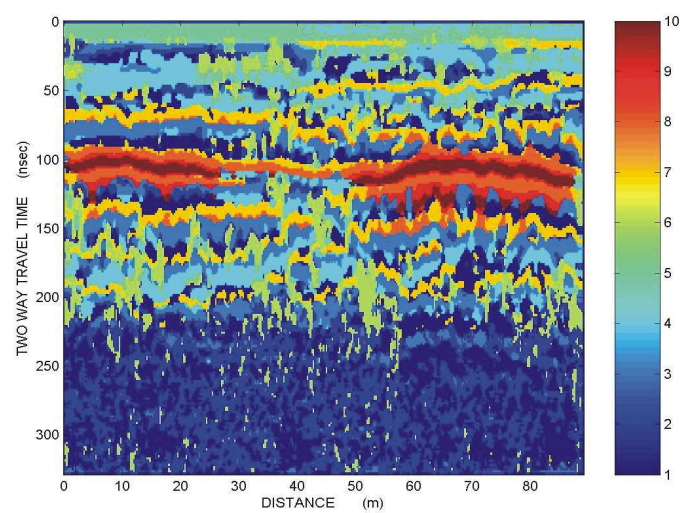
B.5.10: Dewow_SEC_Instant.Phase

B.5.11: Dewow_SEC_Instantaneous Phase
-semblance_background noise removal

B.5.12: k-means_10

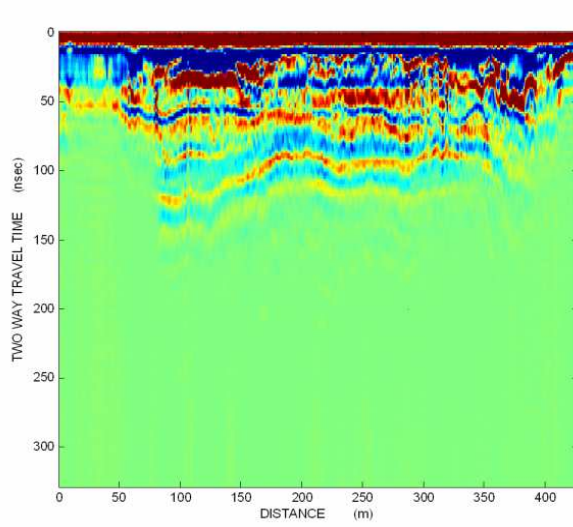


B.5.13: k-means_100

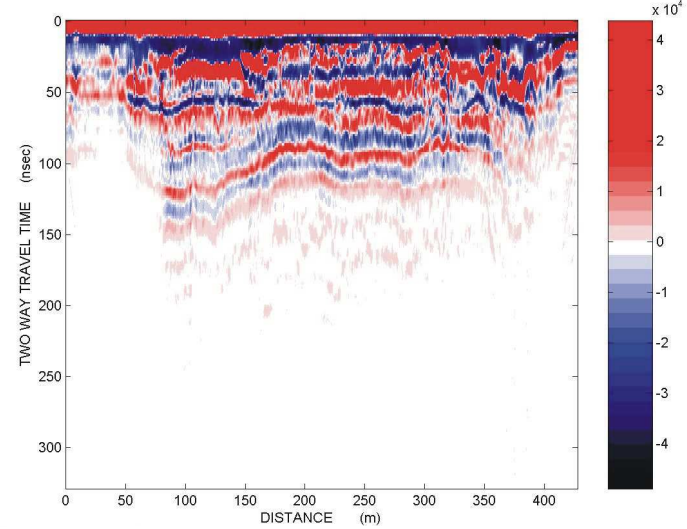


B.5.14: SOM

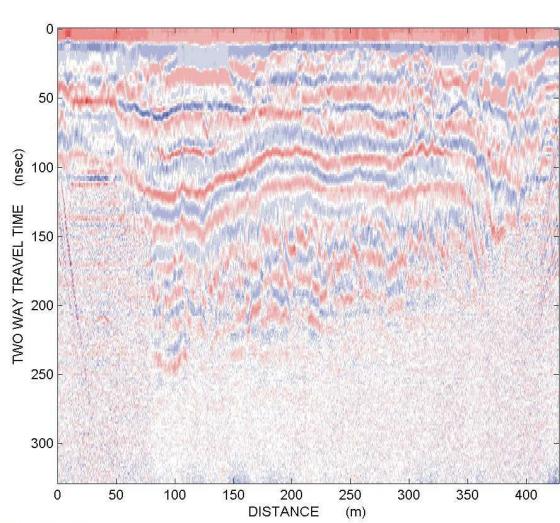
Γραμμή μελέτης 6 (Προσανατολισμός: Νοτιοανατολικά→Βορειοδυτικά)



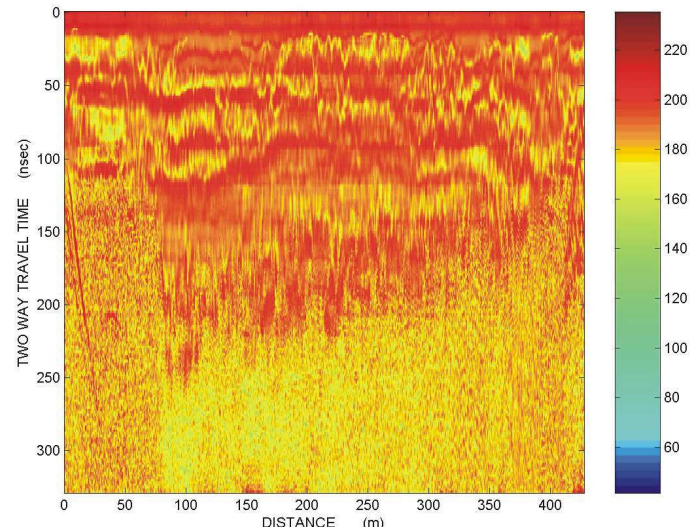
B.6.1: Ακατέργαστα δεδομένα



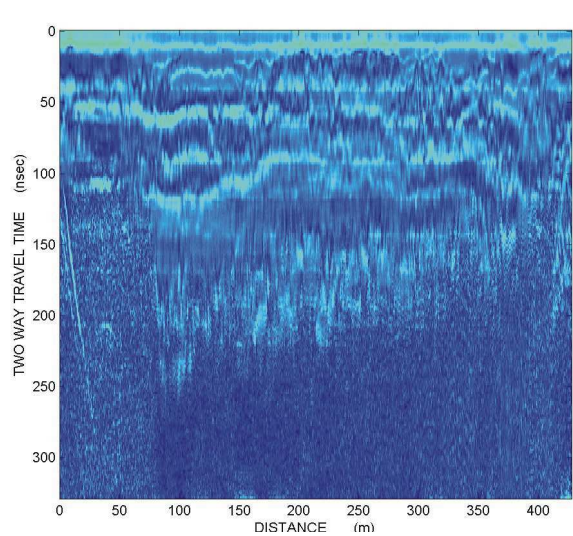
B.6.2: Dewow



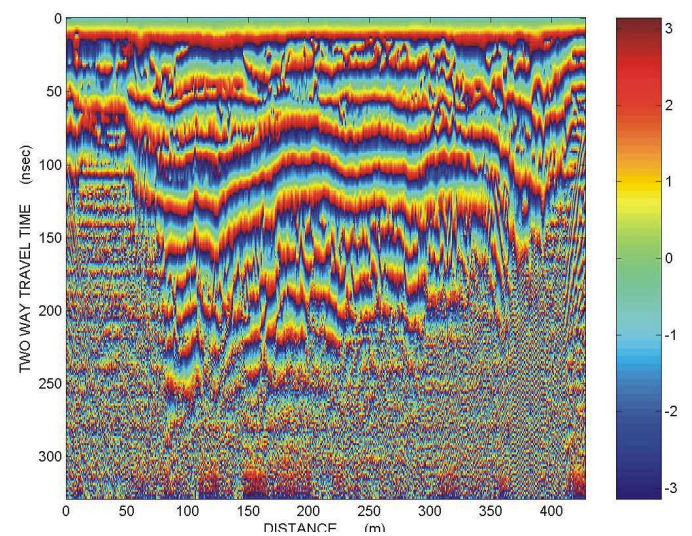
B.6.3: Dewow_AGC



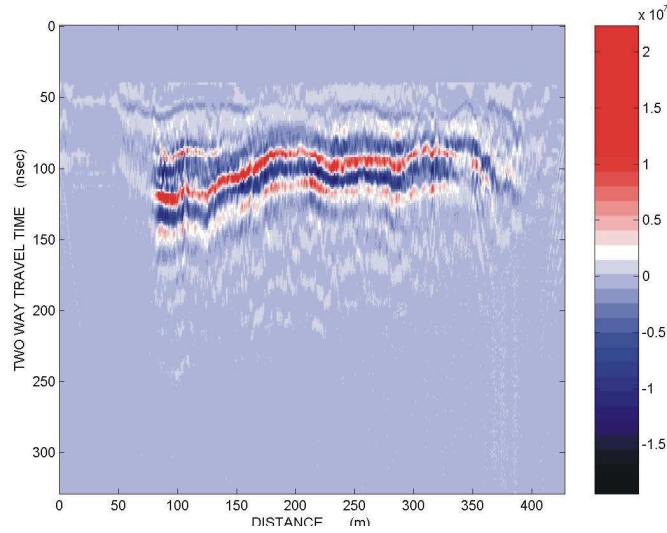
B.6.4: Dewow_AGC_db



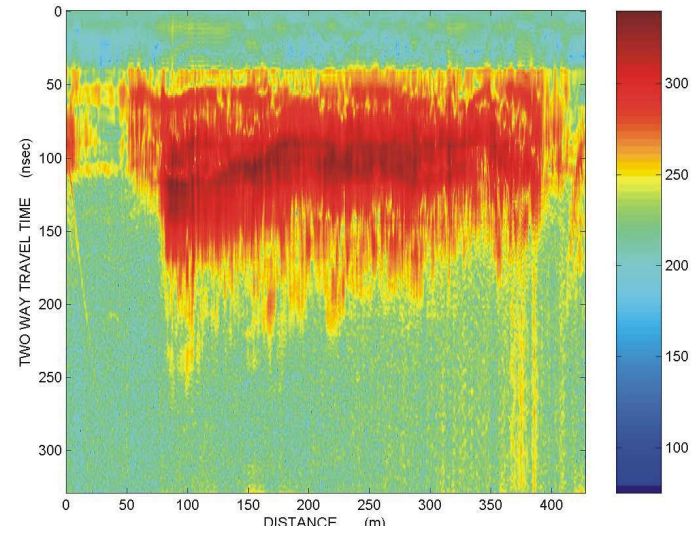
B.6.5: Dewow_AGC_Instantaneous Envelope



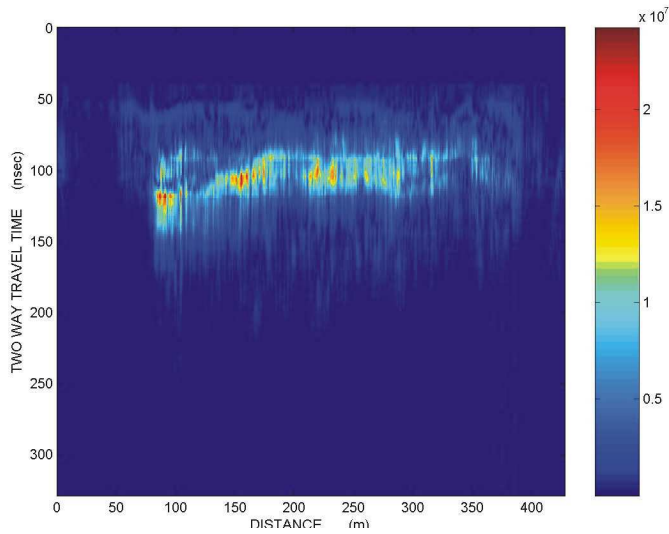
B.6.6: Dewow_AGC_Instant.Phase



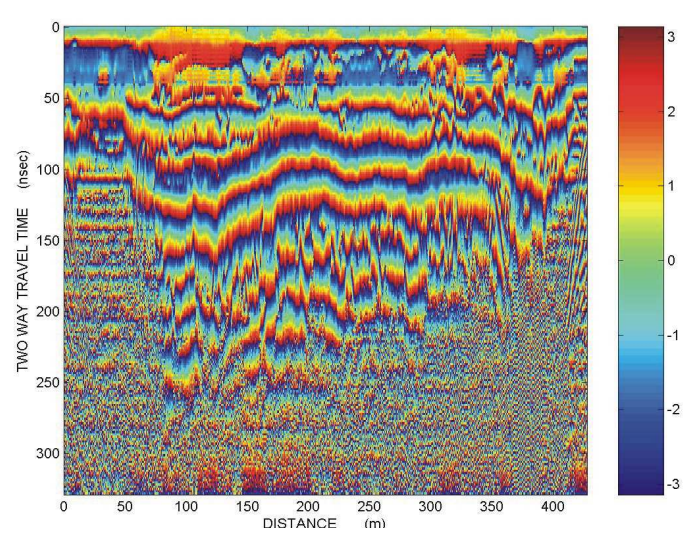
B.6.7: Dewow_SEC



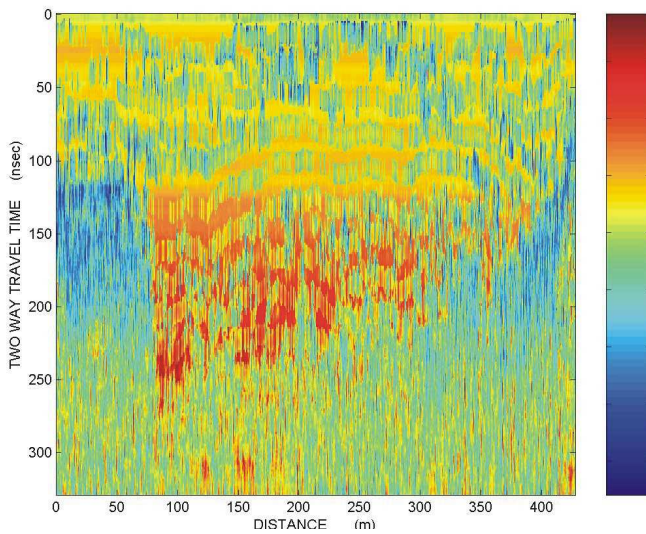
B.6.8: Dewow_SEC_db



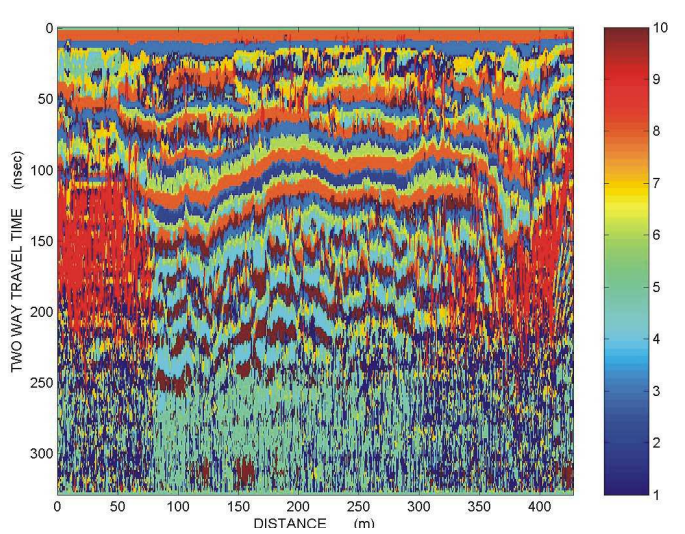
B.6.9: Dewow_SEC_Instantaneous Envelope



B.6.11: Dewow_SEC_Instantaneous Phase



B.6.12: Dewow_SEC_Instantaneous Phase-semblance_background noise removal

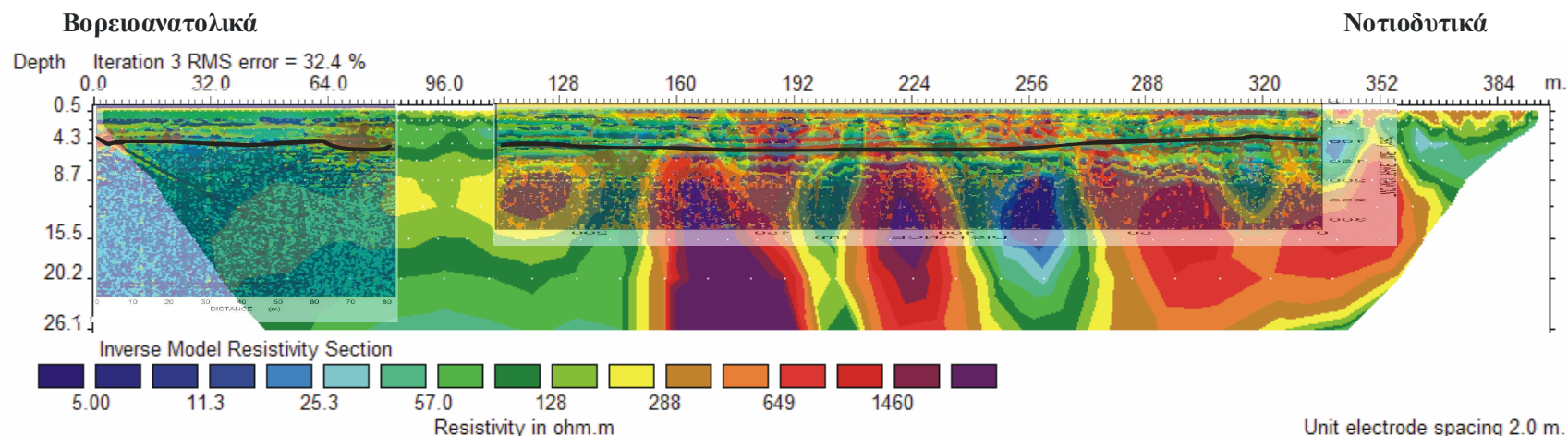


B.6.13: k-means_10

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

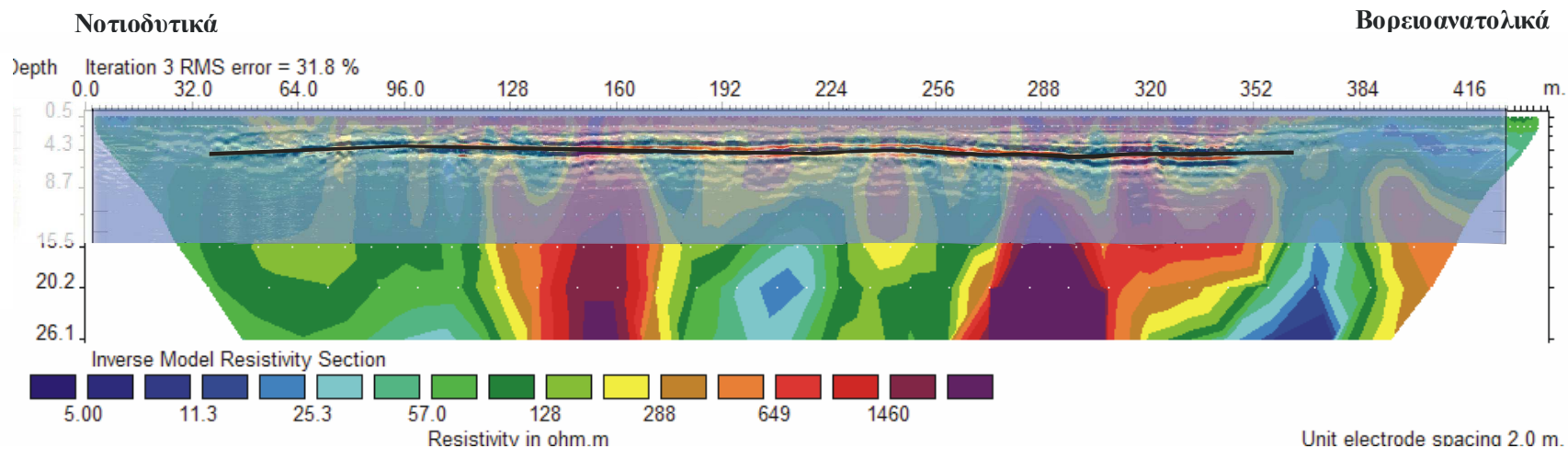
ΕΙΚΟΝΕΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ

Ημερομηνία δημιουργίας γραμμής 3 ηλεκτρικής τομογραφίας & γραμμών 1,3 radar: Δεκέμβριος 2002.



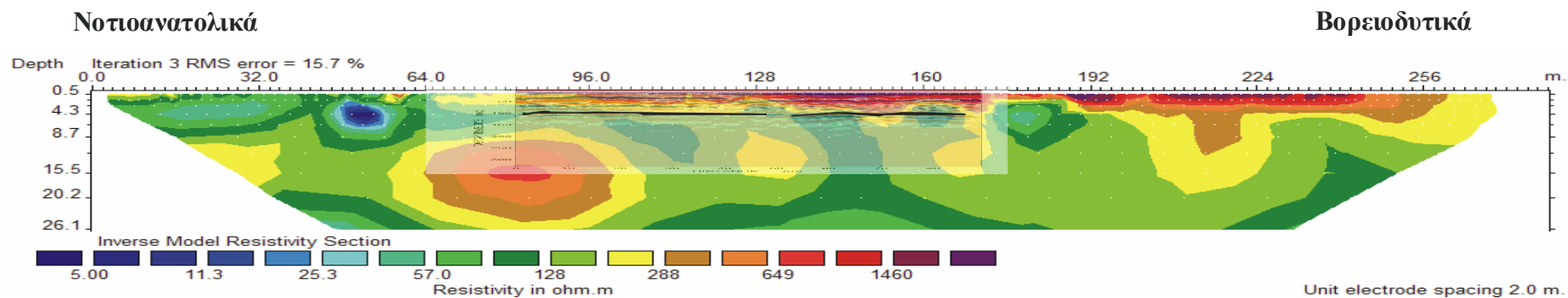
Σχήμα Γ.1: Γραμμή μελέτης 3 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμές 1, 3 γεωραντάρ (SOM)

Ημερομηνία δημιουργίας γραμμής 4 ηλεκτρικής τομογραφίας: Φεβρουάριος 2003 & Ημερομηνία δημιουργίας γραμμής 6 radar : Δεκέμβριος 2002.



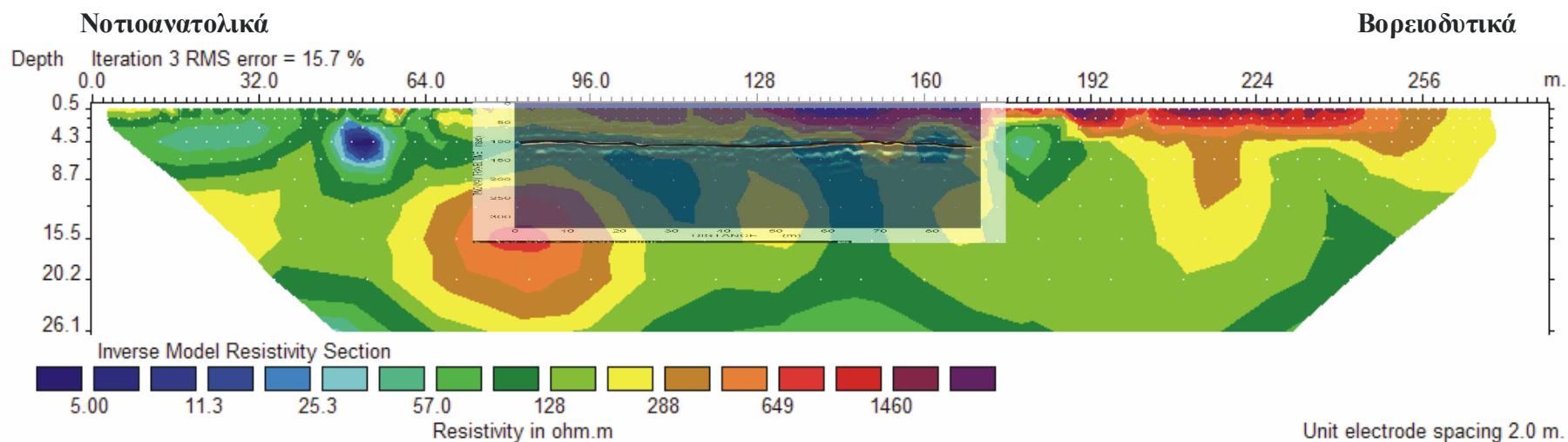
Σχήμα Γ.2: Γραμμή μελέτης 4 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 6 γεωραντάρ (DEWOW>SEC)

Ημερομηνία δημιουργίας γραμμής 6 ηλεκτρικής τομογραφίας & γραμμής 5 radar : Δεκέμβριος 2002.



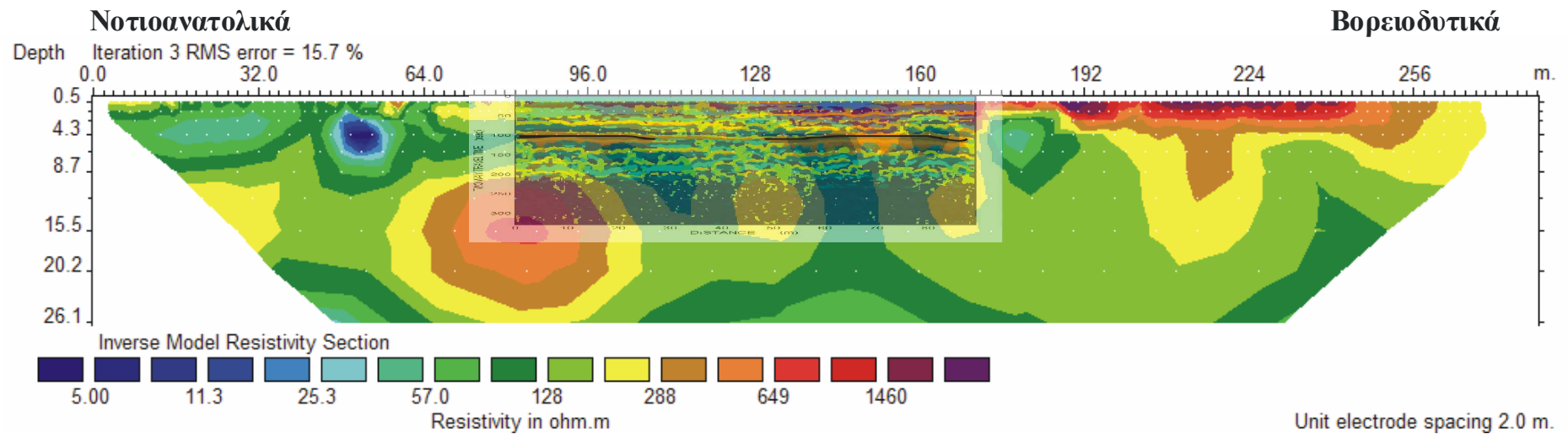
Γ.3: Γραμμή μελέτης 6 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 5 γεωραντάρ (DEWOW)

Ημερομηνία δημιουργίας γραμμής 6 ηλεκτρικής τομογραφίας & γραμμής 5 radar: Δεκέμβριος 2002.



Γ.4: Γραμμή μελέτης 6 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 5 γεωραντάρ (DEWOW>SEC)

Ημερομηνία δημιουργίας γραμμής 6 ηλεκτρικής τομογραφίας & γραμμής 5 radar: Δεκέμβριος 2002.



Γ.5: Γραμμή μελέτης 6 ηλεκτρικής τομογραφίας και γραμμή 5 γεωραντάρ (SOM)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Al-Dajani Abdul Fatah, Reppert Phillip (1999).** “Ground penetrating radar inversion for fracture orientation”. *SEG 1999 Expanded Abstracts*.
2. **Al-Nuaimy W., Huang Y., Nakhkash M., Fang M.T.C., Nguyen V.T., Eriksen A. (2000).** “Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 4.
3. **Annan A.P., Waller W.M., Strangway D.W., Rossiter J.R., Redman J.D., Watts R.D. (1975).** “The electromagnetic response of a low-loss, 2-layer, dielectric earth for horizontal electric dipole excitation”. *Geophysics*, vol. 40.
4. **Bedient P.B., Rifai H.S., Newell C.J. (1994).** “Ground Water Remediation: Transport and Remediation”. *Englewood Cliffs, New Jersey*.
5. **Bernabini M., Pettineli E. (1995).** “Field experiments for characterization of GPR antenna and pulse propagation”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33
6. **Hamran S.E., Gjessing D.T., Hjelmstad J., Aarholt E. (1995).** “Ground penetrating synthetic pulse radar: dynamic range and modes of operation”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33.
7. **Hetterschijt, R.A.A., F.J. Roelofsen en L.M.M. Bakker (2001).** Implementatie van smart pump&treat. Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem, rapport SV-035.
8. **Hugenschmidt J., Partl M.N., De Witte H. (1998).** “GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 4.
9. **Jol H.M. (1995).** “Ground penetrating radar antennae frequencies transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity”. *Geophysical Prospecting*, vol. 43.
10. **Meju M. (2000).** “Environmental geophysics: the tasks ahead”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44.

11. **Mellett J.S. (1995).** “Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management and geology”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33.
12. **Pulse Ekko 1000Run User Guide Version 1.2.**
13. **RES2DINV user’s manual version 3.4.**
14. **Reynolds J. (1998).** “An introduction to applied and environmental geophysics”. *John Willey and Sons*.
15. **Richards, J.A, John Alan (1993).** “Remote sensing digital analysis: an introduction”.
16. **Robinson, E. S. & Coruh, C., (1988),** “Basic Exploration Geophysics”, New York: Johny Wily.
17. **SKB Nieuws (2003).** Vertraging in vergunningsaanvragen verhindert uitvoering SKB-project. no. 13.
18. **Taner M. T. (1992-2000).** Attributes Revisited.
19. **Taner et al. (1992-2001)**
20. **Tauw (2002).** Weert. Report N001-4225244AJA-C01.
21. **Toshioka T., Tsuchida T., Sasahara K. (1995).** “Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33.
22. **Tsoflias G. (1999).** “Detection of vertical fractures in geologic formations using the polarization properties of ground penetration radar signal”. *SEG 1999, Expanded Abstracts*.
23. **Weert_report_hygeia (2004).** Geophysical study at a polluted site in Weert, the Netherlands.
24. **Weert_report_Zanzi (2005) comment Bart.**

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Βαφείδης Α. (1994).** “Αξιολόγηση σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους”. *Χανιά*.
2. **Βαφείδης Α. (2001).** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II.

3. **Hamdan H. (2002).** “Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του Νομού Χανίων”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
4. **Γκανιάτσος Ι. (1995).** “Γεωηλεκτρική τομογραφία με τη διάταξη Wenner”, *Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης.*
5. **Κουκαδάκη Μ.-Τζιμούρτος Ε. (2002).** “Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και των υπογείων νερών”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
6. **Κρητικάκης Γ. (2001).** “Συμβολή των σεισμικών μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης σε γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές μελέτες”. *Εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού μαθήματος ‘Ειδικά Κεφάλαια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας’.* *Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
7. **Μερτίκας Σ. (1999).** Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Ιων.
8. **Πάνας Σ. (1987).** “Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων”. University Studio Press. Θεσσαλονίκη.
9. **Παπαζάχος, Β. (1986).** “Εισαγωγή Στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική”, Εκδόσεις “Ζήτη”, Θεσσαλονίκη.
10. **Παπακωνσταντίνου Π. (2006).** “Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ για τον εντοπισμό καρστικών δομών στο Οροπέδιο του Ομαλού Χανίων”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
11. **Πουλιούδης Γ. (1999).** “Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
12. **Σοφιάκη Ελευθερία (2004).** “Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ με μεθόδους ταξινόμησης (Κ-μέσων τιμών και μέγιστης πιθανοφάνειας): Εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα στην περιοχή Porto Petrolí”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
13. **Σπανουδάκης Ν. (2001).** “Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στην ανίχνευση στόχων μικρών διαστάσεων”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*

14. **Σπανουδάκης Ν. (2002).** “Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά θέματα”. *Μεταπτυχιακή εργασία σε εξέλιξη. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*
15. **Χορευτάκη Γεωργία (2003).** “Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και του υπεδάφειου ραντάρ στο λατομείο Ζωφόρων του Ν.Ηρακλείου”. *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.*

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

1. <http://www.hygeia-eu.org>