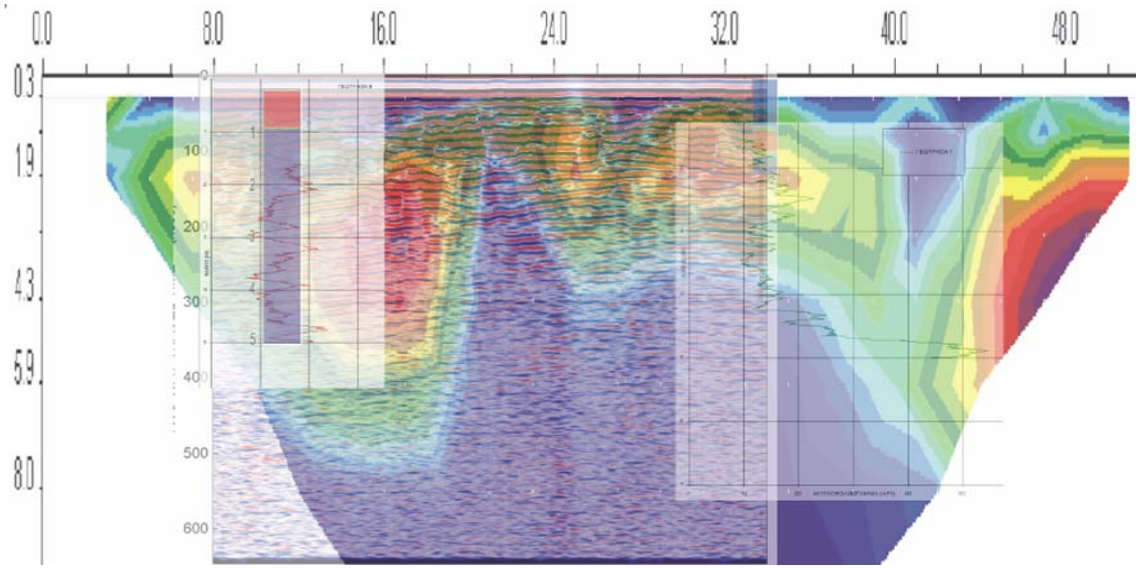
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΔΕ: ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ»



ΑΝΤΩΝΙΟΥ Ι. ΑΝΤΩΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ
Καθηγητής

Χανιά, 2007

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΔΕ: ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ»

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Ι. ΑΝΤΩΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΒΑΦΕΙΔΗΣ Α. Καθηγητής
ΚΑΡΑΤΖΑΣ Γ. Καθηγητής
ΠΑΣΑΔΑΚΗΣ Ν. Λέκτορας

Χανιά, 2007

Πρόλογος

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένα άτομα, τα οποία με στήριξαν και με βοήθησαν στην πραγματοποίηση αυτής της διατριβής.

Οφείλω, λοιπόν, να ευχαριστήσω στον κ. Αντώνιο Βαφείδη Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ανάθεση της εργασίας και τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κύριους Γεώργιο Καρατζά και Νικόλαο Πασαδάκη οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Απαραίτητη βοήθεια στη συλλογή δεδομένων παρείχαν οι Οικονόμου Ν. και Hamdan H., υποψήφιοι διδάκτορες του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για τις γεωφυσικές μετρήσεις, το πρόγραμμα 'Έλεγχος' για την διάθεση των στοιχείων, η Γεωτεκ Ε.Π.Ε. Georesources Technology L.t.d. για την διάνοιξη των γεωτρήσεων και την πραγματοποίηση διαγραφιών, τα ΕΛ.ΠΕ για την άδεια χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων τους στον Ασπρόπυργο για την διεξαγωγή των μετρήσεων καθώς και το Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπογείων Ταμιευτήρων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για τις αναλύσεις δειγμάτων.

Ευχαριστώ τους κ. Σπανουδάκη Ν, Ανδρονικίδη Ν., Κρητικάκη Γ. και. υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη συνεχή υποστήριξή τους.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Χριστίνα Σπερέζη για την πολύτιμη προσφορά, βοήθεια, ηθική υποστήριξη, γνώσεις και συμβουλές της.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά της καθ΄ όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάδειξη της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Ειδικότερα, εξετάζεται η συνεισφορά της τεχνικής του γεωραντάρ στην προσπάθεια για εντοπισμό και οριοθέτηση της ρύπανσης εδαφών.

Περιγράφεται η αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα γεωφυσικών μελετών που σχετίζονται με προβλήματα ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων νερών.

Ως εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα, εξετάζεται η περίπτωση ρύπανσης στα διυλιστήρια Ασπροπύργου των Ελληνικών Πετρελαίων, όπου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική διασκόπηση. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στην επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ από την συγκεκριμένη διασκόπηση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ερμηνεία και συσχέτιση με στοιχεία προηγούμενων ερευνών και άλλων μεθόδων στην εν λόγω περιοχή μελέτης. Επιδιώκεται ανάπτυξη κατάλληλης μεθοδολογίας στις αρχικές καταγραφές του γεωραντάρ για τον προσδιορισμό των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους, για την ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και τη συσχέτισή τους με πιθανούς ρυπογόνους παράγοντες.

Με την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας του γεωραντάρ προσδιορίζονται τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους και απεικονίζεται η πιθανή θέση ρύπανσης. Συμπεράσματα εξάγονται σχετικά με την εφαρμογή της τεχνικής του γεωραντάρ στη μελέτη ρύπανσης των εδαφών και την ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης.

Περιεχόμενα

Περίληψη **I**

Πρόλογος **II**

1 Εισαγωγή **1**
1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας 1
1.2 Αποτελεσματικότητα γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα 2
1.3 Εφαρμοσμένη γεωφυσική στη μελέτη της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών 2
1.4 Αντικείμενο μεταπτυχιακής εργασίας 3
1.5 Δομή διπλωματικής εργασίας 4

2 Συμβολή εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στην επίλυση Περιβαλλοντικών Προβλημάτων **6**
2.1 Εισαγωγή 6
2.2 Γεωφυσική και περιβάλλον 6
2.3 Περιγραφή γεωφυσικής τεχνολογίας 7
2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών περιβαλλοντικής γεωφυσικής 12
2.5 Πειράματα ελεγχόμενης ροής ρύπων 12
Περιγραφή ρύπων που συναντώνται στη περιοχή μελέτης 13
2.5.1 Παρατήρηση μετανάστευσης ρύπων DNAPL σε ελεγχόμενη διαρροή με τη βοήθεια γεωφυσικών μεθόδων 16
2.5.2 Multi-Offset, Multi-Polarization Acquisition and Processing of GPR Data: Πείραμα ελεγχόμενης ροής DNAPL 23
2.5.3 Ακουστική ανίχνευση μη αναμίξιμων υγρών μέσα σε άμμο 25
2.5.4 Ακουστική ανίχνευση μη αναμίξιμων υγρών μέσα σε στρώματα άμμου 26
2.5.5 Προσδιορισμός και χαρτογράφηση του βαθμού κορεσμού DNAPL από δεδομένα 27
2.5.6 Ανίχνευση DNAPL με υψηλής ευκρίνειας υπεδάφειο ραντάρ για διαγραφίες 28
2.5.7 Επίδραση μη αναμίξιμων υγρών ρύπων στην μετάδοση κυμάτων-P διαμέσου δειγμάτων υδροφόρου ορίζοντα 29
2.5.8 Μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ για την ερμηνεία του πορώδους και της διασποράς των DNAPL, για τη βαθμονόμηση τρισδιάστατης πολυφασικής προσομοίωση ροής 30
2.5.9 Εργαστηριακή έρευνα της Complex Resistivity από οργανικούς ρύπους στο Denver Federal Center 33
2.5.10 Χαρακτηρισμός σύνθετων NAPL σε πεδίο με φθοροσιμετρία - Επιλογή διέγερμένης κυματομορφής που οφείλεται σε NAPL 33
2.5.11 Μη διεισδυτική παρακολούθηση της διασποράς των DNAPL διαμέσου κορεσμένου πορώδους με χρήση ηλεκτρικής τομογραφίας 35
2.6 Έρευνες πεδίου σε περιοχές υφιστάμενης ρύπανσης 37
2.6.1 Όρια ανίχνευσης για μη αναμίξιμους υγρούς ρύπους χρησιμοποιώντας NMR 37

2.6.2 Ηλεκτρική τομογραφία για την ανίχνευση DNAPL 38
2.6.3 Συνδυασμός ηλεκτρικών τομογραφιών για τον χαρακτηρισμό του πλουμίου DNAPL: Ανάπτυξη τεχνολογίας και επαλήθευση 39
2.6.4 Γεωφυσική μέθοδος για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό του όγκου των DNAPL που βρίσκονται στο υπέδαφος 40
2.6.5 Ολοκληρωμένος γεωφυσικός χαρακτηρισμός ρυπασμένης περιοχής από NAPL, με τη χρήση μετρήσεων μέσα σε γεωτρήσεις και εργαστηριακών πειραμάτων 41
2.6.6 Ολοκληρωμένη γεωφυσική ανίχνευση του πλουμίου DNAPL 44
2.6.7 Χαρτογράφηση πλουμίων ρύπων TCE και PCE με την χρήση 3-D δεδομένων από γεώτρηση επαγωγικής πόλωσης 44
2.6.8 Εντοπισμός ρύπανσης από NAPL με Crosswell μεθόδους σεισμικών υψηλών συχνοτήτων 45
2.6.9 Μη διεισδυτικός χαρακτηρισμός ρυπασμένης περιοχής χρησιμοποιώντας επαγωγικής πόλωσης 46
2.6.10 Γεωφυσική επισκόπηση για τον χαρακτηρισμό ρύπανσης εδάφους σε μικρό βάθος 48
2.6.11 Τρισδιάστατη αναστροφή Self-Potential για ανίχνευση και χαρτογράφηση της ρύπανση υπεδάφους στο DOE Savannah River Site 49

3 Περιγραφή της περιοχής μελέτης 51
3.1 Εισαγωγή 51
3.2 Γενικά στοιχεία για την εταιρεία 51
3.3 Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης 52
3.4 Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης 54
3.4.1 Ελεύθερη φάση 55
3.4.2 Υπόγειο νερό 55
3.4.3 Εδαφικός αέρας 56
3.4.4 Έδαφος 56
3.5 Γεωφυσική δασκόπηση περιοχής 56
3.6 Γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στα ΕΛΠΕ 57
3.6.1 Ηλεκτρική Τομογραφία 57
3.6.2 Γεωραντάρ 61
3.6.3 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος 62
3.6.4 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας 63
3.7 Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ 66
3.7.1 Εισαγωγή 66
3.7.2 Μονοδιάστατα Φίλτρα 66
3.7.3 Δισδιάστατα Φίλτρα 67
3.7.4 Ενίσχυση του σήματος 68
3.7.5 Μιγαδικά χαρακτηριστικά (Instantaneous Complex Attributes) 69
3.7.6 Μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών (principal components analysis) 71
3.7.7 Μέθοδοι Ταξινόμησης 72
3.8 Συλλογή μετρήσεων με τις μεθόδους ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης, ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ 77
3.8.1 Ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση 77
3.8.2 Ηλεκτρική τομογραφία 77
3.8.3 Γεωραντάρ 79

3.8.4 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας 80

4 Επεξεργασία δεδομένων Γεωραντάρ και παρουσίαση αποτελεσμάτων Ηλεκτρικής Τομογραφίας 81
4.1 Εισαγωγή 81
4.2 Επεξεργασία μετρήσεων Γεωραντάρ 81
4.3 Αποτελέσματα επεξεργασίας Γεωραντάρ 83
4.3.1 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων 92
4.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας 93

5 Συνδυασμένη ερμηνεία Γεωφυσικών μεθόδων 115
5.1 Εισαγωγή 115
5.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα 115
Περιοχή Α 115
Περιοχές Β και Γ 132
Περιοχή Δ 141
Περιοχή 715Α 145
Περιοχή LPG 148

6 Συμπεράσματα - Προτάσεις 153
6.1 Εισαγωγή 153
6.2 Συμπεράσματα 153
6.3 Προτάσεις 156

Βιβλιογραφία 159

Παράρτημα Α 165

Παράρτημα Β 217

Παράρτημα Γ 227

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας

Ο όρος γεωφυσική διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση γεωλογικών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό επιτυγχάνεται με βάση νόμους της φυσικής και συγκεκριμένα με πραγματοποίηση μετρήσεων χαρακτηριστικών φυσικών μεγεθών του υπεδάφους.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 παρατηρήθηκε αξιόλογη ανάπτυξη στις ήδη υπάρχουσες τεχνικές που εφαρμόζονταν για τη μελέτη και περιγραφή των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Αρχικά χρησιμοποιούνταν ένας περιορισμένος αριθμός συστημάτων απεικόνισης του εδάφους, χαμηλής μάλιστα ανάλυσης ποιότητας, τα οποία δεν προσέδιδαν επαρκείς πληροφορίες για μελέτη του υπεδάφους. Μακροχρόνια ερευνητική δραστηριότητα οδήγησε 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 υπεδάφειων γεωλογικών δομών, κατέστησαν τη γεωφυσική διασκόπηση 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 καινούργιος κλάδος της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ο οποίος πραγματεύεται κατά κύριο λόγο περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την ανίχνευση και χαρτογράφηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά (Oteri 1981, Ross et al. 1990, De Lima et al. 1995, Fitterman 1996, Sauck et al. 1998, Atekwana et al. 2000, Buselli and Lu 2001, Orlando et al. 2001).

1.2 Αποτελεσματικότητα γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα

Οι ρυπογόνες ουσίες του υπεδάφους συνήθως κατεισδύουν μέσω των γεωλογικών στρωμάτων και της επικοινωνίας που αυτά έχουν με το υπόγειο νερό. Από τη στιγμή που θα ξεκινήσει η αποκατάσταση του εδάφους και αρχίσει σταδιακά η απορρύπανση από την περιοχή μελέτης, ο βαθμός και η αποτελεσματικότητα του καθαρισμού πρέπει να ελέγχονται σε τακτά διαστήματα. Οι γεωφυσικές τεχνικές επιτρέπουν την παρακολούθηση των συνθηκών 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 «θεραπείας» για την αποκατάσταση του προβλήματος, αντιμετωπίζονται πλέον με μεγαλύτερη ευκολία, μειωμένο κόστος και ασφαλή αποτελέσματα με τη βοήθεια της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

1.3 Εφαρμοσμένη γεωφυσική στη μελέτη της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών

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 ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους, η οποία προκαλείται από τους ρυπογόνους παράγοντες. Αντίθετα, άλλες γεωφυσικές τεχνικές, όπως η σεισμική ανάκλαση και διάθλαση, η μαγνητομετρία και οι ακτίνες-γ, δεν είναι κατάλληλα εργαλεία για την άμεση ανίχνευση της ρύπανσης. Εντούτοις, προσδίδουν

πληροφορίες στην αναγνώριση των λιθολογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών του υπεδάφους, οι οποίες συμβάλλουν στη εξάπλωση της ρύπανσης.

Στις περιπτώσεις αυτές, η γεωφυσική χρησιμοποιείται ως εργαλείο έμμεσης ανίχνευσης 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 ειδική ηλεκτρική αντίσταση νερού, είτε δεν επηρεάζει αισθητά καμιά από τις φυσικές ιδιότητες του υγιούς πετρώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η οργανική ρύπανση υπό μορφή διαλυμένης φάσης (π.χ. υγρό πετρέλαιο, βενζίνη, τετραχλωράνθρακας). Σε αυτές τις περιπτώσεις η γεωφυσική χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό των υδρογεωλογικών παραμέτρων του υπεδάφους. Με τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της ρύπανσης του υπογείου νερού με έναν πιο έμμεσο τρόπο ή τουλάχιστον εξασφαλίζεται καλύτερη καθοδήγηση ως προς τη τοποθεσία εγκατάστασης των γεωτρήσεων παρακολούθησης.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να απεικονίσουν ακόμα και τις περιοχές εκείνες οι οποίες είναι απρόσιτες με γεωτρήσεις παρακολούθησης και να προσθέσουν πολύτιμες στρωματογραφικές πληροφορίες πάνω σε οποιοδήποτε γεωλογικό μοντέλο της ρυπογόνου περιοχής. Σε συνδυασμό δε με γεωχημικές μετρήσεις, υπάρχει δυνατότητα για τη βελτιστοποίηση της θέσης των γεωτρήσεων. Οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν πλέον αυτοτελή τμήματα των προγραμμάτων αποκατάστασης του περιβάλλοντος και πολύτιμα εργαλεία γι' αυτήν.

1.4 Αντικείμενο μεταπτυχιακής εργασίας

Αντικείμενα που πραγματεύεται η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι:

- Η παρουσίαση αποτελεσμάτων γεωφυσικών μελετών που σχετίζονται με τον εντοπισμό και την οριοθέτηση της ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών.
- Η ανάπτυξη κατάλληλης μεθοδολογίας στις αρχικές καταγραφές του γεωραντάρ από διασκόπηση σε περιοχή ρύπανσης στα Ελληνικά Πετρέλαια (Ασπρόπυργος).

Βασικές επιδιώξεις είναι:

- Η περιγραφή των οργανικών ρύπων NAPL / DNAPL και της μετανάστευσης τους 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.
- Η ερμηνεία των καταγραφών για την οριοθέτηση περιοχών ισχυρών ανακλάσεων.
- Ο προσδιορισμός του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα.
- Η ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και η συσχέτισή τους με πιθανούς ρυπογόνους παράγοντες.
- 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 της μεθόδου του γεωραντάρ στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων.
- Απεικόνιση με τη χρήση γεωφυσικών τεχνικών του στρώματος αργίλου κάτω από πλούμιο ρύπανσης.

1.5 Δομή διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1

Το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται την αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα. Αναφέρεται η συνεισφορά παραδοσιακών γεωφυσικών τεχνικών στην ανίχνευση ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Συνοπτική περιγραφή των γεωφυσικών μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Επίσης, παρατίθενται τα αποτελέσματα γεωφυσικών μελετών που σχετίζονται με προβλήματα υπόγειας ρύπανσης

Κεφάλαιο 3

Παρατίθενται στοιχεία για το χώρο ρύπανσης στην περιοχή ΕΛΠΕ και αναφέρονται στοιχεία για την οργανική ρύπανση του υπεδάφους. Περιγράφονται οι γεωφυσικές διασκοπήσεις που διεξήχθησαν καθώς και ο τρόπος συλλογής των δεδομένων στην εν

λόγω περιοχή μελέτης. Επίσης αναλύονται οι τεχνικές μαθηματικής επεξεργασίας που εφαρμόζονται στις καταγραφές γεωραντάρ (φίλτρα, τύποι ενίσχυσης, στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά). Περιγράφεται η συμβολή τους στη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των δεδομένων.

Κεφάλαιο 4

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ. Επίσης, παρατίθενται τα ήδη επεξεργασμένα αποτελέσματα από την ηλεκτρική τομογραφία.

Κεφάλαιο 5

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από εφαρμογή τεχνικών μαθηματικής επεξεργασίας στις μετρήσεις γεωραντάρ, αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ερμηνεία και συσχέτιση με αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Επίσης παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την συνολική επεξεργασία του πακέτου των δεδομένων του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Κεφάλαιο 6

Το τελευταίο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής εργασίας περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που απορρέουν για τη συμβολή της τεχνικής του γεωραντάρ στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων των εδαφών.

Κεφάλαιο 2

Συμβολή εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στην επίλυση Περιβαλλοντικών Προβλημάτων

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια οι γεωφυσικές μέθοδοι παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση, με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται στην απεικόνιση της υπεδάφειας δομής. Έχουν καθιερωθεί σε τομείς όπως η μεταλλευτική έρευνα, η αναζήτηση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, η εφαρμοσμένη μηχανική και η αρχαιομετρία. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραδοσιακές γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονταν στην ανίχνευση μεταλλευμάτων και πετρελαίου βρίσκουν πια πρόσφορο έδαφος στον εντοπισμό της υπεδάφειας ρύπανσης. Πρόσφατα αναπτύχθηκε ένας καινούριος κλάδος της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ο οποίος πραγματεύεται κατά κύριο λόγο περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν στην ανίχνευση και χαρτογράφηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

2.2 Γεωφυσική και περιβάλλον

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

Καινούργια επιτεύγματα στην ψηφιακή τεχνολογία και τη μαθηματική μοντελοποίηση έχουν οδηγήσει σε βελτιωμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων και στην άριστη ερμηνεία τους. Συγκεκριμένα, καινούργιες τεχνικές στις μεθόδους του γεωραντάρ, της ρηχής σεισμικής ανάκλασης, της επαγόμενης πολικότητας, 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).

Εντούτοις, παρά το μεγάλο αριθμό προσφάτων δημοσιεύσεων και παρουσιάσεων σε συνέδρια, είναι δύσκολο να αποτυπωθούν σαφή μοντέλα τα οποία να περιγράφουν με ακρίβεια τις κατά τόπο διακυμάνσεις των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους. Για βελτιωμένη λύση του προβλήματος κρίνεται αναγκαία μια διεπιστημονική έρευνα με γεωφυσικές, υδρογεωλογικές και γεωχημικές μεθόδους πάνω σε υπόγειους ταμιευτήρες.

2.3 Περιγραφή γεωφυσικής τεχνολογίας

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται για την ανίχνευση και οριοθέτηση περιοχών ρύπανσης στο υπέδαφος (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002). Αυτές περιλαμβάνουν:

- Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (Electromagnetometry)
- Σεισμική Ανάκλαση (Seismic Reflection)
- Σεισμική Διάθλαση (Seismic Refraction)
- Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetometry)
- Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (Self Potential)
- Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization)
- Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας Πολλαπλών Συχνοτήτων (Complex resistivity)
- Βαρυτική μέθοδος (Gravity)
- NMR (Nuclear Magnetic Resonance)
- Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)
- Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Electrical Resistivity)
- Διαγραφίες Φυσικής Ραδιενέργειας

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σκοπός της παρούσας αναφοράς δεν είναι η εκτενής παρουσίαση των γεωφυσικών μεθόδων, αλλά μία συνοπτική περιγραφή τους, προκειμένου να κατανοήσει ο αναγνώστης τις βασικές αρχές λειτουργίας τους. Η μέθοδος του γεωραντάρ, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και των διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (Electromagnetometry)

Η μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων βασίζεται στη μέτρηση της απόκρισης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το οποίο προκαλείται μέσα στη γη. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής (κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο χαμηλών συχνοτήτων που παράγεται από πομπό προκαλεί τη ροή ρεύματος μέσα σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά του εδάφους. Το παραγόμενο αυτό ρεύμα προκαλεί με τη σειρά του δευτερεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο επιστρέφει στην επιφάνεια της γης. Τελικά, ένας δέκτης ανιχνεύει το δευτερεύον πεδίο όταν το πρωτεύον είναι μηδενικό και μετράει τη χρονική μεταβολή του (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

Σεισμική Ανάκλαση (Seismic Reflection)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, τα οποία παράγονται τεχνητά στην επιφάνεια της γης. Τα κύματα κατά τη διαδρομή τους 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 και οι επιφανειακές δομές (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

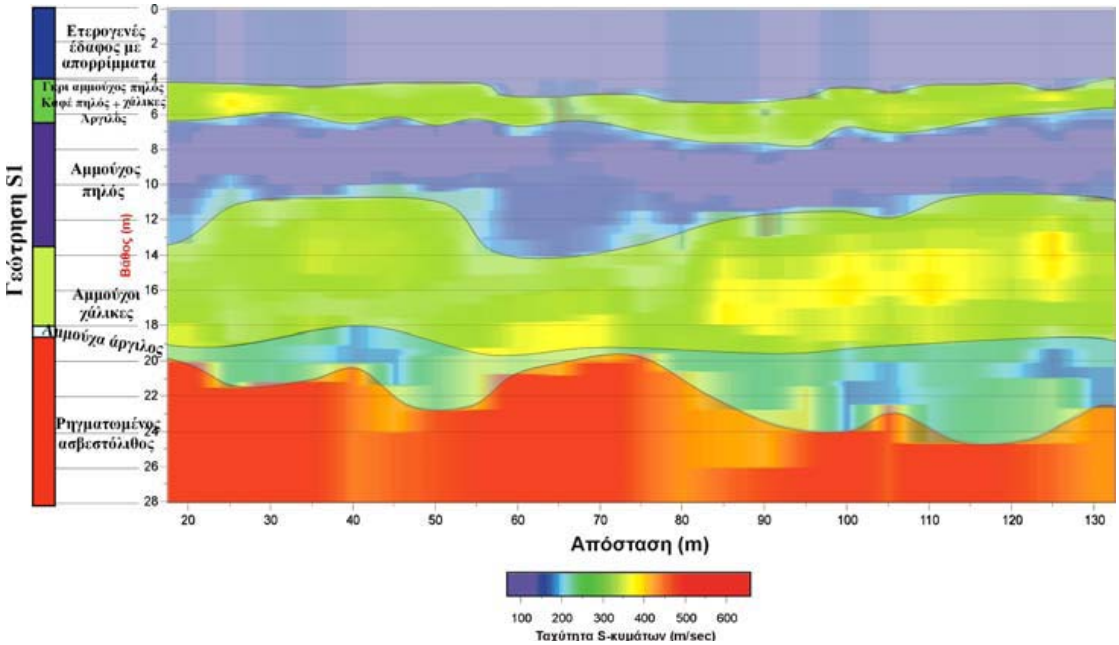
Σεισμική Διάθλαση (Seismic Refraction)

Η Σεισμική Διάθλαση βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας κυμάτων και των μετωπικών κυμάτων διάθλασης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι χρόνοι διαδρομής των κυμάτων, προκειμένου να καθοριστούν 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 (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

Πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh

Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τη λήψη καταγραφών πλούσιων σε επιφανειακά κύματα Rayleigh και την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς τους, για τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η μεθοδολογία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι δυνατό να χωριστεί σε δύο διακριτά στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, από τις σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής προκύπτουν οι πειραματικές καμπύλες διασποράς. Στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς για οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας μία κατάλληλη τεχνική. Τροποποιώντας επαναληπτικά το εδαφικό μοντέλο επιτυγχάνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (αντιστροφή) και προσδιορίζεται το τελικό εδαφικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων με το βάθος) (Κρητικάκης, 2004).



Σχήμα 2.23*: Αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή σεισμικής μεθόδου των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (MASW) στην περιοχή Γένοβα Ιταλίας. Η επεξεργασία των δεδομένων αποκάλυψε έξι γεωλογικά στρώματα, εκ των οποίων το πρώτο στρώμα στα αρχικά 4m οριοθετεί τη ρυπογόνο περιοχή. Οι αρχικές ενδείξεις επιβεβαιώθηκαν από παρακείμενη γεώτρησης S1 (Κρητικάκης, 2004).*

Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetometry)

Οι μαγνητικές μέθοδοι βασίζονται στη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης. Οι τοπικές μεταβολές της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου παρουσιάζουν ενδιαφέρον και ονομάζονται μαγνητικές ανωμαλίες μικρής κλίμακας. Η αποτελεσματικότητα των μεθόδων αυτών περιορίζεται από παρεμβολές (θόρυβος), οι οποίες οφείλονται σε διακυμάνσεις που προκαλούνται από κτίρια, σιδερένιες κατασκευές, οχήματα κτλ (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (physical potential)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μετρήσεις του δυναμικού, το οποίο προέρχεται από φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα. Τα ρεύματα αυτά είτε έχουν ηλεκτροκινητική προέλευση είτε παράγονται με ηλεκτροχημική δράση. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της τάσης χρησιμοποιούνται κατάλληλα βολτόμετρα ή γαλβανόμετρα. Οι μετρήσεις της τάσης πραγματοποιούνται με δύο βασικούς τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, η τάση υπολογίζεται σε διάφορα μέρη οριζόντιας γραμμής η οποία διασχίζει την περιοχή μελέτης. Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων διατηρούνται σταθερές και στο τέλος υπολογίζεται η βαθμίδα του δυναμικού. Κατά το δεύτερο τρόπο, το ένα ηλεκτρόδιο παραμένει σε σταθερή θέση ενώ με το άλλο εντοπίζονται σημεία τα οποία εμφανίζουν το ίδιο δυναμικό με αυτό του ακίνητου ηλεκτροδίου (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization)

Όταν το συνεχές ρεύμα που διαβιβάζεται στη γη μέσω δύο ηλεκτροδίων διακοπεί απότομα, η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων δεν μηδενίζεται αμέσως. Αντίθετα, αρχίζει να ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο και περνούν αρκετά δευτερόλεπτα έως ότου αυτή μηδενιστεί. Το γεγονός 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 (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας Πολλαπλών Συχνοτήτων (Complex resistivity)

Η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας με πολλαπλές συχνότητες (complex resistivity) είναι μια γεωφυσική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες για την μέτρηση των ηλεκτροχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα μεταξύ ορυκτών και νερού. Από το 1984 αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την απευθείας ανίχνευση οργανικών ρύπων στο υπέδαφος και αποδείχτηκε ότι είναι μια πολύ υποσχόμενη μέθοδος για αυτό τον σκοπό μετράει την ηλεκτρική εμπέδηση του εδάφους σε εύρος συχνοτήτων 10^{-3} – 10^{3} Hz η οποία επηρεάζεται από ποικίλες μεταφορές φορτίων και ηλεκτροχημικούς μηχανισμούς (Olhoeft, 1992a).

Βαρυτική μέθοδος (Gravity)

Στις διασκοπήσεις με τη βαρυτική μέθοδο μετράται η επιτάχυνση της βαρύτητας με βαρυτόμετρα στην επιφάνεια της γης. Ο στόχος είναι να εντοπιστεί η επίδραση που προκαλείται στο βαρυτικό πεδίο από τη μεταβολή της πυκνότητας στα γεωλογικά στρώματα. Η ένταση του πεδίου βαρύτητας ή η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης εξαρτάται κύρια από το μέγεθος και το σχήμα καθώς και από τη μάζα και την ταχύτητα περιστροφής της γης. Επομένως, πριν από την ερμηνεία των βαρυτικών δεδομένων επιβάλλεται η πραγματοποίηση διορθώσεων στις μετρήσεις, προκειμένου να αντισταθμιστούν αυτές οι επιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η διάκριση πολύ μικρών αλλαγών στην επιτάχυνση της βαρύτητας, οι οποίες προσδίδουν πληροφορίες για την πλευρική μεταβολή της πυκνότητας των πετρωμάτων (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

Το NMR (Nuclear Magnetic Resonance) είναι ένα καινούργιο εργαλείο διαγραφιών που εφαρμόζεται τα τελευταία δέκα χρόνια κυρίως στις γεωτρήσεις πετρελαίου. Θεωρείται μια αξιόπιστη τεχνολογία η οποία ακόμα εφαρμόζεται συμπληρωματικά των κλασικών διαγραφιών που χρησιμοποιούνταν μέχρι σήμερα. Το εργαλείο NMR αποδεικνύεται ότι όχι μόνο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά δίνει στοιχεία ώστε να αποφευχθούν λάθος εκτιμήσεις που θα προέκυπταν κατά την ερμηνεία των δεδομένων από άλλα εργαλεία.

Η μέθοδος του NMR εκμεταλλεύεται το ότι η ελεύθερη μετάπτωση των νουκλεονίων του υδρογόνου σε ένα μαγνητικό πεδίο έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση μαγνητικής ορμής (μ) και γωνιακής ορμής (J) στα νουκλεόνια. Το ενεργό μέρος του εργαλείου δεν είναι παρά ένα πηνίο το οποίο διαρρέεται από μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικών φορτίων. Λόγω της ελικοειδούς μορφής του πηνίου παράγεται ένα μαγνητικό πεδίο H_p περίπου κάθετο στο μαγνητικό πεδίο της γης H_e. Μετά από μια χρονική περίοδο διακόπτεται η παροχή ηλεκτρικών φορτίων στο πηνίο. Τότε το ίδιο ή κάποιο διαφορετικό πηνίο χρησιμοποιείται για να καταγράψει το επαγόμενο σήμα από τα ευθυγραμμισμένα πρωτόνια. Το σήμα που εκπέμπεται από το πηνίο έχει συχνότητα περίπου 2KHz και αποσβένεται κατά τη διάδοσή του στο σχηματισμό με ρυθμό 50 msec. Όσο περνάει ο χρόνος η φάση αρχίζει να μεταβάλλεται και το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου H_p προσανατολίζεται τείνοντας να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο της γης.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει ότι κάθε μία από τις γεωφυσικές μεθόδους εφαρμόζεται για συγκεκριμένο σκοπό, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες και τον επιθυμητό στόχο της μελέτης. Στα πλαίσια μίας γεωφυσικής διασκόπησης πραγματοποιούνται κατά κύριο λόγο οι περισσότερες μέθοδοι.

2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών περιβαλλοντικής γεωφυσικής

Συνολικά οι γεωφυσικές μέθοδοι για την ανίχνευση ρύπανσης (πετρέλαιο, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, μεταλλικά συντρίμμια, χώροι υγειονομικής ταφής κ.α.), εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία και είναι σε θέση να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες. Παράλληλα, πρόσφατες μελέτες Περιβαλλοντικής Γεωφυσικής, παρουσιάζουν βελτιωμένες τεχνικές απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται περιλήψεις δημοσιεύσεων (1990-2004) πάνω σε μελέτες που αφορούν εφαρμογές της γεωφυσικής τεχνολογίας για την ανίχνευση, χαρτογράφηση και οριοθέτηση περιοχών διαφορετικών τύπων ρύπανσης στο υπέδαφος. Προκειμένου να διευκολυνθεί ο αναγνώστης, ώστε να γίνει κατανοητή η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, οι δημοσιεύσεις κατηγοριοποιήθηκαν σε δύο είδη:

- Σε ελεγχόμενες πειραματικές μελέτες

- Σε έρευνες πεδίου σε περιοχές υφιστάμενης ρύπανσης

2.5 Πειράματα ελεγχόμενης ροής ρύπων

Τα ελεγχόμενα πειράματα προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανομή της ρύπανσης μέσα σε συγκεκριμένο χώρο (free-vapor-dissolved phase). Μελέτες των Brewster και Orlando αποδεικνύουν τη συνεισφορά τους στη μελέτη των ιδιοτήτων του υπεδάφους και στην περιγραφή της μετανάστευσης ρύπων NAPL. Πολλές φορές μάλιστα το πειραματικό στάδιο πραγματοποιείται ταυτόχρονα με αντίστοιχες μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στο εργαστήριο για επαλήθευση της επεξεργασίας.

Περιγραφή ρύπων που συναντώνται στη περιοχή μελέτης

Στη περιοχή μελέτης, η ρύπανση του υδροφορέα οφείλεται στους υδρογονάνθρακες, που προέρχονται από πετρελαιοειδή, όπως το BTEX και το MTBE. Γενικότερα, οι διαρροές σε δεξαμενές αποθήκευσης προϊόντων πετρελαίου, κυρίως σε διυλιστήρια και πρατήρια καυσίμων, εντείνουν το πρόβλημα της ρύπανσης του υδροφορέα. Οι διαρροές οφείλονται κυρίως σε πρόκληση οπών στο περίβλημα των δεξαμενών και σωληνώσεων, ιδιαιτέρως όταν αυτές είναι αρκετά παλαιές, είτε λόγω ατυχημάτων, είτε λόγω διάβρωσης του υλικού. Στη δεύτερη περίπτωση, η διαρροή μπορεί να προέρχεται από μια μικρή τρύπα της δεξαμενής, είτε στη δυσμενέστερη περίπτωση υπογείων σωληνώσεων, οπότε το πρόβλημα δεν είναι ορατό και ο ρύπος με την επίδραση των δυναμικών κινήσεων του υδρολογικού κύκλου, συγκεντρώνεται στον υδροφορέα και εντοπίζεται μέσω πηγαδιών παρατήρησης, αφού περάσει σημαντικό χρονικό διάστημα από την εκκίνησή της.

Η εμφάνιση ελαιωδών στον υδροφόρο ορίζοντα είναι ορισμένες φορές ο μόνος τρόπος για να διαπιστωθεί κάποια διαρροή, κυρίως σε περιπτώσεις υπογείων αγωγών. Τα προϊόντα του διυλιστηρίου ανήκουν στην κατηγορία των υγρών σε μη υδατώδη φάση (Non Aqueous Phase Liquids - NAPLs), τα οποία δε διαλύονται εντός του υπόγειου νερού. Αυτά τα μη αναμειγνυόμενα ρευστά έχουν διαφορετική συμπεριφορά και διαφορετικές ιδιότητες όταν βρίσκονται εντός του υπεδάφους, σε σύγκριση με τα ρευστά, που αναμειγνύονται με το υπόγειο νερό. Στην περίπτωση, που παρατηρηθεί ανάμειξη κάποιου ρευστού με το υπόγειο νερό,

τα συστατικά της ζώνης ρύπανσης είναι συνήθως δύσκολο να διακριθούν με γυμνό μάτι και ταξιδεύουν μαζί με το υπόγειο νερό. Το αντίθετο συμβαίνει με τα NAPLs, τα οποία είναι ορατά, βρίσκονται σε μορφή ελαίου και η μετακίνησή τους εξαρτάται από τη βαρύτητα, την άνωση και τις δυνάμεις τριχοειδών φαινομένων. Από τη στιγμή που τα NAPLs εισέλθουν στο έδαφος, μπορούν να κινηθούν σε αυτό ανάλογα με τις ιδιότητές τους και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Έτσι, τα NAPLs χωρίζονται σε αυτά που κινούνται ως αέρια, ως ελεύθερη μη υδατική φάση και ως διαλυμένη στο υπόγειο νερό φάση (Αϊβαλιώτη Μ., 2005).

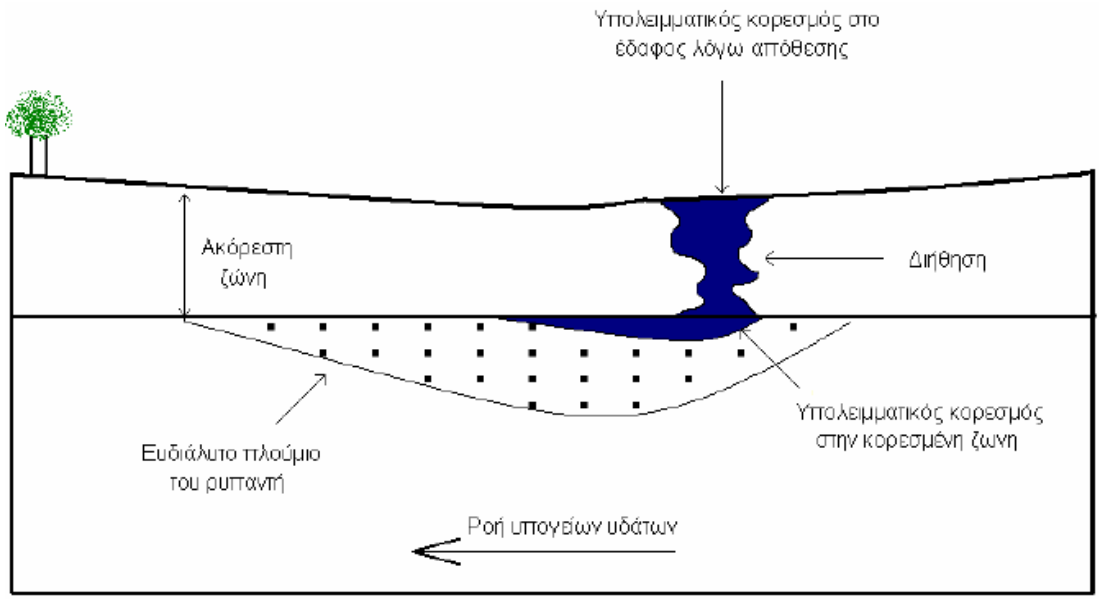
Βασικοί τύποι NAPLs

Οι βασικοί τύποι NAPLs είναι:

- LNAPLs, με πυκνότητα μικρότερη αυτής του ύδατος (επιπλέοντα),
- DNAPLs, με πυκνότητα μεγαλύτερη αυτής του ύδατος.

Η συμπεριφορά των NAPLs εντός του υπεδάφους ποικίλει. Τα ελαφρά (LNAPLs) ταξιδεύουν εντός της ακόρεστης ζώνης με καθοδική πορεία και επιπλέουν επί του υδροφόρου ορίζοντα, δημιουργώντας ταυτόχρονα υπολειμματικό κορεσμό, τόσο στην ακόρεστη ζώνη, όσο και στην κορεσμένη (Σχήμα 2.1).

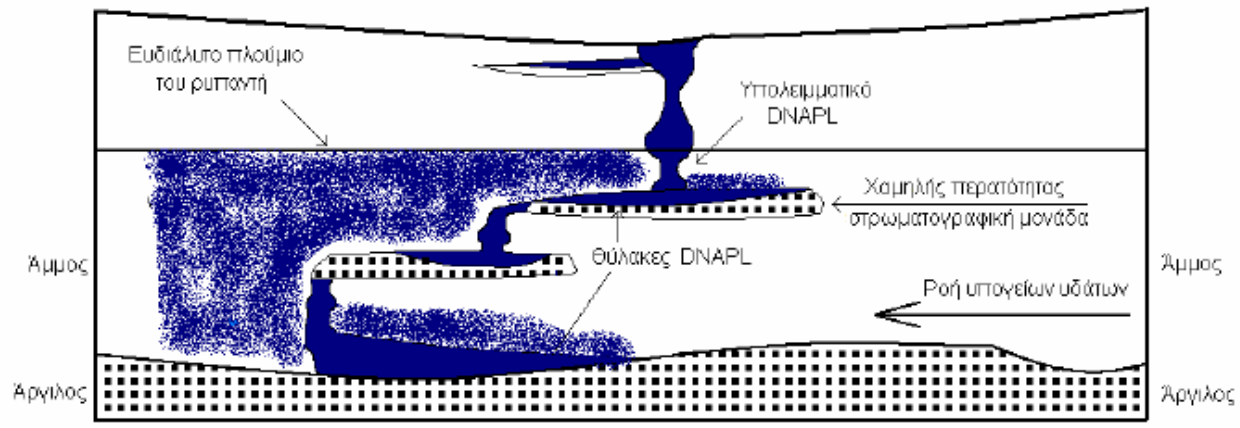
Ο υπολειμματικός κορεσμός (residual saturation) είναι μια από τις κύριες παραμέτρους σε προβλήματα εξυγίανσης υπογείων υδάτων και ορίζεται ως το κλάσμα του ολικού όγκου των πόρων που καταλαμβάνεται από υπολειμματικό NAPL.



Σχήμα 2.1: Συμπεριφορά LNAPLs στο υπέδαφος (Bedient et al., 1994)

Τα βαρύτερα προϊόντα (DNAPLs) ταξιδεύουν εντός της κορεσμένης ζώνης, με καθοδική πορεία, δημιουργώντας θύλακες σε στρώματα χαμηλής περατότητας, επί των οποίων επικάθονται (Σχήμα 2.2).

Τα NAPLs εισέρχονται εντός του εδαφικού υλικού λόγω των υδροστατικών πιέσεων που εξασκούν τα ίδια στο πορώδες υλικό. Αρχικά, τα NAPLs εμφανίζονται υπό συνεχή μορφή από την πηγή ρύπανσης και χαρακτηρίζονται ως NAPLs «ελεύθερης φάσης» (free phase NAPLs). Με τη χρονική εξασθένιση της πηγής, τα NAPLs είναι δυνατόν να αφήσουν την «ελεύθερη φάση» και να εμφανίζονται υπό μορφή φυσαλίδων-σταγόνων, εντός του πορώδους υλικού.



Σχήμα 2.2: Συμπεριφορά DNAPLs στο υπέδαφος (Bedient et al., 1994)

Η μελέτη των NAPLs έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή, λόγω της δυσκολίας εξυγίανσης εδαφών με υπολειμματικά NAPLs, τα οποία δρουν εντός του υπεδάφους ως συνεχείς πηγές ρύπανσης, που διαλύονται εντός του υπογείου ύδατος.

Η βενζίνη, το diesel, η κηροζίνη και γενικά όλοι οι τύποι καυσίμων αποτελούνται από υδρογονάνθρακες, οι οποίοι είναι ελαφρύτεροι του νερού και ανήκουν στα LNAPL's, ενώ περιέχουν σε αρκετά μεγάλο ποσοστό τη συστάδα ενώσεων, που είναι γνωστή ως BTEX (Μουχταρόπουλος Π. 2005).

BTEX

Το BTEX αποτελεί αρκτικόλεξο για τις ουσίες βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλο-βενζόλιο και ξυλόλιο (Benzene, Toluene, Ethyl-benzene, Xylenes). Οι ενώσεις αυτές αποτελούν μονοκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, είναι εξαιρετικά πτητικές, υδατοδιαλυτές και παρουσιάζουν μεγάλη κινητικότητα.

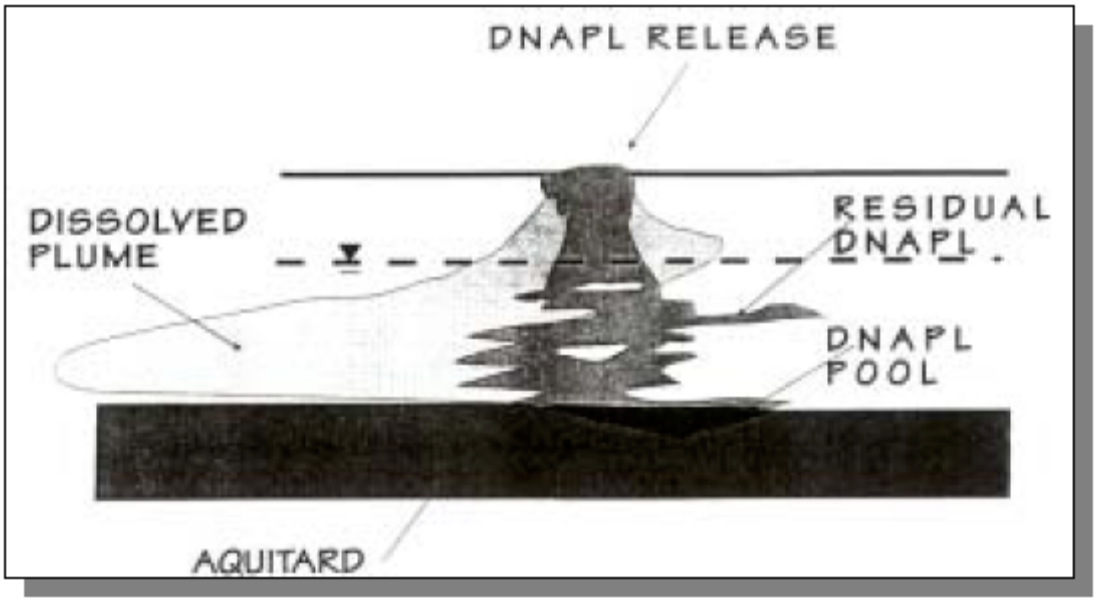
MTBE

Το MTBE (Methyl Tert-Butyl Ether) αποτελεί ένα ευδιάλυτο χημικό συστατικό, το οποίο παράγεται από τη χημική αντίδραση της μεθανόλης και του ισοβουτυλενίου και χρησιμοποιείται κυρίως σαν πρόσθετο οξυγόνου καυσίμων μηχανών εσωτερικής καύσης. Στην οργανική χημεία συναντάται σαν φτηνός διαλύτης με ιδιότητες παραπλήσιες του δι-αιθυλ-αιθέρα, αλλά με υψηλότερο σημείο βρασμού και μικρότερη διαλυτότητα στο νερό.

2.5.1 Παρατήρηση μετανάστευσης ρύπων DNAPL σε ελεγχόμενη διαρροή με τη βοήθεια γεωφυσικών μεθόδων (Brewster et al., 1995)

Στην καναδική βάση ενόπλων δυνάμεων κοντά στο Toronto διεξήχθη ελεγχόμενο πείραμα σε χώρο διαστάσεων 9m x 9m x 3,3m. Περίπου 770lt τετραχλωροαιθυλενίου (PCE) ελευθερώθηκαν εντός της απομονωμένης περιοχής και το πείραμα παρακολουθήθηκε για 984 ώρες με τη βοήθεια πληθώρας γεωφυσικών μεθόδων.

Σκοπός του ελεγχόμενου αυτού πειράματος είναι η ανίχνευση και παρατήρηση ρύπανσης DNAPL κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς και η περιγραφή της μετανάστευσης και τελικής κατανομής της ελεγχόμενης ρύπανσης.



Σχήμα 2.3*: Σχηματική αναπαράσταση ρύπανσης DNAPL μέσα σε πορώδες μέσο. Η ρύπανση κατευθύνεται προς τα κάτω, αφήνοντας ένα ποσοστό της μέσα στους πόρους (residual phase) και παράλληλα σχηματίζοντας λίμνες ρύπανσης (pool phase) μέσα σε περισσότερο αδιαπέρατες επιφάνειες (Brewster et al., 1995)*

Οι ρύποι DNAPL, όταν ελευθερωθούν μέσα στην κορεσμένη ζώνη ταμιευτήρα, μεταναστεύουν αρχικά προς τα κάτω εξαιτίας της μεγαλύτερής τους πυκνότητας και έπειτα επεκτείνονται οριζόντια. Κατά τη μετανάστευση τέτοιου είδους ρύπανσης, ένα ποσοστό της μάζας της συγκρατείται μέσα στους πόρους του εδάφους είτε σαν «αποσυνδεδεμένη παραμένουσα φάση» (residual phase) είτε σαν «συνδεδεμένη φάση» που σχηματίζει λίμνες ρύπανσης (pool phase).

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό σχήμα που απεικονίζει τις δύο φάσεις των ρύπων DNAPL.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα αναφορά χρησιμοποιείται ο όρος pool phase για την περιγραφή των συγκεντρώσεων σε τετραχλωροαιθυλένιο. Παρόλα αυτά, δεν είναι πάντα δυνατό να διακρίνουμε εάν η συγκεκριμένη φάση είναι ομογενής ή ετερογενής, εξαιτίας της όχι και τόσο καλής διακριτικής ικανότητας που παρουσιάζουν οι γεωφυσικές μέθοδοι (όχι καλύτερη από 8cm).

Η γεωλογία της περιοχής περιλαμβάνει ένα στρώμα 3,3m από καλή έως μέτρια διαβαθμισμένη άμμο, το οποίο ακολουθείται από 3m δύσκαμπτης αργίλου. Το στρώμα αργίλου ακολουθείται με τη σειρά του από μία άλλη ζώνη αργίλου 13m, στην οποία παρεμβάλλονται ψαμμιτικά τμήματα μεγάλου πάχους και διασκορπισμένοι ψαμμιτικοί φακοί. Τα αργιλικά ορυκτά, από τα οποία αποτελείται κυρίως αυτό το στρώμα, είναι μοσχοβίτης και χλωρίτης με ίχνη από

καολινίτη και σμεκτίτη. Ο ταμιευτήρας από ψαμμίτη δημιουργήθηκε από εναποθέσεις ιζημάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον και θεωρείται σχετικά ομογενής.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι προηγούμενο ελεγχόμενο πείραμα είχε πραγματοποιηθεί στην ίδια περιοχή, σε κάναβο διαστάσεων 3m x 3m. Στην περίπτωση αυτή έγινε έγχυση μικρότερου όγκου ρύπανσης (231lt τετραχλωροαιθυλενίου) με τον ίδιο τρόπο. Μία σύγκριση μεταξύ του πρώτου και δεύτερου πειράματος απέδειξε ότι επικρατούν τελείως διαφορετικοί ρυθμοί διήθησης και μετανάστευσης της ρύπανσης μεταξύ των δύο μελετών.

Μια σειρά γεωφυσικών διασκοπήσεων με γεωραντάρ (200MHz) προηγήθηκε του δεύτερου πειράματος, έτσι ώστε να αποτυπωθούν η κατάσταση του υπεδάφους και η στρωματογραφία.

Ο χώρος που διεξήχθη το πείραμα περικλειόταν από διπλό τοίχο, προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν ρύπανση της γύρω περιοχής. Ένας εσωτερικός (9m x 9m) και ένας εξωτερικός τοίχος (10m x 10m) κατασκευασμένοι από χαλύβδινες ενώσεις θεμελιώθηκαν σε βάθος 0,6m (στεγανός γεωλογικός σχηματισμός). Αυτή η συνδεσμολογία λειτουργούσε ως σύνορο ενάντια σε τυχόν διαρροή. Οι τοίχοι κατασκευάστηκαν από χαλύβδινες ενώσεις, σχηματίζοντας μία δομή από πασσάλους 3,9m μέσα στο υπέδαφος. Οι ενώσεις μεταξύ των πασάλων διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να γεμίζουν με μπεντονίτη, προκειμένου να δημιουργούν μία στεγανή περιοχή.

Στο εσωτερικό του χώρου, η στάθμη του νερού διατηρήθηκε στα 15cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό επιτευχθεί ο ολοκληρωτικός κορεσμός της περιοχής με νερό.

Τα 770lt τετραχλωροαιθυλενίου εισήχθησαν στο κέντρο του χώρου διαμέσου ενός πλαστικού σωλήνα PVC διαμέτρου 6in. Ταυτόχρονα, το τετραχλωροαιθυλένιο διαποτίστηκε σε κόκκινη μπογιά ανθεκτική στο νερό, προκειμένου να διευκολυνθούν η οπτική αναγνώριση και οι φασματοφωτομετρικές μετρήσεις.

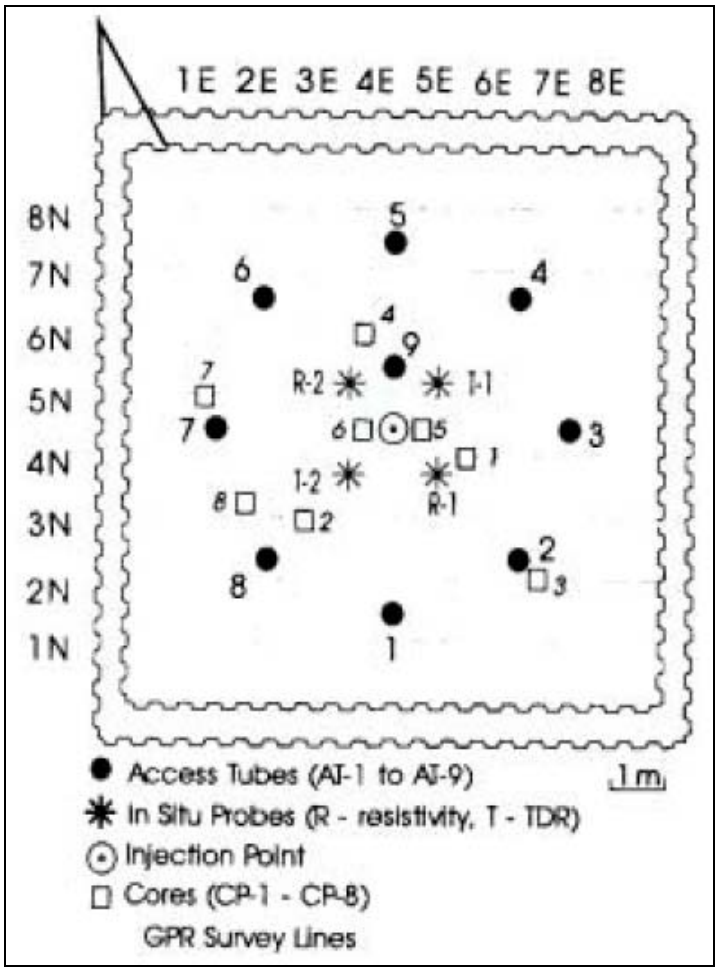
Κατά την πραγματοποίηση του πειράματος εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες γεωφυσικές μέθοδοι:

- Γεωραντάρ (ground penetrating radar)
- Μέθοδος ανάκλασης βασιζόμενη στην παράμετρο του χρόνου (time domain reflectometry)

- Μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης (in situ resistivity)
- Ανάλυση πυρήνων δειγματοληψίας (core analysis)
- Διαγραφίες νετρονίου (neutron logging)
- Διαγραφίες πυκνότητας (density logging).

Περίπου 1000 ώρες μετά την έναρξη του πειράματος ανακτήθηκε μια σειρά πυρήνων (CP-1 έως CP-8). Οι πυρήνες CP-1 έως CP-4 κόβονταν σε δείγματα των 5cm ο καθένας, ενώ οι υπόλοιποι (CP-5 έως CP-8) σε δείγματα των 8cm.

Το τετραχλωροαιθυλένιο που ανιχνευόταν σε κάθε δείγμα πυρήνα διοχετευόταν σε μεθανόλη, προκειμένου να πραγματοποιηθούν φασματοφωτομετρικές μετρήσεις σε μήκος κύματος 370nm. Το ποσοστό ρύπανσης μέσα στους πυρήνες μπορούσε εύκολα να εντοπιστεί βάσει καμπύλης αναφοράς (calibration curve) διαμορφωμένης ειδικά για τετραχλωροαιθυλένιο σε μεθανόλη.



***Σχήμα 2.4**: Σχέδιο που απεικονίζει τη μορφή του χώρου και τη διάταξη των σωλήνων μέτρησης (Brewster et al., 1995)*

Σε κύκλο ακτίνας 3m οκτώ σωλήνες ήταν εξίσου τοποθετημένοι γύρω από το κεντρικό σημείο έγχυσης τετραχλωροαιθυλενίου (Σχήμα 2.4). Αυτοί οι σωλήνες χρησιμοποιήθηκαν για διαγραφίες νετρονίου, πυκνότητας και μετρήσεις με γεωραντάρ. Δύο βυθοσκοπήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, δύο ανάκλασης και ένας ένατος σωλήνας τοποθετήθηκαν σε ακτίνα 1m από το σημείο έγχυσης.

Πληροφορίες από 16 γραμμές γεωραντάρ, τοποθετημένες ανά 1m, συλλέγονταν κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετρήσεων του πειράματος. Τα ίχνη του γεωραντάρ συλλέγονταν με βήμα διασκόπησης 5cm κατά μήκος των γραμμών αυτών. Τα δεδομένα καταγράφηκαν σε τρεις διαφορετικές συχνότητες: 200, 500 και 900MHz. Οι πληροφορίες με την κεραία των 200MHz αποκτήθηκαν με το όργανο EKKO IV, ενώ στα στοιχεία των 500 και 900MHz χρησιμοποιήθηκε το γεωφυσικό σύστημα SIR-7.

Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

Από τη στιγμή που ξεκίνησε το πείραμα, μία ολοκληρωμένη σειρά γεωφυσικών μετρήσεων πραγματοποιούνταν κάθε 8 ώρες. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι το τετραχλωροαιθυλένιο είχε δημιουργήσει μια λίμνη ρύπανσης πάνω σε στρώμα χαμηλής διαπερατότητας. Η λίμνη αυτή βρισκόταν σε βάθος 1m και κάλυπτε μία περιοχή μεγαλύτερη από $32m^2$. Κατά την κατακόρυφη πορεία της μετανάστευσης, το τετραχλωροαιθυλένιο σχημάτισε επίσης 8 μικρότερες εστίες ρύπανσης. Στο τέλος του πειράματος εκτιμήθηκε ότι ένα ποσοστό, περίπου 41% του ολικού τετραχλωροαιθυλενίου, παρέμενε εγκλωβισμένο στην πρώτη λίμνη ρύπανσης που δημιουργήθηκε.

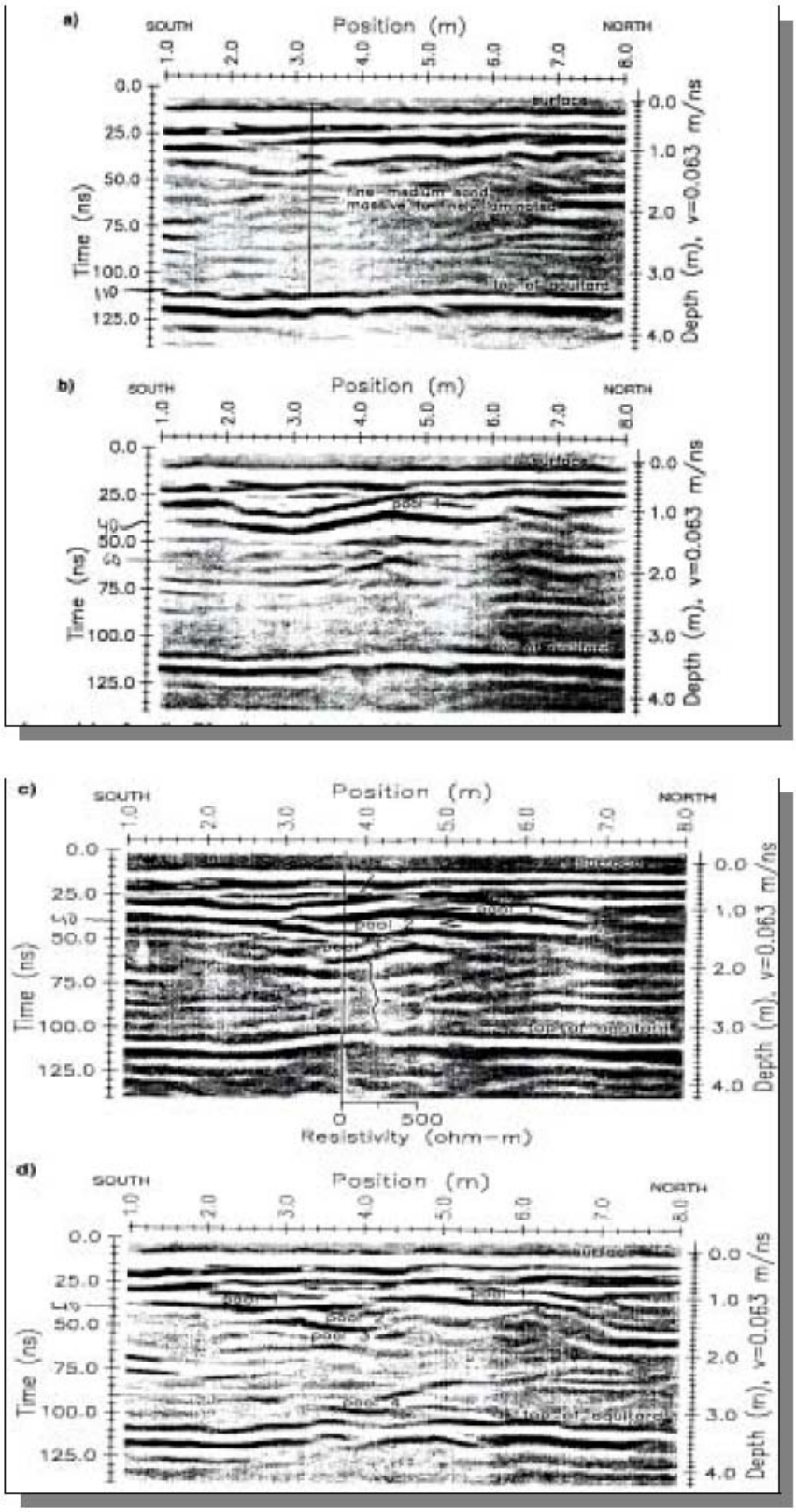
Από τα δεδομένα του γεωραντάρ, συμπεραίνουμε ότι το βάθος διείσδυσης του σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της διακριτικής του ικανότητας. Ο ταμιευτήρας στον πυθμένα είναι σαφώς ορατός από τις πληροφορίες που λαμβάνουμε με την κεραία των 200MHz (σε βάθος 3,3m). Αντίθετα, αυτό δεν συμβαίνει για τις συχνότητες των 500 και 900MHz.

Μία μοναδική οριζόντια συγκέντρωση τετραχλωροαιθυλενίου ανιχνεύεται σε βάθος 1m περίπου (200MHz). Αυτή η συγκέντρωση ρύπανσης διακρίνεται καθαρότερα με την επεξεργασία των 500MHz. Με μεγαλύτερη ευκρίνεια μάλιστα, στα στοιχεία των 900MHz φαίνεται ότι η ρύπανση δεν είναι μία ενιαία λίμνη,

αλλά αποτελείται στην πραγματικότητα από πολλαπλά λεπτά στρώματα. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 48% -100% των παραγόντων ρύπανσης ανιχνεύεται από το γεωραντάρ.

Στην ψαμμιτική περιοχή που διεξάγεται η έρευνα, τα δεδομένα των 200, 500 και 900MHz εμφανίζουν κατακόρυφη διακριτική ικανότητα 10, 4 και 2cm αντίστοιχα.

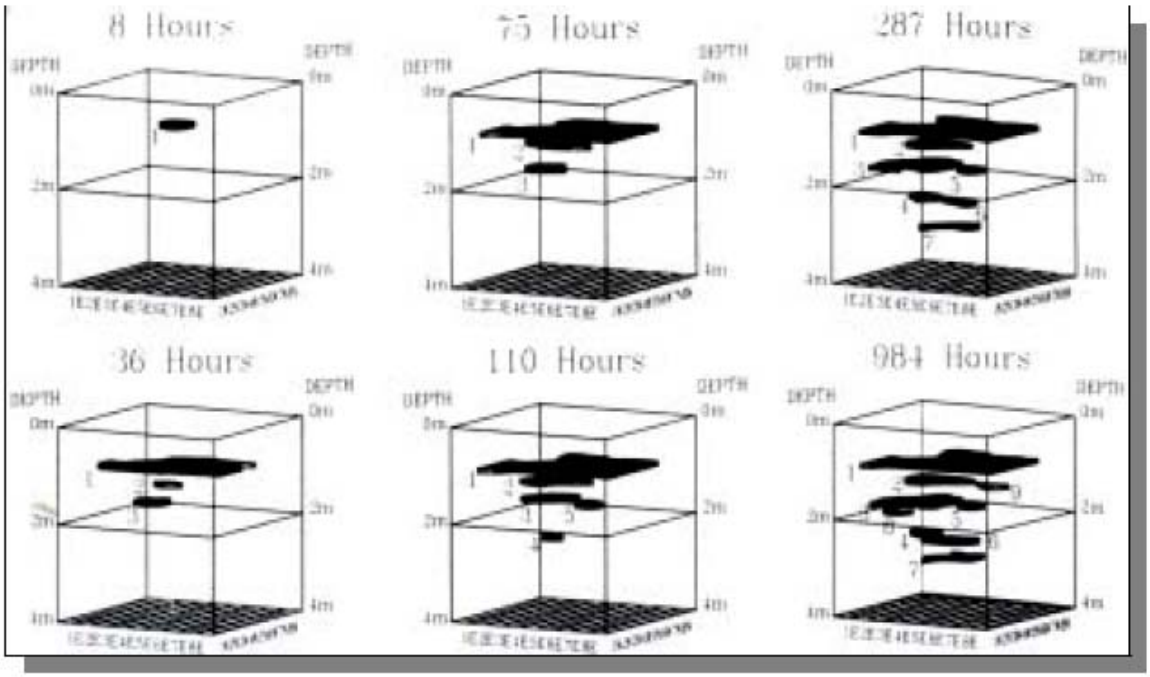
Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται διάφορες τομές που προκύπτουν από μετρήσεις με κεραία των 200MHz κατά μήκος της γραμμής Ε5. Οι μετρήσεις έγιναν πριν την έναρξη του πειράματος και 24, 110 και 984 ώρες αργότερα. Από όλες τις τομές συμπεραίνεται ότι ο ταμιευτήρας παρουσιάζεται σαν ισχυρή, συνεχής ανάκλαση σε βάθος 3,3m.



Σχήμα 253: *Δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη γραμμή E5: (a) πριν από την έκχυση τετραχλωροαιθυλενίου, (b) 24 ώρες μετά την έκχυση, (c) αργότερα από 110 ώρες, (d) μετά την πάροδο 984 ωρών από την έναρξη του πειράματος (Brewster et al., 1995)*

Μετά την πάροδο 110 ωρών από την έναρξη του πειράματος (Σχήμα 2.5c), μπορούν να διακριθούν στην τομή τρεις λίμνες. Η πρώτη λίμνη (pool) εντοπίζεται μεταξύ 25-40nsec και σε βάθος 0,9-1m. Ήδη η λίμνη αυτή έχει επεκταθεί σχεδόν σε όλο το χώρο.

Όσον αφορά τη δεύτερη και τρίτη λίμνη, αυτές εμφανίζονται σε βάθος 1,4m και 1,7m αντίστοιχα. Η δεύτερη λίμνη εκτείνεται περίπου 2m κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης, ενώ η τρίτη 1,5m κατά την οριζόντια διεύθυνση. Τα πλάτη των ανακλάσεων που προκύπτουν από τις λίμνες 2 και 3 είναι ασθενέστερα σε σχέση με την πρώτη λίμνη. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι το ποσοστό της ρύπανσης, που οφείλεται στο τετραχλωροαιθυλένιο, δεν είναι τόσο σημαντικό στη δεύτερη και τρίτη λίμνη.



Σχήμα 2.6*: Τρισδιάστατη ερμηνεία κατανομής ρύπανσης τετραχλωροαιθυλενίου (pool phase) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι λίμνες ρύπανσης εμφανίζουν νοτιοανατολικό προσανατολισμό (Brewster et al., 1995).*

Η τρισδιάστατη ερμηνεία της κατανομής σε τετραχλωροαιθυλένιο (Σχήμα 2.6) πραγματοποιήθηκε σε συγκεκριμένους χρόνους κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η ερμηνεία αυτή βασίζεται κυρίως σε μετρήσεις του γεωραντάρ με κεραία των 200MHz. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι η τρισδιάστατη ερμηνεία δηλώνει μονάχα την παρουσία ρύπανσης σε συγκεκριμένη περιοχή και δεν δίνει καμία πληροφορία για την ποσότητα, την περιεκτικότητα ή το πάχος της ρυπογόνου μάζας. Με τον τρόπο αυτό, επομένως, εντοπίζονται μονάχα οριζόντιες,

συνεχείς συγκεντρώσεις και όχι κάθετες ζώνες παραμένουσας ρύπανσης (αυτές ανιχνεύονται με μεθόδους σεισμικής ανάκλασης και ανάλυση πυρήνων).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του γεωραντάρ και της ανάλυσης των πυρήνων δειγματοληψίας, καθώς οι λίμνες ρύπανσης που εμφανίζονται είναι περίπου κοινές και για τις δύο μεθόδους. Συμπερασματικά, από το συνδυασμό όλων των μεθόδων βρέθηκε ότι το κέντρο της ρύπανσης μετακινήθηκε συνολικά 0,5m νοτιοανατολικά και 1,3m προς τα κάτω. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι φυσικοί ετερογενείς παράγοντες, ακόμα και σε σχετικά ομογενές περιβάλλον, μπορούν να προκαλέσουν μία πλευρική εξάπλωση ρύπανσης DNAPL σε πολύ μεγάλες περιοχές του υπεδάφους.

2.5.2 Multi-Offset, Multi-Polarization Acquisition and Processing of GPR Data: Πείραμα ελεγχόμενης ροής DNAPL (Bradford et al., 2004)

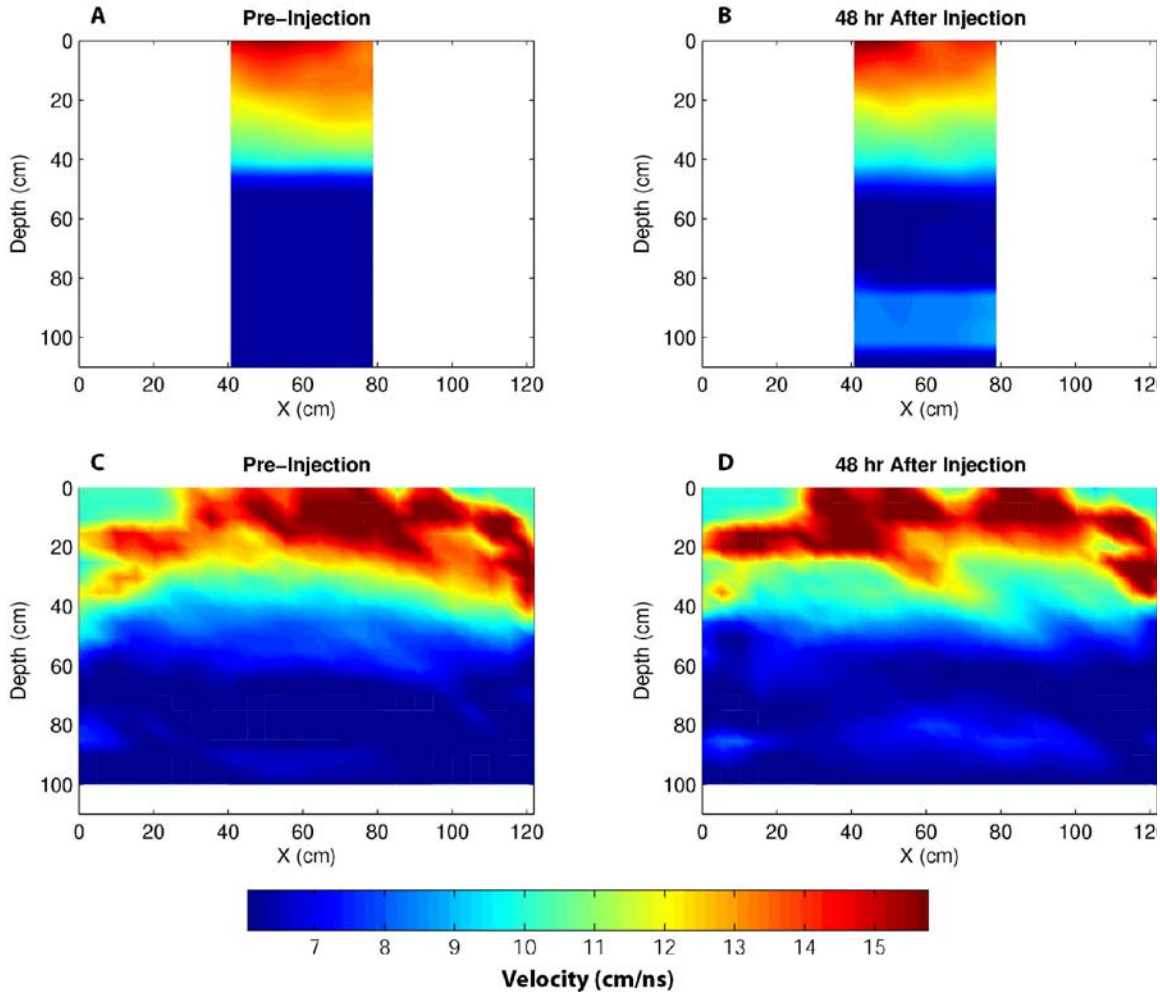
Τα μη υδατικής φάσης υγρά (NAPL) και πιο συγκεκριμένα αυτά με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού δηλαδή τα DNAPL, τυπικά έχουν πολύ μικρότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα και διηλεκτρική σταθερά από το νερό. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του υπεδάφους μπορούν να αλλάξουν σημαντικά όταν οι ρύποι αυτοί αντικαταστήσουν το νερό μέσα στους πόρους του εδάφους. Το γεωραντάρ (GPR) είναι ευαίσθητο στις αντιθέσεις της διηλεκτρικής σταθεράς και παρέχει τη δυνατότητα να προσδιοριστούν οι ζώνες με χαμηλή διηλεκτρική σταθερά που συνδέονται με την παρουσία των DNAPL.

Για την εξέταση των τρισδιάστατων πολλαπλών τεχνικών του GPR στον προσδιορισμό των ανωμαλιών διαπερατότητας που προέρχονται από τα DNAPL, πραγματοποιήθηκε ένα μικρό (107cm x 122cm) πείραμα ελεγχόμενης ροής DNAPL. Το πείραμα έλαβε χώρα σε μια κυλινδρική δεξαμενή πολυαιθυλενίου, όπου τοποθετήθηκε χονδρόκοκκη άμμος και μια πολύ λεπτή στρώση αμμοχάλικων στην βάση της διάταξης. Στην ζώνη λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια εκχύθηκαν 20 λίτρα χλωριωμένου διαλύματος, όπου και παρακολουθήθηκε η κίνηση της ρύπανσης μέσω της κεκορεσμένης ζώνης νερού στο κατώτατο σημείο της δεξαμενής.

Συλλέχθηκαν πλήρη δεδομένα από διαφορετικές τεχνικές συλλογής δεδομένων και επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένων κεραίων γεωραντάρ 900 MHz, τρισδιάστατα σύνολα δεδομένων σε TE και TM πολώσεις, δυσδιάστατα

δεδομένα μετάδοσης γεωραντάρ, μετρήσεις γεωραντάρ μέσα σε γεώτρηση (TDOR) και τέλος εδαφολογικά δείγματα για τη χημική ανάλυση.

Η απεικόνιση της τομογραφίας ΤΕ πολωμένων δεδομένων, καθώς και η τομογραφία των στοιχείων μετάδοσης, αποκαλύπτουν σημαντικές ανωμαλίες ταχύτητας που συνδέονται με συγκέντρωση DNAPL περίπου 40%. Σε αυτή την έρευνα αποδεικνύεται ότι αν πραγματοποιηθεί λεπτομερής ανάλυση σε πολλά βάθη και σε πολλαπλές πολώσεις στα δεδομένα του γεωραντάρ (GPR), τότε βελτιώνεται η δυνατότητα υπολογισμού των ανωμαλιών στην διηλεκτρική σταθερά.

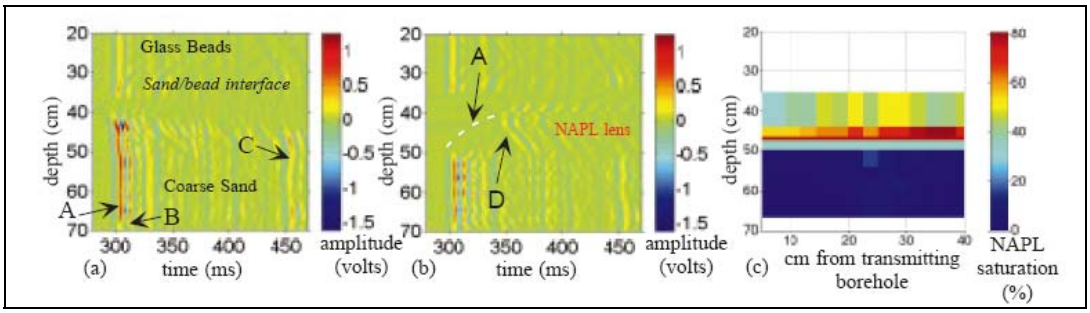


***Σχήμα 2.7**: Μοντέλα ταχύτητας πριν και μετά την έκχυση για την Line 4 με τομογραφία ανάκλασης (reflection tomography) επιφανειακών δεδομένων (A & B), και τομογραφία μετάδοσης (transmission tomography) δεδομένων (C & D). Η κάλυψη των επιφανειακών δεδομένων είναι περιορισμένη στο κέντρο της δεξαμενής, ενώ αντίθετα τα δεδομένα της τομογραφίας (transmission) καλύπτουν όλο το πλάτος. Και οι δύο μέθοδοι μέτρησαν παρόμοια κατανομή στην ταχύτητα, με ανάλογη αύξηση σε αυτή μέσα στην στη ζώνη των DNAPL. Μόνο η τομογραφία (transmission) μέτρησε μια σημαντική αύξηση της ταχύτητας στην κορεσμένη ζώνη κοντά στο σημείο έκχυσης των ρύπων. Και από τις δύο μεθόδους προέκυψε μικρή αύξηση στην ταχύτητα η οποία ήταν συνδεδεμένη με τα υπολείμματα των ρύπων DNAPL πάνω από την κορεσμένη ζώνη (Bradford et al., 2004).*

2.5.3 Ακουστική ανίχνευση μη αναμίξιμων υγρών μέσα σε άμμο (Geller et al., 2002)

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα μετάδοσης κυμάτων P με συχνότητα 90 kHz, σε ένα κουτί με κορεσμένη σε νερό άμμο διαμέτρου 61 cm και ύψους 76 cm, πριν και μετά από την έκχυση NAPL (n-δωδεκάνιο). Στο ένα πείραμα το NAPL εισήχθηκε στην διάταξη σε μορφή φακού περιορισμένο από ένα στρώμα χαμηλής διαπερατότητας και στο δεύτερο πείραμα θεωρήθηκαν κατάλοιπα NAPL πίσω από την επιφάνεια ροής των ρύπων.

Οι ρύποι προκάλεσαν σημαντικές αλλαγές στους χρόνους διαδρομής και στα πλάτη των πρώτων αφίξεων και συντέλεσαν στην δημιουργία ανακλώμενων κυμάτων που φτάνουνε μετά τα απευθείας κύματα. Οι χωρικές διακυμάνσεις στην συγκέντρωση του NAPL εντοπίστηκαν, μετά από εκσκαφή στην διάταξη στο τέλος του πειράματος, στα ίδια σημεία όπου υπήρξαν μεταβολές στα πλάτη και στους χρόνους διαδρομής των κυμάτων P.

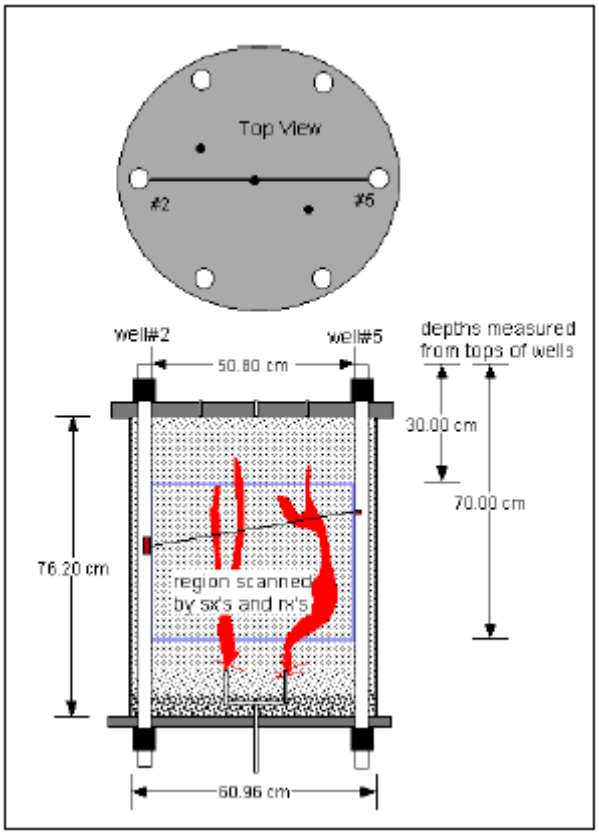


Σχήμα 2.8: Τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος για ανίχνευση φακών ρύπανσης NAPL Τα βάθη που αναφέρονται είναι από την κορυφή του σημείου εισαγωγής των φακών το οποίο εκτείνεται 11.4cm από την κορυφή του φακού. (a) Διασκόπηση του κορεσμένου σε νερό άμμου. Τα βέλη A, B και C δηλώνουν τον χρόνο της πρώτης άφιξης, την ανάκλαση του τοιχώματος της δεξαμενής που βρισκόταν παρακείμενα από το σημείο εισαγωγής και την πλευρική ανάκλαση από την δεξαμενή, (b) Διασκόπηση που ακολουθεί το σημείο που τοποθετήθηκε ο ρύπος. Το βέλος D δηλώνει την δεύτερη άφιξη. (c) Η κατανομή του ρύπου όπως αυτή φάνηκε μετά από εκσκαφή στην δεξαμενή (Geller et al., 2002)..

Οι μεταβολές της τάξεως των 4% στην περιεκτικότητα σε NAPL ήταν ανιχνεύσιμες ενώ πολύ ευδιάκριτη ήταν η περιεκτικότητα από 40 έως 80% μέσα στους φακούς της ρύπανσης σε ακουστικές συχνότητες (acoustic frequencies). Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι μικρές συγκεντρώσεις NAPL είναι πιο εύκολα ανιχνεύσιμες με τα πλάτη παρά με τους χρόνους διαδρομής, παρόλα αυτά η σχέση μεταξύ των αλλαγών στα πλάτη και στις συγκεντρώσεις του ρύπου είναι πιο πολύπλοκες από αυτές της ταχύτητας.

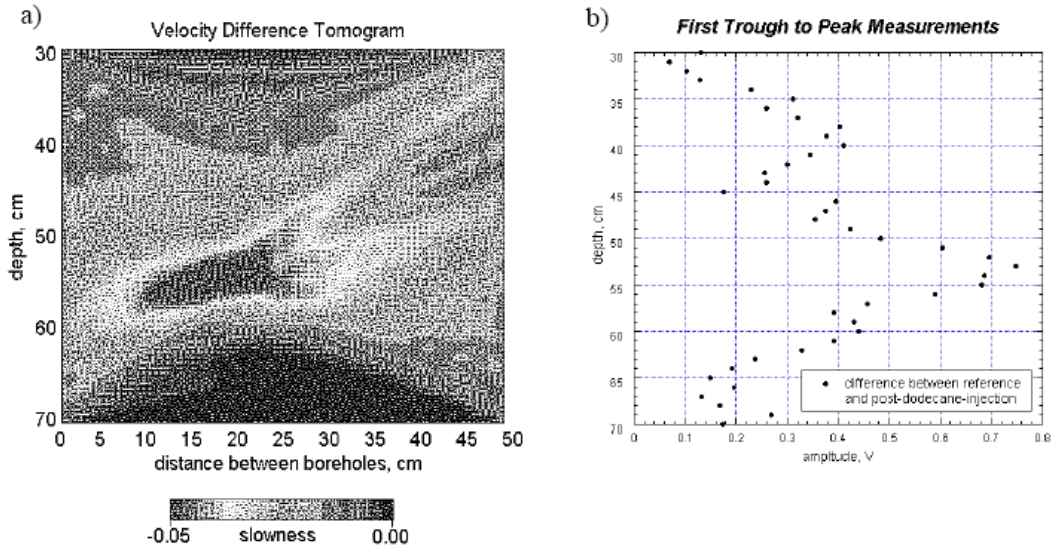
2.5.4 Ακουστική ανίχνευση μη αναμίξιμων υγρών μέσα σε στρώματα άμμου (Kowalsky et al., 1998)

Προκειμένου να διερευνηθεί η ακουστική ορατότητα (acoustic visibility) των NAPL σε εδάφη χαμηλής συνοχής (άμμος), πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε ένα κελί με κορεσμένη σε νερό άμμο διαμέτρου 0.60m (Σχήμα 2.9). Συλλέχθηκαν δεδομένα πριν και μετά από την έκχυση n-δωδεκάνιο που εισήχθηκε από την βάση του κελιού.



Σχήμα 2.9*: Η εργαστηριακή διάταξη(Kowalsky et al., 1998)*

Στα πειράματα αυτά αποδείχθηκε ότι το δωδεκάνιο παρουσιάζει μεγάλη ακουστική ευαισθησία (acoustic sensitivity) στην μετάδοση του πλάτους των κυμάτων P (μείωση μέχρι 65%) και μικρότερη ακουστική ορατότητα (acoustic visibility) για την ταχύτητα διάδοσης (μείωση μέχρι 2%). Οι τομογραφίες μεταβολής της ταχύτητας ήταν επιτυχημένες αλλά περιορισμένης ανάλυσης και απεικόνιζαν τις περιοχές στο κελί με χαμηλές ταχύτητες κυμάτων. Στις θέσεις αυτές υπήρχε δωδεκάνιο όπως αποδείχθηκε μετά από εκσκαφή της διάταξης στο τέλος του πειράματος.



Σχήμα 2.10*: Η τομογραφία της ταχύτητας (a) αποκαλύπτει μια ζώνη μικρή ταχύτητας στα 50 – 60 cm βάθος στην οποία παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες διαφορές στα πλάτη στα δεδομένα πριν και μετά την έκχυση (b) (Kowalsky et al., 1998).*

2.5.5 Προσδιορισμός και χαρτογράφηση του βαθμού κορεσμού DNAPL από δεδομένα γεωραντάρ (Sneddon et al., 2000)

Με σκοπό την μοντελοποίηση της ροής του ρευστού DNAPL, καθορίστηκαν και ταξινομήθηκαν τα δεδομένα GPR μετά την έκχυση των ρύπων στην υπό εξέταση περιοχή. Το 1991 σε ένα πείραμα ελεγχόμενης ροής ρύπων στο υπέδαφος, στην στρατιωτική βάση Borden, πραγματοποιήθηκε έκχυση τριχλωροεθυλένιου (PCE), ένας κοινός ρύπος DNAPL. Μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση και τον εντοπισμό της ρυπασμένης ζώνης ήταν το γεωραντάρ με κεραίες 500-MHz για περίοδο 340 ωρών. Σε αυτή την μελέτη παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο η κυματομορφή των δεδομένων αυτών και η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς αντίστοιχα με το βάθος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί, να καθοριστεί και να χαρτογραφηθεί η ροή του ρύπου ανά ώρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την επαναληψιμότητα της Bruggeman-Hanai-Sen (BHS) mixing formula (2.1).

$$\phi = \frac{\left(\varepsilon^*_{matrix} - \varepsilon^*_{comp}\right)\left(\varepsilon^*_{fluid} / \varepsilon^*_{comp}\right)^C}{\left(\varepsilon^*_{matrix} - \varepsilon^*_{fluid}\right)} \tag{2.1}$$

Όπου,

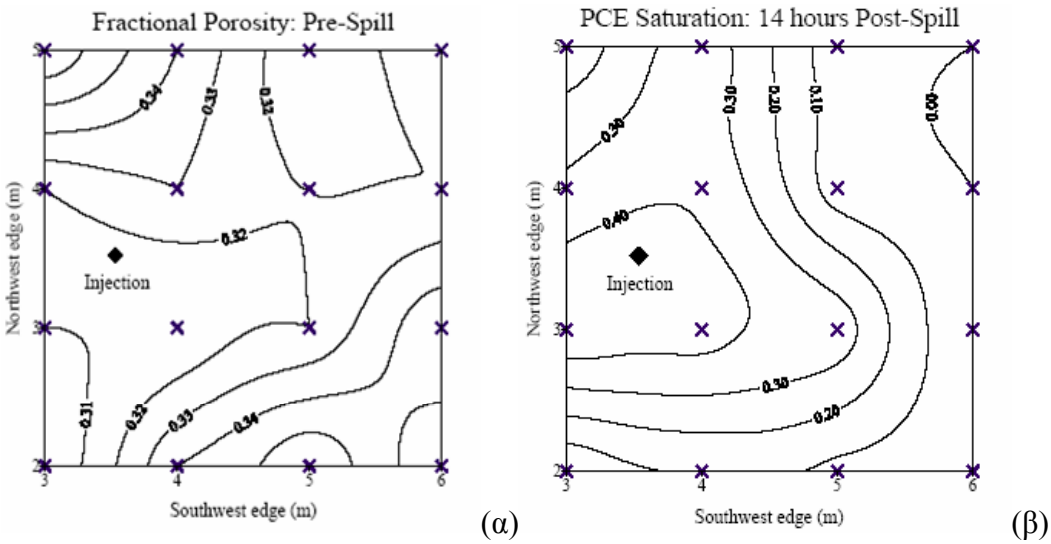
φ = fractional porosity

ε^*_{matrix} = complex relative dielectric permittivity of the matrix

ε^*_{fluid} = complex relative dielectric permittivity of the fluid

ε^*_{comp} = complex relative dielectric permittivity of the composite

C = shape factor (1/3 for spherical grains).



Σχήμα 2.11: (α) Οι ισοϋψείς παρουσιάζουν το υπολογισμένο ολικό πορώδες στο δεύτερο στρώμα, πριν από την έκχυση ρύπου. (β) Οι ισοϋψείς παρουσιάζουν το υπολογισμένο ολικό πορώδες στο δεύτερο στρώμα, 14 ώρες μετά από την έκχυση ρύπου(Sneddon et al., 2000).

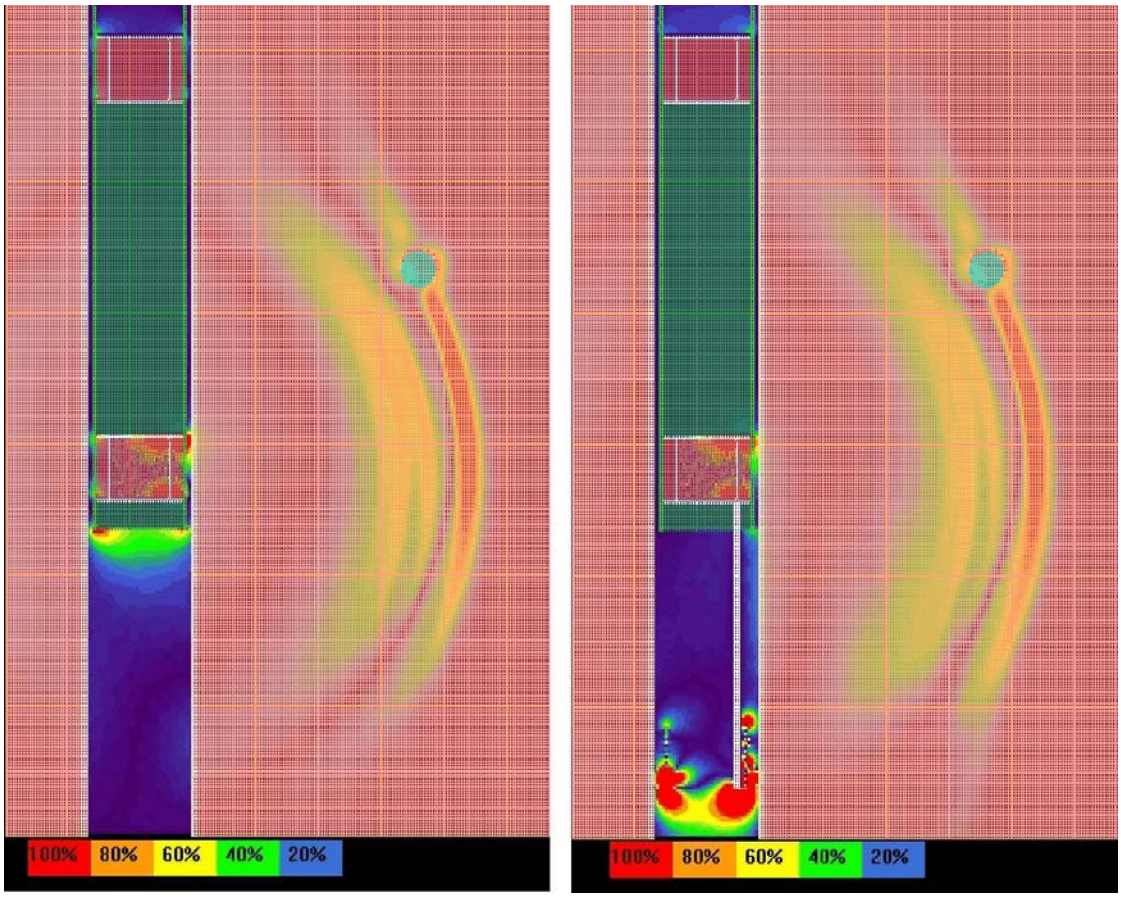
2.5.6 Ανίχνευση DNAPL με υψηλής ευκρίνειας γεωραντάρ για διαγραφίες (DBOR) (Craig et al., 2003)

Το U.S. Geological Survey ανάπτυξε ένα κατευθυνόμενο γεωραντάρ για γεωτρήσεις (DBOR) για υψηλής ανάλυσης εικόνες γύρω από την γεώτρηση. Πραγματοποιήθηκαν φυσική και αριθμητική προσομοίωση για να εκτιμηθεί η ικανότητα αυτού του οργάνου στην ανίχνευση και στην χαρτογράφηση DNAPLs κοντά σε γεωτρήσεις.

Η φυσική προσομοίωση έγινε σε μια δεξαμενή με πυριτική άμμο κορεσμένη σε νερό και η ρύπανση αποτελούταν ο από παραφίνη και πετρέλαιο αναμεμιγμένο με άμμο. Το μίγμα των ρύπων με την άμμο σφραγίστηκε σε πλαστικές σακούλες σε διάφορα σχήματα και μεγέθη. Οι σακούλες αυτές τοποθετήθηκαν μέσα στην δεξαμενή σε ποικίλες αποστάσεις με διαφορετικούς προσανατολισμούς, κοντά στην γεώτρηση.

Από αυτή την προσομοίωση προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι ορθογώνιοι και οι χοντροί με σφηνοειδές σχήμα στόχοι που βρίσκονταν κοντά στην γεώτρηση, απεικονίστηκαν πολύ καλά. Οι χοντροί αλλά και οι λεπτοί στόχοι που βρίσκονταν σε μεγαλύτερη απόσταση από την γεώτρηση, δεν ήταν ευδιάκριτοι.

Πραγματοποιήθηκαν μοντέλα με πεπερασμένες διαφορές (FDTD) (Σχήμα 2.12), για διαφορετικές γεωμετρίες στόχων και ηλεκτρικές ιδιότητες που μπορούσαν να προσομοιωθούν εύκολα. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το σύστημα αυτό θα είναι ικανό στο μέλλον να ανιχνεύει και να οριοθετεί μικρές ποσότητες DNAPL σε ένα πείραμα ελεγχόμενης ροής ρύπων στο υπέδαφος.



***Σχήμα 2.12**: Στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται προσομοίωση των εκπεμπόμενων και ληφθέντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε στόχο παραφίνης χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν τα ομοαξονικά καλώδια τροφοδοσίας και οι χρόνοι καθυστέρησης. Στη δεξιά εικόνα λαμβάνονται υπ' όψιν. Η κατακόρυφη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου του εκπεμπόμενου παλμού απεικονίζεται για χρόνο 4624 ps μετά την έναρξη της προσομοίωσης. Η κυματομορφή μόλις συνάντησε τον στόχο παραφίνης και η επίδραση του στόχου φαίνεται από μια σημαντική αύξηση στην ταχύτητα διαμέσου του στόχου και μία ανάκλαση από τον στόχο. Η επίδραση του καλωδίου και της γραμμής καθυστέρησης παρατηρήθηκαν μετά από σύγκριση των χαμηλότερων από τα πρωτεύοντα κύματα (Craig et al., 2003).*

2.5.7 Επίδραση μη αναμίξιμων υγρών ρύπων στην μετάδοση κυμάτων-P διαμέσου δειγμάτων υδροφόρου ορίζοντα (Geller et al., 2003)

Διεξήχθησαν εργαστηριακά πειράματα σε κυλινδρική διάταξη ώστε να εξεταστεί η επίδραση των υγρών ρύπων μη υδατικής φάσης (NAPL) στην ταχύτητα και την εξασθένιση των κυμάτων-P κατά την διέλευσή τους διαμέσου ετερογενών μέσων. Αυτή η μελέτη αποτελεί κομμάτι μιας ευρύς έρευνας για την

ανίχνευση NAPL χαμηλής διεισδυτικότητας με γεωφυσικές μετρήσεις και γεωτρήσεις. Η έκταση στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα πεδίου είναι το πρώην DEO Pinelas Plant στην Φλόριντα όπου η επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα είναι ρυπασμένη.

Οι μετρήσεις πεδίου έδειξαν μια ζώνη όπου η εξασθένιση των σεισμικών κυμάτων ήταν ασυνήθιστα υψηλή, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στην γεωλογία και/ή στους ρύπους (NAPL ή αέρια φάση). Το δείγμα λήφθηκε ανέπαφο από το πεδίο και μελετήθηκε η διάδοση των κυμάτων-P με συχνότητες 500 kHz. Εξετάστηκαν δύο δείγματα: ένα με ψιλή και καθαρή άμμο από το τμήμα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και ένα με αργιλώδη και λασπώδη άμμο από το κατώτερο τμήμα. Στα αρχικά κορεσμένα με νερό δείγματα εισήχθηκαν είτε τριχλωροαιθάνιο είτε τολουόλιο (NAPL). Τα NAPL κατέλαβαν το 30 έως το πολύ 50% των πόρων του εδάφους.

Η ταχύτητα των κυμάτων-P κυμάνθηκε περίπου στο 4% στα δείγματα που ήταν κορεσμένα με νερό, ενώ για τα δείγματα με την μέγιστη συγκέντρωση σε NAPL μειώθηκε από 5 έως 9% σε σχέση με τα καθαρά δείγματα. Τα αργιλώδη και λασπώδη τμήματα του δείγματος καθώς και τα τμήματα με τη μεγαλύτερη ανομοιομορφία, όπως ήταν αναμενόμενο, προκάλεσαν την μεγαλύτερη εξασθένιση των κυμάτων-P σε σχέση με την καθαρή άμμο. Η παρουσία των NAPL προκάλεσε μείωση του πλάτους στις πρώτες αφίξεις της τάξεως του 34 έως 54%. Η κεντρική συχνότητα της εκπεμπόμενης ενέργειας κυμάνθηκε από 85 έως 200kHz και ήταν ευαίσθητη τόσο στην κοκκομετρία όσο και στην παρουσία NAPL. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με προηγούμενες μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί σε δείγματα με σταθερής κοκκομετρίας (ομογενή) άμμο. Χρειάζονται περισσότερα δεδομένα ώστε να μπορούν να ερμηνευθούν οι τομογραφίες κυμάτων-P, να καθοριστεί η αιτία της υψηλής εξασθένισης των κυμάτων-P και να εκτιμηθεί η ευαισθησία των σεισμικών μεθόδων στην ανίχνευση NAPL.

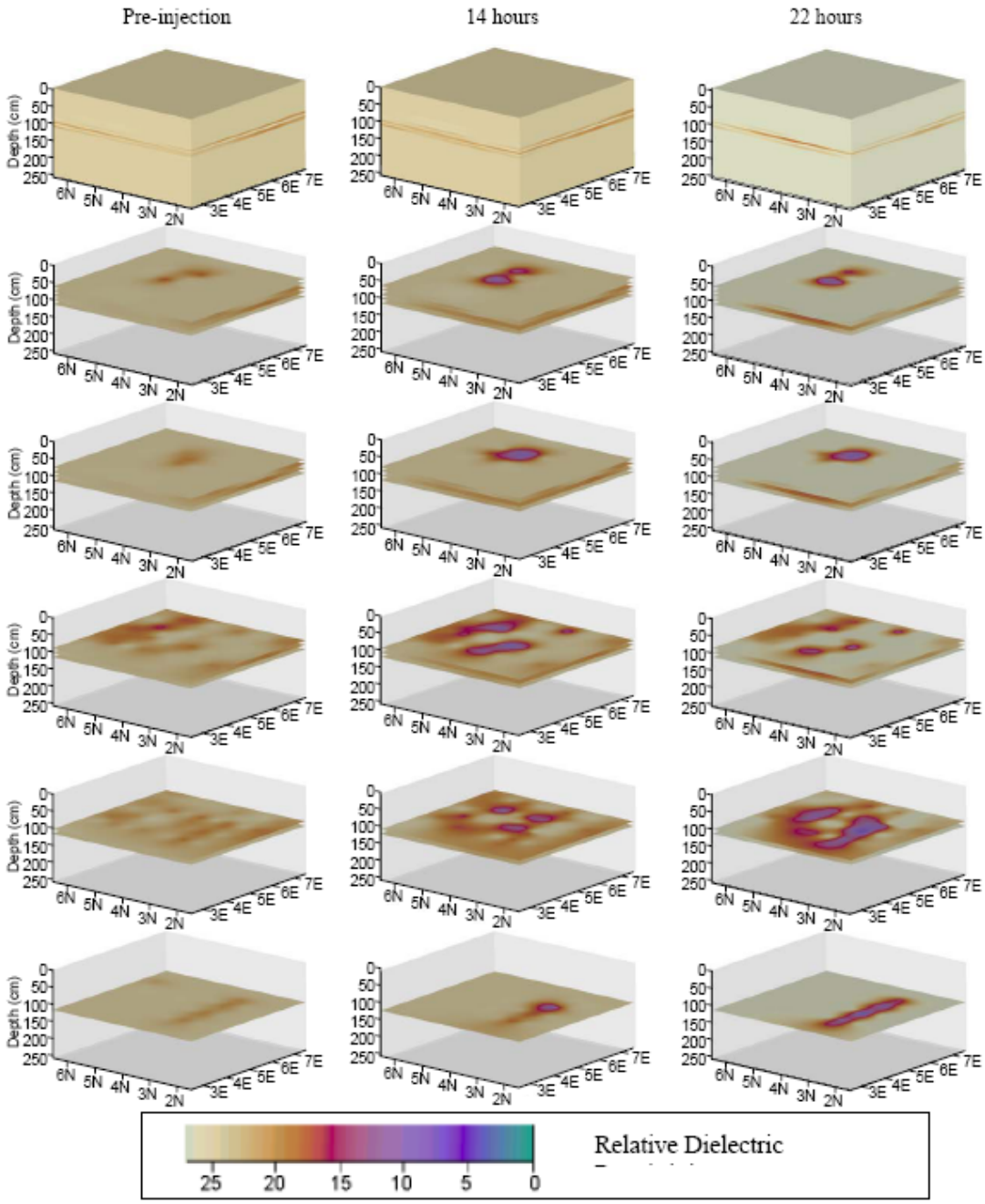
2.5.8 Μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ για την ερμηνεία του πορώδους και της διασποράς των DNAPL, για τη βαθμονόμηση τρισδιάστατης πολυφασικής προσομοίωση ροής (Sneddon et al., 2002)

Τα DNAPLs δημιουργούν μεγάλης διάρκειας ρύπανση υδροφόρου ορίζοντα εξαιτίας της διεισδυτικής τους ικανότητας. Σε μια προσπάθεια για την καλύτερη κατανόηση της υπόγειας συμπεριφοράς πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα

ελεγχόμενης ροής PCE (perchloroethylene) ενός τυπικού DNAPL, στο Canadian Forces Base Borden το 1991. Από τις διάφορες γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση της μετακίνησης του PCE, το USGS συνέλεξε δεδομένα γεωραντάρ με κεραίες 500-MHz. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των παραμέτρων βαθμονόμησης για μια πολυφασική προσομοίωση ροής.

Τα δεδομένα γεωραντάρ συλλέχθηκαν σε ένα κάνναβο κατά την διάρκεια της έκχυσης του DNAPL στο υπέδαφος. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον καθορισμό των τιμών κορεσμού του DNAPL κατά την χρονική διάρκεια που συλλέγονταν τα δεδομένα γεωραντάρ.

Η μοντελοποίηση των καταγραφών γεωραντάρ έχει σαν αποτέλεσμα τομές γεωραντάρ της διηλεκτρικής σταθεράς ως προς το βάθος για πριν και μετά την έκχυση. Οι μοντελοποιημένες τιμές είναι τα τελευταία μέλη στους υπολογισμούς του μαθηματικού τύπου Bruggeman-Hanai-Sen (BHS), όπου σε αυτές αποδίδεται η ερμηνεία για τις τιμές του πορώδους πριν από την έκχυση καθώς και για την διασπορά των DNAPL μετά από την έκχυση.



Σχήμα 2.13*:Οι τρεις στήλες απεικονίζουν τομές για τις ίδιες θέσεις στο πείραμα Borden. Η χρωματική κλίμακα αντιπροσωπεύει την διηλεκτρική σταθερά όπως αυτή προέκυψε από τα δεδομένα του γεωραντάρ. Η στήλη στα αριστερά δείχνει την κατάσταση που επικρατούσε πριν την έκχυση όπου όλες οι μεταβολές οφείλονταν μόνο στη μεταβολή του πορώδους. Η μεσαία και η δεξιά στήλη δημιουργήθηκαν από μετρήσεις γεωραντάρ, που λήφθηκαν 14 και 22 ώρες αντίστοιχα μετά την έκχυση των ρύπων (Sneddon et al., 2002).*

Τα αποτελέσματα που δόθηκαν από την ερμηνεία των φυσικών ιδιοτήτων του πορώδους και τη διασπορά των DNAPL μέσα στην πειραματική διάταξη Borden, απεικονίζονται σε πλέγμα με ανάλυση 50cm x 50cm και με 1cm βάθος και χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση ενός μοντέλου προσομοίωσης της τρισδιάστατης

πολυφασικής ροής. Οι τιμές των DNAPL που υπολογίσθηκαν στο υπέδαφος, 14 και 22 ώρες μετά την έκχυση της ρυπογόνου ουσίας, τόσο από το γεωραντάρ αλλά όσο και από το πολυφασικό μοντέλο ροής, συνδυάστηκαν και από αυτές προέκυψαν τα τρισδιάστατα σχήματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.13 για οπτική σύγκριση.

2.5.9 Εργαστηριακή έρευνα της Σύνθετης Ειδικής Αντίστασης (CR) από οργανικούς ρύπους στο Denver Federal Center (Sneddon et al., 2001)

Το Denver Federal Center είναι μια γνωστή ρυπασμένη περιοχή από DNAPL και αυτό την καθιστά ενδιαφέρουσα για έρευνες, όπως την παρακολούθηση της ρύπανσης και την κίνησή της στο έδαφος καθώς και τις συγκεντρώσεις της σε διάφορα σημεία. Οι φυσικές ιδιότητες των DNAPLs συχνά καθιστούν παραπλανητικές τις πληροφορίες που δίνονται από το πηγάδι παρατήρησης για τις συγκεντρώσεις της υγρής και της αέριας τους φάσης από το πηγάδι παρατήρησης και είναι χαμηλότερες από ότι στην πραγματικότητα. Το έδαφος σε αυτή την περιοχή είναι πλούσιο σε σμεκτίτη και βιογενή αέρια, όμως προτάθηκε η χρήση της μεθόδου CR σαν εργαλείο παρακολούθησης το οποίο είναι ευαίσθητο σε αντιδράσεις αργίλων και οργανικών ουσιών.

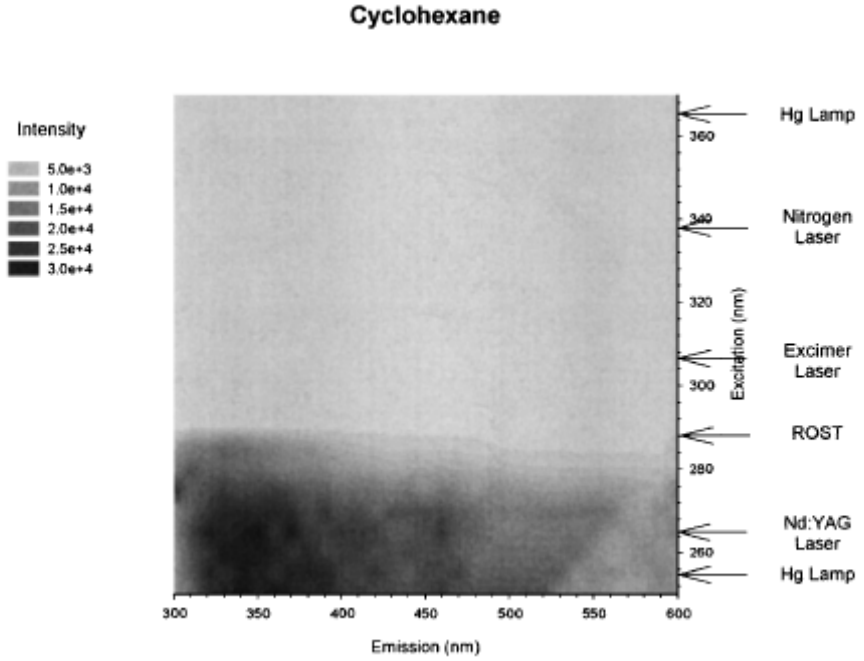
Για καλύτερη ερμηνεία των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο πείραμα ελεγχόμενης ροής οργανικών ρύπων. Με την μέτρηση της CR στο εργαστήριο, επιτυγχάνεται η παρακολούθηση της αντίδρασης του αργίλου με τις οργανικές ενώσεις. Η ένδειξη για την αντίδραση είναι η μείωση του πλάτους της πραγματικής συνιστώσας της αντίστασης, καθώς επίσης η μέγιστη τιμή του αλλάζει θέση και μέγεθος. Επιπλέον, ένδειξη που μπορεί να εντοπιστεί για αυτό είναι η μη γραμμικότητα των δεδομένων. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα είναι ασαφή ως προς τους διάφορους τύπους των ρύπων και των συγκεντρώσεων τους που παρουσιάζονται. Αυτό καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό κατά την συσχέτιση των εργαστηριακών πειραμάτων, όπου χρησιμοποιούνται μεμονωμένες οργανικές ουσίες, με τα δεδομένα πεδίου όπου υπάρχουν ποικίλα μίγματα διαφόρων ρύπων.

2.5.10 Χαρακτηρισμός σύνθετων NAPL σε πεδίο με φθοροσιμετρία - Επιλογή διέγερμένης κυματομορφής που οφείλεται σε NAPL (Kram et al., 2004)

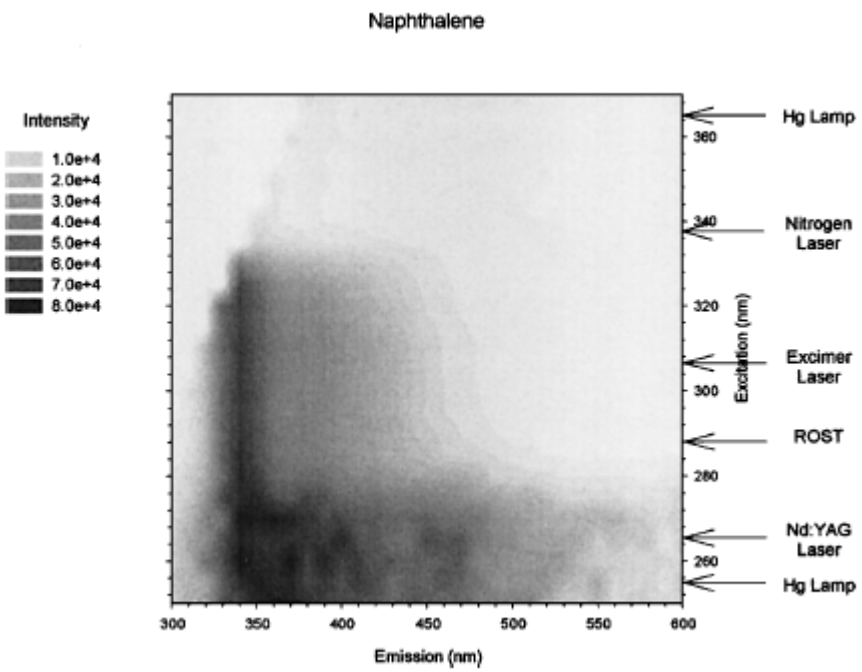
Ο φθορισμός (fluorescence) αποδείχθηκε ότι είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για την ανίχνευση ρύπων NAPL αποτελούμενων από πολυκυκλικούς αρωματικούς

υδρογονάνθρακες (PAHs). Με την διάταξη CPT (cone penetrometer) επιτυγχάνεται η εξέταση του εδάφους in-situ με εισαγωγή του αισθητήρα φθορισμού στο έδαφος για την ανίχνευση NAPLs, όπως είναι τα πετρελαιοειδή και τα λιπαντικά. Επιπρόσθετα αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανίχνευση ζωνών με DNAPL στο έδαφος ανιχνεύοντας μίγματα υδρογονανθράκων που μεταφέρονται σε βάθη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Τα διαθέσιμα συστήματα φθορισμού αποτελούνται από μια πηγή διεγερμένου μονού μήκους κύματος όπου το κάθε ένα παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά τις ικανότητες ανίχνευσης. Διάφορες μορφές NAPL καθώς και μιγμάτων αναλύθηκαν με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά φθορισμού για να καθοριστούν οι βέλτιστες πηγές στην προσπάθεια χαρακτηρισμού του πεδίου. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι CPT - cone penetrometer ανάλογα με το είδος του προς ανίχνευση ρύπου στο έδαφος.



Σχήμα 2.14: *Διέγερση εκπομπής (Excitation emission) για κυκλοεξάνιο. Λαμβάνεται υπ' όψιν σήμα για πηγή διέγερσης πάνω από 285 nm. Οι πηγές διέγερσης υποδεικνύονται ανάλογα με τα αντίστοιχα μήκη κύματος (Kram et al., 2004).*

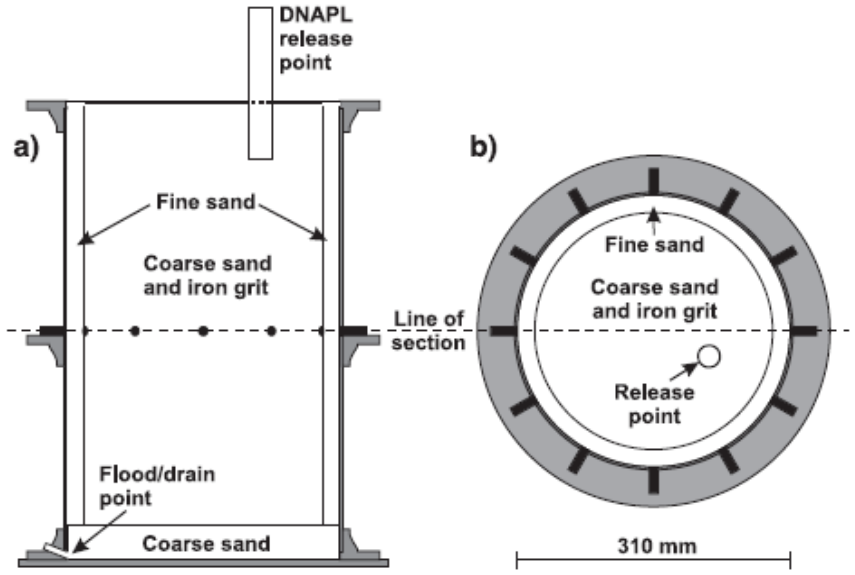


Σχήμα 2.15*: Διέγερση εκπομπής (Excitation emission) για ναφθαλίνη μέσα σε κυκλοεξάνιο (Kram et al., 2004).*

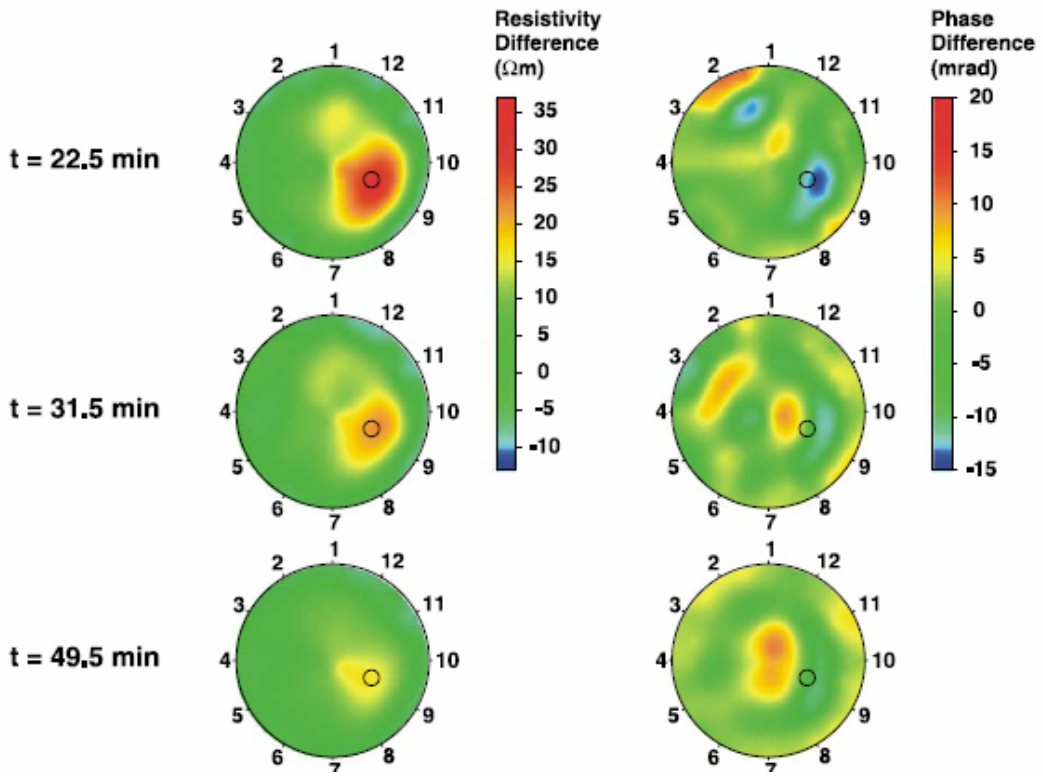
Στη εν λόγο μελέτη αποδεικνύεται ότι με βάση την διέγερση του μήκους κύματος μπορούν να καθοριστούν οι διάφορες ουσίες από τις οποίες αποτελείται ένα κοινό μίγμα NAPL (Σχήματα 2.14 – 2.15). Επίσης εντοπίστηκαν τα βέλτιστα μήκη κύματος φθορισμού για διάφορους ρύπους όπως είναι τα πετρελαιοειδή και τα λιπαντικά σε χλωριωμένους διαλύτες.

2.5.11 Μη διεισδυτική παρακολούθηση της διασποράς των DNAPL διαμέσου κορεσμένου πορώδους με τη χρήση ηλεκτρικής τομογραφίας (Chambers et al., 2004)

Η ηλεκτρική τομογραφία (EIT) χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κίνησης ενός αλογονομένου υδρογονάνθρακα DNAPL διαμέσου κορεσμένου μεσαίου μεγέθους πορώδους σε εργαστηριακή στήλη. Μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έγιναν με της χρήση 12 ηλεκτροδίων σε οριζόντιο επίπεδο, τοποθετημένα σε κανονικές αποστάσεις γύρω από το κέντρο της στήλης. Ένας αλγόριθμος δισδιάστατης αναστροφής, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το κυλινδρικό σχήμα της στήλης, χρησιμοποιήθηκε για να ανασχηματίσει την αντίσταση και τις εικόνες φάσης των μετρήσεων.



Σχήμα 2.16*: Το σχήμα της εργαστηριακής διάταξης σε (a)κατακόρυφη τομή και (b) κάτοψη. Τα ηλεκτρόδια απεικονίζονται με μαύρο χρώμα και το υλικό PVC των τοιχωμάτων με γκρι χρώμα (Chambers et al., 2004).*



Σχήμα 2.17*: Διαφορική αντίσταση και φάση σε χρόνους t = 22,5 31,5 και 49,5 min μετά την έκχυση του ρύπου. Ο κύκλος που φαίνεται είναι το σημείο έκχυσης (Chambers et al., 2004).*

Οι εικόνες της κίνησης του DNAPL πέρα από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων δημιουργήθηκαν και από τα μοντέλα φάσης, τα οποία σχετίζονται με το στάδιο απελευθέρωσης των DNAPL στο πείραμα. Ο παλμός των DNAPL απεικονίζεται

από ανωμαλίες της αντίστασης που απεικονίζονται στις τομογραφίες αντίστασης - χρόνου. Η χωρική έκταση των ανωμαλιών της αντίστασης αποδεικνύει ότι εκτός από κατακόρυφη μετακίνηση πραγματοποιείται και πλευρική εξάπλωση DNAPL.

Κατάλοιπα της ρύπανσης θα μπορούσαν να ανιχνευθούν μετά από ημι-στατικές συνθήκες ανασύστασης. Έγινε εκτίμηση των υπολειμμάτων του DNAPL μετά από επεξεργασία των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο μοντέλο της δεύτερης εξίσωσης Archie. Παρά τις σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις της φάσης εξαιτίας της ρύπανσης από DNAPL, οι εικόνες της διαφορικής φάσης παρουσίασαν μικρές μόνο ανωμαλίες που σχετίζονταν με τη ροή των DNAPL. Αυτές οι μικρές ανωμαλίες εντοπίσθηκαν μόνο στα αρχικά στάδια του πειράματος κατά τη μέγιστη φάση της ροής μέσα στο επίπεδο των ηλεκτροδίων.

2.6 Έρευνες πεδίου σε περιοχές υφιστάμενης ρύπανσης

Εκτός από τις καθιερωμένες γεωφυσικές μεθόδους που εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση, δηλαδή το γεωραντάρ, τις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και τη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης, χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές οι οποίες στοχεύουν στην επεξεργασία διαφορετικών παραμέτρων. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και άλλες λιγότερο διαδεδομένες γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για την ανίχνευση και οριοθέτηση περιοχών ρύπανσης. Όπως για παράδειγμα ο φθορισμός (Fluorescence), NMR (proton nuclear magnetic resonance), μέθοδοι παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός γεωφυσικών τεχνικών προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την διασπορά των ρύπων στο έδαφος και βοηθά στην ακριβέστερη οριοθέτηση περιοχών ρύπανσης.

2.6.1 Όρια ανίχνευσης για μη αναμίξιμους υγρούς ρύπους χρησιμοποιώντας NMR (Proton Nuclear Magnetic Resonance) (Traci et al., 2003)

Εργαστηριακές μελέτες αποδεικνύουν ότι είναι δυνατό να υπολογιστεί το μέγεθος της ρύπανσης από τολουόλιο στο έδαφος, με την μέθοδο NMR (proton nuclear magnetic resonance). Τα όρια ανίχνευσης για το τολουόλιο παρουσία νερού εξαρτώνται από:

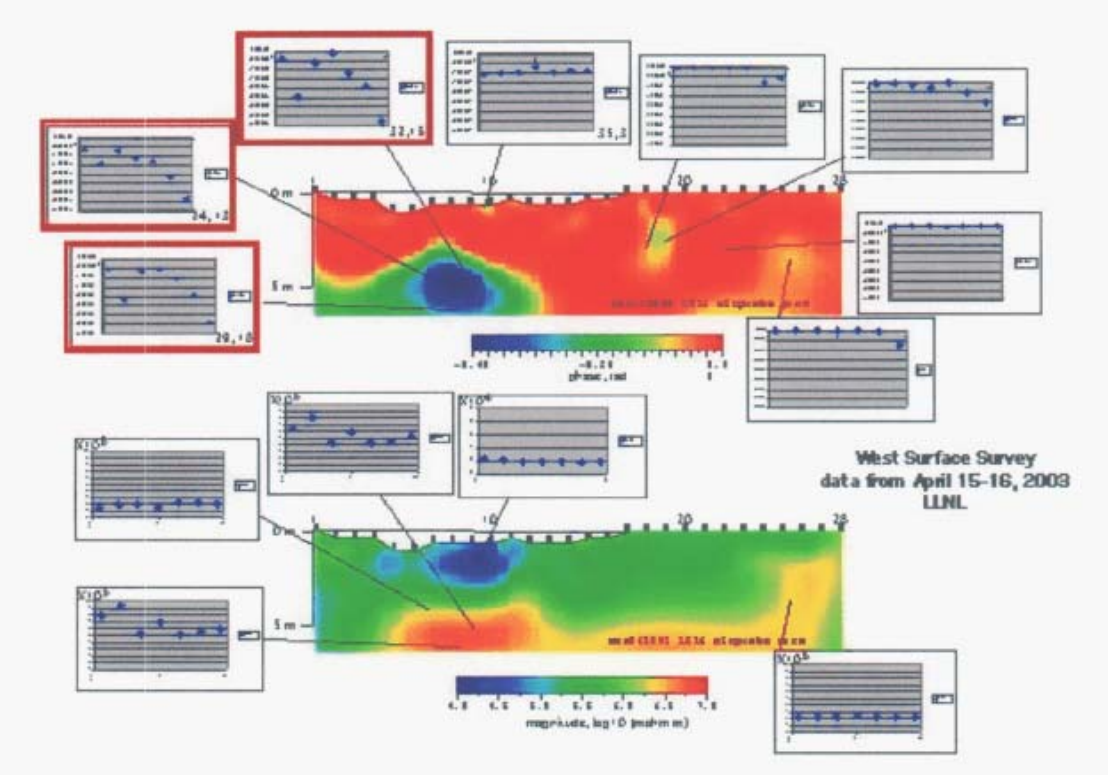
- τον λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N) των δεδομένων,

- από τον λόγο του χρόνου παραμονής του ρύπου ως προς αυτόν του νερού (ο οποίος καθορίζεται από ένα συνδυασμό της λιθολογίας, της ορυκτολογίας του πετρώματος)
- από το ποσοστό του πορώδους που καταλαμβάνεται από το νερό και τον ρύπο και
- από την ποσότητα του ρύπου σε σχέση με την ποσότητα του νερού.

Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλο αριθμό μιγμάτων ρύπων με παρόμοιο ιξώδες και ικανότητα ενυδάτωσης, χρησιμοποιώντας συνδυασμένα δεδομένα NMR. Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται τα όρια προβλεπόμενα ανίχνευσης με την μέθοδο NMR για βενζόλιο, χλωροβενζόλιο, 1,1-δίχλωροβενζόλιο, αιθυλοβενζόλιο, 1,1,1-τριχλωροβενζόλιο, τριχλωροαιθάνιο, τολουόλιο και ξυλένιο. Με αναλογία σήματος προς θόρυβο (S/N) = 50 για επιφανειακά δεδομένα ή δεδομένα από γεώτρηση NMR, προβλέφθηκε ότι το βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και ξυλένιο μπορούν να ποσοτικοποιηθούν σε πολλά εδάφη, με την προϋπόθεση ότι ο ρύπος καταλάμβανε τουλάχιστον το 50% του πορώδους. Η ευαισθησία του NMR σε χλωριωμένους ρύπους είναι μικρότερη. Για παράδειγμα με αναλογία σήματος προς θόρυβο (S/N) = 50 προβλέφθηκε ότι το 1,1-δίχλωροβενζόλιο μπορεί να ποσοτικοποιηθεί στο έδαφος, μόνο στην περίπτωση που ο ρύπος καταλάμβανει περισσότερο από το 75% του πορώδους.

2.6.2 Ηλεκτρική τομογραφία για την ανίχνευση DNAPL (Daily et al., 2004)

Εργαστηριακές έρευνες (π.χ. Olheoft, μη δημοσιευμένη αναφορά 2001) απέδειξαν ότι οι ηλεκτρικές ιδιότητες χαμηλών συχνοτήτων μερικών εδαφών ρυπασμένων από DNAPL μπορεί να είναι αρκετά ξεχωριστές ώστε να δίνουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η ηλεκτρική τους τομογραφία για τον εντοπισμό αυτού του είδους ρύπου. Στόχος αυτής της μελέτης είναι να καθορίσει αν η ηλεκτρική τομογραφία του εδάφους και του υπόγειου νερού σε ρυπασμένη περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και χαρτογράφηση της διασποράς του ρύπου.



Σχήμα 2.18*: Εύρος τιμών και τομογραφίες φάσης σε 8.0 Hz στα δυτικά της περιοχής μελέτης. Επίσης φαίνεται το εύρος φάσματος μεταξύ 0,125 και 8,0 Hz για ορισμένα επιλεγμένα εικονοστοιχεία (pixels) (Daily et al., 2004).*

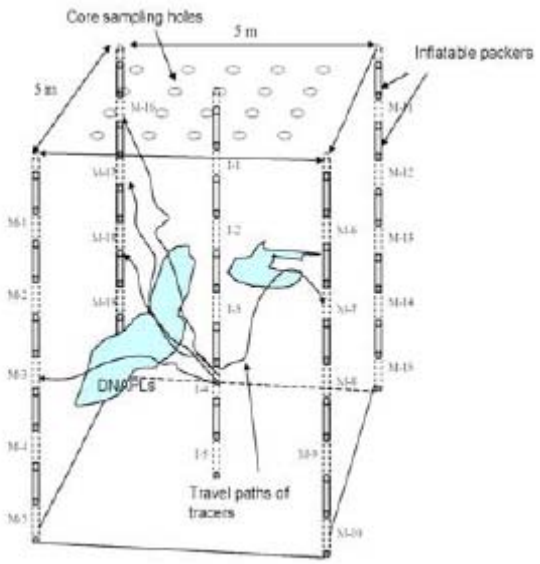
Η τακτική που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει την πρόβλεψη της παρουσίας καθώς και της ακριβής θέσης των DNAPL από κατάλληλα δεδομένα που έχουν ληφθεί στην εκβολή του A-014 στο Savannah River Site. Σε αυτή την περιοχή υπάρχει υποψία για ρύπανση σε μικρό βάθος. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση αυτών των προβλέψεων με τα αποτελέσματα αναλύσεων από την ίδια περιοχή. Αν υπάρξει ταύτιση ανάμεσα στις προβλέψεις αυτές και τις αναλύσεις από τα δείγματα τότε θα υπάρξουν αποδείξεις ότι η ρύπανση με DNAPL μεταβάλει το υπέδαφος κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ρύπανση μπορεί να εντοπιστεί και να χαρτογραφηθεί χρησιμοποιώντας χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικές μεθόδους. Στην περίπτωση που υπάρξει πλήρης διαφωνία τότε οι μέθοδοι αυτοί δεν χρησιμεύουν για την ανίχνευση της ρύπανσης.

2.6.3 Συνδυασμός ηλεκτρικών τομογραφιών για τον χαρακτηρισμό του πλουμίου DNAPL: Ανάπτυξη τεχνολογίας και επαλήθευση (Illman et al., 2003)

Σε αυτή την μελέτη αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι για τον συνδυασμό διαφορετικών τύπων πληροφοριών με στοχαστικές διαδικασίες, με αποτέλεσμα

την ανάπτυξη μιας χαμηλού κόστους τεχνολογία, η οποία μπορεί να χαρακτηρίζει, παρακολουθεί και προβλέπει μια ζώνη ρύπανσης DNAPL. Αυτή η τεχνολογία αξιοποιεί πρόσφατα ανεπτυγμένες υδραυλικές τομογραφίες και διευρύνει την γενική ιδέα στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την απεικόνιση των των DNAPL και την διασπορά τους στο υπέδαφος.

Η καινούρια αυτή τεχνολογία χρησιμοποιεί μια μεθοδολογία στοχαστικών διαδικασιών για την χωροθέτηση των παραμενόντων ρύπων DNAPL. Συγκεκριμένα, αναλύει τις πληροφορίες που προκύπτουν από την υδραυλική τομογραφία για τον καθορισμό της τρισδιάστατης υδραυλικής ανομοιογένειας. Χρησιμοποιείται η επαναλαμβανόμενη διαδικασία μέχρι οι διαθέσιμες πληροφορίες και μετρήσεις περιγράψουν πλήρως την ανομοιογένεια η οποία ελέγχει την χωρική κατανομή του ρύπου DNAPL.



***Σχήμα 2.19**: Θεμελιώδη διάγραμμα όπου παρουσιάζεται η επεξήγηση της προσέγγισης για χαρακτηρισμό της ζώνης των DNAPL με τομογραφίες (Illman et al., 2003).*

2.6.4 Γεωφυσική μέθοδος για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό του όγκου των DNAPL που βρίσκονται στο υπέδαφος (Mark et al., 2003)

Μέχρι σήμερα, στις περισσότερες έρευνες η εκτίμηση του όγκου των DNAPL που βρίσκονται στο υπέδαφος, υπολογίζεται έμμεσα από τις διαλυμένες συγκεντρώσεις τους στο έδαφος. Τα DNAPLs έχουν πολύ χαμηλές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς (3-4) σε σχέση με το νερό (80). Με την αντικατάσταση του νερού από DNAPLs στους πόρους μειώνεται η διηλεκτρική σταθερά. Επίσης η

μείωση του πορώδους προκαλεί μείωση στην διηλεκτρική σταθερά, έτσι για να χρησιμοποιηθεί η διηλεκτρική σταθερά στον υπολογισμό του όγκου των DNAPL, είναι απαραίτητη η μέτρηση του πορώδους.

Σε αυτή την έρευνα η διηλεκτρική σταθερά μετρήθηκε με το CPT. Το πορώδες υπολογίστηκε από πολλές μετρήσεις που έγιναν σε πετρώματα που δεν υπήρχαν ίχνη ρυπογόνου ουσίας με τις διαγραφίες γάμμα γάμμα. Οι διαγραφίες αυτές εκτελέστηκαν σε γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου δίπλα από τις θέσεις που έγιναν οι μετρήσεις CPT. Επίσης στις ίδιες γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας και διαγραφίες νετρονίου.

Σαν πεδίο μελέτης επιλέχθηκε μια έντονα ρυπασμένη σε DNAPL περιοχή, κυρίως σε TCE. Τα γεωλογικά στρώματα της περιοχής είναι 50 ft άμμο, ιλύς και λίγους αργίλους και η περιεκτικότητα σε silt να αυξάνεται με το βάθος. Οι διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας έδειξαν ότι εμφανίζονται περιοχές με χαμηλή διαπερατότητα στα -9, -20 και -31 ft msl απόλυτο υψόμετρο. Κατά τους υπολογισμούς του κλασματικού όγκου DNAPL, παρουσιάστηκαν τρεις μεγάλες τιμές στα βάθη -8, -18, και -30 ft που βρίσκονται ελάχιστα παραπάνω από τις θέσεις με χαμηλή διαπερατότητα. Ο μέσος όρος του βαθμού κορεσμού των DNAPL είναι περίπου 0,10, με μεγαλύτερη τιμή το 0,25. Οι τιμές του πορώδους κυμαίνονται από 0,3 σε 0,55. Η περιεκτικότητα σε DNAPL είναι ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνει το DNAPL προς τον συνολικό όγκο των πόρων. Πάλι οι μεγαλύτερες τιμές κορεσμού του DNAPL είναι λίγο παραπάνω από τα τρία στρώματα χαμηλής διαπερατότητας. Οι περιεκτικότητες σε DNAPL κυμαίνονται περίπου στο 25% στις ρυπασμένες ζώνες, με μεγαλύτερη τιμή το 45. Η μέθοδος αυτή υπόσχεται πολλά για τον ακριβή προσδιορισμό του όγκου και της περιεκτικότητας των DNAPL στο έδαφος, καθιστώντας την κατάλληλη για κορεσμένα, ρυπασμένα εδάφη από DNAPL.

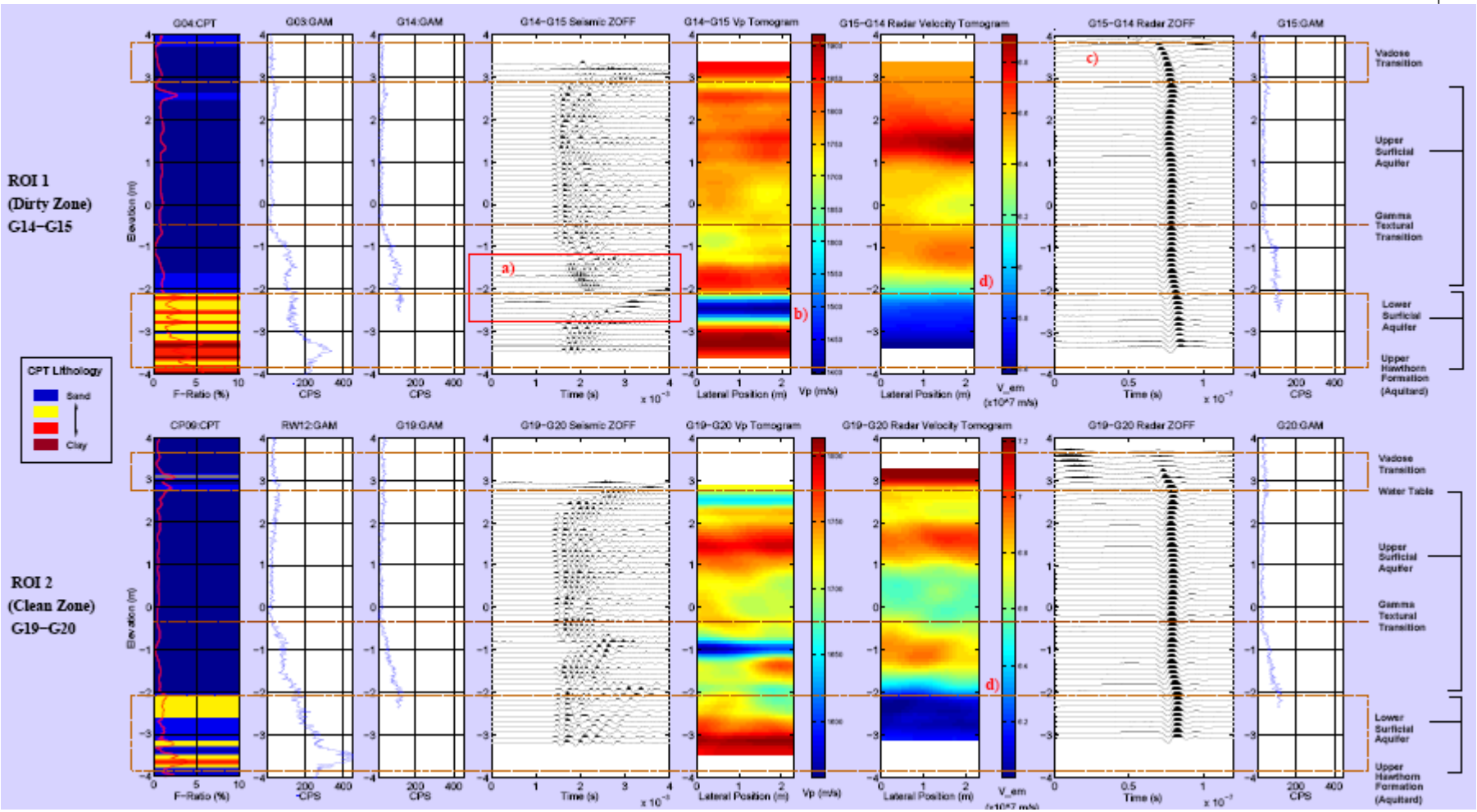
2.6.5 Ολοκληρωμένος γεωφυσικός χαρακτηρισμός ρυπασμένης περιοχής από NAPL, με την χρήση μετρήσεων μέσα σε γεωτρήσεις και εργαστηριακών πειραμάτων (Ajo-Franklin et al., 2002)

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα από μια γεωφυσική έρευνα που είναι σε εξέλιξη, στην περιοχή Pinellas, μια περιοχή με επιβεβαιωμένη ύπαρξη ρύπανσης NAPL. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι να παρουσιάσει την συνδυασμένη χρήση, υψηλών σε ανάλυση δεδομένων σεισμικών

και γεωραντάρ, για την εκτίμηση της εξάπλωσης της ρύπανσης σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Με τη χρήση συνδυασμένων πληροφοριών από σεισμικά και γεωραντάρ, καθορίζεται και η γεωλογία της περιοχής μαζί με τις πιθανές θέσεις ρύπανσης.

Παρόλο που δεν υπάρχουν σαφείς γεωφυσικές ενδείξεις για την ύπαρξη NAPL στην περιοχή, ωστόσο ανιχνεύθηκε ανώμαλη εξασθένηση σεισμικών κυμάτων (seismic attenuation anomaly) σε πολλές περιοχές. Η εξασθένηση αυτή δεν ήταν δυνατό να εξηγηθεί ούτε σαν επίδραση της γεώτρησης αλλά ούτε και από την γεωλογία της περιοχής, έτσι πιθανό να οφείλονταν σε περιοχές που είναι μερικώς κορεσμένες σε αέριους ρύπους (ατμούς των ρύπων - πτητικοί οργανικοί ρύποι) ή NAPL. Πιθανές πηγές αέριων ρύπων είναι η βιοαποδόμηση των ρύπων και κάποιες εξωτερικές επιδράσεις από τις μεθόδους εξυγίανσης του εδάφους.

Οι συνεχιζόμενες έρευνες στο Pinellas site επικεντρώθηκαν στην κατανόηση του μηχανισμού που είναι υπεύθυνος για την σεισμική εξασθένηση, αναπτύσσοντας ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο του εδάφους της περιοχής και εφαρμόζοντας πιο ολοκληρωμένες ποσοτικές εκτιμήσεις στην υπέρθεση και την ανάλυση των δεδομένων γεωραντάρ και σεισμικών.



***Σχήμα 2.20**: Ολοκληρωμένη επεξεργασία για τις γραμμές ROI 1 (ρυπασμένη ζώνη) και ROI 2 (καθαρή ζώνη) η οποία περιλαμβάνει τις κυματομορφές, τις τομογραφίες ταχυτήτων του γεωραντάρ και σεισμικών, πληροφορίες για την λιθολογία από CPT και φυσικές διαγραφίες ακτίνων γάμμα. Παρατηρείται μεγάλη εξασθένηση στην επιλεγμένη περιοχή (a) στην οποία εμφανίζονται και οι μικρότερες ταχύτητες (Vp = 1400m/s) πράγμα που πιθανόν να οφείλεται στην παρουσία αερίων (Ajo-Franklin et al., 2002).*

2.6.6 Ολοκληρωμένη γεωφυσική ανίχνευση του πλουμίου DNAPL (Blackhawk Geoservices Inc. 2001)

Το αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι η δημιουργία μιας οικονομικά συμφέρουσας τρισδιάστατης γεωφυσικής απεικόνισης, για τον έλεγχο της κατανομής και της κίνησης των DNAPL στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα αναπτύσσεται μια τριμελής προσέγγιση για τον χαρακτηρισμό της φυσικής ετερογένειας (physical heterogeneity), για τον έλεγχο της κίνησης των DNAPL και για την απεικόνιση της κατανομής τους στο έδαφος.

Με την υπέρθεση τομών σεισμικής διάθλασης και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, απεικονίζονται λεπτομερώς οι γεωλογικοί σχηματισμοί του υπεδάφους. Επίσης συνδυάζονται δεδομένα δισδιάστατης και τρισδιάστατης τομογραφίας που προκύπτουν τοποθετώντας ηλεκτρικές και σεισμικές πηγές αλλά και αισθητήρες μέσα σε γεωτρήσεις. Οι ίδιοι ηλεκτρικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή ηλεκτρικής τομογραφίας για την απεικόνιση των DNAPL μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς από τα προηγούμενα δύο βήματα. Με την συλλογή δεδομένων τρισδιάστατης τομογραφίας μπορεί να γίνει η παρακολούθηση της μετακίνησης των DNAPL.

Αυτή η τριμελής προσέγγιση αποτελεί μια νέα οικονομικά συμφέρουσα μη καταστρεπτική τεχνολογία για τρισδιάστατη γεωφυσική απεικόνιση των DNAPL χωρίς την παραγωγή επιπλέον απορριμμάτων στις ήδη επιβαρημένες περιοχές. Το άμεσο πλεονέκτημα από αυτό το ολοκληρωμένο πακέτο είναι η ικανότητα του να παράγει υψηλής ευκρίνειας τρισδιάστατες εικόνες των γεωλογικών σχηματισμών και των DNAPL στο υπέδαφος. Όταν αυτή η προσέγγιση γίνει διαθέσιμη θα μπορεί να βοηθήσει στον σχεδιασμό νέων τεχνολογιών εξυγίανσης εδαφών. Με βάση τις εικόνες της κατανομής των DNAPL και των γεωλογικών σχηματισμών, αυτή η μέθοδος μπορεί να βελτιώσει τις μελέτες επικινδυνότητας και να υπολογίσει το πραγματικό κόστος των εναλλακτικών μεθόδων εξυγίανσης.

2.6.7 Χαρτογράφηση πλουμίων ρύπων TCE και PCE με την χρήση 3-D δεδομένων από γεώτρηση επαγωγικής πόλωσης (Briggs et al., 2004)

Σε μια ρυπασμένη από DNAPLs περιοχή, συλλέχθηκαν δεδομένα σ΄νθετης ειδικής αντίστασης (CR) και επαγωγικής πόλωσης (IP), με τρισδιάστατη διάταξη ηλεκτροδίων τα οποία τοποθετήθηκαν επιφανειακά αλλά και εντός γεωτρήσεων. Στις ρυπογόνους ουσίες περιλαμβάνονται το τετραχλωροεθυλένιο (TCE) και το

τριχλωροεθυλένιο (PCE), τα οποία μέχρι πρόσφατα απορρίπτονταν απευθείας στο περιβάλλον.

Ο σχεδιασμός της διάταξης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η τρισδιάστατη αντιστροφή (IP). Τα δεδομένα μετρήθηκαν σε δύο συχνότητες (1/4 και 1/16 Hz), και αναστράφηκαν για την φάση και το μέτρο ειδικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα της αναστροφής αυτής συγκρίθηκαν με αποτελέσματα που προέκυψαν από εργαστηριακές μετρήσεις σε πυρήνες με ρύπους PCE και TCE. Οι πυρήνες αυτοί ελήφθησαν από τρεις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην εν λόγω περιοχή επάνω σε συγκεκριμένες γραμμές μελέτης. Η φάση και το φανταστικό μέρος της σύνθετης ειδικής αντίστασης δείχνουν να είναι πολύ καλά συσχετισμένες με τη συγκέντρωση των ρύπων που συλλέχθηκαν στις δύο από τις τρεις γεωτρήσεις, όταν όμως οι συγκεντρώσεις των PCE και TCE ήταν πάνω από 1 mg/kg.

Από τις δύο συχνότητες, καλύτερη συσχέτιση με τις γεωτρήσεις είχαν τα δεδομένα που λήφθηκαν με 1/16 Hz. Είναι φυσικό ότι για χαμηλότερες συχνότητες υπάρχει λιγότερος θόρυβος όπως και παραμόρφωση από το ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και η βελτιωμένη συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις ήταν επακόλουθο αυτού. Ο σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να αποδείξει ότι μια παράταξη ηλεκτροδίων σε γεώτρηση μπορεί να ανιχνεύσει ένα σήμα επαγωγικής πλικότητας το οποίο σχετίζεται με τα δεδομένα της συγκέντρωσης.

2.6.8 Εντοπισμός ρύπανσης από NAPL με σεισμικές μεθόδους υψηλών συχνοτήτων (Geller et al., 2003)

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η ανάπτυξη, η παρουσίαση και η αξιολόγηση της χρησιμότητας της απεικόνισης των σεισμικών μεθόδων υψηλών συχνοτήτων για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό της ρύπανσης από NAPL στον υδροφόρο ορίζοντα.

Τα σεισμικά δεδομένα συλλέγονται σε γεωτρήσεις ρυπασμένες από NAPL περιοχές για την χαρτογράφηση της κατανομής των P-wave ταχυτήτων και των πλατών μεταξύ των γεωτρήσεων (τομογραφίες). Αρκετές προσεγγίσεις εξετάστηκαν για την διάκριση των ανωμαλιών που προέρχονται από την παρουσία των NAPL και από αυτές που προέρχονται από την ετερογένεια στην λιθολογία, περιλαμβάνοντας: (1) περιοδικές μετρήσεις πριν και μετά την εξυγίανση, (2) σύγκριση τομογραφιών από την ρυπασμένη περιοχή με κοντινές μη ρυπασμένες περιοχές, (3) βαθμονόμηση των δεδομένων από το πεδίο με τις εργαστηριακές μετρήσεις σε πυρήνες με

μεταβαλλόμενες συγκεντρώσεις ρύπανσης από την περιοχή μετρήσεων και (4) υπέρθεση δεδομένων γεωραντάρ και σεισμικών δεδομένων. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο ρυπασμένες περιοχές πριν την έναρξη της εξυγίανσης του εδάφους και κατά την διάρκεια αυτής. Επίσης μετρήθηκαν P-wave σε πυρήνες από την μία περιοχή συναρτήσει του λόγου NAPL προς τον κορεσμό σε νερό.

Στη βορειοανατολική πλευρά του DOE Pinellas Plant στην Φλόριντα, υπάρχουν NAPLs, τριχλωροεθυλένιο (TCE), τολουένιο, χλωριούχο μεθυλένιο, αποσαθρωμένα έλαια και ρητίνη τα οποία ρυπαίνουν το έδαφος σε βάθος 10 m. Σε εργαστηριακά πειράματα σε πυρήνες από επιλεγμένες διερευνητικές γεωτρήσεις, NAPL TCE και το τολουένιο προκάλεσαν σημαντικές μειώσεις στις ταχύτητες των P-wave καθώς και αυξήσεις στην εξασθένηση των P-wave σχετικές με τις συνθήκες κορεσμού σε νερό. Οι σεισμικές και με γεωραντάρ επισκοπήσεις, εντός και εκτός της ρυπασμένης περιοχής, αποκάλυψαν ιζηματογενή πετρώματα σε στρώσεις όπου τα NAPL θα μπορούσαν να παγιδευτούν. Σε όλη την υπό εξέταση περιοχή παρατηρήθηκαν σημεία με ανώμαλα υψηλή εξασθένηση των P-wave, όπου πιθανά να προέρχονται από την λιθολογία, τα βιογενή αέρια, NAPLs, ή ακόμη και τον συνδυασμό αυτών.

Στο Paducah Gaseous Diffusion Plant στο Κεντάκι, συλλέχθηκαν σεισμικά δεδομένα στην ακριβή θέση της ιστορικής έκχυσης TCE, της οποίας η ποσότητα είχε εκτιμηθεί ότι ξεπερνούσε τα 500.000 γαλόνια, πριν από την έναρξη εξυγίανσης της περιοχής. Τα δεδομένα σε μη ρυπασμένες περιοχές αποκαλύπτουν την στρωματογραφία της περιοχής η οποία παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις ρυπασμένες περιοχές.

Μελετήθηκαν στο εργαστήριο δειγματοληπτικοί φυσικά κορεσμένοι πυρήνες, όπου και μετρήθηκαν οι ακουστικές ταχύτητες αρκετών ρυπογόνων ουσιών NAPL (όπως TCE και τολουένιο) και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Εντοπίστηκαν περιοχές με πιθανή ρύπανση από την σύγκριση τα πλατών των P-wave με γειτονικές μη ρυπασμένες περιοχές, αλλά αυτές είναι αβέβαιες λόγω του ότι δεν υπήρχαν ερευνητικές γεωτρήσεις για εξακρίβωση της λιθολογίας και άλλων λεπτομερειών στην περιοχή.

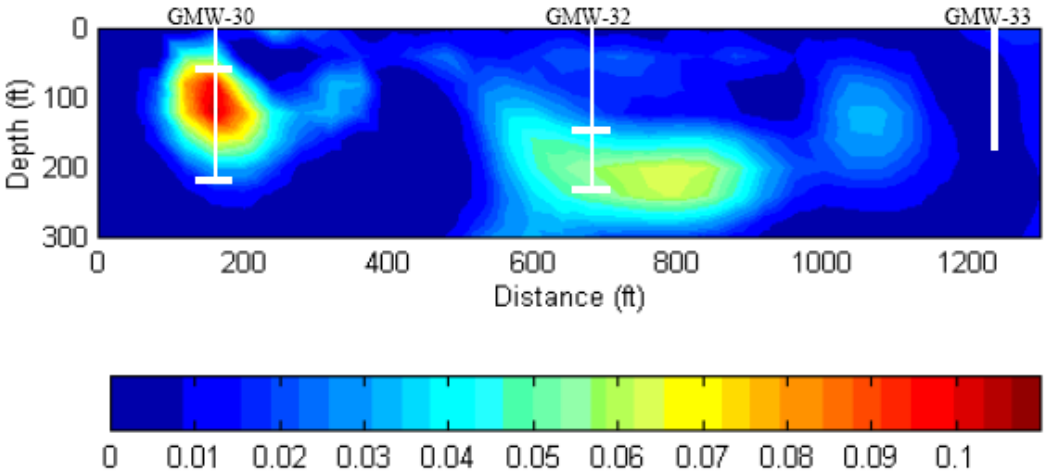
2.6.9 Μη διεισδυτικός χαρακτηρισμός ρυπασμένης περιοχής χρησιμοποιώντας επαγωγική πόλωση (Induced Polarization) (Morgan et al., 2003)

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων/εδαφών επηρεάζεται από την χημική σύσταση των διαλυμάτων που βρίσκονται μέσα στους πόρους, το σχήμα και

το μέγεθος των κόκκων των δειγμάτων των πετρωμάτων/εδαφών και τις επιφανειακές γεωχημικές ιδιότητες ροής στα πετρώματα/εδάφη και το πορώδες.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ελέγχεται από φυσικοχημικούς επιφανειακούς μηχανισμούς και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εκτεταμένη κατανομή στους χρόνους που χρειάζονται για να αποκτήσει ισορροπία το σύστημα.

Το εργαστήριο Earth Resources Laboratory (ERL) στο MIT ασχολήθηκε για αρκετά χρόνια στην έρευνα με την μέθοδο της επαγώμενης πολικότητας για τον χαρακτηρισμό της ρυπασμένης περιοχής. Αυτή η συνεχιζόμενη έρευνα περιλαμβάνει εργαστηριακά πειράματα στην επίδραση της μικρογεωμετρίας των πετρωμάτων/εδάφους και της χημείας της ρυπογόνου ουσίας σε μια διερεύνηση της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης θορύβου (EMC) και ανάπτυξη τρισδιάστατου μοντέλου και ανάστροφου κώδικα.

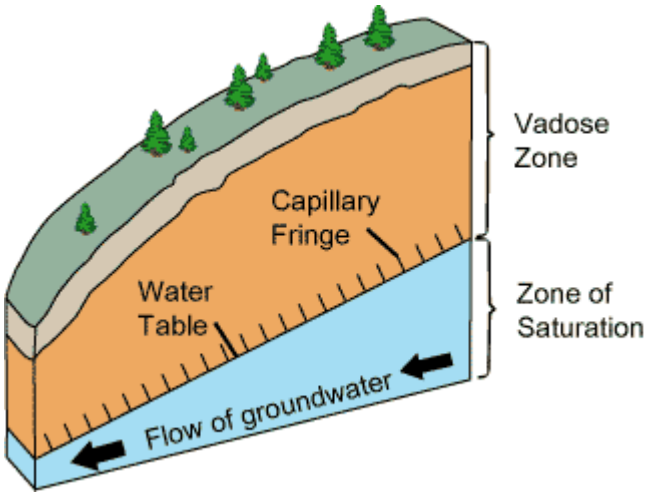


Σχήμα 2.21*: Στην τομογραφία φαίνεται η κατανομή των πλουμίων του ρύπου καθώς και οι θέσεις των γεωτρήσεων (Morgan et al., 2003).*

Έχει καθιερωθεί ότι η SIP responses στα ρυπασμένα πετρώματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό και την αναγνώριση των ρύπων και σε κάποιες περιπτώσεις παρέχει πληροφορίες για την χημεία της διεπιφάνειας. (Olhoeft, 1985,1992), (Börner et. al, 1993), (Vanhala, 1997a, 1997b), (Lesmes and Morgan, 2001), (Lesmes and Frye, 2001). Οι Börner et. al. (1993) πραγματοποίησαν εργαστηριακές έρευνες για τις επιπτώσεις των οργανικών και ανόργανων ρύπων στην ειδική αγωγιμότητα αργίλων και σε δείγματα σχιστολιθικών ψαμμιτών, σε φάσμα συχνότητας 10-1 σε 103 Hz. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι το φάσμα συχνότητας με ιδιαίτερο ενδιαφέρον κυμαίνεται πέραν του 1KHz.

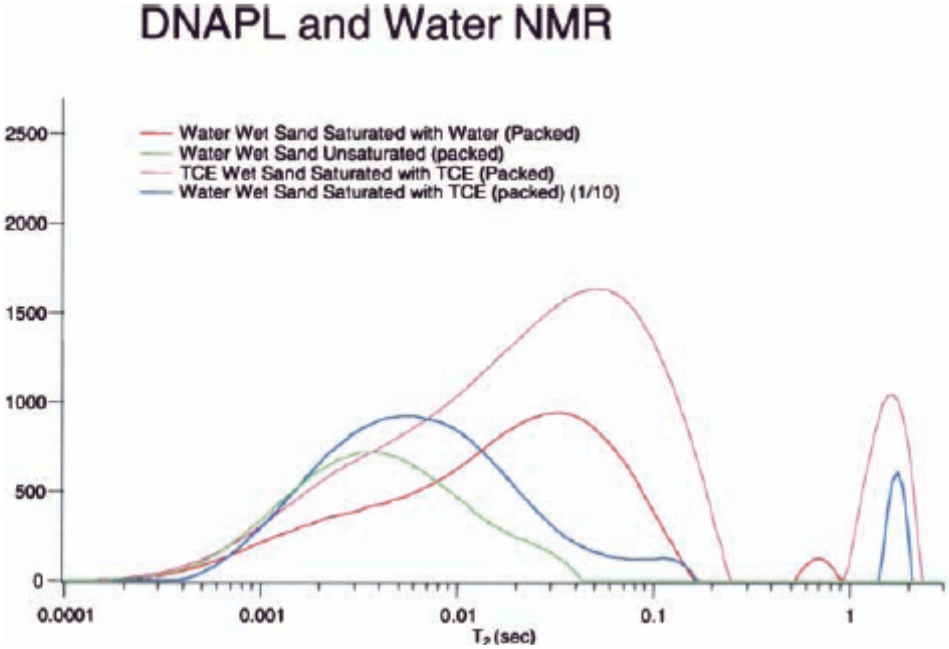
2.6.10 Γεωφυσική επισκόπηση για τον χαρακτηρισμό ρύπανσης εδάφους σε μικρό βάθος (Guillen et al., 2004)

Η ρύπανση του υπεδάφους μαστίζει πολλές περιοχές και απειλεί τα αποθέματα του υπόγειου νερού. Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε για να γίνει γεωφυσικός χαρακτηρισμός της ακόρεστης ζώνης (πάνω από την κορεσμένη ζώνη και πιο συγκεκριμένα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα) (Σχήμα 2.20) στο National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL) καθώς και σε άλλες ρυπασμένες περιοχές.



***Σχήμα 2.20**: Η ακόρεστη ζώνη (Guillen et al., 2004)*

Οι τύποι των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της ρηχής περιοχής του υπεδάφους είναι τα ηλεκτρομαγνητικά (EM), γεωραντάρ (GPR), ηλεκτρικά, σεισμικά και nuclear magnetic resonance (NMR). Τα τρία θέματα που παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο είναι: (i) η ανάπτυξη εικόνων υψηλής ανάλυσης όπου θα υπάρχει η δυνατότητα να αντληθούν σημαντικές πληροφορίες για την ετερογένεια του υπεδάφους και τις ιδιότητες του, (ii) ο συνδυασμός διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων (π.χ ηλεκτρικά) που παρουσιάζουν ακρίβεια στις μετρήσεις και λεπτομέρεια στην απεικόνιση με μεθόδους που εφαρμόζονται σε γεωτρήσεις (π.χ NMR, neutron-based moisture) και τελικά, (iii) η εφαρμογή πολλαπλών γεωφυσικών μεθόδων που περιορίζουν την ασάφεια στον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.



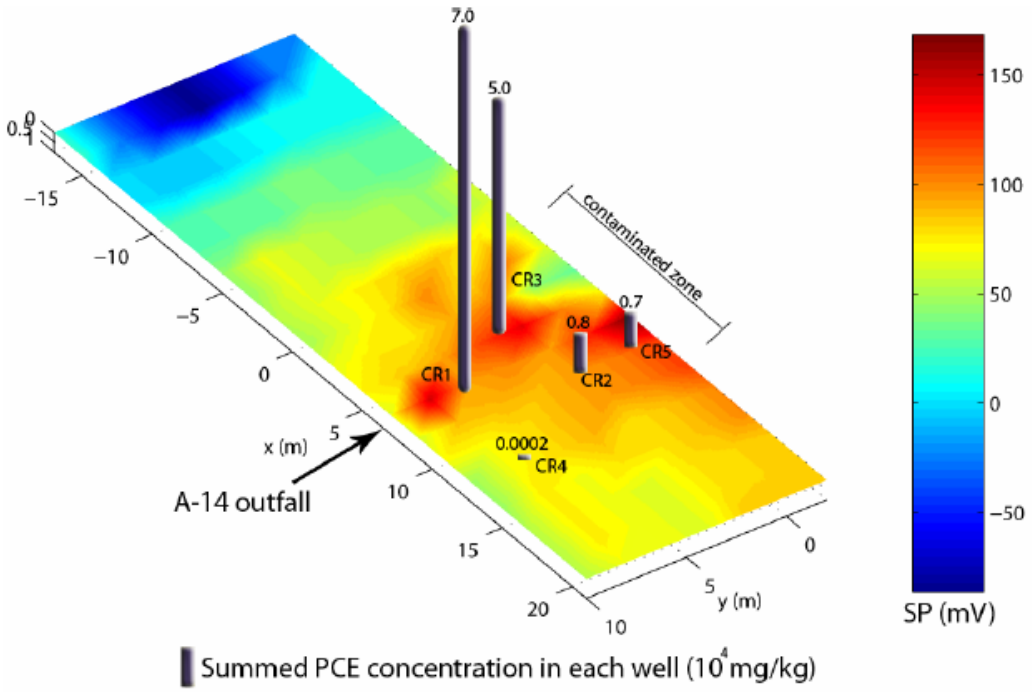
Σχήμα 2.23*: Οι κατανομές στους χρόνους T_2 στο NMR, χρησιμοποιούνται στην διάκριση των DNAPL από το νερό στο υπέδαφος. Στο διάγραμμα φαίνονται τέσσερις διαφορετικοί με νερό και TCE μέσα σε άμμο*

2.6.11 Τρισδιάστατη αναστροφή Φυσικού Δυναμικού για ανίχνευση και χαρτογράφηση της ρύπανση υπεδάφους στο DOE Savannah River Site (Minsley et al., 2004)

Δεδομένα Φυσικού Δυναμικού συλλέχθηκαν από μια περιοχή συνολικού εμβαδού 250m^2 στο Department of Energy (DOE) Savannah River Site όπου είναι γνωστή η ύπαρξη ρύπανσης στο υπέδαφος (DNAPL). Μη πολωτικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση σήματος SP, σε κάνναβο με αποστάσεις 2m στις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις και σε τέσσερις παραταγμένες γεωτρήσεις με απόσταση ηλεκτροδίων 3,7m και με ολικό βάθος τα 25,6 m.

Οι κύριοι ρύποι τετραχλωροαιθυλένιο (PCE) και τετραχλωροαιθυλένιο (TCE), οξειδώνονται σχετικά εύκολα στο περιβάλλον. Οι διακυμάνσεις στις οξειδοαναγωγικές συνθήκες του υπεδάφους αποτελούν την ηλεκτροχημική πηγή για τα σήματα Φυσικού Δυναμικού που μετρώνται σε αυτή την επισκόπηση. Ένας τρισδιάστατος αντίστροφος αλγόριθμος Φυσικού Δυναμικού χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει το μοντέλο της ηλεκτρικής πηγής, λαμβάνοντας υπόψη την δομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτει από το 3D επαγωγική πόλωση στον χώρο των συχνοτήτων που μετρήθηκε στην ίδια ακριβώς θέση στο ύπαιθρο. Οι πηγές και οι εξασθενήσεις του ηλεκτρικού ρεύματος μπορούν να συσχετιστούν με τις ζώνες υψηλού και χαμηλού οξειδοαναγωγικού δυναμικού και για αυτό τον λόγο

αναγνωρίζεται η ποσότητα των ρύπων που υπάρχουν στην κάθε θέση. Αυτά τα αποτελέσματα συσχετίζονται με συγκεντρώσεις DNAPL, οι οποίες έχουνε προκύψει σαν δεδομένα από αρκετά πηγάδια μετρήσεων, αποτελώντας ένδειξη ότι οι πηγές SP είναι δείκτης για ρύπους σε μια περιοχή όπου οι πηγές ηλεκτροχημικών μηχανισμών είναι ενεργές. Παρόλα αυτά σε αρκετές περιπτώσεις οι πηγές SP και οι συγκεντρώσεις του ρύπου δεν συσχετίζονται, πράγμα το οποίο αποδεικνύει ότι η διακύμανση των βιοχημικών παραμέτρων στο έδαφος που ελέγχουνε την απόκριση SP επιπρόσθετα με την συγκέντρωση.



Σχήμα 2.24*: Στο σχήμα αυτό φαίνεται η σχέση μεταξύ των επιφανειακών δεδομένων SP και της ολικής συγκέντρωσης PCE στα πηγάδια παρατήρησης. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στα σημεία με τις μεγαλύτερες SP ανωμαλίες. Αυτό επιβεβαιώνει την σχέση μεταξύ της επιφανειακής SP και των ρυπασμένων ζωνών.*

Πιο εκτεταμένες γεωχημικές πληροφορίες είναι απαραίτητες για την επιβεβαίωση της μεθοδολογίας για την τρισδιάστατη αναστροφή του Φυσικού Δυναμικού και την ανάπτυξή της ως εργαλείο πρόβλεψης για ρυπασμένες περιοχές.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή της περιοχής μελέτης

3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε επεξεργασία δεδομένων από μελέτη που έλαβε χώρα στην περιοχή του Ασπροπύργου και πιο συγκεκριμένα στα ΕΛΠΕ. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Ανταγωνιστικότητα", Γ' Κ.Π.Σ., 2000-2006. Έργο: "Διεθνείς συνεργασία στη βιομηχανική έρευνα και δραστηριότητες ανάπτυξης σε προ-ανταγωνιστικό στάδιο-2003", τομέας: "Περιβάλλον", τίτλος: "Εκτίμηση και παρακολούθηση της ρύπανσης εδαφών από πετρελαιοειδή με σύγχρονες γεωφυσικές μεθόδους (ΕΛΕΓΧΟΣ)".

Στο συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα χρησιμοποιούνται γεωφυσικές μέθοδοι για την ανίχνευση της ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων νερών από πετρελαιοειδή. Κοινός στόχος των δύο έργων είναι η προστασία των υπόγειων νερών από τη ρύπανση, είτε αυτή προέρχεται από πετρελαιοειδή είτε από την υφαλμύρωση.

3.2 Γενικά στοιχεία για την εταιρεία

Το 1958 το Ελληνικό Δημόσιο αναθέτει την έναρξη λειτουργίας του Διυλιστηρίου Ασπροπύργου στην εταιρία ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ Α.Ε. Έτσι, ξεκινά η λειτουργία του πρώτου διυλιστηρίου πετρελαίου στη χώρα. Η τεχνολογική και παραγωγική εξέλιξή του υπήρξε ραγδαία και σήμερα αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα διυλιστήρια πετρελαίου στην Ευρώπη. Είναι σύνθετο (complex), με ετήσια δυναμικότητα διύλισης 7,5 εκατ. μετρικών τόνων αργού. Διαθέτει μεγάλο αριθμό μονάδων διύλισης και μετατροπής βαρέων κλασμάτων σε λευκά προϊόντα. Βασικό πλεονέκτημά του είναι οι μονάδες μετατροπής με υψηλό δείκτη πολυπλοκότητας.

Με τη λειτουργία της μονάδας ΤΑΜΕ, είναι σε θέση να παράγει βενζίνη υψηλών οκτανίων με αυστηρές περιβαλλοντικές προδιαγραφές (10 ppm S), την οποία προμηθεύει σε όλο τον Όμιλο, ενώ καλύπτει το 80% της συνολικής παραγωγής του Ομίλου σε τελικά προϊόντα βενζινών. Επίσης, με τη μονάδα αποθείωσης diesel δύναται να παράγει Auto diesel 50 και 10 ppm S.

Μετά τα εκτενή έργα αναβάθμισης μονάδων και δικτύων διακίνησης που έλαβαν χώρα το 2004, το Διυλιστήριο Ασπροπύργου λειτούργησε το 2005 εναρμονισμένο πλήρως στις νέες περιβαλλοντικές απαιτήσεις και στις σύγχρονες απαιτήσεις ασφάλειας, αυξάνοντας παράλληλα την αποδοτικότητά του και τη συμμετοχή του στην κερδοφορία του Ομίλου.

Ενόψει των μελλοντικών περιβαλλοντικών απαιτήσεων που θα τεθούν σε ισχύ από το έτος 2008, το Διυλιστήριο Ασπροπύργου προγραμματίζει νέα έργα, προκειμένου να εξασφαλίσει τη δυναμική συμμετοχή του στην κάλυψη των αναγκών του Ομίλου.

3.3 Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης

Σύμφωνα με τις διαγραφίες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάνοιξη των πηγαδιών παρακολούθησης και άντλησης της ελεύθερης φάσης στα πλαίσια του προγράμματος αποκατάστασης, το έδαφος στην περιοχή του διυλιστηρίου αποτελείται από αμμώδη και ιλυώδη άργιλο (sand – silty clay) με τη συμμετοχή χαλικιών και χονδρότερων υλικών. Το πάχος των υλικών αυτών κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,5 και 6m. Η χημική και ορυκτολογική σύσταση του εδαφικού υλικού σχετίζεται με αυτήν του υποστρώματος, το οποίο αποτελείται από ασβεστόλιθο και δολομίτη στους λόφους και αλουβιακές αποθέσεις στα χαμηλότερα επίπεδα. Το ενεργό πορώδες του ασβεστόλιθου είναι μεταξύ των τιμών 0,1-5%, το οποίο αποτελεί μια ενδιάμεση τιμή πορώδους σε σχέση με άλλα πετρώματα, η οποία βέβαια ευνοεί τη γρήγορη μετακίνηση των ρύπων. Το νερό της βροχής προκαλεί έντονη διάβρωση στο εδαφικό υπόστρωμα με αποτέλεσμα στην περιοχή να έχουν εντοπιστεί έγκοιλα σε διάφορα μεγέθη.

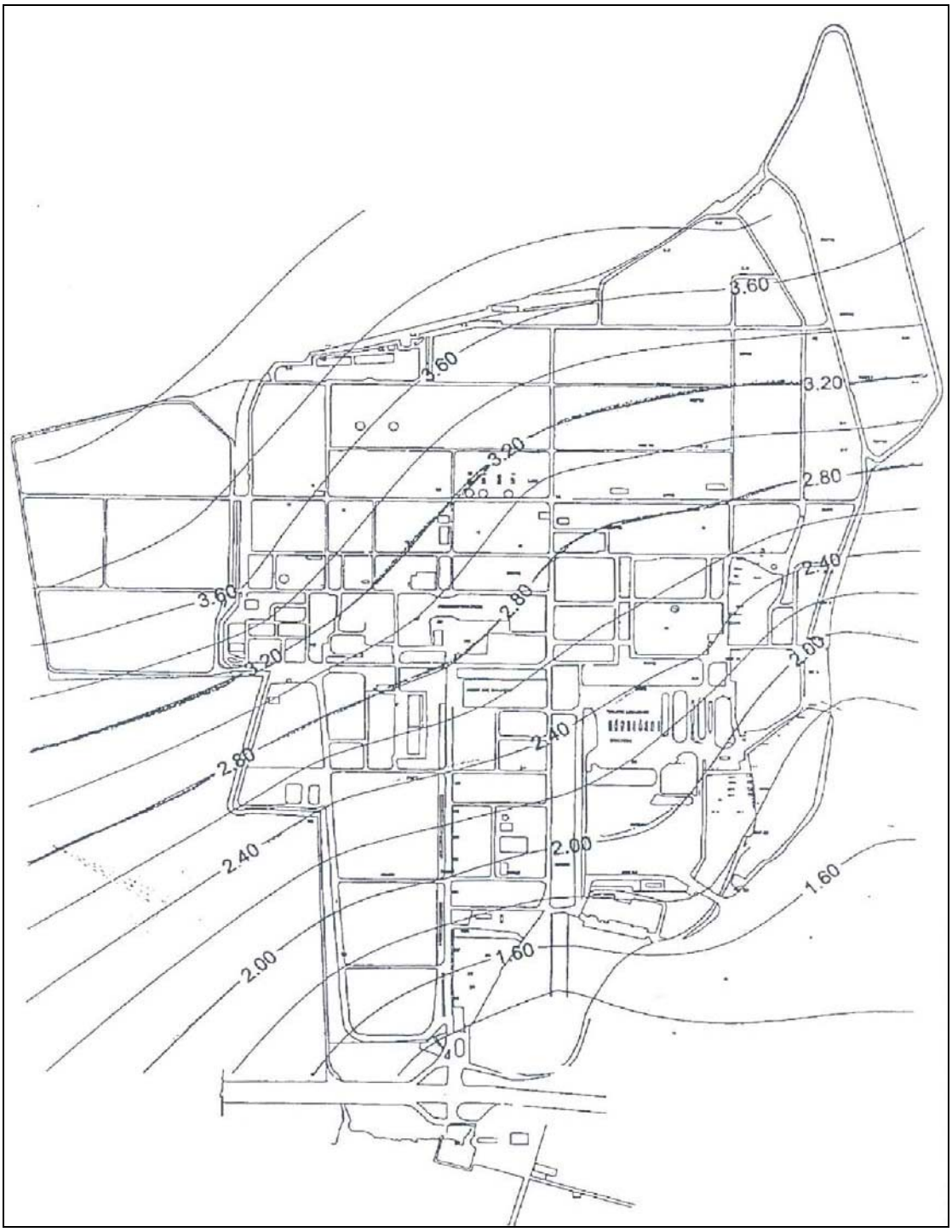
Το νερό που μεταφέρεται υπογείως δημιουργεί ένα πολύπλοκο υπόγειο σύστημα καναλιών, το οποίο κατά τόπους γίνεται επιφανειακό και καταλήγει σε πηγές ή στη θάλασσα. Τα ρήγματα που υπάρχουν στην περιοχή διακόπτουν ή αλλάζουν την πορεία της υπόγειας ροής και είναι υπεύθυνα για τις αλλαγές στη λιθολογία αλλά και την ύπαρξη λόφων. Η ροή του υπόγειου νερού καθορίζεται από αυτές τις αλλαγές και το υδραυλικό ύψος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 και 9m. Επίσης η παρουσία εγκοίλων, τα οποία αποθηκεύουν ποσότητες νερού, οδηγούν σε μη προβλέψιμες κατευθύνσεις την υπόγεια απορροή.

Οι λόφοι που υπάρχουν μεταξύ του διυλιστηρίου και της λίμνης Κουμουνδούρου αναπτύσσονται σχεδόν από την Ανατολή προς τη Δύση. Η δυτική πλευρά των λόφων διακόπτεται από την εθνική οδό Αθηνών – Κορίνθου και τελειώνει στην ακτή. Στην περιοχή υπάρχει ένα καταγεγραμμένο ρήγμα, το οποίο είναι παράλληλο με τους λόφους και βρίσκεται νότια των ορίων του διυλιστηρίου, ξεκινώντας από το βορειοδυτικό τμήμα του διυλιστηρίου και καταλήγοντας στην ακτή. Το ρήγμα αυτό φαίνεται να τελειώνει στο λόφο (παρουσιάζει ύφεση) αλλά μπορεί να υποτεθεί ότι συνεχίζει έως τον κόλπο του Σαρωνικού.

Ένα επιπλέον σημαντικό πρόβλημα κατά τον προσδιορισμό των εδαφικών ιδιοτήτων, είναι η ποσότητα και ο τύπος των υπόγειων εγκαταστάσεων που υπάρχουν στην περιοχή του διυλιστηρίου. Έτσι, το έδαφος σε πολλά σημεία διακόπτεται από υλικά όπως ξύλο, τσιμέντο, ατσάλι, σκουπίδια κ.α αλλά και εγκαταστάσεις όπως σωληνώσεις, υπόγεια διαμερίσματα και κανάλια. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα την επίδραση:

- στην υπόγεια απορροή,
- στην εξάπλωση του εδαφικού αέρα,
- στον εντοπισμό της θέσης και της έκτασης των πλουμίων της ελεύθερης φάσης στον υπόγειο υδροφορέα

Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται οι ισοϋψείς γραμμές του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα του διυλιστηρίου, όπως αυτές έχουν προκύψει από παλαιότερες μελέτες της υδρογεωλογίας της περιοχής (Κανελλοπούλου, 2004).



Σχήμα 3.1: Ισοϋψείς του υδροφόρου ορίζοντα του διυλιστηρίου (Κανελλοπούλου, 2004)

3.4 Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης

Στα τέλη της δεκαετίας του 80' (1989), διαπιστώθηκε η παρουσία πετρελαιοειδών στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής εγκατάστασης και λειτουργίας αυτού. Το φαινόμενο αυτό θεωρήθηκε ιδιαίτερα επικίνδυνο, δεδομένου ότι πλησίον

των εγκαταστάσεων υπάρχει η λίμνη Κουμουνδούρου και η ακτογραμμή του κόλπου της Ελευσίνας. Μια ενδεχόμενη διαρροή πετρελαιοειδών προς αυτά θα μπορούσε να έχει καταστροφικές συνέπειες για το τοπικό οικοσύστημα και φυσικά θα εμπεριείχε σημαντική επικινδυνότητα για όλους τους πιθανούς αποδέκτες (ψάρια, πουλιά, ανθρώπους, κτλ.).

Σύμφωνα με τις δειγματοληψίες και τις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής τόσο στην ελαιώδη φάση, όσο και στο νερό, στο έδαφος και στον εδαφικό αέρα της περιοχής του διυλιστηρίου έχει διαμορφωθεί μια αξιόπιστη εικόνα της κατάστασης ρύπανσης που επικρατεί, η οποία παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους (Κανελλοπούλου, 2004).

3.4.1 Ελεύθερη φάση

Ο όρος ελεύθερη φάση αναφέρεται σε πετρελαϊκά προϊόντα που ανήκουν στα λεγόμενα Μη – Υδατικής Φάσης Υγρά (Non – Aqueous Phase Liquids – NAPL), τα οποία διαλύονται ελάχιστα στο νερό και ως εκ τούτου υπάρχουν μέσα σε αυτό ως ξεχωριστή φάση. Ειδικότερα, όταν αυτά είναι ελαφρύτερα από το νερό ανήκουν στα λεγόμενα LNAPL (Light Non – Aqueous Phase Liquids) και σχηματίζουν ένα στρώμα ελεύθερης φάσης που επιπλέει πάνω στον υδροφορέα.

Δειγματοληψίες και αναλύσεις της ελεύθερης ελαιώδους φάσης έχουν δείξει ότι ένα μεγάλο τμήμα του υπεδάφους του διυλιστηρίου καλύπτεται από στρώμα ελαιώδους φάσης το οποίο αποτελεί κλάσμα ελαφρών υδρογονανθράκων και η σύστασή του παραπέμπει σε βενζίνη. Το κλάσμα αυτό επιμολύνεται τοπικά από βαρύτερα συστατικά (ντίζελ ή jet fuel). Σε συγκεκριμένες περιοχές του διυλιστηρίου ανιχνεύονται δείγματα που παραπέμπουν σε αργό πετρέλαιο διαφορετικού βαθμού αποδόμησης. Τα δείγματα με υψηλή πυκνότητα (βαριά συστατικά) εντοπίζονται στην ΒΔ περιοχή του διυλιστηρίου, ενώ τα ελαφρά δείγματα στην ανατολική περιοχή (Κανελλοπούλου, 2004).

3.4.2 Υπόγειο νερό

Στις αναλύσεις δειγμάτων υπόγειου νερού που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν, μετρήθηκε η συνολική ποσότητα των περιεχομένων υδρογονανθράκων στο νερό (TPH), των πτητικών αρωματικών υδρογονανθράκων (BTEX) και των πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) (Κανελλοπούλου, 2004).

3.4.3 Εδαφικός αέρας

Ο όρος "εδαφικός αέρας" (soil gas) αναφέρεται στον αέρα που καταλαμβάνει τους πόρους του εδάφους. Εάν στο έδαφος υπάρχουν πτητικά συστατικά (π.χ. πτητικοί υδρογονάνθρακες), είτε προσροφημένα στην επιφάνεια των κόκκων, είτε σε υγρή κατάσταση, τότε στον εδαφικό αέρα συνυπάρχουν και οι ατμοί αυτών σε ισορροπία με την υγρή φάση. Οι ατμοί αυτοί μπορεί να αποτελούν κίνδυνο εκρήξεων (Κανελλοπούλου Γ., 2004).

Όπως έχει προκύψει από δειγματοληψίες και αναλύσεις εδαφικού αέρα του υπεδάφους του εν λόγω διυλιστηρίου, σε όλες τις περιοχές δειγματοληψίας, με εξαίρεση την νοτιοανατολική περιοχή, μετρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων.

3.4.4 Έδαφος

Σε γενικές γραμμές, οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες που συναντώνται στα δείγματα εδάφους είναι κυρίως κορεσμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία των επικίνδυνων ρύπων για το υπόγειο νερό. Με βάση τη χαμηλότερη πυκνότητά τους από το νερό (0,7-1g/ml), οι υδρογονάνθρακες αυτοί θα συσσωρευτούν πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα επηρεάζοντας την οσμή, το χρώμα και τη γεύση του πόσιμου νερού. Σύμφωνα με τη μοριακή τους δομή, τα συστατικά αυτά έχουν χαμηλή διαλυτότητα στο νερό αλλά είναι εξαιρετικά πτητικά. Και οι δυο παράγοντες μειώνονται με την αύξηση του μοριακού βάρους των κλασμάτων.

Επειδή τα εδαφικά δείγματα ήταν σε γενικές γραμμές αμμώδη, όσον αφορά την κοκκομετρία τους θεωρείται ότι ευνοούν τη διήθηση των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων σε μεγαλύτερα βάθη. Οι συγκεντρώσεις TPH που έχουν προσδιοριστεί είναι σε χαμηλά έως μέτρια επίπεδα βάση το εύρος τιμών συγκεντρώσεων (300 – 5000mg/Kg), οι οποίες επιδιώκονται κατά τον καθαρισμό εδαφών από πετρελαϊκούς ρυπαντές. Οι διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα κατά τις εποχιακές αλλαγές πιθανότατα έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ευρύτερης περιοχής ρύπανσης με υψηλές ποσότητες υδρογονανθράκων (Κανελλοπούλου, 2004).

3.5 Γεωφυσική διασκόπηση περιοχής

Στα διυλιστήρια του Ασπροπύργου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική διασκόπηση, με τις μεθόδους ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης, ηλεκτρικής τομογραφίας και

γεωραντάρ. Η γεωφυσική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικές περιόδους, τον Ιούλιο και τον Νοέμβριο του 2005.

Πιο συγκεκριμένα, τον Ιούλιο του 2005 διασκοπήθηκε η περιοχή Α, που βρίσκεται ανάμεσα στις δεξαμενές P8758A και P8758B (Σχήματα 3.6 και 1.1) στην οποία διατρήθηκαν οι τρεις ερευνητικές γεωτρήσεις Α, Β και Γ, συνολικού μήκους 20m. Από τις γεωτρήσεις συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους στα οποία έγινε χημική ανάλυση και βρέθηκαν πολύ μικρές συγκεντρώσεις πετρελαιοειδών. Επίσης, στις ίδιες γεωτρήσεις μετρήθηκε η αργιλότητα των εδαφών με την χρήση διαγραφιών.

Τον Νοέμβριο του 2005, εκτός από την περιοχή Α, διασκοπήθηκαν και οι περιοχές Β, Γ, 715Α, Δ, και LPG (Σχήματα 3.6–3.7). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 14 γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας συνολικού μήκους 696m, 42 γραμμές γεωραντάρ συνολικού μήκους 1092m, 4 κάνναβοι ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης συνολικού εμβαδού 1088 m^2. Οι πληροφορίες τόσο για τους γεωλογικούς σχηματισμούς, όσο και για την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, προήλθαν από παρακείμενες υπάρχουσες γεωτρήσεις και για αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο να μην σαρωθεί η περιοχή με την σεισμική μέθοδο, η οποία παρέχει πληροφορίες τόσο για την στρωματογραφία, όσο και για το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα.

3.6 Γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στα ΕΛΠΕ

3.6.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία οι μετρήσεις από τη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας μαζί και με τη μέθοδο του Γεωραντάρ αποτέλεσαν τις σημαντικότερες τεχνικές μελέτης της συγκεκριμένης περιοχής.

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή 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. Για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. 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.

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_α, 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.

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

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

Οι χαρακτηριστικές τιμές των ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες προέκυψαν από γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις αναφοράς, από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε θέσεις όπου τα πετρώματα εμφανίζονται στην επιφάνεια και από προηγούμενες μελέτες (Βαφείδης κ. α., 1991), (Βαφείδης κ. α., 1992), συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 : Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων.

Είδος Πετρώματος	**Αντίσταση** (Ohm.m)
Επιφανειακές προσχώσεις	80-250
Νεογενή ιζήματα	
Άργιλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200

Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
Αλπικά ιζήματα	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500

Διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια της γης έχουν προταθεί για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου – διπόλου.

Στη διάταξη διπόλου – διπόλου, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος αποτελούν το ένα δίπολο και απέχουν μεταξύ τους απόσταση α. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού αποτελούν το άλλο δίπολο και απέχουν μεταξύ τους την ίδια απόσταση α, ενώ τα δύο δίπολα απέχουν απόσταση n_α, όπου n ακέραιος. Στη διάταξη αυτή η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_\alpha = \pi \alpha n(n+1)(n+2)\frac{\Delta V}{I} \tag{3.1}$$

όπου ΔV είναι η τάση και I η ένταση του ρεύματος.

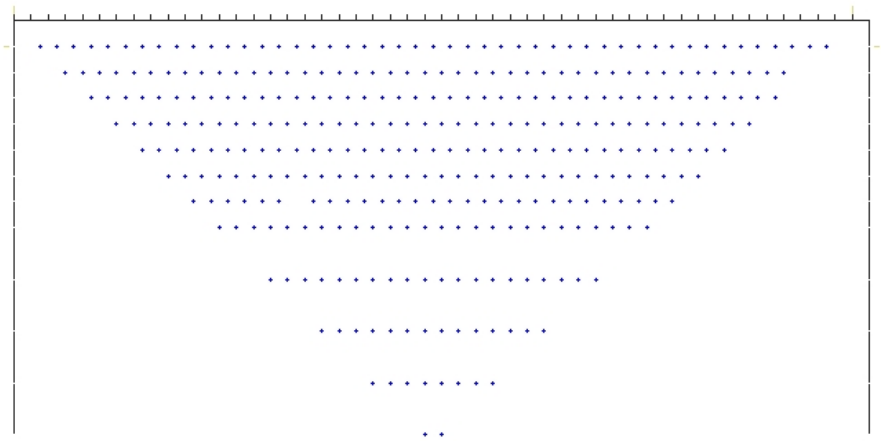
Για τη συλλογή των δεδομένων, δηλαδή των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται κατά μήκος ευθείας γραμμής, διατηρώντας σταθερή απόσταση α μεταξύ τους. Κάθε ηλεκτρόδιο έχει έναν αριθμό για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων με αριθμητική σειρά. Για την πρώτη μέτρηση τα 1 και 2 ηλεκτρόδια αποτελούν το δίπολο ρεύματος, ενώ τα 3 και 4 αποτελούν το δίπολο δυναμικού. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόδια 2 και 3 αποτελούν το δίπολο ρεύματος, ενώ το δίπολο δυναμικού αποτελείται από τα ηλεκτρόδια 4 και 5 και ούτω καθεξής μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλα τα ηλεκτρόδια. Όλες οι τιμές της φαινόμενης αντίστασης που υπολογίστηκαν, τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο από την επιφάνεια του εδάφους που ονομάζεται επίπεδο δεδομένων.

Αυξάνοντας την απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα, οι τιμές της φαινόμενης αντίστασης τοποθετούνται σε επίπεδο που βρίσκεται βαθύτερα από το προηγούμενο. Στην περίπτωση αυτή το δίπολο ρεύματος αποτελούν τα ηλεκτρόδια 1, 2 και το

δίπολο δυναμικού τα ηλεκτρόδια 4, 5. Η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλα τα ηλεκτρόδια, οπότε και αυξάνουμε την απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα. Η απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα είναι πάντα ακέραιο πολλαπλάσιο της απόστασης των ηλεκτροδίων του διπόλου.

Όσο αυξάνεται η απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα, η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης επηρεάζεται από βαθύτερα τμήματα του υπεδάφους. Αλλά επειδή το δίπολο δυναμικού σταδιακά απομακρύνεται από το δίπολο ρεύματος, οι μετρήσεις αρχίζουν να περιέχουν όλο και περισσότερο θόρυβο. Για αξιόπιστα αποτελέσματα η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του n είναι 8. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό αυξάνεται και η απόσταση των ηλεκτροδίων που αποτελούν τα δίπολα και η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους (Σχήμα 3.2). Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων που δίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης



Σχήμα 3.2: Διάταξη των δεδομένων στην ψευδοτομή του υπεδάφους.

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.

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.

3.6.2 Γεωραντάρ

Ο τρόπος που λειτουργεί το υπεδάφειο ραντάρ 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 του παλμού και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η διάδοση του κύματος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού καθώς και από τη συχνότητα εκπομπής της κεραίας του πομπού.

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το πλάτος του παλμού και το χρόνο που κάνει από τον πομπό στον δέκτη. Ο δέκτης κατοπτεύει τρία είδη κυμάτων (Σχήμα 3.3):

- Ανακλώμενα κύματα. Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από τον πομπό, διαδίδονται στο μέσο μέχρι να συναντήσουν κάποιο εμπόδιο όπου ανακλώνται και επιστρέφουν στο δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής ισούται με:

$$t_r = (4D^2 + X^2)/\upsilon \qquad (3.1)$$

  όπου X είναι η απόσταση πομπού-δέκτη και D το βάθος του εμποδίου.

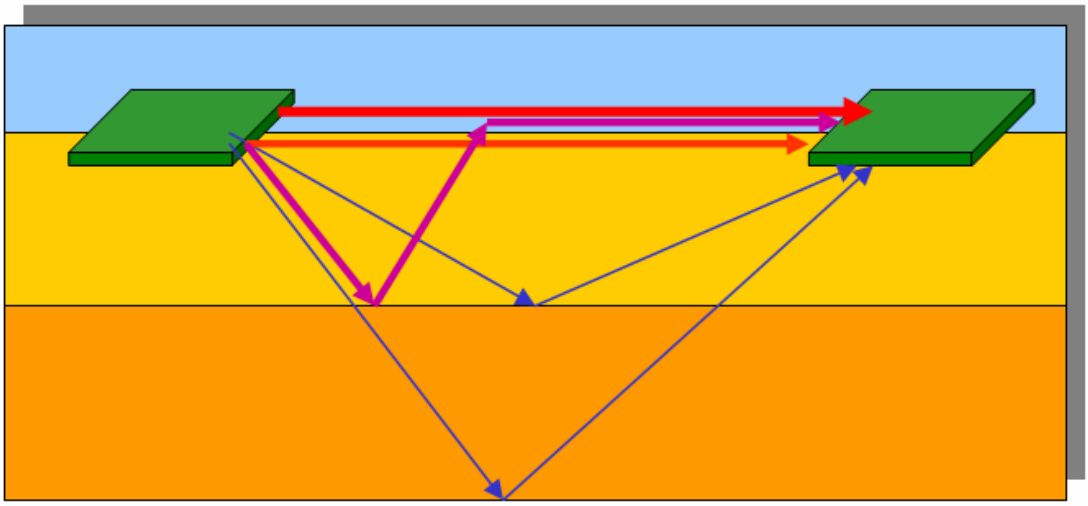
- Απ' ευθείας κύματα. Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: απ'

ευθείας κύματα αέρα και εδάφους. Τα κύματα αυτά διανύουν μικρές αποστάσεις οπότε οι απώλειες είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα. Τα απ' ευθείας κύματα του αέρα φτάνουν πρώτα στο δέκτη επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι η μέγιστη δυνατή. Αμέσως μετά φτάνουν τα απ' ευθείας κύματα εδάφους. Οι εξισώσεις που δίνουν το χρόνο διαδρομής γι' αυτά τα κύματα είναι αντίστοιχα:

$$t = X / \upsilon_{\text{αέρα}} \tag{3.2}$$

$$t = X / \upsilon_{\text{εδάφους}} \tag{3.3}$$

- Κρίσιμα διαθλώμενα κύματα. Όταν σε μία διασκόπηση κοινού ενδιάμεσου σημείου ή σταθερού πομπού κινούμενου δέκτη, η απόσταση πομπού δέκτη υπερβεί μια κρίσιμη τιμή X_c τότε το κύμα ανακλάται στη πρώτη επιφάνεια που θα συναντήσει, διαθλάται στην επιφάνεια και διαδίδεται προς τον πομπό μέσω του αέρα.



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

3.6.3 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος του κινούμενου πομπού-δέκτη χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να χαρτογραφηθούν τα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους και να επισημανθούν οποιεσδήποτε αξιοσημείωτες μεταβολές που παρατηρούνται στην τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά γρήγορη και προσφέρει άμεσα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα φυσικά συσχετίζονται με τις υπόλοιπες γεωφυσικές τεχνικές ώστε να προκύψουν τελικά οι περιοχές ενδιαφέροντος.

Στη μέθοδο του κινούμενου πομπού – δέκτη μελετάται η χρονική μεταβολή του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το όργανο μετράει την πραγματική και φανταστική συνιστώσα του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος γραμμών μελέτης ή σε κάνναβο.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετακινείται όλη η μονάδα, η οποία περιλαμβάνει το πομπό και το δέκτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με το όργανο CM – 031. Η συχνότητα του οργάνου είναι 9,766 kHz, ενώ η απόσταση πομπού – δέκτη είναι 3,74m. Το βάθος διασκόπησης φτάνει με το συγκεκριμένο όργανο τα 6m.

Η φανταστική συνιστώσα που μετράται με το όργανο δίνει πληροφορίες για την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους και χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση αυτού, ενώ η πραγματική συνιστώσα παρέχει περισσότερα στοιχεία για την ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων (καλώδια, σωλήνες, βαρέλια) στο υπέδαφος.

3.6.4 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας

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

Η διαγραφία ακτίνων γάμμα σε ιζηματογενείς σχηματισμούς συνήθως δίνει πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ραδιενεργά στοιχεία τείνουν να συγκεντρώνονται στα αργιλικά πετρώματα. Ιζηματογενείς σχηματισμοί χωρίς αργιλικές προσμίξεις εμφανίζουν χαμηλές τιμές φυσικής ραδιενέργειας εκτός αν το νερό του σχηματισμού περιέχει ραδιενεργά άλατα.

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

Διαγραφίες ακτίνων γάμμα

Στις διαγραφίες ακτίνων γάμμα καταγράφεται η φυσική ραδιενέργεια η οποία προέρχεται από το τμήμα του σχηματισμού το οποίο βρίσκεται κοντά στο φρεάτιο (1 ft). Η φυσική ραδιενέργεια ανιχνεύεται με απαριθμητή Geiger-Muller ή με απαριθμητή σπινθηρισμών.

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

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

Ο απαριθμητής σπινθηρισμών παρουσιάζει πολλή καλή ικανότητα εντοπισμού ακτίνων γάμμα λόγω των μικρών διαστάσεων του κρυστάλλου NaI και προτιμάται από τον απαριθμητή Geiger-Muller στις εργασίες ραδιομετρικής διασκόπησης σε φρεάτια όπου απαιτείται μεγάλη ευαισθησία και καλή διακριτική ικανότητα. Ο απαριθμητής σπινθηρισμού δεν δίνει αξιόπιστες πληροφορίες σε φρεάτια όπου οι θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 120oC, επειδή οι κρύσταλλοι NaI είναι ευαίσθητοι στην θερμοκρασία.

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

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

GRAPI= $\alpha U_{ppm}^{238} + \beta Th_{ppm}^{232} + \gamma K_{\%}^{40}$, όπου α, β, γ είναι σταθερές της συσκευής.

Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε αργιλικές προσμίξεις

Η διαγραφία ακτίνων γάμμα χρησιμοποιείται αντί της διαγραφίας φυσικού δυναμικού για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά όταν:

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

Η περιεκτικότητα σε αργιλικές προσμίξεις δίνεται από τη σχέση:

$$V_{sh} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$$

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

Οι τιμές της φυσικής ραδιενέργειας στις διαγραφίες ακτίνων γάμμα αντιστοιχούν στο μέσο όρο μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε χρονικό διάστημα π.χ. 1 sec. Η διαγραφία των ακτίνων γάμμα επηρεάζεται από την ταχύτητα με την οποία κινείται η συσκευή. Μια τυπική ταχύτητα είναι 1800 ft/hour. Μεγαλύτερη ταχύτητα (π.χ. 3600

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

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

3.7 Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ

3.7.1 Εισαγωγή

Οι εικόνες του υπεδάφιου ραντάρ ανακτώνται από την καταγραφή του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υπέδαφος και προκειμένου να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα για την κατανόηση τους απαιτείται η ψηφιακή ανάλυση αυτών. Σκοπός της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι να τονίσει κάποια χαρακτηριστικά που δε γίνονται άμεσα αντιληπτά.

Το πρώτο στάδιο στην ψηφιακή ανάλυση εικόνας είναι το στάδιο της προεπεξεργασίας, το οποίο περιλαμβάνει:

- Αρχικά την εφαρμογή φίλτρων με τα οποία επιτυγχάνεται ο τονισμός των οριζόντιων και των κεκλιμένων ανακλαστήρων, του αποτελέσματος των κυμάτων περίθλασης, η απομάκρυνση του θορύβου και γενικότερα η βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.
- Στη συνέχεια εφαρμογή μετασχηματισμών των δεδομένων. Αυτός ο τρόπος παρουσίασης δεδομένων έχει σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή σχέσεων και συμπερασμάτων που διαφορετικά δεν θα ήταν αντιληπτά.

Οι δύο κυριότεροι μετασχηματισμοί είναι:

1. Ο μετασχηματισμός Fourier ο οποίος επιτρέπει τη μελέτη ιδιοτήτων ενός ίχνους (ή χρονοσειράς) αλλά δεν επιτρέπει τη μελέτη των τοπικών διακυμάνσεων.
2. Η ανάλυση δεδομένων σαν αναλυτικά σήματα ή διαφορετικά η μιγαδική ανάλυση ιχνών (complex trace analysis), εξασφαλίζει την τοπική πληροφορία (Taner 1979).

3.7.2 Μονοδιάστατα Φίλτρα

Τα μονοδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε να ενεργούν είτε σε χρονοσειρές, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, είτε σε

στιγμιότυπα κύματος λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά ίχνη, αλλά αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο. Δηλαδή ενεργούν στον x-άξονα (απόσταση, m) ή στον y-άξονα (χρόνος, nsec), (Σπανουδάκης, 2001).

Φίλτρο διόρθωσης Dewow

Πρόκειται για φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων κάθε ίχνους ξεχωριστά. Αρχικά υπολογίζει το μήκος του τελεστή (M) από τη σχέση $2/(f \cdot \Delta t)$, όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής (MHz) και Δt το διάστημα δειγματοληψίας (nsec). Ο τελεστής αυτός υπολογίζει το μέσο όρο των σημείων γύρω από το κεντρικό. Κατόπιν η μέση τιμή αφαιρείται από τα αρχικά δεδομένα. Η γενική μορφή του τελεστή που υπολογίζει τη μέση τιμή είναι:

$$\frac{1}{M}\begin{bmatrix}1\\1\\\vdots\\1\\1\end{bmatrix}_{(M\times 1)} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{M}\begin{bmatrix}0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0\\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}_{(M\times N)}$$

Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal)

Πολλές φορές λόγω του φαινομένου της αντήχησης των κεραιών (antenna ringing), εμφανίζονται στα δεδομένα, σήματα που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες. Τέτοιοι οριζόντιοι ανακλαστήρες εμφανίζονται και λόγω της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το περιβάλλον. Για παράδειγμα οι χρήστες του γεωραντάρ, τα ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες και δέκτες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούν σημαντικές επιδράσεις στο σήμα που καταγράφεται. Το φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου εφαρμόζεται για να εξαλειφθούν τα παραπάνω φαινόμενα. Για να υλοποιηθεί αυτό υπολογίζεται ένα νέο ίχνος το οποίο αποτελεί το μέσο όρο όλων των ιχνών. Κατόπιν το μέσο ίχνος αφαιρείται από κάθε ίχνος και προκύπτει μια νέα εικόνα απαλλαγμένη από τα παραπάνω φαινόμενα.

3.7.3 Δισδιάστατα Φίλτρα

Τα δισδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε κατά την εφαρμογή τους να λαμβάνουν υπόψη μια ομάδα δεδομένων που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη και γειτονικούς χρόνους. Κάνουν πράξεις μεταξύ των δεδομένων και το αποτέλεσμα

αντικαθιστά το κεντρικό δεδομένο. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο σε τομές γεωραντάρ όσο και σε οριζόντιες τομές (Σπανουδάκης, 2001).

3.7.4 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).

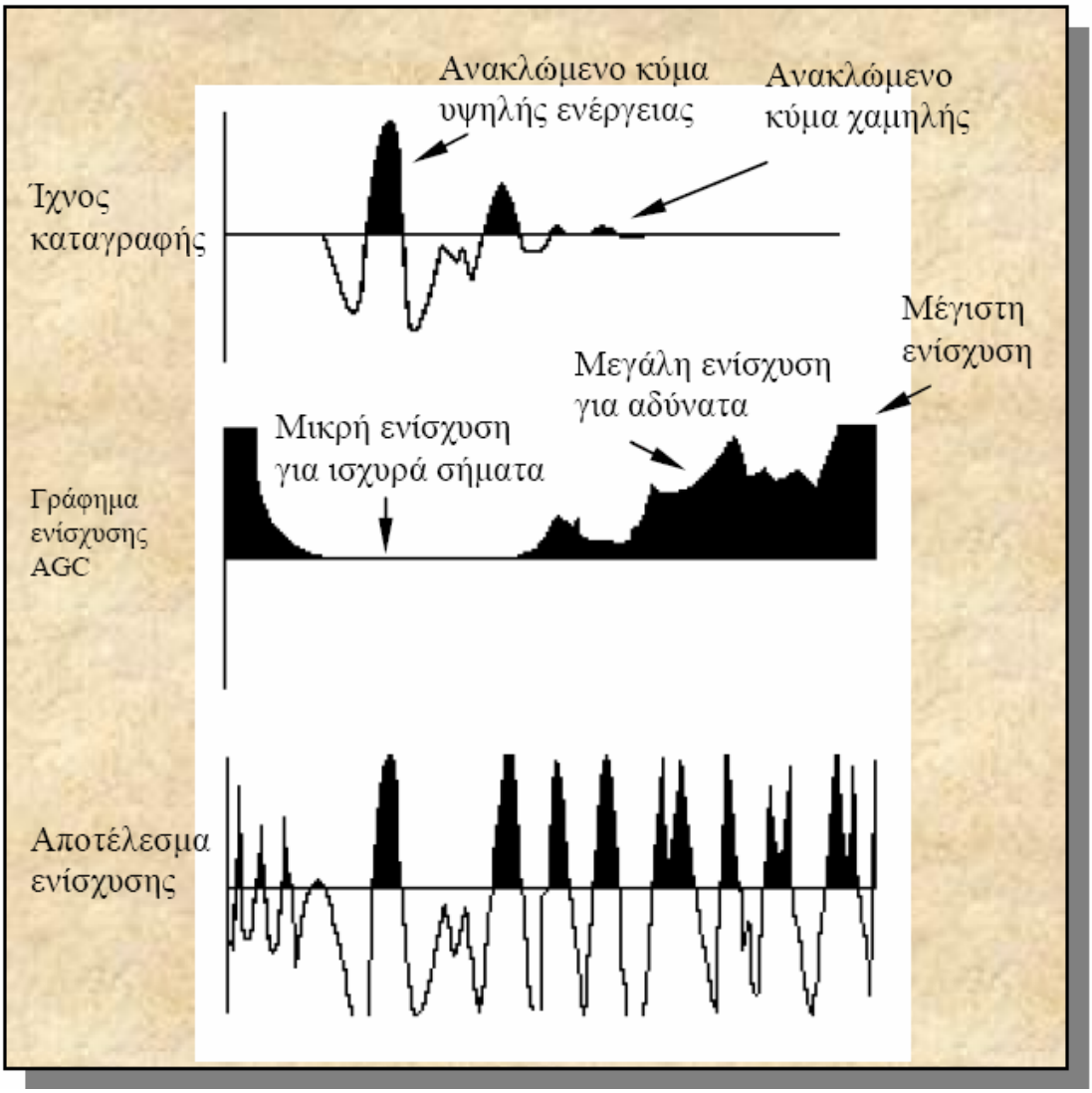
Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ενίσχυσης:

- Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC)
- Εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (Spreading and Exponential Compensation - SEC)
- Σταθερή ενίσχυση (Πουλιούδης, 1999).

Σε αυτή την εργασία εφαρμόστηκαν ο δεύτερος τύπος ενίσχυσης ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

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 γραμμικά (Σχήμα 3.4). Η συνάρτηση που περιγράφει την ενίσχυση SEC είναι $g(t) = C + \left(1 + \frac{t - (\tau_w + t_0)}{\tau_w}\right) e^{bt}$, όπου C είναι η σταθερά εκκίνησης, t_0 ο χρόνος άφιξης του πρώτου σήματος (timezero), τ_w το εύρος του παλμού και το β = (εξασθένιση α σε db/m επί ταχύτητα παλμού 0,1 m/ns) / 8,69 (Πουλιούδης, 1999).



Σχήμα 3.4: Η ενίσχυση SEC (Πουλιούδης, 1999).

3.7.5 Μιγαδικά χαρακτηριστικά (Instantaneous Complex Attributes)

Η μιγαδική ανάλυση ιχνών όπως προαναφέρθηκε αποτελεί τεχνική μετασχηματισμού που εξασφαλίζει την τοπική λεπτομέρεια. Έχει σαν αποτέλεσμα τον φυσικό διαχωρισμό του πλάτους και της φάσης μιας κυματομορφής (χαρακτηριστικά ή attributes). Το χαρακτηριστικό πλάτος αναφέρεται σαν ισχύς ανάκλασης ή φάκελος ή στιγμιαίο πλάτος του σήματος (reflection strength , envelope, instantaneous amplitude), ενώ η φάση αναφέρεται ως στιγμιαία φάση (instantaneous phase). Η στιγμιαία φάση αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της στιγμιαίας συχνότητας (instantaneous frequency).

Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά

Η *στιγμιαία φανταστική συνιστώσα* είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά 90° σήμα, το οποίο χρησιμεύει στον ποιοτικό έλεγχο της μεταβολής της στιγμιαίας φάσης στο χρόνο.

Το *στιγμιαίο πλάτος* (Instantaneous Envelope) είναι βασικό μιγαδικό χαρακτηριστικό, επειδή αποτελεί το μέτρο του σύνθετου ίχνους που χάνει στην ανάλυση κατά τη διεύθυνση του χρόνου, χρησιμεύει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες. Η σχέση που το περιγράφει είναι:

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + x^{*2}(t)} \tag{3.4}$$

Το *στιγμιαίο πλάτος (dB based Reflection Strength) σε κλίμακα dB* δίδεται από τη σχέση: 20logE(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 (fractal analysis) δίδει πληροφορίες σχετικά με στρωματογραφικές σειρές και ανωμαλίες λόγω της ύπαρξης υδρογονανθράκων.

Η *στιγμιαία φάση* (Instantaneous Phase) δίδεται από τη σχέση θ(t) = arctan $[\frac{x^*(t)}{x(t)}]$ και τείνει να ενισχύσει τους αδύναμους ανακλαστήρες αφού είναι ανεξάρτητη από το πλάτος. Όμως είναι πολύ ευαίσθητη στο θόρυβο.

Η *στιγμιαία συχνότητα* (Instantaneous Frequency) ορίζεται σαν ο ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας φάσης $d\theta(t)/dt$ και είναι πολύ ευαίσθητη στο θόρυβο.

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

$$\text{Semblance(t)} = \frac{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2}\left[\sum_{m=1}^{M} f_m(t+\tau)\right]^2 - \sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2}\left[\sum_{m=1}^{M} f_m{}^2(t+\tau)\right]}{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2}\left[\sum_{m=1}^{M} f_m{}^2(t+\tau)\right]} \tag{3.5}$$

Όπου $\mathbf{f}_m$ είναι το m ίχνος του συνόλου και **N** το μήκος του παραθύρου υπολογισμού.

3.7.6 Μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών (principal components analysis)

Ο σκοπός της ανάλυσης κύριων συνιστωσών είναι να εξηγήσει τη δομή του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας Σ μέσω ελάχιστων (π.χ. 2 ή 3) γραμμικών συνδυασμών των αρχικών μεταβλητών, ώστε να ελαττωθούν οι διαστάσεις των δεδομένων και να γίνει ευκολότερη η ερμηνεία τους. Η ανάλυση αυτή αποκαλύπτει σχέσεις που δεν ήταν δυνατόν να υποπτευθεί κανείς και επομένως επιτρέπει μια ερμηνεία που δεν θα προέκυπτε από συμβατική ανάλυση. Με την ανάλυση κύριων συνιστωσών προσδιορίζεται ένα νέο σύστημα συντεταγμένων στο οποίο τα δεδομένα που προκύπτουν είναι στατιστικώς ασυσχέτιστα. Δηλαδή, πρέπει να προσδιοριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων **y** έτσι ώστε ο αρχικός πίνακας **Σ** διασποράς (μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας) να μετασχηματιστεί σε διαγώνιο πίνακα.

Ο πίνακας Σ μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας δίνεται από την σχέση:

$$\Sigma = \mathrm{Cov}\,(X) = E\,[(X-\mu)\,(X-\mu)^T] \qquad (3.6)$$

Και X τυχαίος πίνακας της μορφής : $X_{(p\times N)} = [\,x_1 |\, x_2 |\ldots |\, x_p\,]^T$ (3.7)

Όπου **p** ο αριθμός των μιγαδικών χαρακτηριστικών (attributes), **N** ο αριθμός των ιχνών και **x** τυχαίες μεταβλητές.

Και E(x) η μέση τιμή των παραπάνω δεδομένων : $E(x) = \begin{bmatrix} E(x_1) \\ E(x_2) \\ \vdots \\ E(x_p) \end{bmatrix}$ (3.8)

Με την ανάλυση των κυρίων συνιστωσών προσδιορίζεται ένα σύστημα συντεταγμένων ψ έτσι ώστε ο αρχικός πίνακας Σ διασποράς (ή μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας) να μετασχηματιστεί σε διαγώνιο πίνακα. Οι κύριες συνιστώσες είναι στατιστικώς ασυσχέτιστες και έχουν μεταβλητότητες ίσες με τις ιδιοτιμές του πίνακα Σ, ενώ ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των κύριων συνιστωσών είναι διαγώνιος.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \ldots \geq \lambda_p \qquad \Sigma_\psi = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \qquad (3.9)$$

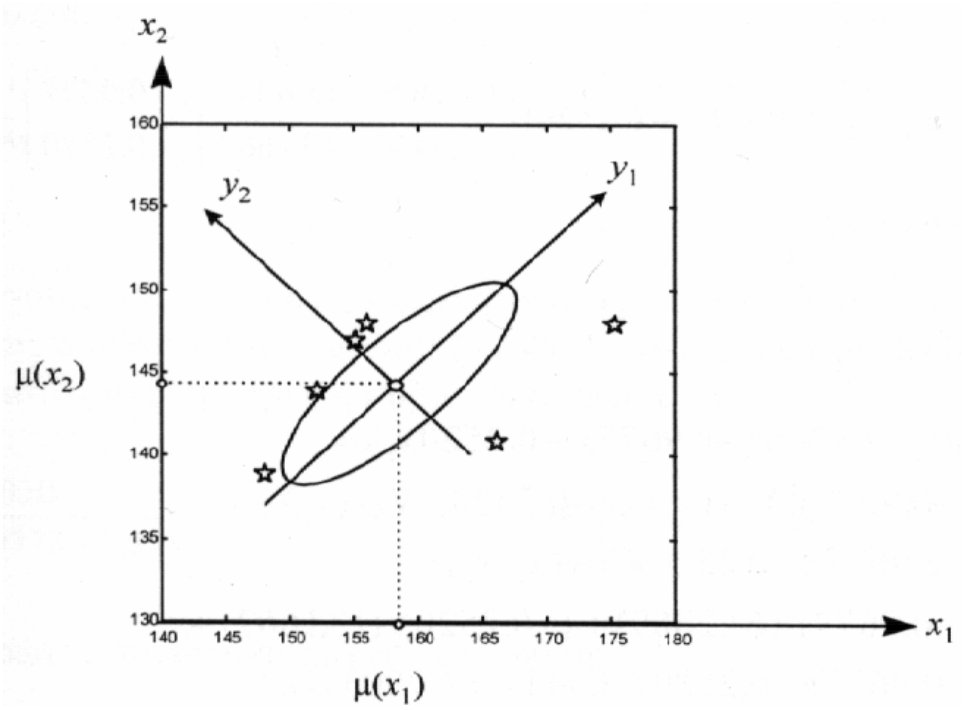
Για κάθε μη – μηδενική ιδιοτιμή λ_i προσδιορίζεται το αντίστοιχο διάνυσμα:

$$e_i = \begin{bmatrix} e_{1,i} \\ e_{2,i} \\ \vdots \\ e_{p,i} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Επομένως οι κύριες συνιστώσες περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$y_1 = e_1^T x \tag{3.11}$$

$$y_2 = e_2^T x \tag{3.12}$$



Σχήμα 3.5: Ο μετασχηματισμός των κυρίων συνιστωσών (Μερτίκας, 1999)

Πολλές φορές παρατηρείται το ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας που αντιστοιχεί στις δύο ή τρεις πρώτες κ.τ.λ. συνιστώσες να αποτελεί ή και να υπερβαίνει το 80 με 90 %, σε αυτήν την περίπτωση οι συνιστώσες αυτές μπορούν να "αντικαταστήσουν" τις p αρχικές μεταβλητές χωρίς να απολεσθεί πληροφορία (Μερτίκας, 1999).

3.7.7 Μέθοδοι Ταξινόμησης

Κατά το στάδιο της ταξινόμησης πραγματοποιείται διαχωρισμός των αντικειμένων, δεδομένων και καταχώρισή τους στη συνέχεια σε ομάδες (τάξεις) με τη βοήθεια της στατιστικής. Δηλαδή αρχικά καθορίζονται τα κριτήρια, βάση των οποίων

θα γίνει η διαφοροποίηση και στη συνέχεια επιλέγεται ο κατάλληλος αλγόριθμος ώστε να διαχωριστούν τα αντικείμενα σε δύο ή περισσότερες ομοειδείς τάξεις.

Στα δεδομένα του υπεδάφιου ραντάρ πραγματοποιείται ταξινόμηση έτσι ώστε τα μιγαδικά χαρακτηριστικά των δεδομένων να τοποθετηθούν σε ομάδες που παρουσιάζουν την ίδια μορφή, που έχουν δηλαδή τις ίδιες περίπου ιδιότητες.

Ανάλογα με την επιλογή των κέντρων συγκεντρώσεων (δειγμάτων) βάση των οποίων θα επιτευχθεί ο διαχωρισμός των δεδομένων, οι μέθοδοι ταξινόμησης διαχωρίζονται στις δύο παρακάτω κατηγορίες:

Αυτόματη ταξινόμηση: Αρχικά καθορίζεται ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός των τάξεων που θα δημιουργηθούν από τον αλγόριθμο ταξινόμησης. Στη συνέχεια επιλέγεται αυθαίρετα ένα σύνολο δεδομένων τα οποία θεωρούνται ως πρωτογενείς πυρήνες (κέντρα) συγκέντρωσης παρομοίων μιγαδικών χαρακτηριστικών. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται τυχαίες ομάδες, τάξεις από τα αρχικά δεδομένα. Στο επόμενο βήμα όλα τα υπόλοιπα δεδομένα προσαρτώνται και συνεπώς ταξινομούνται στην πλησιέστερη και πιο ομοειδή ομάδα. Οι ομάδες αυτές που δημιουργήθηκαν από την πρώτη αυτή προσπάθεια είναι μάλλον απίθανο να αποτελούν και την βέλτιστη λύση, έτσι λοιπόν ο αλγόριθμος προσδιορίζει νέες συγκεντρώσεις δεδομένων για κάθε ομάδα καθώς η πρόσθεση νέων δεδομένων κατά την διαδικασία της ταξινόμησης συνεπάγεται και αλλαγή της αρχικής ταξινόμησης. Στη συνέχεια όλα τα δεδομένα ταξινομούνται εκ νέου με κάθε στοιχείο να αντιστοιχείται στην πλησιέστερη ομάδα συγκέντρωσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες ομάδες. Αν οι νέες ομάδες δεδομένων διαφέρουν από αυτές που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται, διαφορετικά σταματά.

Καθοδηγούμενη ταξινόμηση: Κατά τη διαδικασία αυτής της ταξινόμησης δεν επιλέγονται αυθαίρετα τα κέντρα συγκέντρωσης από το σύνολο των δεδομένων αλλά χρησιμοποιούνται γνωστά δείγματα (κέντρα) βάση των οποίων θα ταξινομηθούν τα υπόλοιπα δεδομένα σε ομάδες. Η επιλογή των δειγμάτων εκπαίδευσης του αλγορίθμου αποτελεί ένα βασικό και κρίσιμο βήμα στην καθοδηγούμενη ταξινόμηση.

Μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης Κ- μέσων τιμών (k-means)

Στον αλγόριθμο των Κ μέσων τιμών το κριτήριο για την ταξινόμηση των δεδομένων σε ομάδες είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης τετραγωνικής απόστασης όλων των σημείων από τα αντίστοιχα κέντρα ομαδοποίησης:

$$E_K = \sum_{j=1}^{K} \left\| m_j(k) - \mathbf{x} \right\|^2 \tag{3.13}$$

Όπου $\boldsymbol{m}_j$ τα κέντρα συγκέντρωσης, $\boldsymbol{k}$ ο αριθμός των κέντρων συγκέντρωσης και $\boldsymbol{x}$ τα δείγματα.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα (4) βήματα:

1. Επιλέγονται (είτε τυχαία είτε αυτά είναι γνωστά) **Κ** αρχικά κέντρα ομάδων $m_1(1), m_2(2), ..., m_K(1)$.

2. Κάθε άγνωστο δείγμα $\boldsymbol{x}$ αντιστοιχείται στην ομάδα $\boldsymbol{\omega}_j$ εάν:

$$\left\| m_j(k) - \mathbf{x} \right\| < \left\| m_i(k) - \mathbf{x} \right\| \tag{3.14}$$

για κάθε $i = 1, 2, ..., K,\ i \neq j$

3. Υπολογίζονται τα νέα κέντρα ομάδων από τη σχέση:

$$m_j(k+1) = \frac{1}{n} \sum_{x \in \omega_j} \mathbf{x} \tag{3.15}$$

όπου $\boldsymbol{n}$, ο αριθμός των δειγμάτων στην ομάδα $\boldsymbol{j}$.

4. Αν $m_j(k+1) = m_j(k)$ για $j = 1, 2, ..., K$, ο αλγόριθμος συγκλίνει, διαφορετικά επαναλαμβάνεται από το βήμα 2.

Η επιλογή του πλήθους Κ των κέντρων συγκέντρωσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, γιατί αλλάζοντας τον αριθμό Κ των κέντρων προκύπτουν τελείως διαφορετικές ομάδες. Κρίσιμη είναι επίσης και η επιλογή των αρχικών κέντρων συγκέντρωσης $m_1(1)$, $m_2(2)$,….,$m_k(1)$, επειδή κάποιες ομάδες μπορεί να μείνουν άδειες αν τα κέντρα απέχουν μακριά από την κατανομή των δεδομένων. Ο αλγόριθμος των Κ μέσων τιμών είναι υπολογιστικά απλός, γρήγορος και χρησιμοποιείται συνήθως για την ταξινόμηση μεγάλων συνόλων

δεδομένων. Δίνει ακριβή αποτελέσματα όταν οι τάξεις απέχουν σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (Kulkarni A., 1998).

Χάρτες αυτοδιοργάνωσης (Self Organizing Maps, SOM)

Οι χάρτες αυτοδιοργάνωσης είναι ειδικές περιπτώσεις νευρωνικών δικτύων που βασίζονται στην ανταγωνιστική μάθηση. Τα νευρώνια σε αυτή την περίπτωση είναι τοποθετημένα στους κόμβους ενός πλέγματος, το οποίο είναι δύο διαστάσεων. Τα νευρώνια εκπαιδεύονται βάση των δειγμάτων εισόδου σύμφωνα με τους κανόνες της ανταγωνιστικής μάθησης, δηλαδή μόνο ένα νευρώνιο νικάει κάθε φορά τον ανταγωνισμό. Στη συνέχεια διατάσσονται στον χάρτη το ένα σε σχέση με το άλλο και σχηματίζεται ένας τοπογραφικός χάρτης όπου η πλευρική διάταξή τους είναι ενδεικτική των φυσικών στατιστικών χαρακτηριστικών που περιέχονται στα δεδομένα. Δηλαδή τα νευρώνια που βρίσκονται κοντά στον χάρτη εκτελούν παρόμοιες λειτουργίες.

Ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται δημιουργεί μία αποτύπωση των χαρακτηριστικών (των γνωρισμάτων) προσαρμόζοντας τους συντελεστές βάρους από τους κόμβους εισόδου στους κόμβους εξόδου σ' ένα δίκτυο δύο επιπέδων. Το πρώτο επίπεδο αποτελεί το στρώμα εισόδου και το δεύτερο το ανταγωνιστικό στρώμα που οργανώνεται σε ένα δύο διαστάσεων πλέγμα. 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, οι οποίες γενικεύονται από μια 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 πιο ανταποκρίνεται καλύτερα στα διανύσματα εισόδου. Κάθε φορά που εισάγεται μία νέα είσοδος μόνο ένα νευρώνιο ανακηρύσσεται νικητής.
- **Συνεργασία:** Το νευρώνιο νικητής καθορίζει μια τοπογραφική 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 αλλά σε μικρότερο βαθμό. Αυτός είναι και ο λόγος όπου υπάρχει μια τοπογραφική συνέχεια στον τοπογραφικό χάρτη.

Τρία είναι τα βασικά βήματα του αλγόριθμου μετά την τοποθέτηση των αρχικών τιμών (initialization) στα συναπτικά βάρη: η δειγματοληψία, το ταίριασμα βάση της ομοιότητας των δειγμάτων (similarity matching) και η προσαρμογή (updating). Ο αλγόριθμος συνοψίζεται ως εξής:

1. **Τοποθέτηση αρχικών τιμών στα συναπτικά βάρη (initialization).** Αρχικά επιλέγονται τυχαίες τιμές για τα διανύσματα συναπτικών βαρών $\mathbf{w}_j(0)$. Ο μόνος περιορισμός είναι αυτές οι τιμές πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους για κάθε νευρώνιο $j = 1, 2, ...l$ όπου *l*, ο αριθμός των νευρωνίων στο πλέγμα. Καλό είναι οι τιμές να είναι μικρές ώστε να μην κορεστεί το δίκτυο από τους υπολογισμούς. Ένας τρόπος για την τοποθέτηση αρχικών τιμών στα συναπτικά βάρη $\left\{\mathbf{w}_j(0)\right\}_{j=1}^{l}$ είναι να επιλεχθούν τυχαία δείγματα από το εύρος τιμών των διανυσμάτων εισόδου $\left\{\mathbf{x}_i\right\}_{i=1}^{N}$.
2. **Δειγματοληψία (sampling).** Επιλέγεται ένα δείγμα $\mathbf{x}$ από τα δεδομένα το οποίο πρέπει να έχει διαστάσεις *m*.

3. **Ταίριασμα (similarity matching).** Υπολογίζεται το νευρώνιο νικητής *i*(x)σε κάθε βήμα *n* με κριτήριο την ελάχιστη Ευκλείδεια απόσταση:

$$i(\mathbf{x}) = \arg\min_j \left\|\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j\right\|, \; j = 1, 2, ..., l \tag{3.16}$$

4. **Προσαρμογή (updating).** Τα συναπτικά βάρη όλων των νευρωνίων ανανεώνονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + \eta(n) h_{j,i(\mathbf{x})}(n)(\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j(n)), \tag{3.17}$$

όπου η(*n*) η παράμετρος ρυθμού εκμάθησης και $\mathrm{h}_{j,i(x)}$ η τοπολογική γειτονιά γύρω από το νευρώνιο νικητή *i*(x). Και οι δυο παραπάνω παράμετροι μεταβάλλονται κατά τη διαδικασία της μάθησης για καλύτερα αποτελέσματα.

5. **Επανάληψη (continuation).** Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 2 ωσότου δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στον χάρτη.

3.8 Συλλογή μετρήσεων με τις μεθόδους ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης, ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ

3.8.1 Ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση

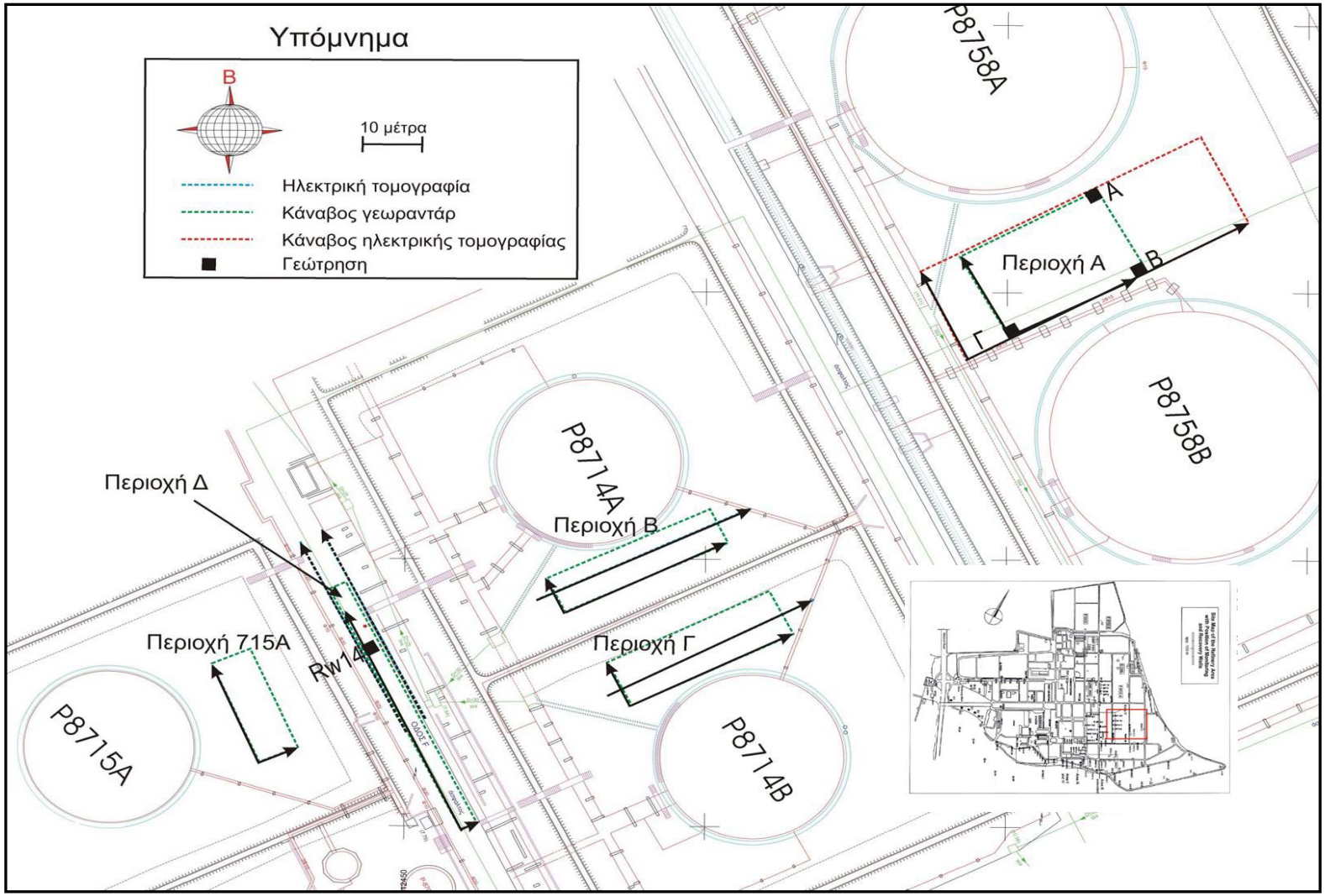
Με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο CM – 031 σαρώθηκε κάνναβος 26m x 15m ανάμεσα στις δεξαμενές P8758A και P8758B (Σχήμα 3.6, περιοχή Α), τον Ιούλιο και τον Νοέμβριο του 2005, για τη μελέτη της χρονικής μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Το βήμα δειγματοληψίας σε όλους τους καννάβους ήταν 1m.

Ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση πραγματοποιήθηκε και στις περιοχές Β και Γ, ανάμεσα στις δεξαμενές P8714A και P8714B (Σχήμα 3.6). Οι διαστάσεις των καννάβων Β και Γ είναι 7m x 30m και 9m x 30m αντίστοιχα. Σαρώθηκε επίσης ο κάνναβος 715A με διαστάσεις 7m x 20m ανατολικά της δεξαμενής P8715A (Σχήμα 3.6).

3.8.2 Ηλεκτρική τομογραφία

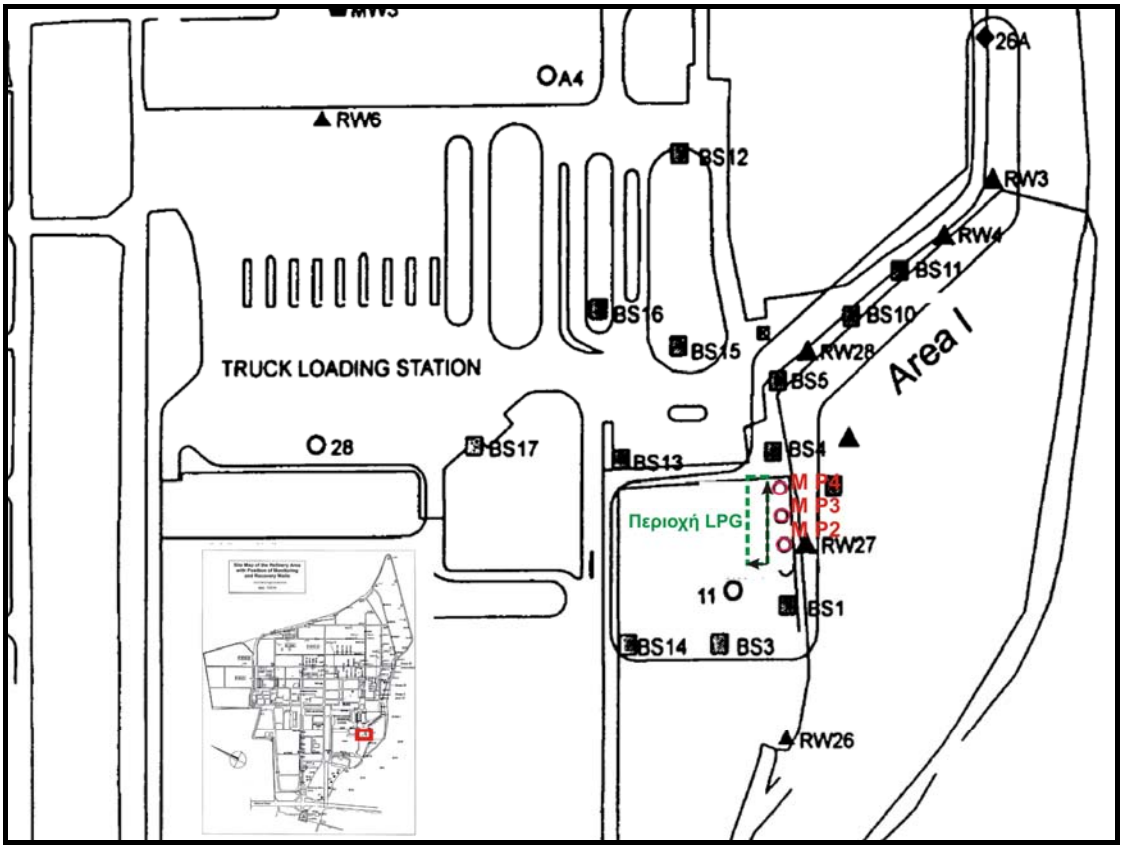
Τον Ιούλιο 2005, στην περιοχή Α διασκοπήθηκαν 10 παράλληλες γραμμές μελέτης (00 – 18) μήκους 54m με ισαπόσταση γραμμών 2m. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων ήταν 2m. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 28 ηλεκτρόδια για κάθε γραμμή μελέτης. Η ένταση του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος κυμαινόταν από 1–100 mA. Στην ίδια περιοχή πραγματοποιήθηκαν επαναληπτικές μετρήσεις τον Νοέμβριο του 2005.

Το ίδιο χρονικό διάστημα (Νοέμβριος του 2005) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και στις περιοχές Β και Γ. Συγκεκριμένα στις παραπάνω περιοχές, διασκοπήθηκαν δύο γραμμές μελέτης, μήκους 39m, με ισαπόσταση ηλεκτροδίων 1,5m (Σχήμα 3.6). Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας διεξήχθησαν επάνω στους αντίστοιχους καννάβους της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης.



Σχήμα 3.6: Οι θέσεις των γραμμών μελέτης της γεωφυσικής έρευνας και των γεωτρήσεων στο ΝΑ τμήμα των διυλιστηρίων Ασπρόπυργου.

Στην περιοχή Δ, με την ηλεκτρική τομογραφία σαρώθηκαν δύο παράλληλες γραμμές μελέτης στα άκρα του δρόμου (Σχήμα 3.6). Στη ίδια περιοχή υπάρχει η γεώτρηση RW14 παρακολούθησης και άντλησης της στάθμης της ελαιώδους φάσης. Στην RW14 κατά τη διάρκεια των γεωφυσικών μετρήσεων τον Νοέμβριο του 2005 παρατηρήθηκε στρώμα ελαιώδους φάσης σε βάθος 4m – 4,6m, πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.



Σχήμα 3.7: Οι θέσεις των γραμμών μελέτης της γεωφυσικής έρευνας και των γεωτρήσεων στο ΝΔ τμήμα των διυλιστηρίων Ασπρόπυργου (Κανελλοπούλου, 2004).

3.8.3 Γεωραντάρ

Τον Ιούλιο του 2005 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το γεωραντάρ PulseEkko 1000 της εταιρίας Sensors and Software Inc κατά μήκος 10 γραμμών μελέτης στην περιοχή Α (Σχήματα 3.6 και 5.1) που βρίσκεται ανάμεσα στις δεξαμενές P8758A και P8758B. Η κεντρική συχνότητα εκπομπής ήταν 110 MHz, το διάστημα δειγματοληψίας, 500 picoseconds (1 picosecond = 10^{-12} second), ενώ το βήμα διασκόπησης ήταν 0,25m, η ισαπόσταση των γραμμών μελέτης 2m και το μήκος κάθε γραμμής 56m. Το ίδιο πείραμα επαναλήφθηκε τον Νοέμβριο του 2005 με το γεωραντάρ Ramac, κεραίες κεντρικής συχνότητας 100 MHz, διάστημα

δειγματοληψίας 798 picoseconds και βήμα διασκόπησης 0,0114m. Όσον αφορά στην κεντρική συχνότητα κεραιών, το διάστημα δειγματοληψίας και το βήμα διασκόπησης επιλέχθηκαν οι ίδιες τιμές για όλες τις μετρήσεις με το σύστημα Ramac.

Μετρήσεις με το σύστημα Ramac πραγματοποιήθηκαν τον Νοέμβριο 2005 και στις περιοχές Β, Γ, 715Α και LPG (Σχήματα 3.6 και 3.7) με ισαπόσταση γραμμών μελέτης 1m. Στις περιοχές Β, Γ και 715Α διασκοπήθηκαν με το γεωραντάρ οι κάνναβοι της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης. Στην περιοχή Δ, διασκοπήθηκε κάνναβος διαστάσεων 3,5 x 50m (Σχήμα 3.6) με ισαπόσταση γραμμών μελέτης 0,5m. Στην ίδια περιοχή υπάρχει η γεώτρηση RW14 παρακολούθησης της στάθμης της ελαιώδους φάσης.

3.8.4 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας

Στην περιοχή Α, που βρίσκεται ανάμεσα στις δεξαμενές P8758A και P8758B (Σχήμα 5.1) διατρήθηκαν οι τρεις γεωτρήσεις Α, Β και Γ, συνολικού μήκους 20m. Από τις γεωτρήσεις συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους στα οποία έγινε χημική ανάλυση και βρέθηκαν πολύ μικρές συγκεντρώσεις πετρελαιοειδών. Σε αυτές τις γεωτρήσεις μετρήθηκε η αργιλότητα των εδαφών με την χρήση διαγραφιών. Πραγματοποιηθηκε ταξινόμηση των δεδομένων από τις διαγραφίες με την μέθοδο SOM η οποία συνέβαλε στην ερμηνεία τους.

Κεφάλαιο 4

Επεξεργασία δεδομένων Γεωραντάρ και παρουσίαση αποτελεσμάτων Ηλεκτρικής Τομογραφίας

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται η επεξεργασία που εφαρμόστηκε στα δεδομένα του υπεδάφειου ραντάρ στην προσπάθεια για ανάδειξη της συμβολής του στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών. Επιλέχθηκε ενδεικτικά γραμμή μελέτης 00 από την Περιοχή Α, για λεπτομερή παρουσίαση όλων των βημάτων (εικόνων) που προέκυψαν κατά την επεξεργασία αυτής. Για τις υπόλοιπες γραμμές μελέτης, έγινε επιλογή μερικών εικόνων οι οποίες παρουσιάζονται και ερμηνεύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Επίσης για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε υπέρθεση (Κεφάλαιο 6) των εικόνων του γεωραντάρ και των εικόνων της ηλεκτρικής τομογραφίας σε περιοχές όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και με τις δύο μεθόδους. Για αυτό το λόγο σε αυτή την ενότητα παραθέτονται τα αποτελέσματα επεξεργασίας των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας

4.2 Επεξεργασία μετρήσεων Γεωραντάρ

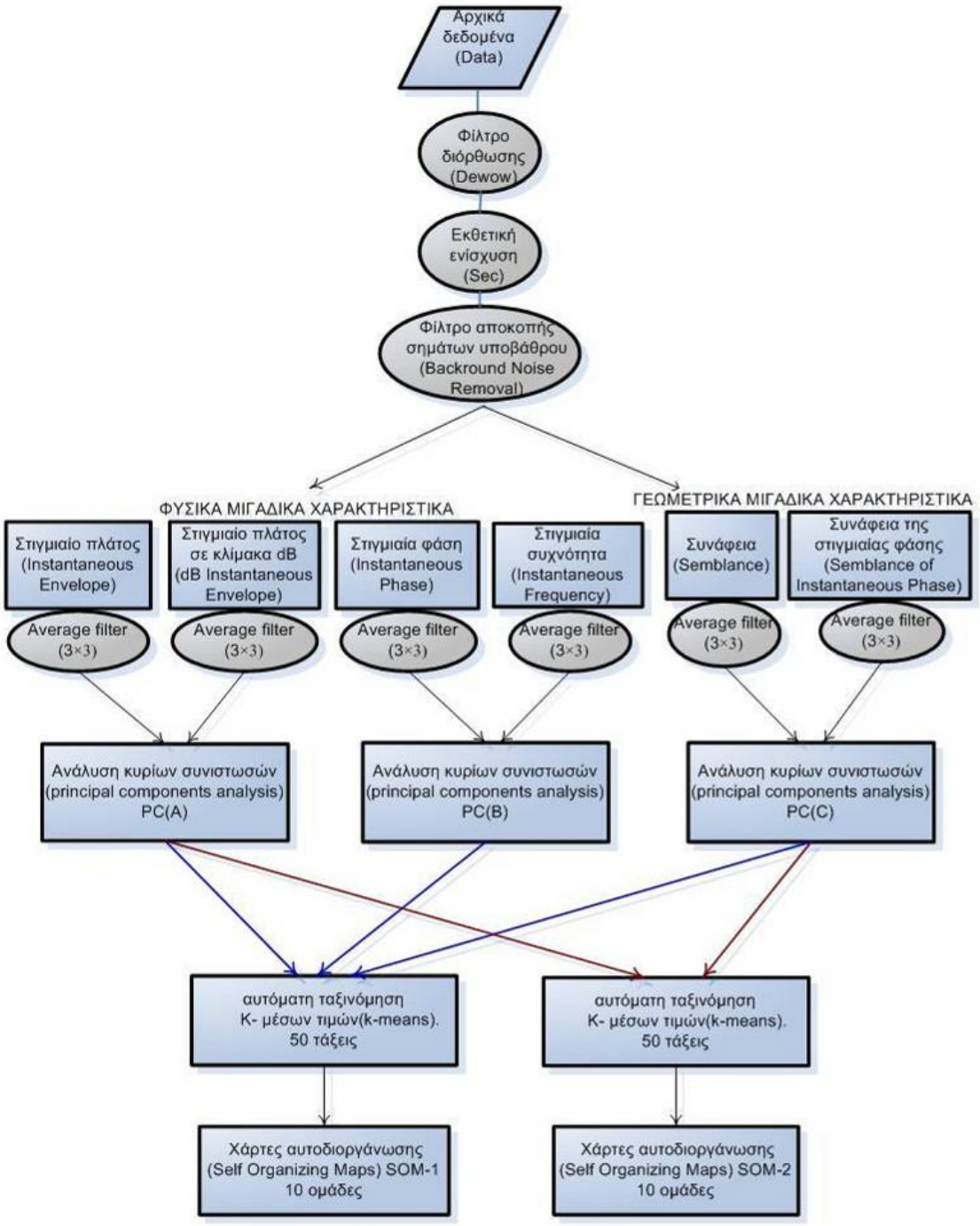
Σε όλες τις αρχικές αυτές εικόνες εφαρμόζεται φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων σε κάθε ίχνους ξεχωριστά (Dewow), έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι πρώτες αφίξεις, δηλαδή τα απευθείας κύματα του αέρα και τα απευθείας κύματα του εδάφους.

Μετά την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow εφαρμόζεται γραμμική και εκθετική ενίσχυση (Sec) κατά την οποία αναπληρώνεται η ενέργεια των σημάτων από απώλειες και έχουμε ουσιαστική βελτίωση στην εικόνα.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Backround Noise Removal) για να εξαλειφθούν φαινόμενα όπως της αντήχησης των κεραιών (antenna ringing) τα οποία προέρχονται από μεταλλικές κατασκευές, ηλεκτροφόρα καλώδια και σωλήνες που ήταν πολύ κοντά σε όλες τις γραμμές μετρήσεων.

Έπειτα υπολογίζονται τα φυσικά μιγαδικά χαρακτηριστικά (Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα) και τα γεωμετρικά μιγαδικά χαρακτηριστικά (Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης).

Σε κάθε μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται φίλτρο μέσης τιμής (average filter), έτσι ώστε να εξομαλυνθούν τα δεδομένα.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας

Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά χωρίζονται σε τρία ζευγάρια: **1:** Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, **2:** Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα, **3:** Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης και πραγματοποιείται μετασχηματισμός

κυρίων συνιστωσών σε κάθε ζευγάρι ξεχωριστά, έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων και να επιτευχθεί συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής πληροφορίας (≈80%) περιλαμβάνεται στις τρεις πρώτες κύριες συνιστώσες στο πρώτο και τρίτο ζευγάρι, ενώ στο δεύτερο κατανέμεται και στις δύο συνιστώσες με αναλογία περίπου 60% - 40%. Οι πρώτες συνιστώσες των τριών ζευγαριών καθώς και η δεύτερη συνιστώσα του δεύτερου ζευγαριού επιλέχθηκαν για την ταξινόμηση με τη μέθοδο των **Κ-μέσων τιμών**. Με την αυτόματη μέθοδο ταξινόμησης των Κ-μέσων τιμών τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 50 τάξεις και στη συνέχεια, με τον αλγόριθμο του Kohonen (Self Organizing Maps) ταξινομήθηκαν σε 20 ομάδες.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται αναλυτικά τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

4.3 Αποτελέσματα επεξεργασίας Γεωραντάρ

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την επεξεργασία της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α, με σειρά αντίστοιχη με τη ροή της επεξεργασίας (Σχήμα 4.1). Λόγω πληθώρας δεδομένων (γραμμών) έχει γίνει επιλογή μιας μόνο γραμμής, για την οποία παρουσιαζονται ενδεικτικά όλα τα βήματα της επεξεργασίας. Οι υπόλοιπες γραμμές θα παρουσιαστούν στο Παράρτημα Α.

Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα, τα οποία δεν έχουν υποστεί επεξεργασία (Σχήμα 4.2).

Το επόμενο βήμα της επεξεργασίας είναι η εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow το οποίο δεν διαφοροποιεί αισθητά την εικόνα (Σχήμα 4.3).

Στη συνέχεια ακολουθεί η εφαρμογή του φίλτρου γραμμικής και εκθετικής ενίσχυση (Sec) κατά την οποία αναπληρώνεται η ενέργεια των σημάτων από απώλειες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τέθηκε εξασθένηση ίση με 10 db/m. Εύκολα παρατηρείται ότι το φίλτρο Sec εμφανίζει κάποιες περισσότερες λεπτομέρειες και στο υπόλοιπο κομμάτι των εικόνων των αρχικών δεδομένων (Σχήμα 4.4).

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Backround Noise Removal). Παρατηρούμε βελτίωση της εικόνας όσο αφορά την ευκρίνεια της (Σχήμα 4.5).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες από τα μιγαδικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν σε αυτήν την εργασία είναι το στιγμιαίο πλάτος, το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, η στιγμιαία φάση, η γρήγορη στιγμιαία συχνότητα, η συνάφεια και η συνάφεια της στιγμιαίας φάσης.

Σε όλες τις εικόνες του στιγμιαίου πλάτους όπως φαίνεται και στο Σχήμα.4.6 παρατηρείται ότι κυριαρχούν τα ψυχρά χρώματα (μπλε). Εμφανίζονται όμως και κάποιες περιοχές με θερμά χρώματα (κίτρινο – κόκκινο) που σημαίνει την ύπαρξη πλευρικών μεταβολών του πλάτους των ανακλώμενων κυμάτων.

Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB εφαρμόστηκε σε δεδομένα μετά από ενίσχυση (Sec) αλλά και σε δεδομένα μετά από εφαρμογή φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Backround Noise Removal) όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.7 – 4.8 αντίστοιχα. Οι εικόνες κυριαρχούνται από το κόκκινο χρώμα, όμως σε πολλές περιοχές οι τιμές του στιγμιαίου πλάτους είναι χαμηλότερες (κίτρινο). Στις περιοχές που μεταβάλλεται το στιγμιαίο πλάτος συγκεντρώνεται το ενδιαφέρον.

Στις εικόνες τις στιγμιαίας φάσης όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.9 εμφανίζονται έντονα οι ανακλάσεις (οριζόντιες γραμμές). Αυτό οφείλεται στο ότι η στιγμιαία φάση τείνει να ενισχύσει τη συνέχεια των ανακλαστήρων. Οι περιοχές στις οποίες διακόπτονται οι ανακλαστήρες παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Στις εικόνες της στιγμιαίας συχνότητας Σχήμα 4.10 το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις περιοχές που διακόπτεται η οριζόντια συνέχεια των ανακλαστήρων.

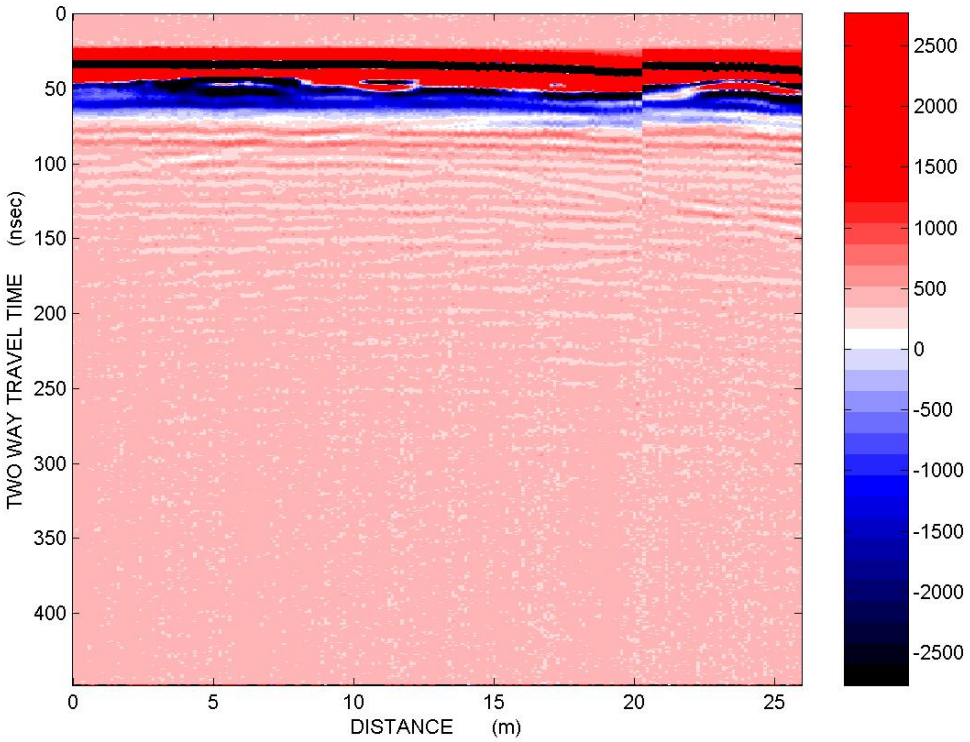
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εικόνες της συνάφειας και της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης (semblance, semblance of instantaneous phase), εικόνες που δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Και στις δυο περιπτώσεις επιλέχτηκαν τρία ίχνη και πέντε δείγματα από κάθε ίχνος. Και στις εικόνες της συνάφειας και της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης στα Σχήματα 4.11 - 4.12 αντίστοιχα, παρατηρείται η ύπαρξη περιοχών με ερυθρά χρώματα (κόκκινο) που διαφοροποιούνται από το σύνολο της εικόνας όπου οι ανακλαστήρες παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή της συνάφειας και αντιστοιχούν σε λιγότερο διαταραγμένο ασβεστόλιθο. Η συνάφεια, που είναι το μέτρο της ομοιότητας μεταξύ διάφορων ιχνών και φανερώνει τις διακυμάνσεις στην μορφολογία του σχηματισμού. Σημειώνεται ότι η συνάφεια της στιγμιαίας φάσης παρουσιάζει καλύτερη ανάλυση.

Το επόμενο βήμα της επεξεργασίας είναι ο χωρισμός των μιγαδικών χαρακτηριστικών (όπου έχει εφαρμοστεί το φίλτρο μέσης τιμής με παράθυρο

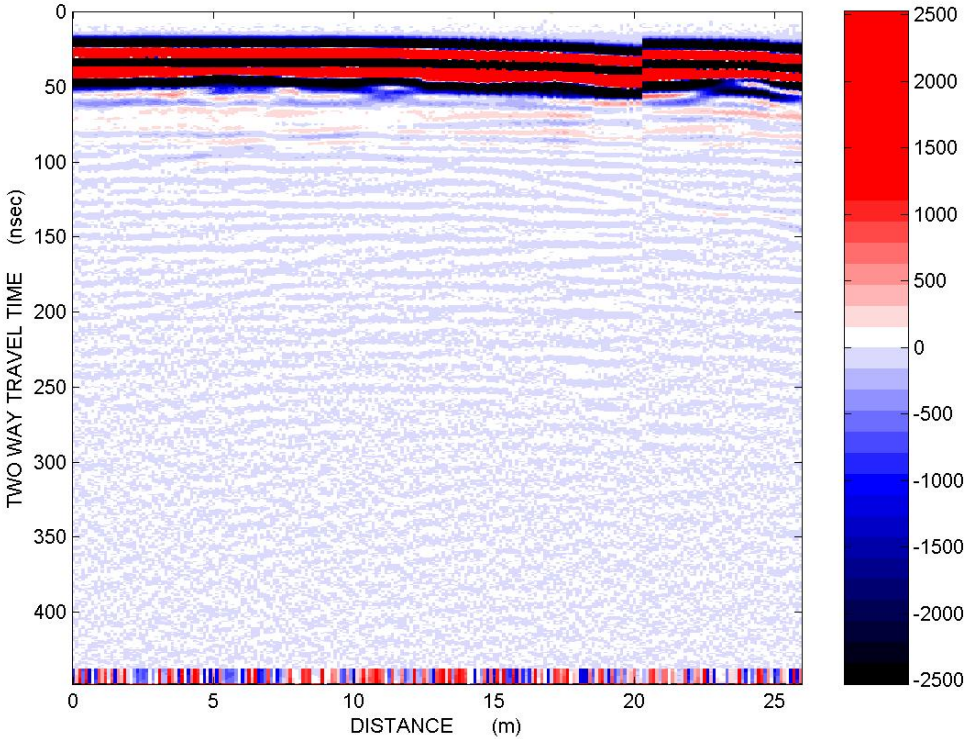
διάρκειας 3nsec) σε 3 ομάδες και η ανάλυση των κυρίων συνιστωσών ανά ομάδα. Οι τρεις ομάδες είναι: **(α)** Στιγμιαίο πλάτος και στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, **(β)** Στιγμιαία φάση και στιγμιαία συχνότητα και **(γ)** συνάφεια και συνάφεια της στιγμιαίας φάσης. Μετά την ανάλυση των κυρίων συνιστωσών επιλέχτηκαν οι εξής κύριες συνιστώσες όπου συγκεντρώνουν το 80% της πληροφορίας. Από την πρώτη και την τρίτη ομάδα επιλέχτηκε η πρώτη συνιστώσα και από την δεύτερη ομάδα και οι δυο κύριες συνιστώσες.

Μετά την επιλογή των συνιστωσών πραγματοποιήθηκε αυτόματη ταξινόμηση των εικόνων σε 50 τάξεις (Σχήμα 4.13) με τη μέθοδο των K - μέσων τιμών και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε χάρτης αυτοδιοργάνωσης σε 20 τάξεις (Σχήμα 4.14).

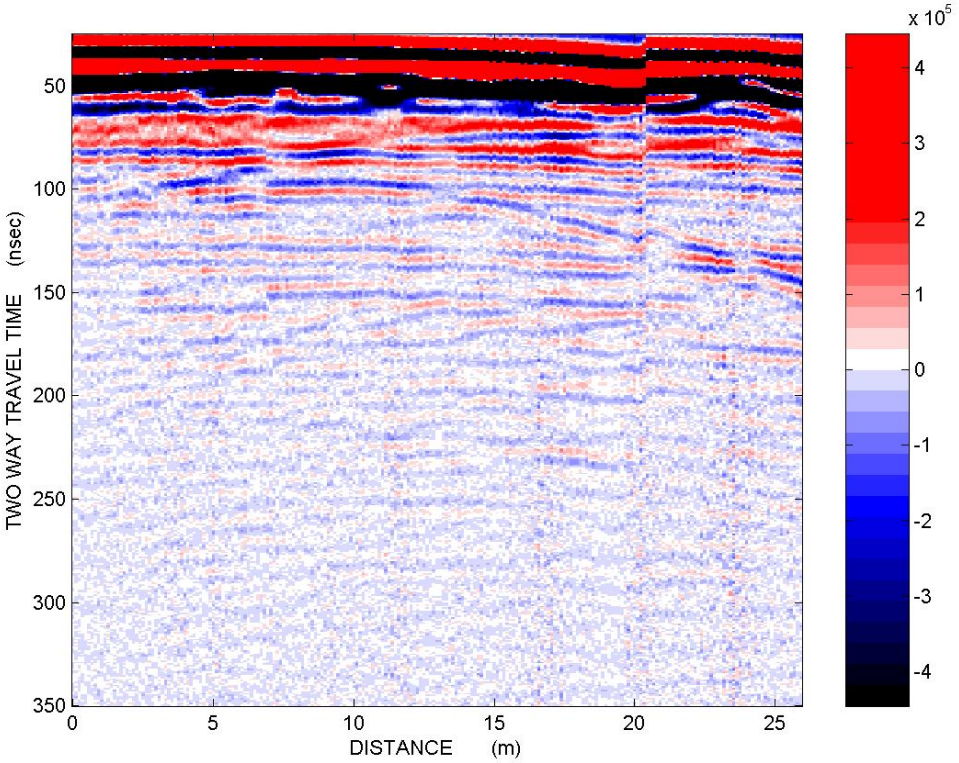
Στις εικόνες παρατηρούνται 2 μεγάλες ομάδες, μια με ψυχρά χρώματα και μια με θερμά. Επομένως, το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στα σημεία που υπάρχει αυτή η μεταβολή. Στις περιοχές με θερμά χρώματα εμφανίζονται οι ανακλάσεις οπότε αναμένεται, στα σημεία όπου διακόπτονται από τα ψυχρά χρώματα, να υπάρχει και διαφοροποίηση στο έδαφος και πιθανότατα και στις αντιστάσεις των πετρωμάτων στην τομογραφία.



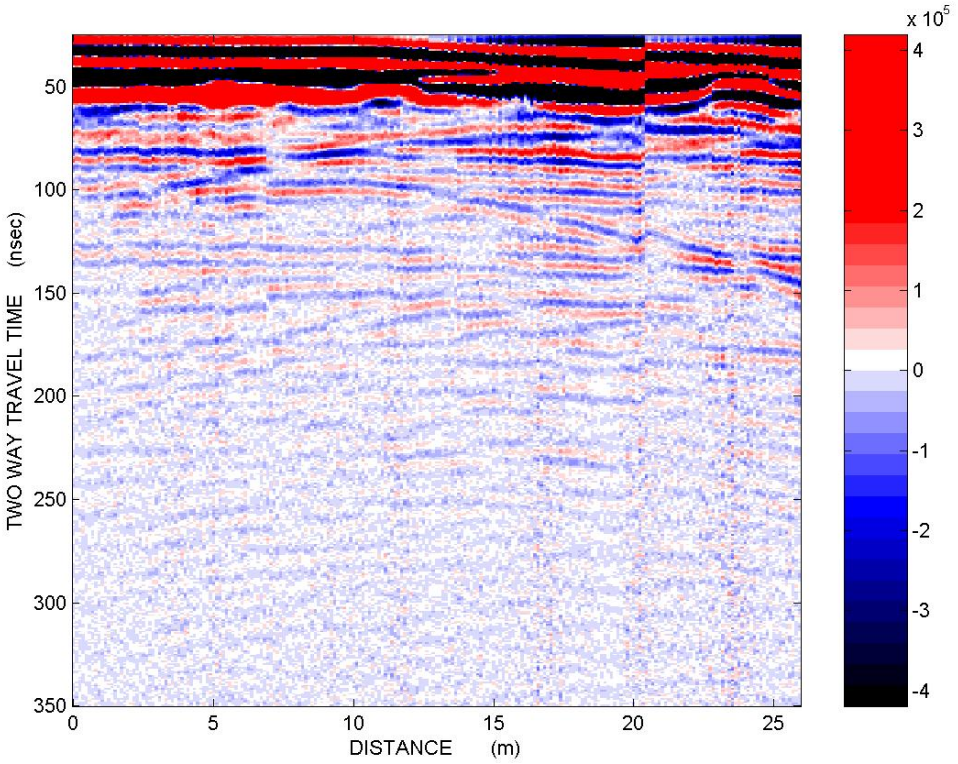
Σχήμα 4.2: Αρχικά δεδομένα της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α.



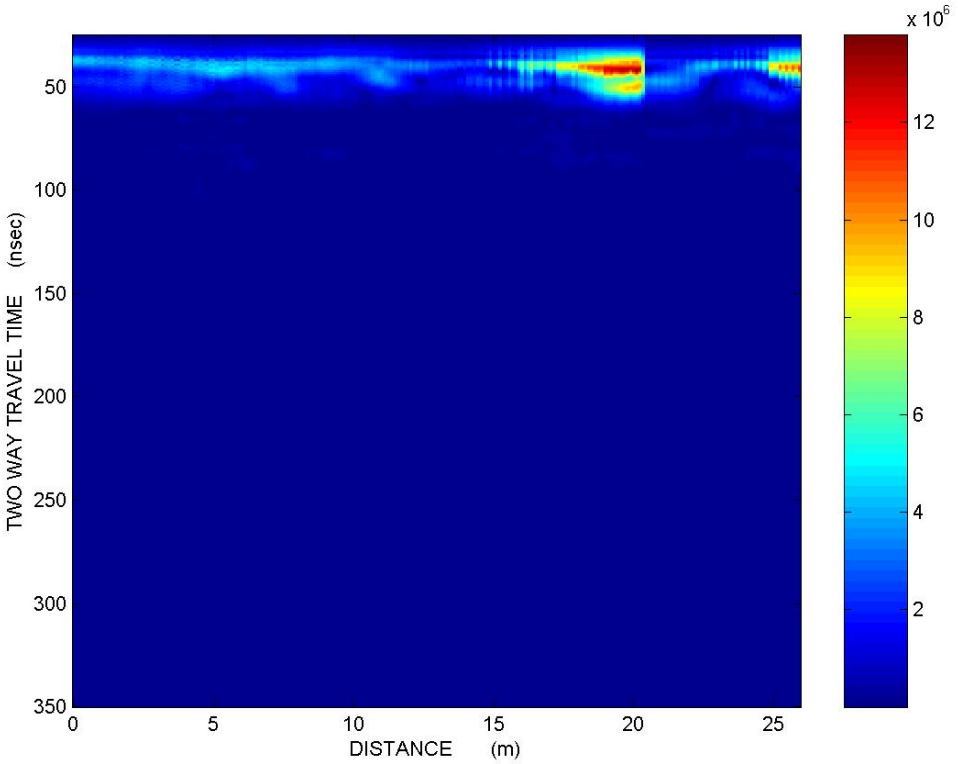
Σχήμα 4.3: Εφαρμογή φίλτρου διόρθωσης (Dewow) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α.



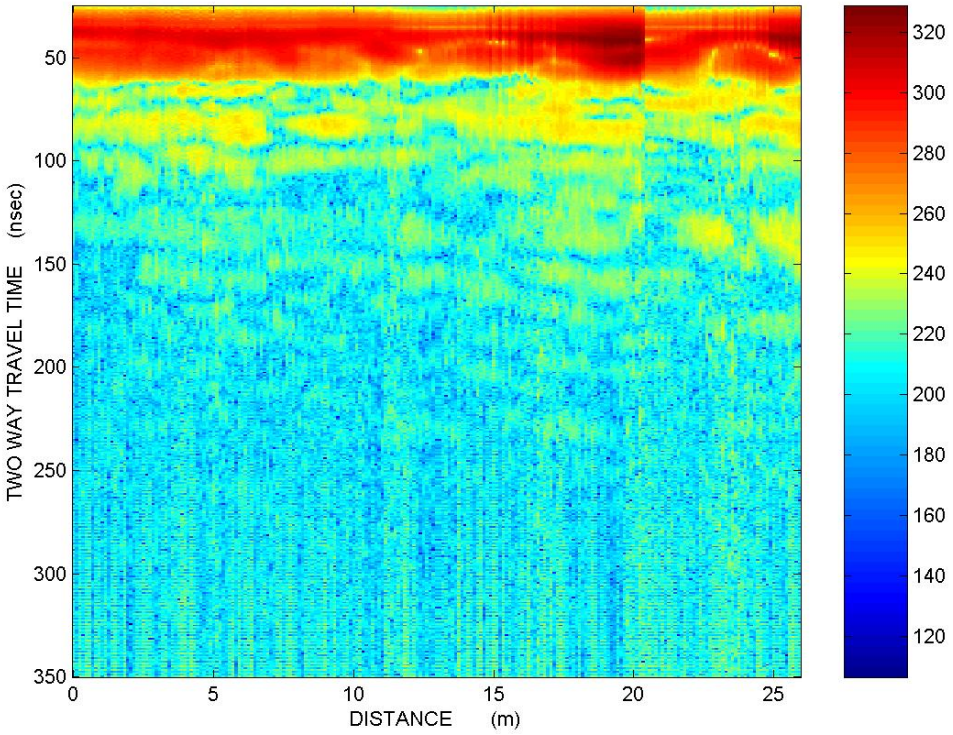
Σχήμα 4.4: Εφαρμογή φίλτρου φίλτρου σταθερής ενίσχυσης (Sec) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α.



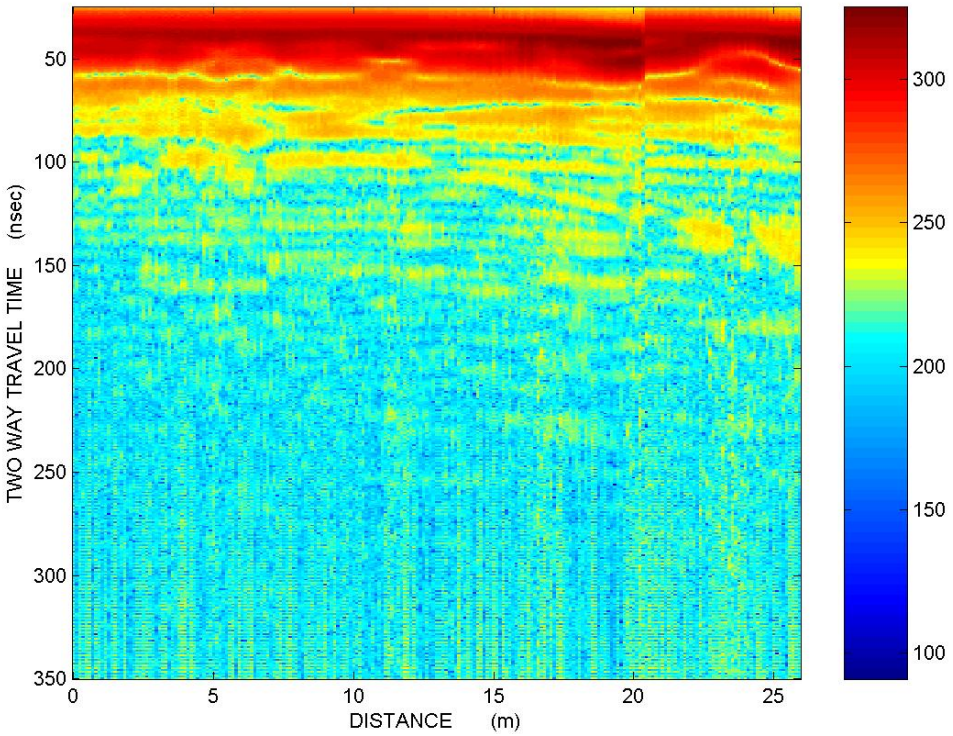
Σχήμα 4.5: Εφαρμογή φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Backround Noise Removal) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α.



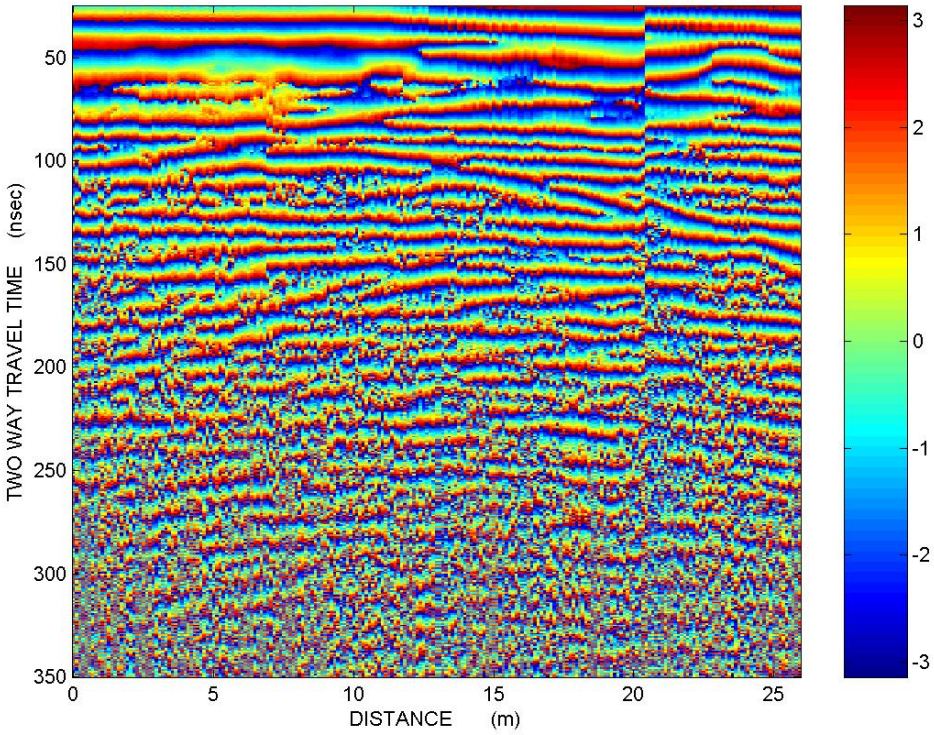
Σχήμα 4.6: Στιγμιαίο πλάτους (Instantaneous Envelope) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α, μετά από Dewow, Sec, Backround Noise Removal.



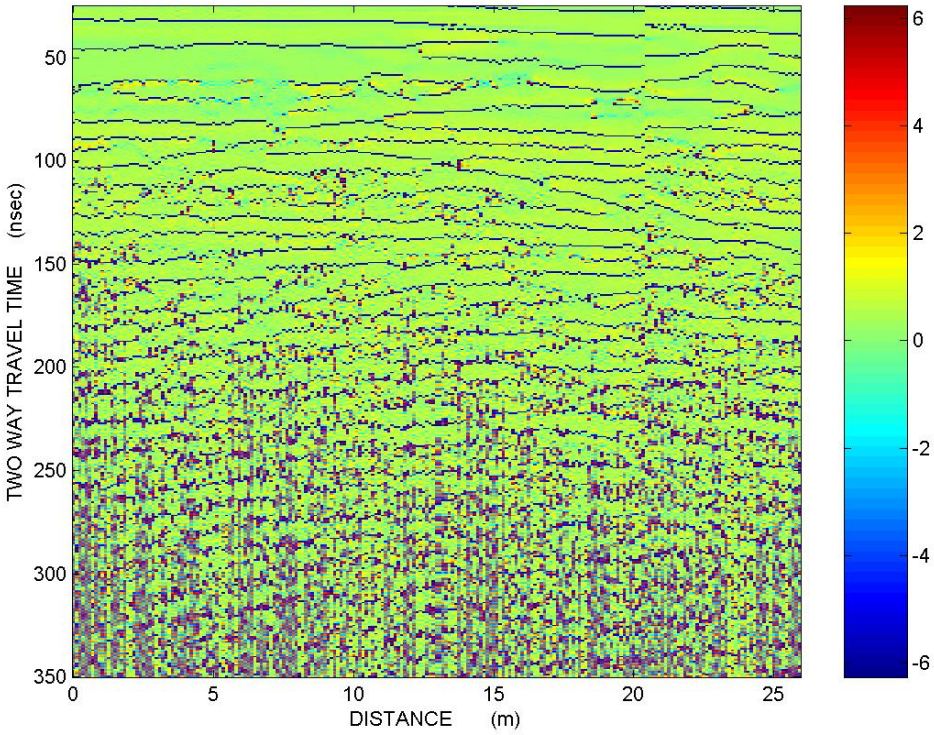
Σχήμα 4.7: Στιγμιαίο πλάτους σε κλίμακα dB (dB Instantaneous Envelope) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α, μετά από Dewow, Sec, Backround Noise Removal.



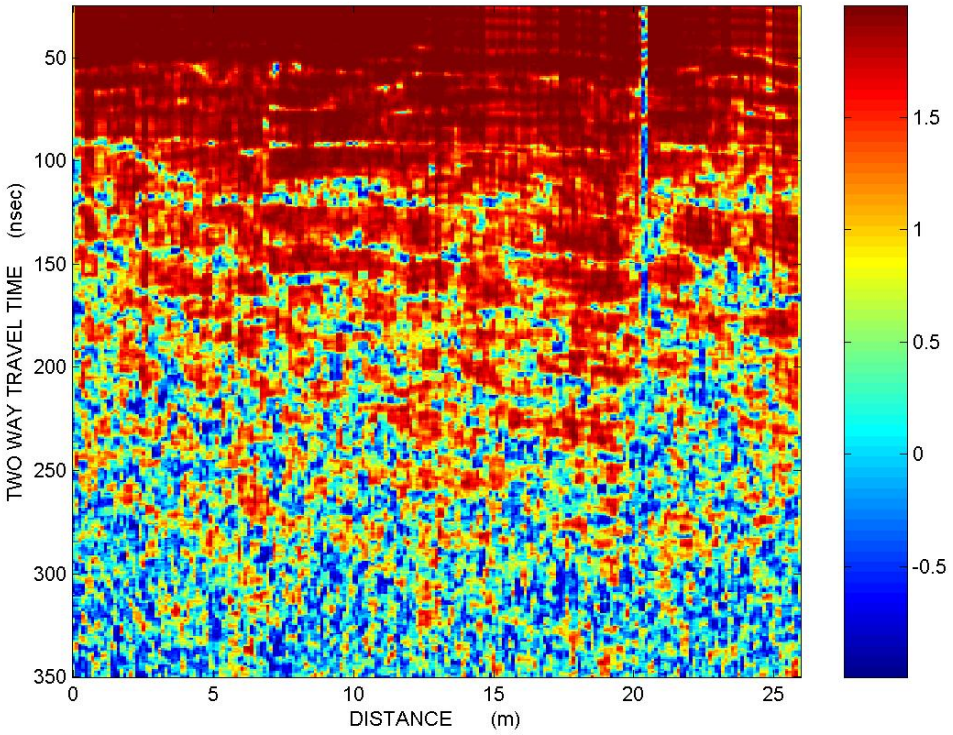
Σχήμα 4.8: Στιγμιαίο πλάτους σε κλίμακα dB (dB Instantaneous Envelope) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α μετά από Dewow και Sec.



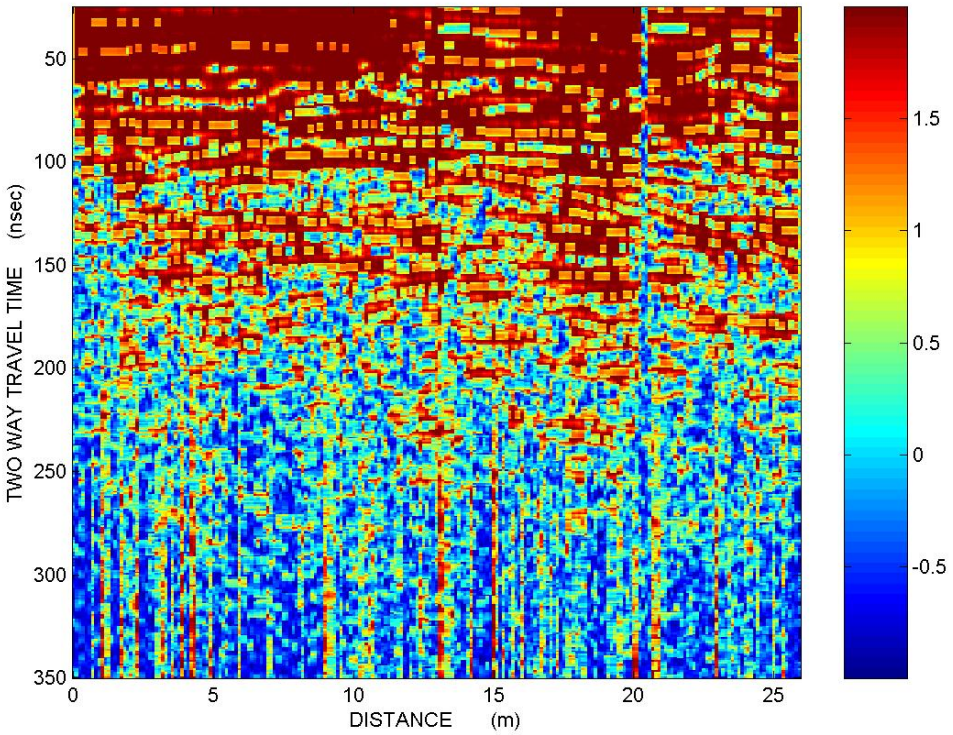
Σχήμα 4.9: Στιγμιαία φάση (instantaneous phase) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α μετά από Dewow, Sec, Backround Noise Removal.



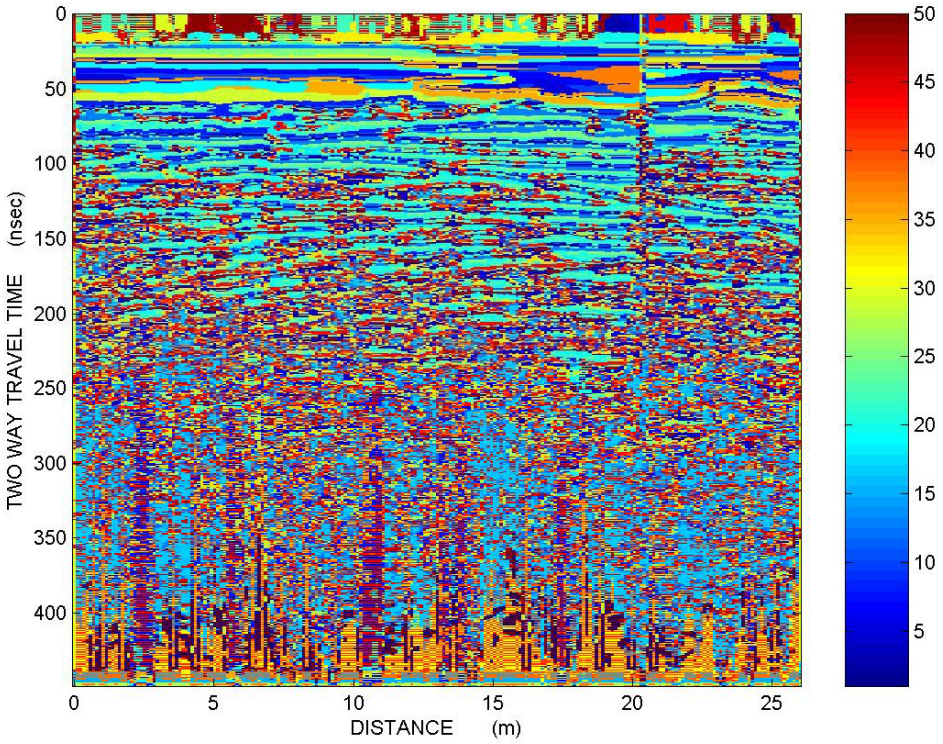
Σχήμα 4.10: Στιγμιαία συχνότητα (instantaneous frequency) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α μετά από Dewow, Sec, Backround Noise Removal.



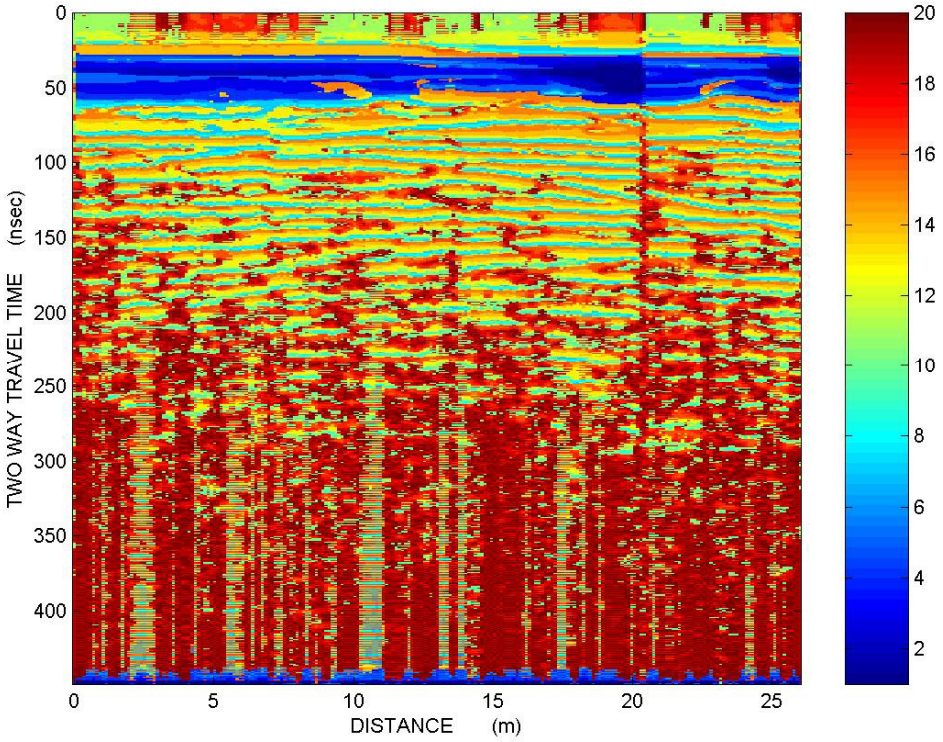
Σχήμα 4.11: Συνάφειας (semblance) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α μετά από Dewow και Sec.



Σχήμα 4.12: Συνάφεια της στιγμιαίας φάσης (semblance of instantaneous phase) της γραμμής μελέτης 00 από την Περιοχή Α μετά από Dewow, Sec, Backround Noise Removal.



Σχήμα 4.13: Εικόνα αυτόματης ταξινόμησης (K - means) σε 40 τάξεις.

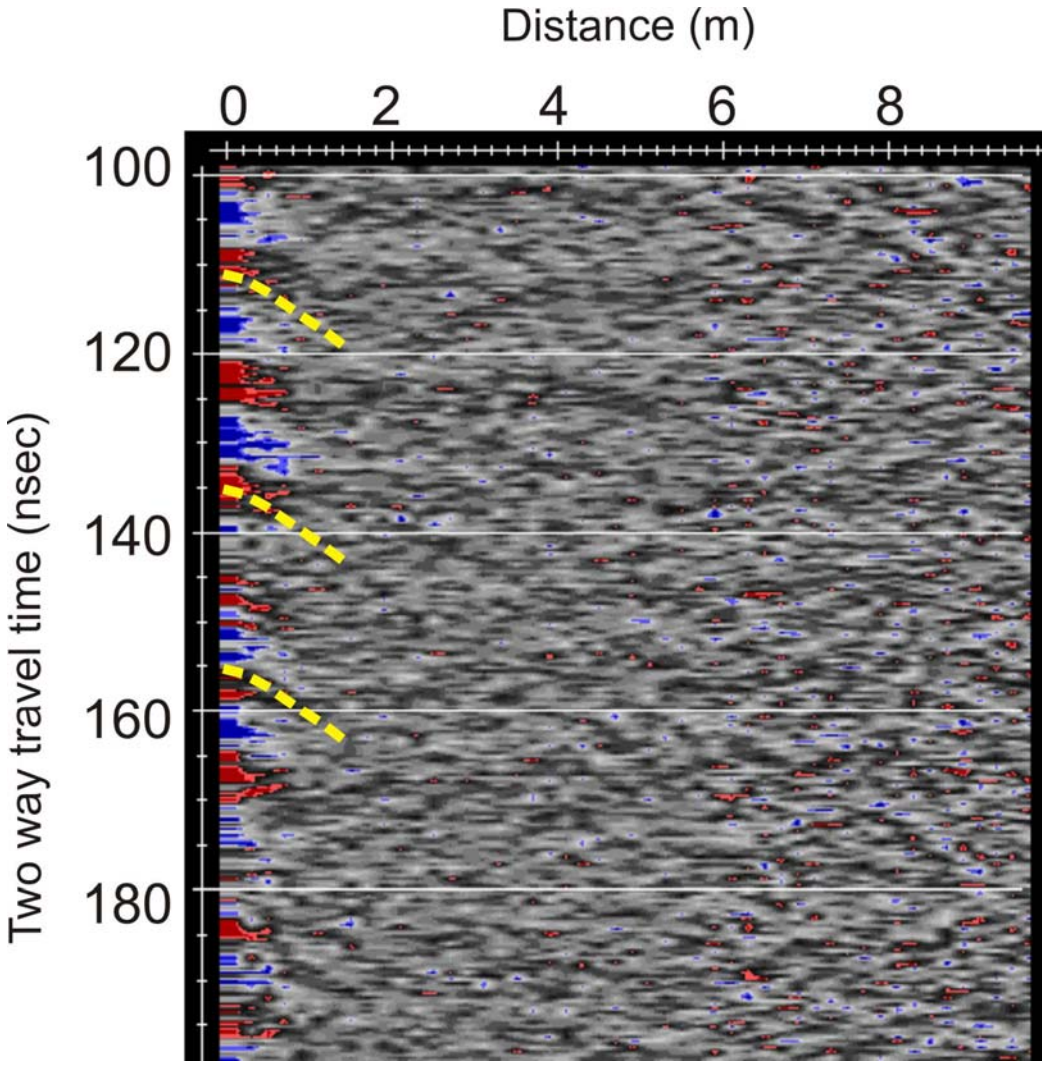


Σχήμα 4.14: Εικόνα αυτοδιοργάνωσης (SOM) σε 20 τάξεις.

Με όμοιο τρόπο που έγινε η επεξεργασία των δεδομένων της των υπολοίπων γραμμών μελέτης. Στα σχήματα που ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο παρατίθενται επιλεκτικά κάποιες εικόνες από τις πιο σημαντικές γραμμές, για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

4.3.1 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση ταχυτήτων σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου Σχήμα 4.15 όπου η απόσταση πομπού-δέκτη αυξανόταν σταδιακά από 0,5m μέχρι τα 5m. Στις καταγραφές αυτές οι χρόνοι διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων σχηματίζουν υπερβολικού τύπου καμπύλη στο δρομοχρονικό διάγραμμα και η μέση τετραγωνική ταχύτητα υπολογίζεται από τη μέθοδο t^2-x^2. Από την εφαρμογή της μεθόδου σε τέσσερις διαδοχικούς ανακλαστήρες προέκυψαν παρόμοιες ταχύτητες, περίπου 3 cm/nsec.

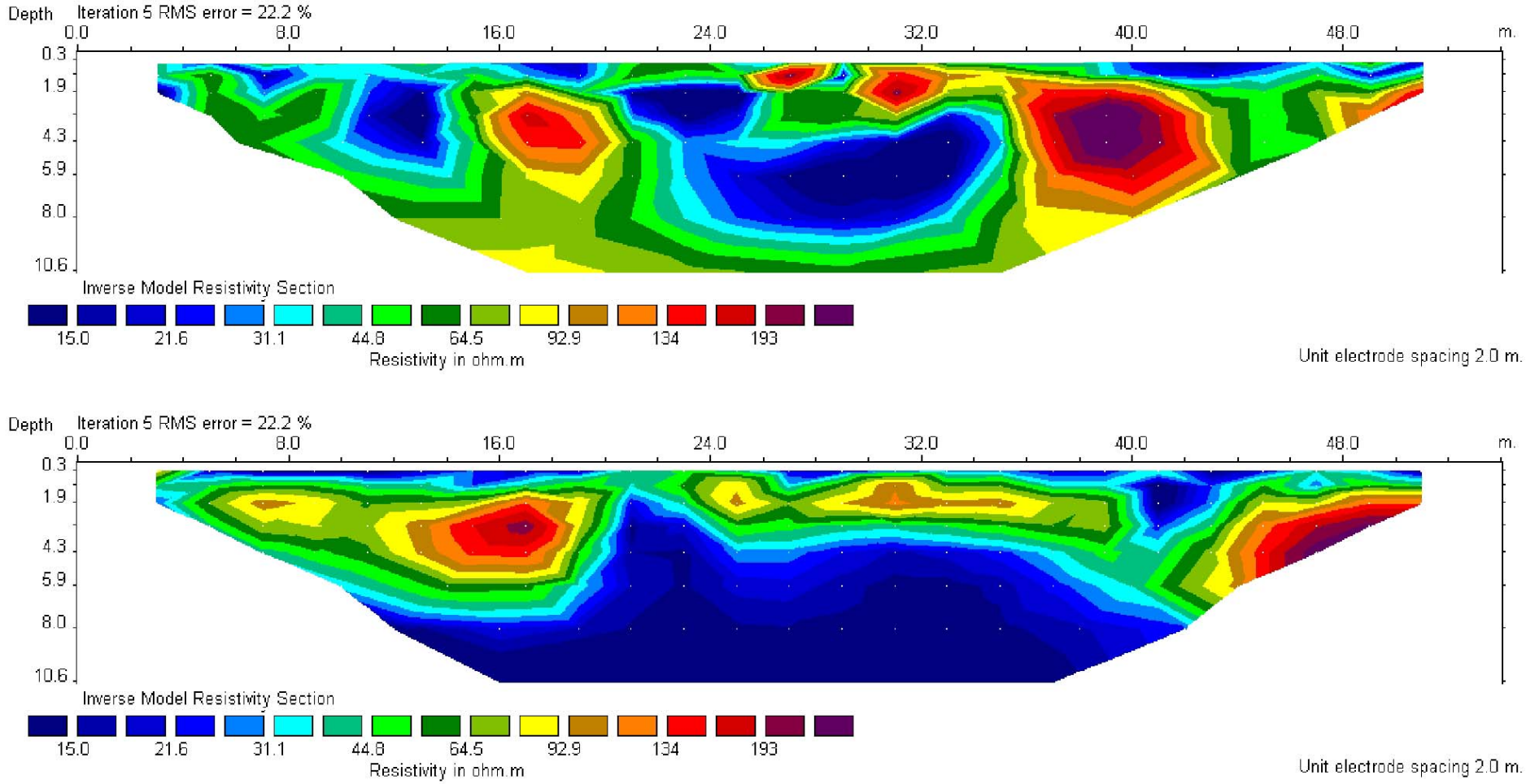


Σχήμα 4.15: Περιοχή Α, γραμμή 02: Καταγραφές γεωραντάρ κοινού ενδιάμεσου σημείου (100-180 ns), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση της ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος.

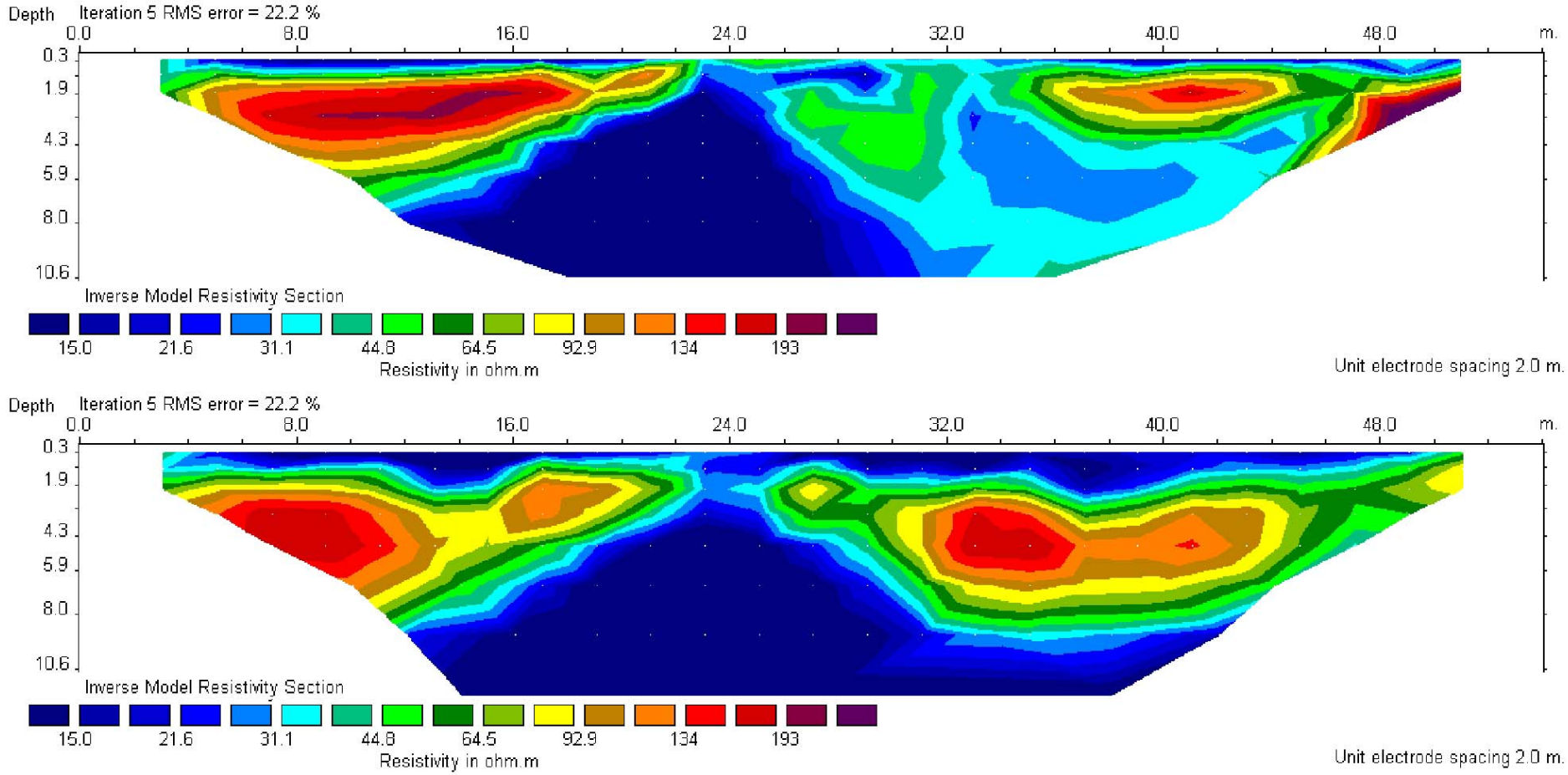
4.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

Η επεξεργασία των δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο Res2Dinv ver 3.2. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους. Το συγκεκριμένο λογισμικό πραγματοποιεί αντιστροφή των δεδομένων φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τη δημιουργία γεωηλεκτρικού μοντέλου που αναφέρεται στη μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε σχέση με το βάθος. Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις. Περαιτέρω επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομών που προέκυψαν από την αντιστροφή των δεδομένων ηλεκτρικών αντιστάσεων, περιλάμβανε τη βελτίωση της απεικόνισης των

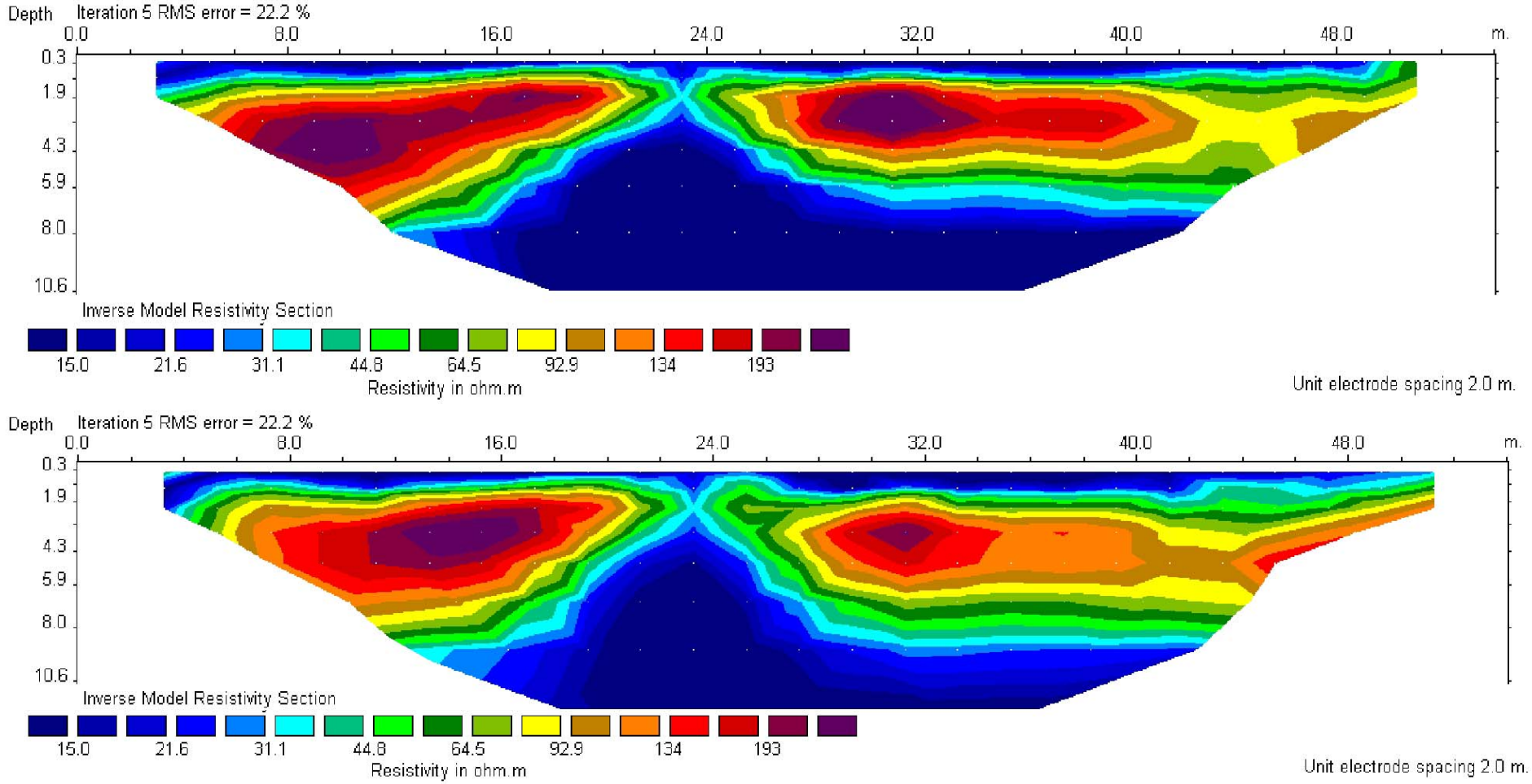
αποτελεσμάτων με αλλαγή της χρωματικής κλίμακας και την απόρριψη τιμών οι οποίες δημιουργούσαν μεγάλο σφάλμα στην διαδικασία της αντιστροφής. Στα Σχήματα 4.16 έως 4.20 παρουσιάζονται οι γεωηλεκτρικές τομές που πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο του 2005 στην περιοχή Α. Επίσης στα Σχήματα 4.21 έως 4.25 παρουσιάζονται οι γεωηλεκτρικές τομές που πραγματοποιήθηκαν τον Νοέμβριο του 2005 στην περιοχή Α. Η γεωηλεκτρική τομή στην περιοχή Β απεικονίζεται στο Σχήμα 4.26 και οι γεωηλεκτρικές τομές στις περιοχές Γ και Δ, στα Σχήματα 4.27 και 4.28-4.29 αντίστοιχα.



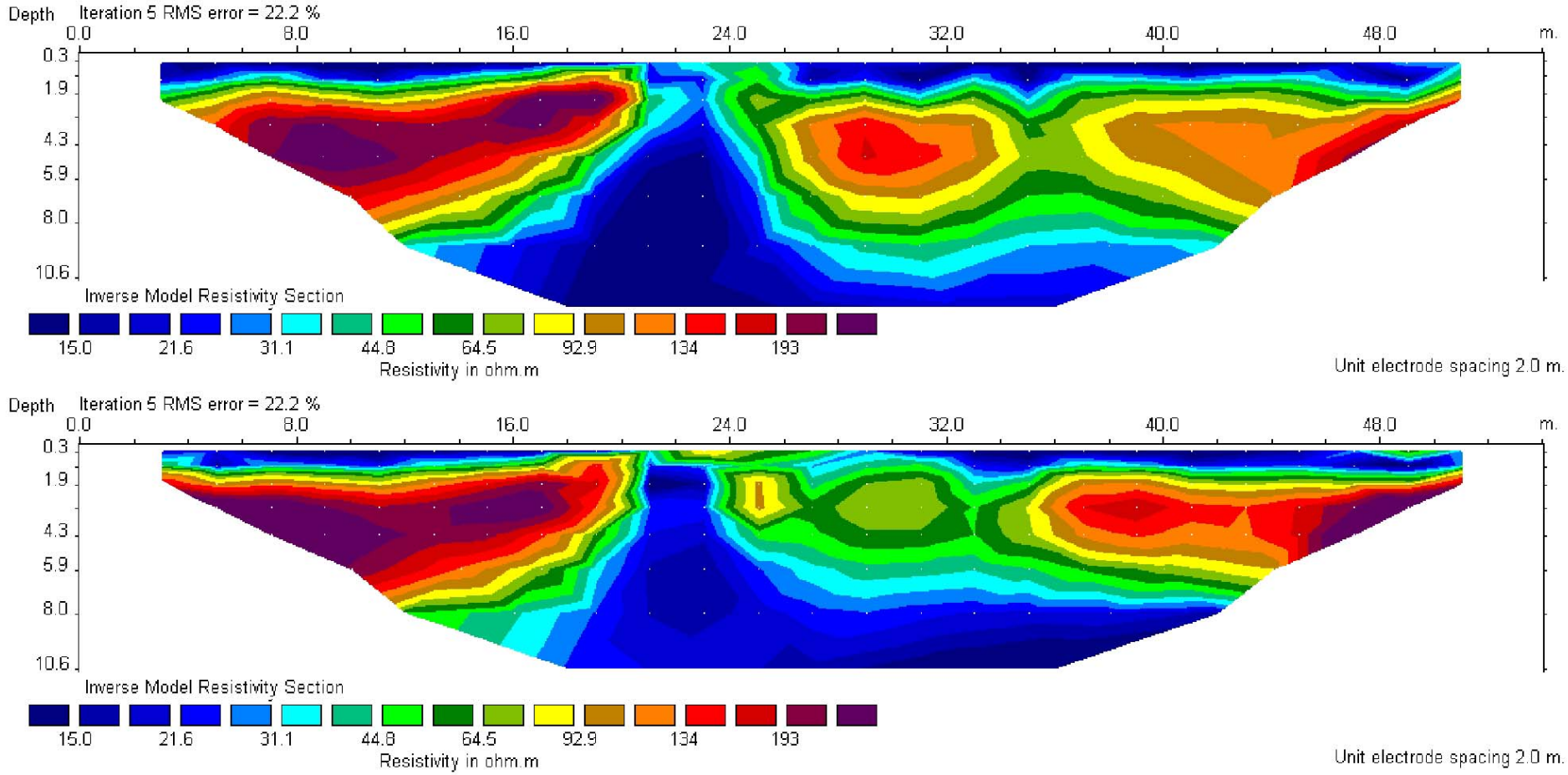
Σχήμα 4.16: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 00 (επάνω) και 02 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Ιουλίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



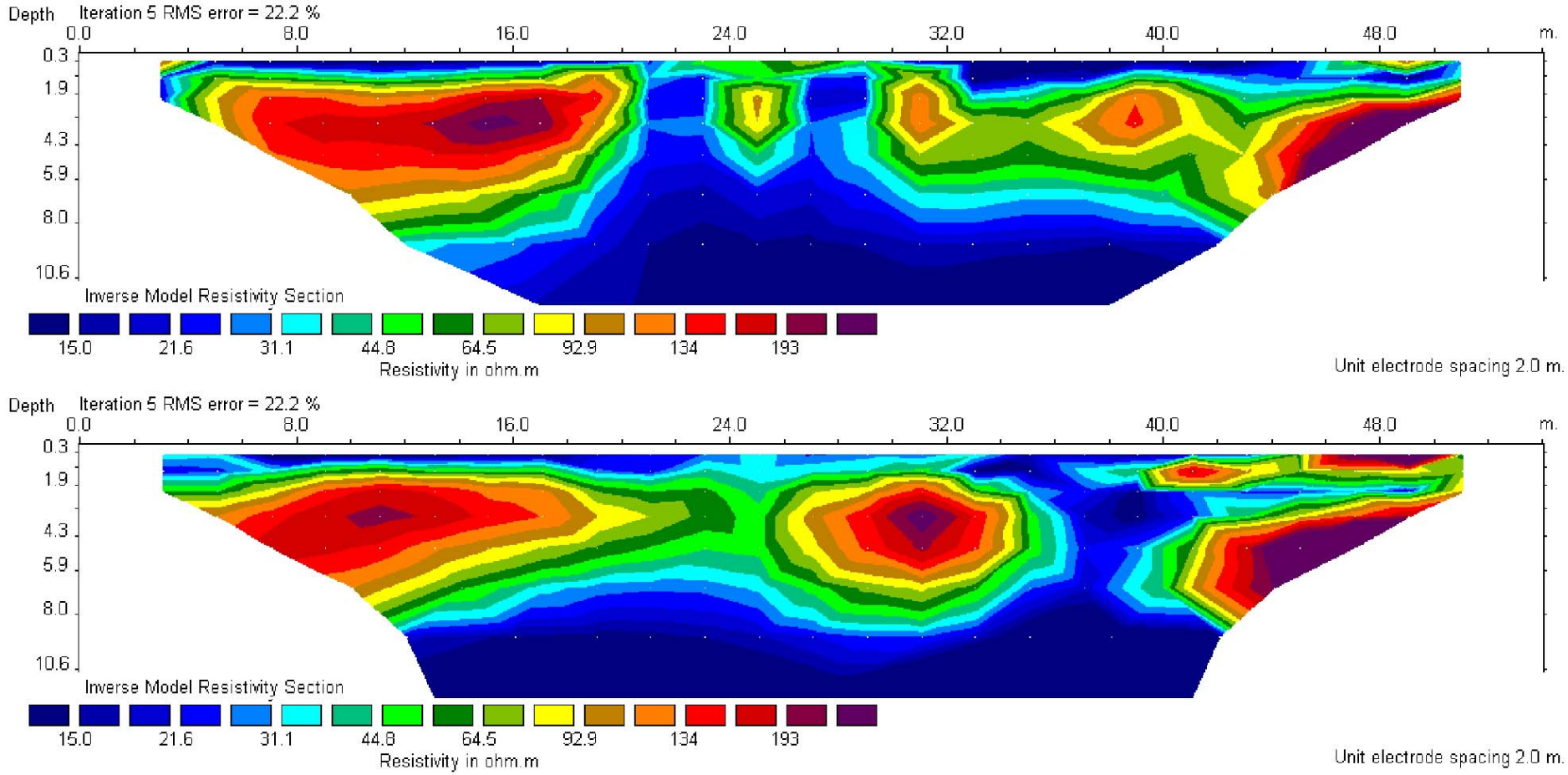
Σχήμα 4.17: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 04 (επάνω) και 06 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Ιουλίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



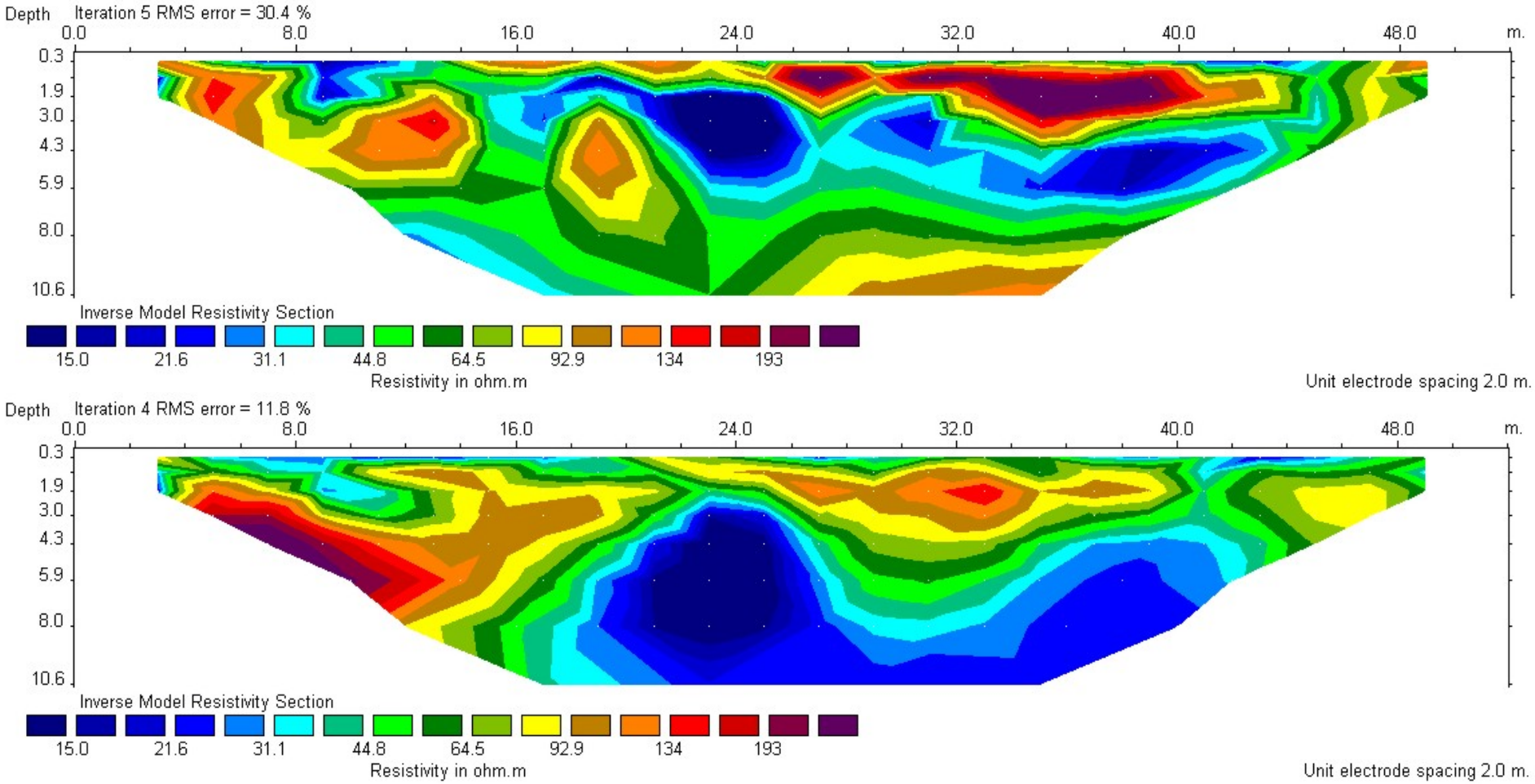
Σχήμα 4.18: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 08 (επάνω) και 10 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Ιουλίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



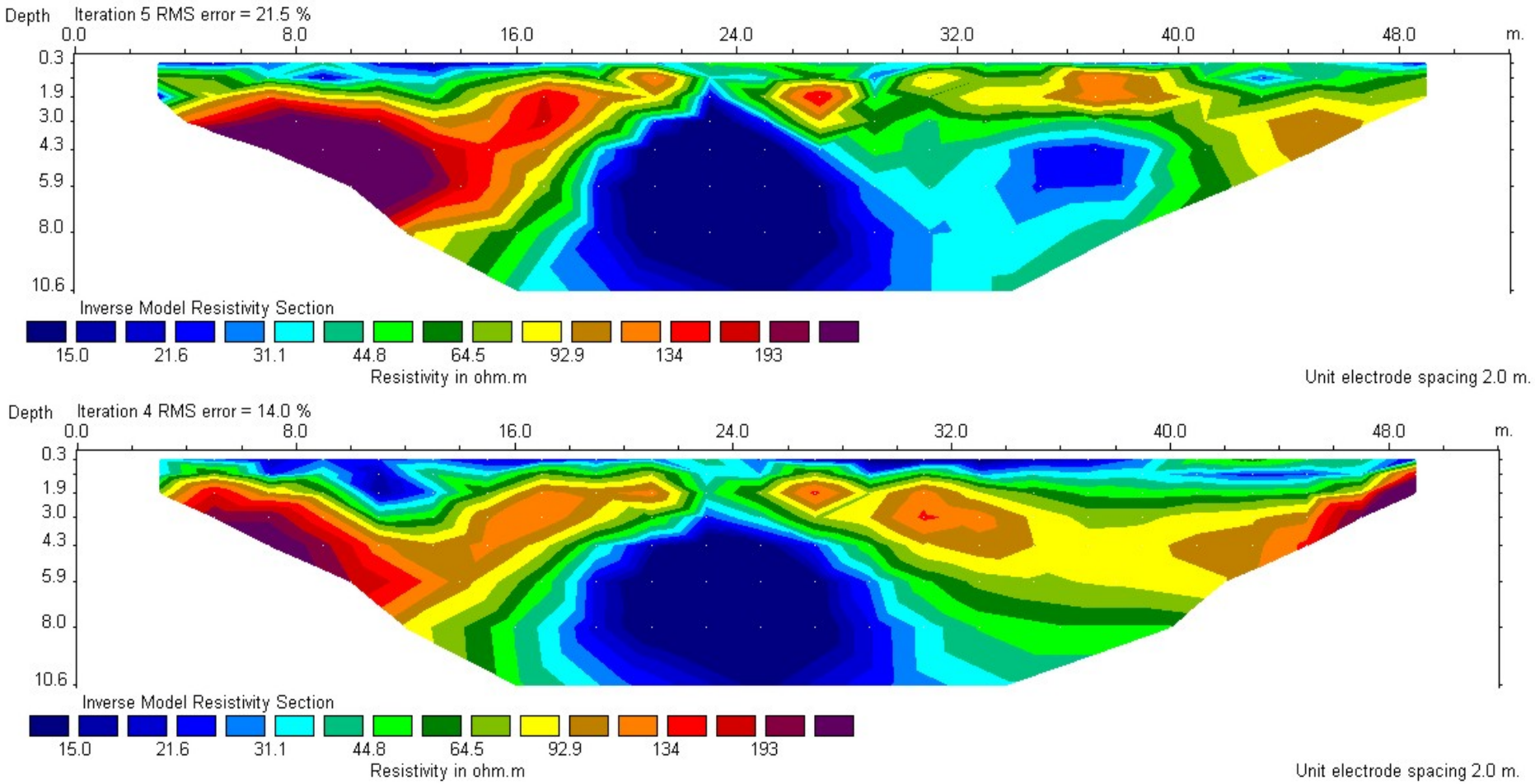
Σχήμα 4.19: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 12 (επάνω) και 14 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Ιουλίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



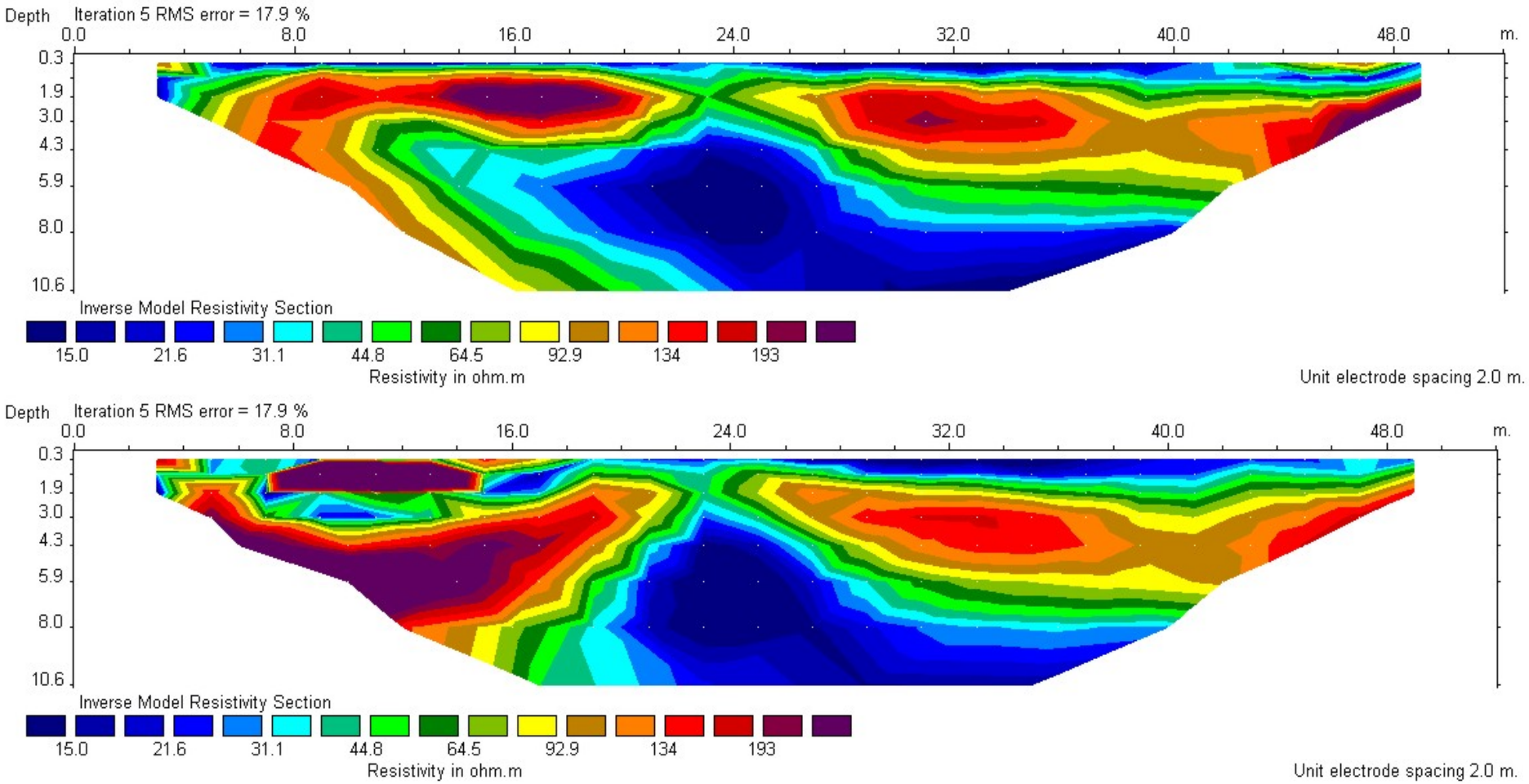
Σχήμα 4.20: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 16 (επάνω) και 18 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Ιουλίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



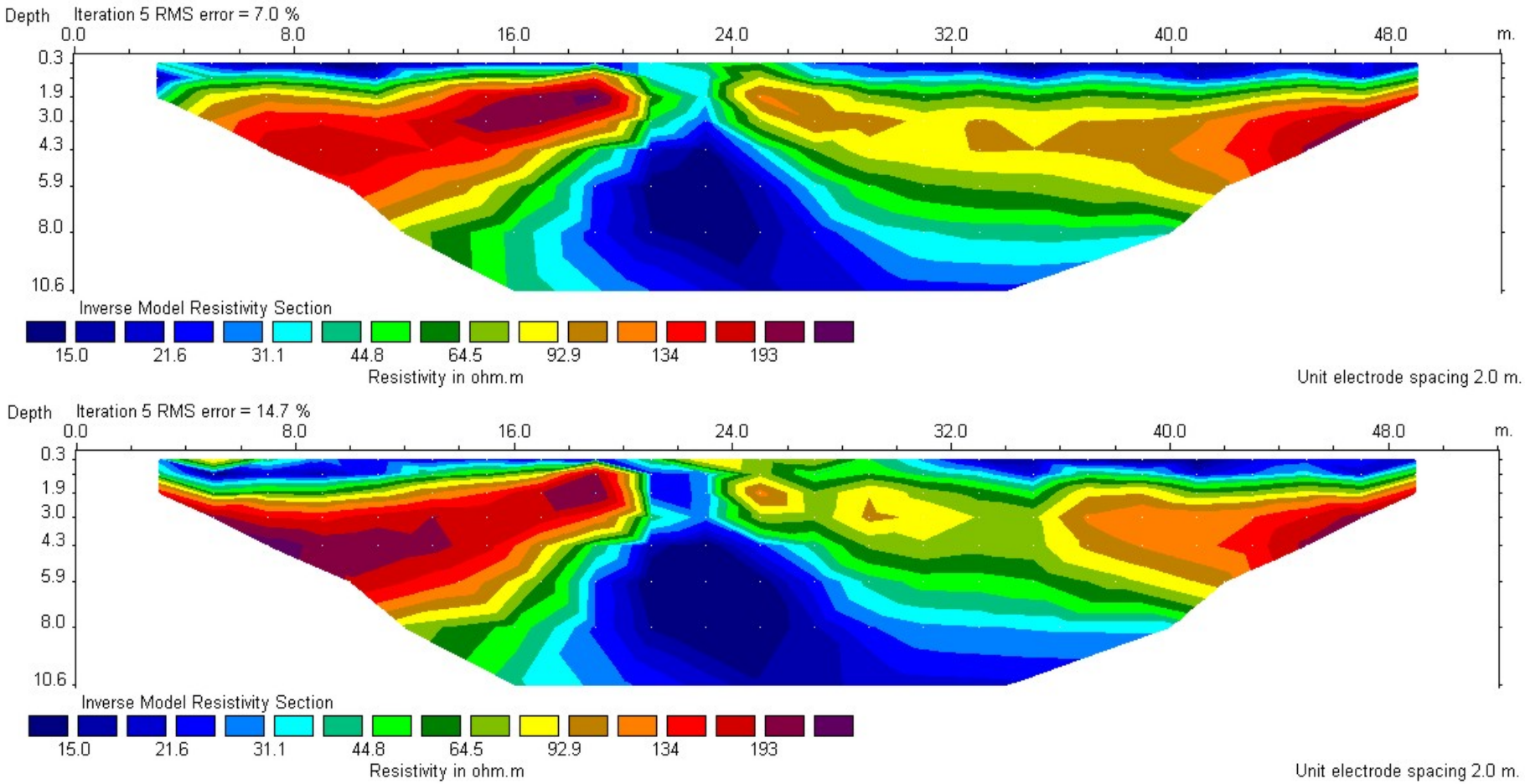
Σχήμα 4.21: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 00 (επάνω) και 02 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



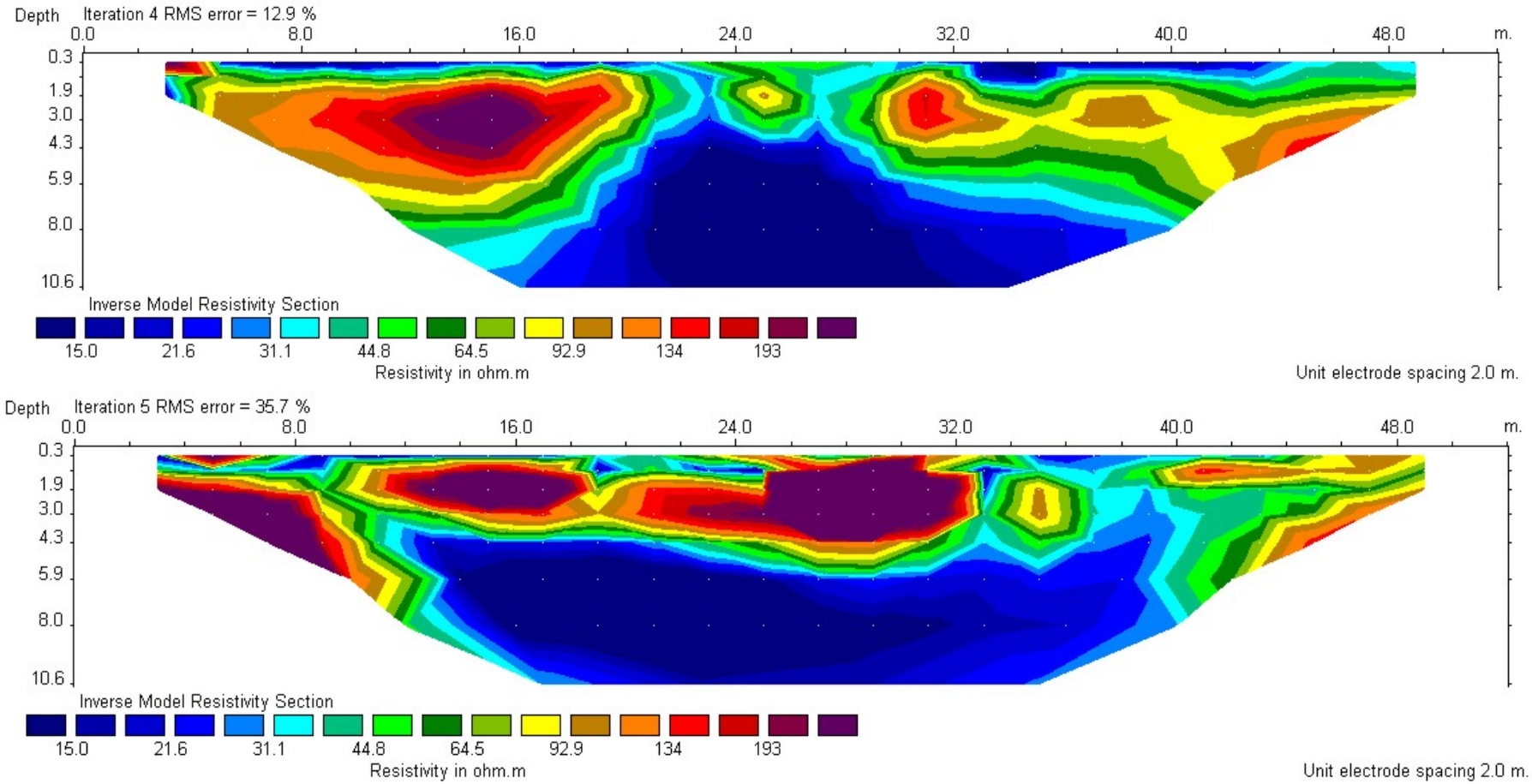
Σχήμα 4.22: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 04 (επάνω) και 06 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



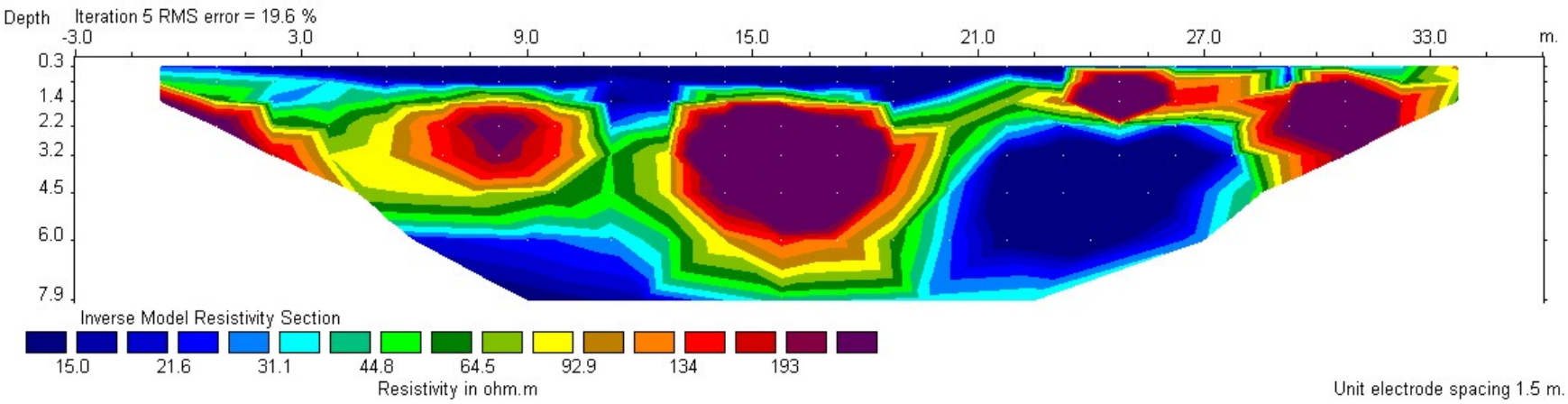
Σχήμα 4.23: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 08 (επάνω) και 10 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



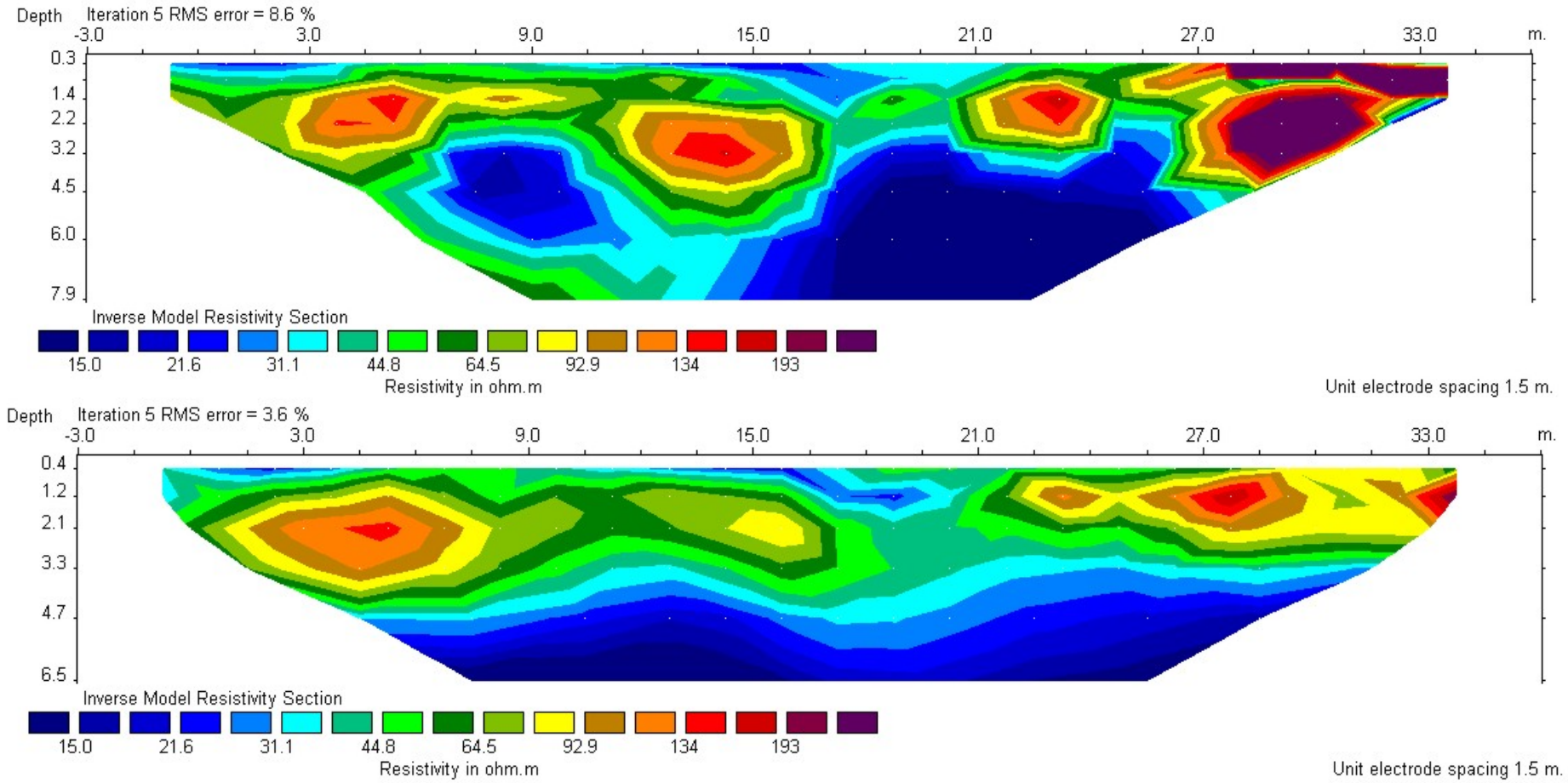
Σχήμα 4.24: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 12 (επάνω) και 14 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



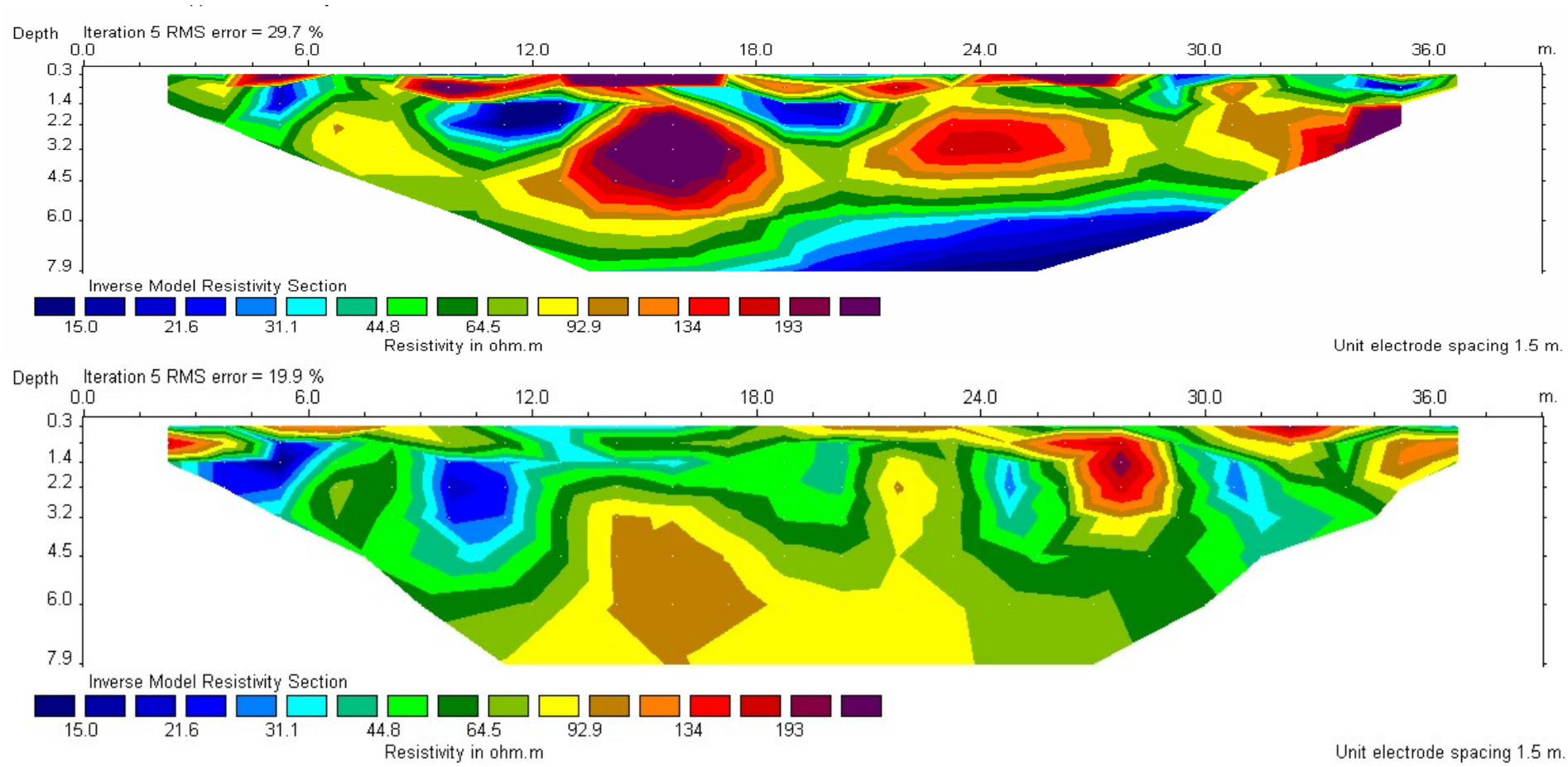
Σχήμα 4.25: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρικές τομές 16 (επάνω) και 18 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



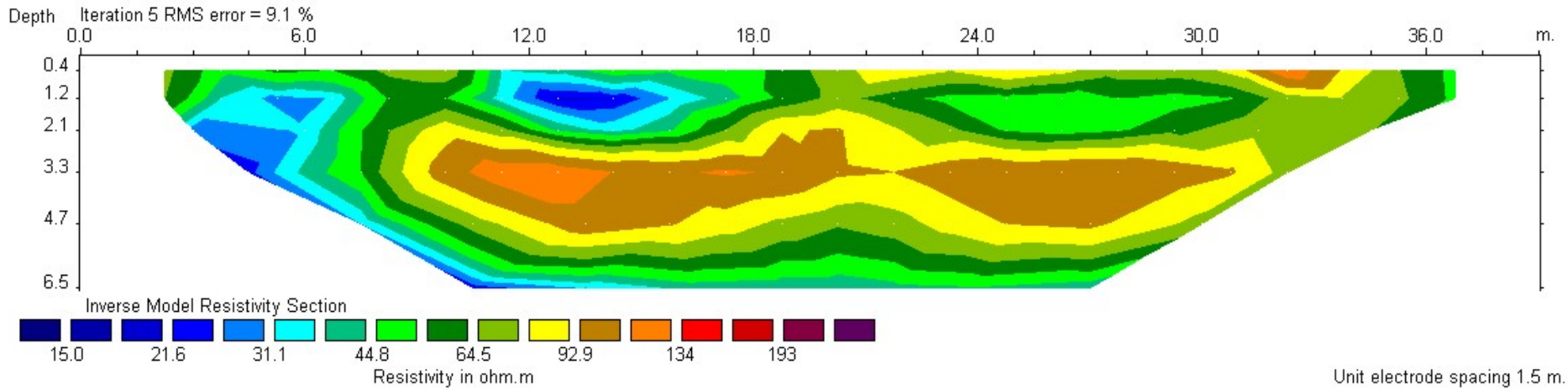
Σχήμα 4.26: Περιοχή Β: Γεωηλεκτρική τομή 01 που προέκυψε από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 4.27: Περιοχή Γ: Γεωηλεκτρικές τομές 01, με τη διάταξη διπόλου-διπόλου (επάνω) και 01 με διάταξη Wenner (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 4.28: Περιοχή Δ: Γεωηλεκτρικές τομές 01 (επάνω) και 02 (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.



Σχήμα 4.29: Περιοχή Δ: Γεωηλεκτρική τομή 02 που προέκυψε από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη Wenner. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.

Κεφάλαιο 5

Συνδυασμένη ερμηνεία Γεωφυσικών μεθόδων

5.1 Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εύρεση κατάλληλης επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ, για την βέλτιστη ερμηνεία τους και την εύκολη σύγκρισή τους με τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται επιλεγμένες εικόνες από την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ σε κάθε περιοχή μελέτης και συγκρίνονται με τις τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας και τις γεωτρήσεις που έγιναν πλησίον σε αυτές, για την καλύτερη ερμηνεία τους.

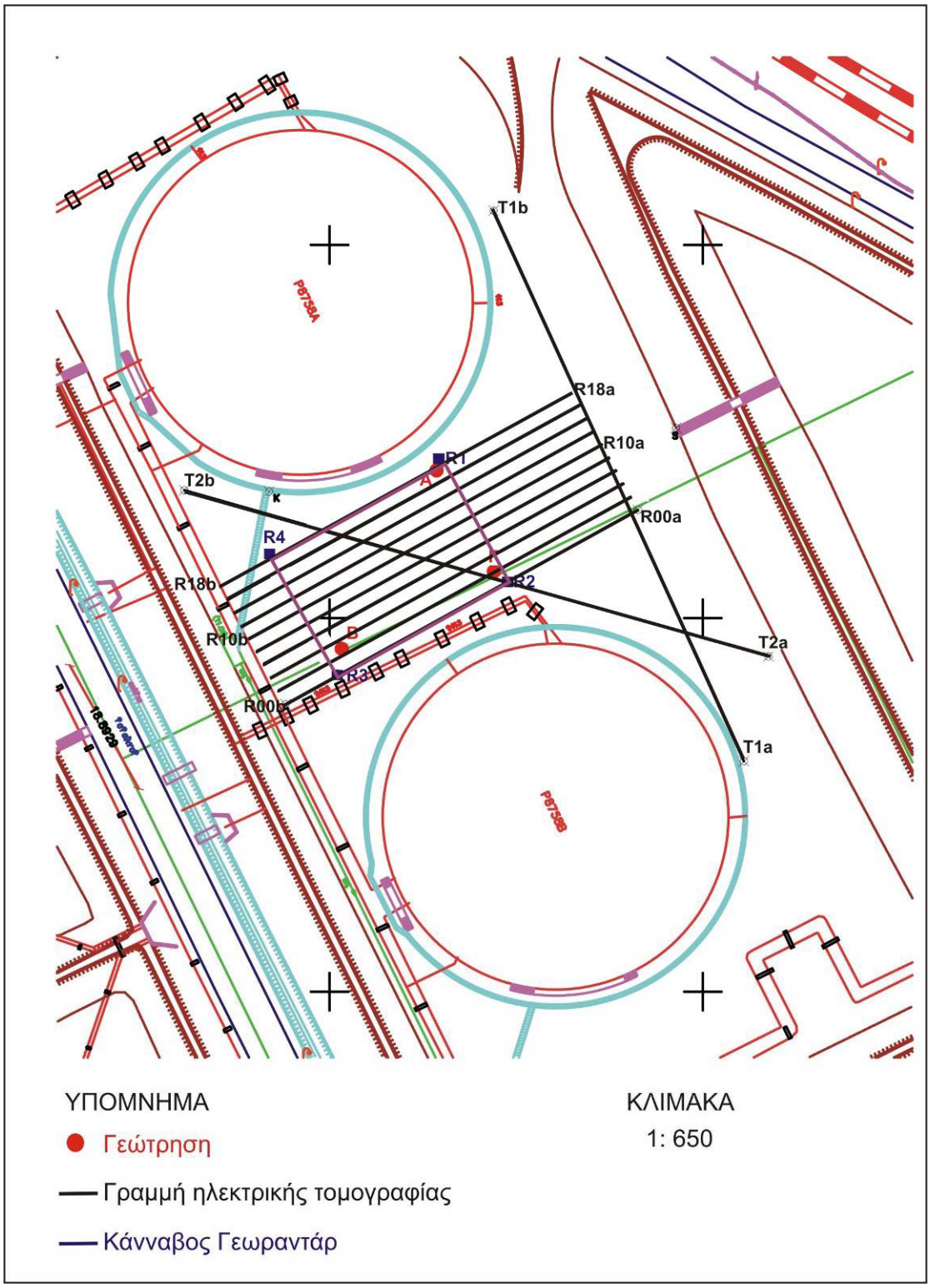
5.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα γίνεται προσπάθεια συνδυασμού των δεδομένων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία με στόχο την καλύτερη δυνατή εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την γεωλογική δομή του υπεδάφους, όσο και για τις θέσεις πιθανής ρύπανσης. Με τα δεδομένα των γεωτρήσεων από τον χώρο των μετρήσεων και τα αποτελέσματα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλοι συνδυασμοί που παρατίθενται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Οι συνδυασμοί αυτοί συνέβαλαν στην καλύτερη ερμηνεία και αποσαφήνιση της κατάστασης που επικρατεί ανά περιοχή, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

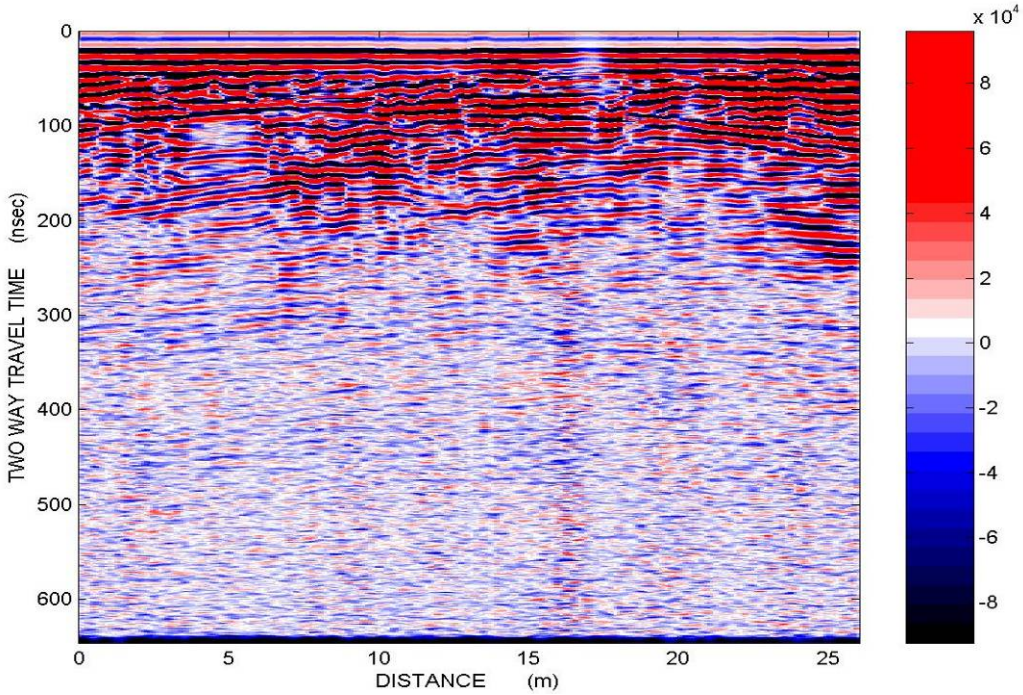
Περιοχή Α

Αρχικά παρουσιάζονται επιλεγμένες τομές του γεωραντάρ (σχήματα 5.1-5.3) από τις μετρήσεις της περιόδου Ιουλίου 2005. Οι εικόνες αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή φίλτρων dewow, σταθερής ενίσχυσης και μέσης τιμής. Οι ανακλαστήρες εμφανίζουν υφή διαφορετική στην υπερκείμενη αμμώδη άργιλο σε σχέση με την υποκείμενη ιλυώδη άργιλο. Από το συνδυασμό των γεωφυσικών δεδομένων με τα στοιχεία από τις γεωτρήσεις προέκυψε ότι οι ανακλαστήρες που εμφανίζονται στις τομές γεωραντάρ απεικονίζουν εναλλαγές λεπτών εδαφικών στρωμάτων διαφορετικής αργιλότητας. Πιο αναλυτική ερμηνεία απαιτεί λεπτομερή γεωλογική περιγραφή των εδαφικών δειγμάτων από τις γεωτρήσεις. Από τις γεωτρήσεις αυτές

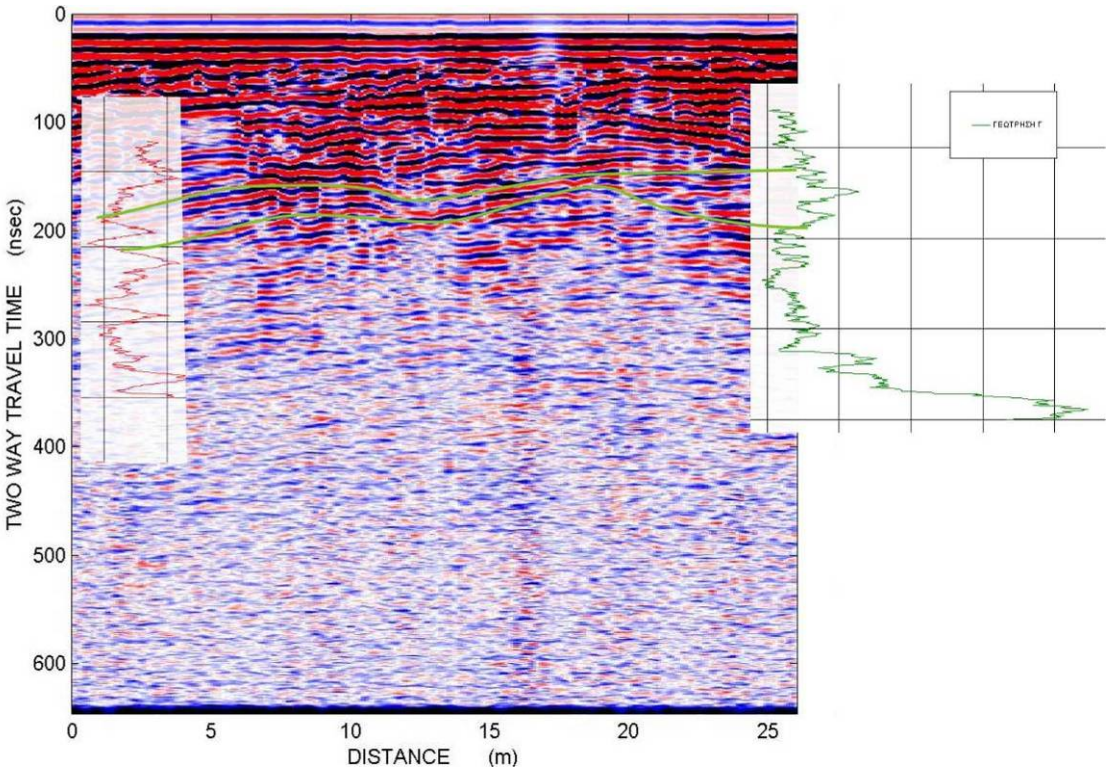
συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους και πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των ΤΡΗ (σε ppm) (Κανελλοπούλου, 2004)).



Σχήμα 5.1: Γραμμές μελέτης Περιοχής Α



Σχήμα 5.2: Τομή γεωραντάρ 02. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.



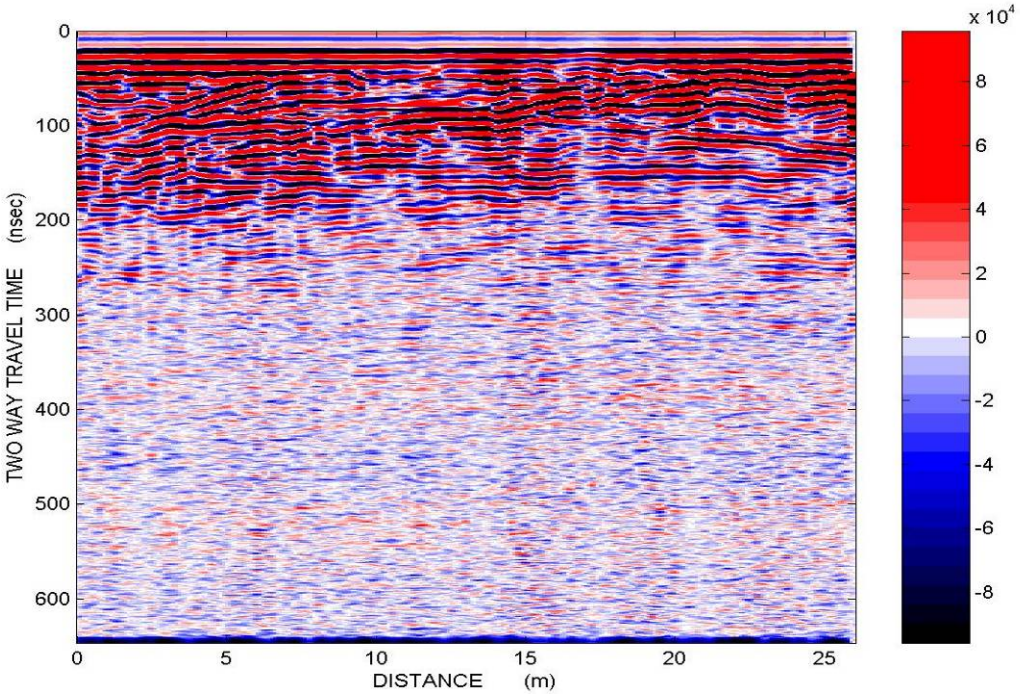
Σχήμα 5.3: Υπέρθεση τομής γεωραντάρ 02 με τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας στις γεωτρήσεις Β και Γ.

Στην γραμμή γεωραντάρ 02 (Σχήμα 5.2) και σε χρόνους καταγραφής περίπου 200 nsec εμφανίζεται σειρά ανακλαστήρων οι οποίοι συσχετίζουν χαρακτηριστική διπλή απότομη αλλαγή της φυσικής ραδιενέργειας στις γεωτρήσεις Β και Γ (Σχήμα

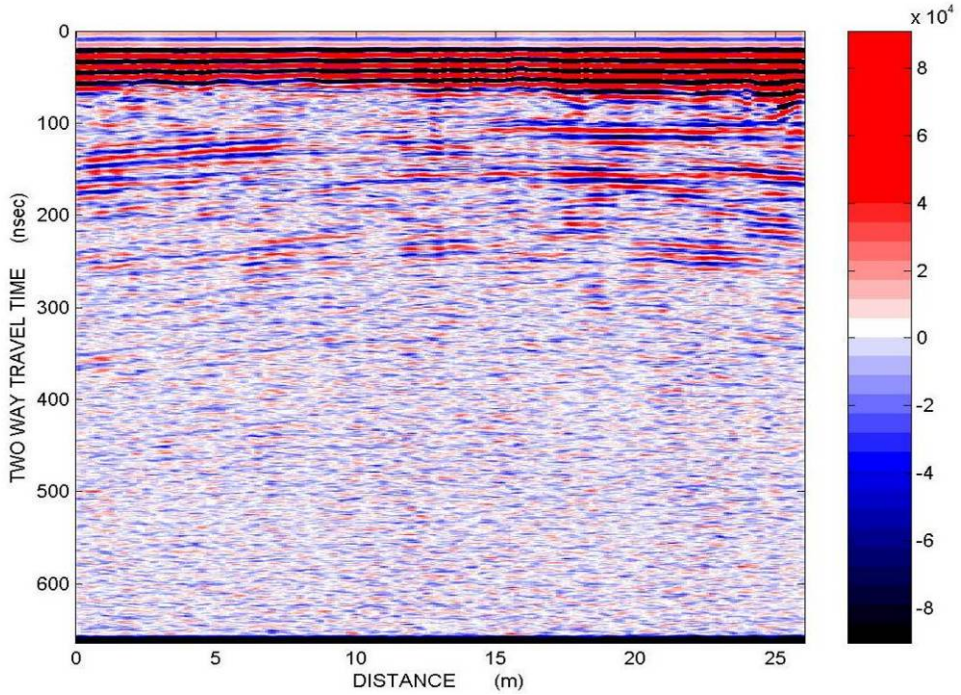
5.3). Αυτή η απότομη αύξηση της αργιλότητας Κατά μήκος αυτής της τομής και σε βάθος 1-1,5 m (100 ns) παρατηρείται ανακλαστήρας ο οποίος πιθανόν να είναι το πάνω όριο εδαφικού στρώματος λιγότερο ή μη περατού, καθώς στις παραπάνω γεωτρήσεις η ρύπανση των εδαφών περιορίζεται σε βάθη μικρότερα των 1,5 m.

Παρόμοιες καταγραφές παρατηρούνται σε όλες τις γραμμές της περιοχής μελέτης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι γραμμές 04, 10 και 18 στα Σχήματα 5.4 – 5.6 αντίστοιχα όπου παρατηρούνται τα ίδια αποτελέσματα. Οι ανακλαστήρες αυτοί πιθανό να οφείλονται στην κατά τόπους εμφάνιση χαλικιών μέσα στο αργιλικό έδαφος, στην ανομοιογένεια του εδάφους ή ακόμη και στην αλλαγή της περιεκτικότητας σε άργιλο.

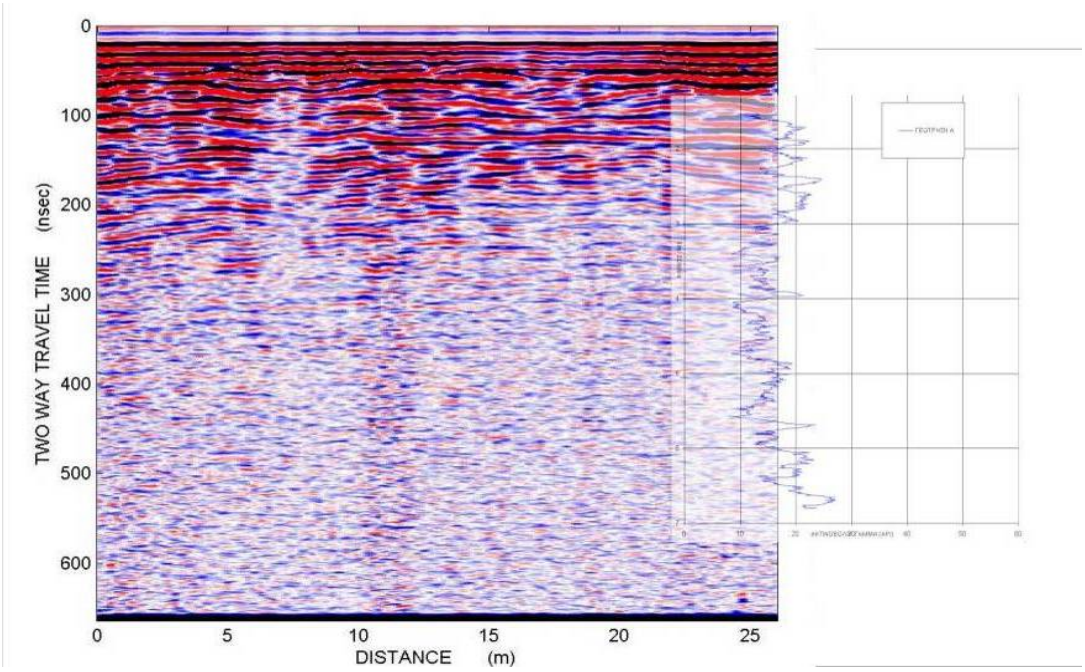
Επίσης διακρίνεται ότι σε όλες τις τομές γεωραντάρ (Σχήματα 5.3 – 5.6) μετά τα 300 ns αλλάζει η υφή των καταγραφών και πιο συγκεκριμένα αποσβένεται το υψίσυχνο σήμα του γεωραντάρ. Αυτό οφείλεται στην απότομη αύξηση της αργιλότητας του εδάφους που αυτό τεκμηριώνεται από τις διαγραφίες αλλά και από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα από τις γεωτρήσεις.



Σχήμα 5.4: Τομή γεωραντάρ 04. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.



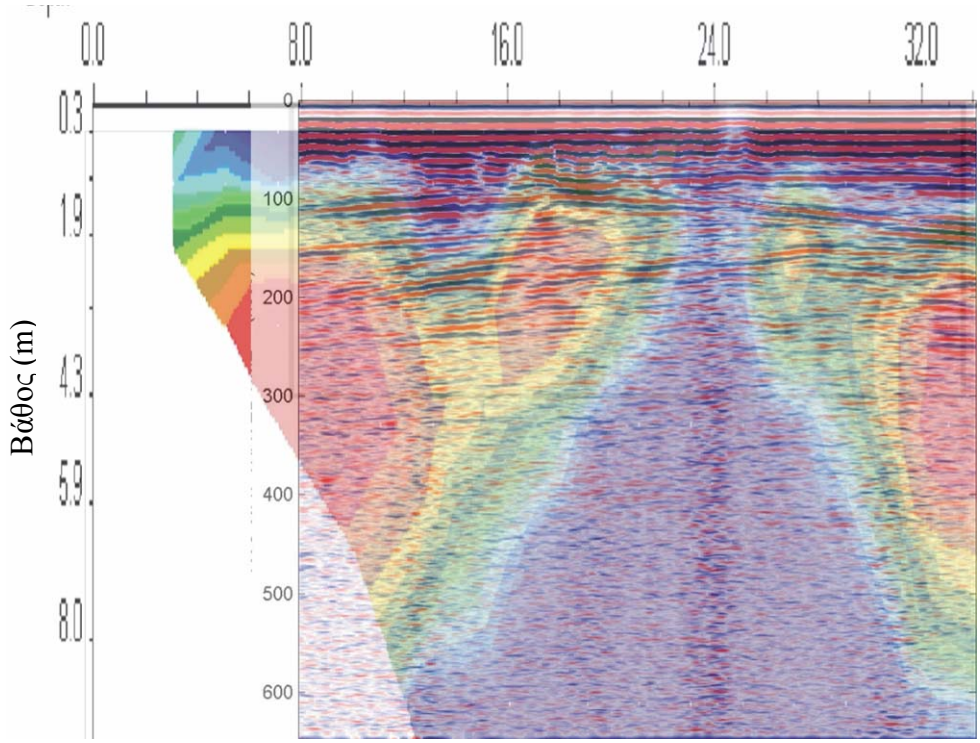
Σχήμα 5.5: Τομή γεωραντάρ 10. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.



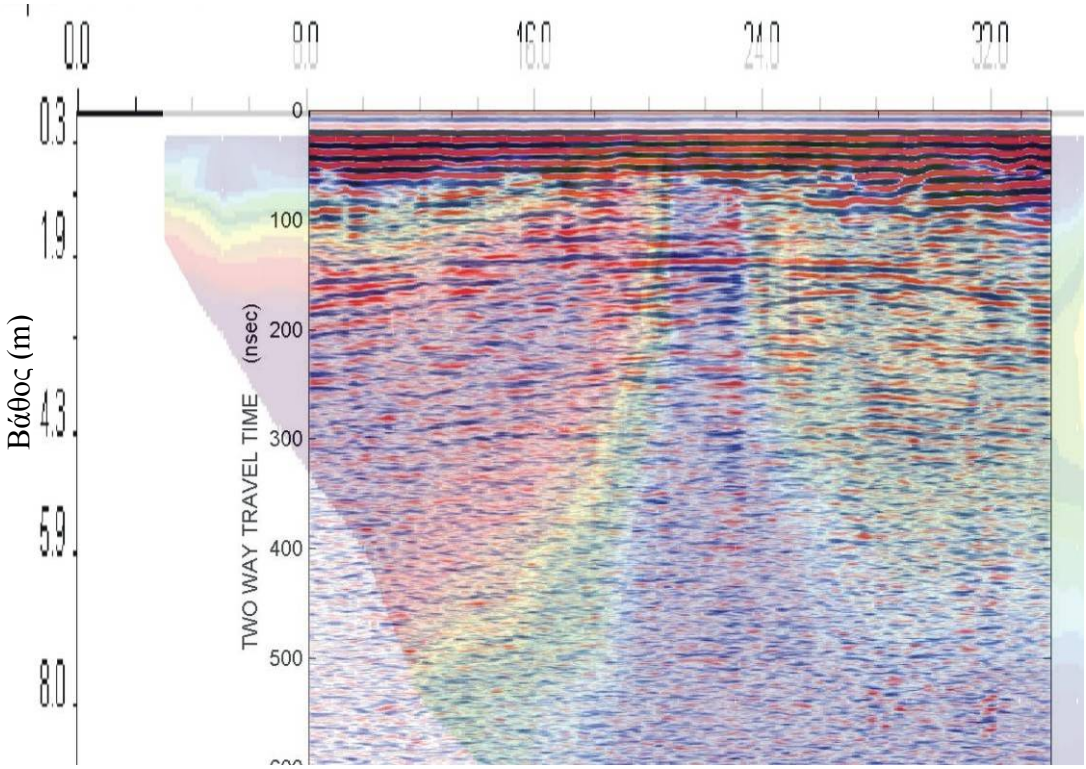
Σχήμα 5.6: Υπέρθεση τομής γεωραντάρ 18 με τη διαγραφία φυσικής ραδιενέργειας στη γεώτρηση Α.

Στα Σχήματα 5.7 - 5.9 απεικονίζονται οι υπερθέσεις των τομών γεωραντάρ και ηλεκτρικής τομογραφίας για τις γραμμές 06, 14 και 16 αντίστοιχα. Από τη υπέρθεση των τομών του γεωραντάρ με τις αντίστοιχες γεωηλεκτρικές τομές που

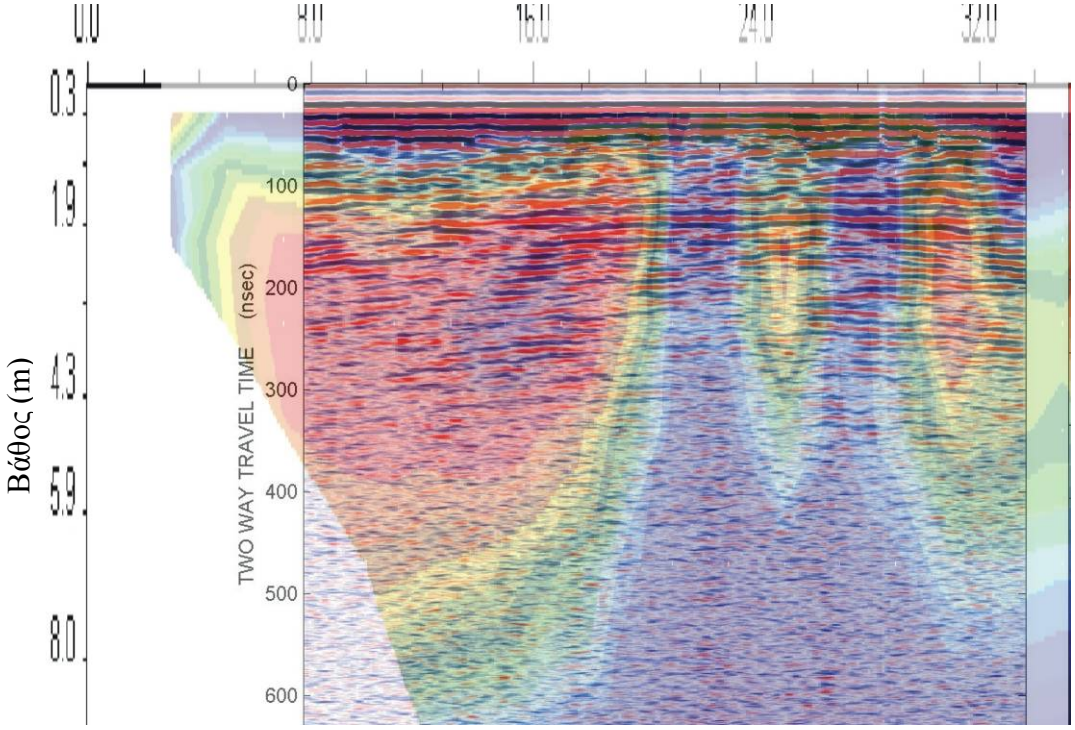
πραγματοποιήθηκαν εκείνη την περίοδο (Ιούλιο 2005), παρατηρείται αρκετά καλή συμφωνία. Παραδείγματος χάριν, στο μέσο περίπου της γραμμής 06 (Σχήμα 5.7), σε οριζόντια απόσταση περίπου 24 m από την αρχή της γραμμής, παρατηρείται στην γεωηλεκτρική τομή έντονη πλευρική μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και αντίστοιχα στην ίδια θέση παρατηρείται στη τομή γεωραντάρ διακοπή της συνέχειας των ανακλαστήρων. Αυτό παρατηρείται πολύ έντονα και στην γραμμή 14 (Σχήμα 5.8) όπως επίσης και στις περισσότερες γραμμές της περιοχής μελέτης (Παράρτημα. Β).



Σχήμα 5.7: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 06

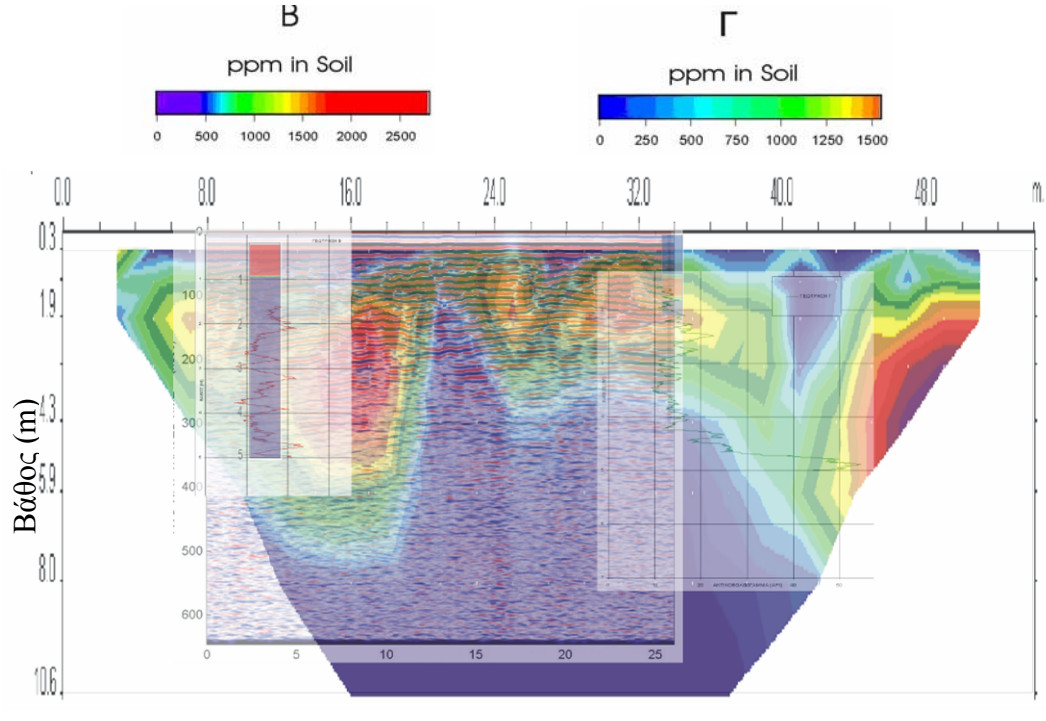


Σχήμα 5.8: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 14.

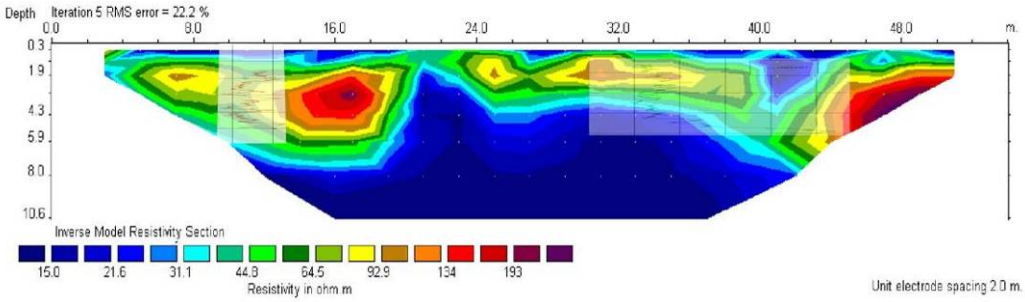


Σχήμα 5.9: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή16.

Στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται δύο γεωηλεκτρικές τομές (02 και 18) σε υπέρθεση με τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας τις τομές γεωραντάρ και τις χημικές αναλύσεις για ΤΡΗ. Στις τομές αυτές παρατηρούνται δύο ζώνες, η μια επιφανειακή όπου παρατηρούνται υψηλές σχετικά τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (50-200 Ωm πράσινο και κόκκινο χρώμα) και η δεύτερη βρίσκεται σε βάθος 2-5 m και χαρακτηρίζεται με πολύ χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (<20 Ωm μπλε χρώμα). Στην επιφανειακή ζώνη υπάρχει κυρίως αργιλικός μανδύας με παρεμβολές από κροκάλες ή χαλίκια κατά τόπους και σε αυτό αποδίδονται οι ζώνες αυξημένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Οι χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πιθανότατα να οφείλονται σε αργιλικά υλικά. Επίσης στις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας (Γεώτρηση Β) παρατηρείται ότι οι περιοχές με τις απότομη διακύμανση της φυσικής ραδιενέργειας η οποία συμπίπτει με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης .Οι συγκεντρώσεις ΤΡΗ που προσδιορίστηκαν στην γεώτρηση Β είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα ενώ στην γεώτρηση Γ έχουμε πολύ μικρές τιμές ρύπανσης.



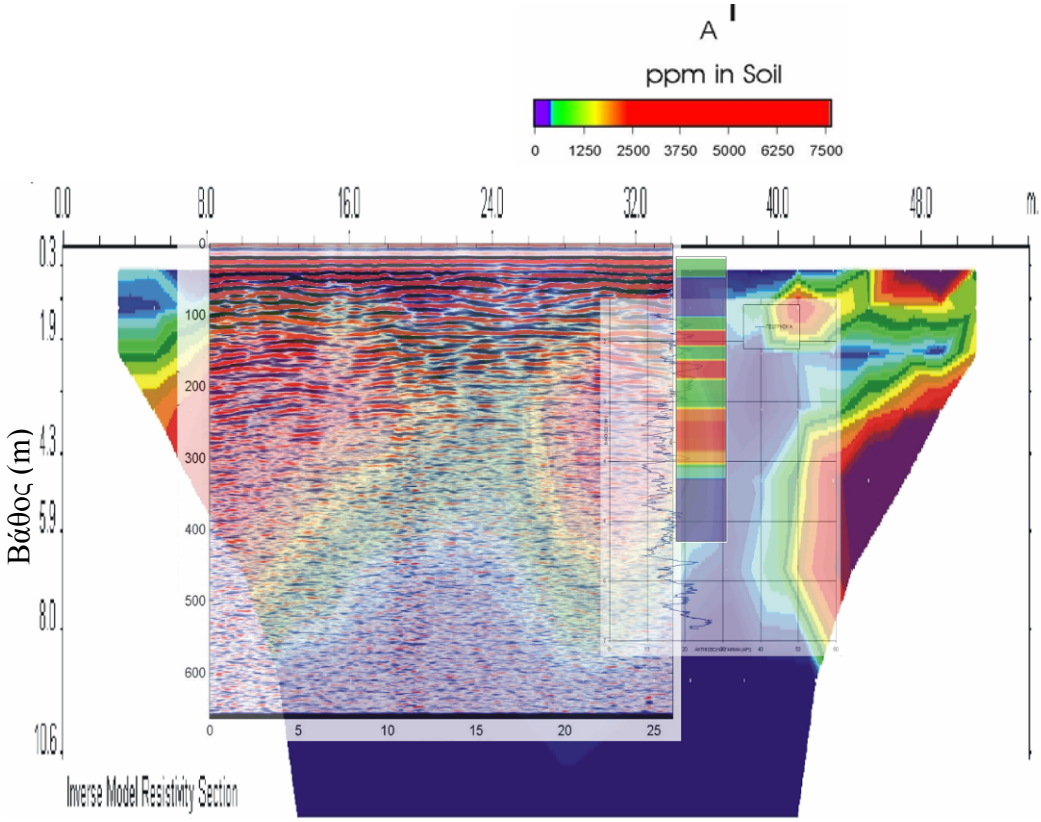
(α)



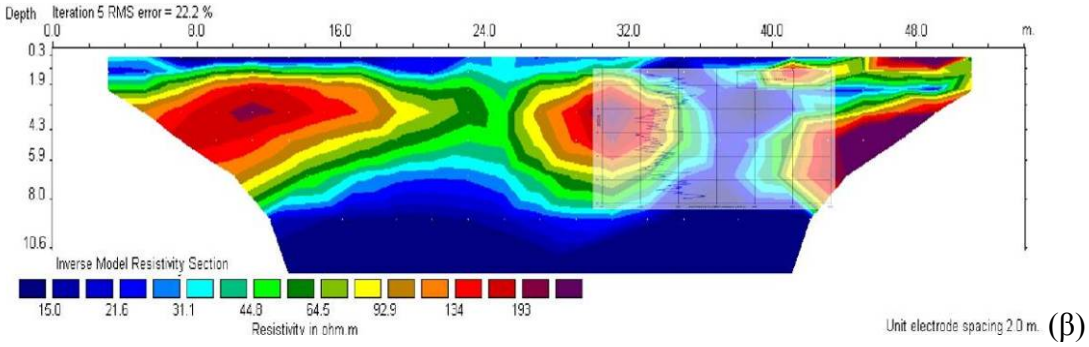
(β)

Σχήμα 5.10: (α)Υπέρθεση ηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ και διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας (οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα είναι σε API) στις γεωτρήσεις Β και Γ και (β) υπέρθεση ηλεκτρικής τομής και διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας για τη γραμμή 02.

Αυξημένη ρύπανση (2500-7500 ppm) παρατηρείται στη γεώτρηση Α σε περιοχή όπου εμφανίζεται ζώνη υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στην γεωηλεκτρική τομή 18 (Σχήμα 5.11). Στην γραμμή γεωραντάρ 02 (Σχήμα 5.10) και σε χρόνους καταγραφής περίπου 200 nsec εμφανίζεται σειρά ανακλαστήρων οι οποίοι συσχετίζουν χαρακτηριστική διπλή απότομη αλλαγή της φυσικής ραδιενέργειας στις γεωτρήσεις Β και Γ.



(α)



Σχήμα 5.11: (α)Υπέρθεση ηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ και διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας στη γεώτρηση Α και (β) υπέρθεση ηλεκτρικής τομής και διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας για τη γραμμή 18.

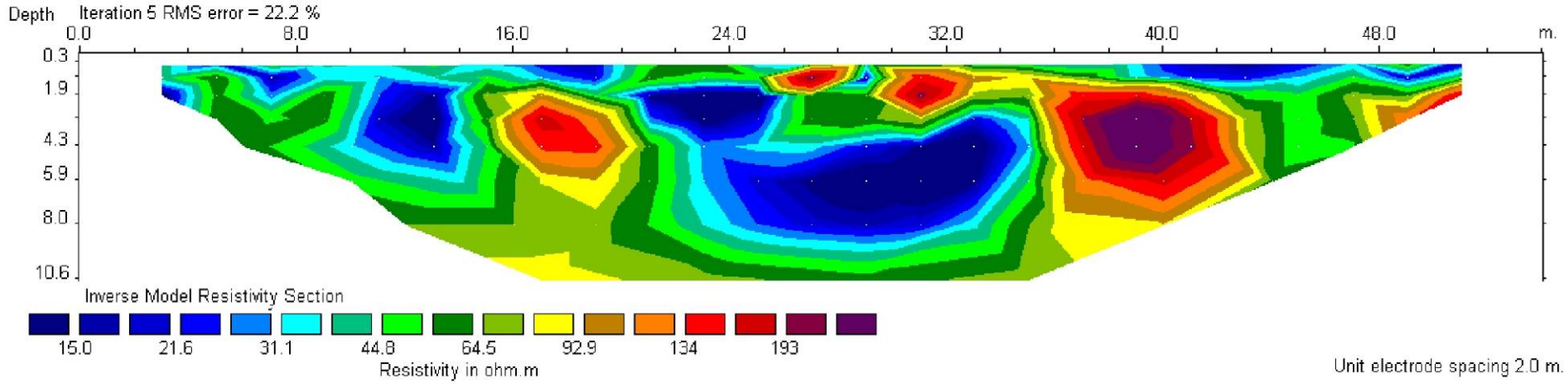
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης της γεωφυσικής έρευνας στην ίδια περιοχή που πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2005. Επίσης παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν τις δυο αυτές περιόδους.

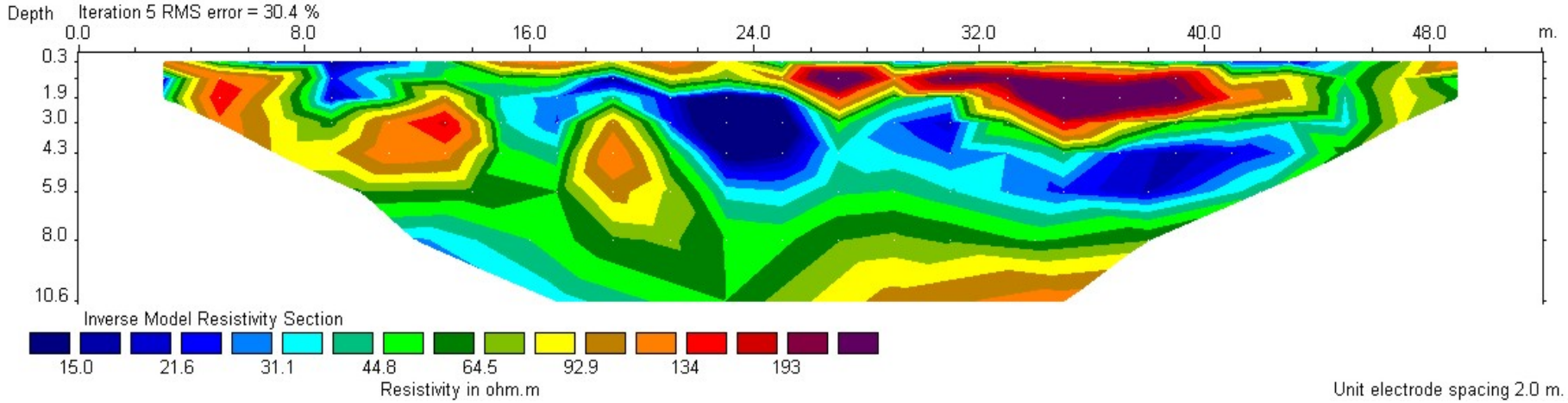
Όσον αφορά στις αντίστοιχες γεωηλεκτρικές τομές του Ιουλίου 2005 και του Νοεμβρίου 2005, παρουσιάζουν ομοιότητες. Αυτό σημαίνει ότι οι εναλλαγές χαμηλών και υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στο υπέδαφος σχετίζονται με αντίστοιχες εναλλαγές των γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι αποτελούνται από ιλυώδη άργιλο, χαλίκια και άμμους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περίοδος των μετρήσεων του Νοεμβρίου του 2005, ήταν ακριβώς μετά από πολύ ισχυρές βροχοπτώσεις στην περιοχή. Υπάρχουν όμως κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις, κυρίως στις γραμμές μελέτης 00 και 02 (Σχήματα 5.12 και 5.13) πιθανόν λόγω της σωλήνωσης που τοποθετήθηκε στις γεωτρήσεις Β και Γ μετά την πρώτη περίοδο μετρήσεων.

Στις γεωηλεκτρικές τομές (Σχήματα 4.17 – 4.29) παρατηρείται ζώνη χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία σύμφωνα με την διαγραφία φυσικής ραδιενέργειας στην γεώτρηση Γ (γεωηλεκτρική τομή 02, Σχήματα 5.10 - 5.13) παρουσιάζει αυξημένη αργιλότητα. Ο υπερκείμενος αυτού γεωηλεκτρικός σχηματισμός παρουσιάζει έντονη πλευρική ανομοιογένεια και ζώνες αυξημένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε αμμώδη άργιλο με κροκάλες ή χαλίκια κατά τόπους.

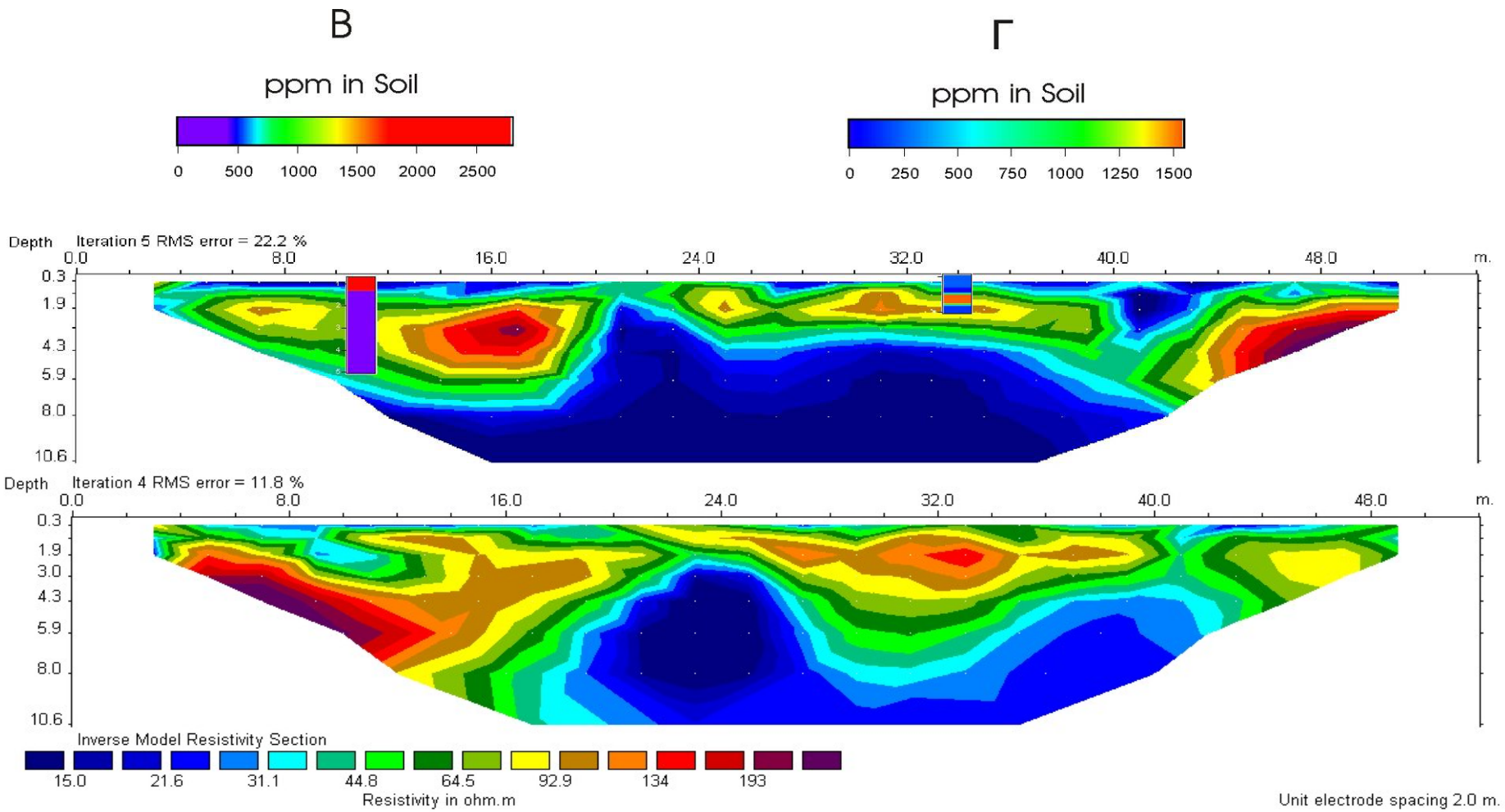
Μεγαλύτερη συγκέντρωση ΤΡΗ μετρήθηκε στην γεώτρηση Α τον Ιούλιο του 2005 (Σχήμα 5.14), (οι μεγάλες τιμές συγκέντρωσης ΤΡΗ σε ppm στο έδαφος απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στην στήλη της γεώτρησης). Από τη σύγκριση των

γεωηλεκτρικών τομών του Ιουλίου 2005 και Νοεμβρίου 2005 (Σχήματα 5.12-5.13) κατά μήκος της γραμμής 18 προκύπτει ότι η χωρική κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεν παρουσιάζει αξιόλογη χρονική μεταβολή. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ρύπανση που παρατηρήθηκε τον Ιούλιο του 2005 παραμένει στα ίδια επίπεδα μέχρι τον Νοέμβριο 2005.

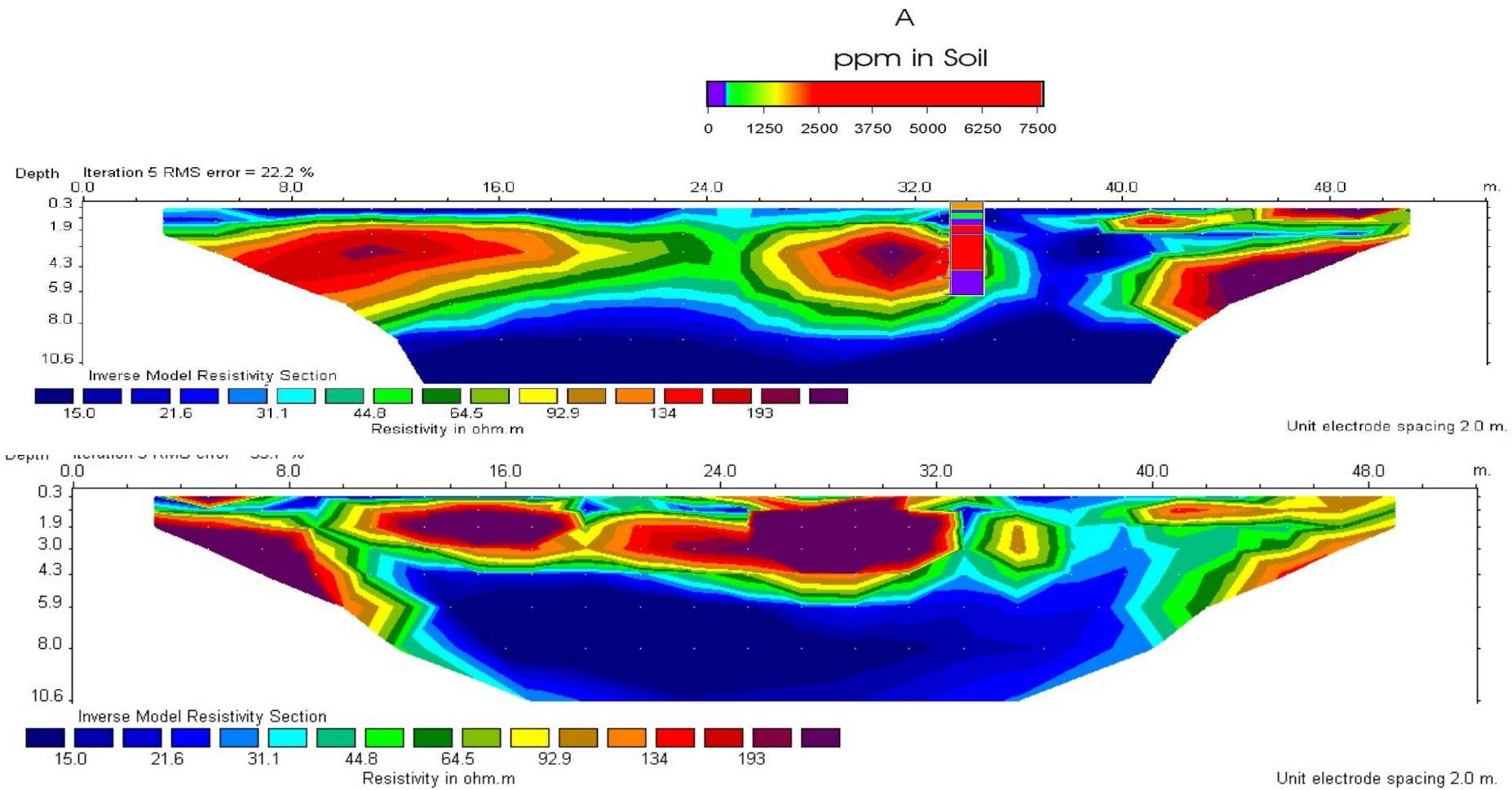




Σχήμα 5.12: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρική τομή 00 την περίοδο Ιουλίου 2005 (επάνω) και Νοεμβρίου 2005 (κάτω). Η γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

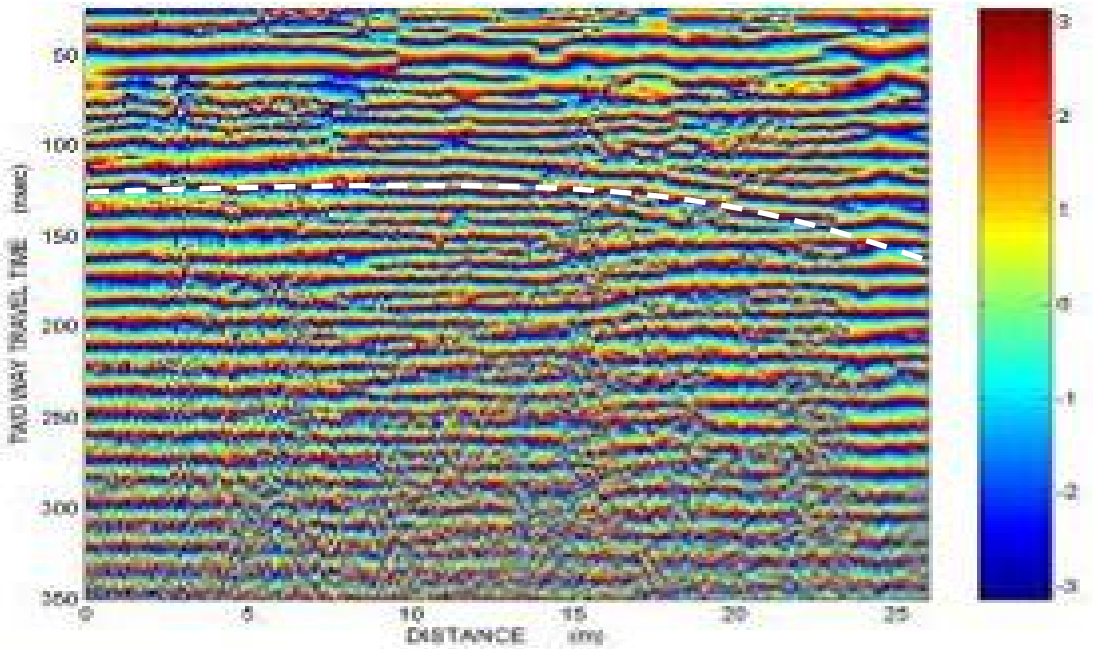


Σχήμα 5.13: Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής 02 με τη συγκέντρωση ΤΡΗ σε εδαφικά δείγματα από τις γεωτρήσεις Β και Γ την περίοδο Ιουλίου 2005 (επάνω) και γεωηλεκτρική τομή 02 την περίοδο Νοεμβρίου 2005 (κάτω). Η γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

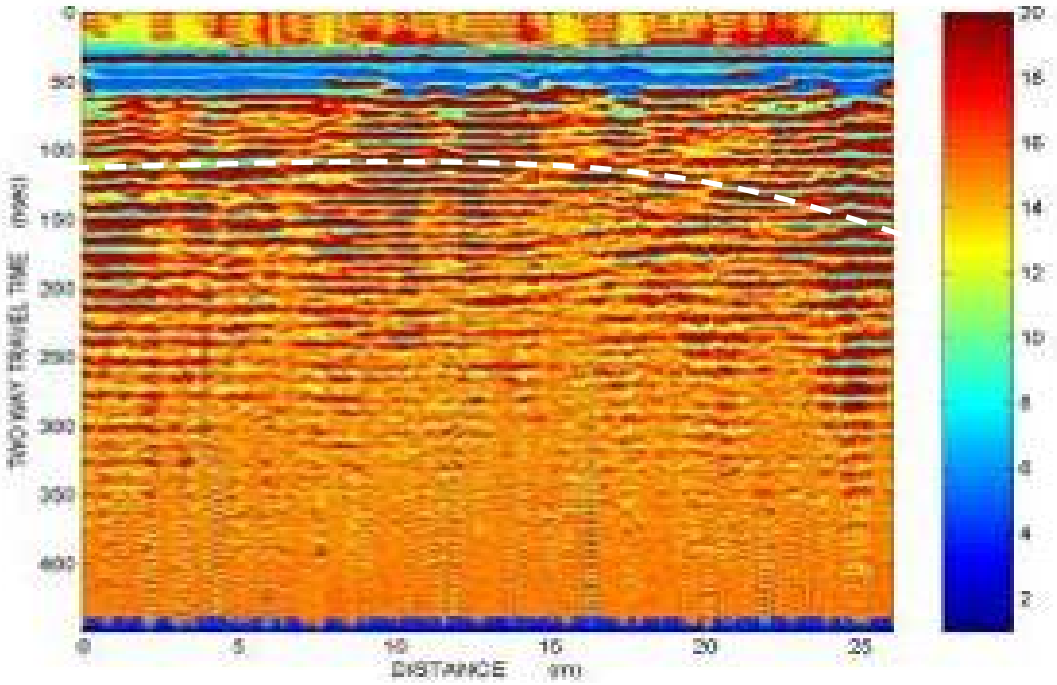


Σχήμα 5.14: Περιοχή Α: Γεωηλεκτρική τομή 18, με τη συγκέντρωση ΤΡΗ σε εδαφικά δείγματα από την γεώτρηση Α την περίοδο Ιουλίου 2005 (επάνω) και γεωηλεκτρική τομή 02 την περίοδο Νοεμβρίου 2005 (κάτω). Η γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

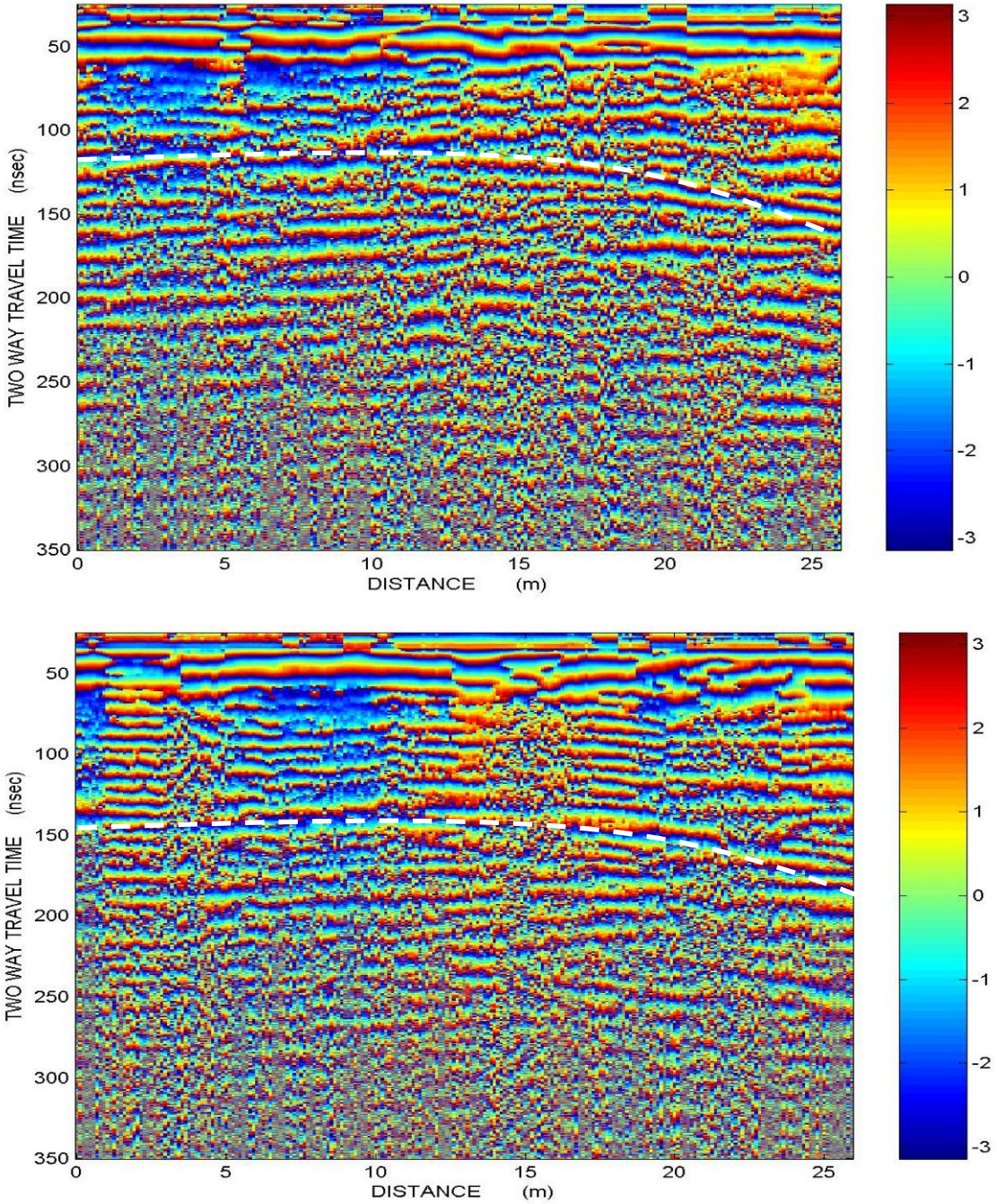
Στις τομές γεωραντάρ για την γραμμή 02 (Σχήματα 5.15 – 5.16) η ταξινομημένη τομή (Σχήμα 5.16) έχει προκύψει από την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.2, όπως επίσης και η στιγμιαία φάση. Σε όλες τις γραμμές που παρατίθενται οι οποίες είναι οι 02, 04 και 08 διακρίνεται ένας κεκλιμένος ανακλαστήρας (από τα 100 έως και τα 150 περίπου ns) ο οποίος βαθαίνει προς ΒΑ. Ο ίδιος ανακλαστήρας παρατηρείται σε όλες τις τομές γεωραντάρ της περιοχής Α Ουσιαστικά με τον ανακλαστήρα αυτό οριοθετείται το επιφανειακό στρώμα με το αμέσως βαθύτερο το οποίο εμφανίζει μεγαλύτερη αργιλότητα..



Σχήμα 5.15: Περιοχή Α: Τομή Γεωραντάρ 02 (Στιγμιαία φάση). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 5.16: Περιοχή Α: Ταξινομημένη τομή Γεωραντάρ 02. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

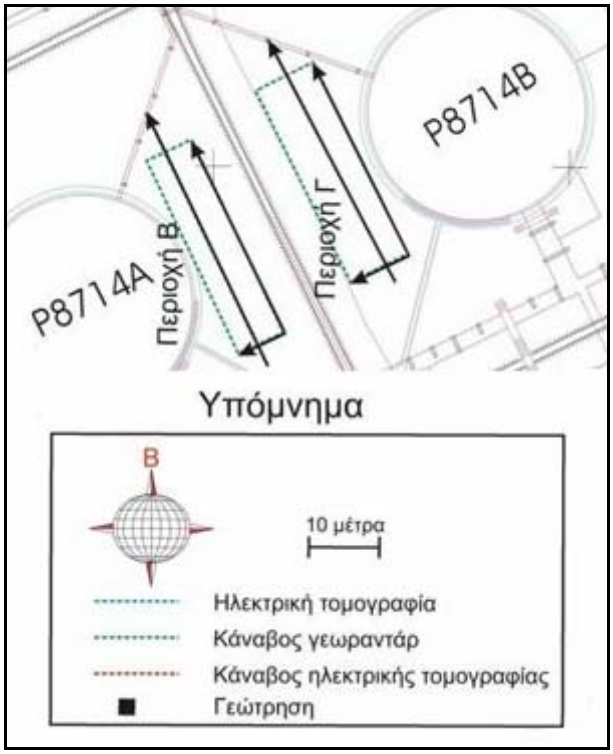


Σχήμα 5.17: Περιοχή Α: Τομή Γεωραντάρ 04 (επάνω) και 08 (κάτω) (Στιγμιαία φάση). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

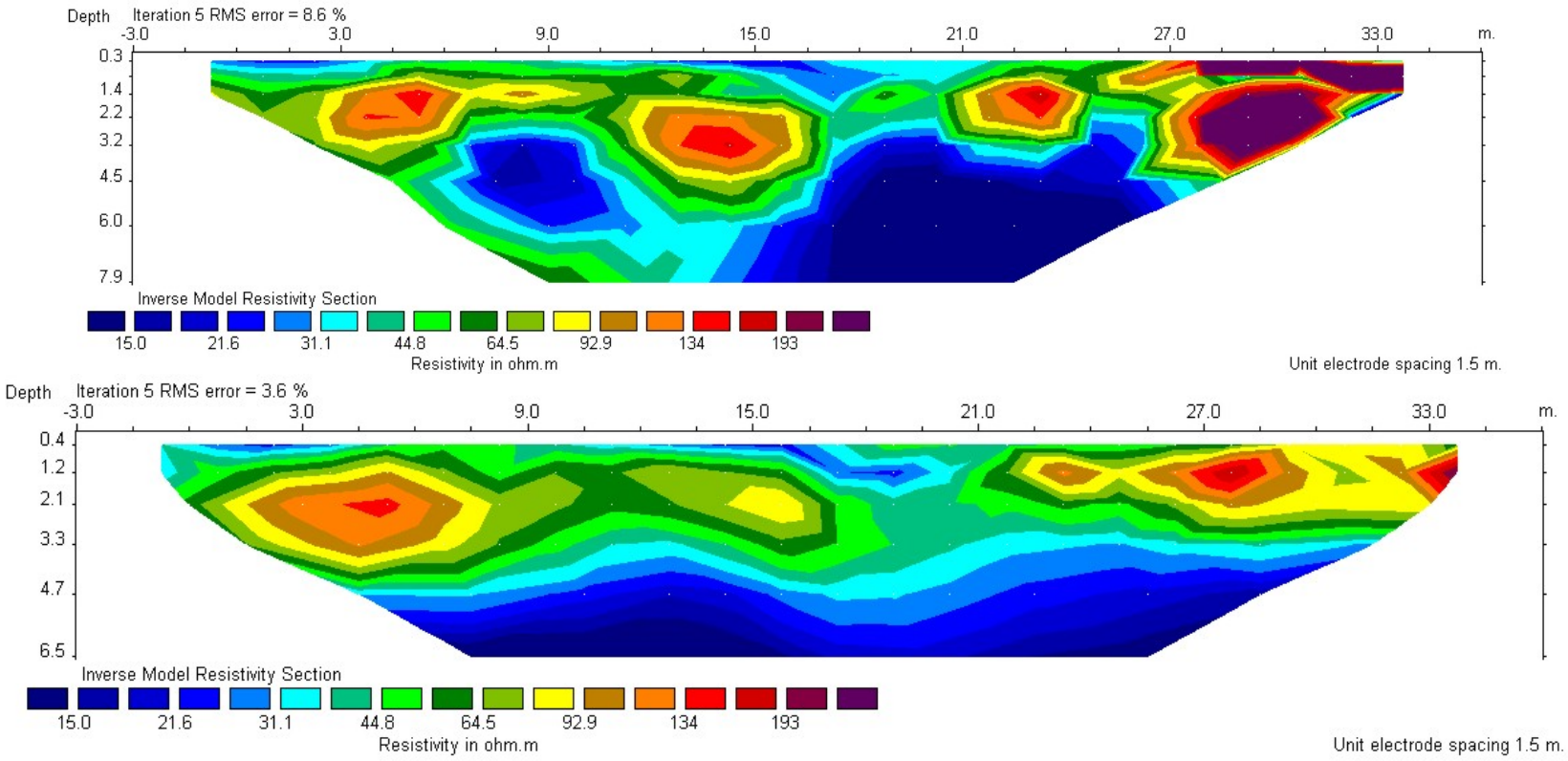
Περιοχές Β και Γ

Για κάθε γραμμή μελέτης παρουσιάζονται πρώτα τα αρχικά δεδομένα γεωραντάρ και στην συνέχεια η επεξεργασία τους για να είναι ευδιάκριτη η εικόνα. Όλες οι εικόνες προέκυψαν σύμφωνα με την επεξεργασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.

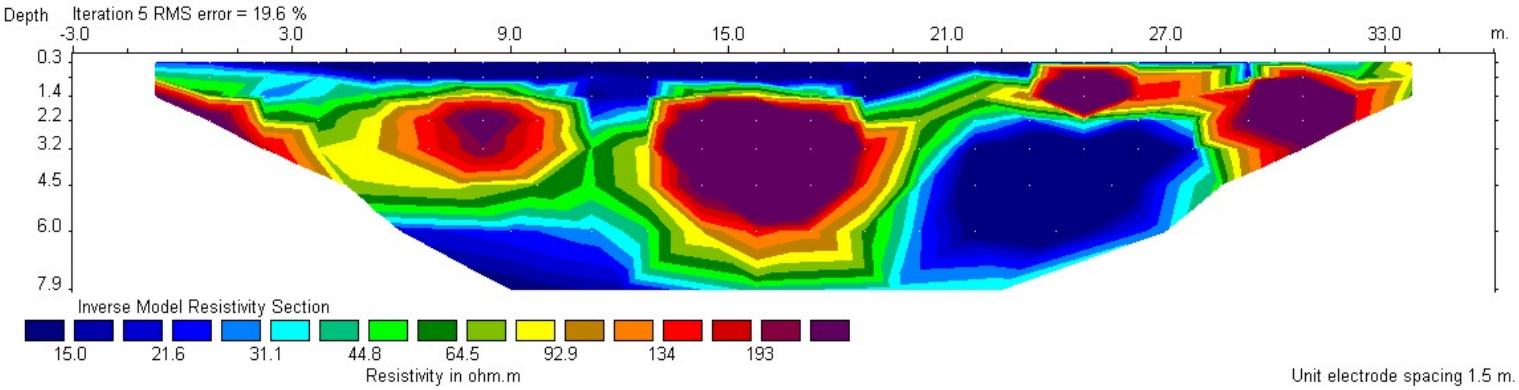
Παρατίθενται οι γεωηλεκτρικές τομές που πραγματοποιήθηκαν στις περιοχές Β και Γ. Χαρακτηριστικό στις γεωηλεκτρικές τομές αυτές είναι οι ζώνες με υψηλες αντιστάσεις (Σχήματα 5.19 – 5.20). Διακρίνεται ότι στα σημεία που υπάρχει μεγάλη αλλαγή στην αντίσταση, πιθανό να υπάρχει αλλαγή γεωλογικού στρώματος. Το πάνω όριο της ζώνης υψηλών αντιστάσεων εμφανίζεται και στις τομές γεωραντάρ (Σχήματα 5.21 - 5.31, άσπρη διακεκομμένη γραμμή) σε χρόνους 150 ns, που αντιστοιχούνε σε βάθη 1 - 1.5m καθώς και στις υπερθέσεις (Σχήματα 5.26 και 5.31). Επίσης σε όλες τις τομές γεωραντάρ διακρίνεται ότι μετά τα 150 ns περίπου αλλάζει η υφή των καταγραφών και πιο συγκεκριμένα αποσβένεται το υψίσυχνο σήμα του γεωραντάρ. Η απόσβεση του σήματος πιθανό να οφείλεται είτε στην ύπαρξη ρυπασμένης ζώνης είτε στην απότομη αλλαγή της αργιλότητας του εδάφους κάτω από τη συγκεκριμένη ζώνη και απαιτείται η διάνοιξη γεώτρησης και χημική ανάλυση των δειγμάτων του εδάφους για επαλήθευση.



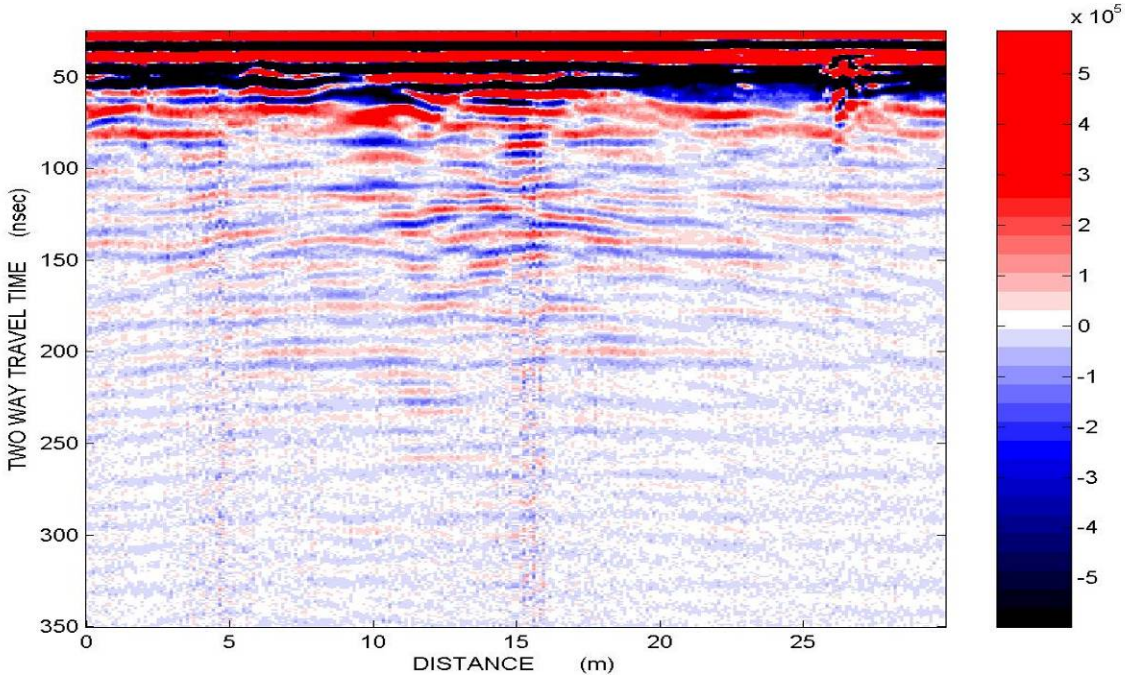
Σχήμα 5.18: Γραμμές μελέτης Περιοχών Β και Γ.



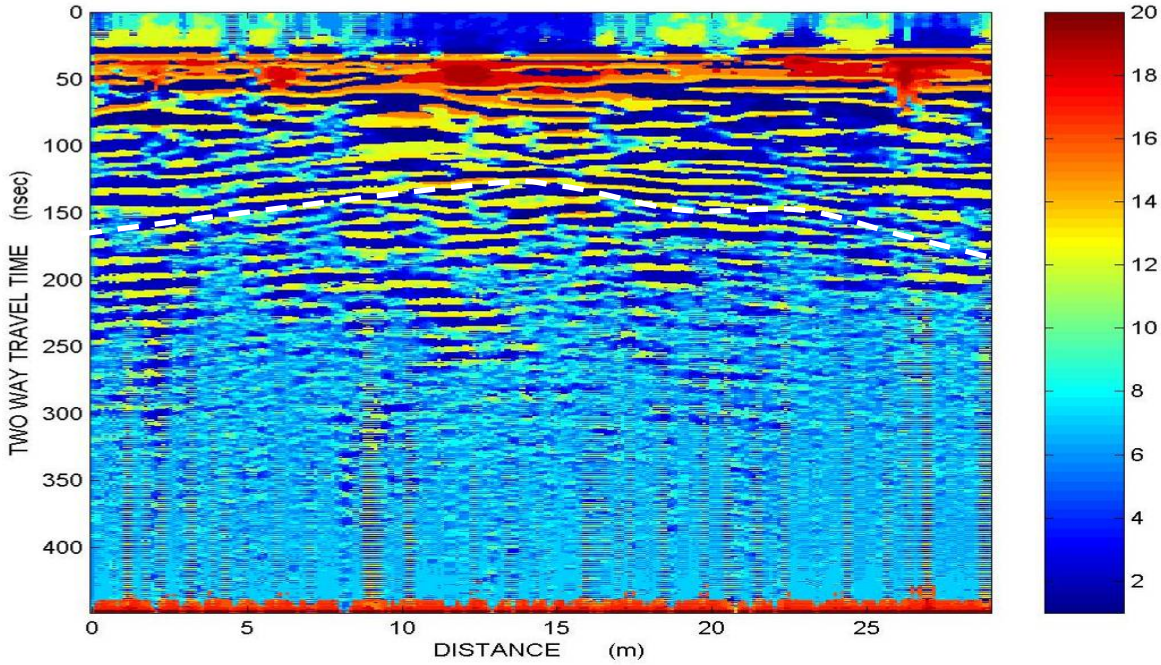
Σχήμα 5.19: Περιοχή Γ: Γεωηλεκτρικές τομές 01, με τη διάταξη διπόλου-διπόλου (επάνω) και 01 με διάταξη Wenner (κάτω) που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005.



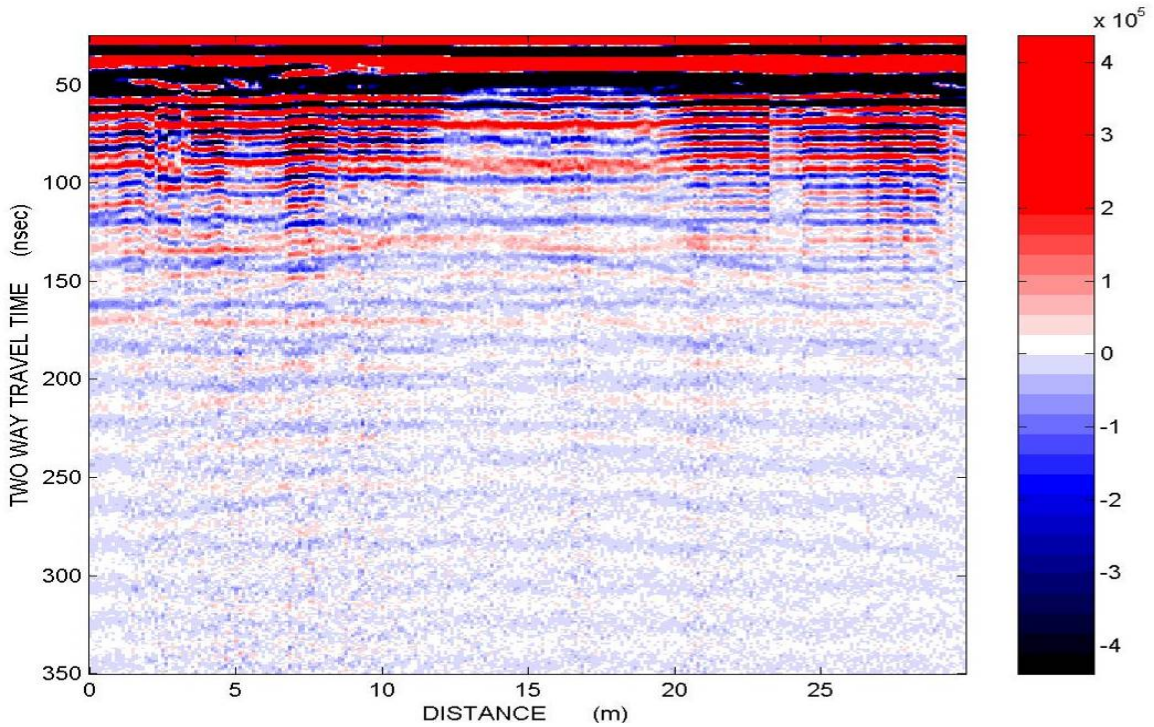
Σχήμα 5.20: Περιοχή Β: Γεωηλεκτρική τομή 01 που προέκυψε από την ηλεκτρική τομογραφία την περίοδο Νοεμβρίου 2005 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Οι γραμμές μελέτης έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



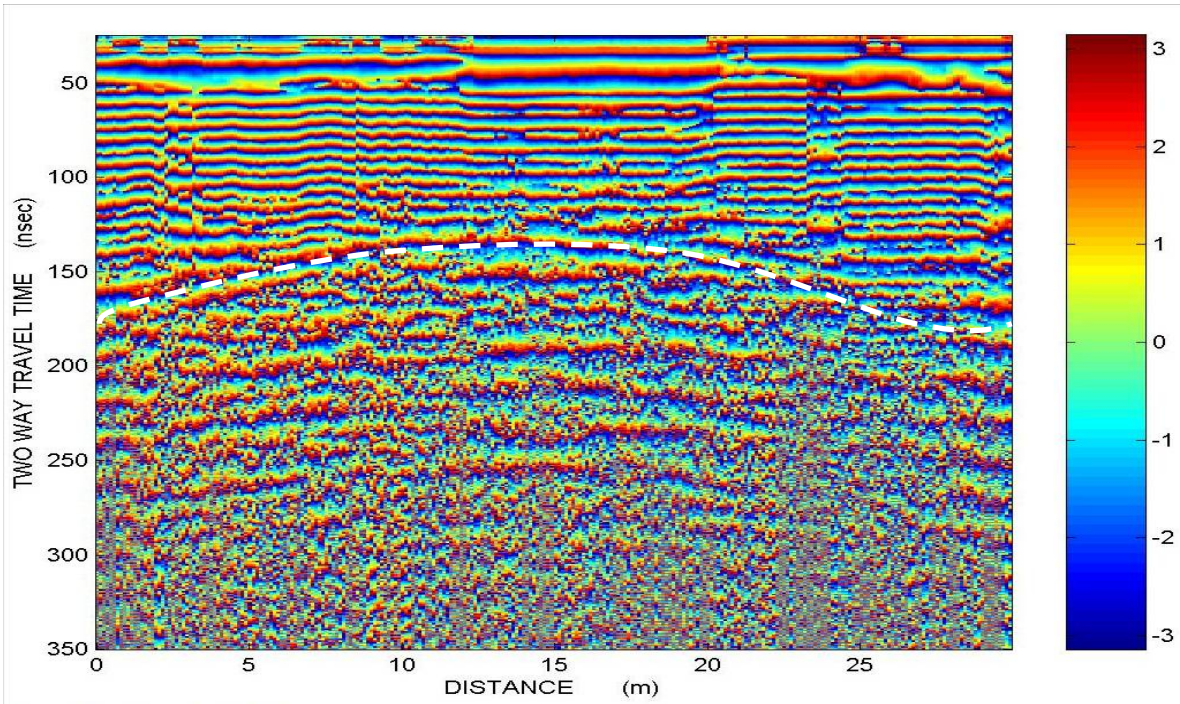
Σχήμα 5.21: Περιοχή Β: Τομή γεωραντάρ 02 (Αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



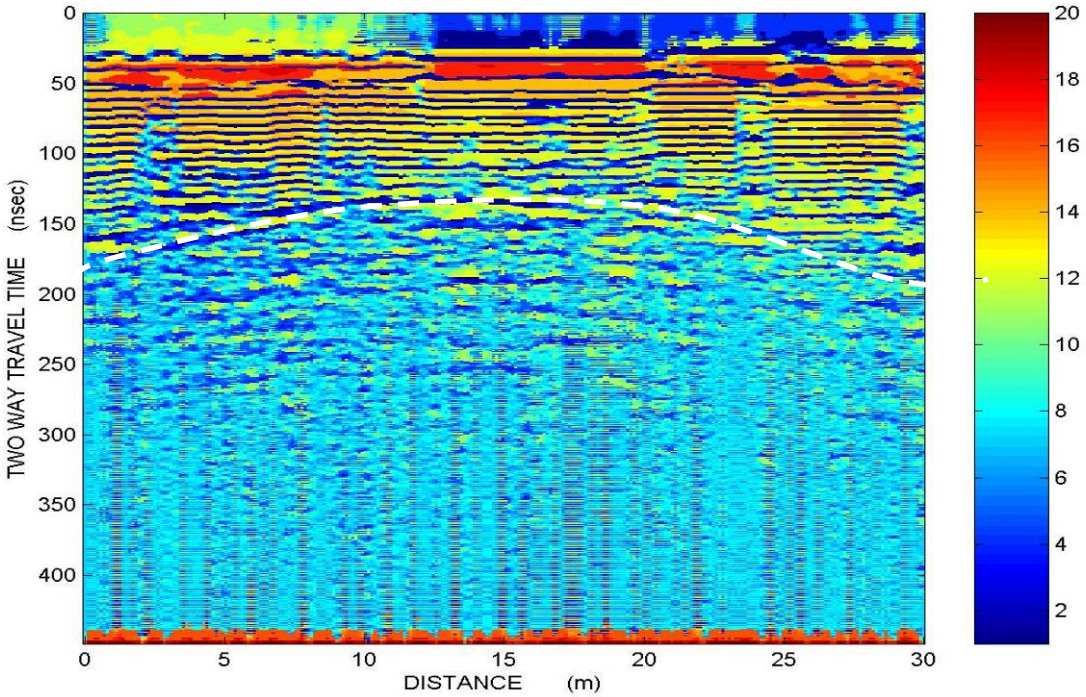
Σχήμα 5.22: Περιοχή Β: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 02. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 5.23: Περιοχή Β: Τομή γεωραντάρ 06 (Αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

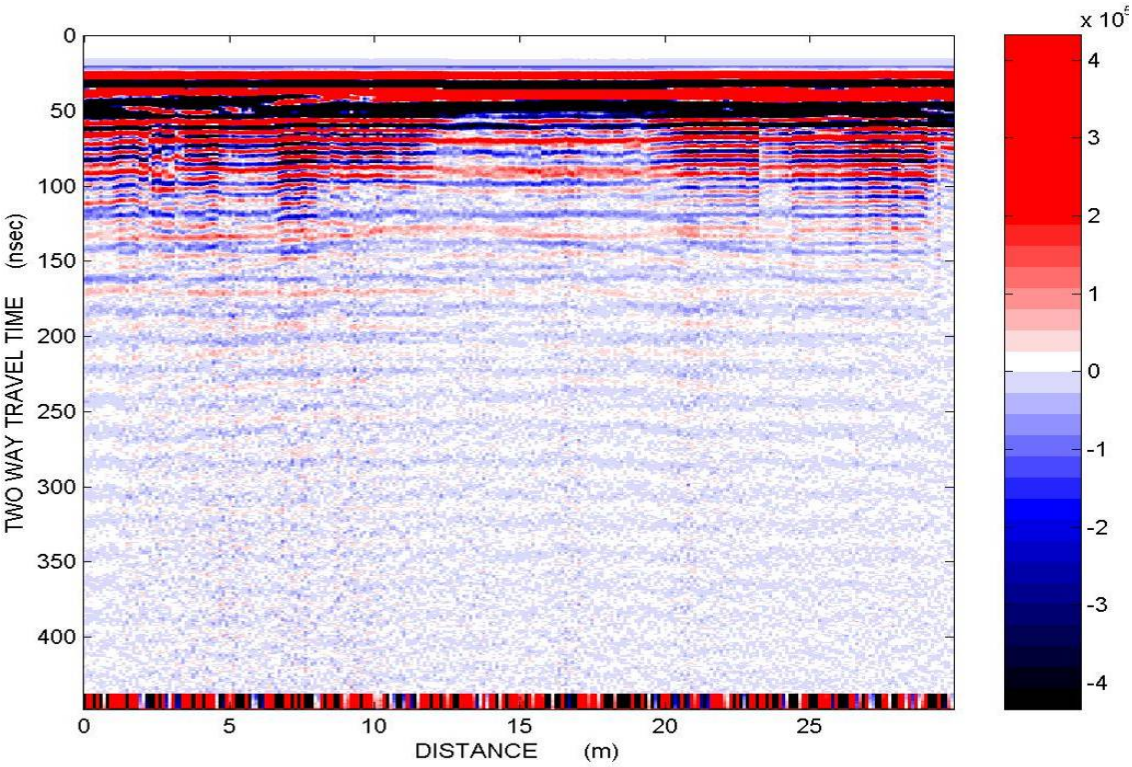


Σχήμα 5.24: Περιοχή Β: Τομή γεωραντάρ 06 (Στιγμιαία φάση). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

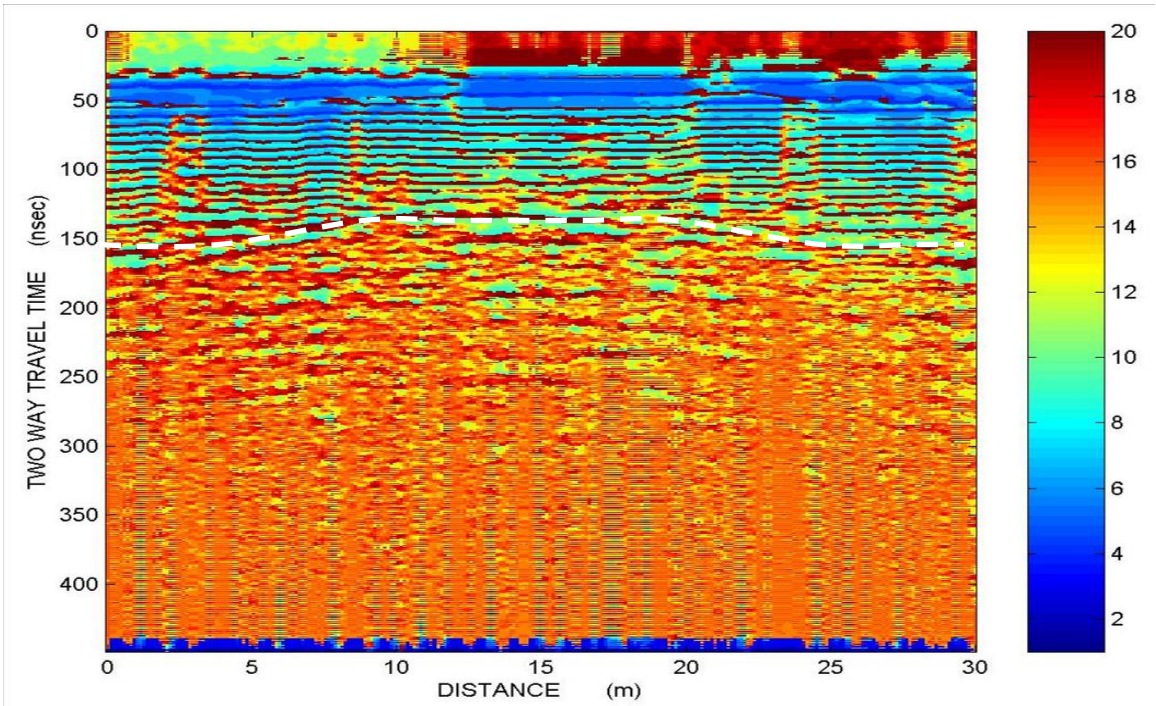


Σχήμα 5.25: Περιοχή Β: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 06. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

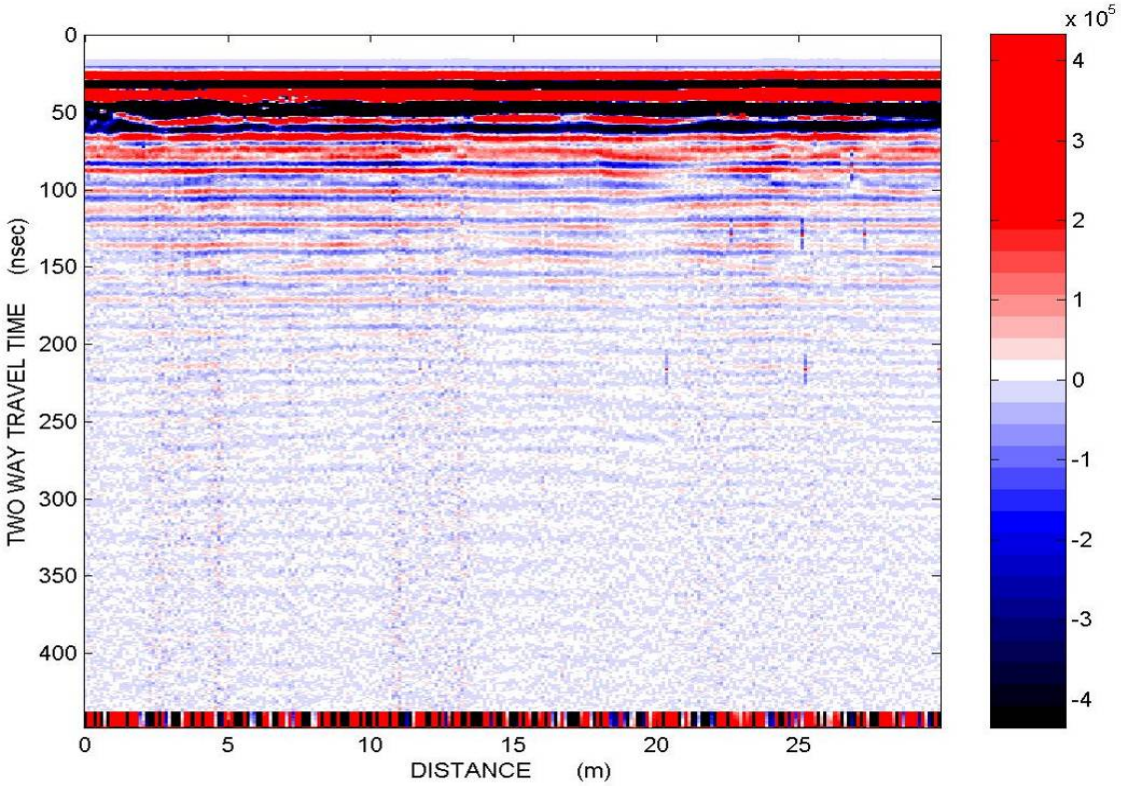
Σχήμα 5.26: Περιοχή Β: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με ταξινομημένη τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 04. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



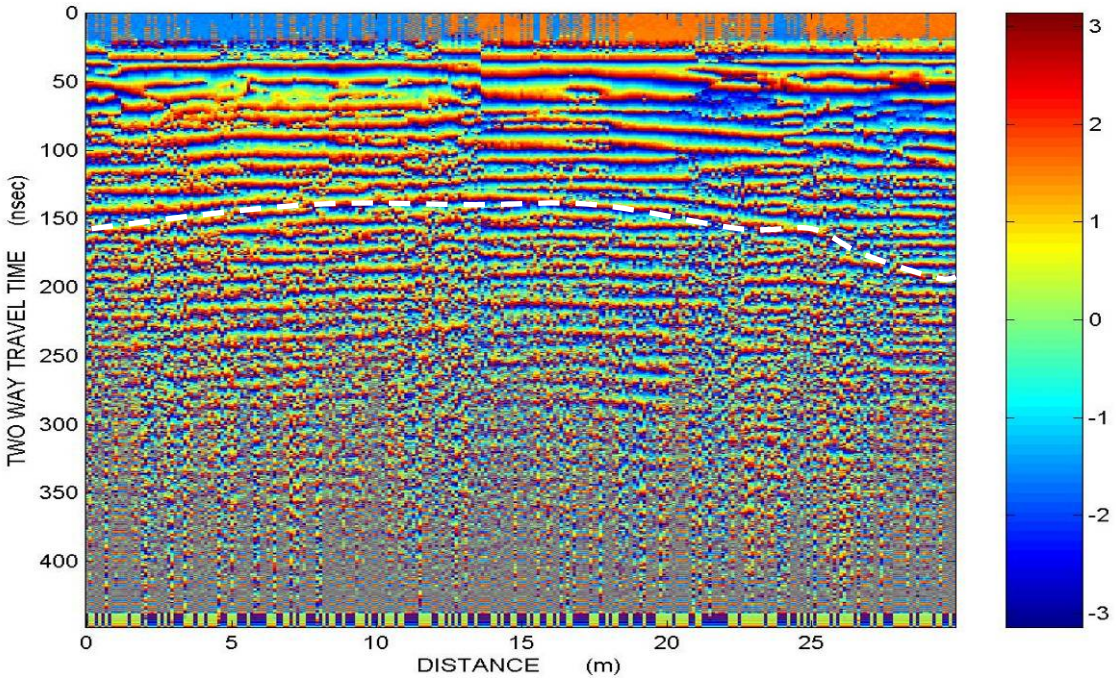
Σχήμα 5.27: Περιοχή Γ: Τομή γεωραντάρ 06 (Αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



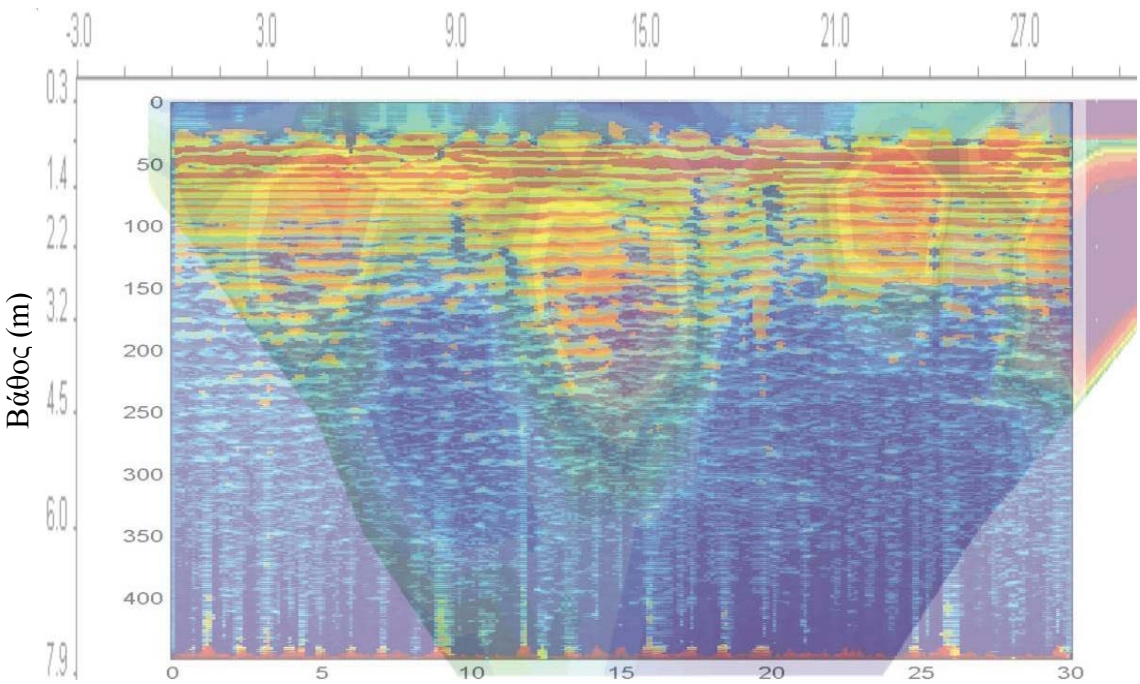
Σχήμα 5.28: Περιοχή Γ: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 06. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 5.29: Περιοχή Γ: Τομή γεωραντάρ 07 (Αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



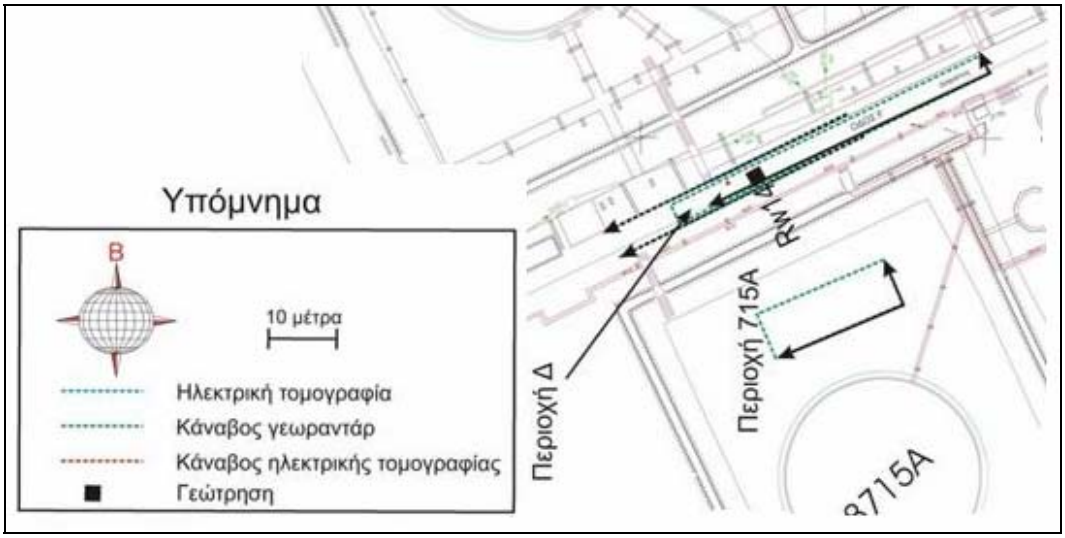
Σχήμα 5.30: Περιοχή Γ: Τομή γεωραντάρ 07 (Στιγμιαία φάση). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 5.31: Περιοχή Γ: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με ταξινομημένη τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 05. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

Περιοχή Δ

Στην γεώτρηση RW14 που βρίσκεται στην περιοχή Δ, παρατηρήθηκε στρώμα ελαιώδους φάσης σε βάθος 4 – 4,6 m, ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας εμφανίζεται στα 4,6 m. Η RW14 (με μωβ χρώμα) απέχει 20 m περίπου από την αρχή της γραμμής μελέτης 01 της ηλεκτρικής τομογραφίας και 37 m από την αρχή της γραμμής μελέτης 07 του γεωραντάρ (Σχήμα 5.32). Στη γεωηλεκτρική τομή 01 (Σχήμα 5.35) εμφανίζεται ζώνη υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ανωμαλία Δ1) η οποία αποδίδεται στο στρώμα της ελαιώδους φάσης. Αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη ζώνης χαμηλότερων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μέσα στην Δ1 στη θέση της γεώτρησης RW14 η οποία αποδίδεται στην διαδικασία απορρύπανσης (κώνος άντλησης της ελαιώδους φάσης). Η ζώνη χαμηλών αντιστάσεων που παρατηρείται σε βάθος μεγαλύτερο των 6m και σε οριζόντια απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης 20 – 30 m, αποδίδεται στην κορεσμένη σε νερό ζώνη. Από την υπέρθεση της γεωηλεκτρικής τομής 01 με τη τομή γεωραντάρ 08 (Σχήμα 5.36), κοντά στη γεώτρηση RW14 παρατηρείται διακοπή της συνέχειας του ανακλαστήρα στα 2 περίπου μέτρα βάθος που αντιστοιχεί στο πάνω όριο της ρυπασμένης ζώνης.

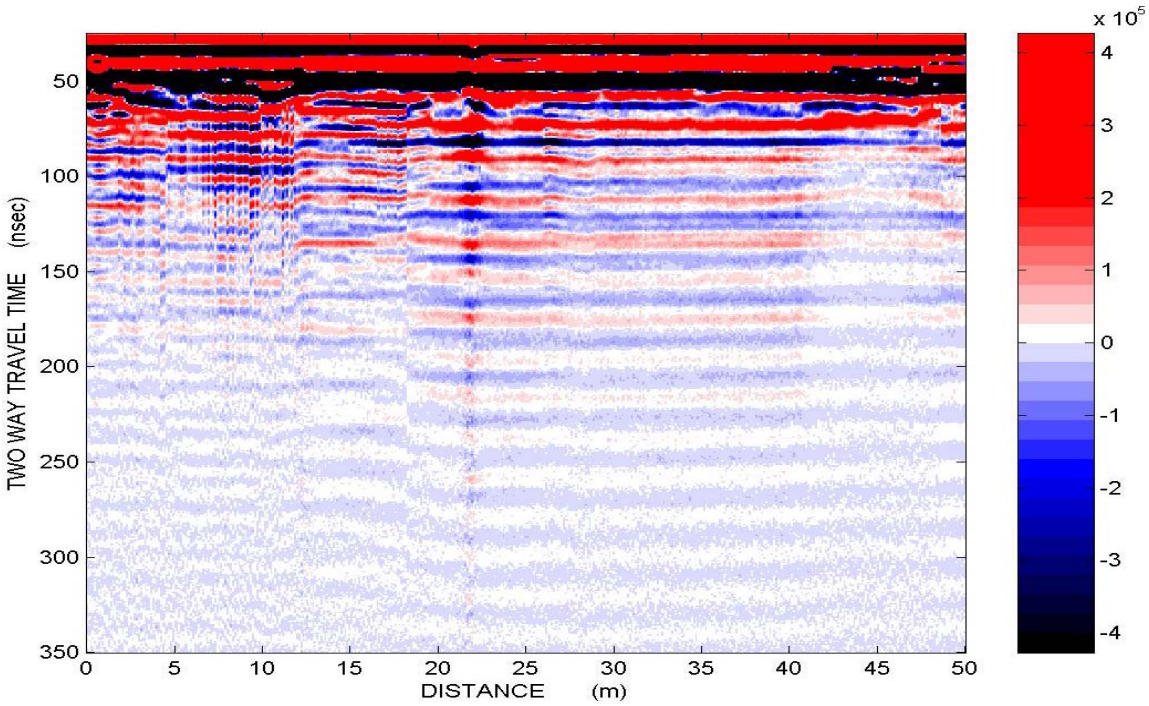


Σχήμα 5.32: Γραμμές μελέτης Περιοχής Δ και Περιοχής 715Α.

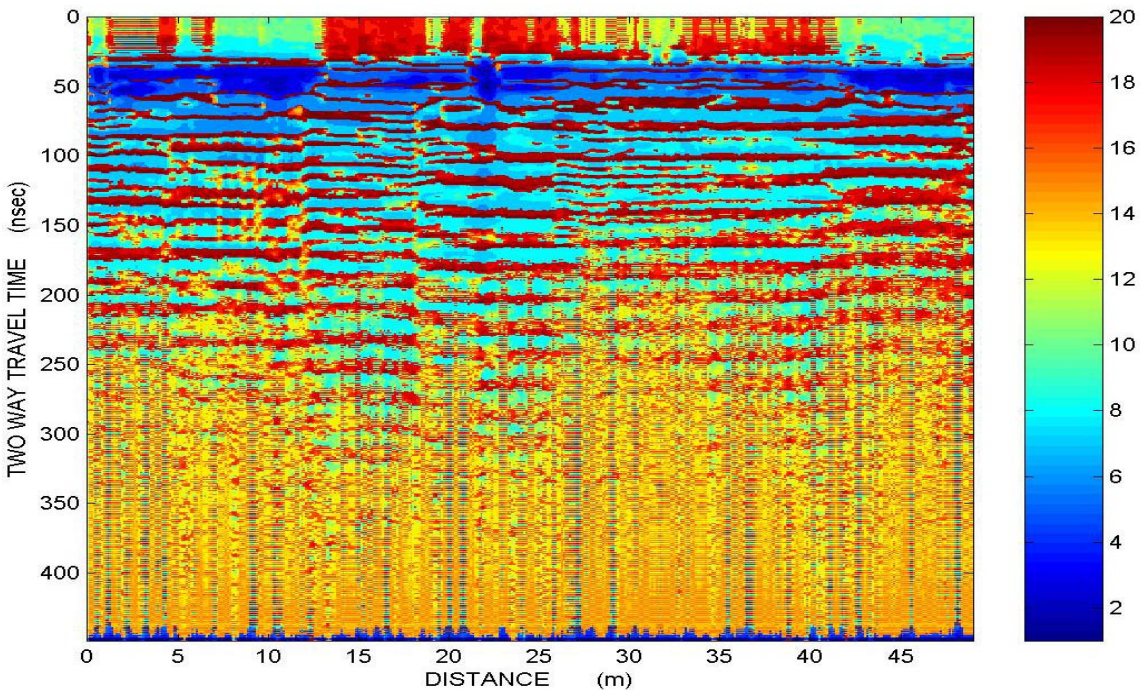
Στην ταξινομημένη τομή γεωραντάρ (Σχήμα 5.34) μετά την ομαδοποίηση παρατηρούνται δύο κύριες τάξεις (μπλε και κίτρινο χρώμα), η πρώτη αντιστοιχεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς που βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και η δεύτερη πιθανό στον υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης διακρίνεται ότι μετά τα 200 ns περίπου αλλάζει η υφή των καταγραφών και πιο συγκεκριμένα αποσβένεται το

υψίσυχνο σήμα του γεωραντάρ όπου και εμφανίζεται έντονα η οριοθέτηση του επιφανειακού στρώματος. Η απόσβεση του σήματος πιθανό να οφείλεται στην απότομη αύξηση της αργιλότητας του εδάφους κάτω από τη συγκεκριμένη ζώνη.

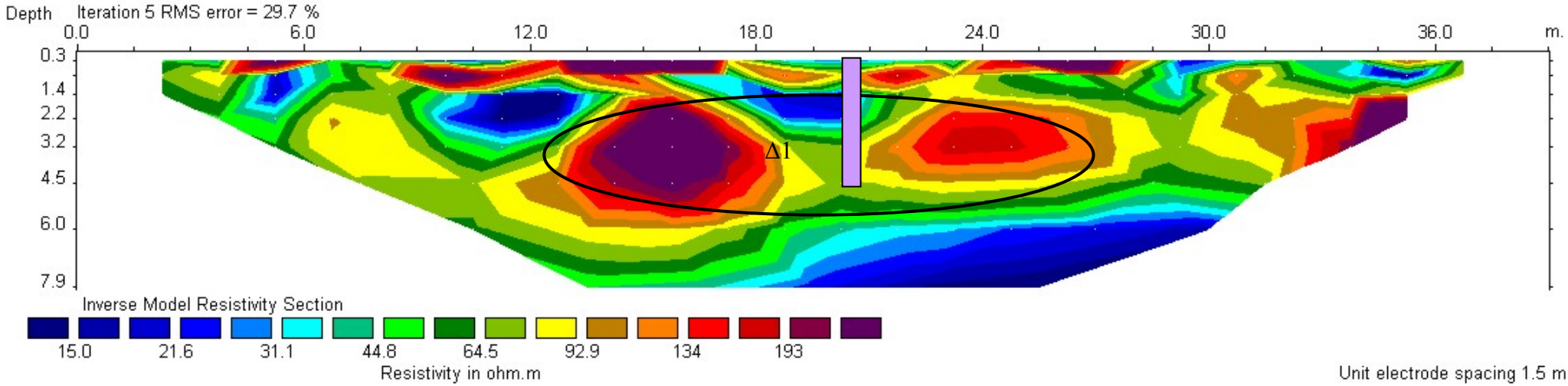
Στις τομές γεωραντάρ αυτής της περιοχής μελέτης παρατηρείται η ύπαρξη υψηλών τιμών θορύβου. Ο θόρυβος αυτός σχετίζεται με την ύπαρξη της ασφάλτου η οποία εγκλωβίζει την ενέργεια και δημιουργεί τις πολλαπλές ανακλάσεις. Λόγω της ασφάλτου το σήμα που προέρχεται από βαθύτερους ανακλαστήρες (π.χ υδροφόρο) είναι πολύ ασθενές και έτσι δεν ανιχνεύεται.



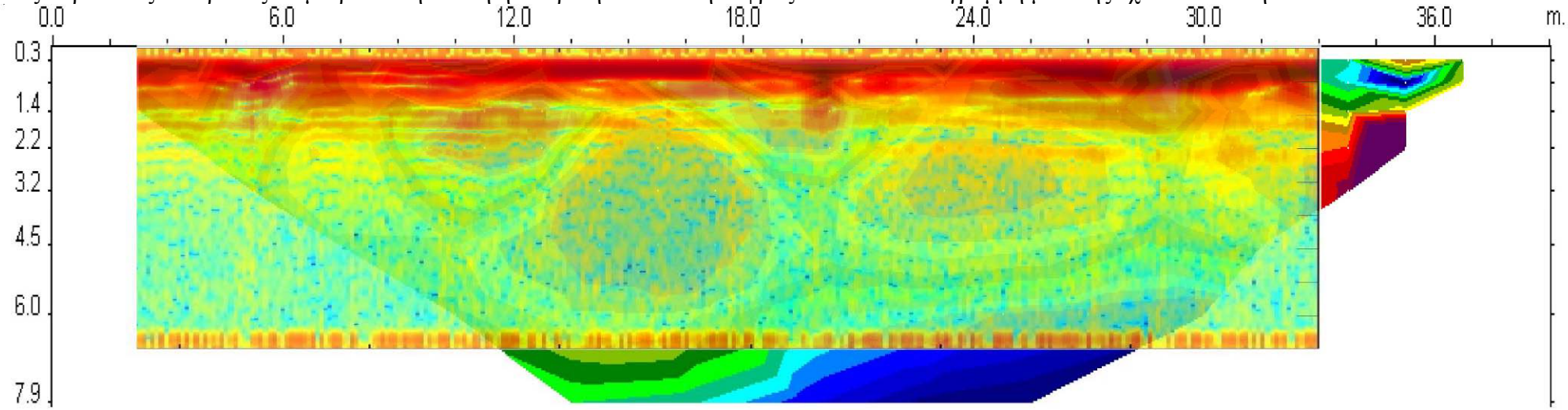
Σχήμα 5.33: Περιοχή Δ: Τομή γεωραντάρ 03 (αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.



Σχήμα 5.34: Περιοχή Δ: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 03. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.



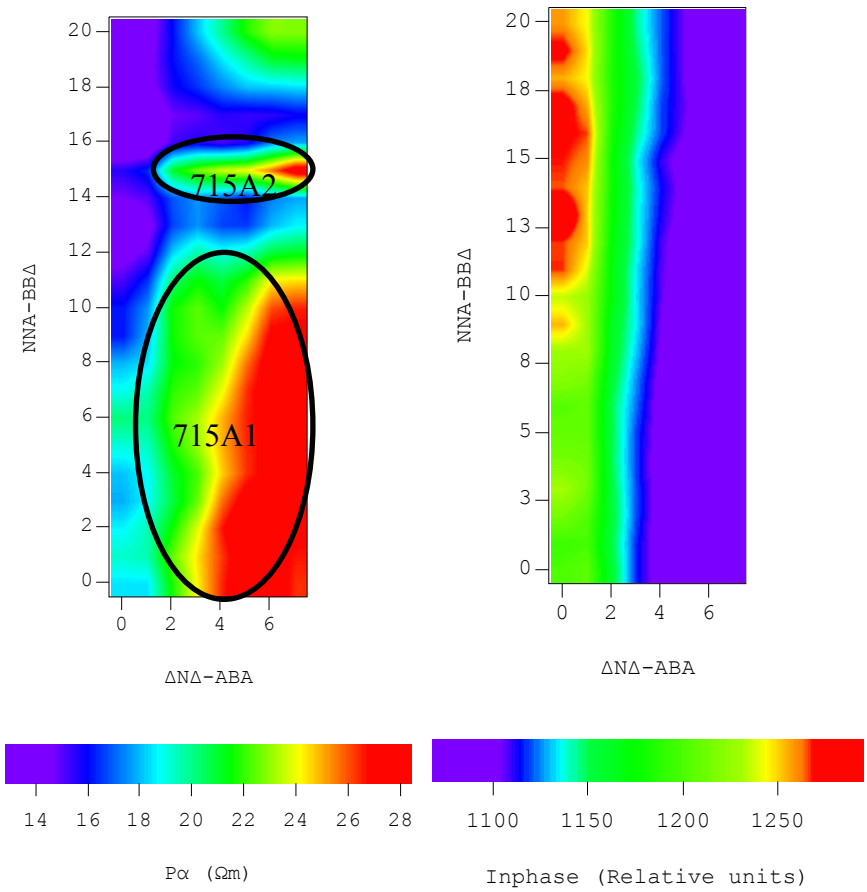
Σχήμα 5.35: Περιοχή Δ: Γεωηλεκτρική τομή 01 που προέκυψε από την ηλεκτρική τομογραφία με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος σε μέτρα και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ωm. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.



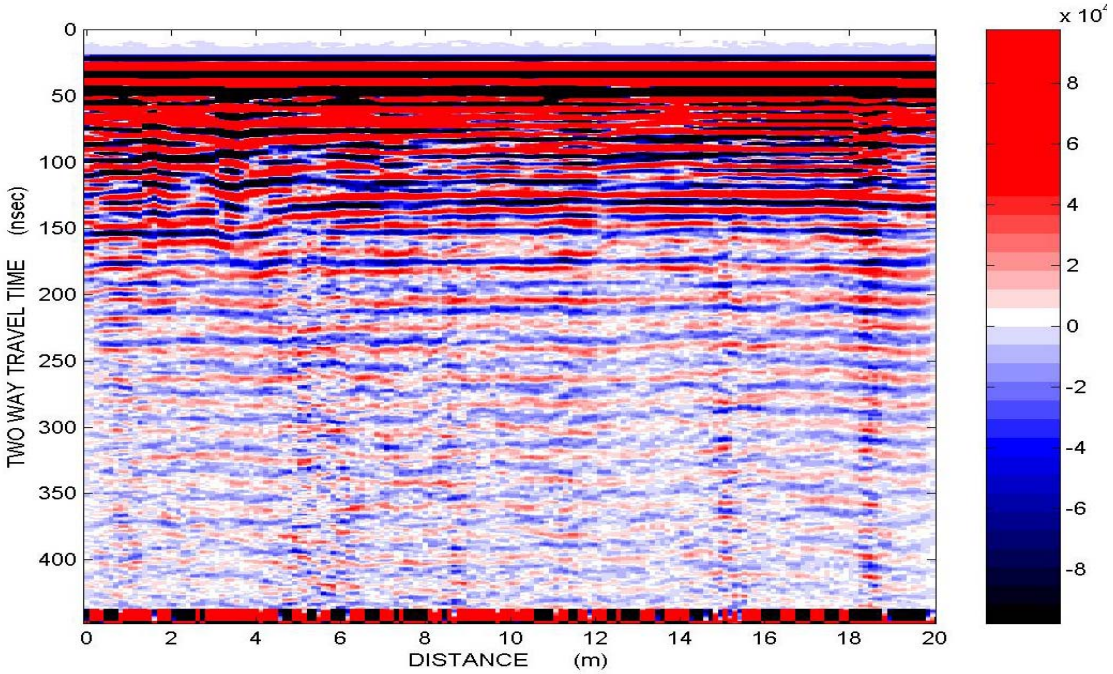
Σχήμα 5.36: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής 01 (περιοχή Δ) με τομή γεωραντάρ από τον μετασχηματισμό S (120 MHz). Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.

Περιοχή 715Α

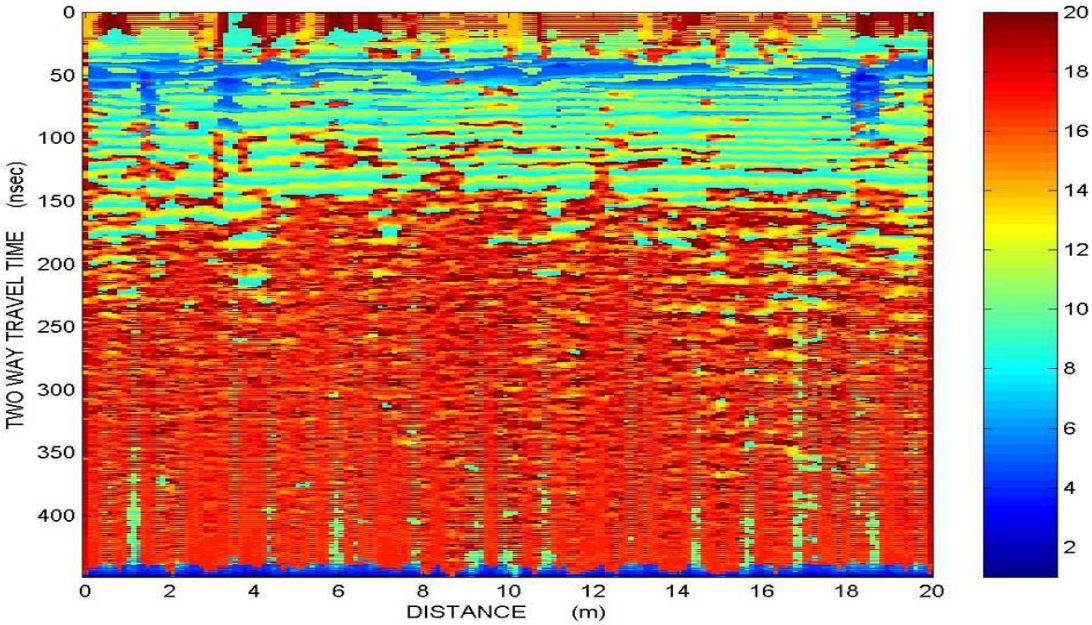
Στην περιοχή 715Α (Σχήμα 5.32) στο χάρτη ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 5.37) εμφανίζονται δύο ανωμαλίες 715Α1 και 715Α2 οι οποίες σχετίζονται με αυτές που παρατηρήθηκαν στη περιοχή Δ (στις γεωηλεκτρικές τομές που βρίσκονται βόρεια της 715Α). Στην ταξινομημένη τομή γεωραντάρ (Σχήμα 5.40) μετά την ομαδοποίηση παρατηρούνται δύο κύριες τάξεις. Η πρώτη αντιστοιχεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς που βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και η δεύτερη στον υδροφόρο ορίζοντα. Στην τομή γεωραντάρ του σχήματος 5.39 διακρίνεται ένας ανακλαστήρας στα 2 m (150 ns) ο οποίος πιθανό να οφείλεται στον υδροφόρο ορίζοντα ή στην ρυπασμένη ζώνη. Στην περιοχή αυτή ο υδροφόρος εμφανίζεται περίπου στα 2 m βάθος ενώ στην περιοχή Δ στα 4.6 m, πράγμα το οποίο οφείλεται στην διαφορά υψομέτρου της επιφάνειας του εδάφους στις δύο αυτές περιοχές.



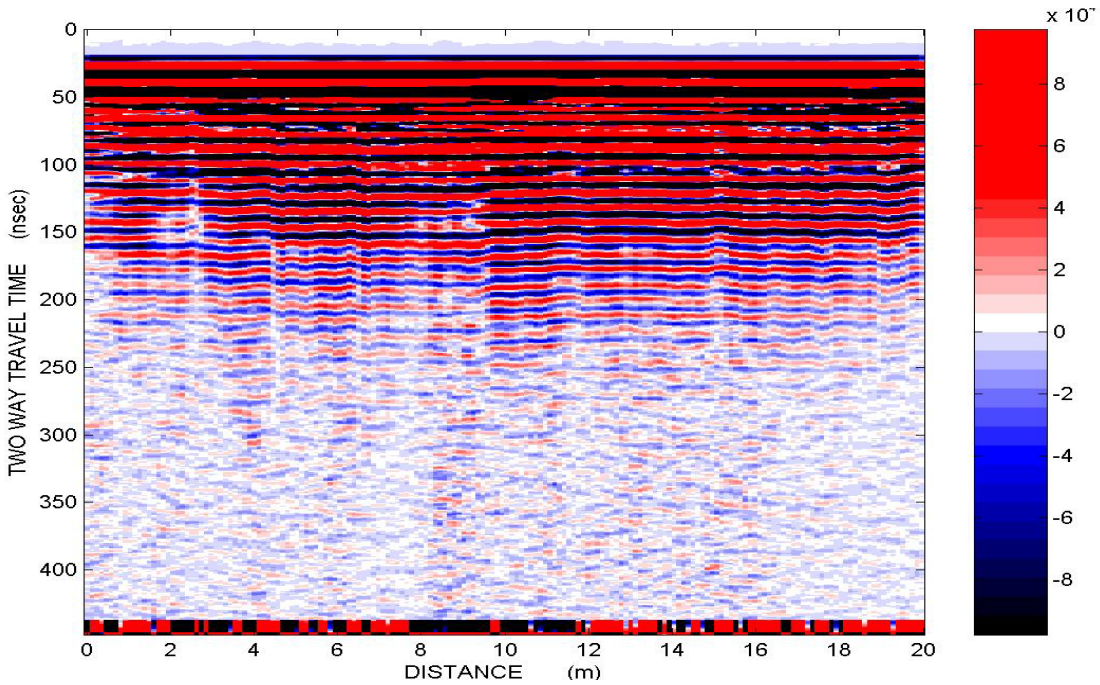
Σχήμα 5.37: Περιοχή 715Α: Χάρτες της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε Ωm (αριστερά) και της πραγματικής συνιστώσας του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, σε σχετικές μονάδες (δεξιά), όπως μετρήθηκαν τον Νοέμβριο 2005.



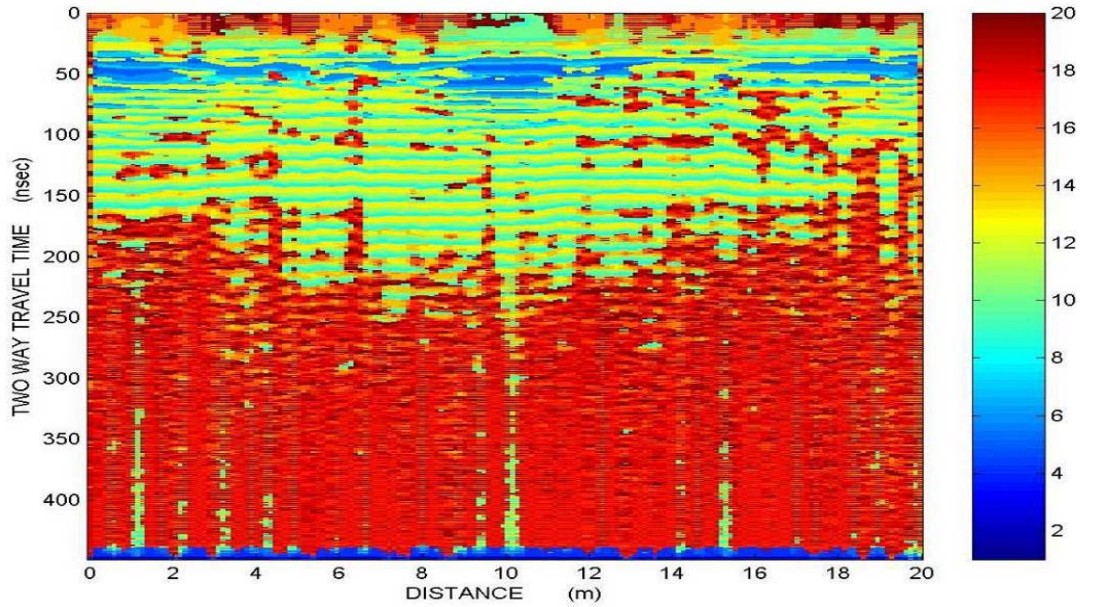
Σχήμα 5.38: Περιοχή 715Α: Τομή γεωραντάρ 00 (αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.



Σχήμα 5.39: Περιοχή 715Α: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 00. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.



Σχήμα 5.40: Περιοχή 715Α: Τομή γεωραντάρ 02 (αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.

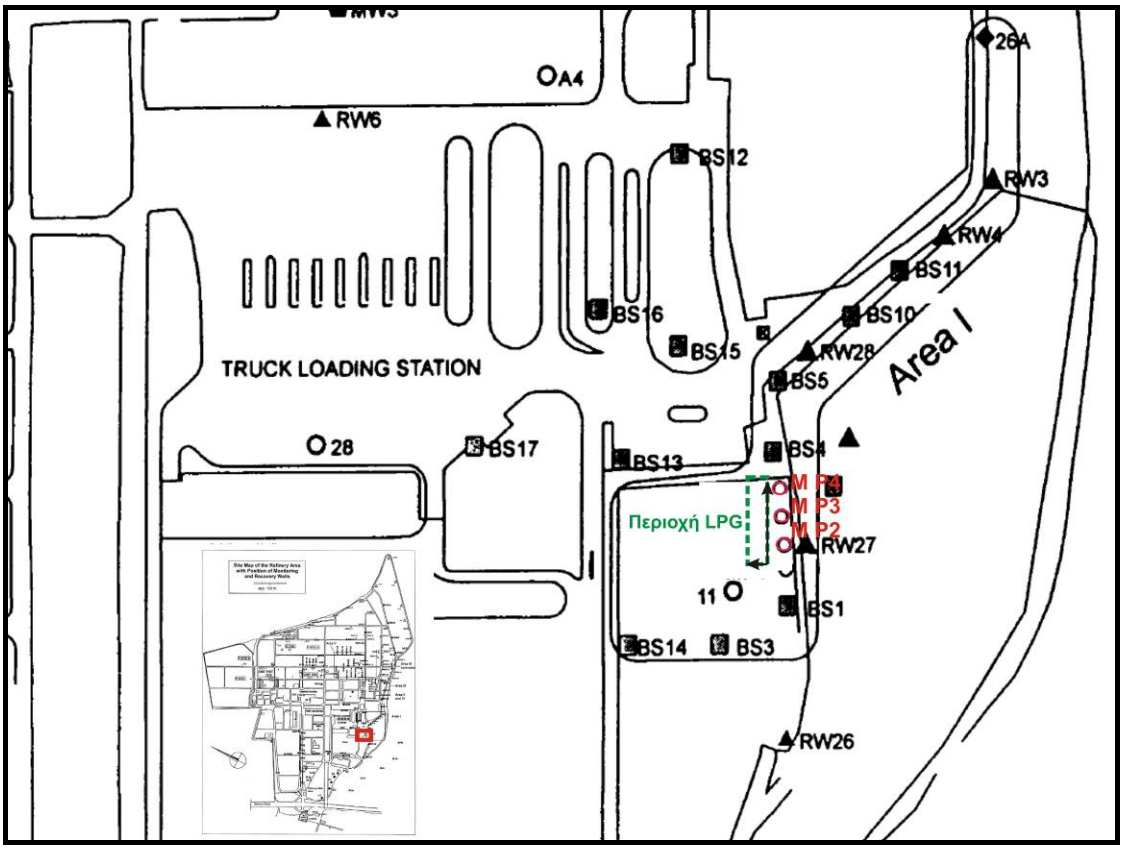


Σχήμα 5.41: Περιοχή 715Α: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 02. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.

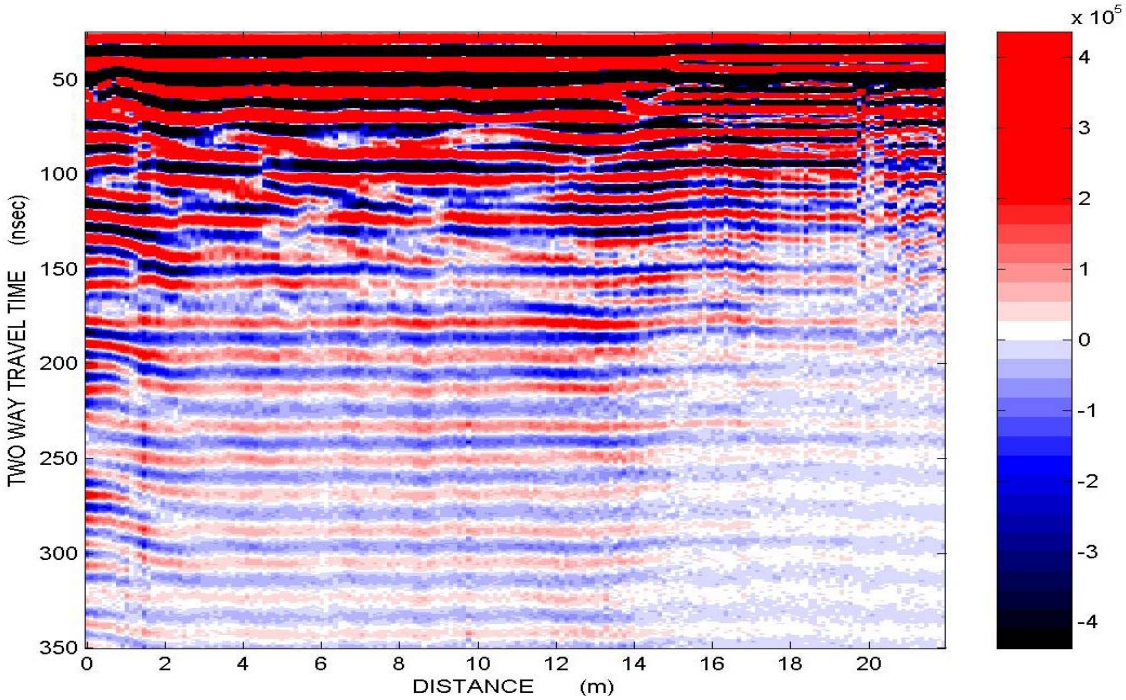
Περιοχή LPG

Για κάθε γραμμή μελέτης παρουσιάζονται πρώτα τα αρχικά δεδομένα γεωραντάρ και στην συνέχεια η επεξεργασία τους για να είναι ευδιάκριτη η εικόνα. Όλες οι εικόνες προέκυψαν σύμφωνα με την επεξεργασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.

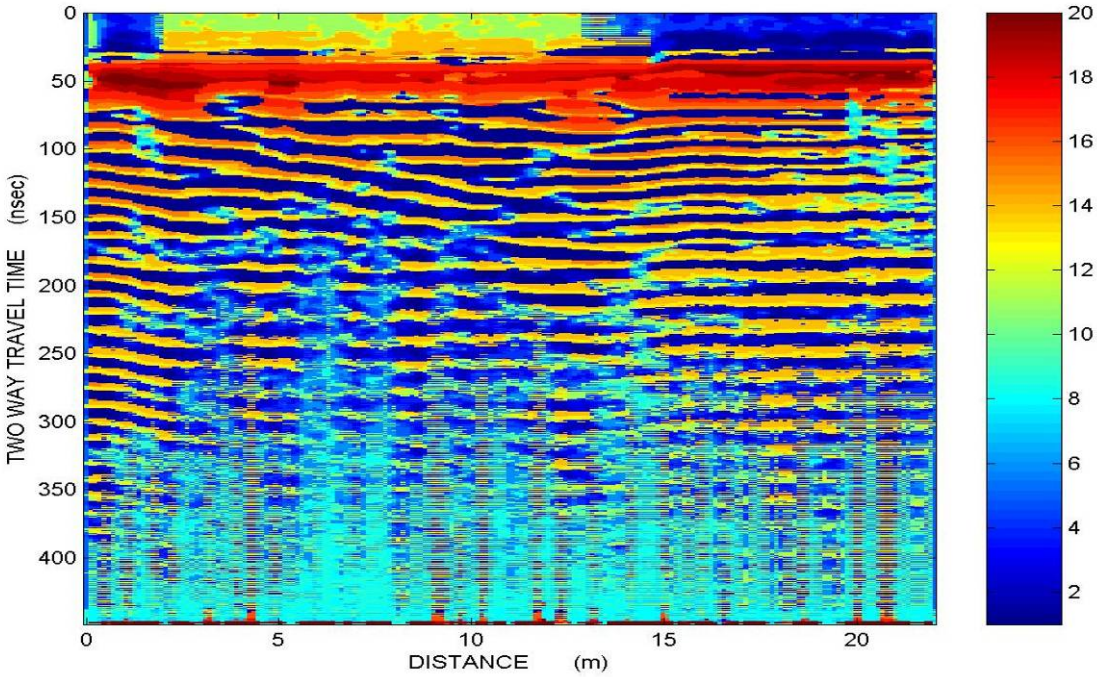
Στην περιοχή LPG (Σχήμα 5.42), βρίσκονται οι γεωτρήσεις MP1, MP2, MP3 και BS4 (Σχήμα 5.47). Ο υδροφόρος ορίζοντας εμφανίζεται σε βάθος περίπου 1,8 μέτρων. Στις παραπάνω γεωτρήσεις δεν παρατηρήθηκε στρώμα ελαιώδους φάσης. Από την υπέρθεση των γεωτρήσεων στην ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 06 (Σχήμα 5.48), παρατηρούνται δύο κύριες τάξεις ανάμεσα στις γεωτρήσεις MP2 και MP3. Η πρώτη αντιστοιχεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς που βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και η δεύτερη στον υδροφόρο ορίζοντα. Σημειώνεται ότι στις τομές γεωραντάρ δεν έγινε προσπάθεια για διόρθωση της υψομετρικής διαφοράς που εμφανίζεται στην περιοχή των μετρήσεων.



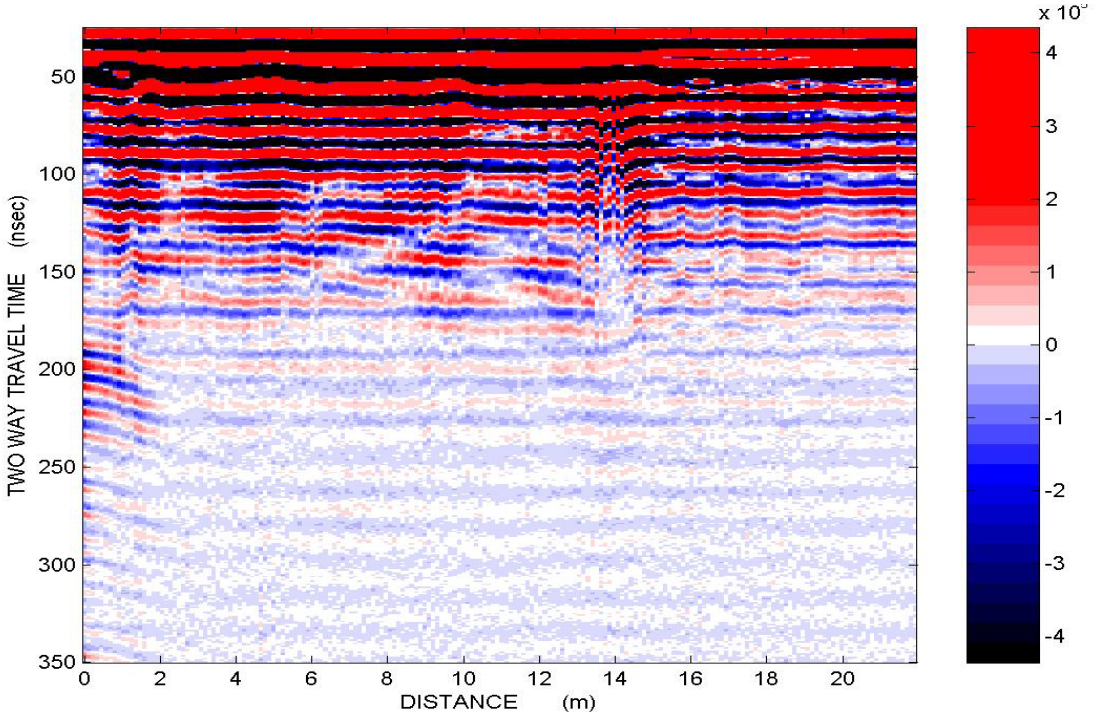
Σχήμα 5.42: Γραμμές μελέτης Περιοχή LPG.



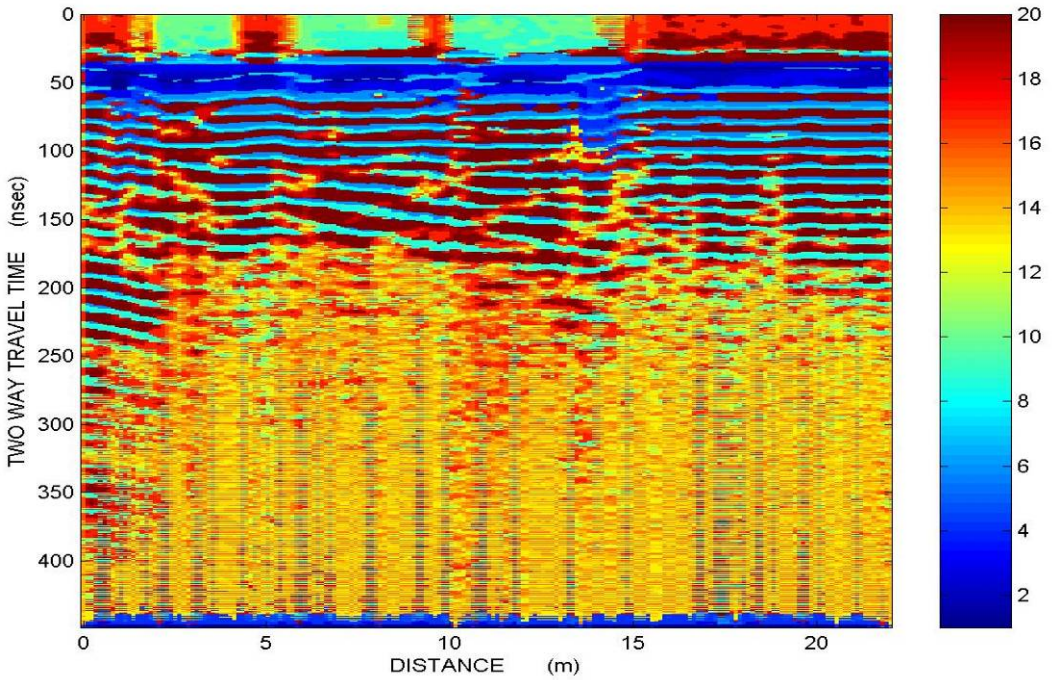
Σχήμα 5.43: Περιοχή LPG: Τομή γεωραντάρ 01 (αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



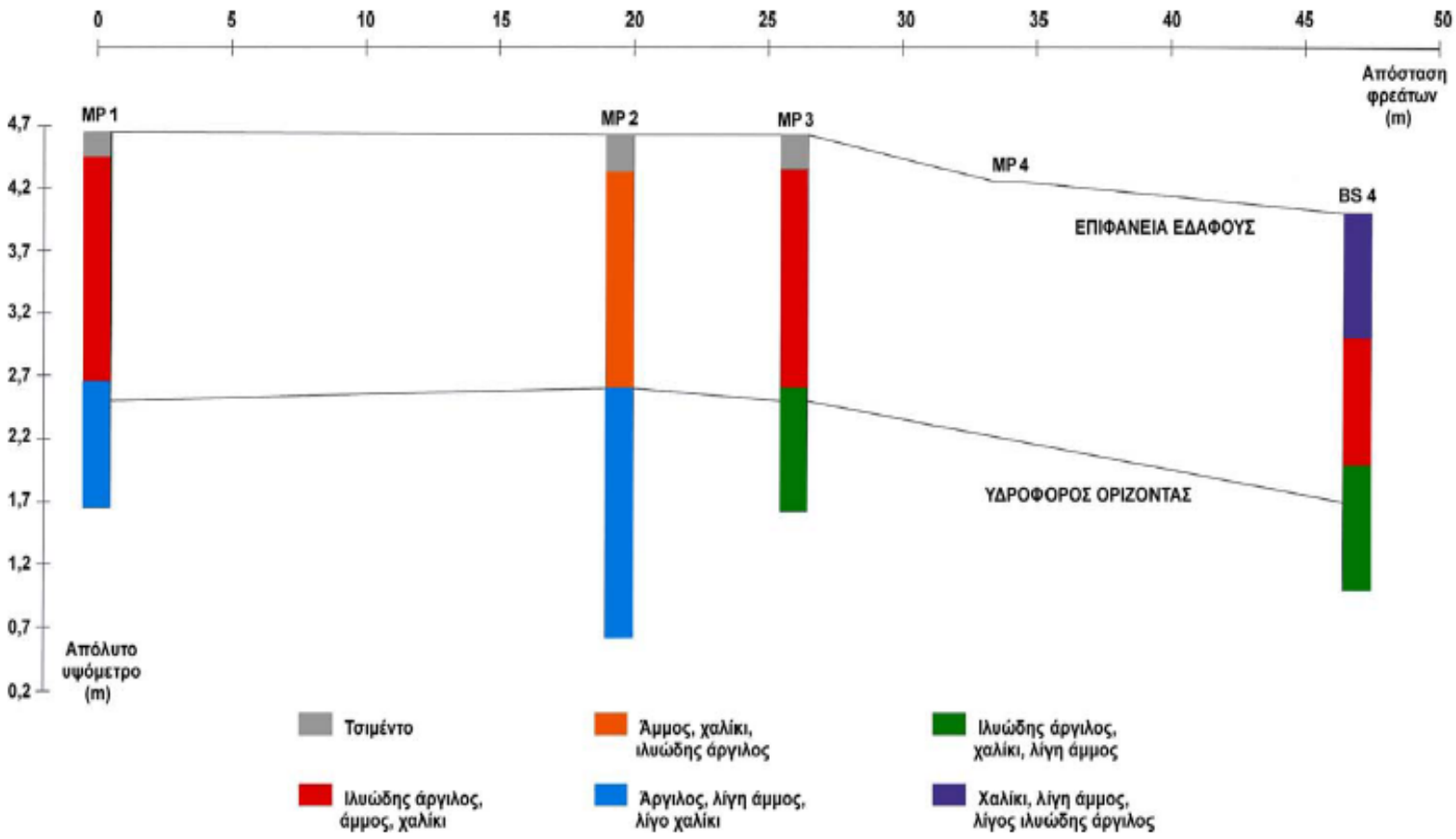
Σχήμα 5.44: Περιοχή LPG: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 01. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



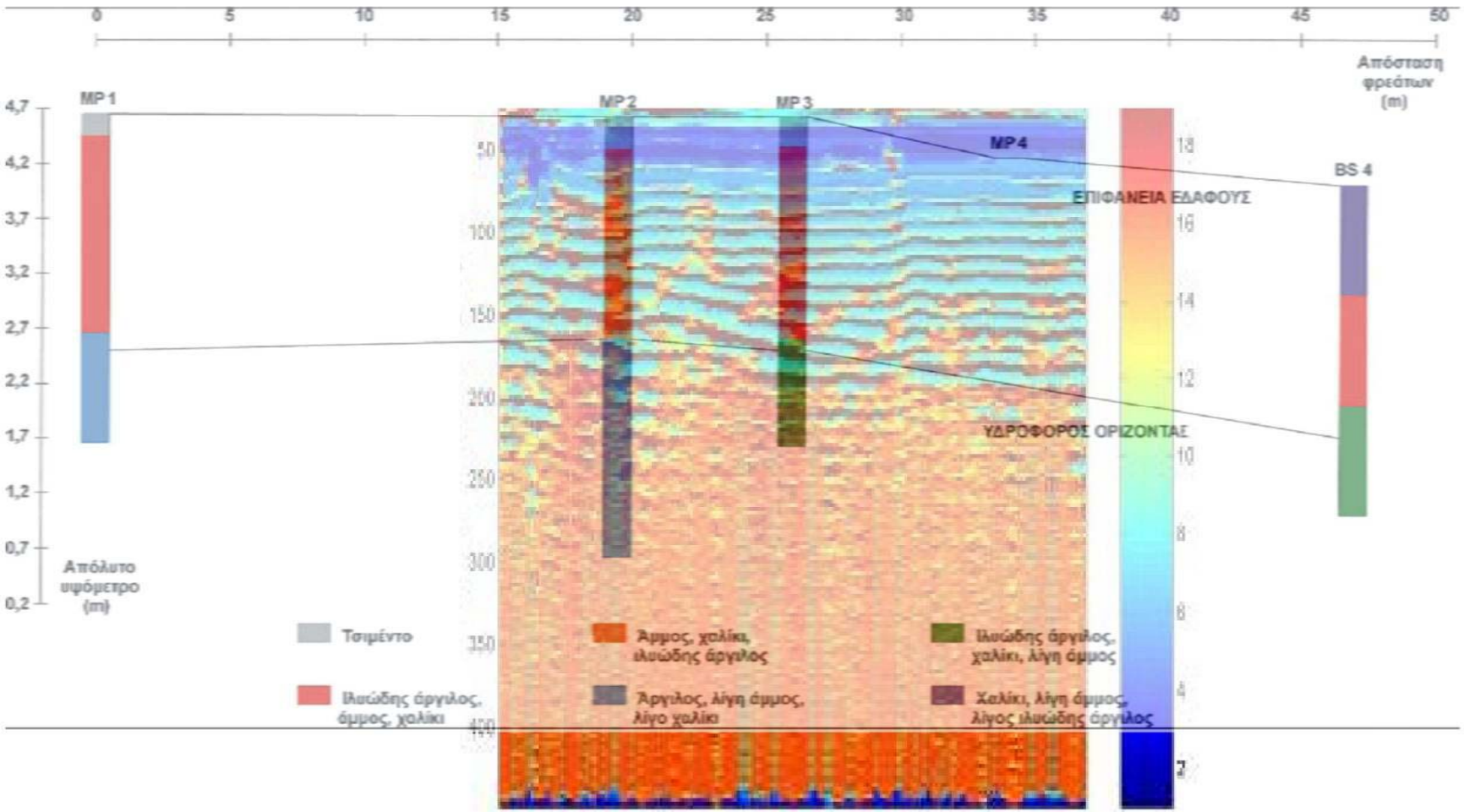
Σχήμα 5.45: Περιοχή LPG: Τομή γεωραντάρ 04 (αρχικά δεδομένα). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 5.46: Περιοχή LPG: Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 04. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 5.47: Περιοχή LPG: Περιγραφή των γεωτρήσεων MP1, MP, MP και BS4 (Αϊβαλιώτη, 2005).



Σχήμα 5.48: Περιοχή LPG: Υπέρθεση των γεωτρήσεων του σχήματος 5.37 και ταξινομημένης τομής γεωραντάρ 06. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1 Εισαγωγή

Στο τέλος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, γίνεται καταγραφή και αξιολόγηση των συμπερασμάτων που προκύπτουν για τη συμβολή του γεωραντάρ και της κατάλληλης επεξεργασίας των δεδομένων του, στην ανίχνευση ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών από υδρογονάνθρακες, καθώς και στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Ενώ παρατίθενται προτάσεις, που θα βοηθούσαν στη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών μεθόδων και στην ανάδειξη ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

6.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια, προκειμένου να αναδειχθεί και να καθιερωθεί ο ρόλος των γεωφυσικών μεθόδων στην ανίχνευση ρύπανσης του υπεδάφους από υδρογονάνθρακες, μέσα από την παρουσίαση γεωφυσικών περιβαλλοντικών μελετών. Η αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στη μελέτη περιβαλλοντικών προβλημάτων εξαρτάται από το πόσο έντονα διαφοροποιούνται οι φυσικές ιδιότητες των εδαφικών και γεωλογικών σχηματισμών με και χωρίς ρύπανση.

Η συνδυασμένη εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης πλεονεκτεί, καθώς με τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων από την καθεμία ξεχωριστά, προκύπτουν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Αυτό οφείλεται στο ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι επηρεάζονται από διαφορετικές, αντίστοιχα, φυσικές ιδιότητες των εδαφών και πετρωμάτων.

Ακολουθώντας την παραπάνω λογική του συνδυασμού διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, συμπεραίνεται, ότι για την 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 στη γεωφυσική έρευνα. Έτσι, γίνεται κατανοητό, ότι το γεωραντάρ απεικονίζει δεδομένα σε λίγα μέτρα βάθος, ενώ για την απεικόνιση του υπεδάφους σε μεγαλύτερο βάθος 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 στοιχεία των γεωτρήσεων.

Σε οποιαδήποτε διασκόπηση, σημαντική είναι η συμβολή του δίκτυου 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 χημική ανάλυση δειγμάτων νερού και εδάφους είναι επιβεβλημένη για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση πιθανών ζωνών ρύπανσης.

Όπως προαναφέρθηκε, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή της κατάλληλης επεξεργασίας στις αρχικές καταγραφές του γεωραντάρ, για τη βέλτιστη ερμηνεία τους και την εύκολη σύγκρισή τους με τα δεδομένα άλλων γεωφυσικών μεθόδων, κυρίως της ηλεκτρικής τομογραφίας. Ενώ η συνήθης πρακτική είναι η κατά το δυνατόν λιγότερη επεξεργασία των αρχικών καταγραφών, κρίθηκε απαραίτητη η αλλεπάλληλη εφαρμογή πολλών διαφορετικών φίλτρων, καθώς επίσης και η ταξινόμηση των δεδομένων, η οποία αποτελεί μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία (απαιτούνται 3 ώρες για κάθε εικόνα).

Συνολικά, πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα του γεωραντάρ πληθώρα συνδυασμών φίλτρων, ενισχύσεων κ.λ.π., μέχρι τελικά να επιλεγεί αυτός, ο οποίος δίνει την βέλτιστη ευκρίνεια στις εικόνες.

Το τελικό στάδιο της εργασίας περιλαμβάνει την υπέρθεση και τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων από την καθεμία γεωφυσική μέθοδο ξεχωριστά και με τα στοιχεία από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις, για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Κατά τη γεωφυσική διασκόπηση και τις γεωτρήσεις που διεξήχθησαν στην περιοχή του Ασπροπύργου, η ερμηνεία οδηγεί στην υπόδειξη κάποιων πιθανών ρυπασμένων ζωνών, τόσο επιφανειακά, όσο και σε μεγαλύτερα βάθη. Από το συνδυασμό των γεωφυσικών δεδομένων με τα στοιχεία από τις γεωτρήσεις προέκυψε, ότι οι ανακλαστήρες που εμφανίζονται στις τομές γεωραντάρ απεικονίζουν εναλλαγές λεπτών εδαφικών στρωμάτων διαφορετικής αργιλότητας. Πιο αναλυτική ερμηνεία απαιτεί λεπτομερή γεωλογική περιγραφή των εδαφικών δειγμάτων από τις γεωτρήσεις.

Χαμηλή ρύπανση παρατηρείται στη γεώτρηση Α στην περιοχή Α, όπου εμφανίζεται ζώνη υψηλών ζειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στη γεωηλεκτρική

τομή 18. Στις Περιοχές Β και Γ διακρίνεται σε όλες τις τομές γεωραντάρ ότι μετά τα 150 ns περίπου αλλάζει η υφή των καταγραφών και πιο συγκεκριμένα αποσβένεται το υψίσυχνο σήμα του γεωραντάρ. Η απόσβεση του σήματος πιθανό να οφείλεται είτε στην ύπαρξη ρυπασμένης ζώνης είτε στην απότομη αλλαγή της αργιλότητας του εδάφους κάτω από τη συγκεκριμένη ζώνη και απαιτείται η διάνοιξη γεώτρησης και χημική ανάλυση των δειγμάτων του εδάφους για επαλήθευση.

Στην γεώτρηση RW14 που βρίσκεται στην περιοχή Δ, παρατηρήθηκε στρώμα ελαιώδους φάσης σε βάθος 4 – 4,6 m. Σε γεωηλεκτρική τομή που πραγματοποιήθηκε στην ίδια περιοχή εμφανίζεται ζώνη υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία αποδίδεται στο στρώμα της ελαιώδους φάσης. Αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη ζώνης χαμηλότερων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μέσα στην Δ1 στη θέση της γεώτρησης RW14 η οποία αποδίδεται στην διαδικασία απορρύπανσης (κώνος άντλησης της ελαιώδους φάσης). Επίσης ταξινομημένη τομή γεωραντάρ από την περιοχή 715Α διακρίνεται ένας ανακλαστήρας στα 2 m (150 ns) ο οποίος πιθανό να οφείλεται στον υδροφόρο ορίζοντα ή στην ρυπασμένη ζώνη.

Όσο αφορά στη συμβολή της γεωφυσικής διασκόπησης στο γεωλογικό χαρακτηρισμό του υπό μελέτη χώρου, αυτή κρίνεται πρωταρχικής σημασίας. Η μέθοδος του γεωραντάρ εντόπισε στο επιφανειακό αργιλικό στρώμα, εναλλαγές λεπτών εδαφικών στρωμάτων διαφορετικής αργιλότητας, καθώς και τον υδροφόρο ορίζοντα.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης απεικόνισε το υπέδαφος σε μεγαλύτερα βάθη, την παρουσία νερού στους σχηματισμούς και τον κώνο άντλησης των ρύπων από το υπέδαφος. Από τις καταγραφές επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη ενός υπερκείμενου στρώματος με αμμώδη άργιλο και του υποκείμενου στρώματος με ιλυώδη άργιλο. Ενδιάμεσά τους εμφανίζονται οι εναλλαγές εδαφικών στρωμάτων διαφορετικής αργιλότητας, όπου και παρουσιάζεται αύξηση της αργιλότητας σε σχέση με το βάθος.

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. Προέκυψαν, 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 υδροφορέα. Επομένως ο συνδυασμός των μεθόδων κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμος, δε μπορεί όμως να αποτελέσει κανόνα για το τι συμβαίνει στην περιοχή και καθιστά

απαραίτητες τις επιπρόσθετες ενέργειες βελτιστοποίησης της έρευνας. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται παρακάτω προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

6.3 Προτάσεις

Με την επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ διαπιστώνεται ότι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου για ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις εδαφικές συνθήκες (αργιλότητα). Συνεπώς, το γεωραντάρ καθίσταται χρήσιμο εργαλείο συλλογής και ερμηνείας δεδομένων, διαρκώς εξελισσόμενο και με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών και δυνατοτήτων. Σημαντικό στοιχείο είναι επίσης, η ποιότητα των αρχικών καταγραφών, καθώς και ο σωστός σχεδιασμός των διασκοπήσεων. Προτείνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων στις περιοχές όπου τα δεδομένα γεωραντάρ παρουσίαζαν υψηλές τιμές θορύβου και χρειάζονταν εφαρμογή πολλών διαδοχικών φίλτρων.

Από τη γεωφυσική διασκόπηση στο χώρο των ΕΛΠΕ στην περιοχή Ασπρόπυργου εντοπίστηκαν κάποιες θέσεις με πιθανή την ύπαρξη ρύπανσης. Λόγω του ότι παρατηρείται έλλειψη γεωτρητικών δεδομένων στις περιοχές αυτές, που οι γεωφυσικές μέθοδοι παρέχουν ενδείξεις ρύπανσης, προτείνεται η διάνοιξη γεωτρήσεων, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί καλύτερη διασταύρωση των δεδομένων των γεωτρήσεων, με τις γεωφυσικές μεθόδους. Συγκεκριμένα πρέπει να επαληθευτούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ με στοιχεία από καινούριες γεωτρήσεις που θα πραγματοποιηθούν στις πιθανές ζώνες ρύπανσης που εντοπίστηκαν. Επίσης προτείνεται η πραγματοποίηση γεωτρήσεων για την επαλήθευση της γεωλογίας της περιοχής.

Στις περιοχές, όπου υπάρχουν μετρήσεις από μια μόνο γεωφυσική μέθοδο, προτείνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων με δεύτερη μέθοδο για την συνδυασμένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει μια πιο λεπτομερής γεωφυσική διασκόπηση στις περιοχές όπου εντοπίστηκε ρύπανση από γεωτρήσεις, η οποία θα περιλαμβάνει πυκνότερες γραμμές, μικρότερο βήμα διασκόπησης καθώς και εφαρμογή άλλων γεωφυσικών μεθόδων.

Στις περιοχές για τις οποίες δεν υπάρχουν καθόλου πληροφορίες, η γεωφυσική έρευνα θα μπορούσε να δώσει χρήσιμα στοιχεία για την επιλογή της θέσης των γεωτρήσεων. Θα μπορούσε να εφαρμοστεί παρόμοια προσέγγιση σε ανάλογα προβλήματα, ώστε να προκύψει μία αρχική εκτίμηση του προβλήματος και να

αποφευχθούν πολυέξοδες ερευνητικές γεωτρήσεις, τουλάχιστον στο πρώτο στάδιο της μελέτης.

Σημαντική επίσης, θα ήταν επαναλαμβανόμενη συλλογή μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα στις ίδιες θέσεις, δίνοντας έμφαση στην εξέλιξη του φαινομένου. Προτείνεται η επανάληψη των ίδιων ηλεκτρικών τομογραφιών σε μετέπειτα διάστημα του εμπλουτισμού του υδροφορέα. Η πραγματοποίηση ηλεκτρικών μετρήσεων στην ίδια ακριβώς περιοχή θα προσφέρει ένα επιπλέον στοιχείο για τις αυξομειώσεις του βάθους του υδροφορέα. Οι γεωτρήσεις παράλληλα που έχουν προταθεί καταρχήν ως ερευνητικές και δειγματοληπτικές, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον ως γεωτρήσεις για εξυγίανση του εδάφους, εφόσον οι προτεινόμενες θα βρίσκονται ήδη πλησίον των ρυπασμένων ζωνών.

Στις περισσότερες γεωφυσικές περιβαλλοντικές μελέτες που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα ελεγχόμενης ροής των ρύπων στο υπέδαφος. Στις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται η ανίχνευση, η παρατήρηση ρύπανσης και η τελική κατανομή της ελεγχόμενης ρύπανσης με γεωφυσικές μεθόδους αλλά και η άμεση επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Επίσης είναι εφικτή η λήψη μετρήσεων πριν και μετά την έκχυση, όπου αυτό μετά από σύγκριση τους συνήθως αποκαλύπτει σημαντικές αλλαγές σε αυτές και κυρίως στη κυματομορφή των δεδομένων, στην ταχύτητα διάδοσης, στην διηλεκτρική σταθερά, στην εξασθένηση των κυμάτων κ.λ.π.. Επιπλέον, με την αλλαγή διαφόρων παραμέτρων της διάταξης, όπως είναι το υλικό πλήρωσης, το ύψος του υδροφόρου, το είδος ρύπανσης, οι κεραίες γεωραντάρ κ.λ.π. επιτυγχάνεται η βέλτιστη προσομοίωση των δεδομένων πεδίου με τα εργαστηριακά πειράματα. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω προτείνεται η δημιουργία διάταξης ελεγχόμενης ροής ρύπων στο εργαστήριο.

Συμπερασματικά, η βελτίωση των αποτελεσμάτων απαιτεί συνδυασμό 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.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι η τεχνική του γεωραντάρ δεν είναι σε θέση να προσφέρει αρκετά στοιχεία για τη ρύπανση του υπεδάφους όταν εφαρμόζεται μόνη της. Για τη μελέτη της ρύπανσης είναι απαραίτητο να συνδράμουν περισσότερες επιστήμες (γεωλογία - υδρογεωλογία - χημεία), αλλά και διαφορετικές γεωφυσικές

μέθοδοι και γεωτρήσεις, προκειμένου στο τέλος να συνεκτιμηθούν τα επιμέρους στοιχεία και να προκύψει ένα ασφαλές αποτέλεσμα.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

1. Αϊβαλιώτη Μ. (2005). "Προσδιορισμός Πιλοτική Εφαρμογή της Μεθόδου Air Sparging για την Εξυγίανση Υδροφορέα σε Διυλιστήριο Πετρελαίου", Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Φεβρουάριος, 2005.

2. Βαφείδης, Α. και Αμολοχίτης, Γ., (1992). "Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές και σεισμικές διασκοπήσεις στον οικισμό Άνω Μέρους, Ν. Ρεθύμνης", Έκθεση, Νομαρχιακό Ταμείο Ρεθύμνης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 1992.

3. Βαφείδης, Α., Μονόπωλης, Δ., Αμολοχίτης, Γ. και Στειακάκης, Μ., (1991). "Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις στην κοιλάδα του Κερίτη ποταμού", Έκθεση, ΓΓΕΤ, ΟΑΔΥΚ, Πολυτεχνείο Κρήτης,1991

4. Γιδαράκος Ε., Πασαδάκης Ν., Κανελοπούλου Γ., Αϊβαλιώτη Μ (2004). "Αξιολόγηση της υπάρχουσας κατάστασης ρύπανσης σε διυλιστήριο του Ελλαδικού χώρου", Έκθεση στα πλαίσια του Ερευνητικού προγράμματος «Πρόγραμμα πρόληψης διαρροών, άντλησης και αποκατάστασης του υπεδάφους», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2004.

5. Κανελλοπούλου Γ. (2004). "Προσδιορισμός και αξιολόγηση ρύπανσης υπεδάφους σε διυλιστήριο πετρελαίου με χρήση τεχνικών fingerprinting και πολυπαραμετρικής ανάλυσης", Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Νοέμβριος, 2004.

6. Μερτίκας Σ. (1999). "Τηλεπισκόπιση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας", Εκδόσεις Ιων.

7. Μουχταρόπουλος Π. (2005). "Μελέτη ροής και παραγωγικότητας ελεύθερης φάσης LNAPL του υδροφορέα ενός διυλιστηρίου πετρελαίου", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Ιούλιος, 2005.

8. . Πουλιούδης Γ. (1999). "Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ". Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

9. Ραπτάκης Δ., (1995). "Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκριση τους", Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνική σχολή Α.Π.Θ.

10. Σπανουδάκης Ν. (2002). "Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα", Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Νοέμβριος, 2002.

11. Σπανουδάκης Ν. (2001). "Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης , Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

12. Τζιμούρτος Μ., Κουκαδάκη Μ. (2002). "Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων νερών," Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Διεθνής

1. Ajo-Franklin, J.B., Geller, J.T. and Majer, E.L. et al. (2002). 'Integrated Geophysical Characterization of a NAPL-Contaminated Site Using Borehole and Laboratory Measurements', Eos Trans, AGU Fall Meet. Suppl., Vol 83 No 47, 2002.

2. Blackhawk Geoservices Inc. Golden, CO (2001). 'Integrated Geophysical Detection of DNAPL Source Zones', NTIS: ADA409159, 68 pp, Nov 2001.

3. Bradford, J. (2004). 'Multi-Offset, Multi-Polarization Acquisition and Processing of GPR Data: a Controlled DNAPL Spill Experiment', SAGEEP 2004: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Colorado Springs, Colorado, 22-26 February 2004.

4. Briggs, V. et al. (2004). 'Mapping of TCE and PCE Contaminant Plumes Using a 3-D Induced Polarization Borehole Data, SAGEEP 2004: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems', Colorado Springs, Colorado, 22-26 February 2004.

5. Craig, M.W. and Wright, D.L. (2003). 'DNAPL Detection Sensitivity of a High-Resolution Directional Borehole Radar', SAGEEP 2003: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Antonio, Texas, 6-10 April 2003.

6. Daily, W. and Abelardo, R. (2004). 'Electrical Impedance Tomography for Detection of DNAPL Contamination', SAGEEP 2004: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Colorado Springs, Colorado, 22-26 February 2004.

7. Geller, J.T., Kowalsky, M.B. et al. (2002). 'Acoustic Detection of Immiscible Liquids in Sand', Geophysical Research Letters, Vol 27 No 3, p 417-420, 1 Feb 2000.

8. Kowalsky, M.B., Geller, J.T. et al. (1998). 'Acoustic Visibility of Immiscible Liquids in Poorly Consolidated Sand', Society Of Exploration Geophysics Annual Meeting, 4 pp., 1998.

9. Kram, M.L., Keller, A.A. et al. (2004). 'Complex NAPL Site Characterization Using Fluorescence, Part 1: Selection of Excitation Wavelength Based on NAPL Composition', Soil and Sediment Contamination: an International Journal, Vol 13 No 2, p 103-118, Mar/Apr 2004.

10. Traci, B. and Knight, R. (2003). 'Detection Limits for Immiscible Liquid Organic Contaminants Using Proton Nuclear Magnetic Resonance', SAGEEP 2003: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Antonio, Texas, 6-10 April 2003.

11. Sneddon, K.W. and Olhoef, G.R. (2000). 'Determining and Mapping DNAPL Saturation Values from Noninvasive GPR Measurements', SAGEEP 2000: Symposium on Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, Arlington, VA, 21-25 February 2000.

12. Geller, J.T., Ajo-Franklin, J.B. and Majer, E.L. (2003). ‚Effect of Immiscible Liquid Contaminants on P-Wave Transmission Through Natural Aquifer

Samples', SAGEEP 2003, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Antonio, Texas, 6-10 April 2003.

13. Illman, A.W. (2003). 'Fusion of Tomography Tests for DNAPL Source Zone Characterization: Technology Development and Validation', Strategic Environmental Research & Development Program, Cleanup CU-1365, 1 pp, Sep 2003.

14. Mark, S. and North, L. (2003). 'A Geophysical Method for Detection and Quantification of Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL) in the Subsurface', SAGEEP 2003: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Antonio, Texas, 6-10 April 2003.

15. Sneddon, K.W. (2001). 'Laboratory Complex Resistivity Investigation of Organic Contaminants: Denver Federal Center Soils, SAGEEP 2001: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems', Denver, Colorado, 4-7 March 2001.

16. Sneddon, K.W., Powers, M.H., Johnson, R.H. et al. (2002). 'Modeling GPR Data to Interpret Porosity and DNAPL Saturations for Calibration of a 3-D Multiphase Flow Simulation', U.S. Geological Survey Open-File Report 02-451, 29 pp, 2002.

17. Geller, J.T., Majer, E.L., Ajo-Franklin, J.B. et al. (2003). 'NAPL Contaminant Location with High-Frequency Crosswell Seismic Methods', Lawrence Berkeley National Laboratory Environmental Remediation Technology Research, p 94, 2003.

18. Morgan, F.D.; Sogade, J.; Lesmes, D. et al. (2003). 'Non-invasive Contaminant Site Characterization Using Geophysical-Induced Polarization', The 225th ACS National Meeting, New Orleans, LA, March 23-27, 2003.

19. Chambers, J.E. and Loke, M.H. (2004). 'Non-invasive Monitoring of DNAPL Migration Through a Saturated Porous Medium Using Electrical Impedance Tomography', Journal of Contaminant Hydrology, Vol 68 No 1-2, p 1-22, Jan 2004.

20. Ajo-Franklin, J.B., Geller, J.T. et al. (2003). 'Preliminary Characterization of a NAPL-Contaminated Site using Borehole Geophysical Techniques', SAGEEP 2003: Proceedings of the 15th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Environmental and Engineering Geophysical Society, Denver, CO. CD-ROM, p 202-220, 2003.

21. Guillen, D.P. and Hertzog, R.C. (2004). 'A Survey of Department of Energy-Sponsored Geophysical Research for Shallow Waste Site Characterization', Vadose Zone Journal Vol 3, p 122-133, 2004

22. Minsley, B. et al. (2004). 'Three Dimensional Self-Potential Inversion for Subsurface Contaminant Detection and Mapping at the DOE Savannah River Site at South Carolina', SAGEEP 2004: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Colorado Springs, Colorado, 22-26 February 2004.

23. Gidarakos E., Thomas J., "Detailed Chemical Characterization of Subsurface Contaminants in Support of Remediation Activities", Battelle Report, 1999

24. Taner M. T., Koehler F., Sheriff R. E. (1979). "Complex seismic trace analysis", Geophysics, Vol. 44 No 6, pp 1041-1063, 1979.

25. Barnes A. E. (1998). "The complex seismic trace made simple", The Leading Edge, Vol. 17, No 17, pp 473-476.

26. Taner M. T. (1992-2000). Attributes Revisited. http://www.rocksolidimages.com

27. Kulkarni A. (1998). "Artificial Neural Networks for Image Understanding".

28. Carr M., Cooper R., Smith M., Taner M. T., Taylor G., (2001). "The generation of a rock and fluid properties volume via the integration of multiple seimic attributes and log data".

29. Bedient P.B., Rifai H.S., Newell C.J. (1994). "Ground Water Remediation: Transport and Remediation". Englewood Cliffs, New Jersey

30. Haykin, S. (1999). "Neural Networks, Prentice Hall".

31. Kohonen T., (1995, 1997, 2001). “Self-Organizing Maps”, Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

32. Richards K., (1999). “Network Based Intrusion Detection: A Review of Technologies”, Computers & Security, 18:671-682.

33. Wildes, R.P. and Richards, W.A. (1988), Recovering material properties from sounds, in Richards, W.A. (ed), Natural Computation, 356-363, MIT Press.

34. Haskell N., A., (1953). “The dispersion of surface waves in multi-layered media”, Bulletin of Seismological Society of America, 43, 17-34.

35. Miller R., D., & Xia J., (1999). “Using MASW to Map Bedrock in Oathle”, Kansas, Open file report No. 99-9. Harding Lawson Associates, Lee’s Summit, Missouri.

36. Miller R., D., Xia J., Park C., B., & Ivanov J., M., (1999). “Multichannel analysis of surface waves to map bedrock”, The Leading Edge, 18(12),1392-1396.

37. Stokoe II K., H., Wright G., W., Bay J., A., & Roesset J., M., (1994). “Characterization of geotechnical sites by SASW method”, Woods R.D. Edition, Geophysical characterization of sites, Oxford Publishers.

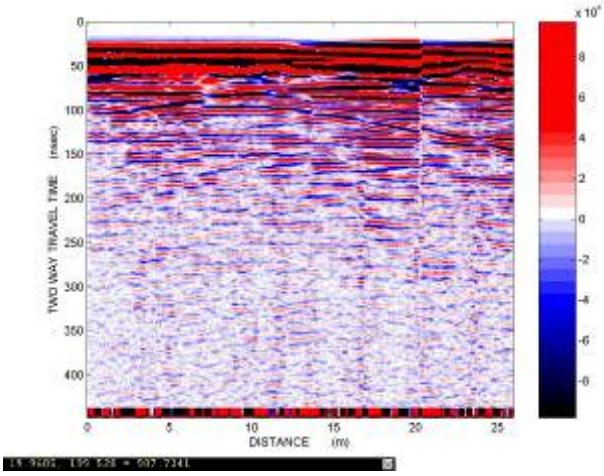
Παράρτημα Α:

Επεξεργασία τομών γεωραντάρ

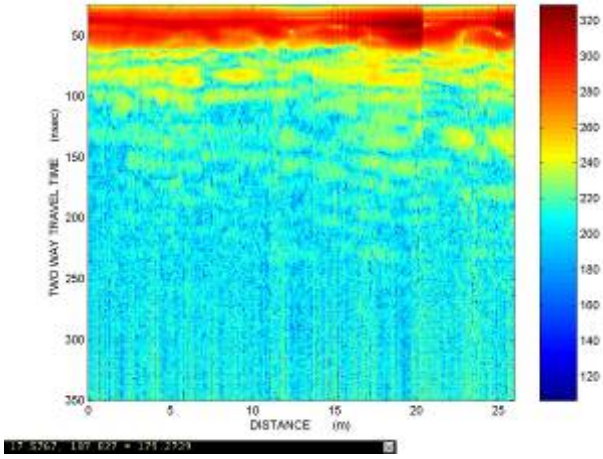
Σημείωση: Σε κάθε εικόνα του παραρτήματος Α απεικονίζεται η διαδοχική επεξεργασία που εφαρμόστηκε στα αρχικά δεδομένα του γεωραντάρ. Η επεξεργασία που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται αναλυτικότερα παρακάτω.

1. Διόρθωση (dewow)
2. Ενίσχυση σήματος (SEC)
3. Αποκοπή θορύβου υποβάθρου (background noise removal)
4. Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db (db instantaneous envelope)
5. Στιγμιαίο πλάτος (instantaneous envelope)
6. Στιγμιαίο συχνότητα (instantaneous frequency fast)
7. Στιγμιαία φάση (instantaneous phase)
8. Συνάφεια (semblance)
9. Ταξινόμηση με την μέθοδο k-means, χρήση 50 τάξεων (k-means_50)
10. Ταξινόμηση με την μέθοδο SOM, χρήση 20 τάξεων (SOM_20 classes)

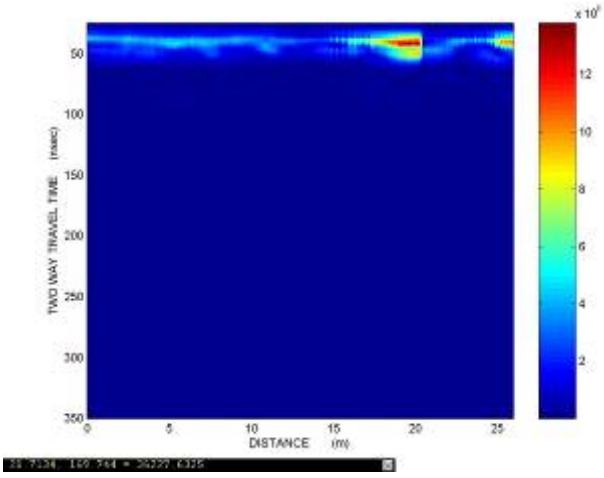
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 00



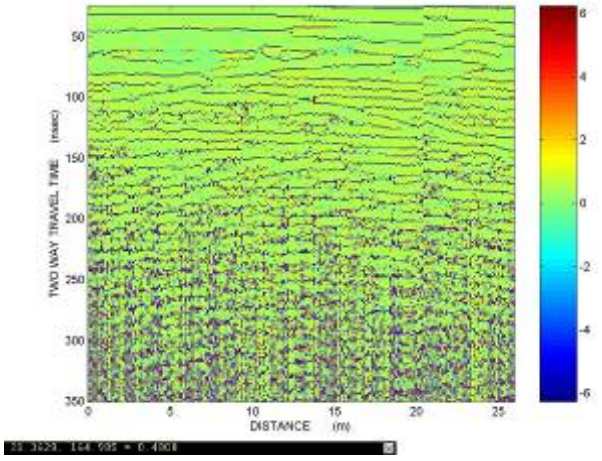
1, 2, 3



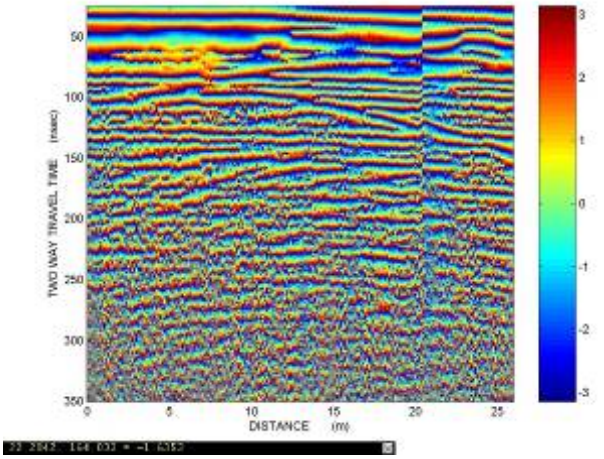
1, 2, 3, 4



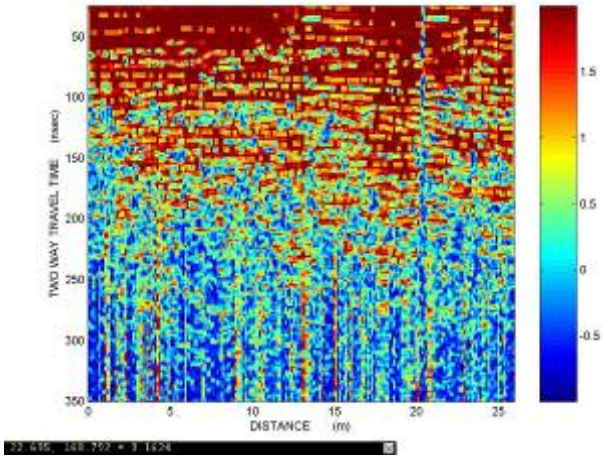
1, 2, 3, 5



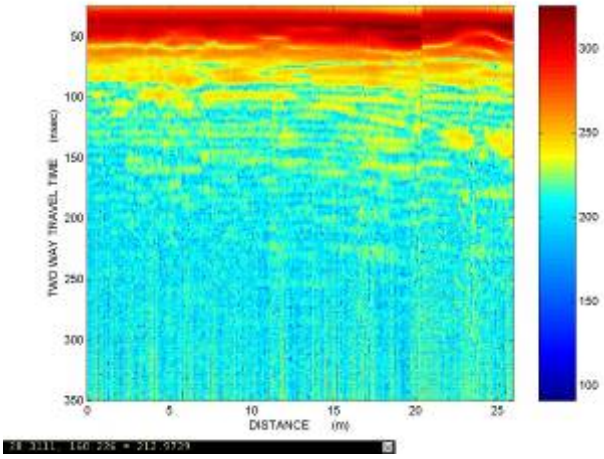
1, 2, 3, 6



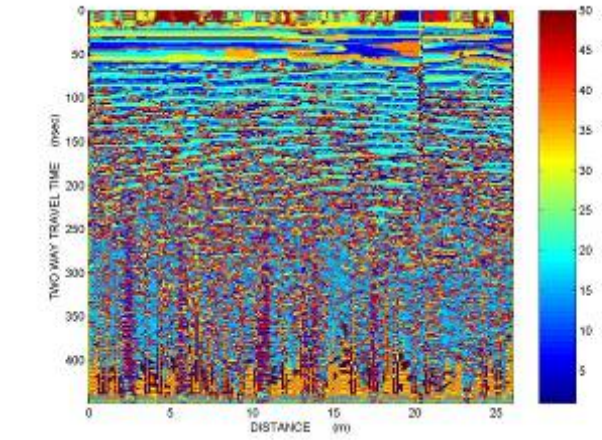
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

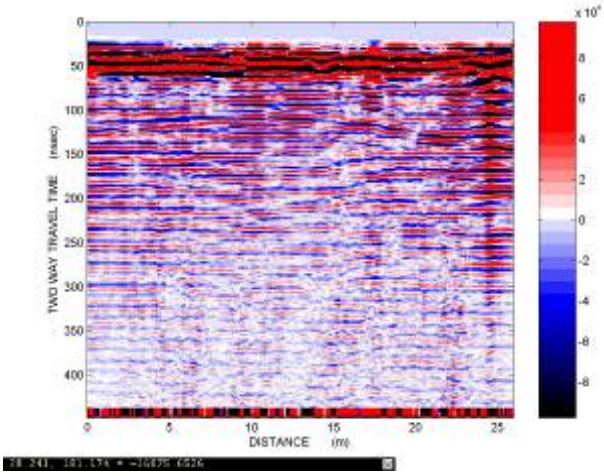


1, 2, 4

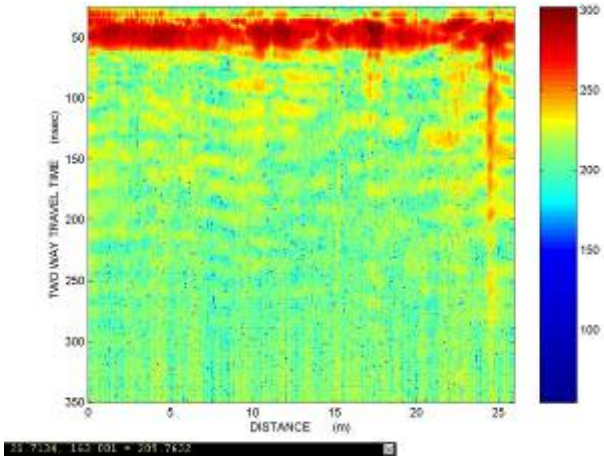


9

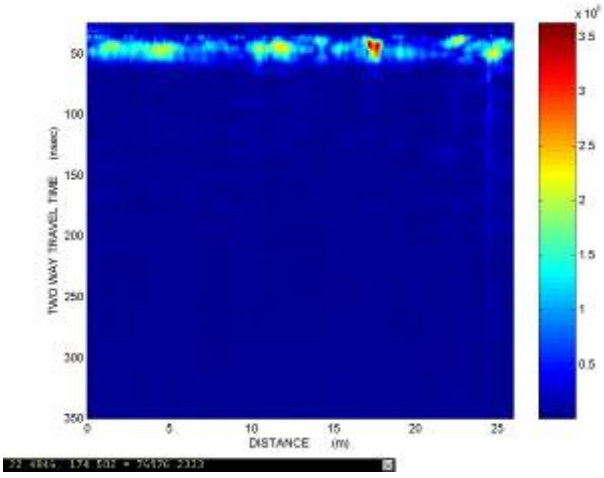
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 02



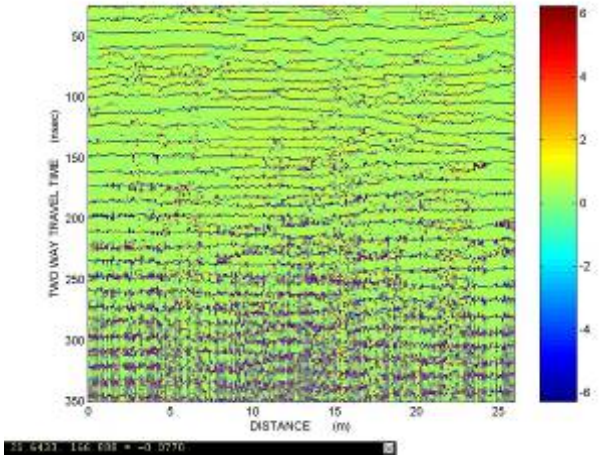
1, 2, 3



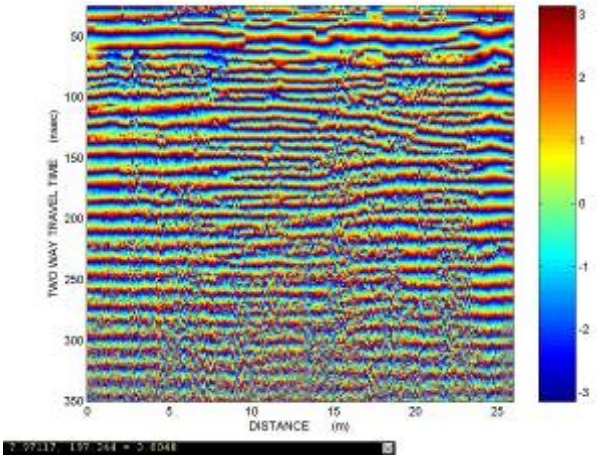
1, 2, 3, 4



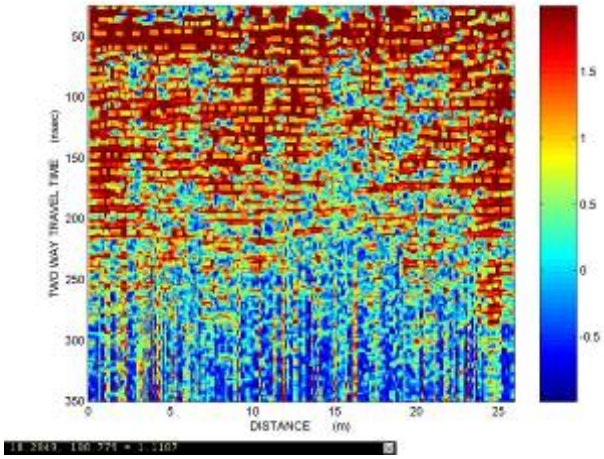
1, 2, 3, 5



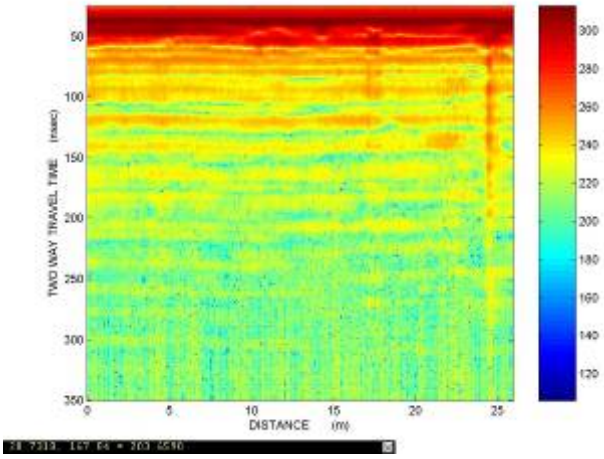
1, 2, 3, 6



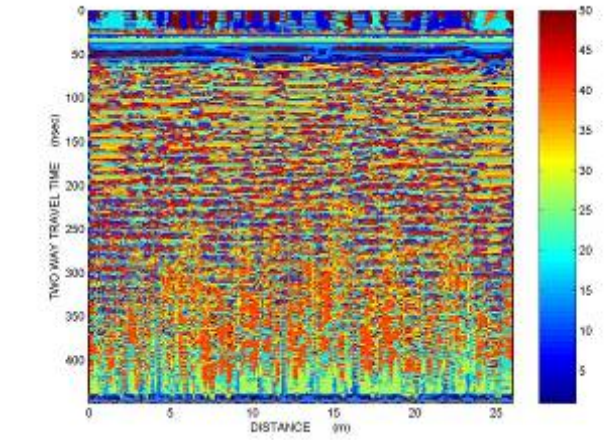
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

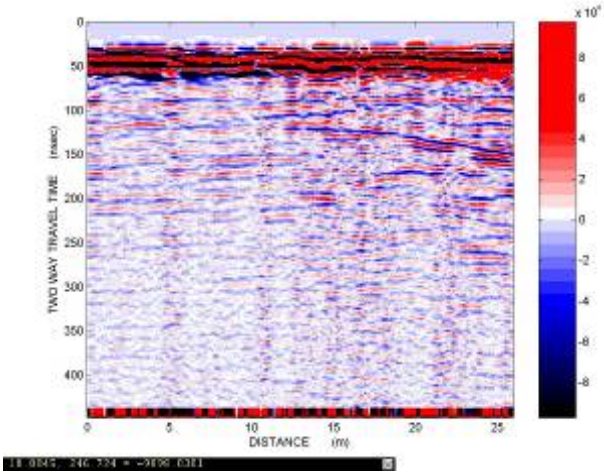


1, 2, 4

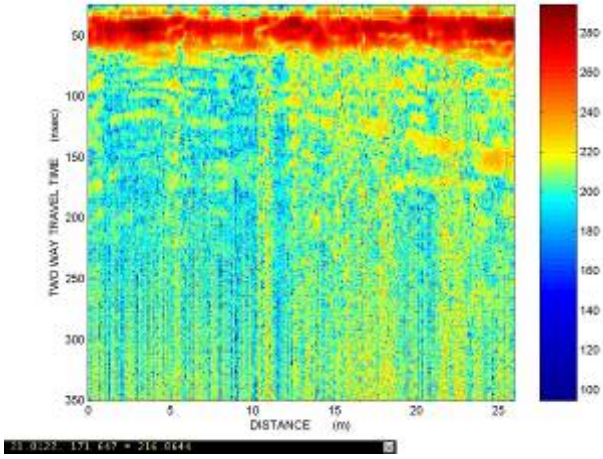


9

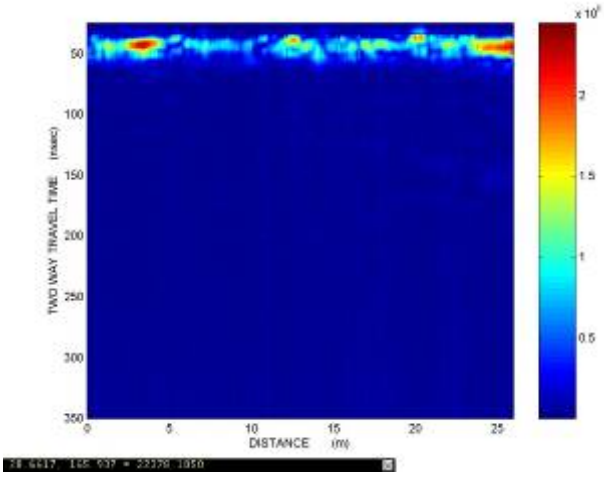
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 04



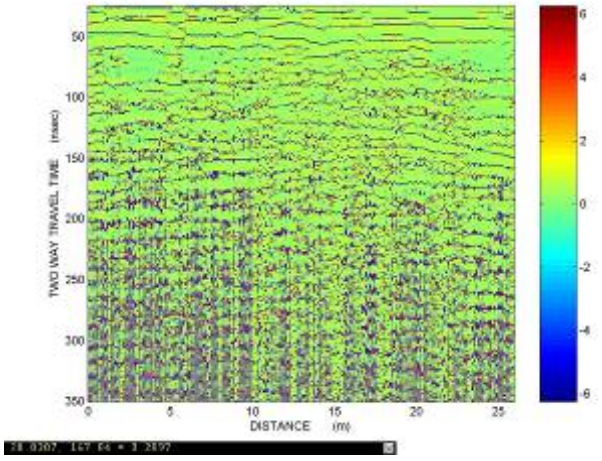
1, 2, 3



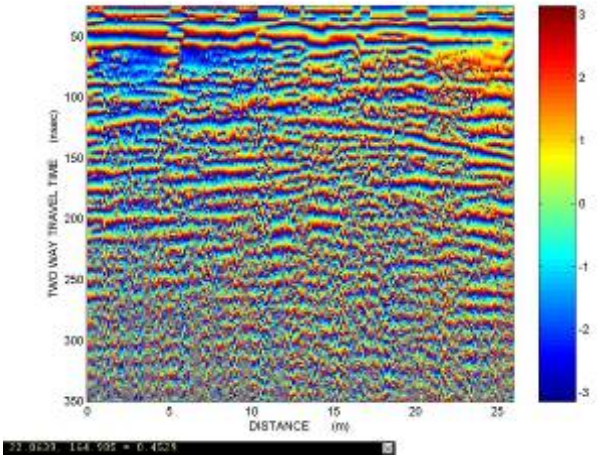
1, 2, 3, 4



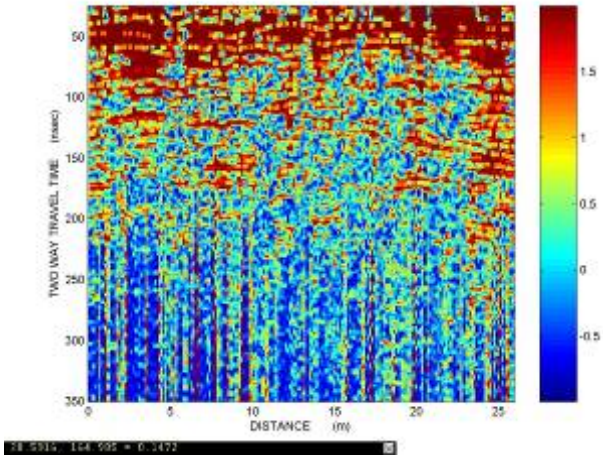
1, 2, 3, 5



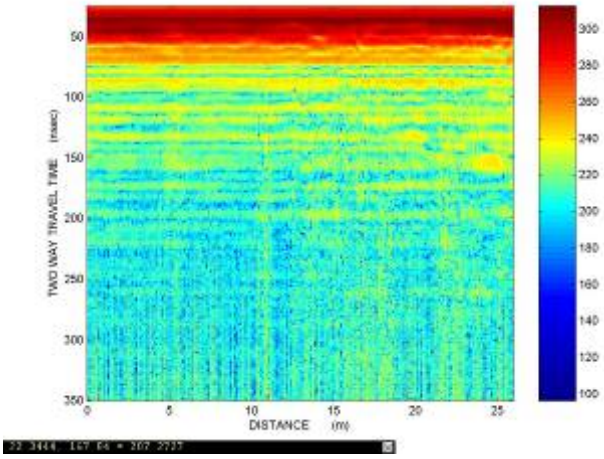
1, 2, 3, 6



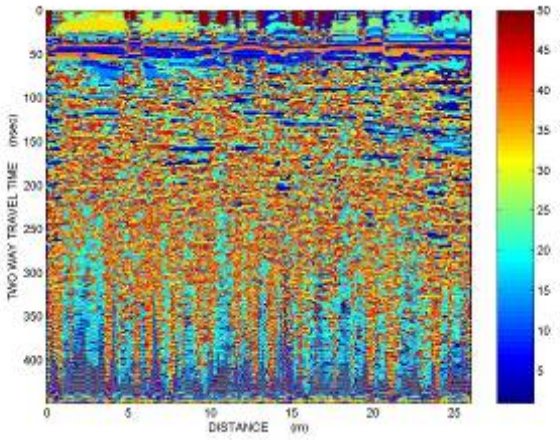
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

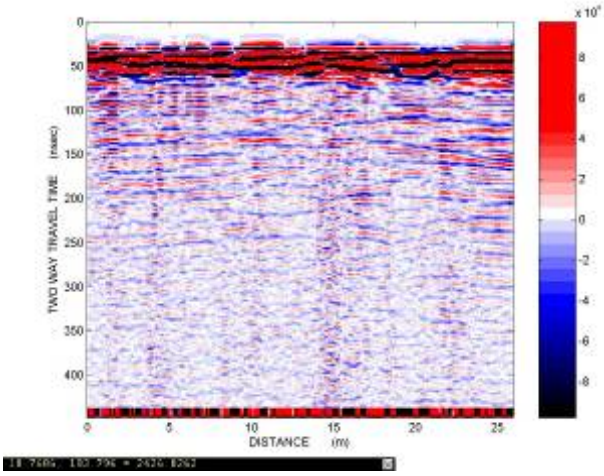


1, 2, 4

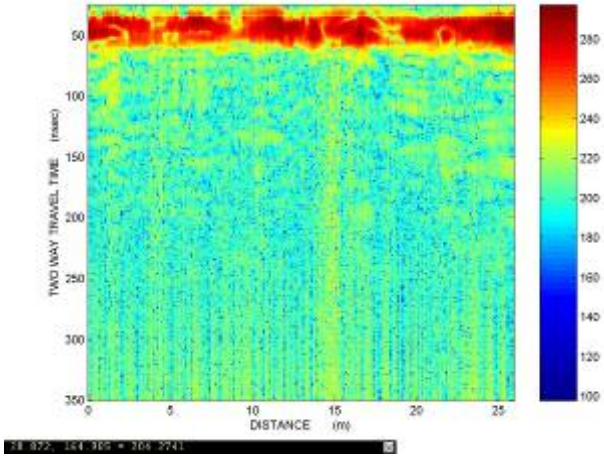


9

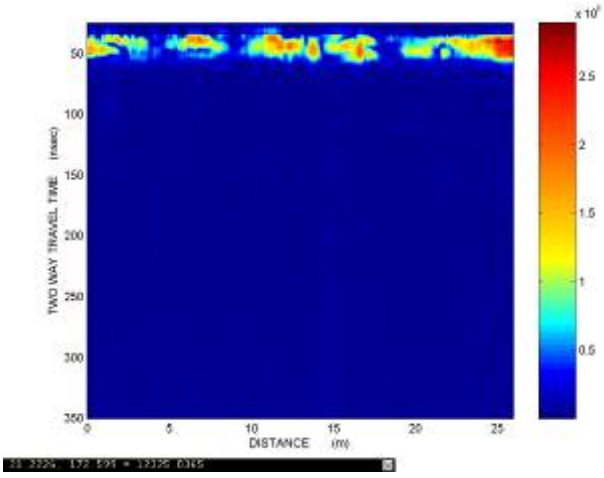
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 06



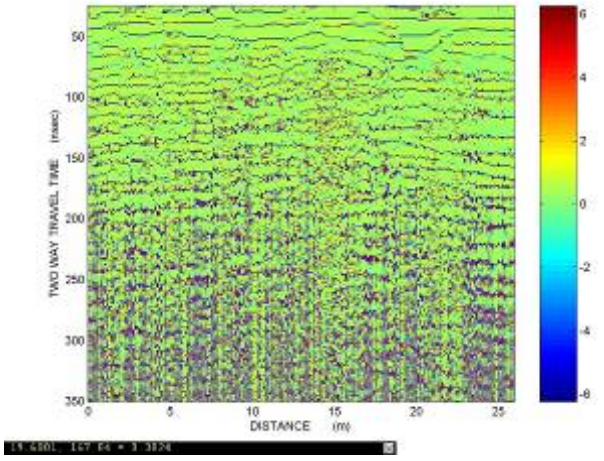
1, 2, 3



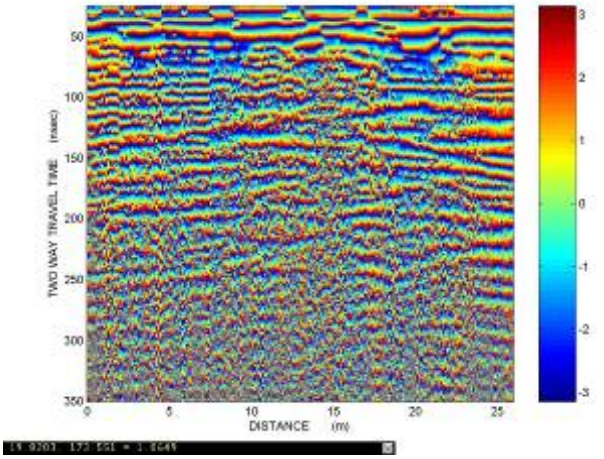
1, 2, 3, 4



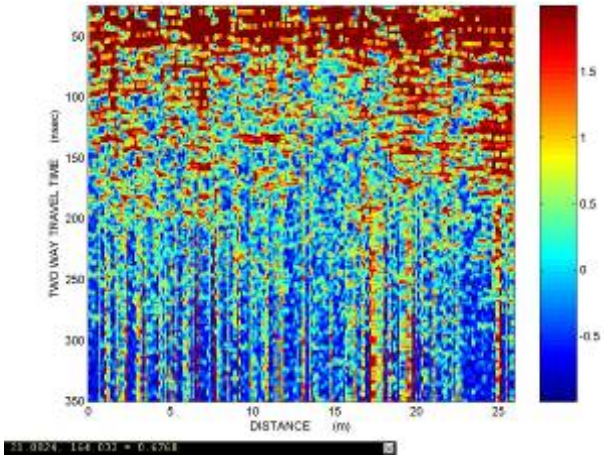
1, 2, 3, 5



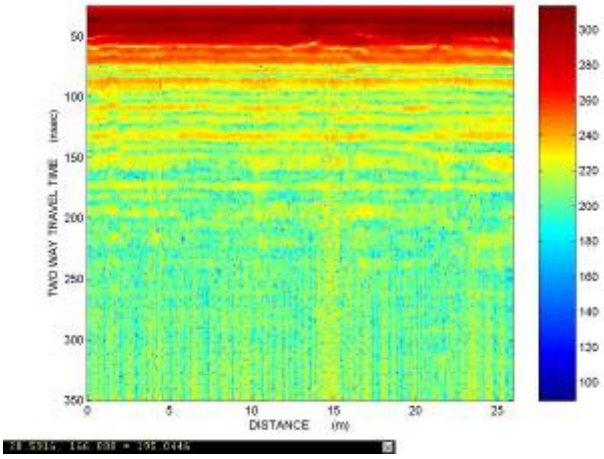
1, 2, 3, 6



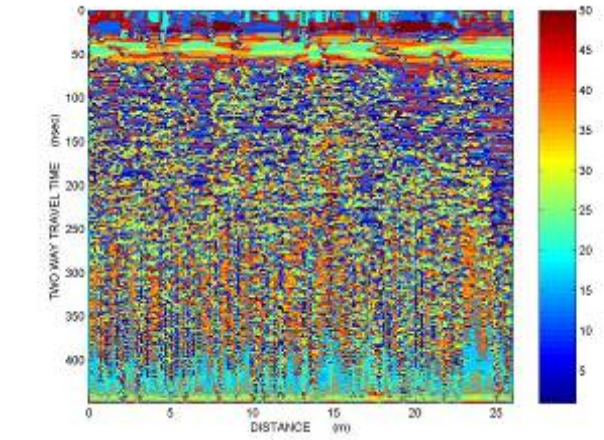
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

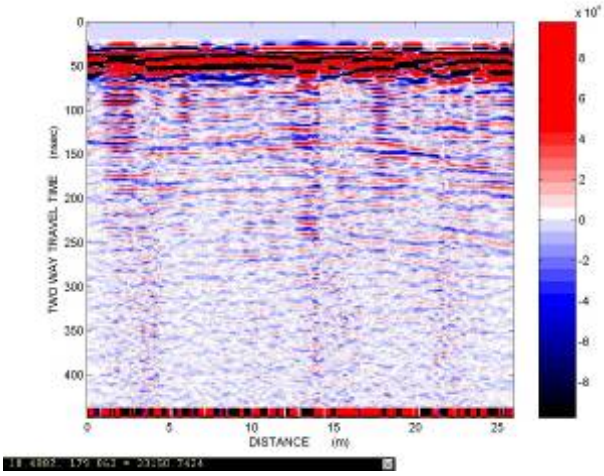


1, 2, 4

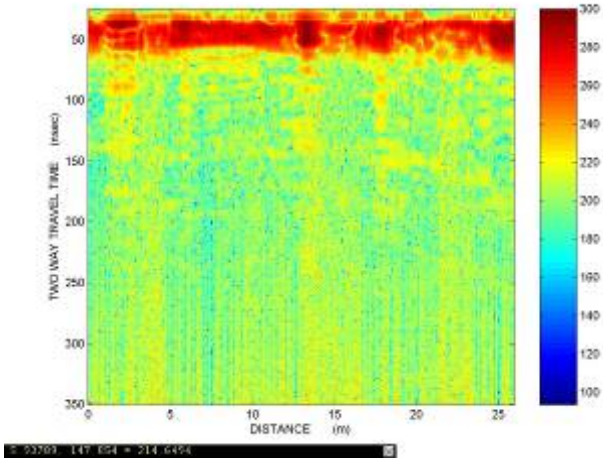


9

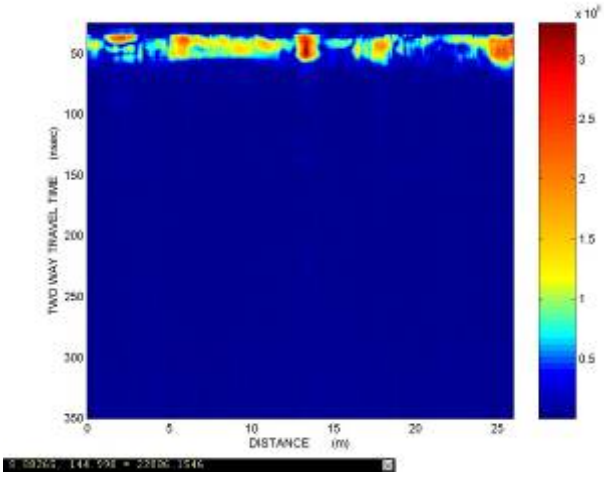
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 08



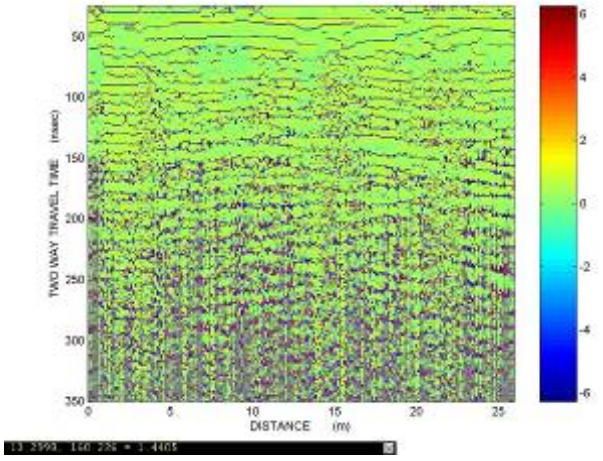
1, 2, 3



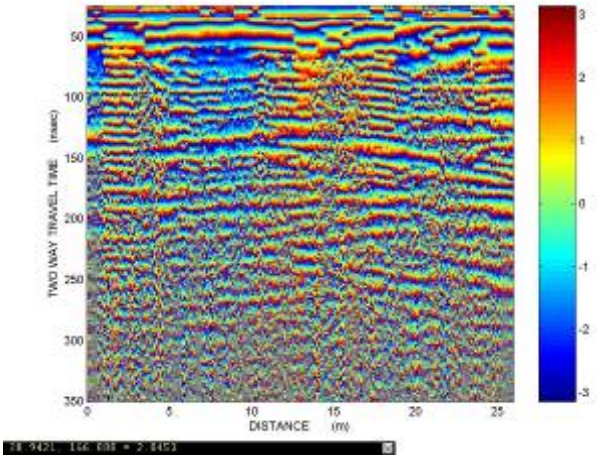
1, 2, 3, 4



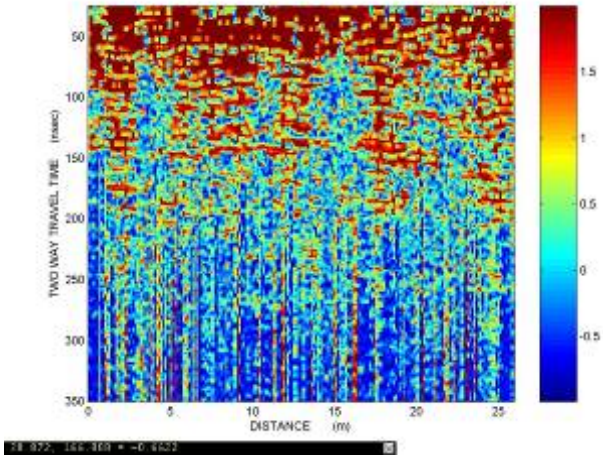
1, 2, 3, 5



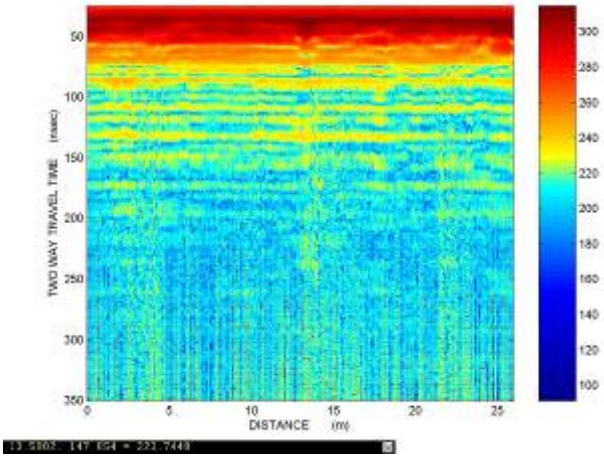
1, 2, 3, 6



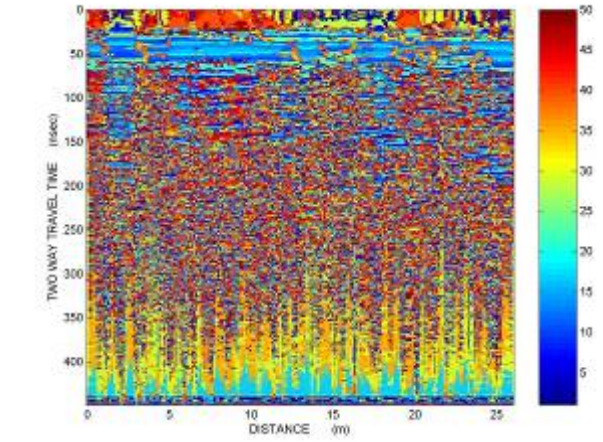
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

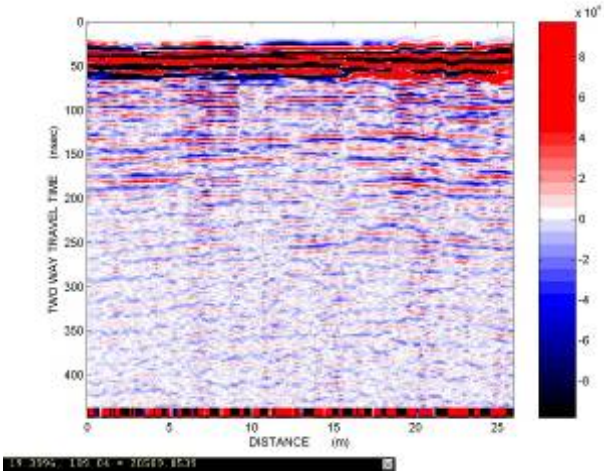


1, 2, 4

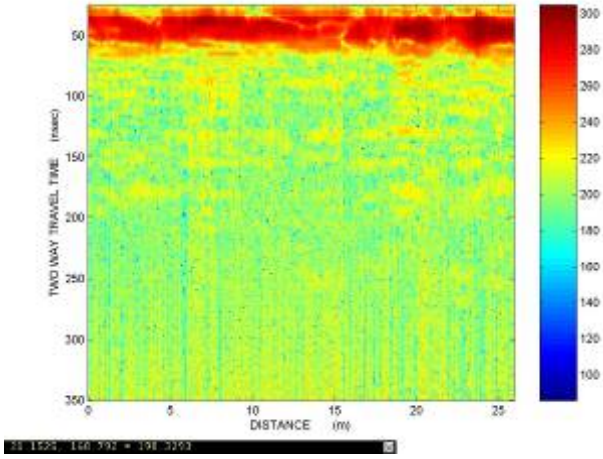


9

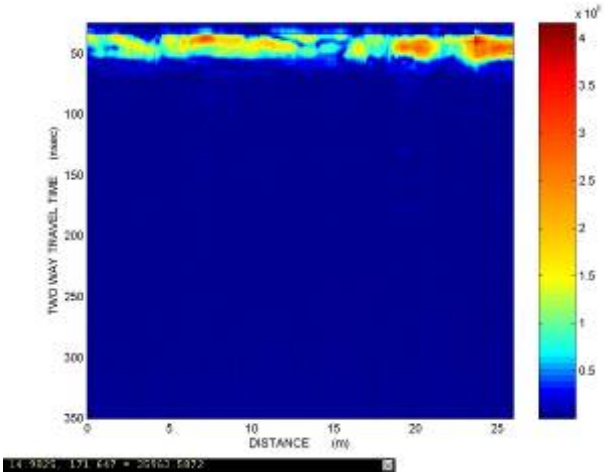
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 10



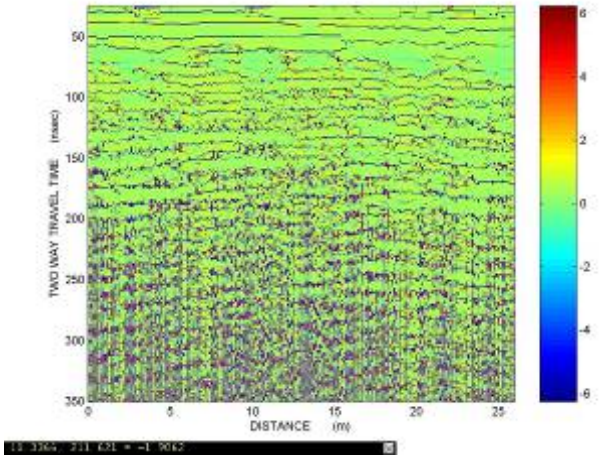
1, 2, 3



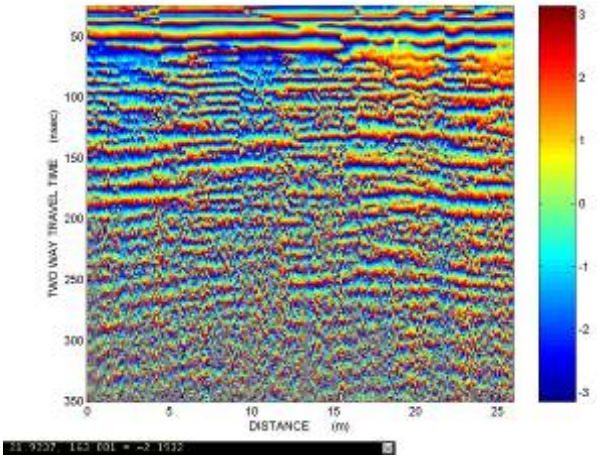
1, 2, 3, 4



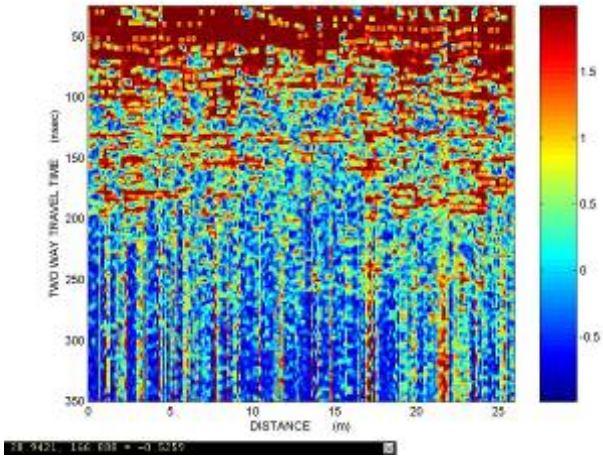
1, 2, 3, 5



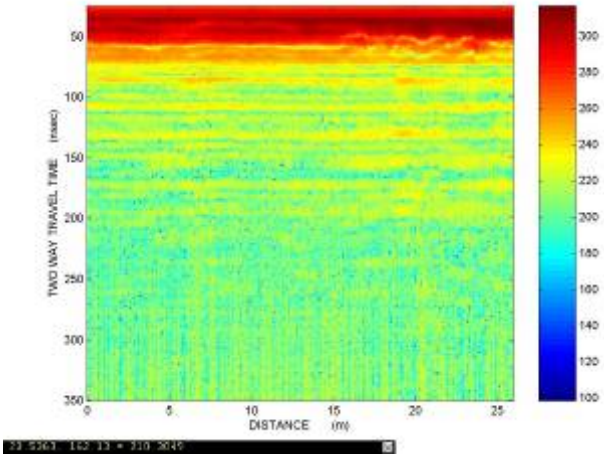
1, 2, 3, 6



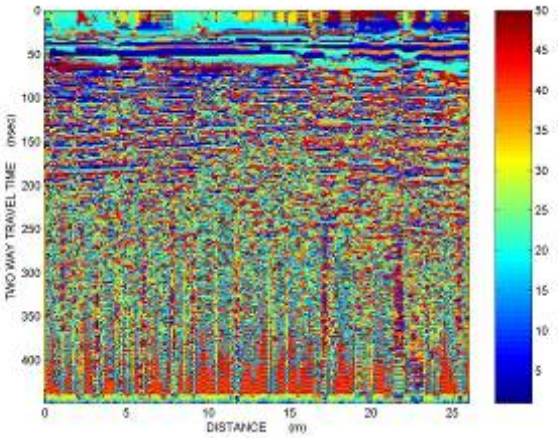
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

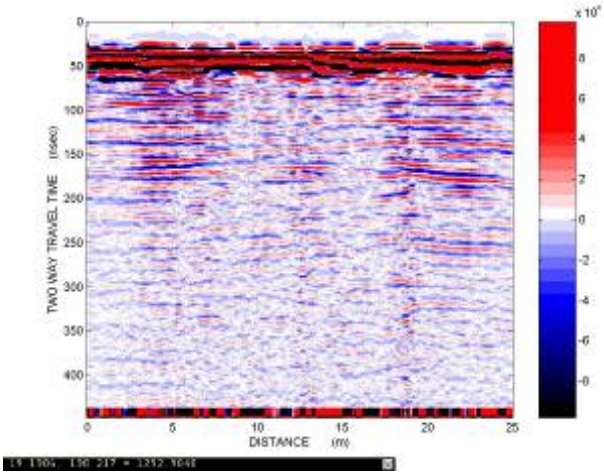


1, 2, 4

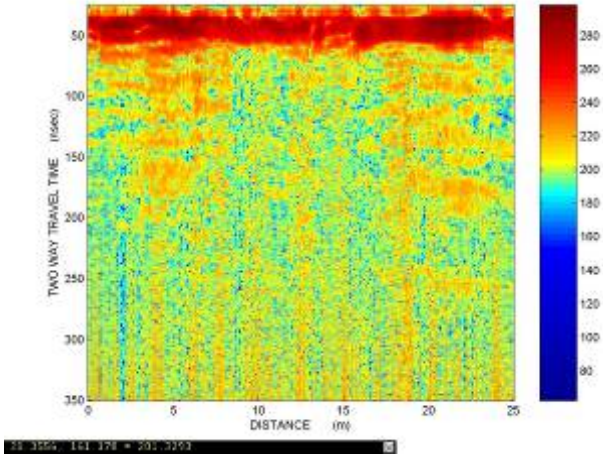


9

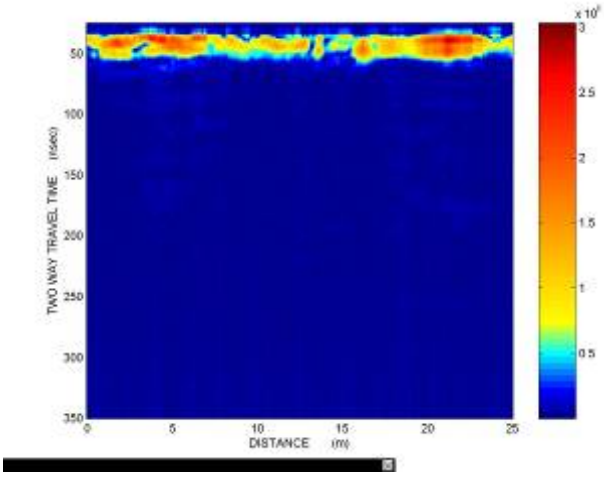
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 12



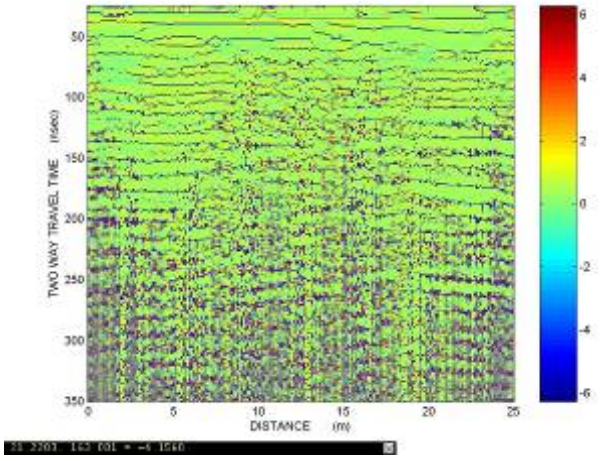
1, 2, 3



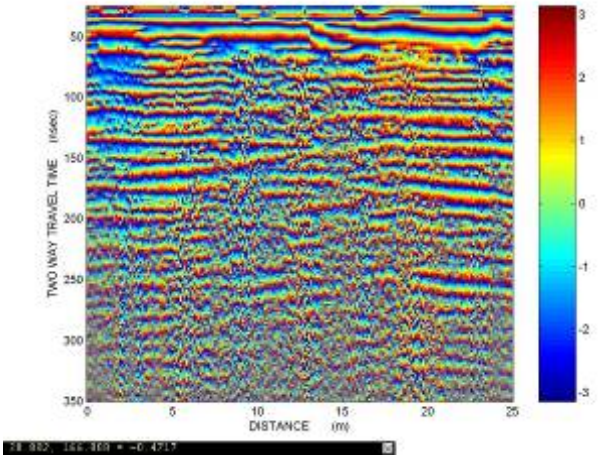
1, 2, 3, 4



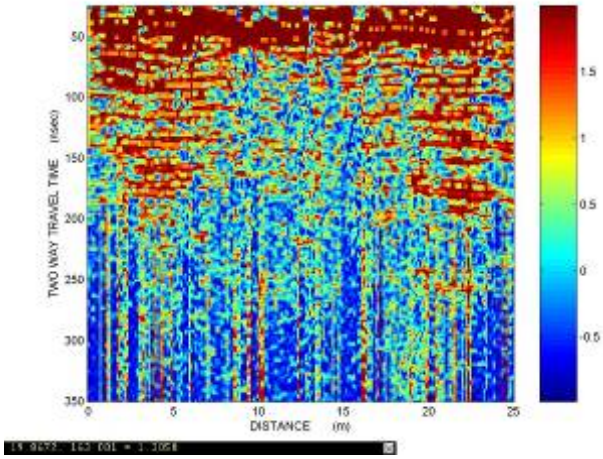
1, 2, 3, 5



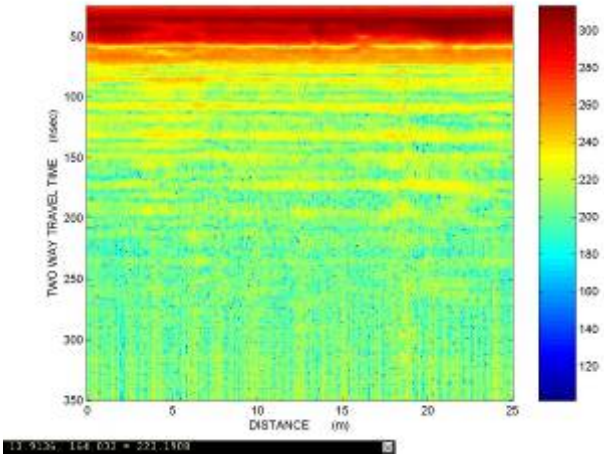
1, 2, 3, 6



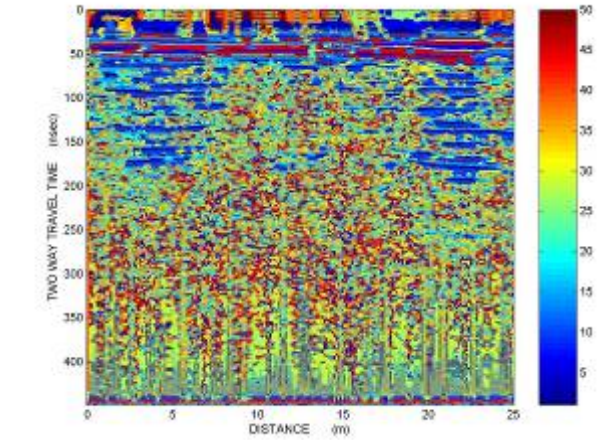
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

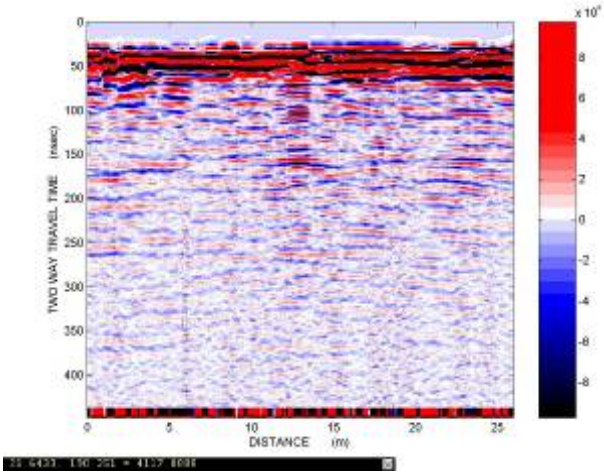


1, 2, 4

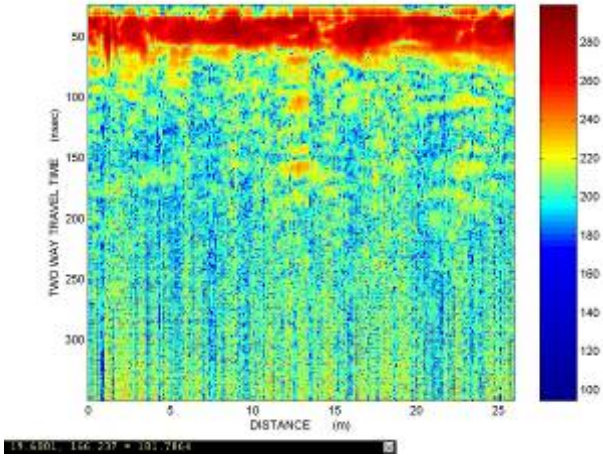


9

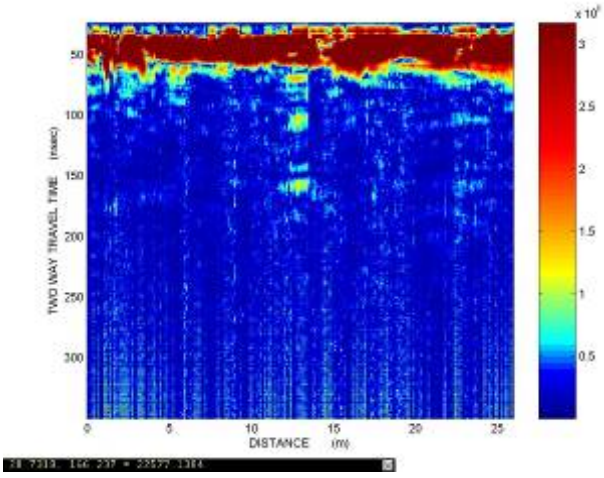
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 14



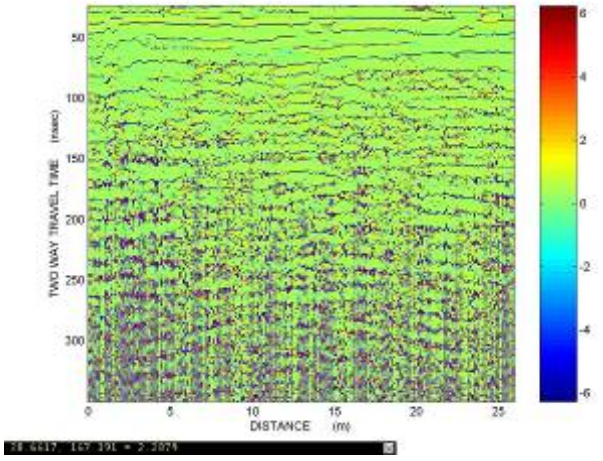
1, 2, 3



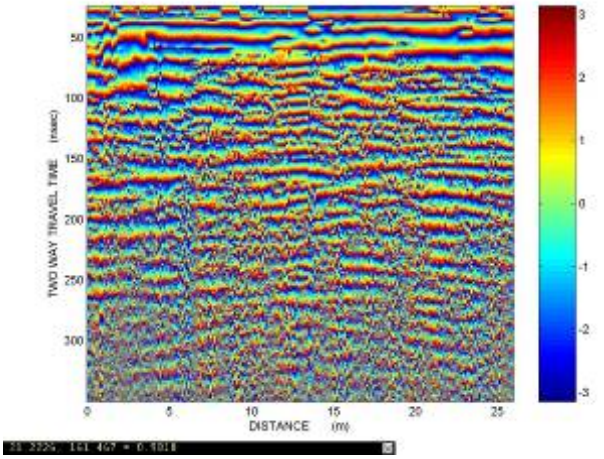
1, 2, 3, 4



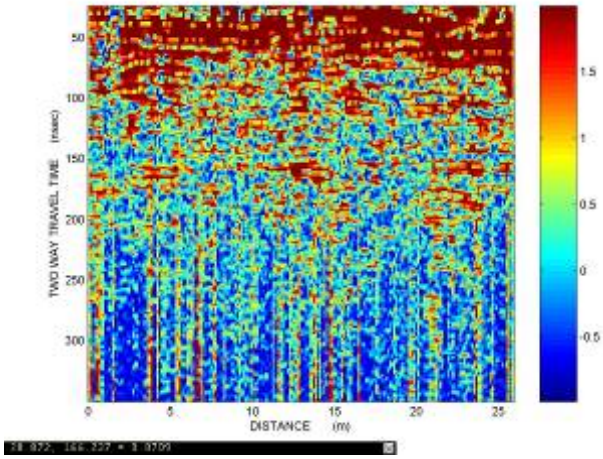
1, 2, 3, 5



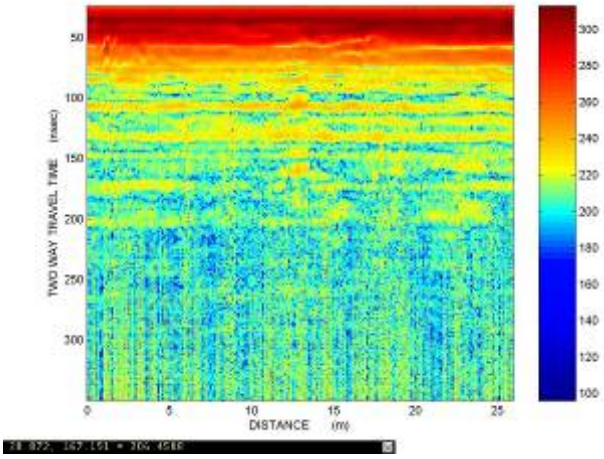
1, 2, 3, 6



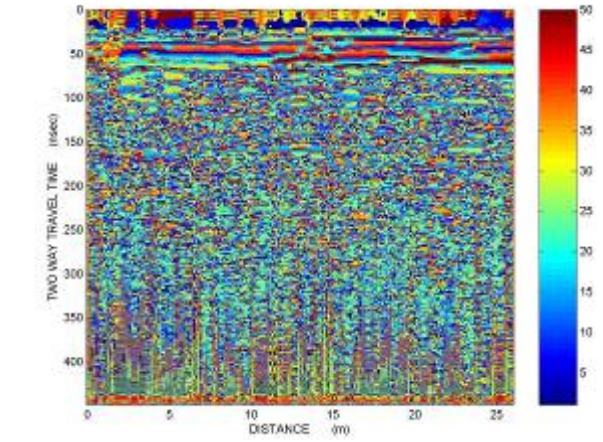
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

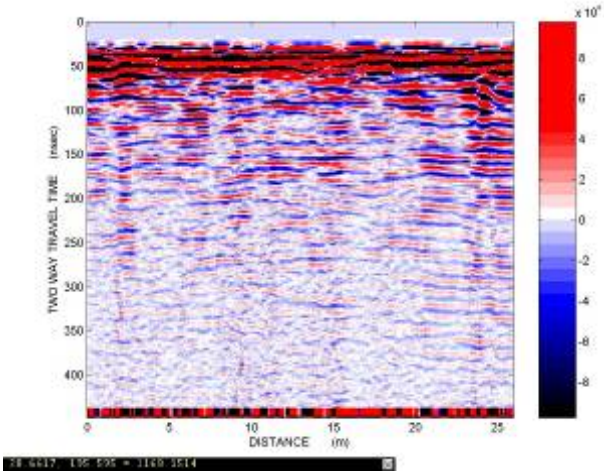


1, 2, 4

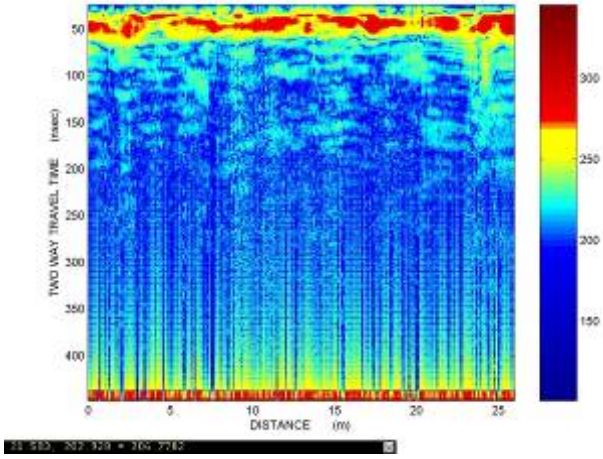


9

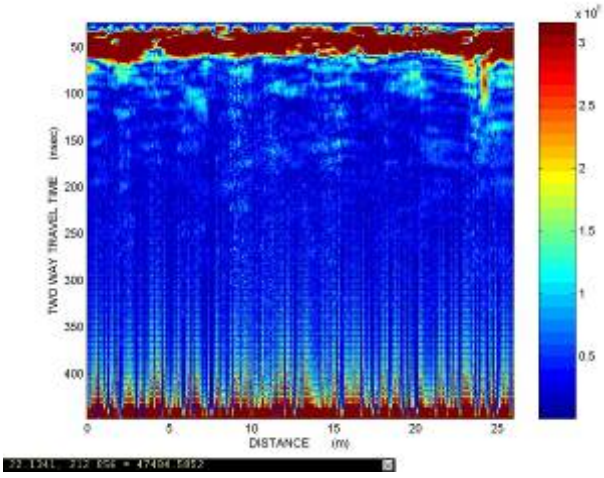
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 16



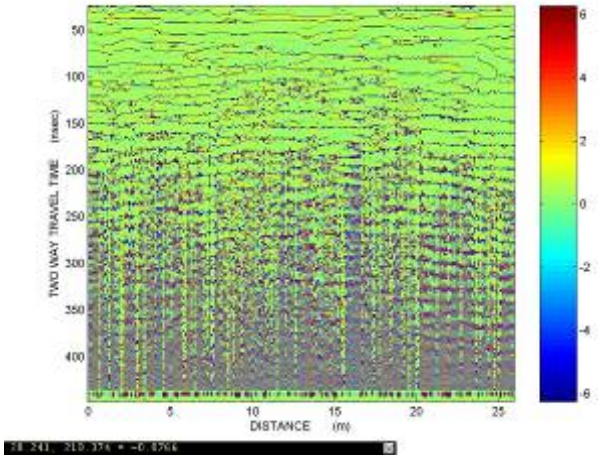
1, 2, 3



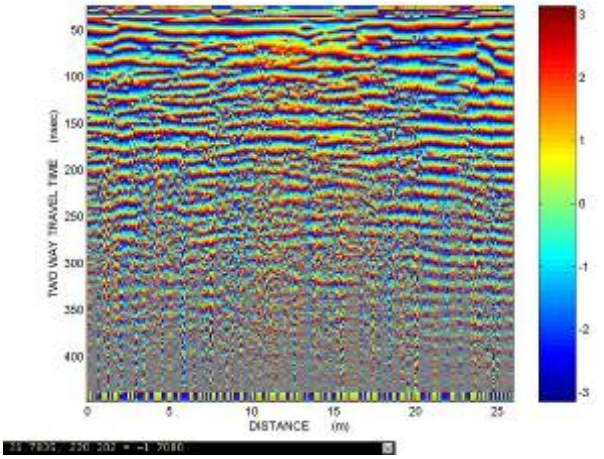
1, 2, 3, 4



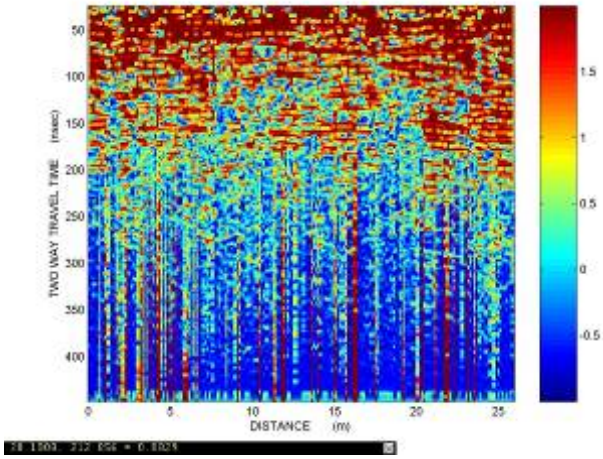
1, 2, 3, 5



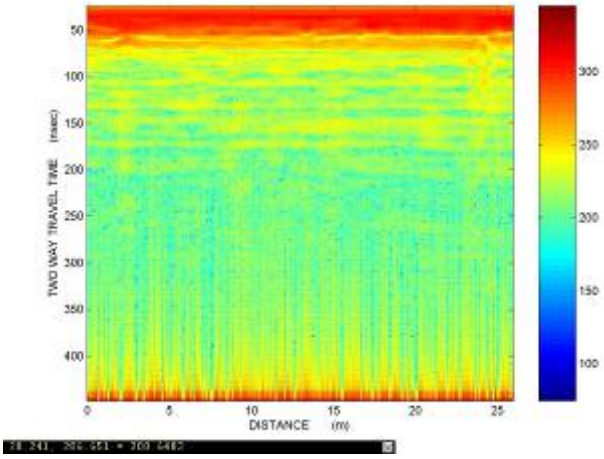
1, 2, 3, 6



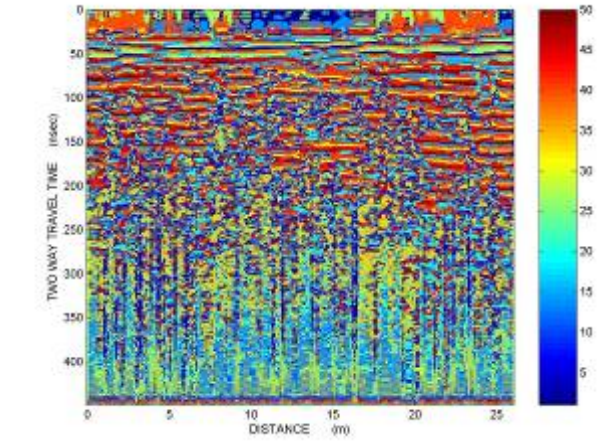
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

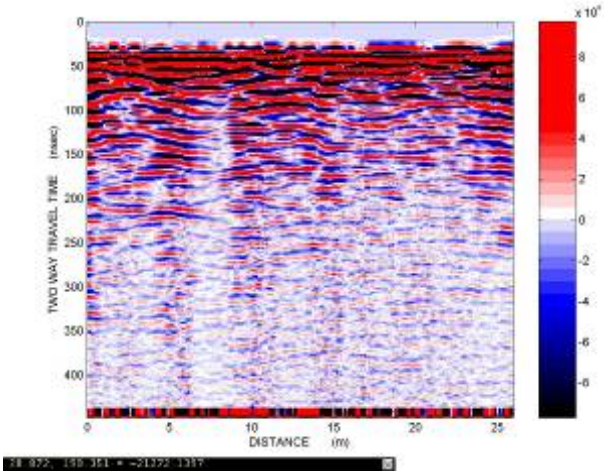


1, 2, 4

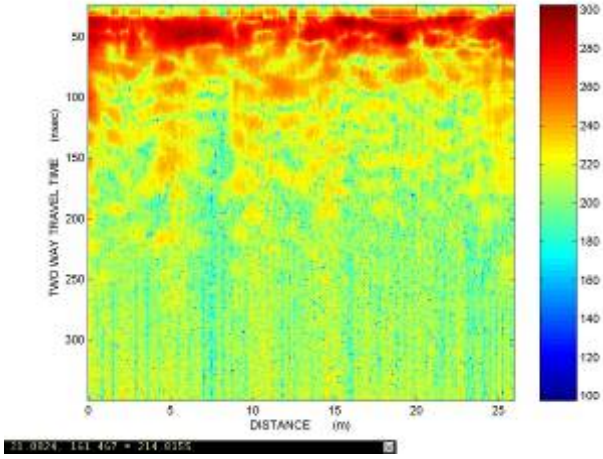


9

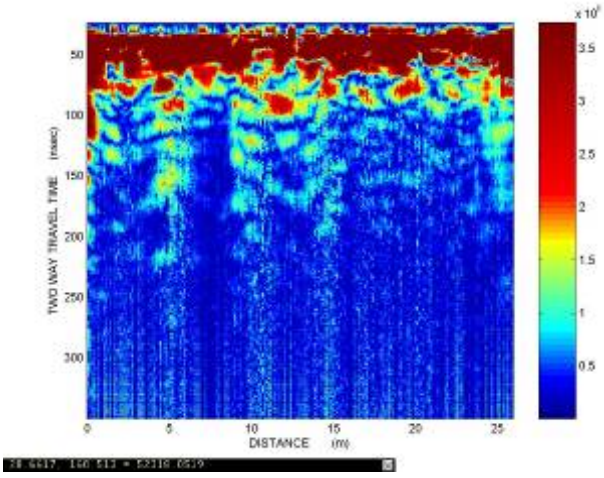
Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 18



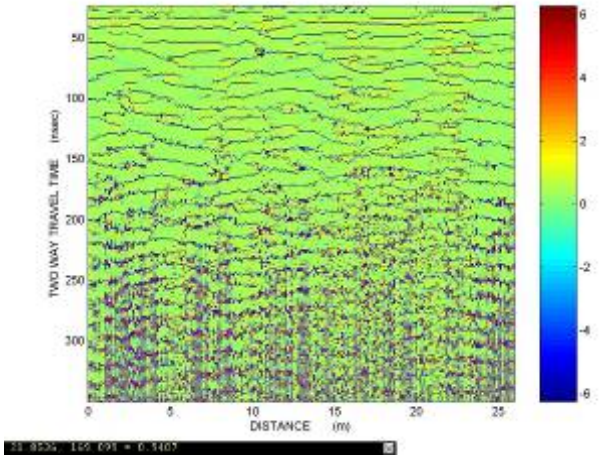
1, 2, 3



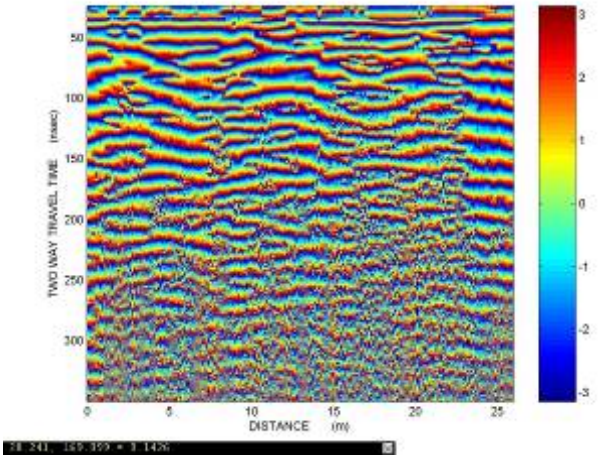
1, 2, 3, 4



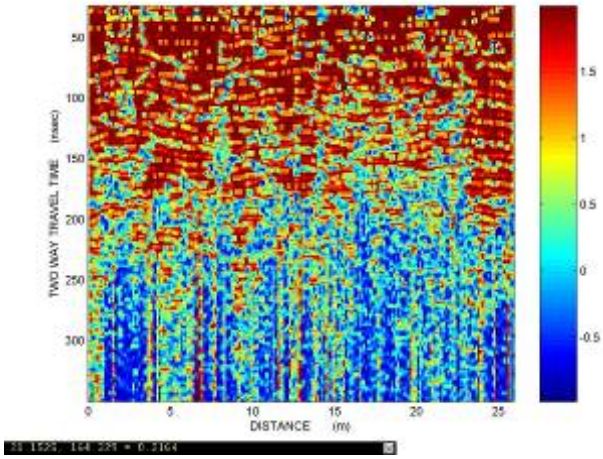
1, 2, 3, 5



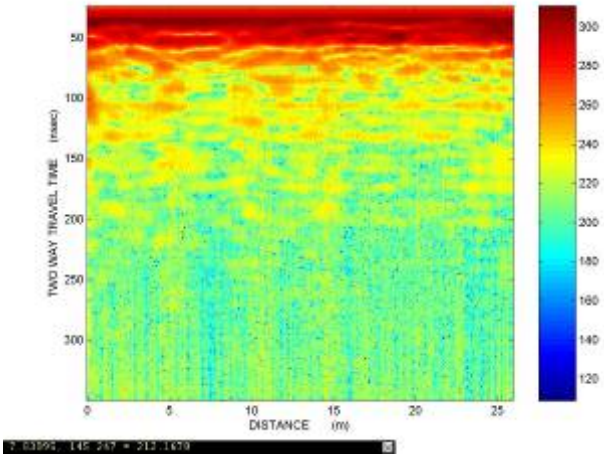
1, 2, 3, 6



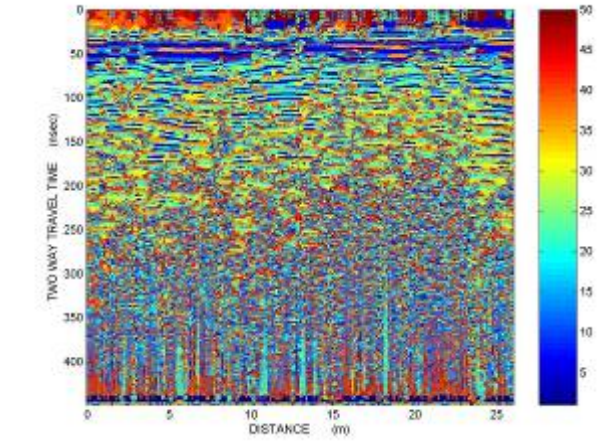
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

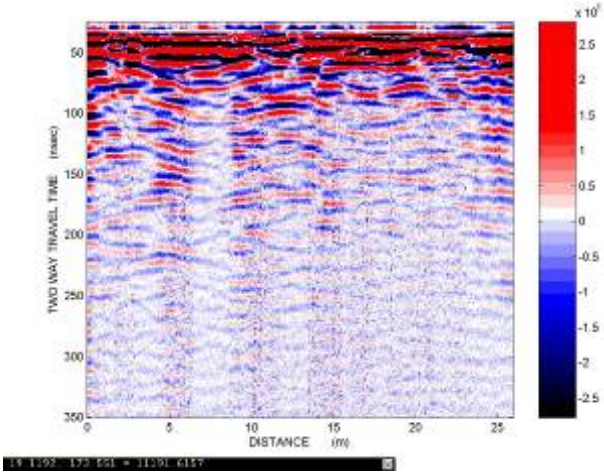


1, 2, 4

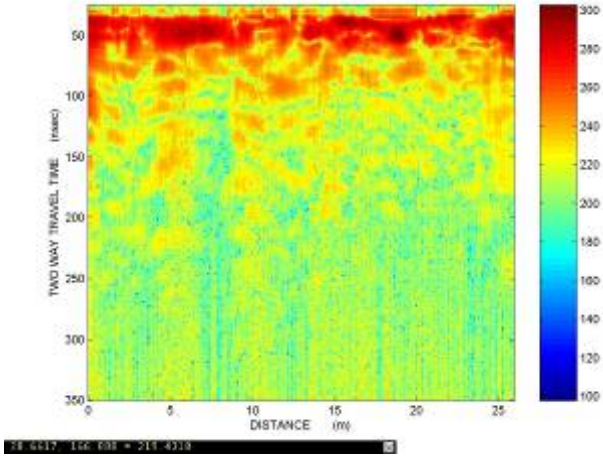


9

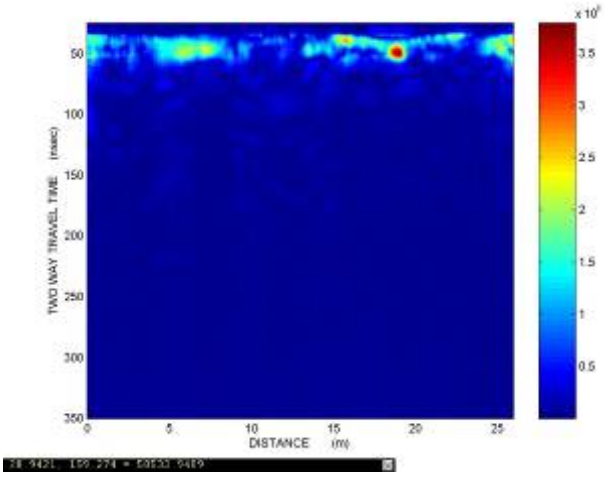
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 01



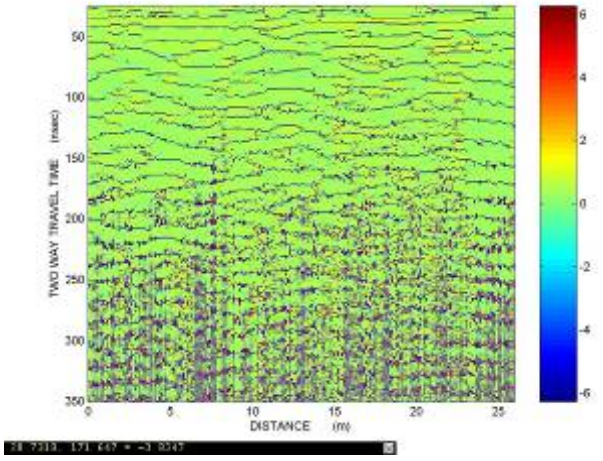
1, 2, 3



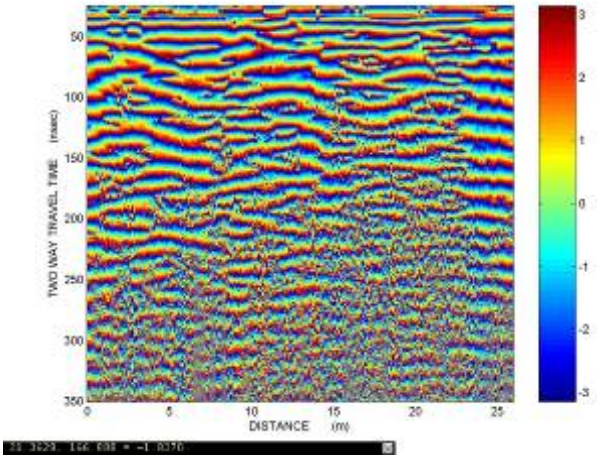
1, 2, 3, 4



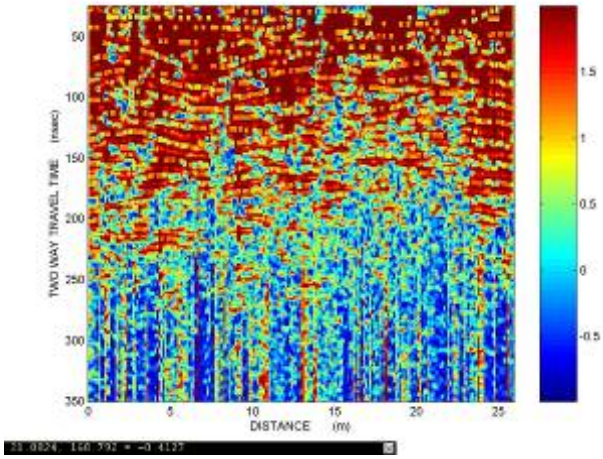
1, 2, 3, 5



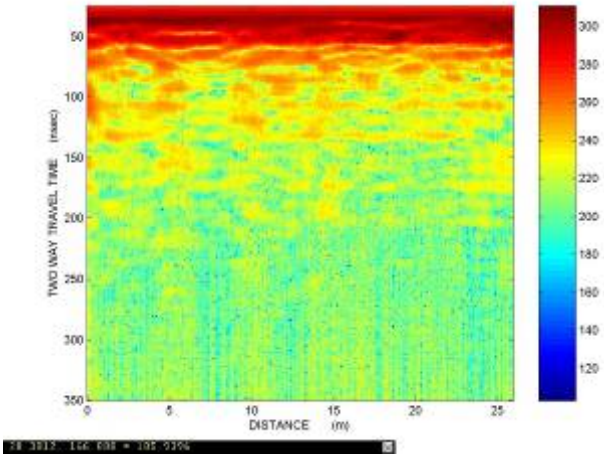
1, 2, 3, 6



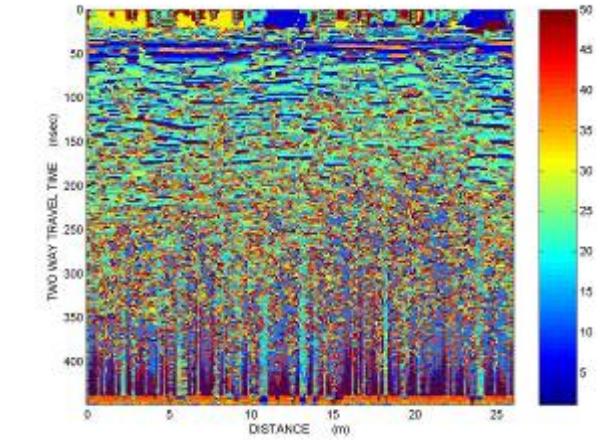
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

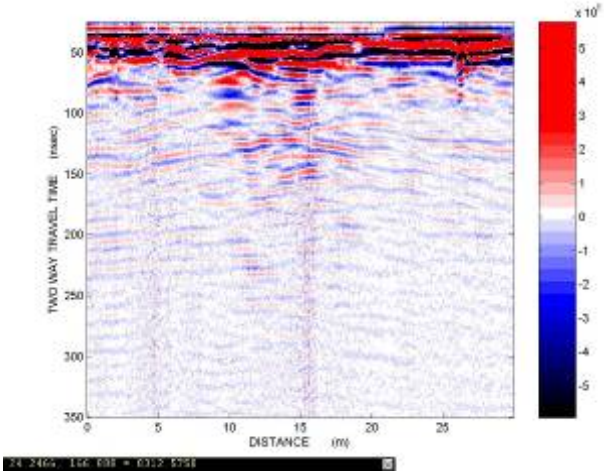


1, 2, 4

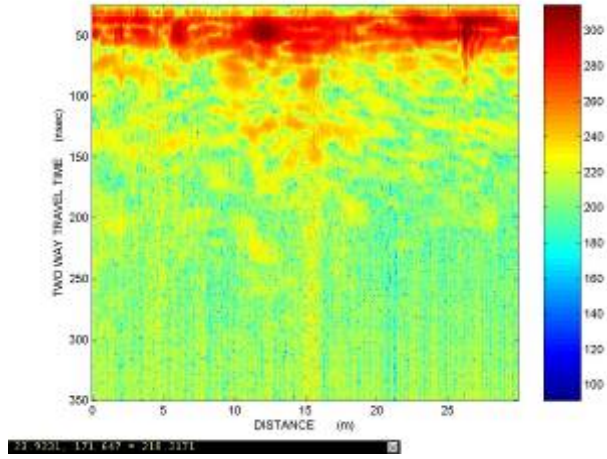


9

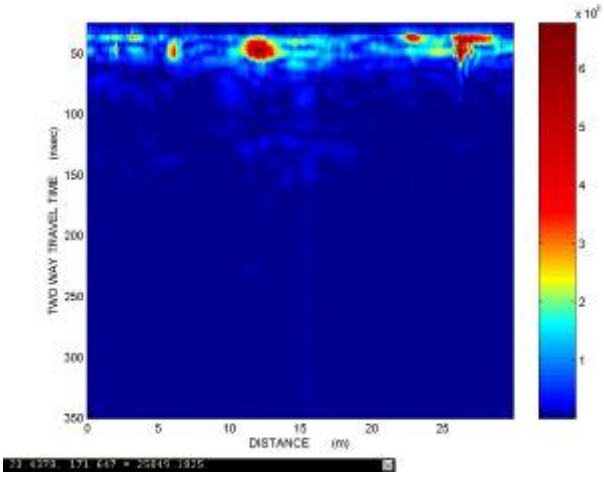
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 02



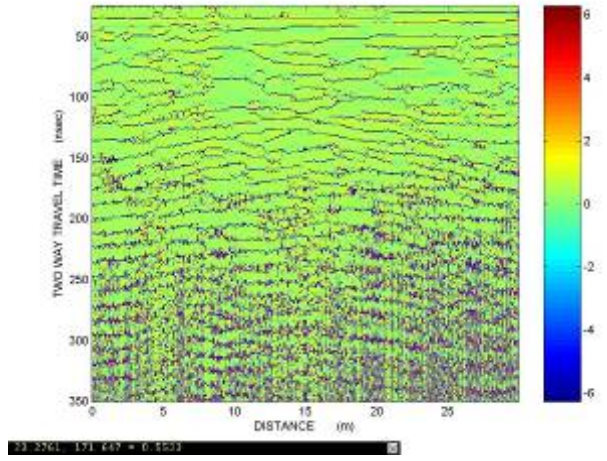
1, 2, 3



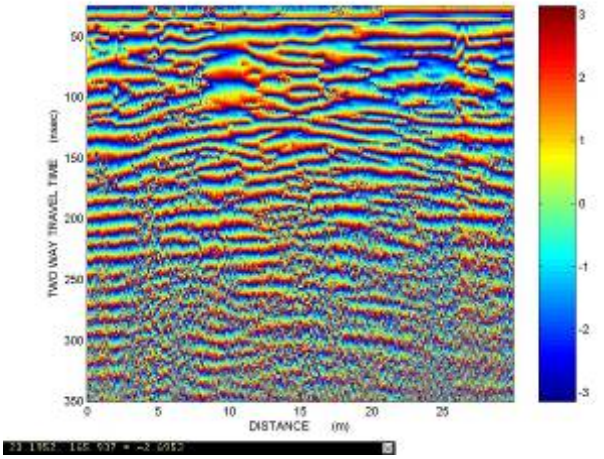
1, 2, 3, 4



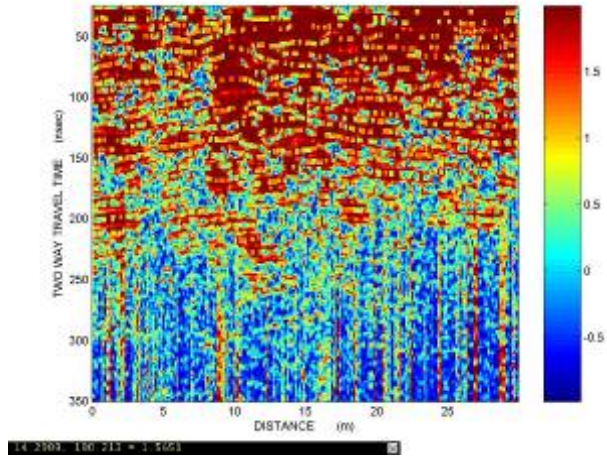
1, 2, 3, 5



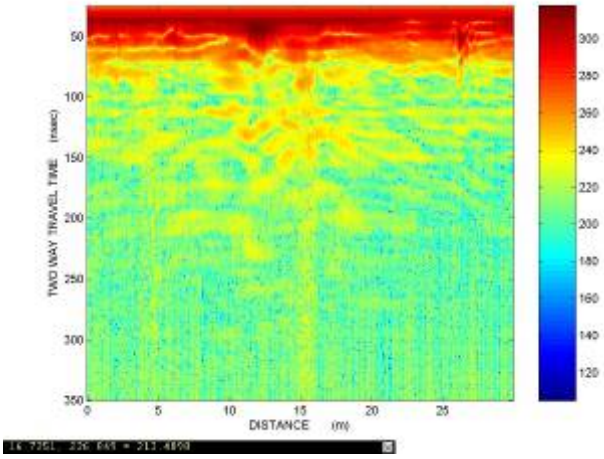
1, 2, 3, 6



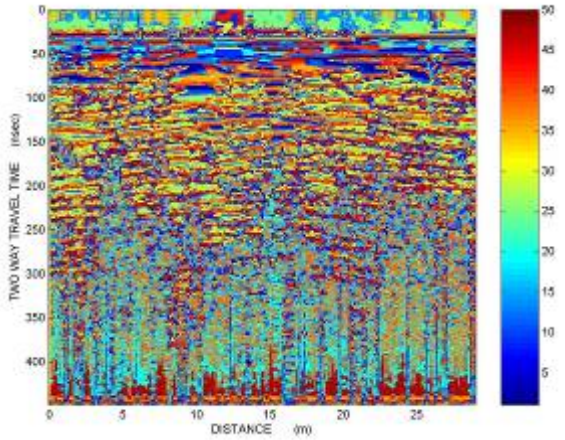
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

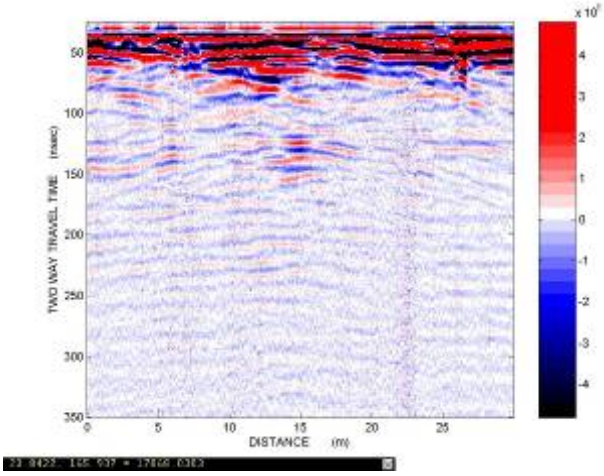


1, 2, 4

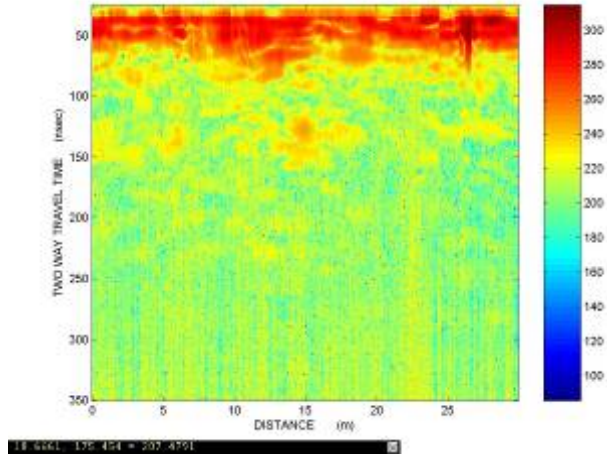


9

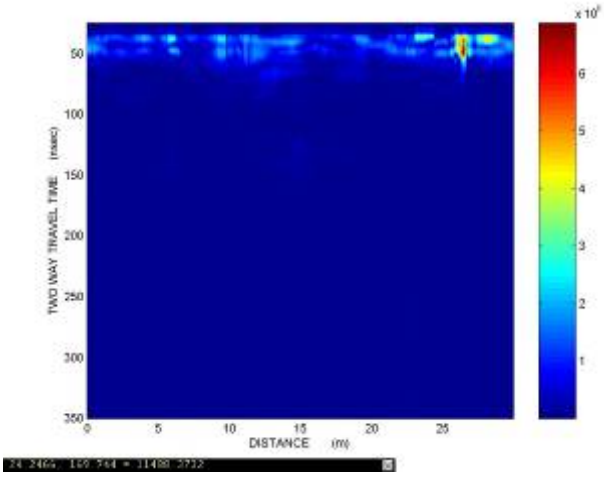
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 03



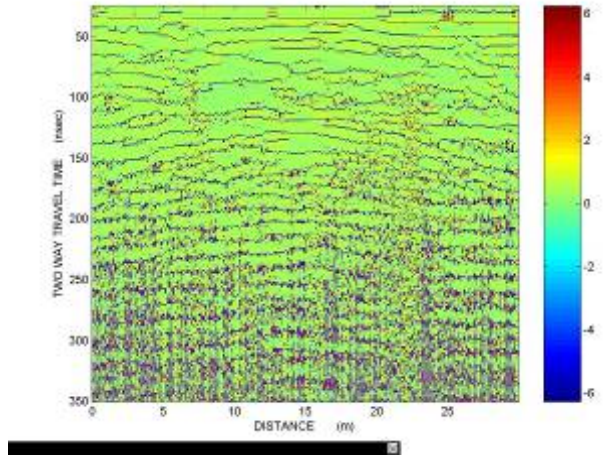
1, 2, 3



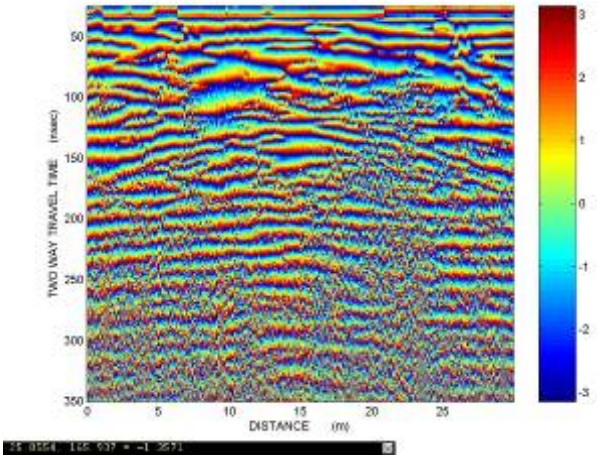
1, 2, 3, 4



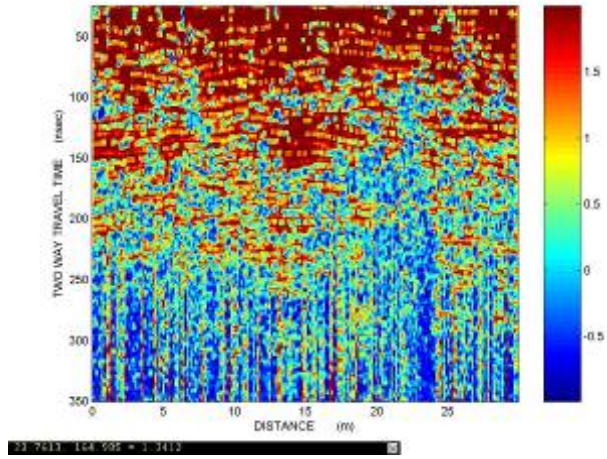
1, 2, 3, 5



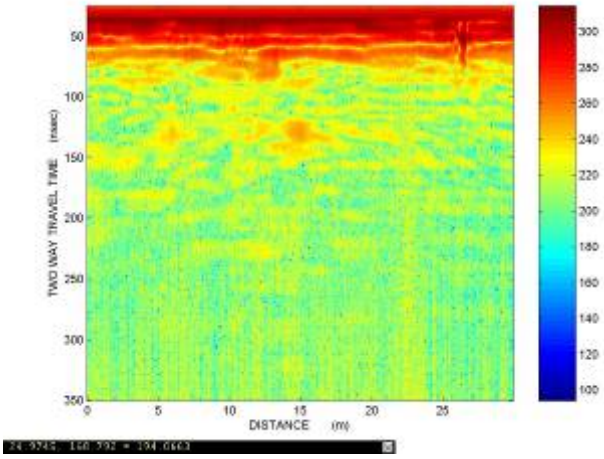
1, 2, 3, 6



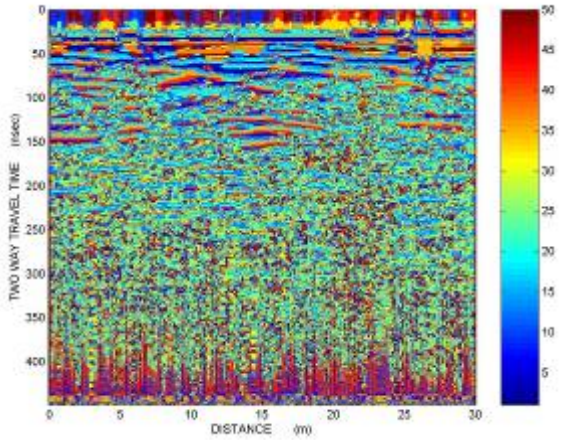
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

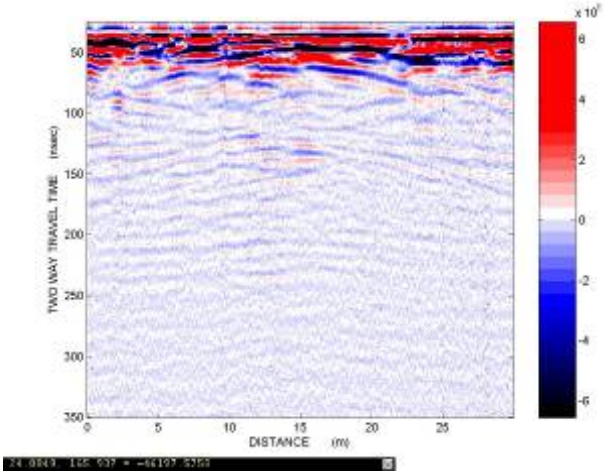


1, 2, 4

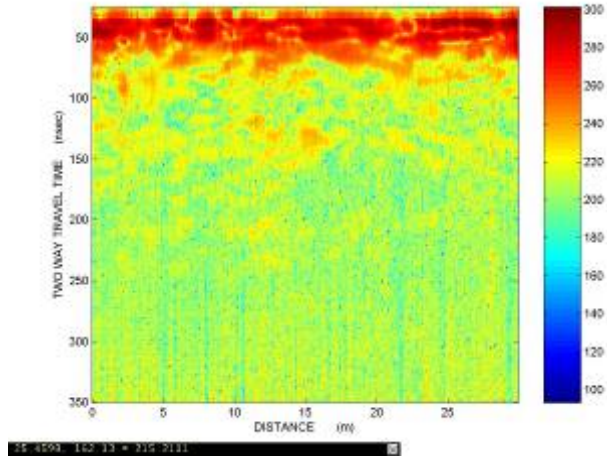


9

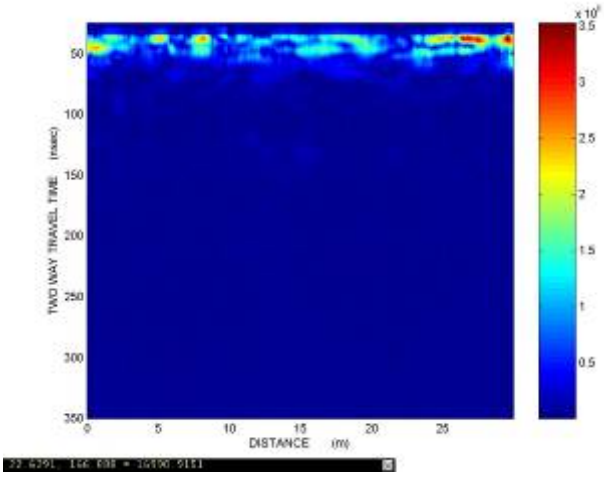
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 04



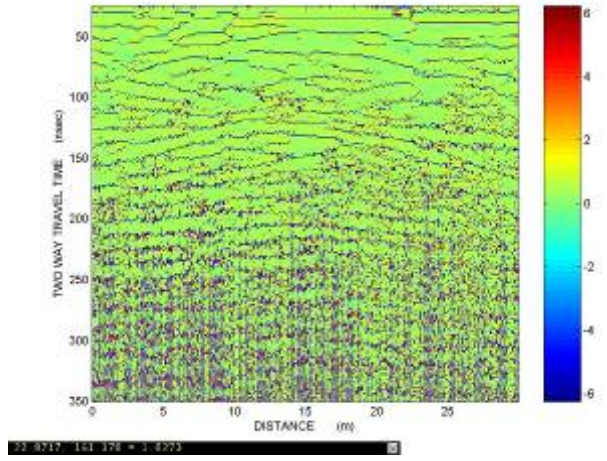
1, 2, 3



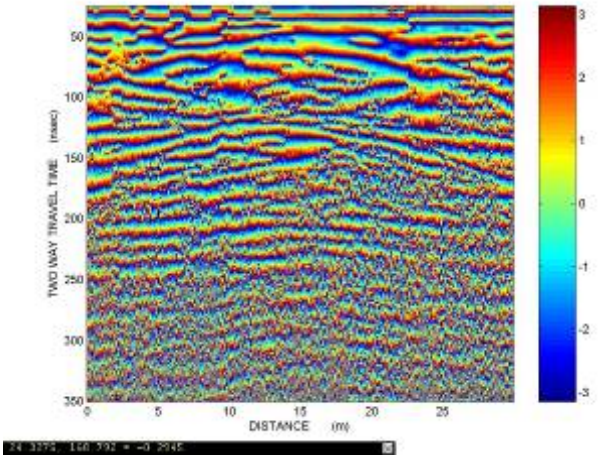
1, 2, 3, 4



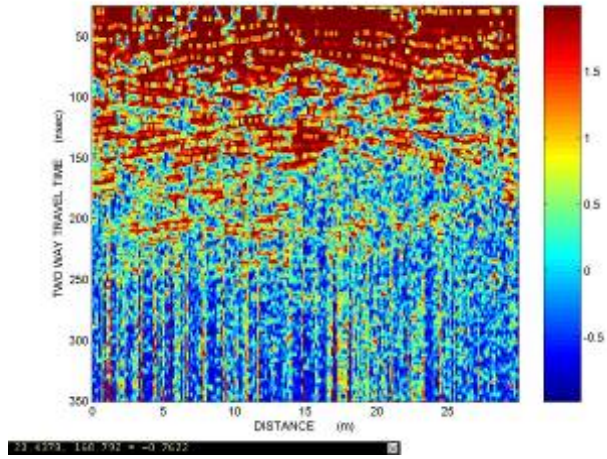
1, 2, 3, 5



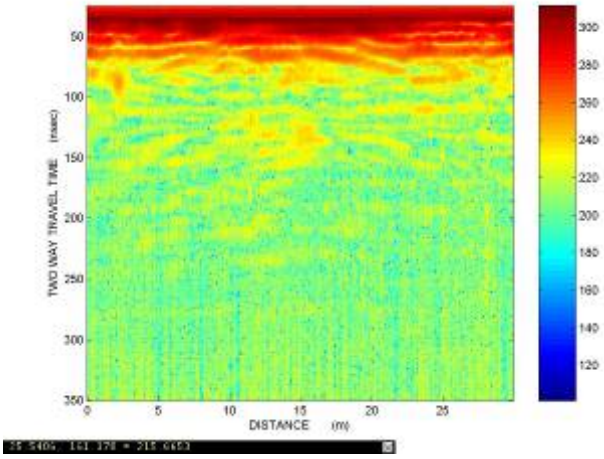
1, 2, 3, 6



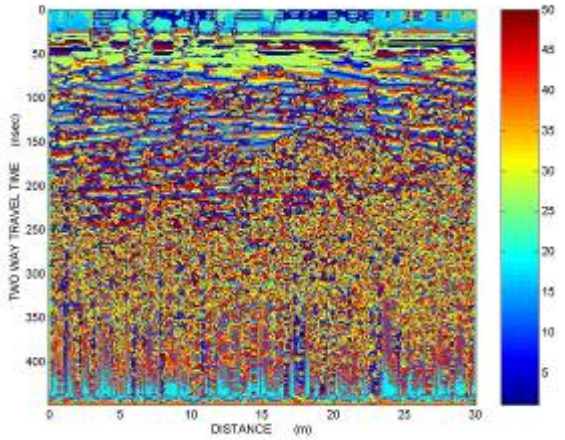
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

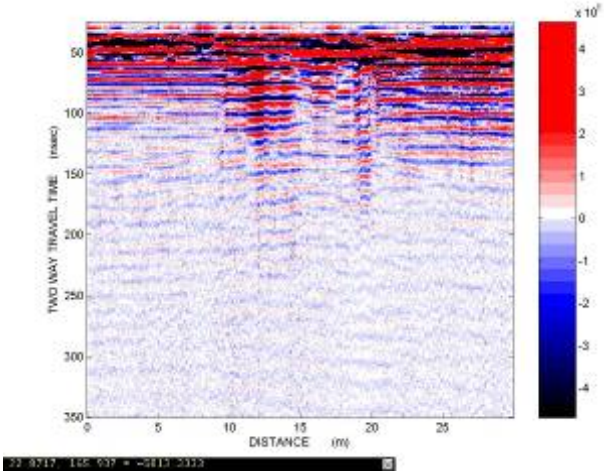


1, 2, 4

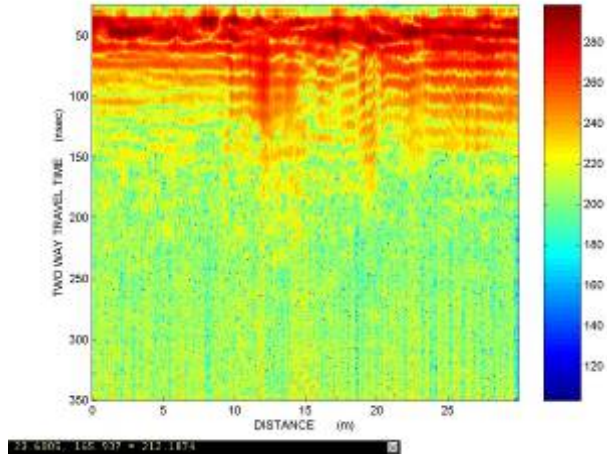


9

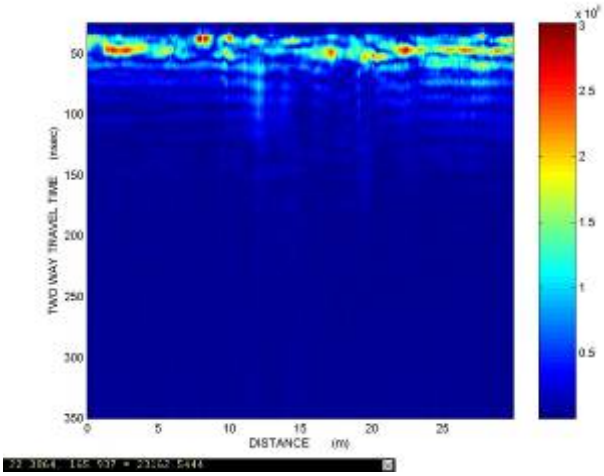
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 05



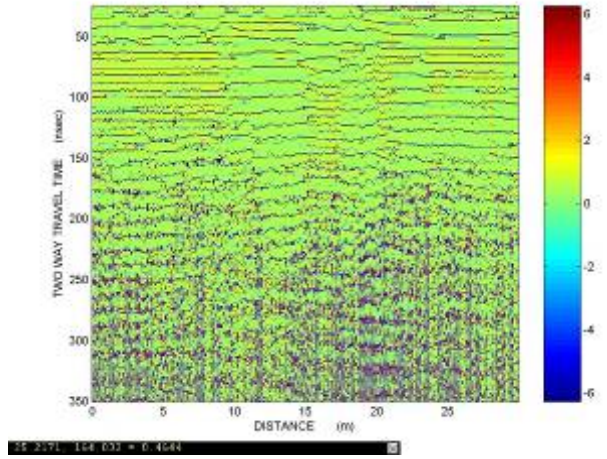
1, 2, 3



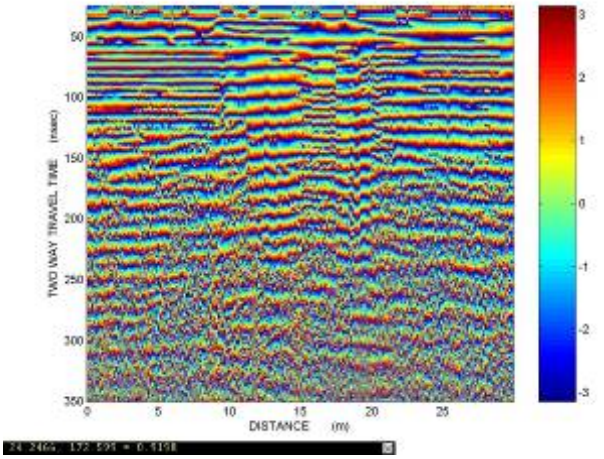
1, 2, 3, 4



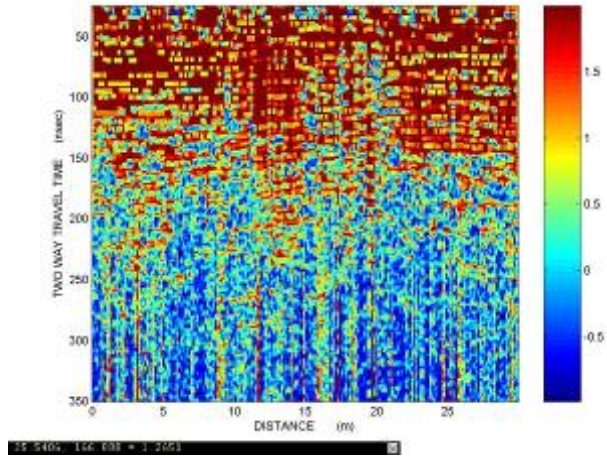
1, 2, 3, 5



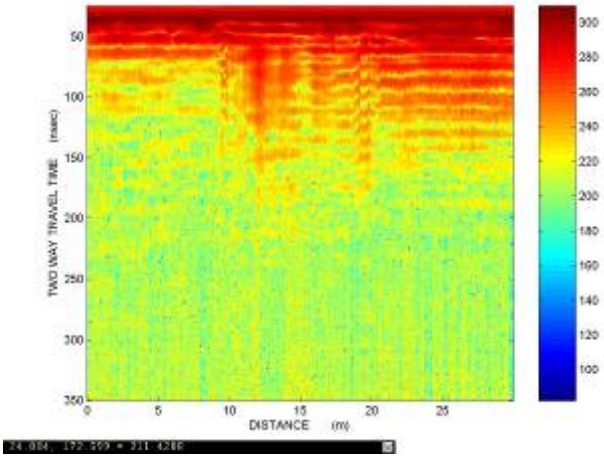
1, 2, 3, 6



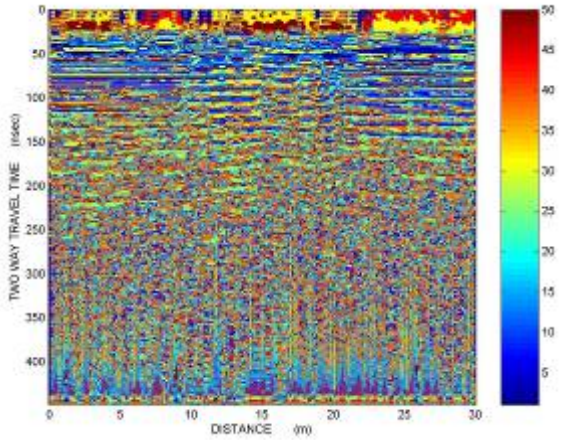
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

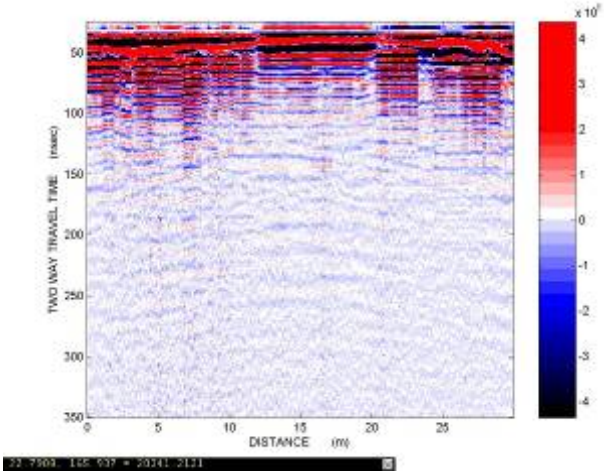


1, 2, 4

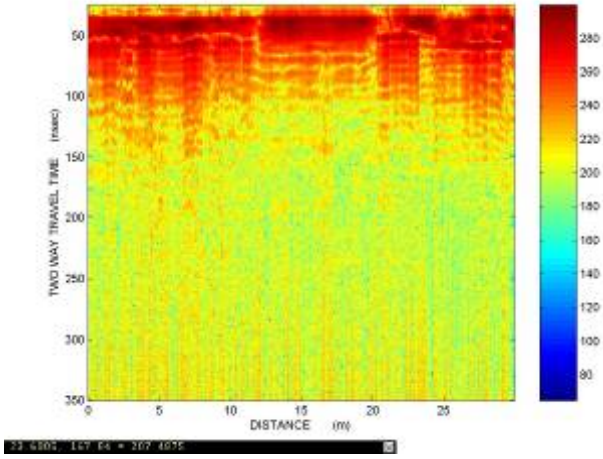


9

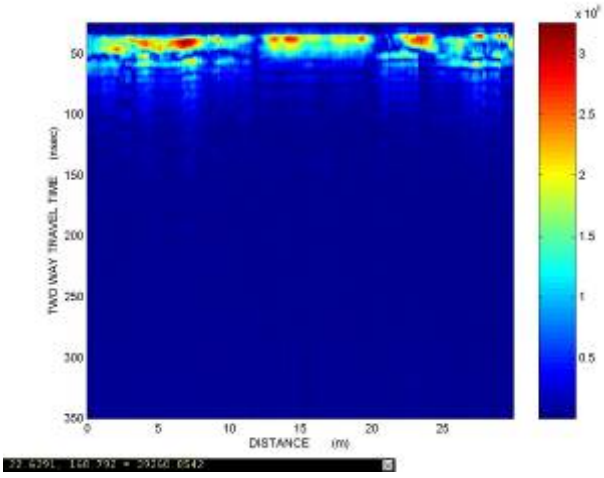
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 06



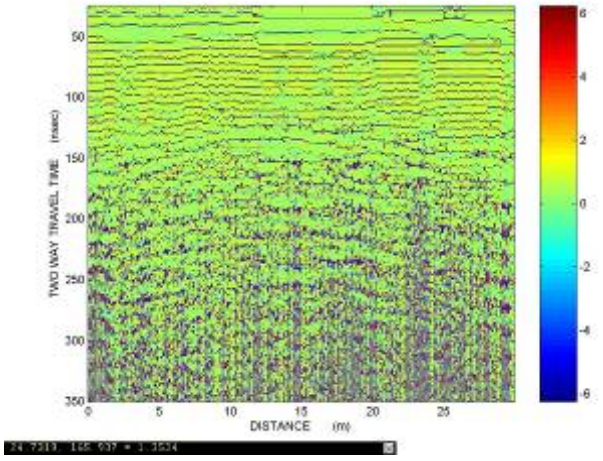
1, 2, 3



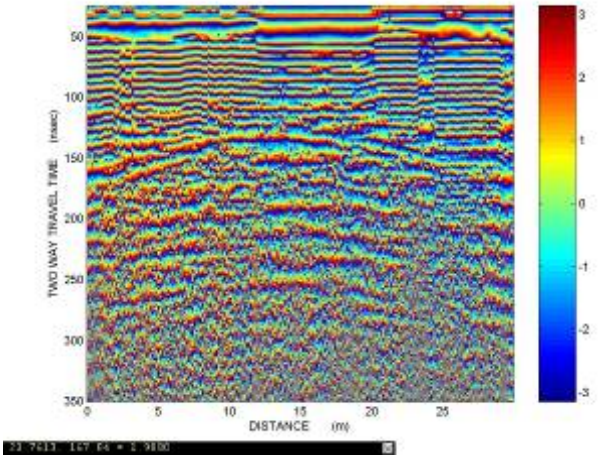
1, 2, 3, 4



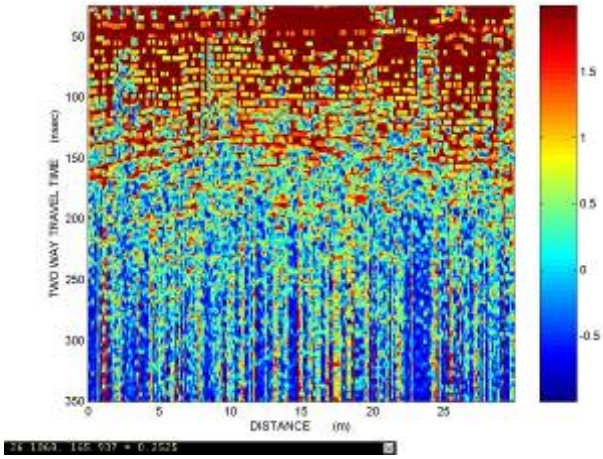
1, 2, 3, 5



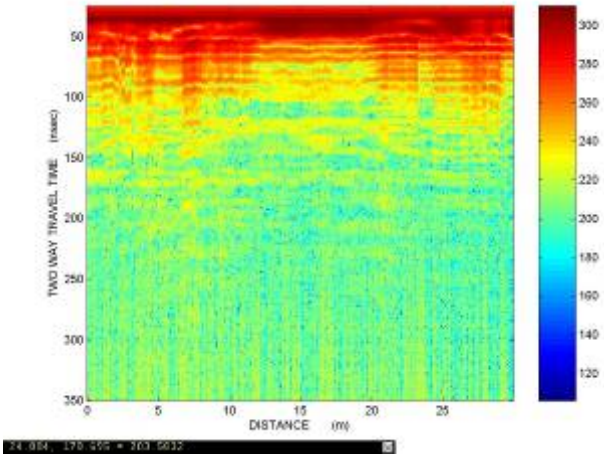
1, 2, 3, 6



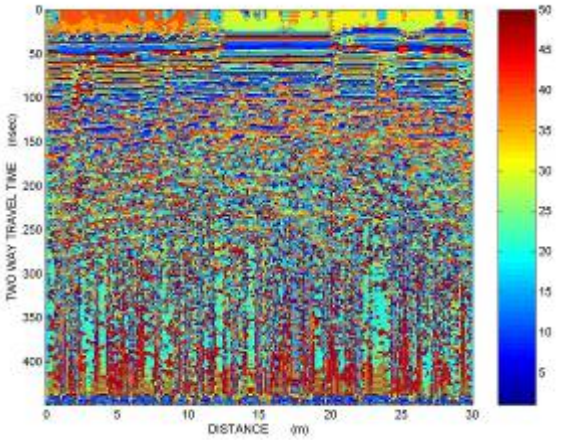
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

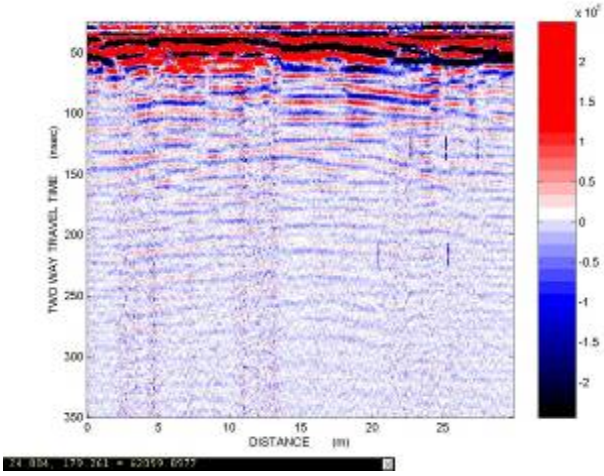


1, 2, 4

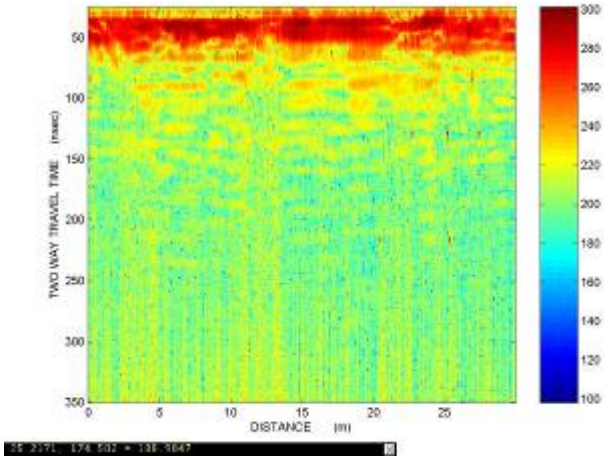


9

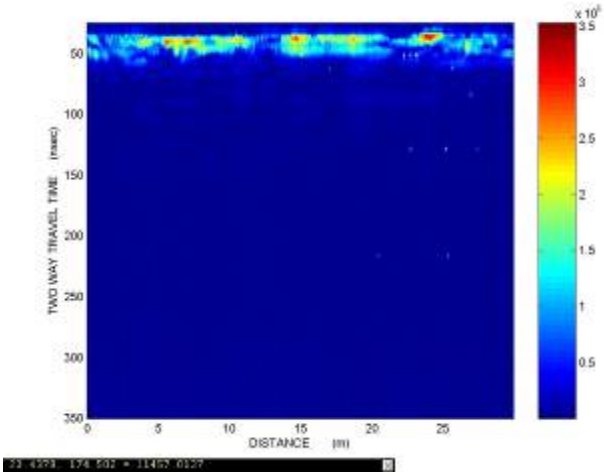
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 07



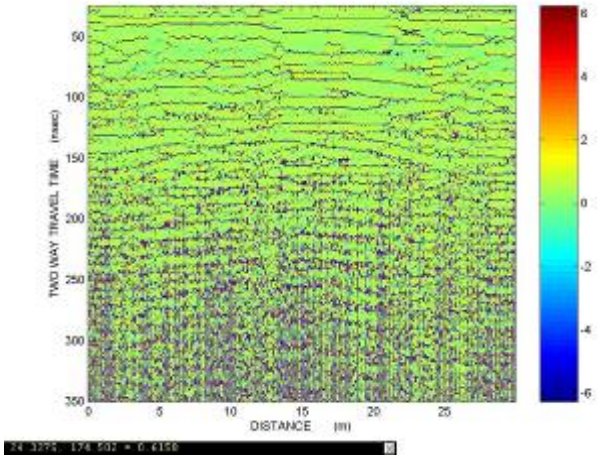
1, 2, 3



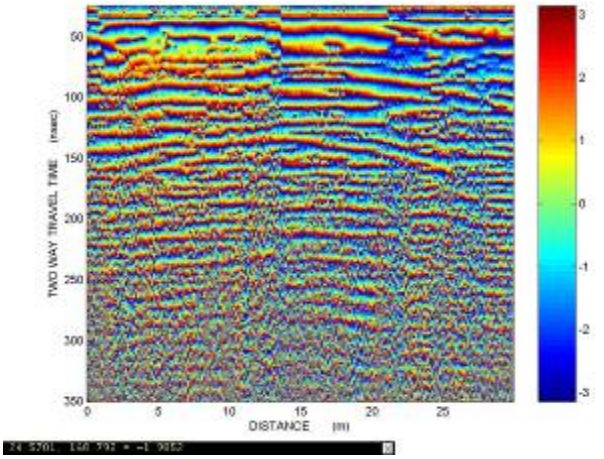
1, 2, 3, 4



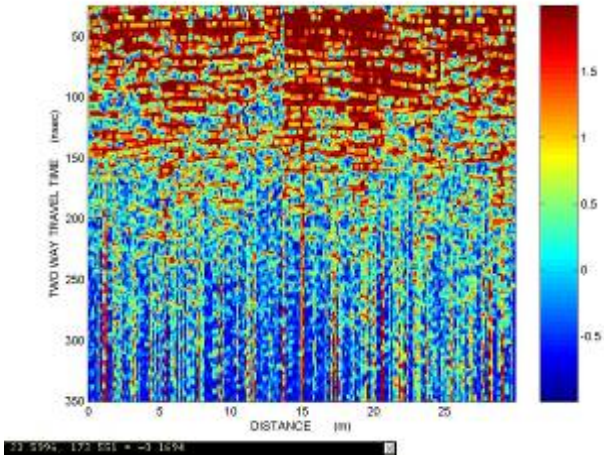
1, 2, 3, 5



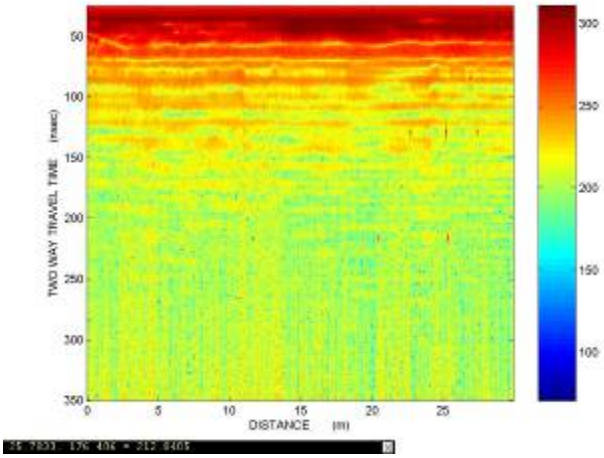
1, 2, 3, 6



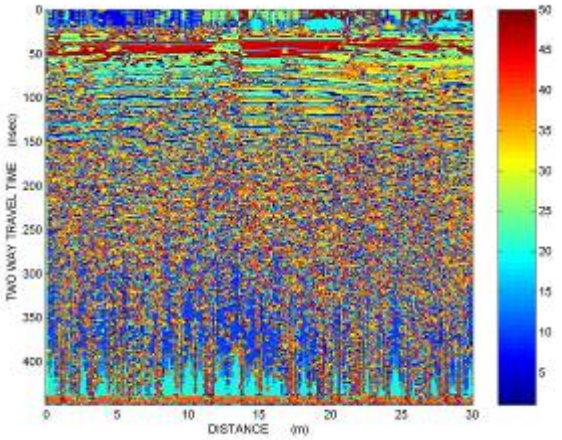
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

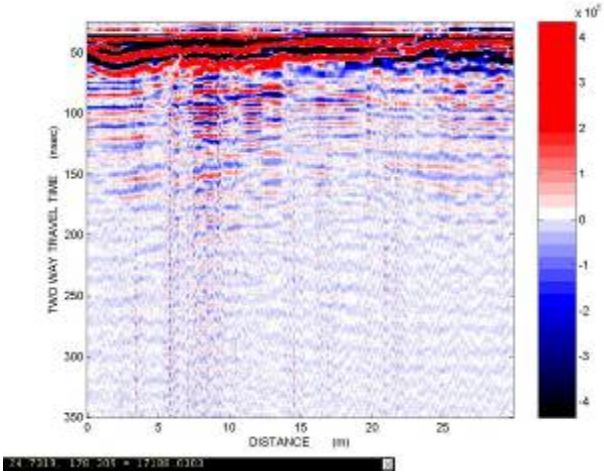


1, 2, 4

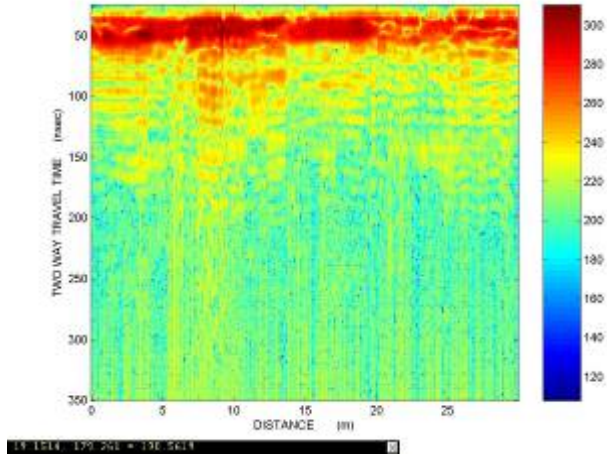


9

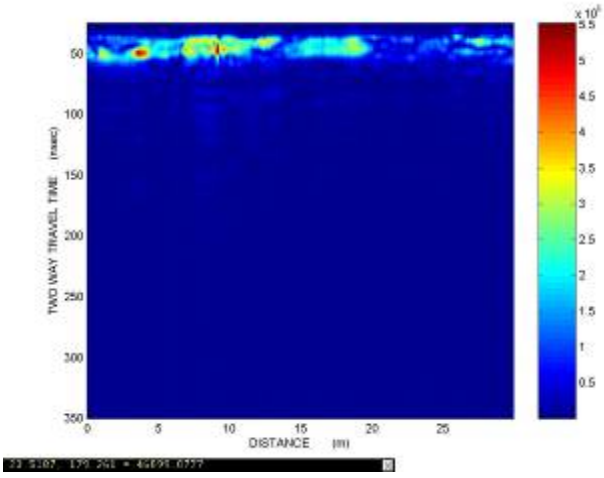
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 08



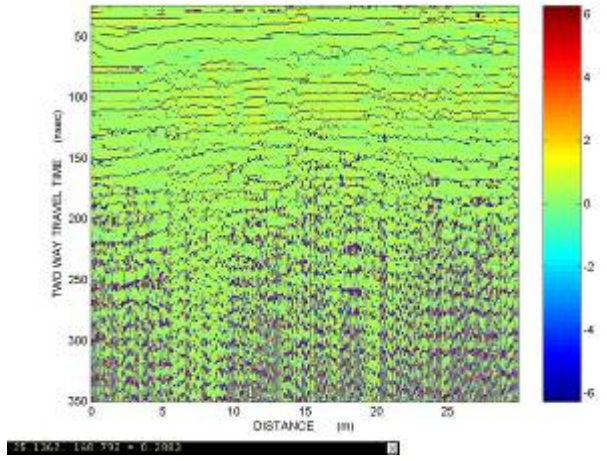
1, 2, 3



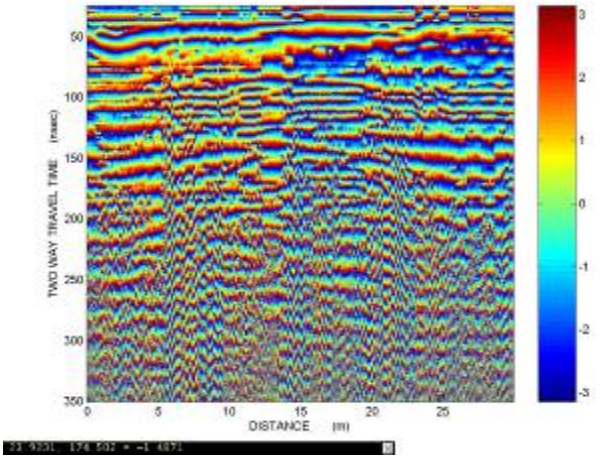
1, 2, 3, 4



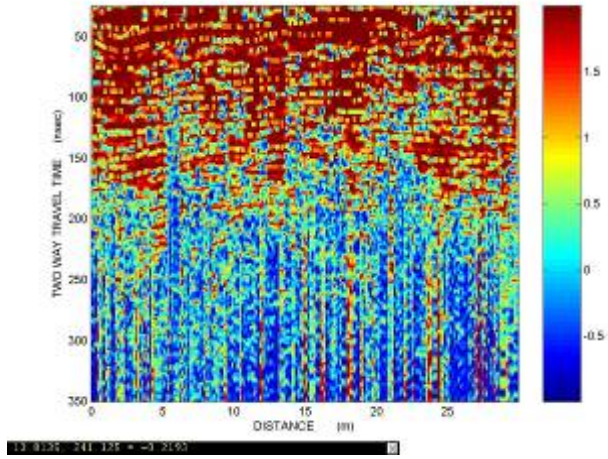
1, 2, 3, 5



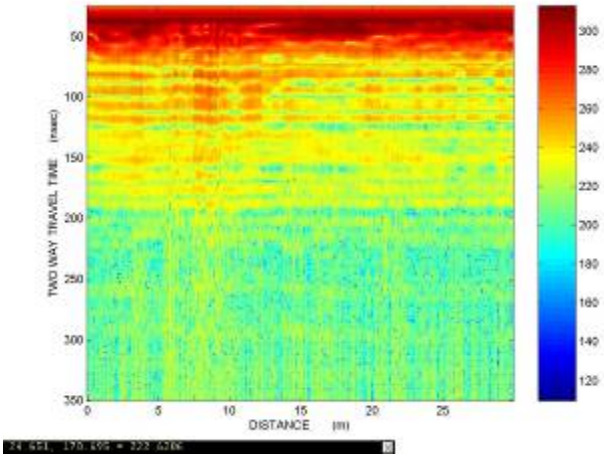
1, 2, 3, 6



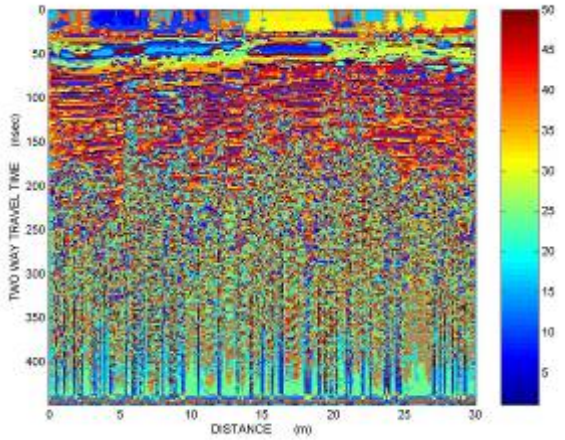
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

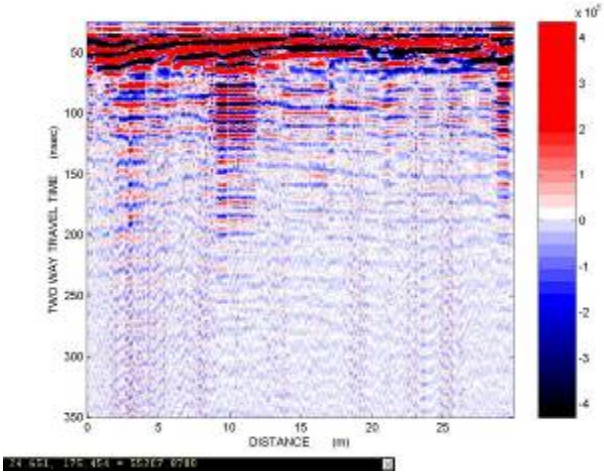


1, 2, 4

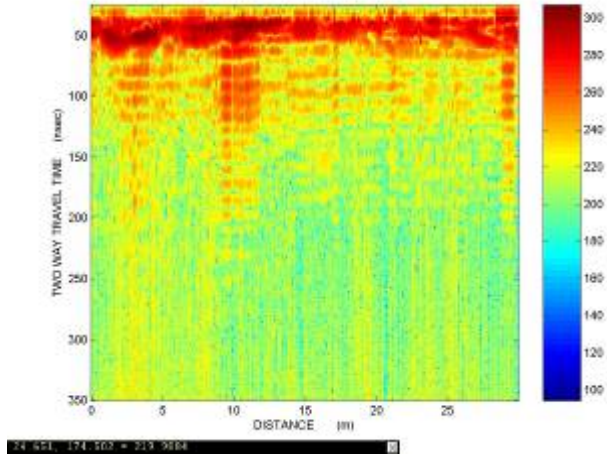


9

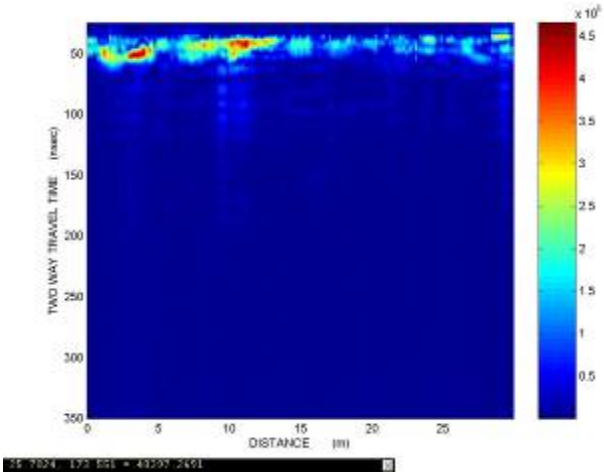
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 09



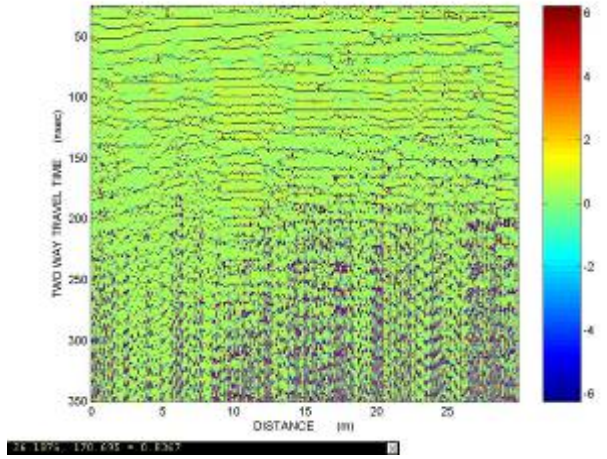
1, 2, 3



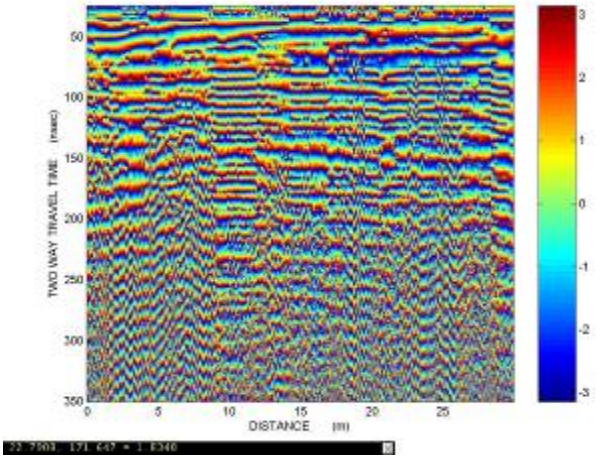
1, 2, 3, 4



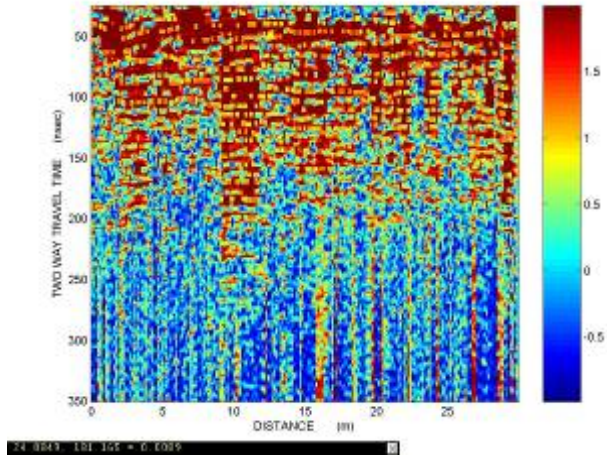
1, 2, 3, 5



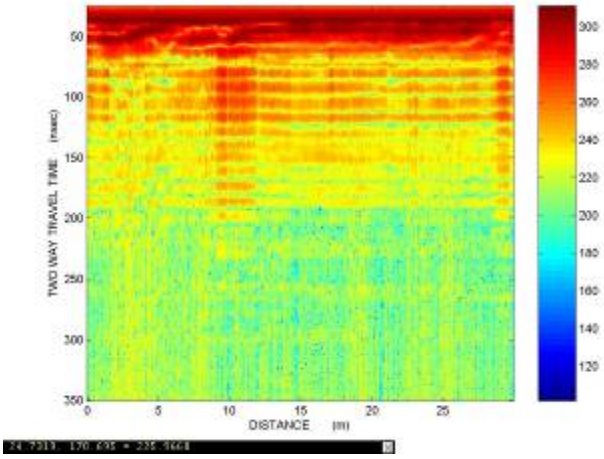
1, 2, 3, 6



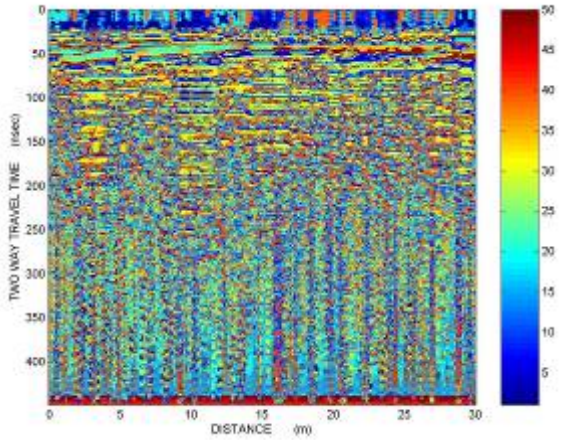
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

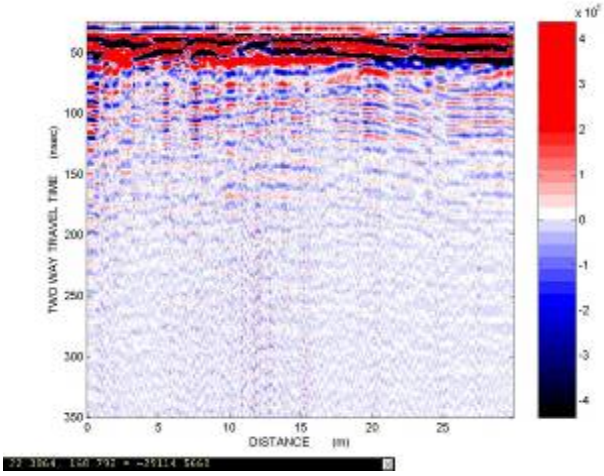


1, 2, 4

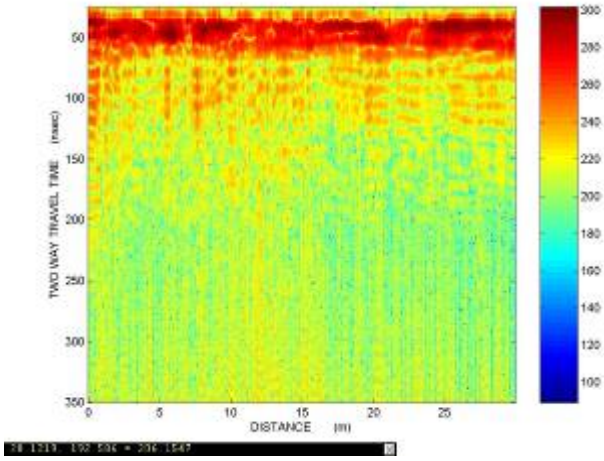


9

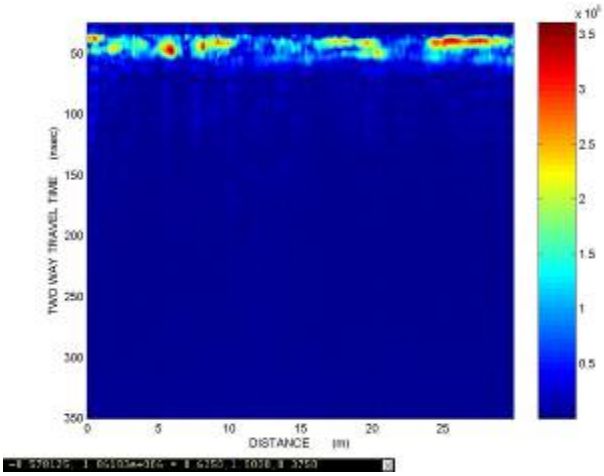
Περιοχή Β, Γραμμή μελέτης 10



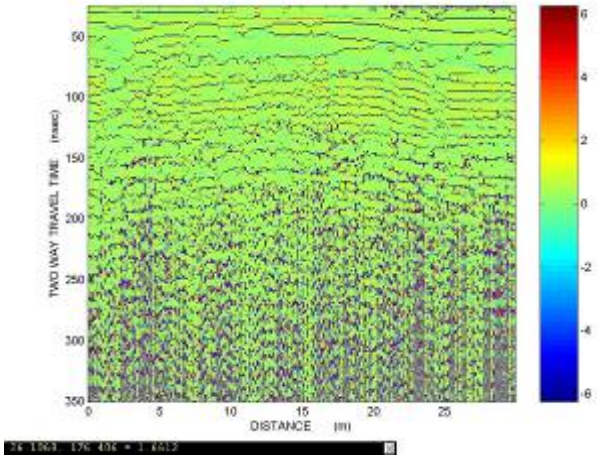
1, 2, 3



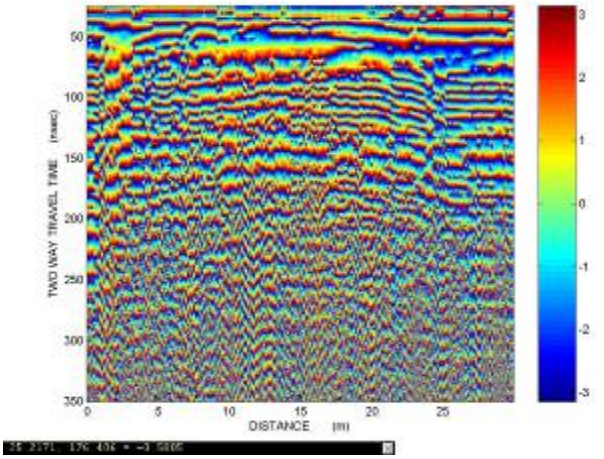
1, 2, 3, 4



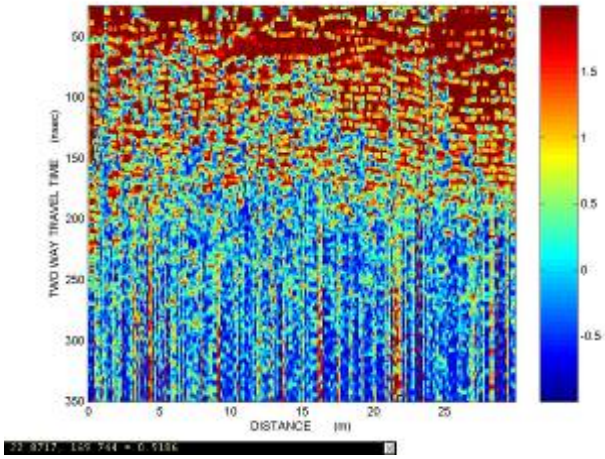
1, 2, 3, 5



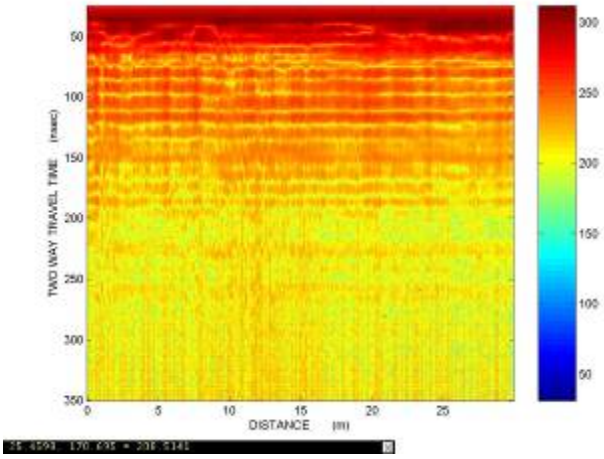
1, 2, 3, 6



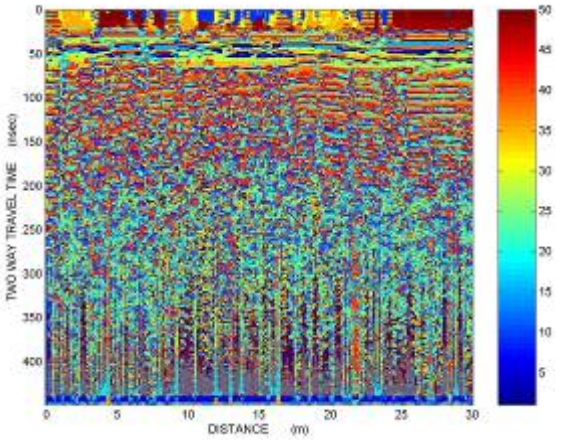
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

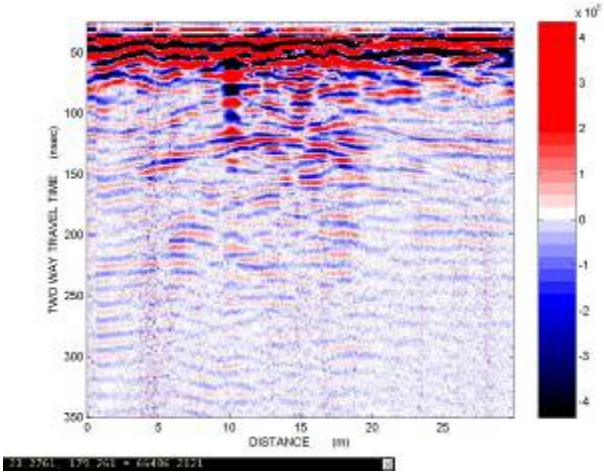


1, 2, 4

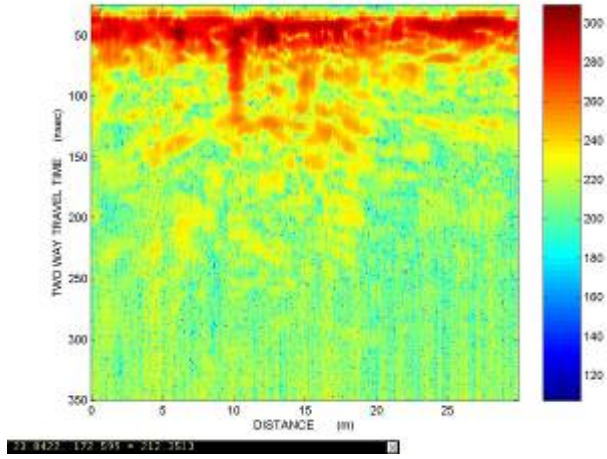


9

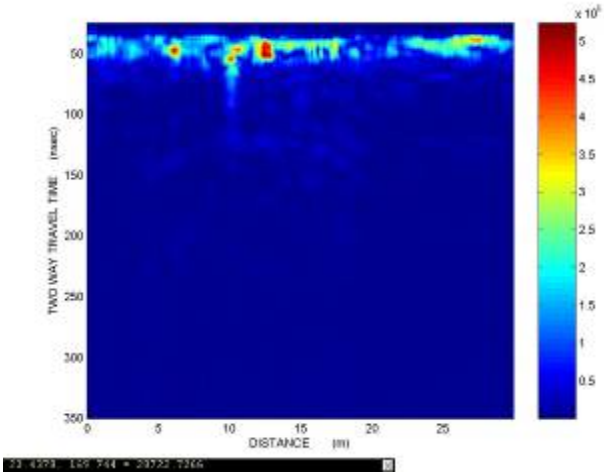
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 01



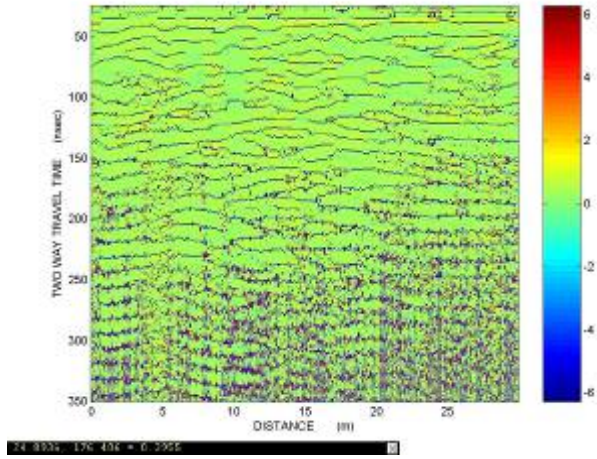
1, 2, 3



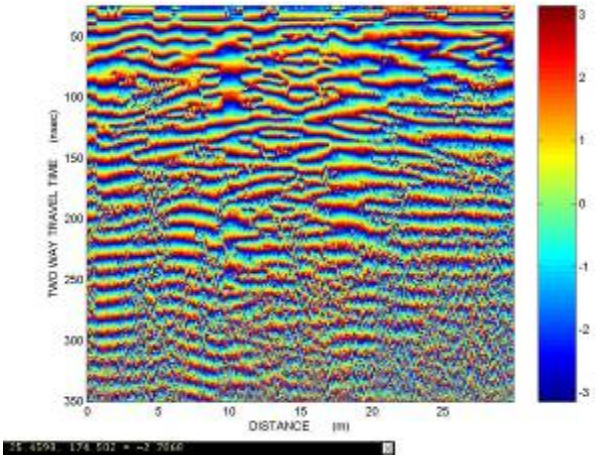
1, 2, 3, 4



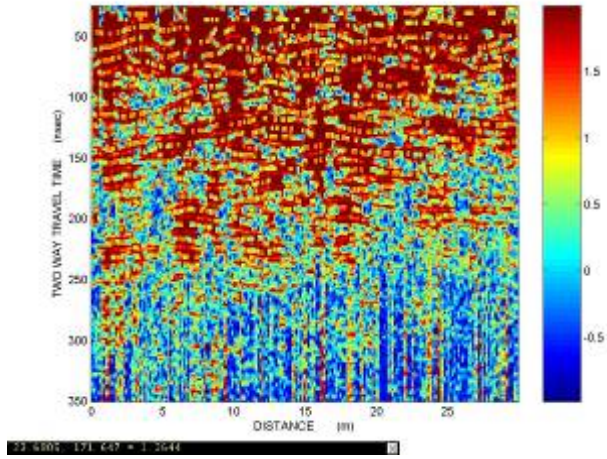
1, 2, 3, 5



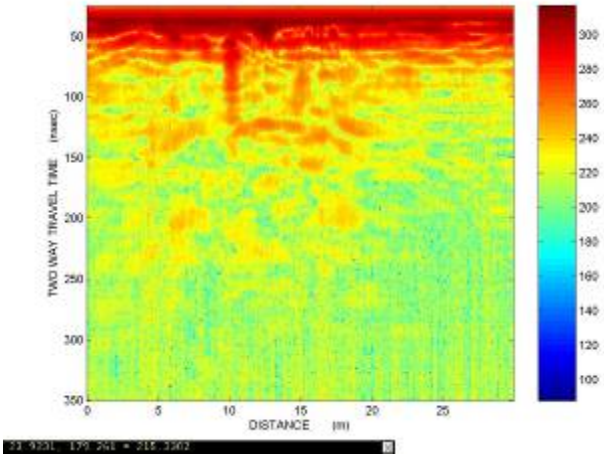
1, 2, 3, 6t



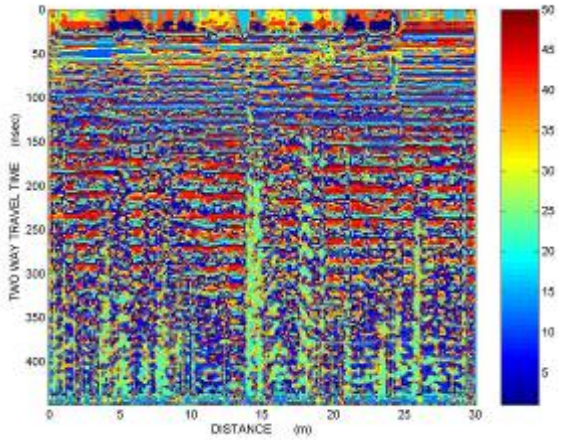
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

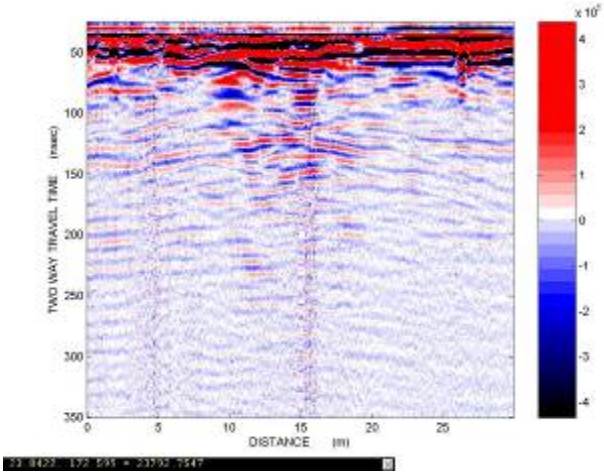


1, 2, 4

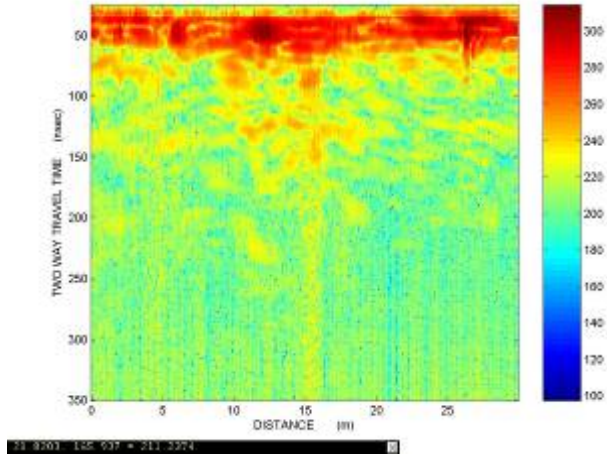


9

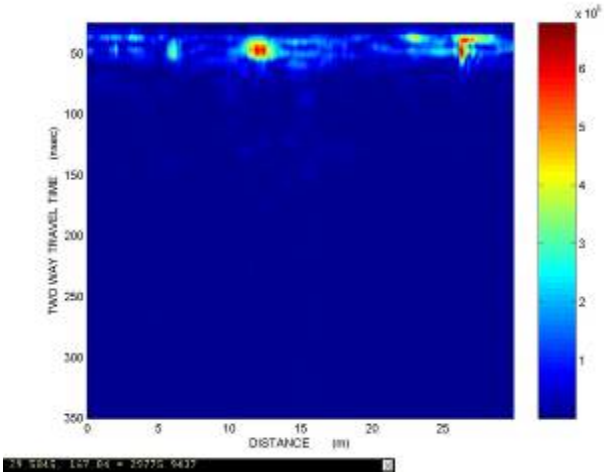
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 02



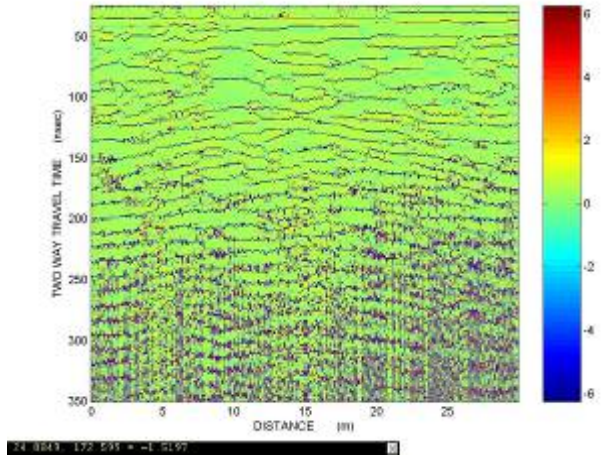
1, 2, 3



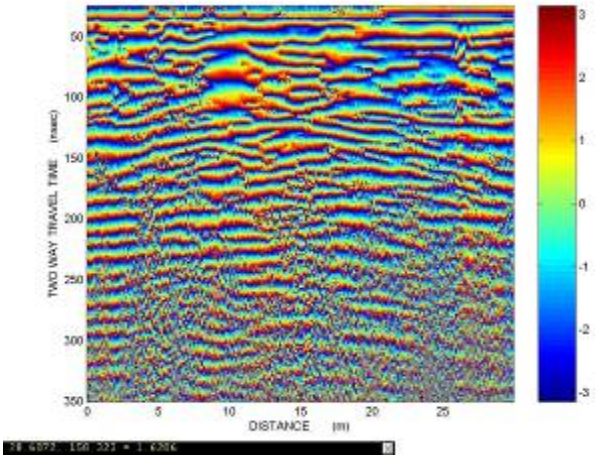
1, 2, 3, 4



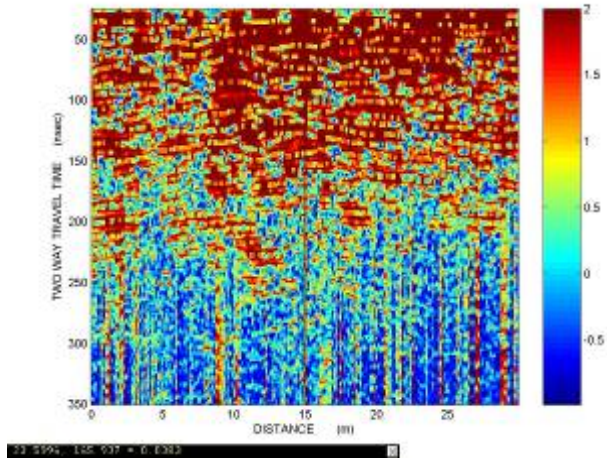
1, 2, 3, 5



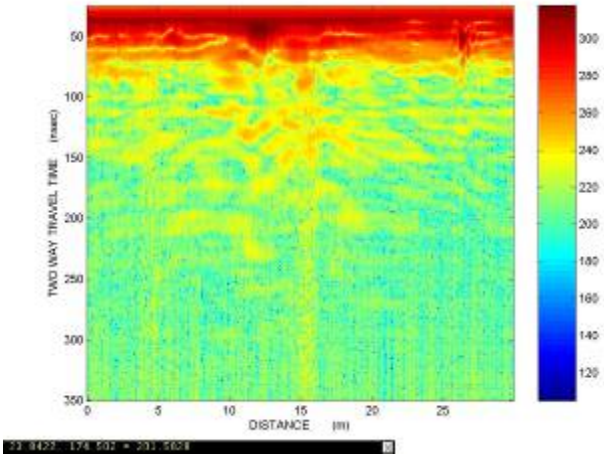
1, 2, 3, 6



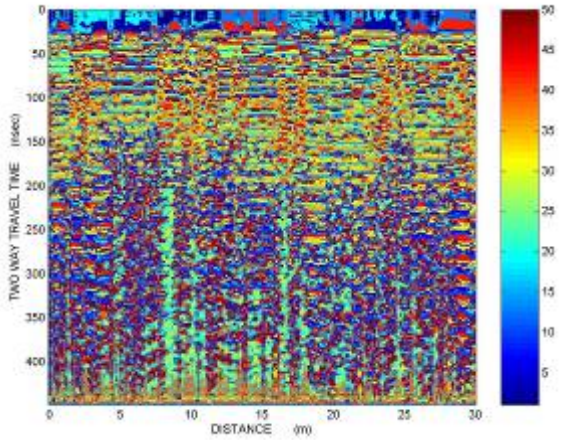
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

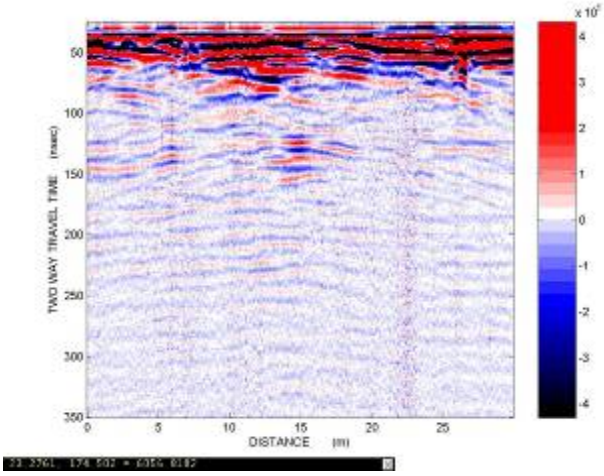


1, 2, 4

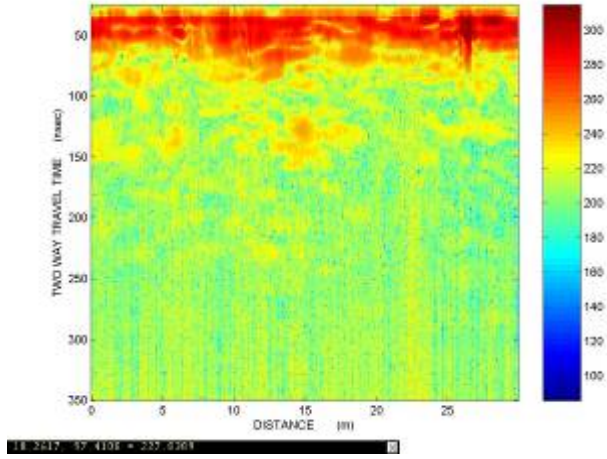


9

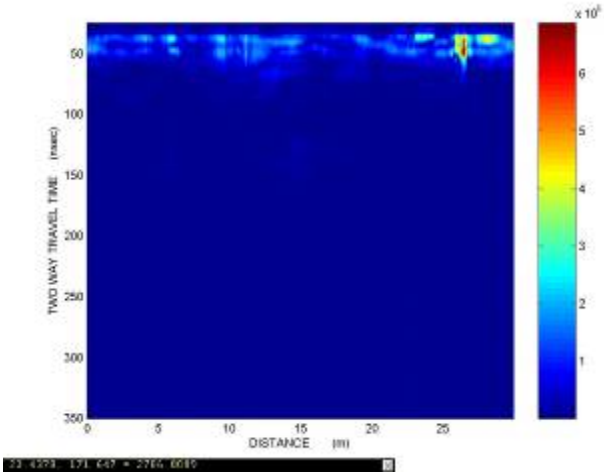
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 03



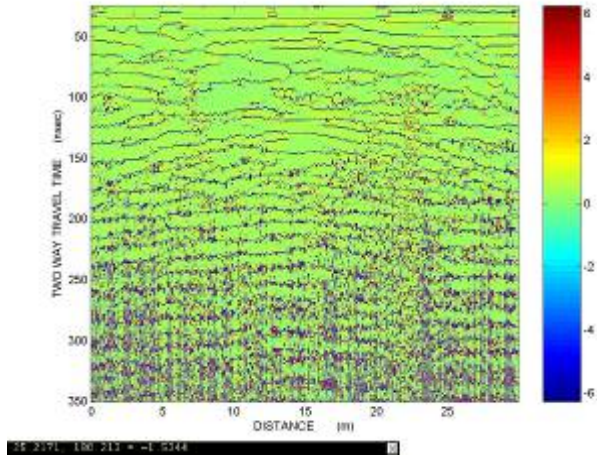
1, 2, 3



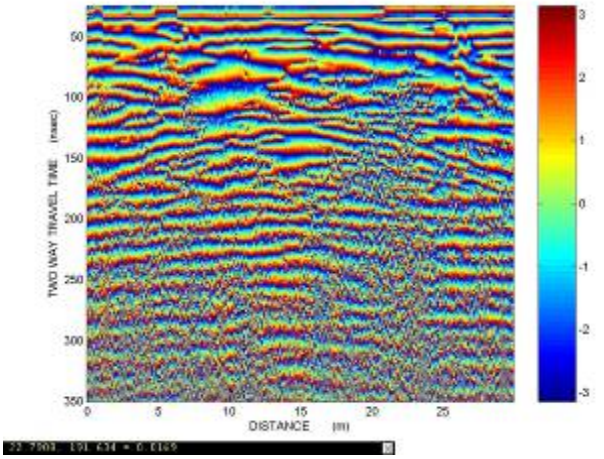
1, 2, 3, 4



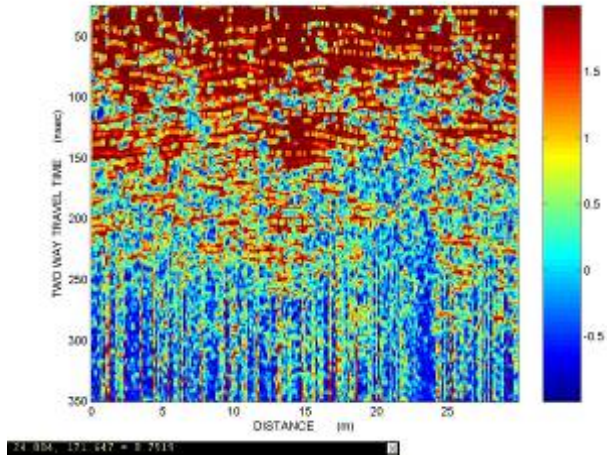
1, 2, 3, 5



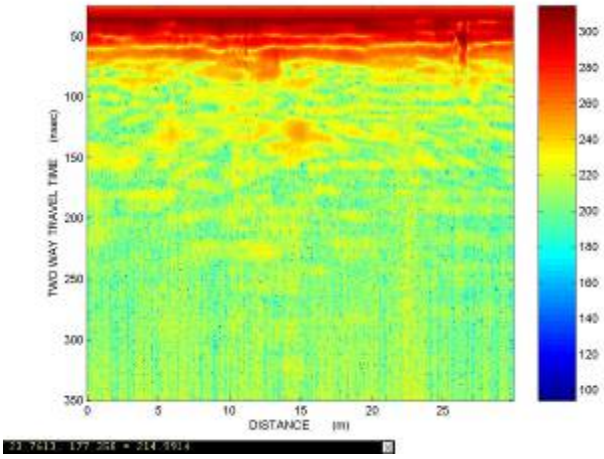
1, 2, 3, 6



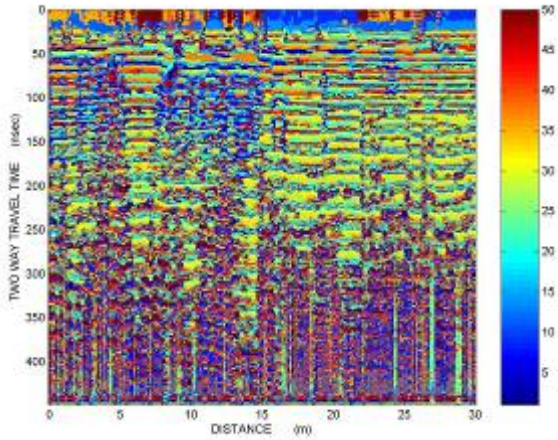
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

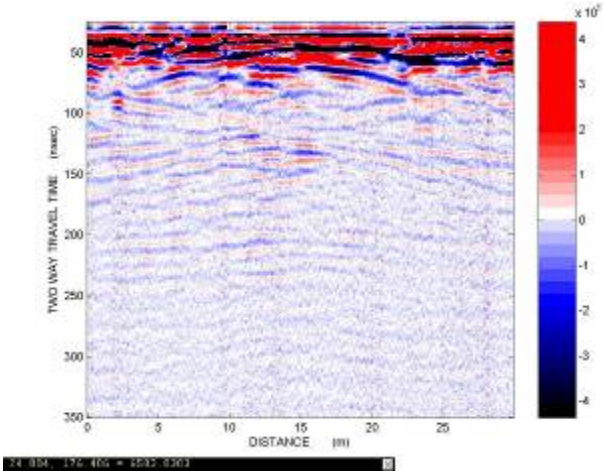


1, 2, 4

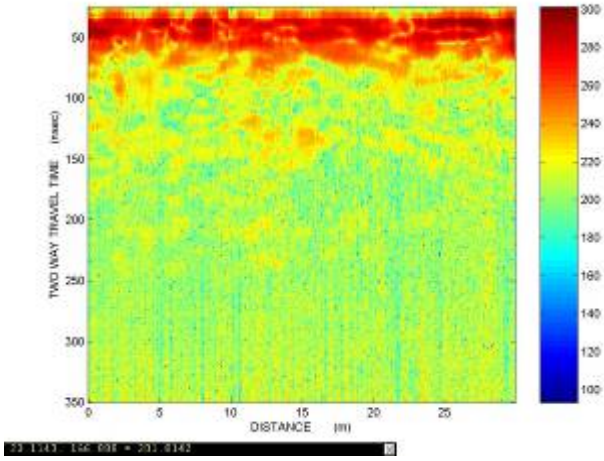


9

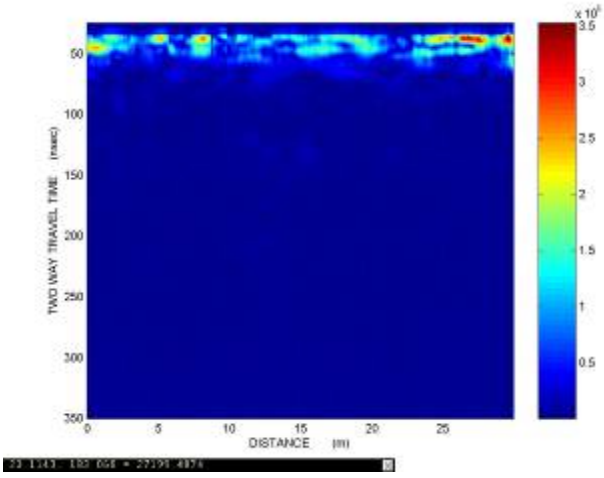
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 04



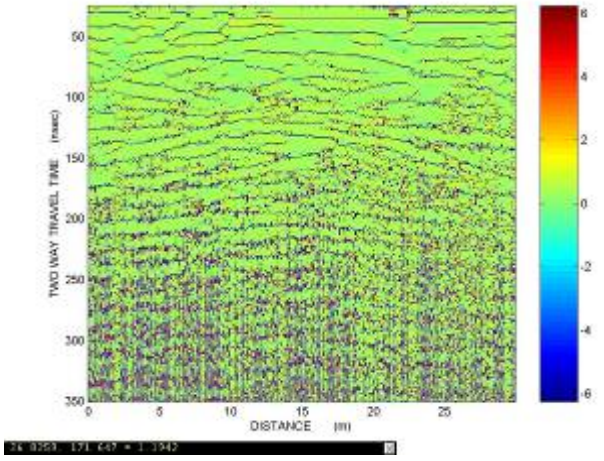
1, 2, 3



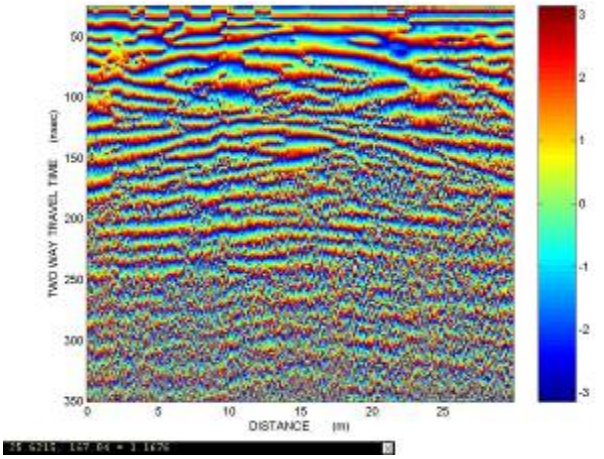
1, 2, 3, 4



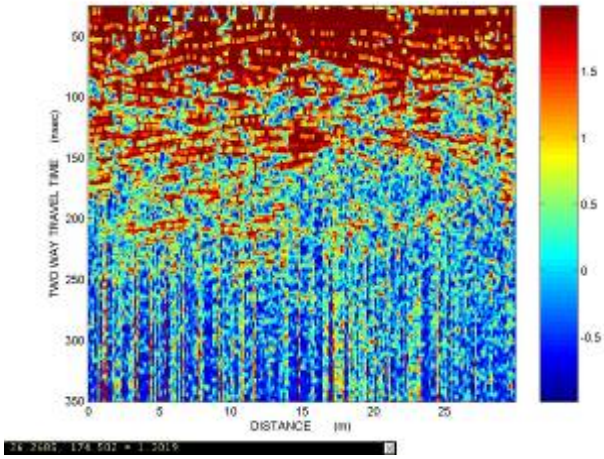
1, 2, 3, 5



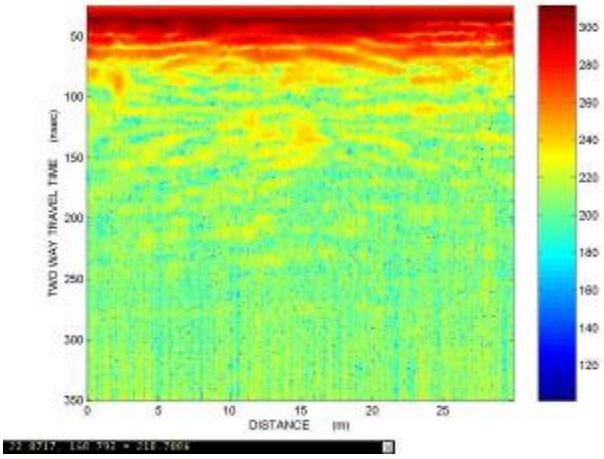
1, 2, 3, 6



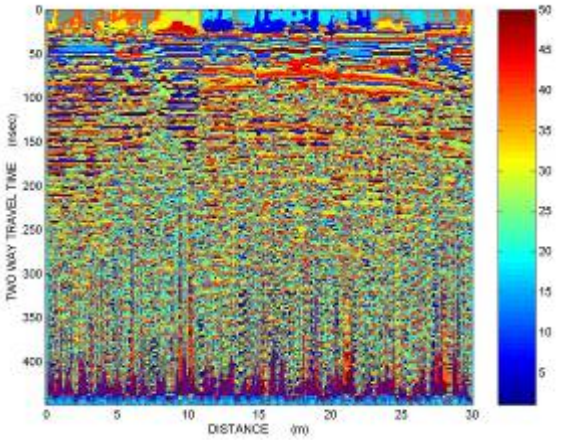
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

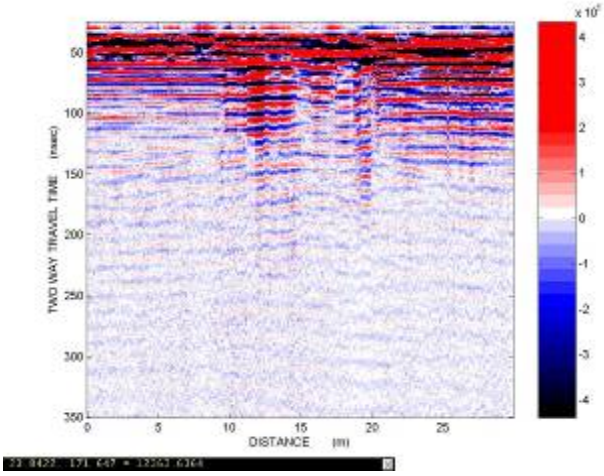


1, 2, 4

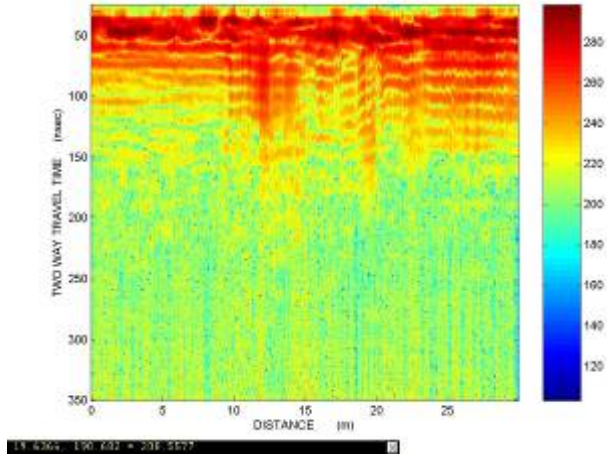


9

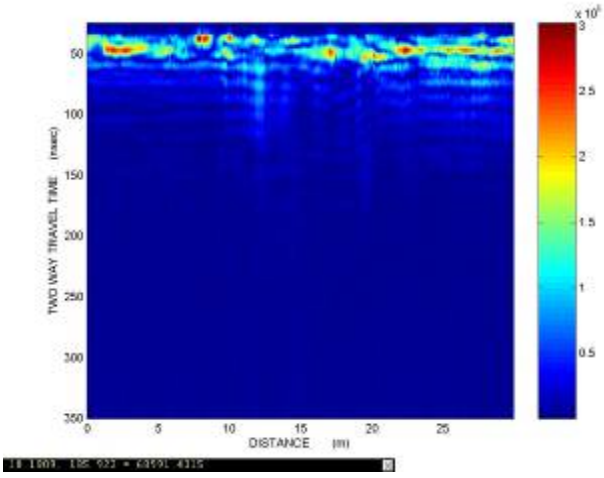
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 05



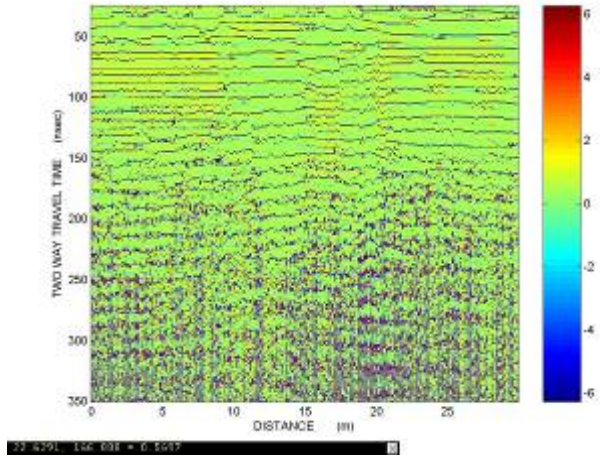
1, 2, 3



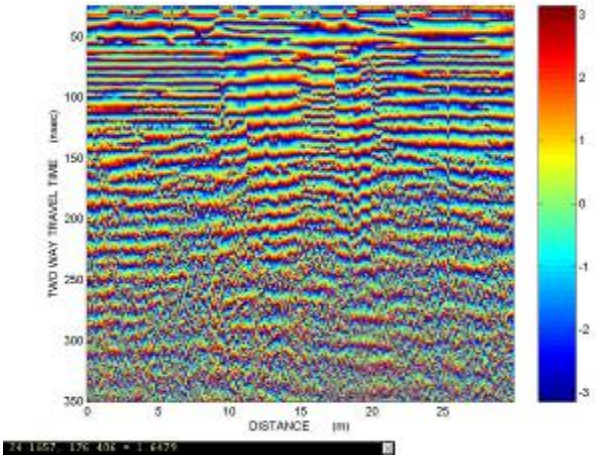
1, 2, 3, 4



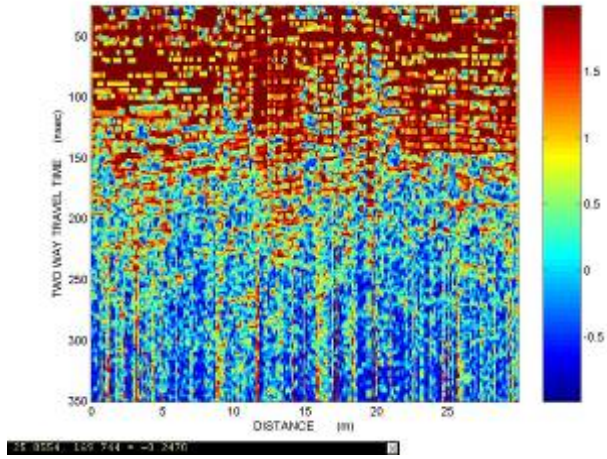
1, 2, 3, 5



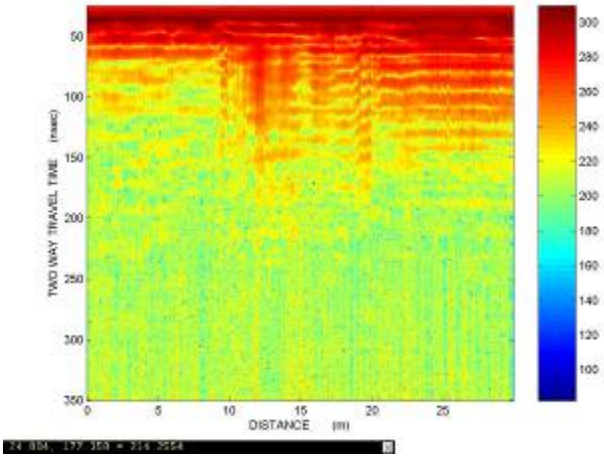
1, 2, 3, 6



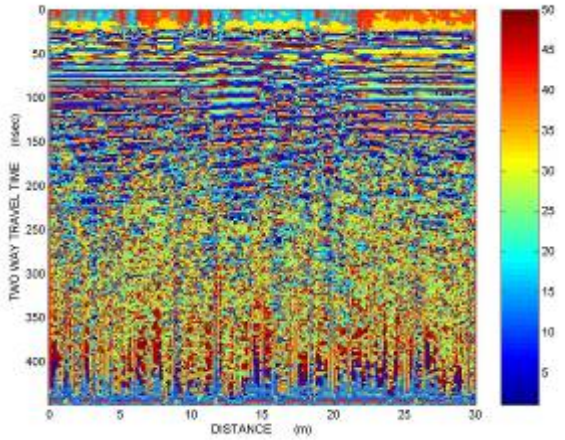
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

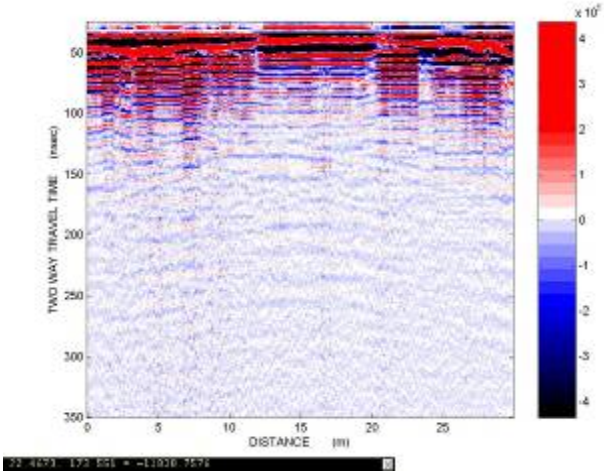


1, 2, 4

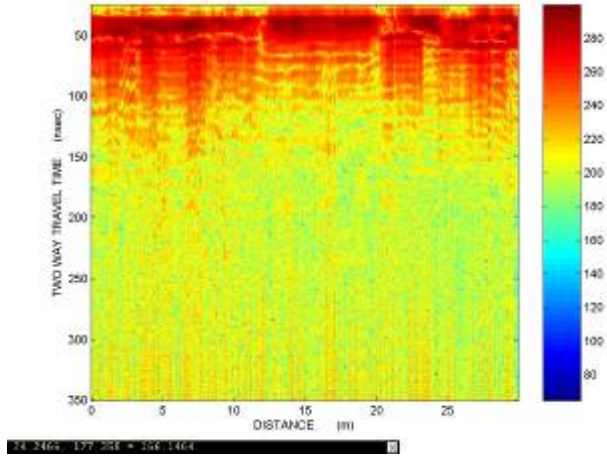


9

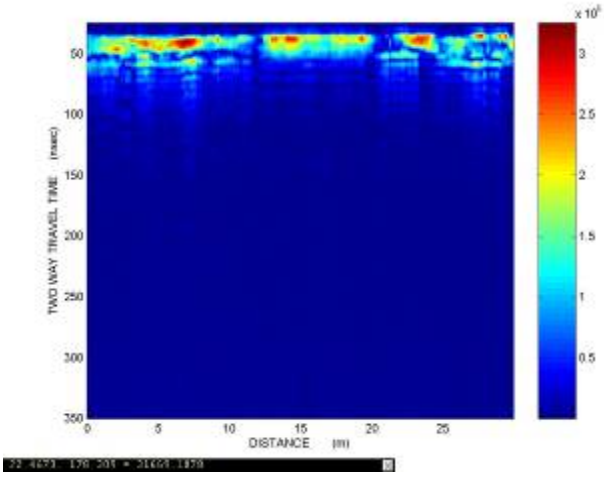
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 06



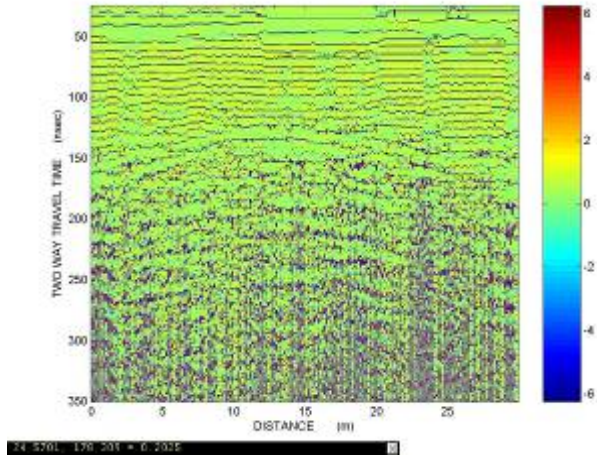
1, 2, 3



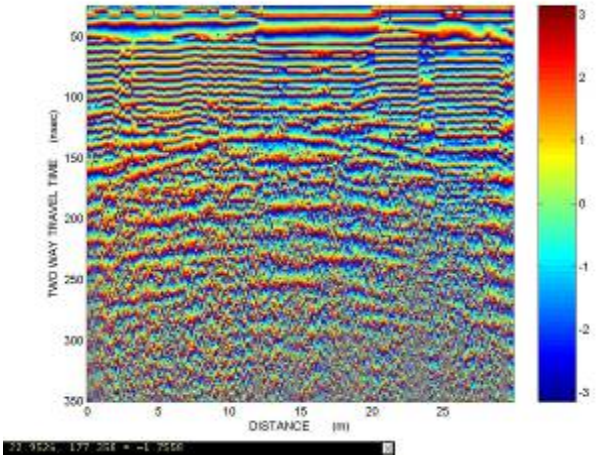
1, 2, 3, 4



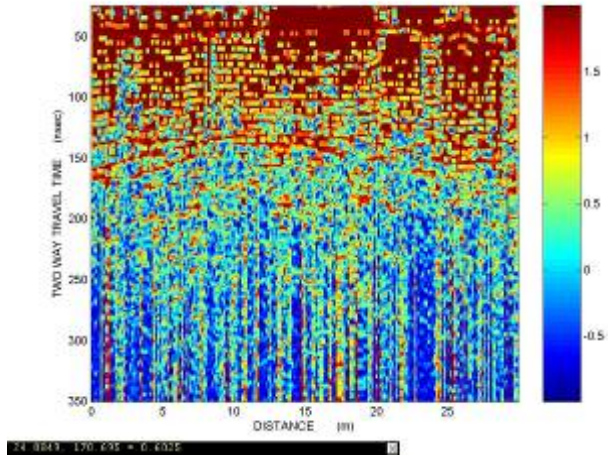
1, 2, 3, 5



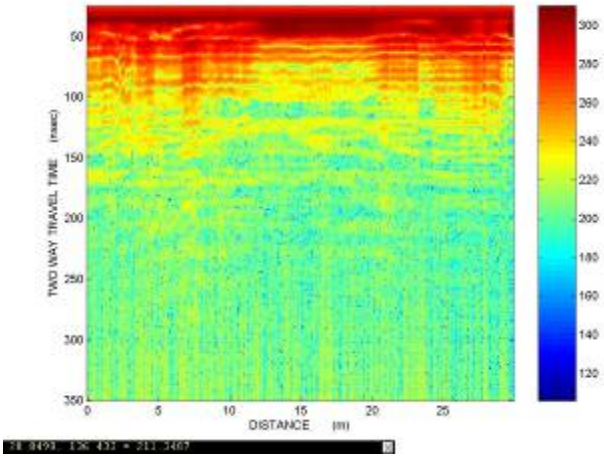
1, 2, 3, 6



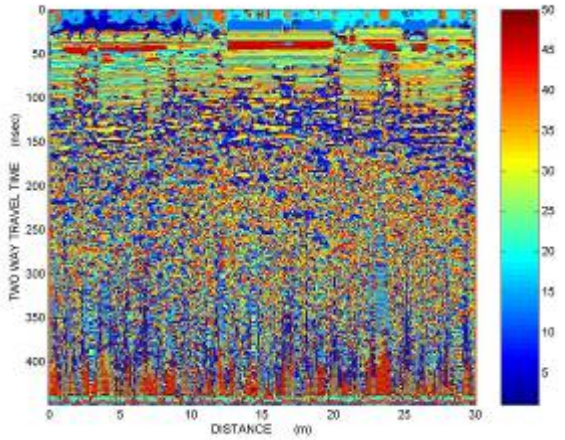
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

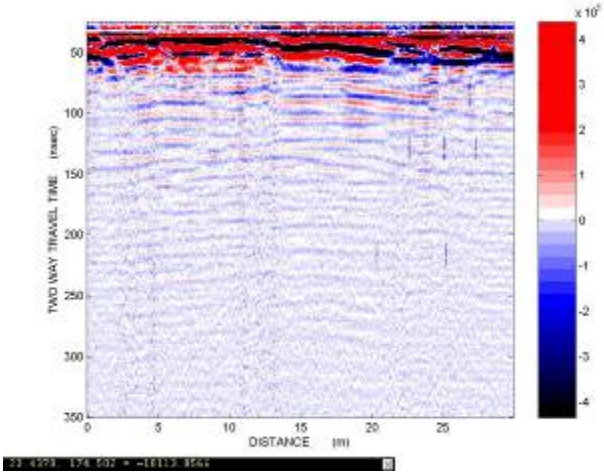


1, 2, 4

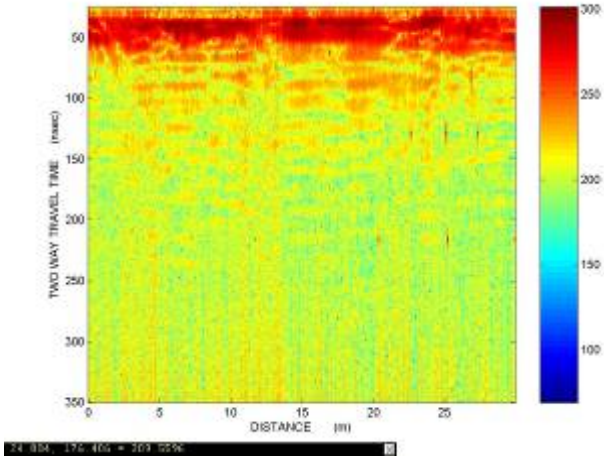


9

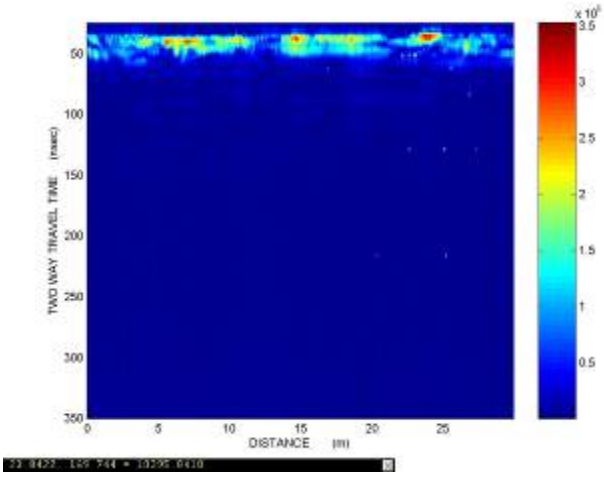
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 07



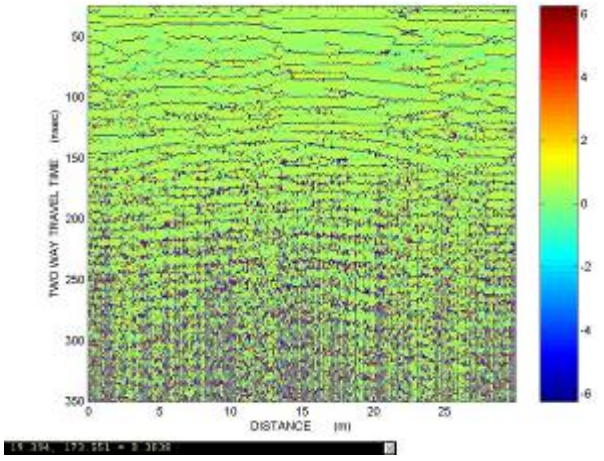
1, 2, 3



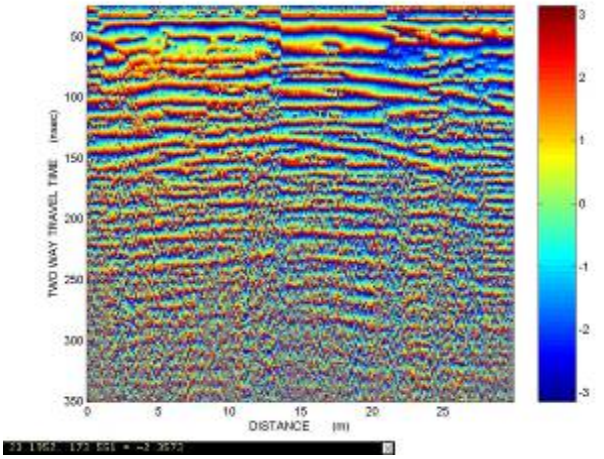
1, 2, 3, 4



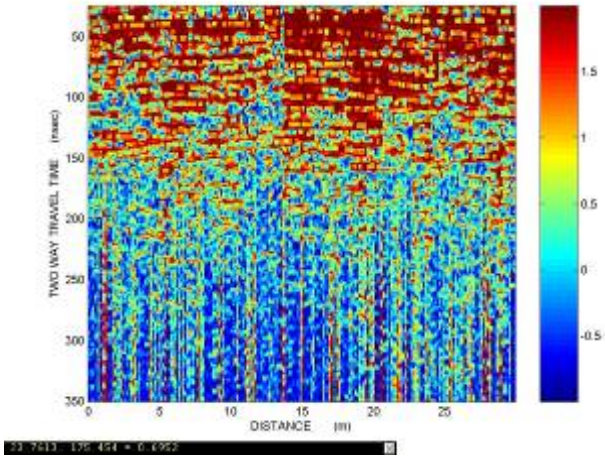
1, 2, 3, 5



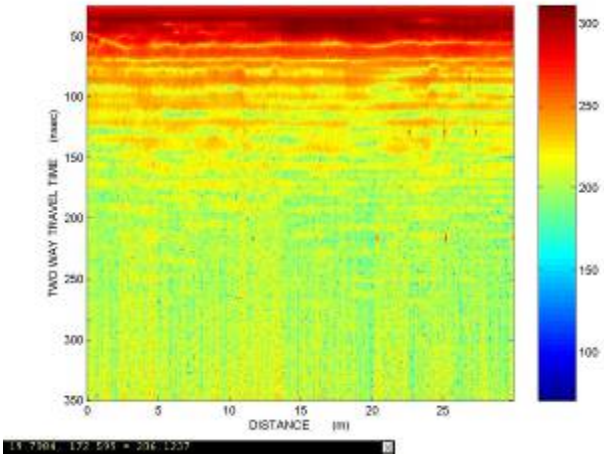
1, 2, 3, 6



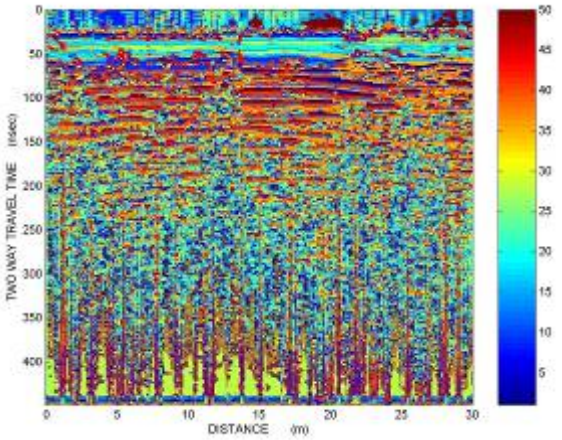
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

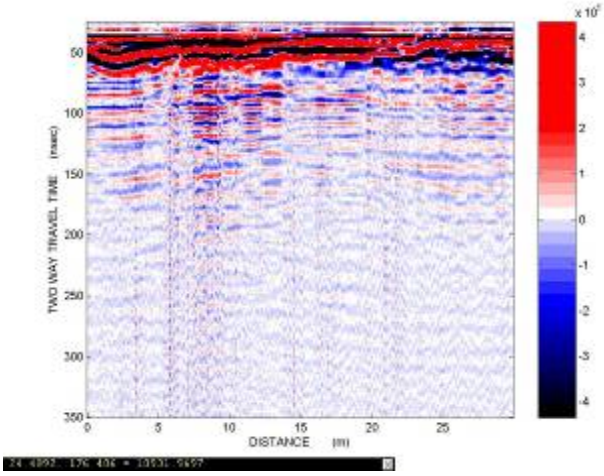


1, 2, 4

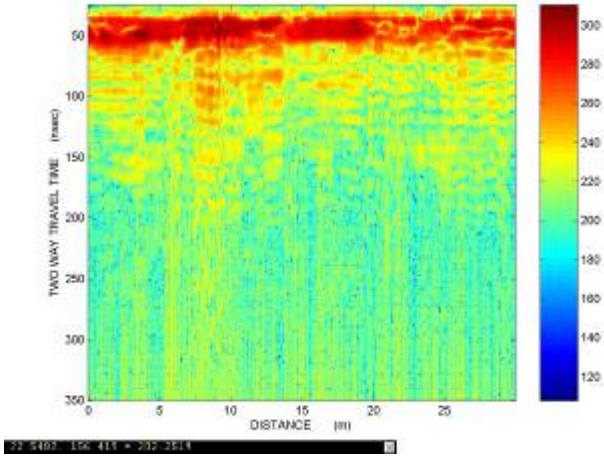


9

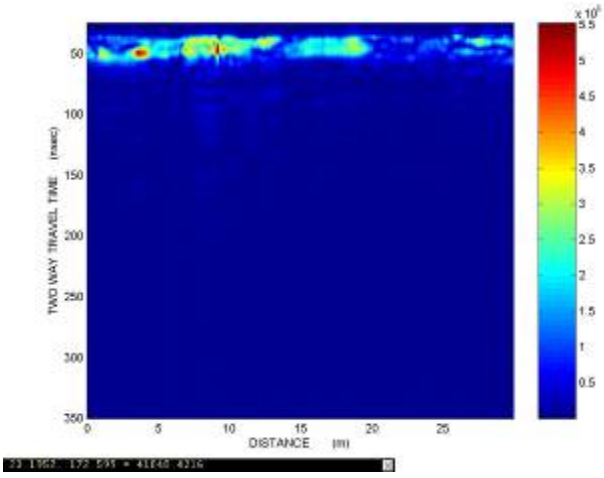
Περιοχή Γ, Γραμμή μελέτης 08



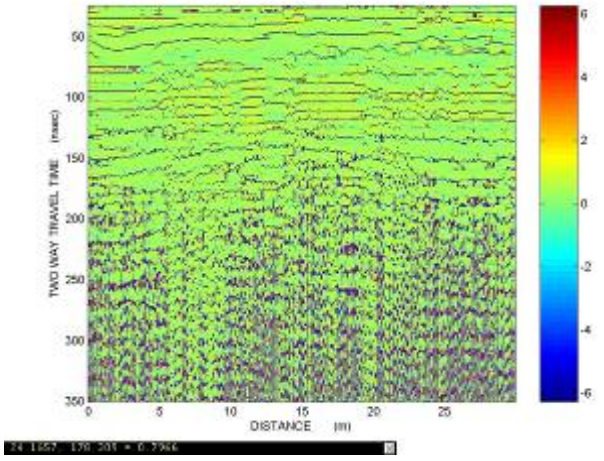
1, 2, 3



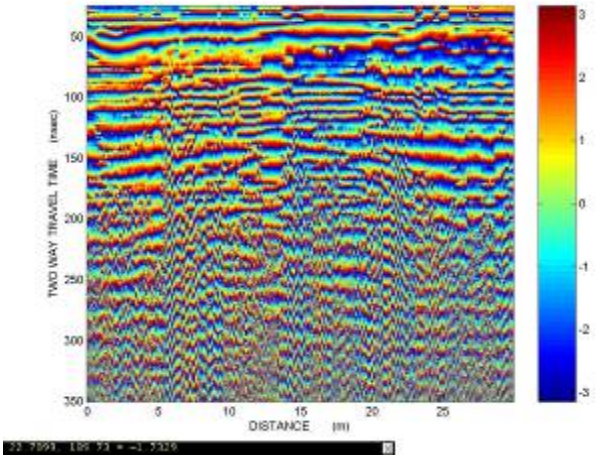
1, 2, 3, 4



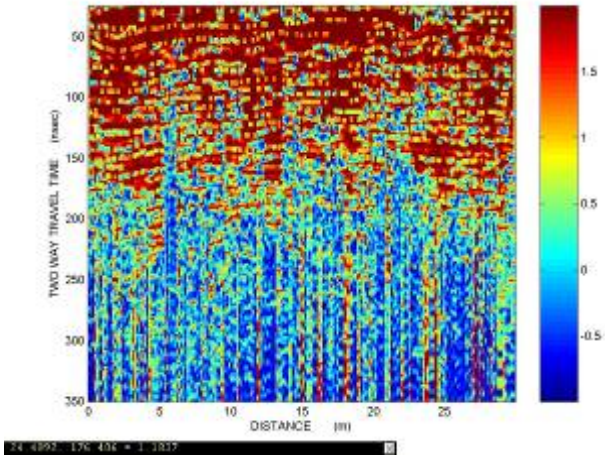
1, 2, 3, 5



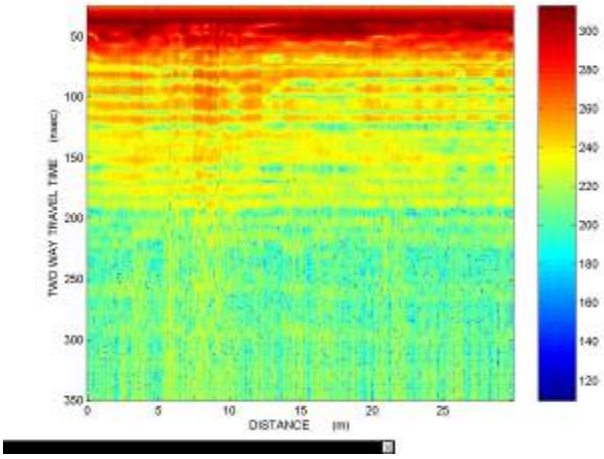
1, 2, 3, 6



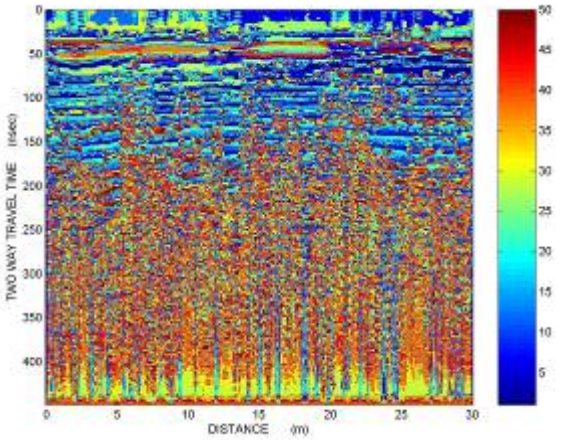
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

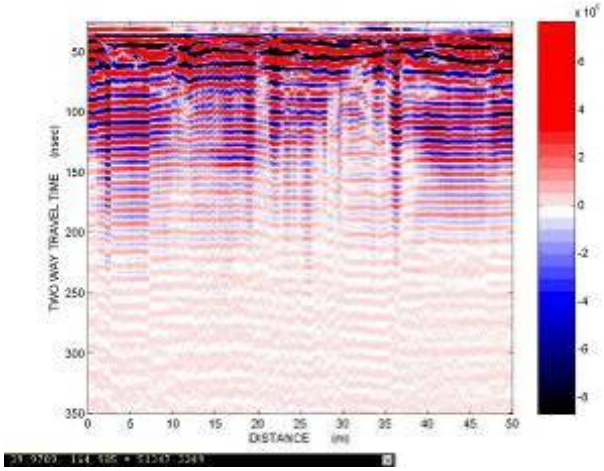


1, 2, 4

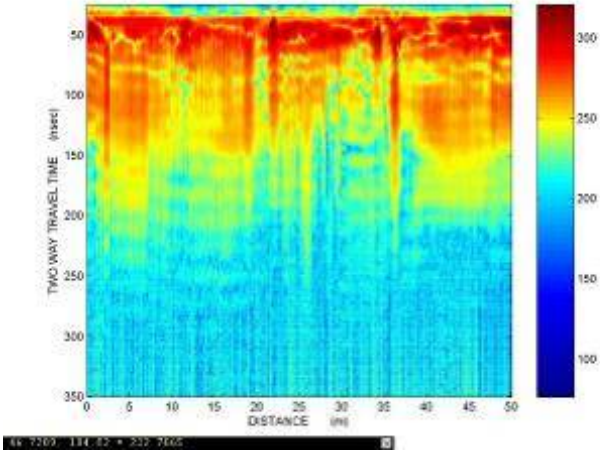


9

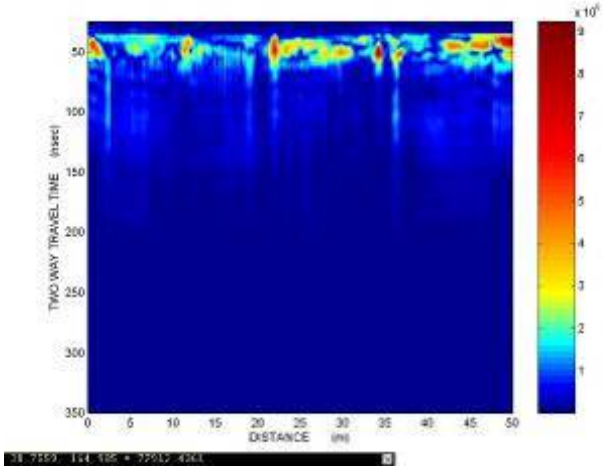
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 01



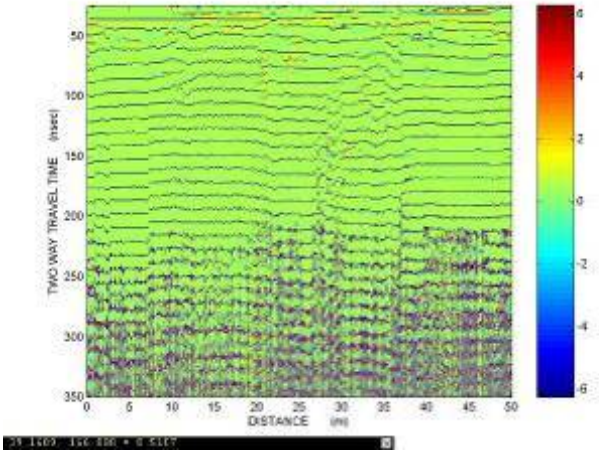
1, 2, 3



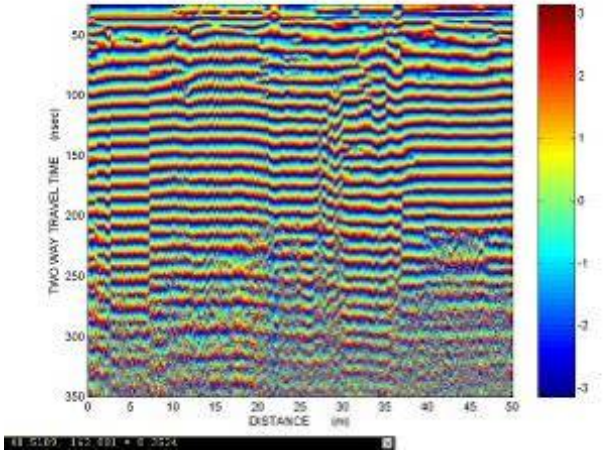
1, 2, 3, 4



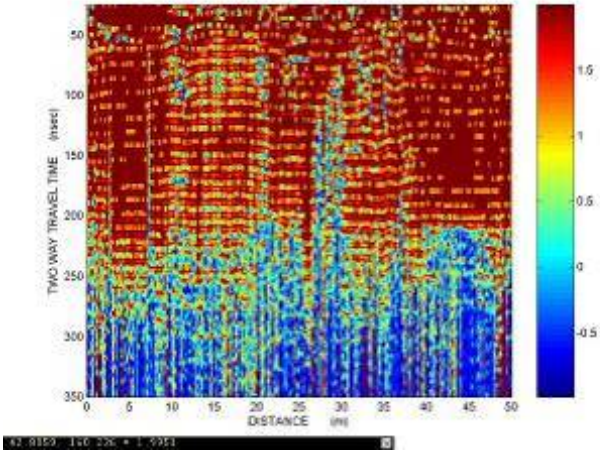
1, 2, 3, 5



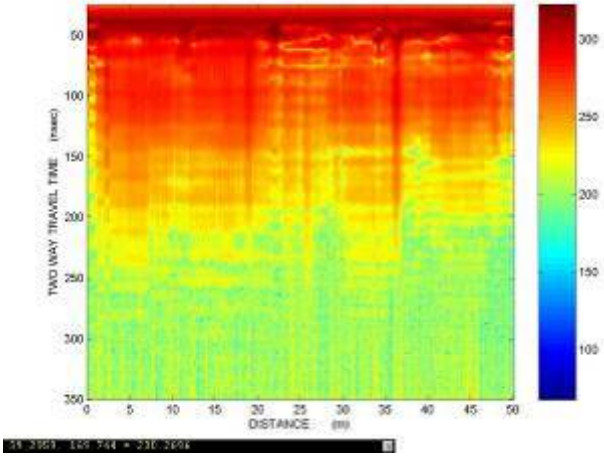
1, 2, 3, 6



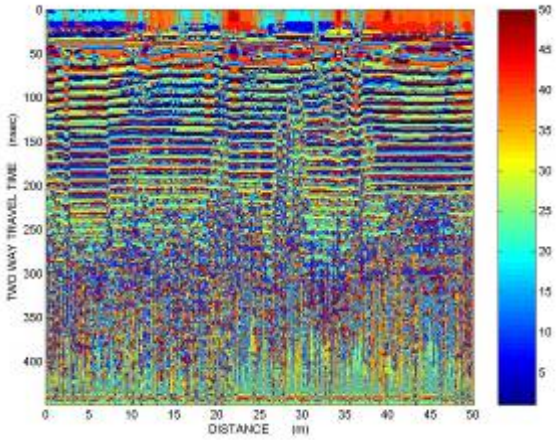
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

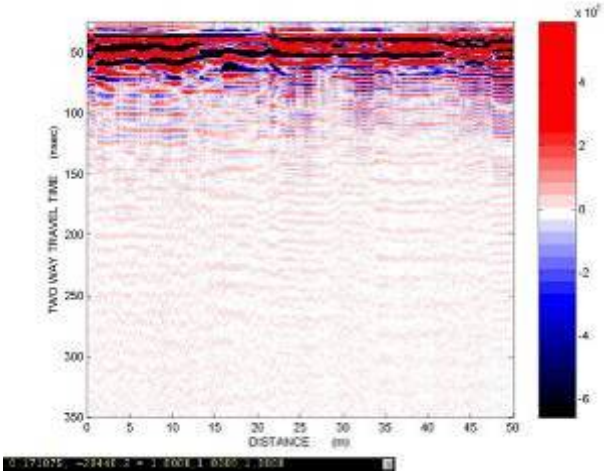


1, 2, 4

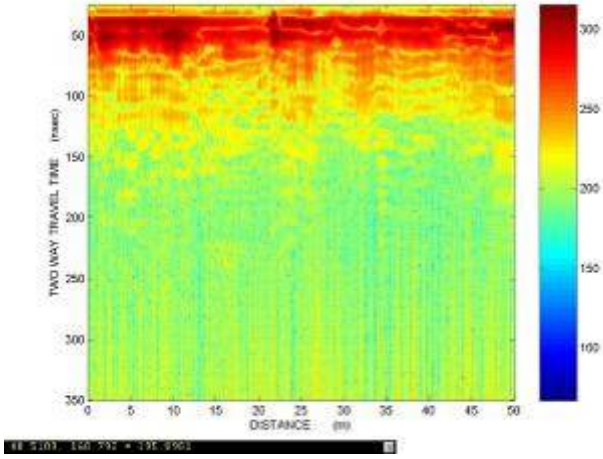


9

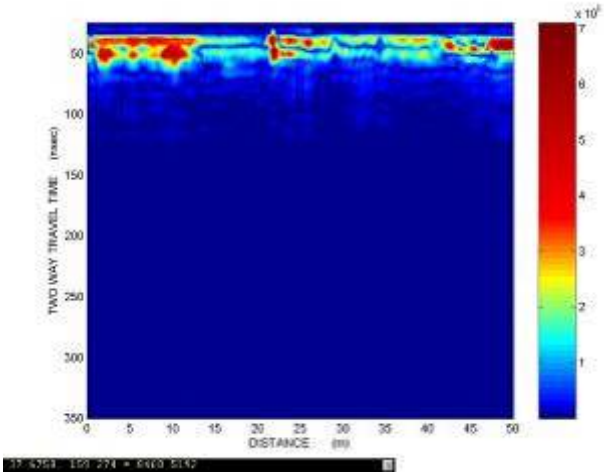
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 02



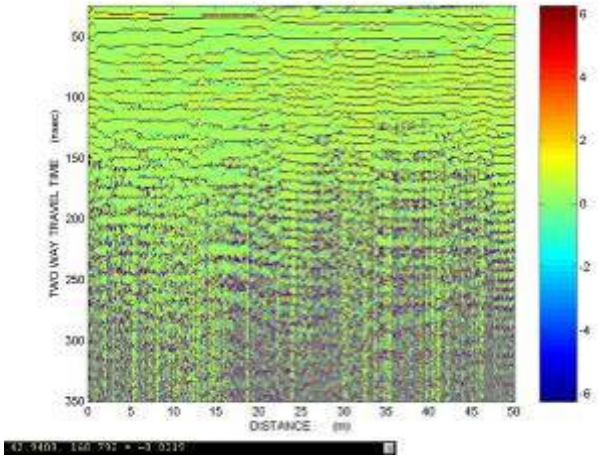
1, 2, 3



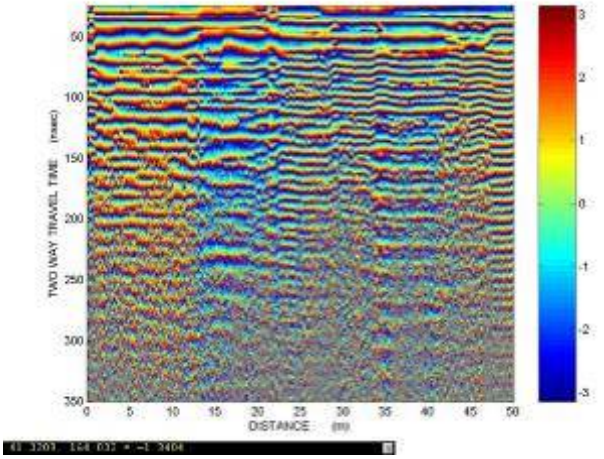
1, 2, 3, 4



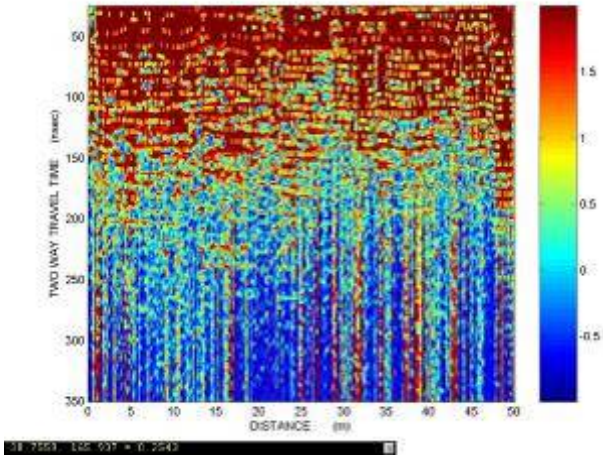
1, 2, 3, 5



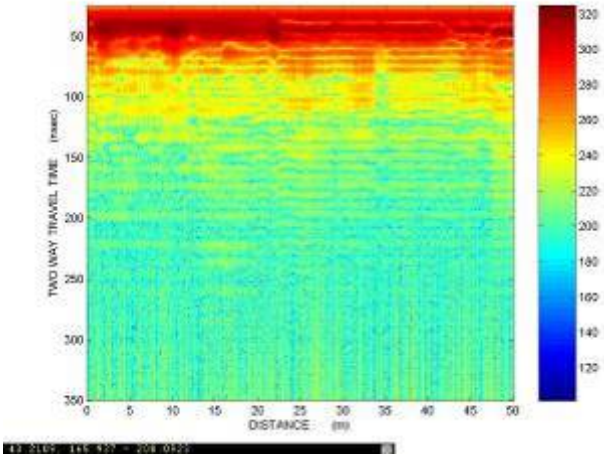
1, 2, 3, 6



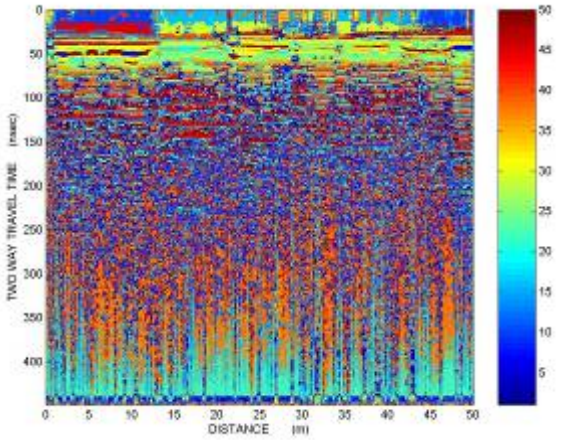
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

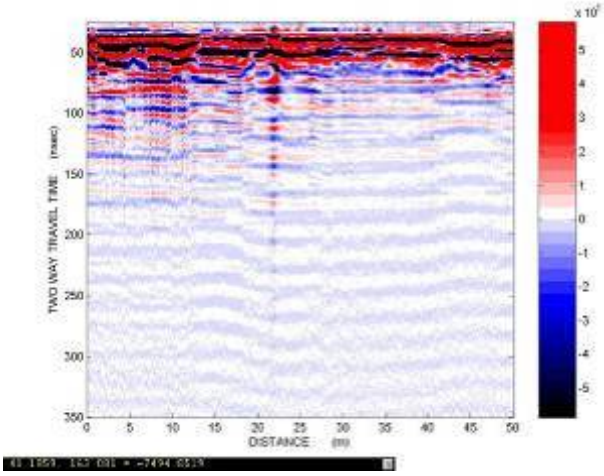


1, 2, 4

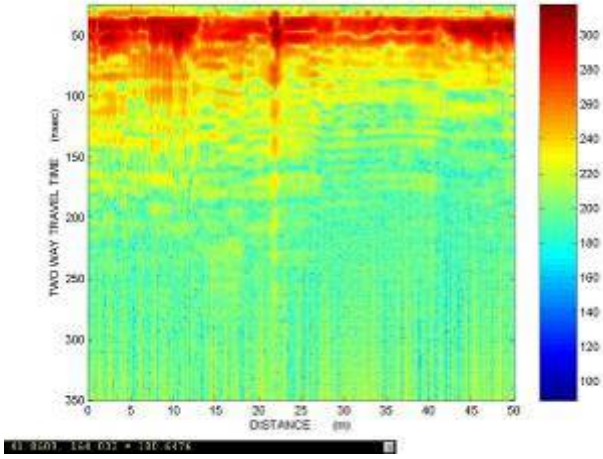


9

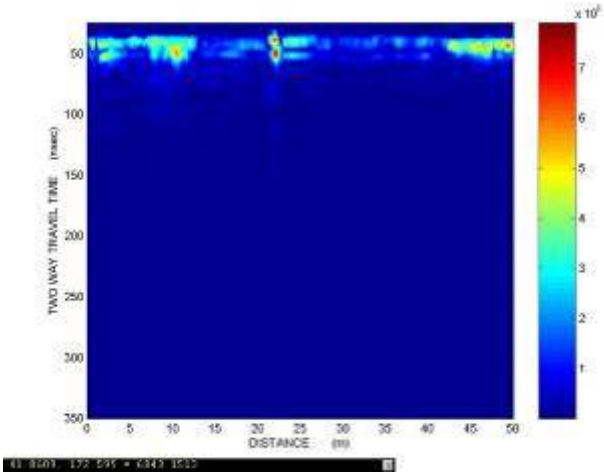
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 03



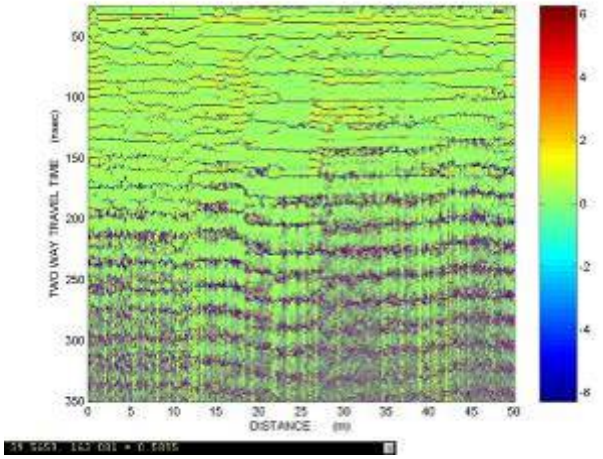
1, 2, 3



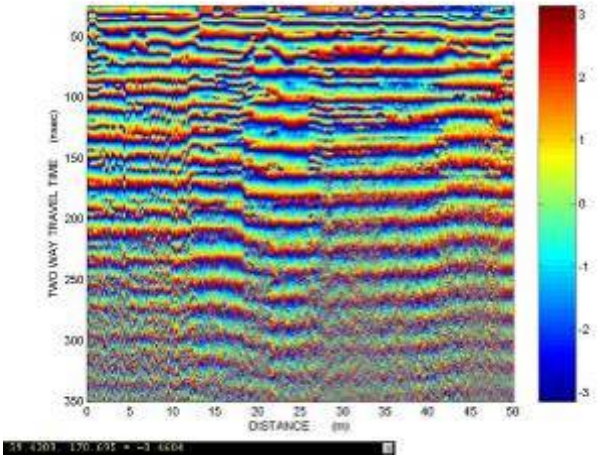
1, 2, 3, 4



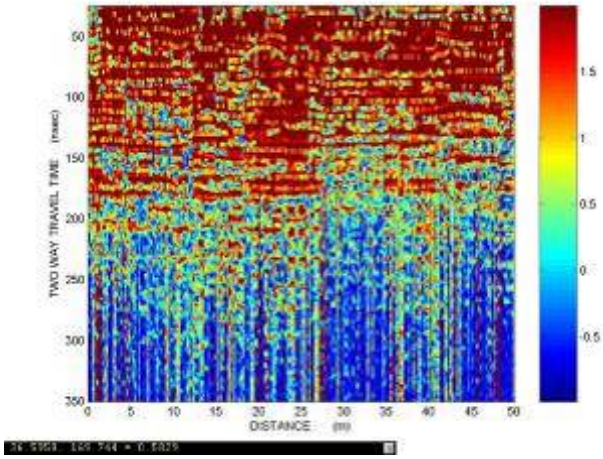
1, 2, 3, 5



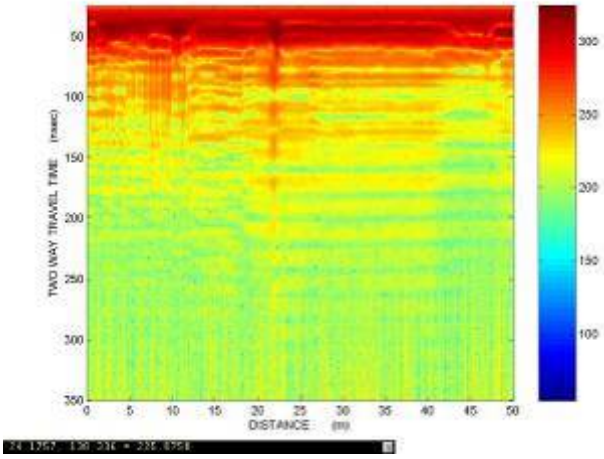
1, 2, 3, 6



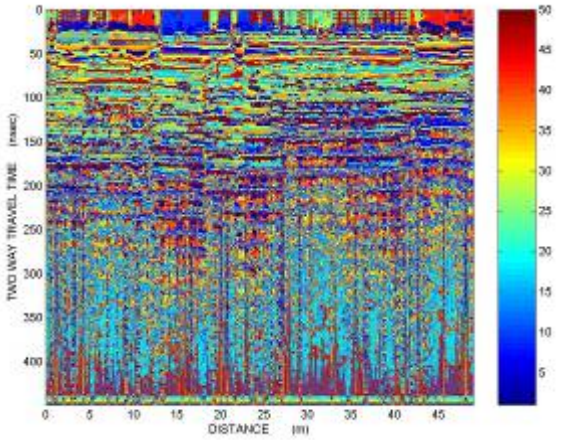
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

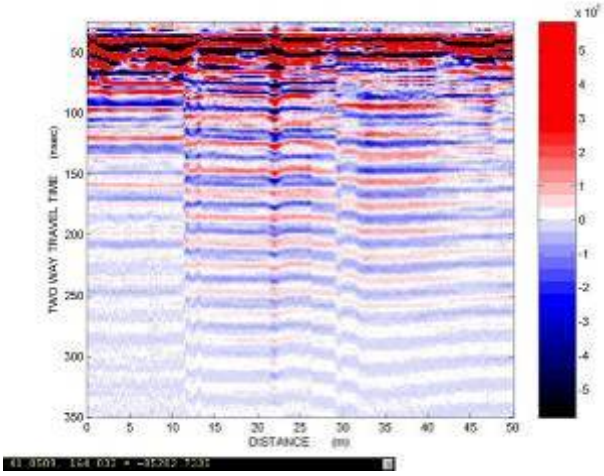


1, 2, 4

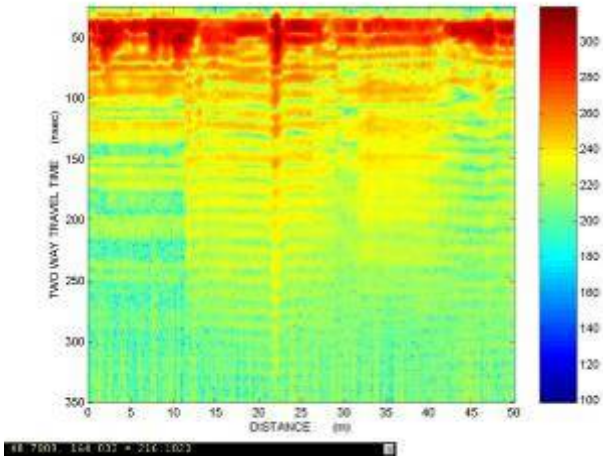


9

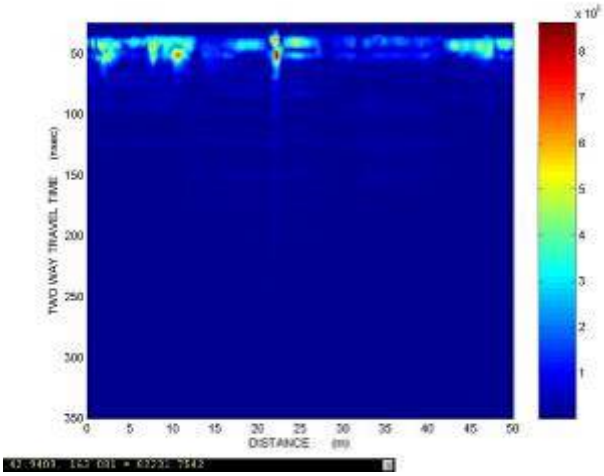
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 04



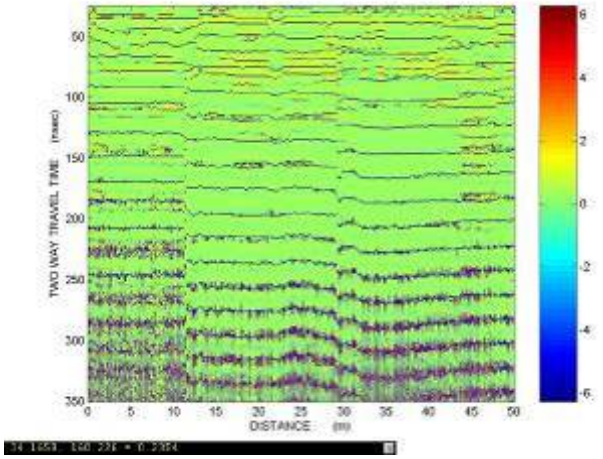
1, 2, 3



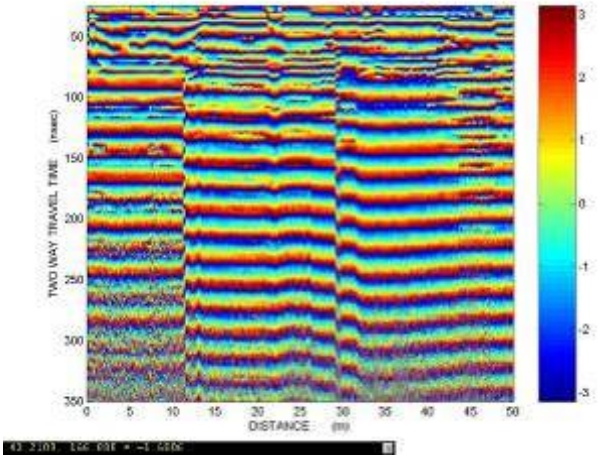
1, 2, 3, 4



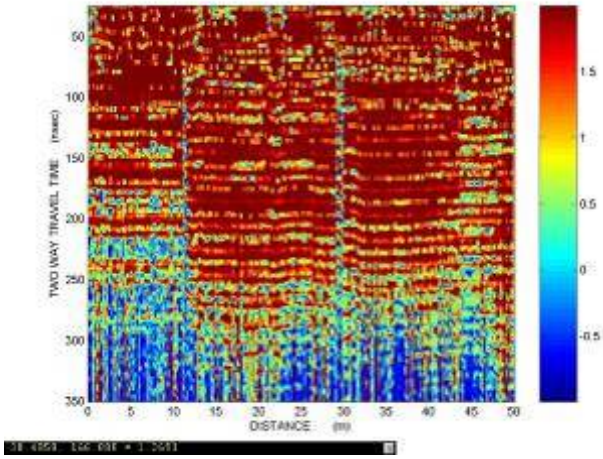
1, 2, 3, 5



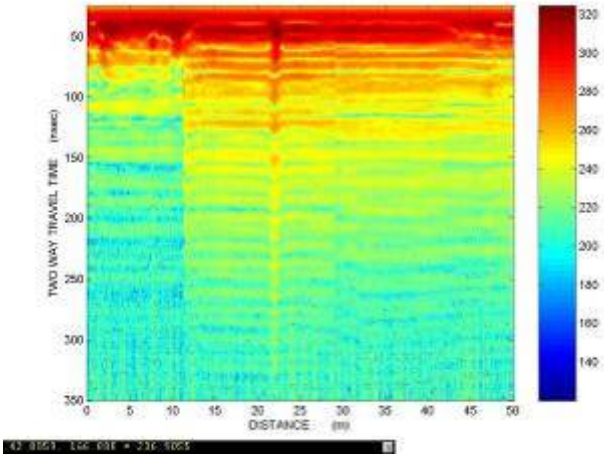
1, 2, 3, 6



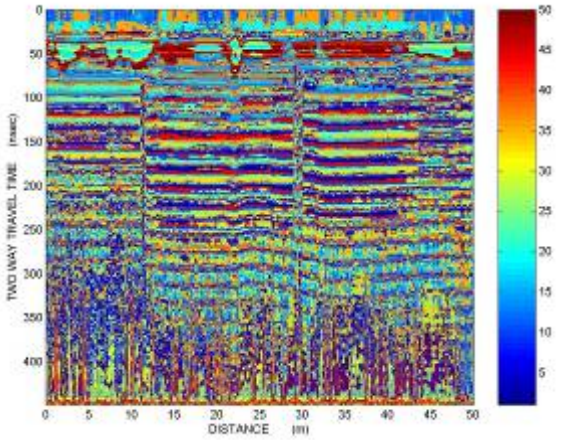
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

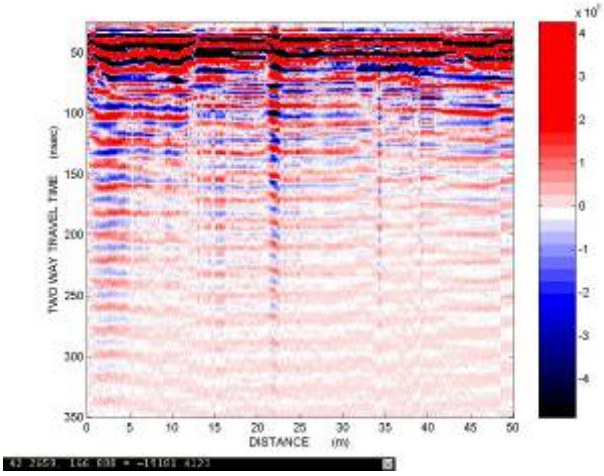


1, 2, 4

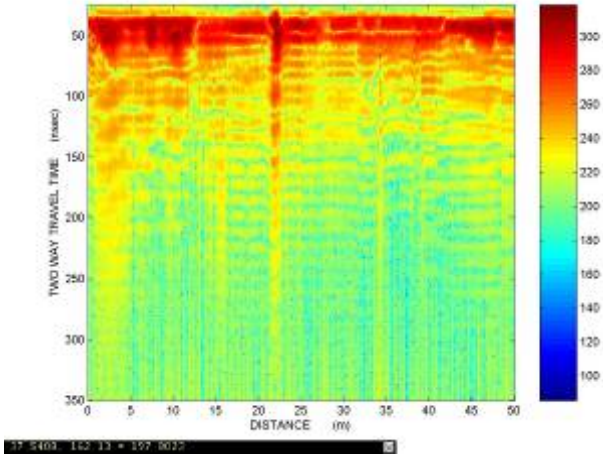


9

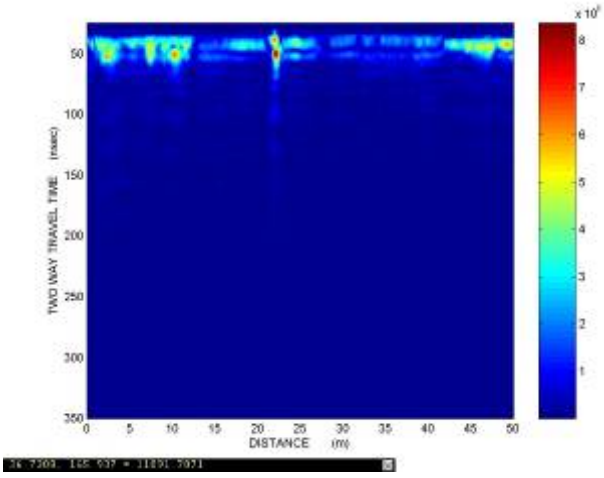
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 05



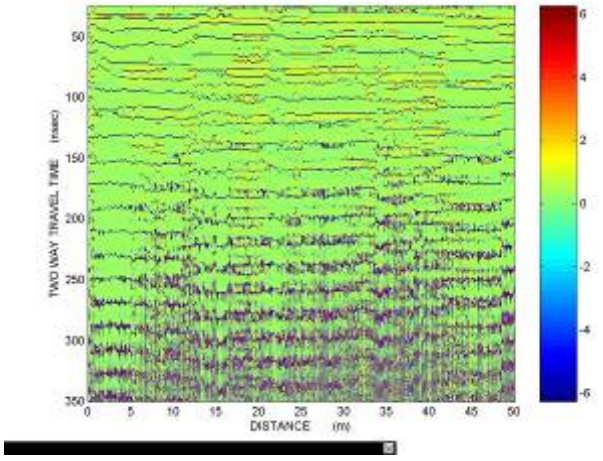
1, 2, 3



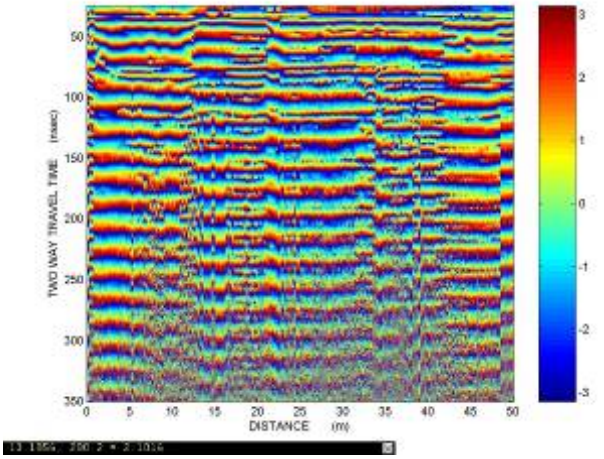
1, 2, 3, 4



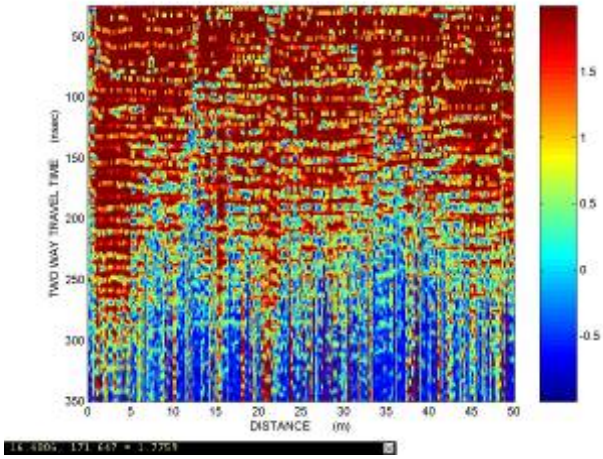
1, 2, 3, 5



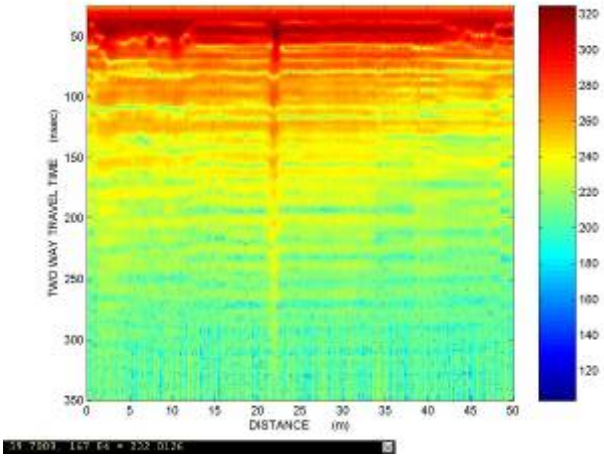
1, 2, 3, 6



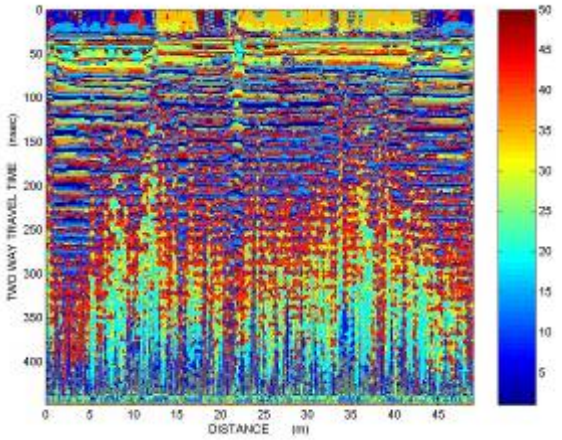
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

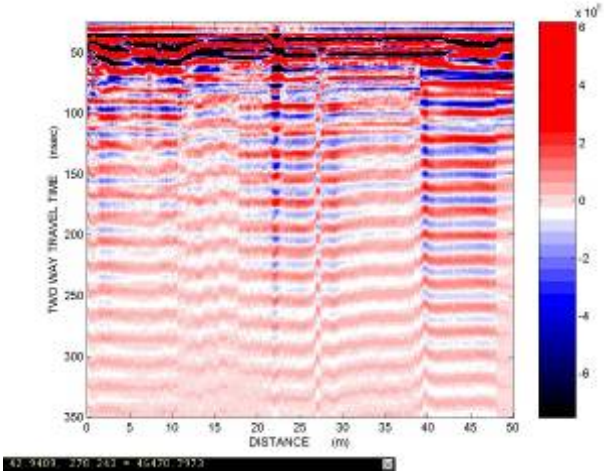


1, 2, 4

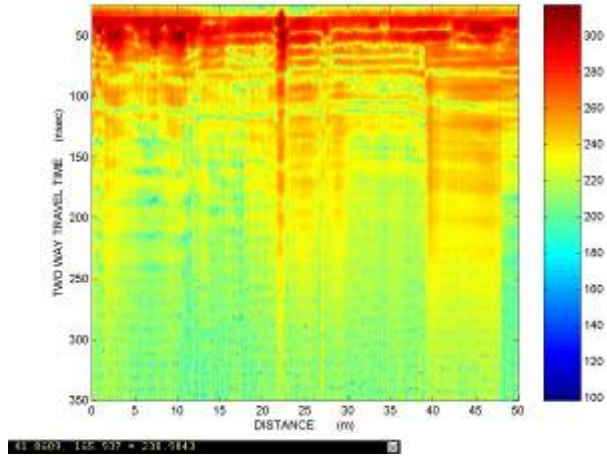


9

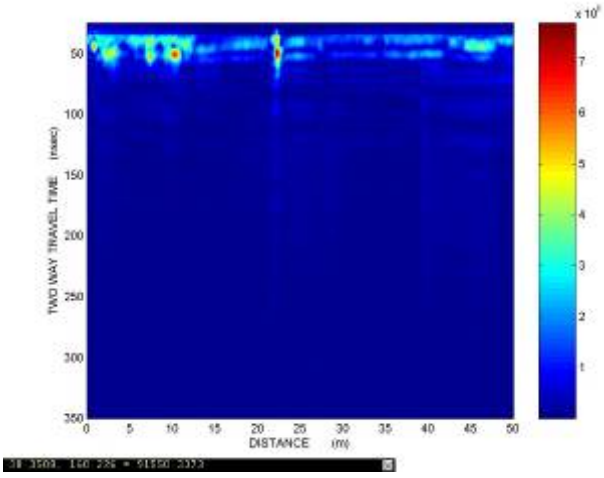
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 06



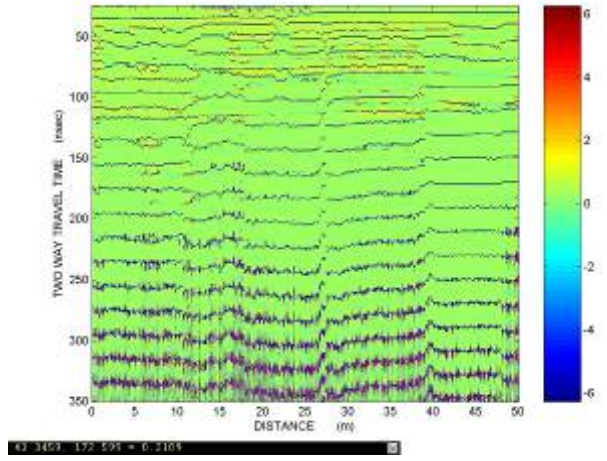
1, 2, 3



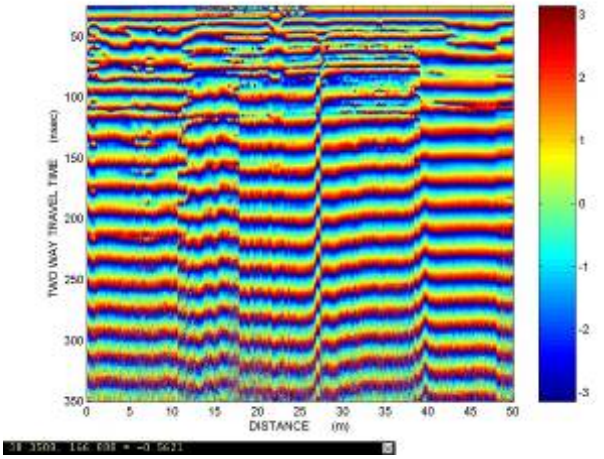
1, 2, 3, 4



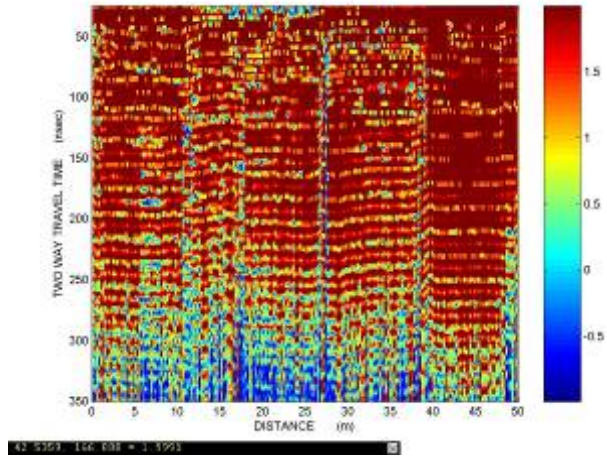
1, 2, 3, 5



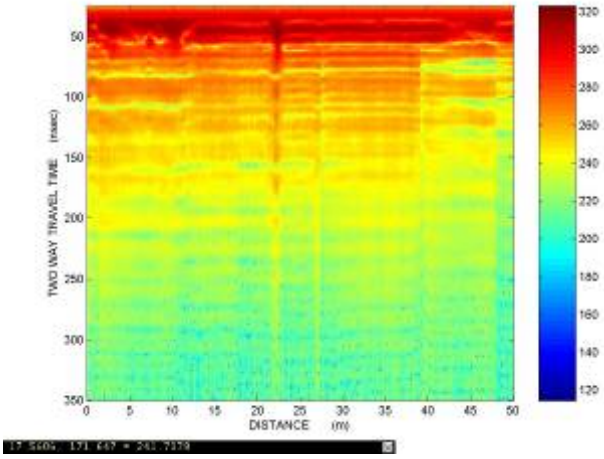
1, 2, 3, 6



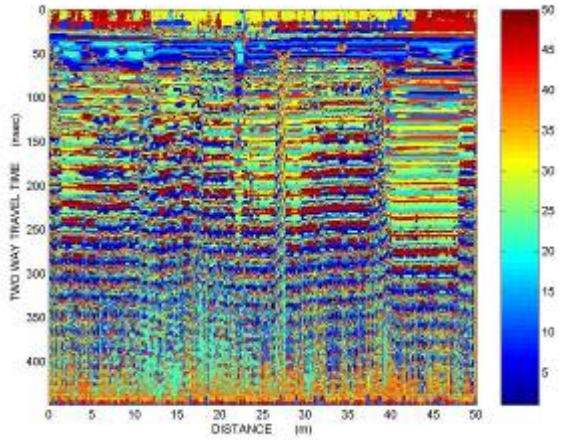
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

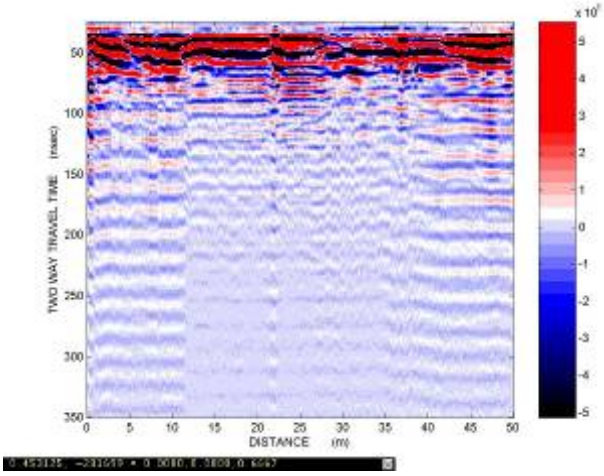


1, 2, 4

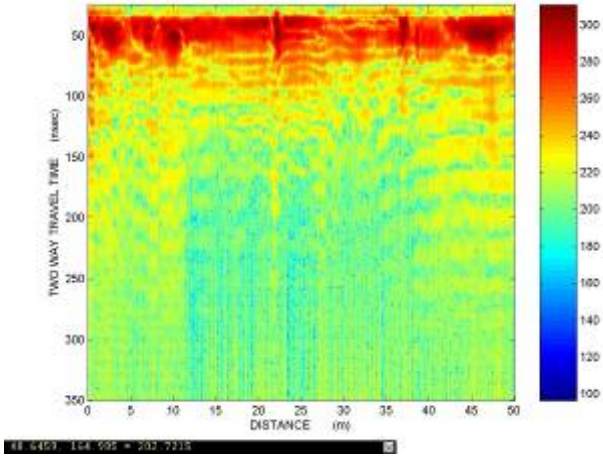


9

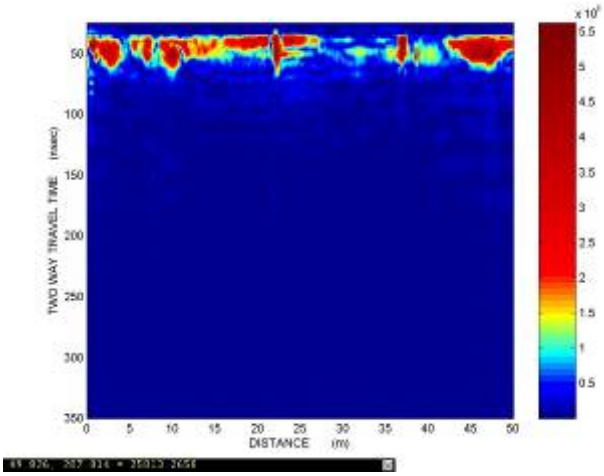
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 07



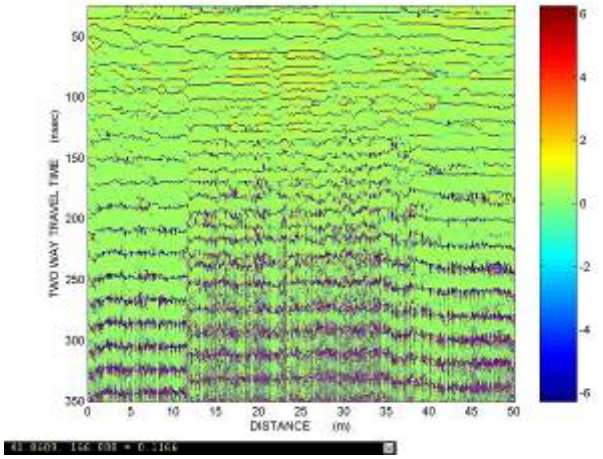
1, 2, 3



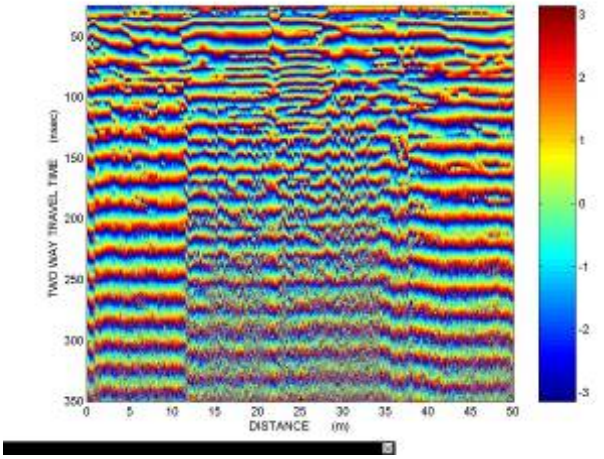
1, 2, 3, 4



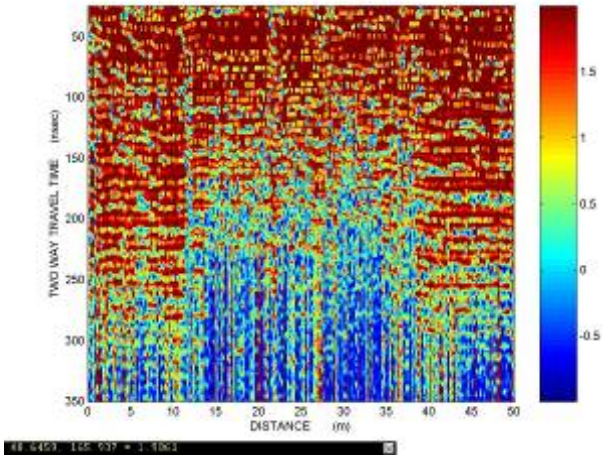
1, 2, 3, 5



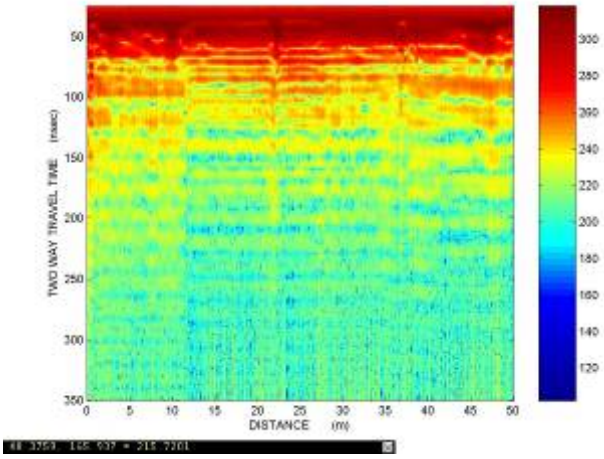
1, 2, 3, 6



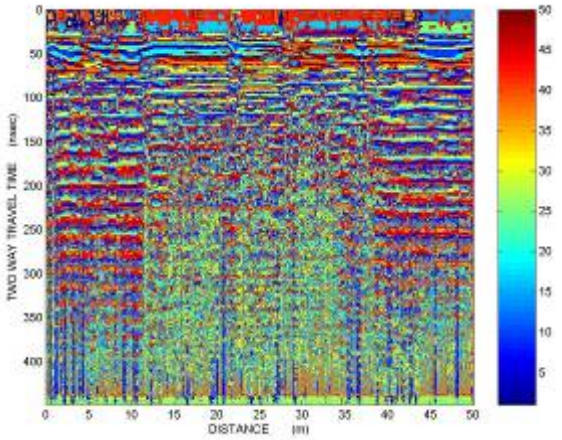
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

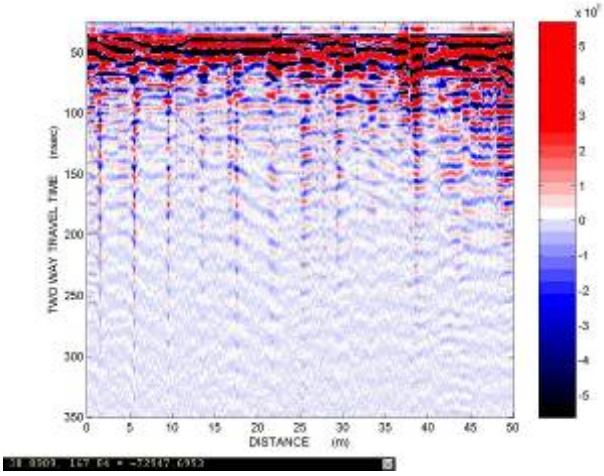


1, 2, 4

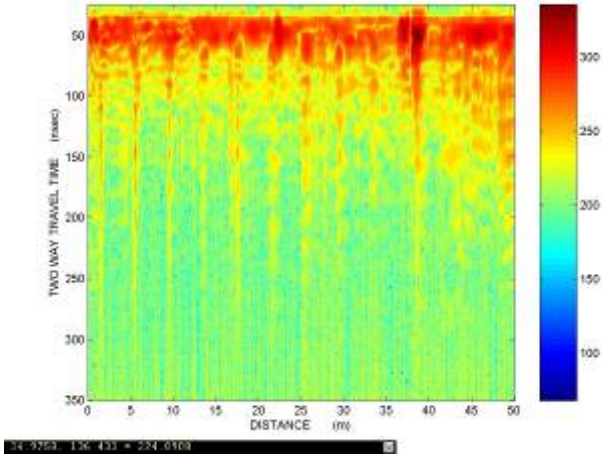


9

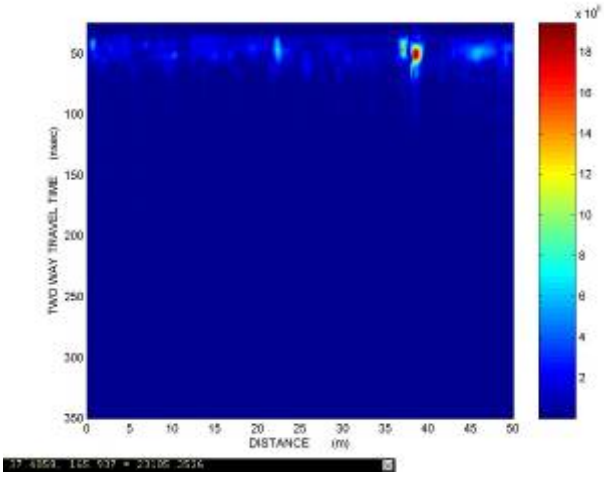
Περιοχή Δ, Γραμμή μελέτης 08



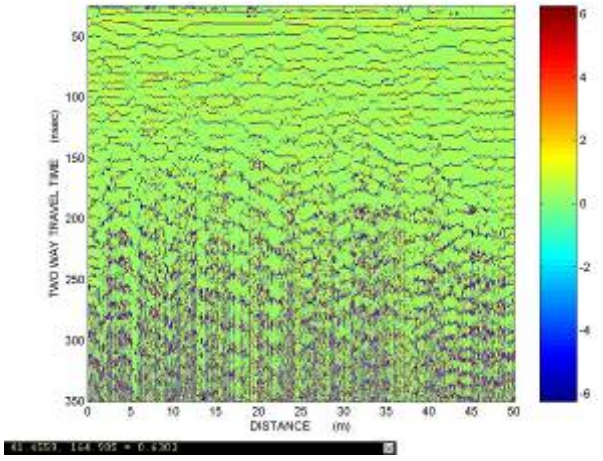
1, 2, 3



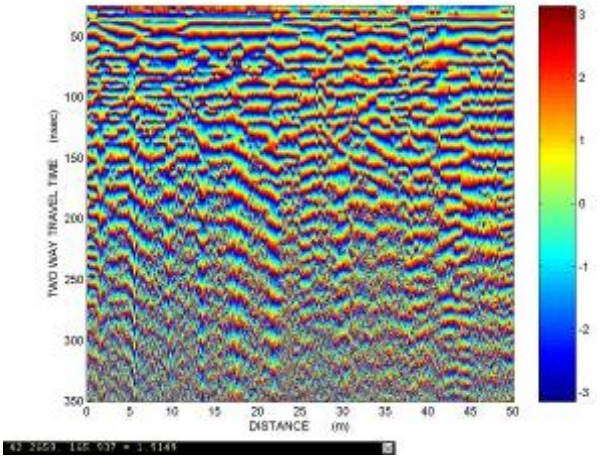
1, 2, 3, 4



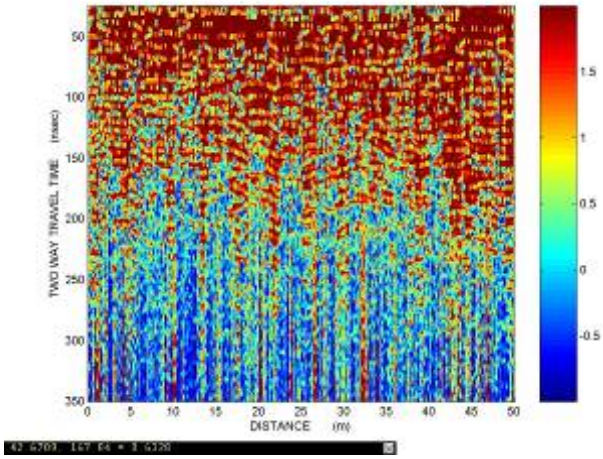
1, 2, 3, 5



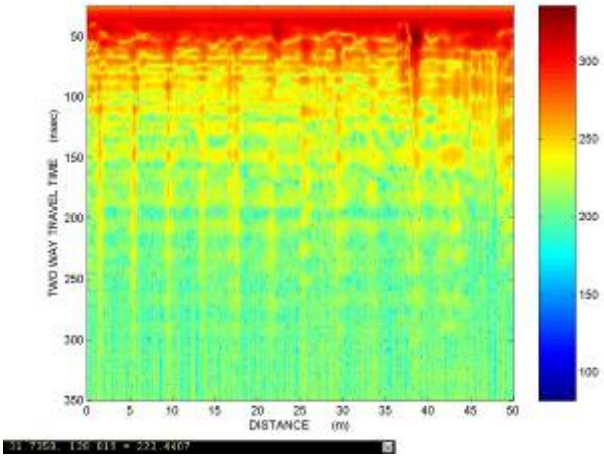
1, 2, 3, 6



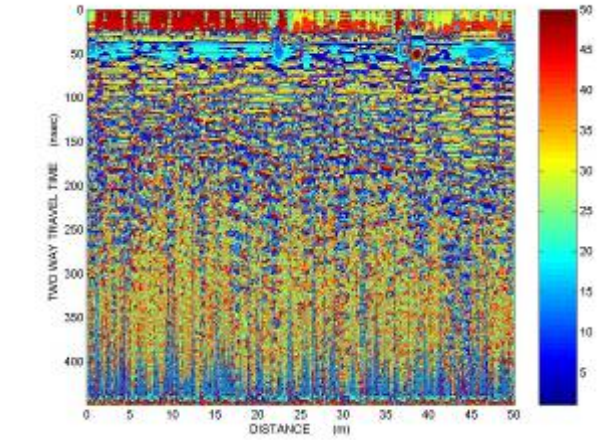
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

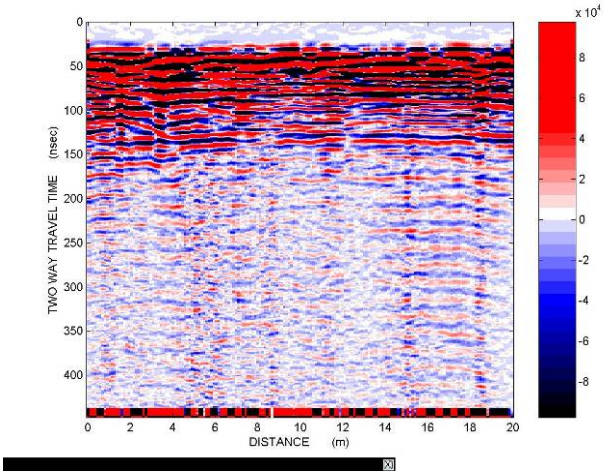


1, 2, 4

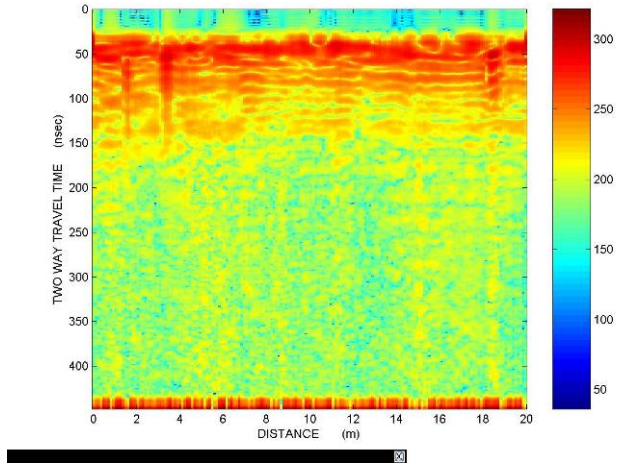


9

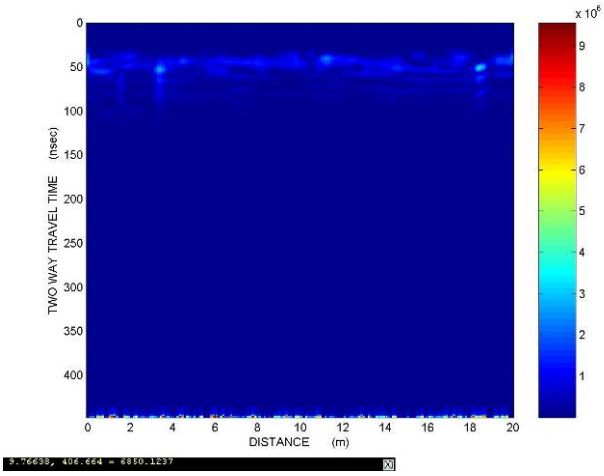
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 00



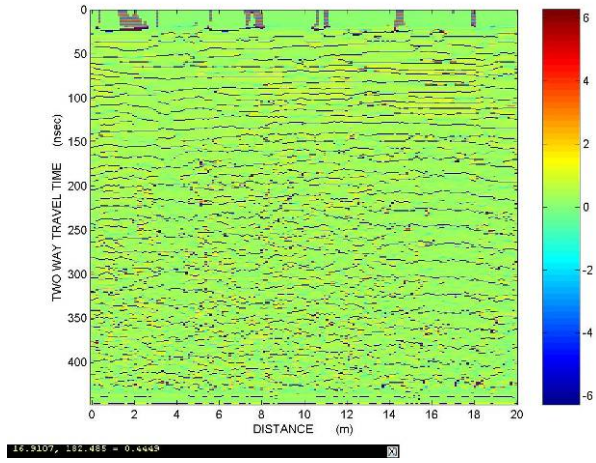
1, 2, 3



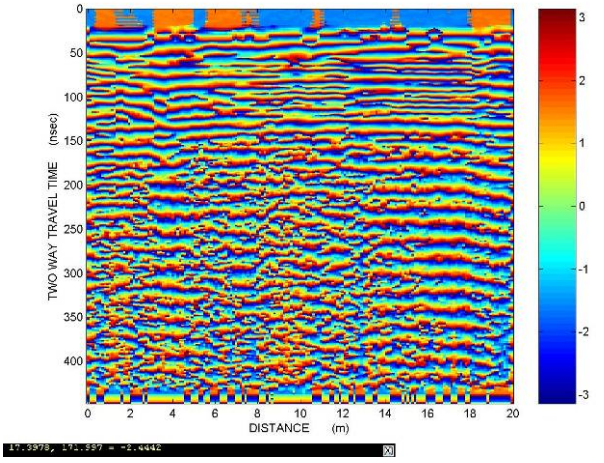
1, 2, 3, 4



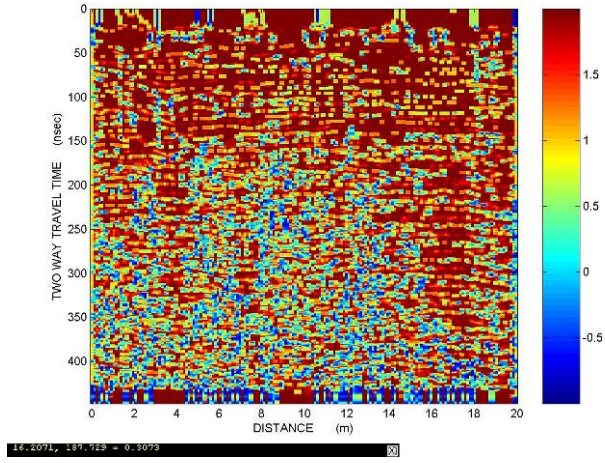
1, 2, 3, 5



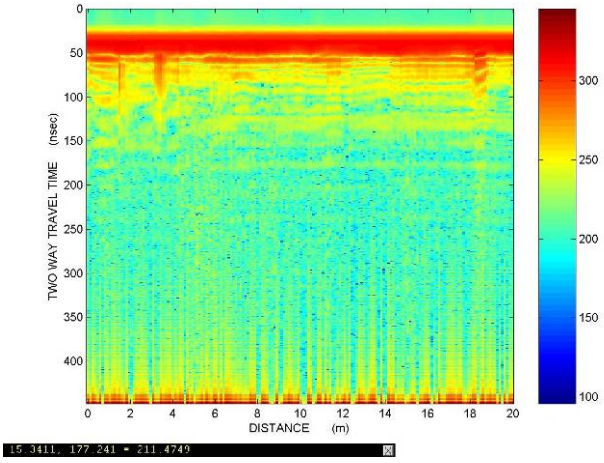
1, 2, 3, 6



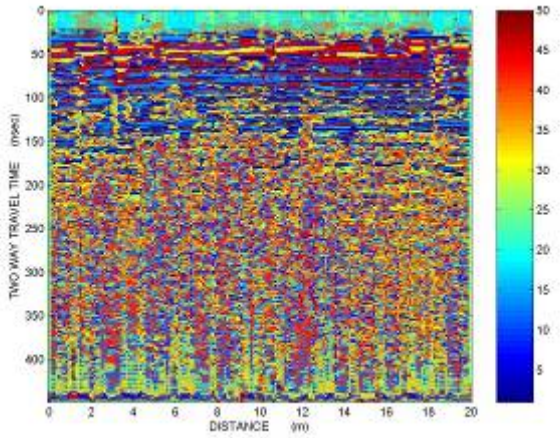
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

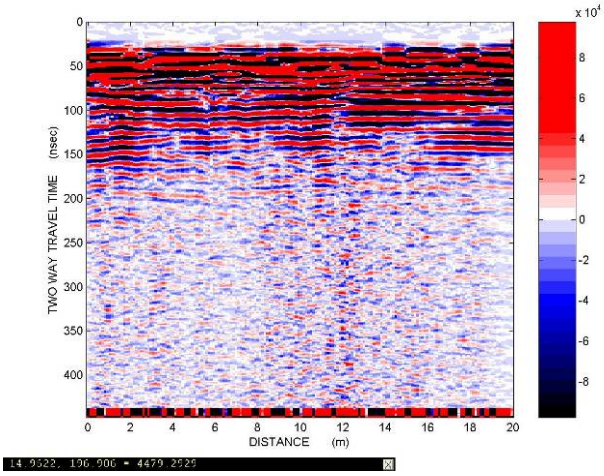


1, 2, 4

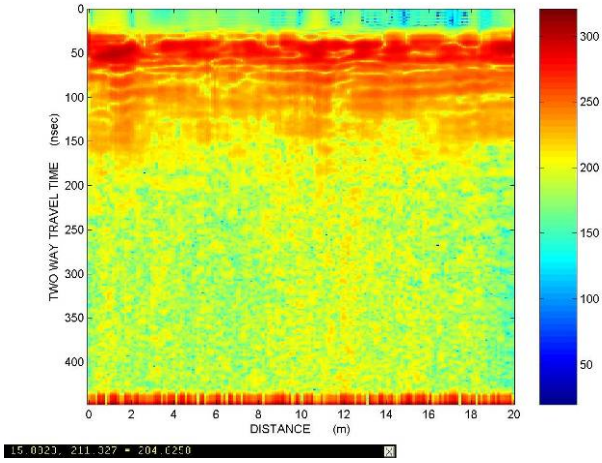


9

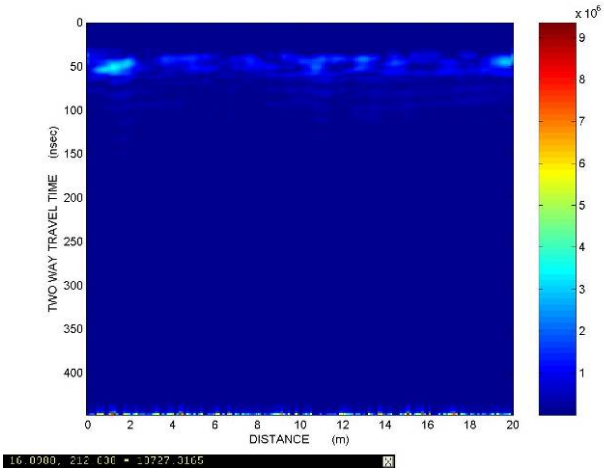
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 01



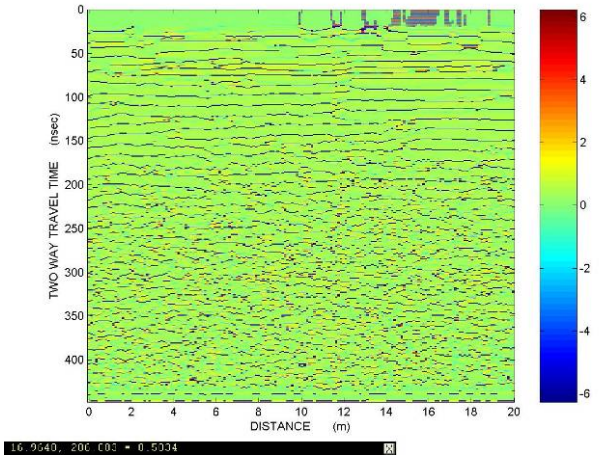
1, 2, 3



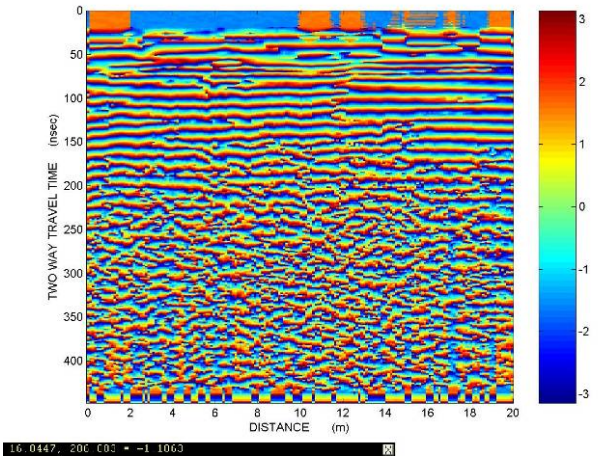
1, 2, 3, 4



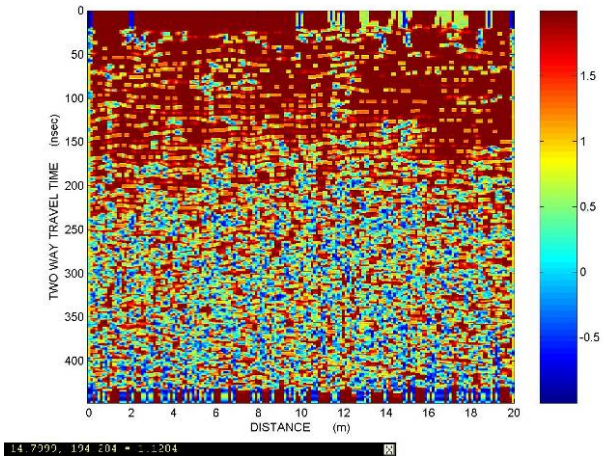
1, 2, 3, 5



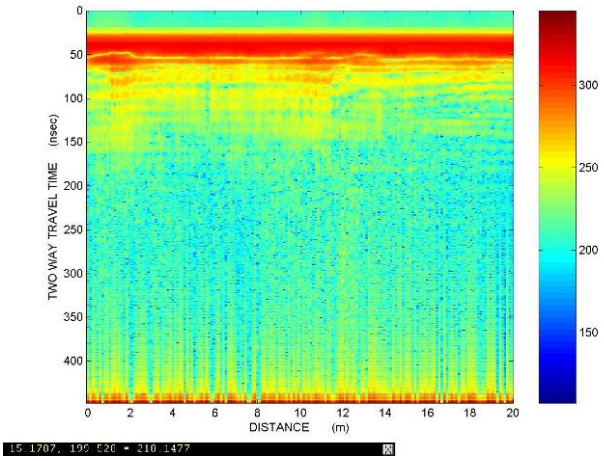
1, 2, 3, 6



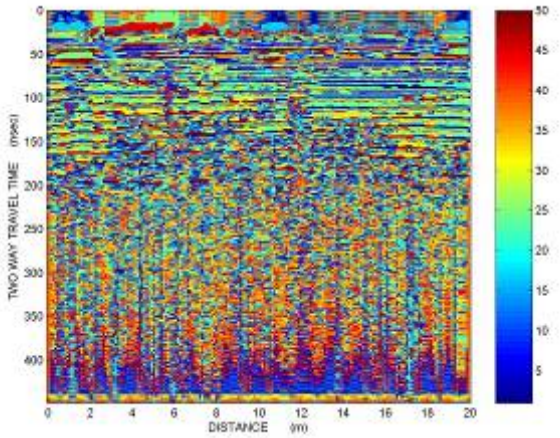
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

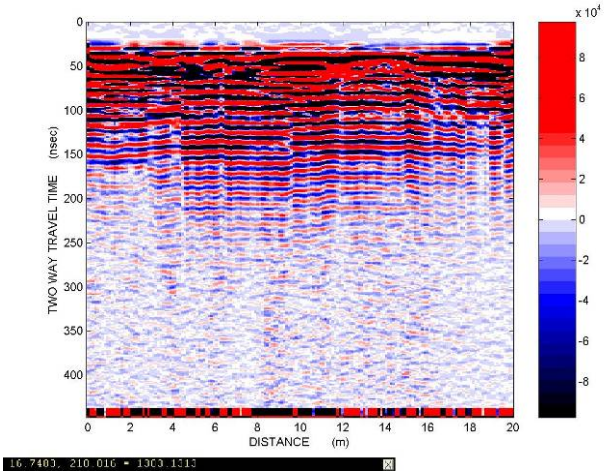


1, 2, 4

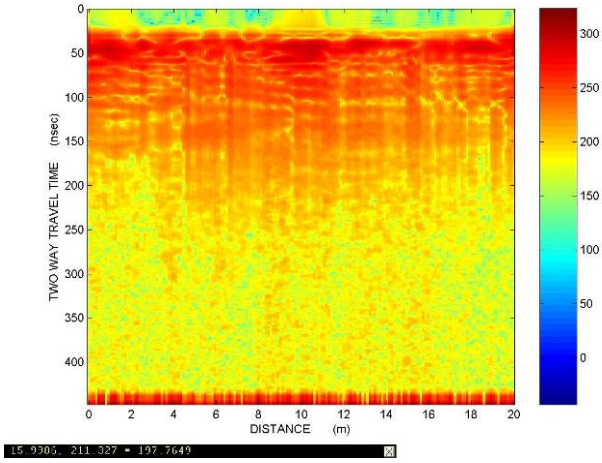


9

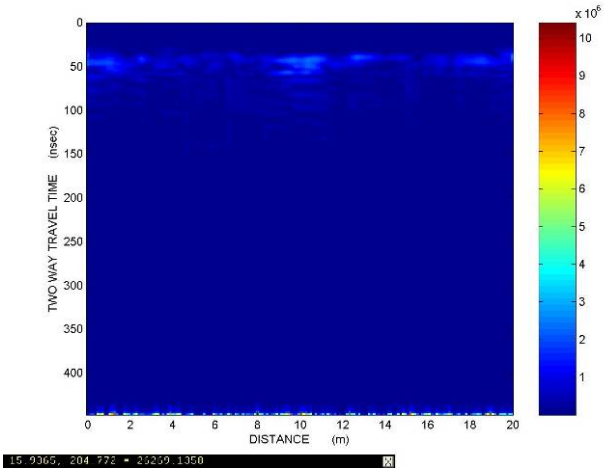
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 02



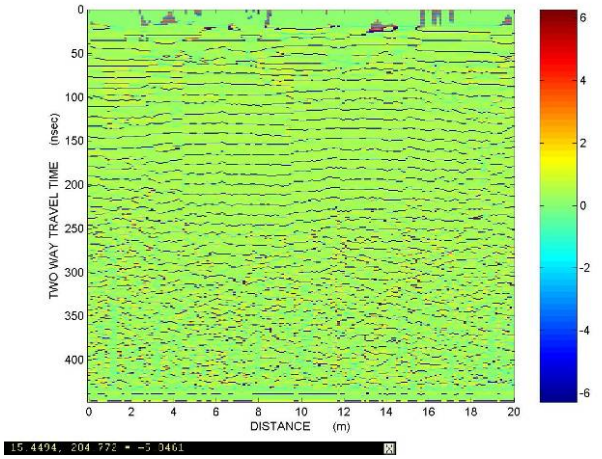
1, 2, 3



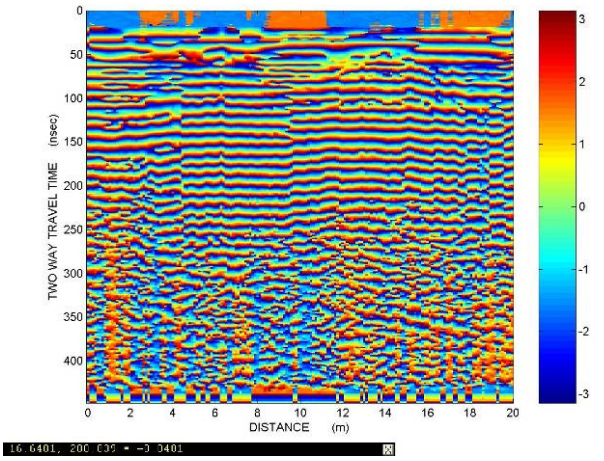
1, 2, 3, 4



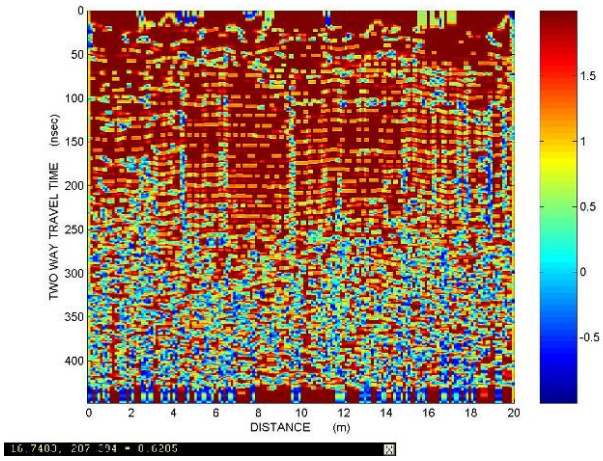
1, 2, 3, 5



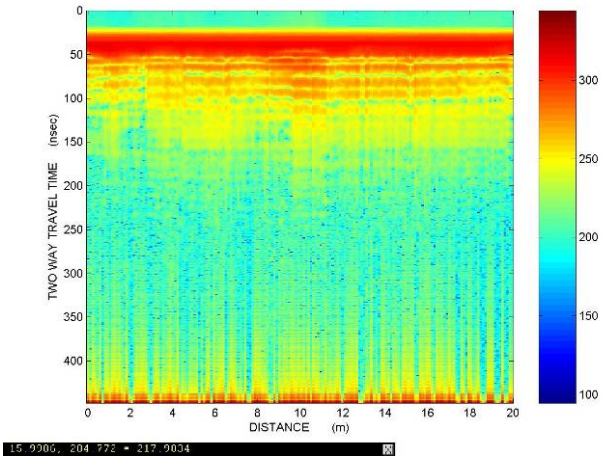
1, 2, 3, 6



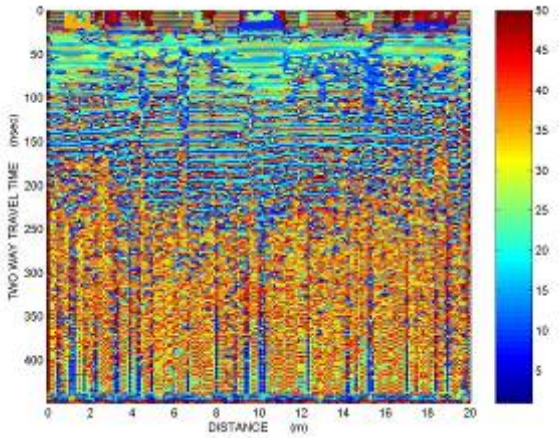
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

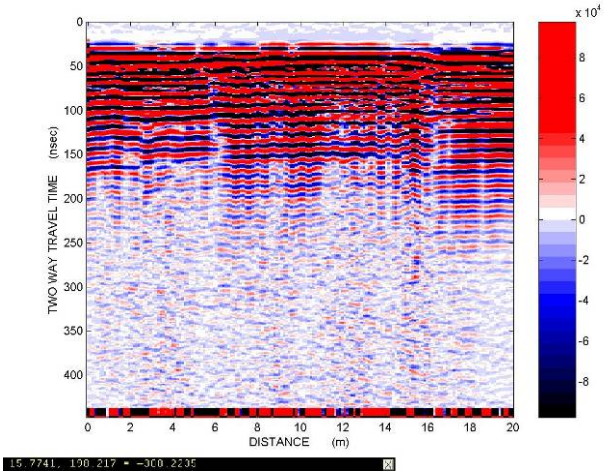


1, 2, 4

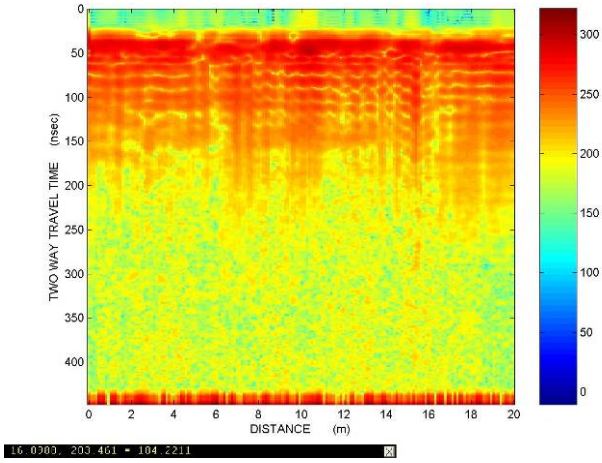


9

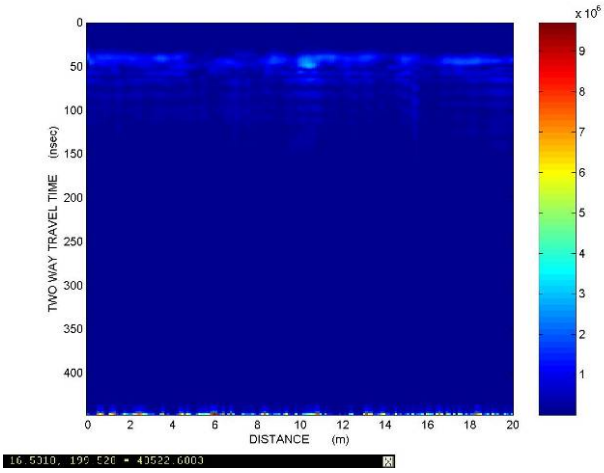
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 03



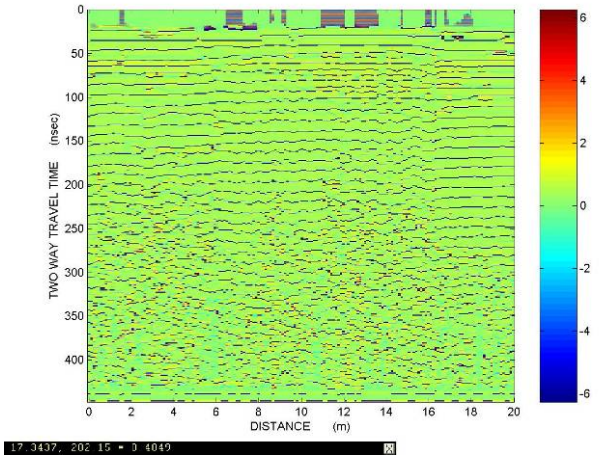
1, 2, 3



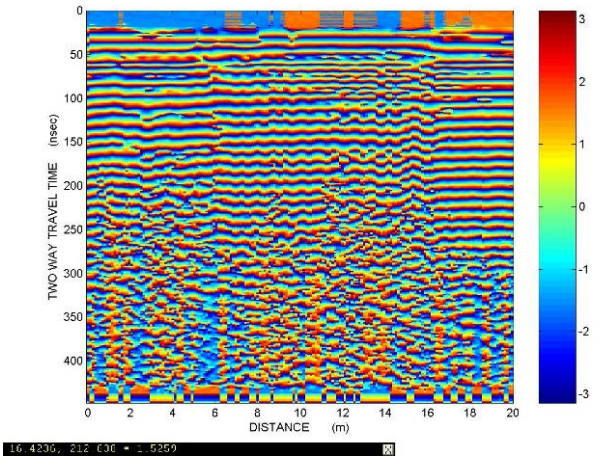
1, 2, 3, 4



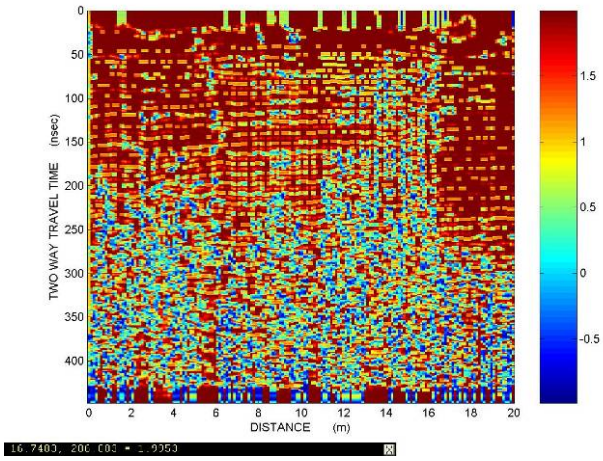
1, 2, 3, 5



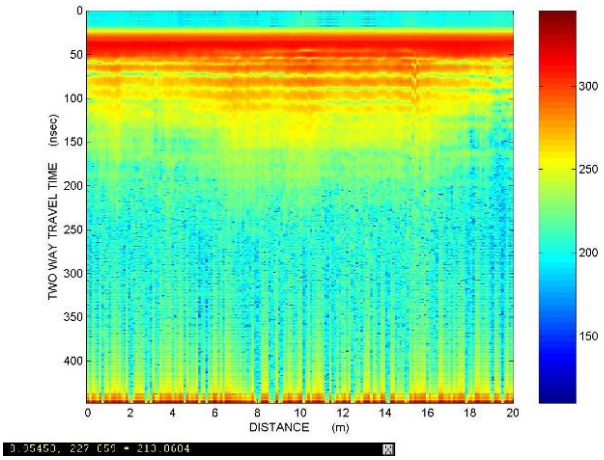
1, 2, 3, 6



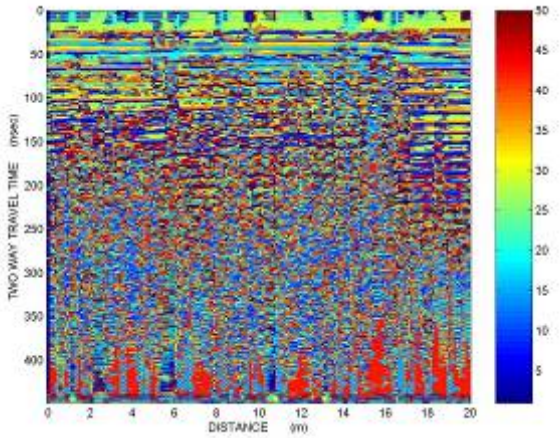
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

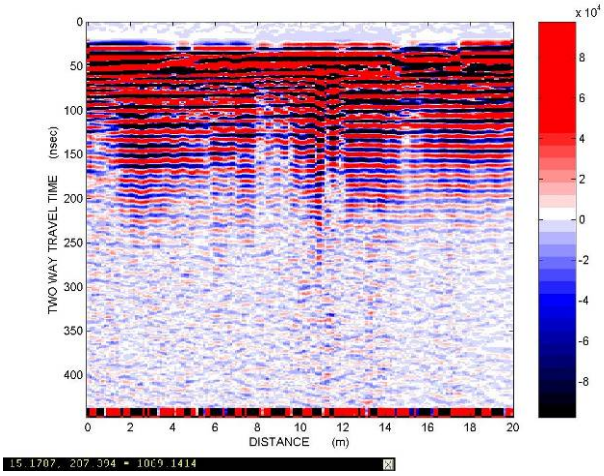


1, 2, 4

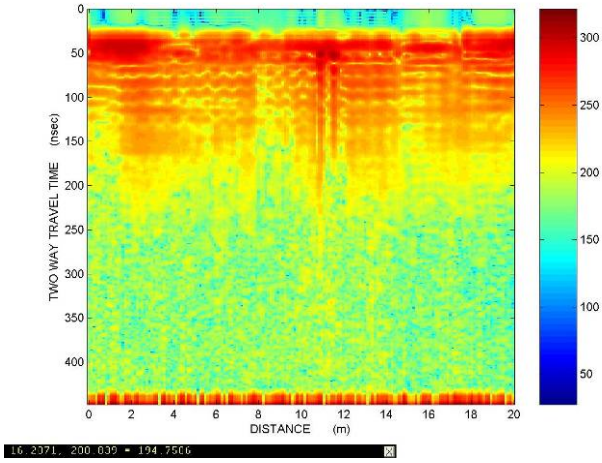


9

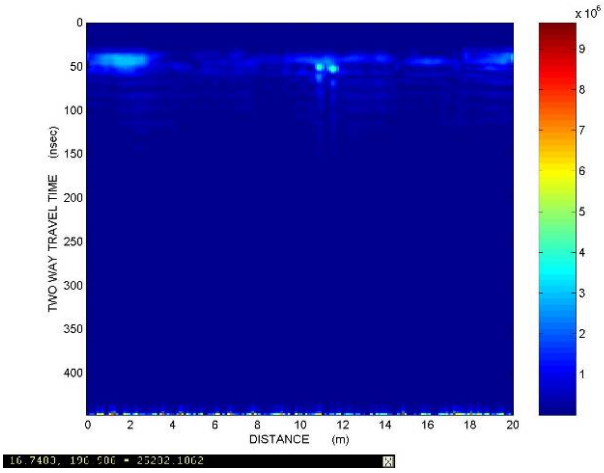
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 04



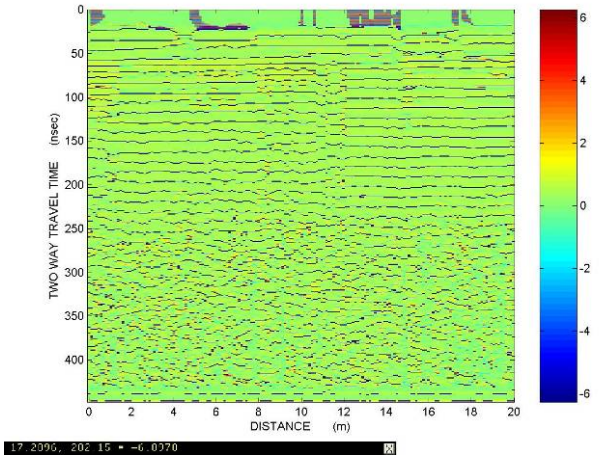
1, 2, 3



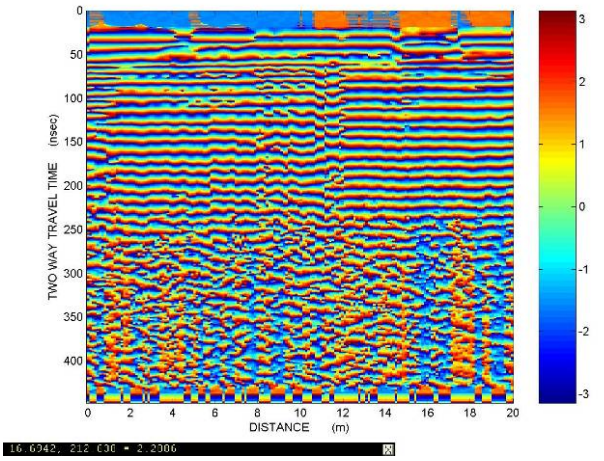
1, 2, 3, 4



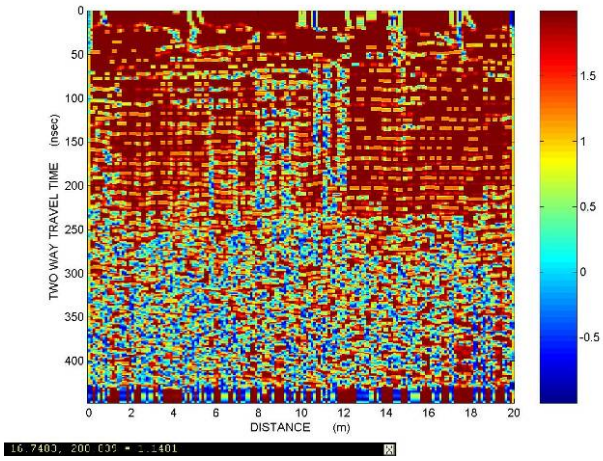
1, 2, 3, 5



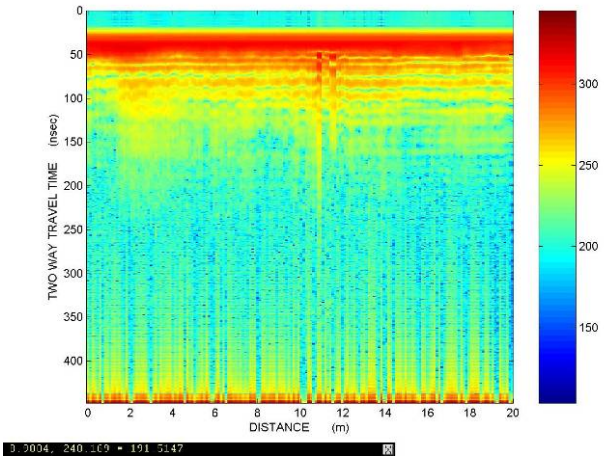
1, 2, 3, 6



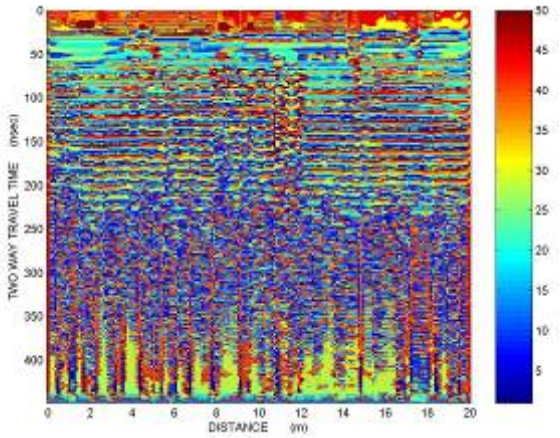
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

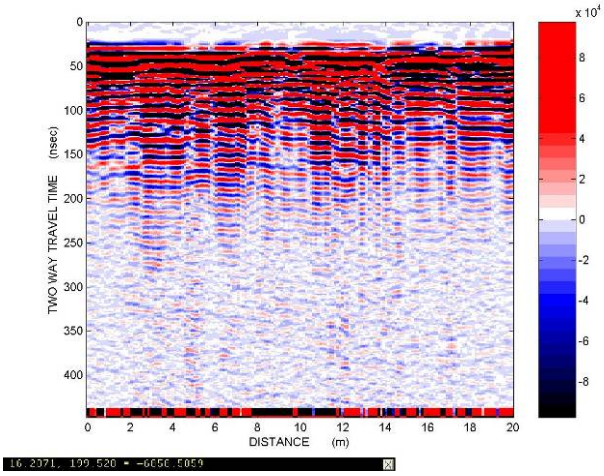


1, 2, 4

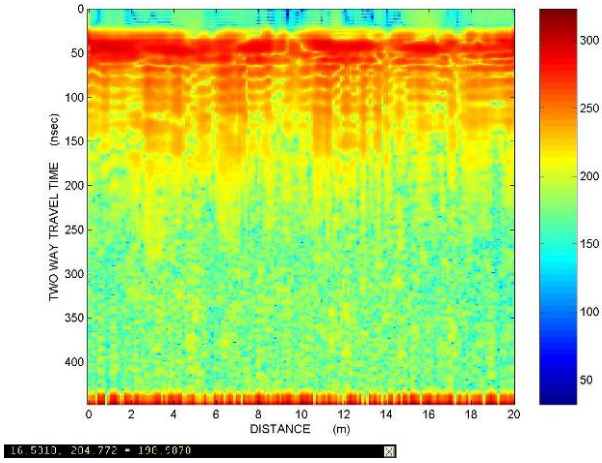


9

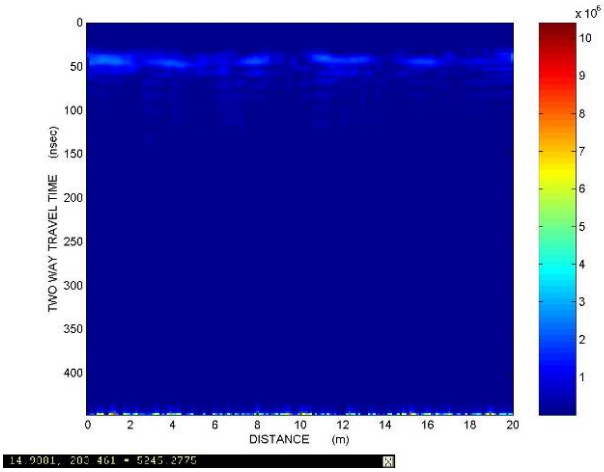
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 05



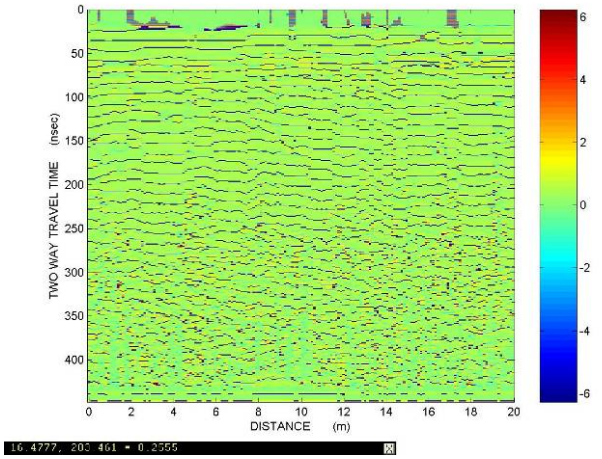
1, 2, 3



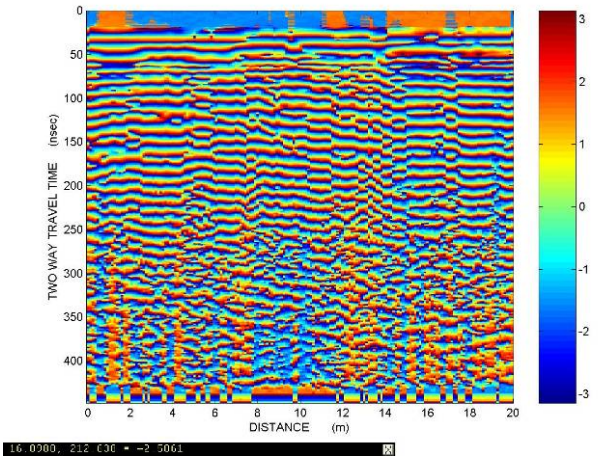
1, 2, 3, 4



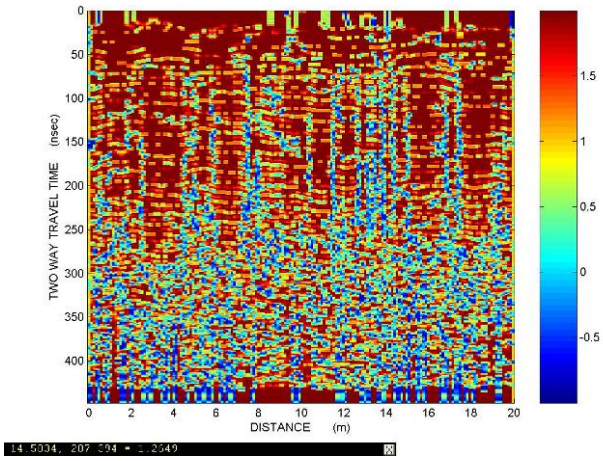
1, 2, 3, 5



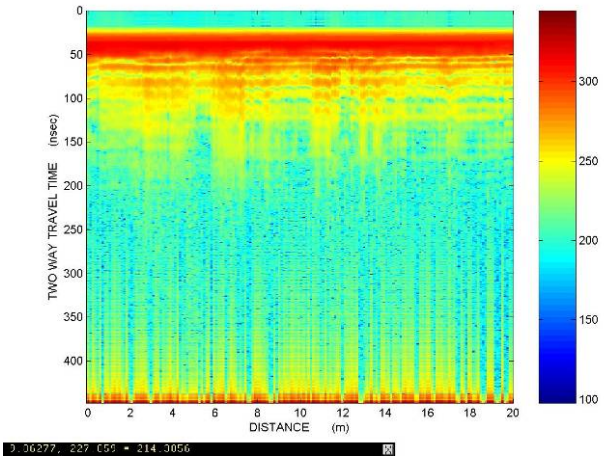
1, 2, 3, 6



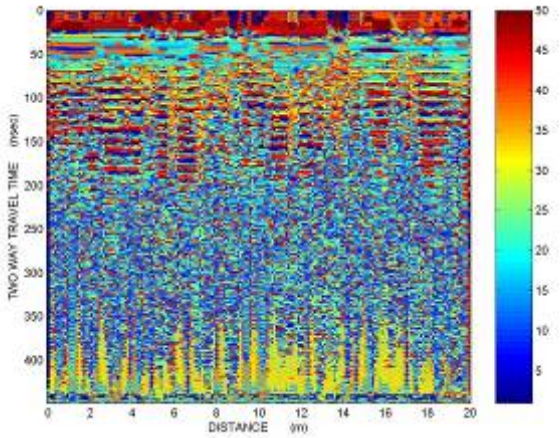
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

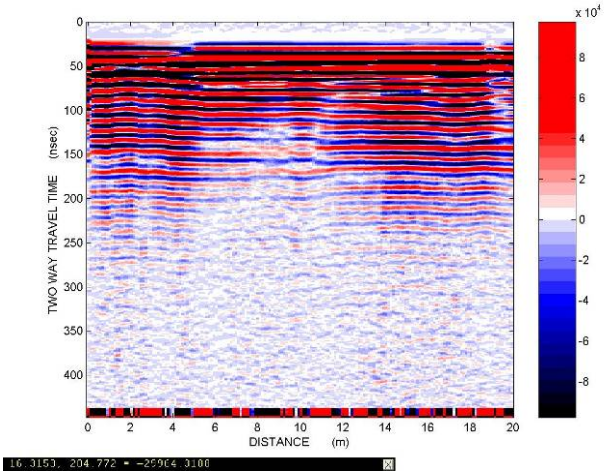


1, 2, 4

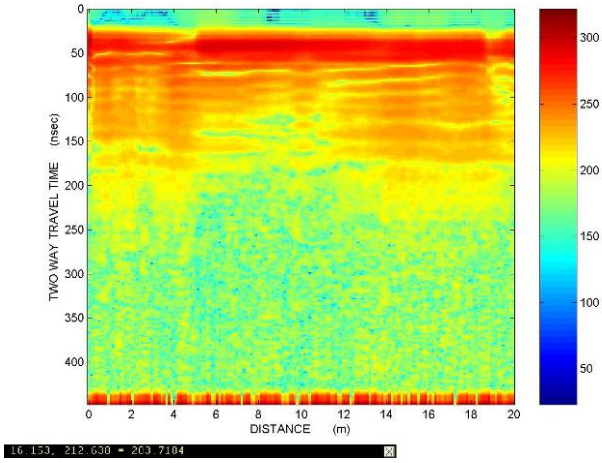


9

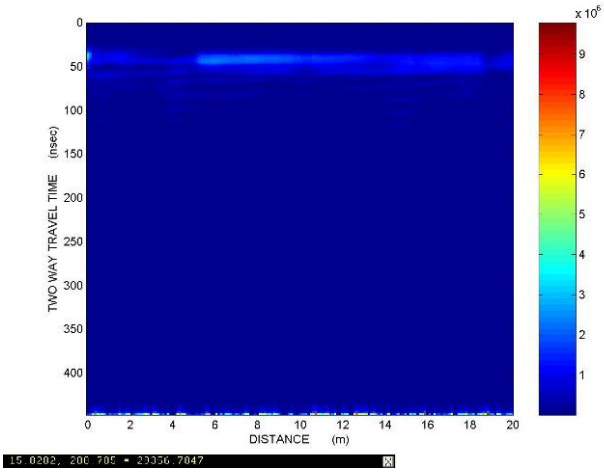
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 06



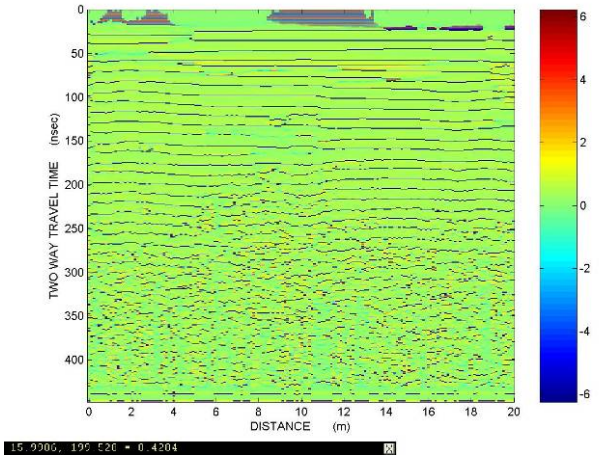
1, 2, 3



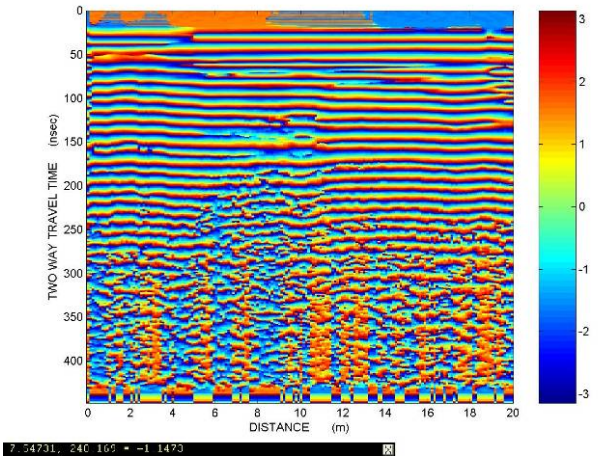
1, 2, 3, 4



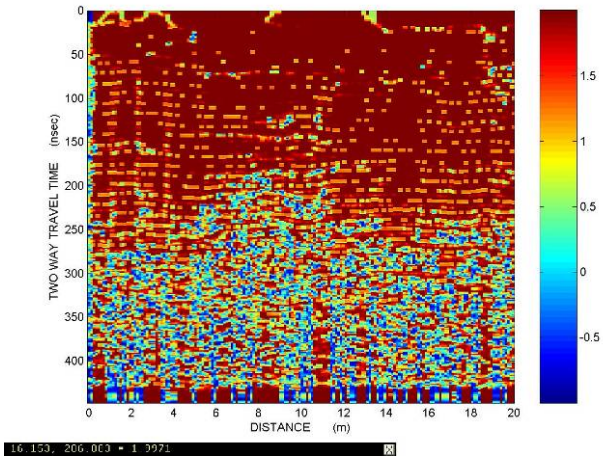
1, 2, 3, 5



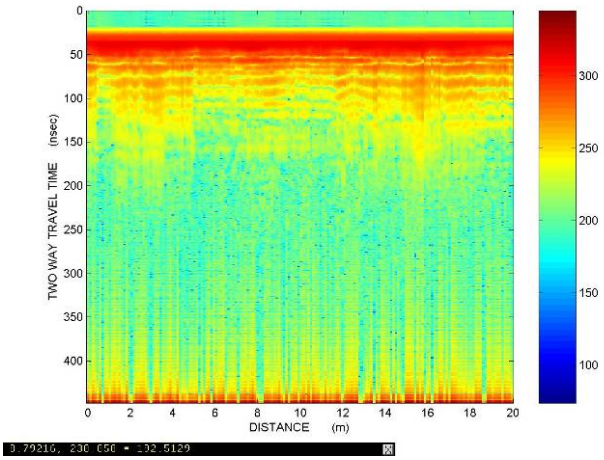
1, 2, 3, 6



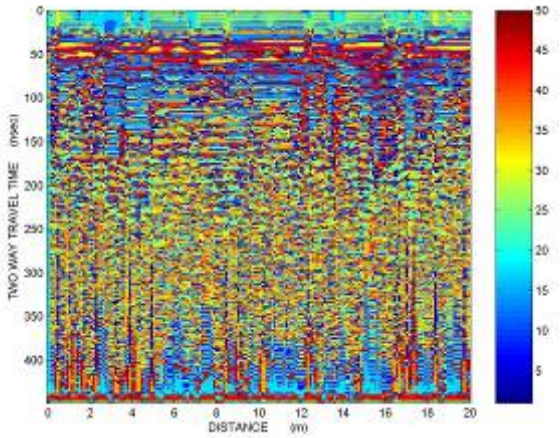
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

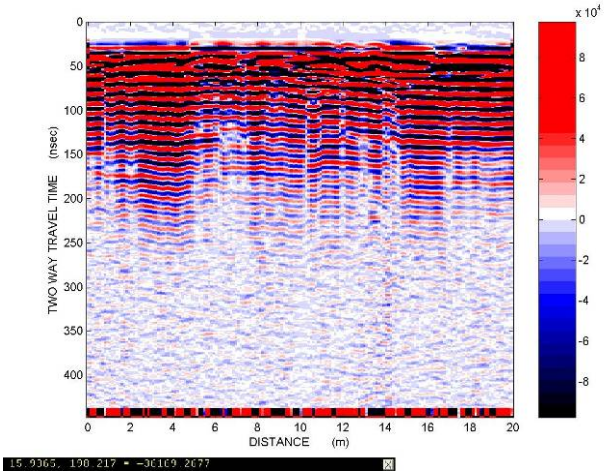


1, 2, 4

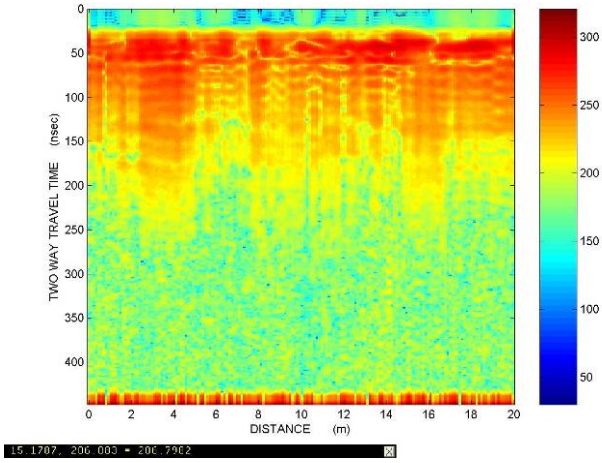


9

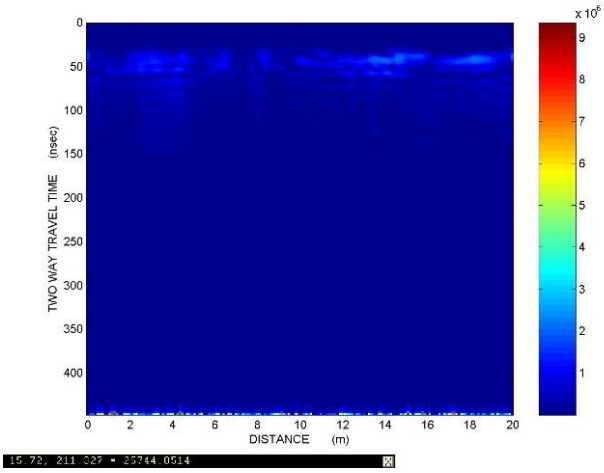
Περιοχή 715Α, Γραμμή μελέτης 07



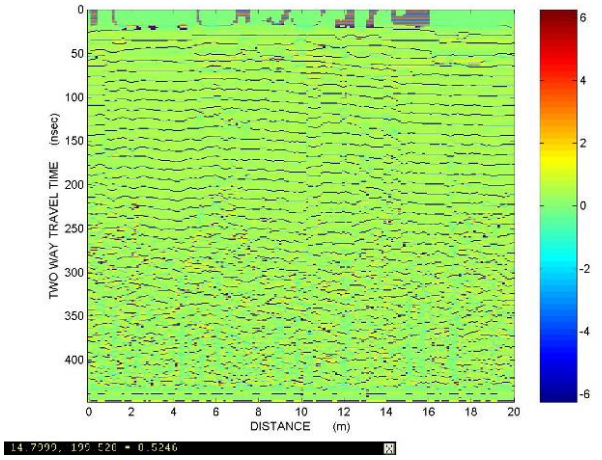
1, 2, 3



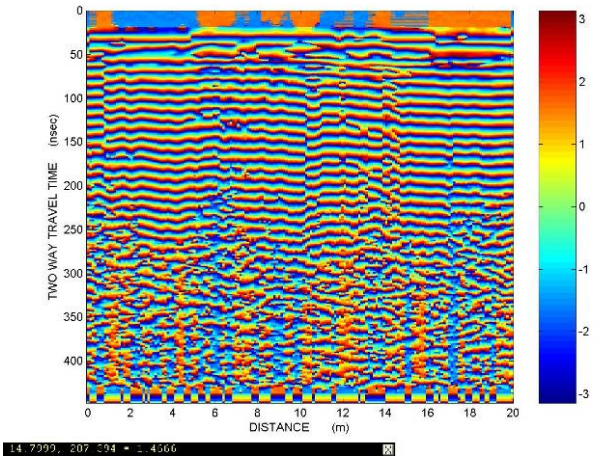
1, 2, 3, 4



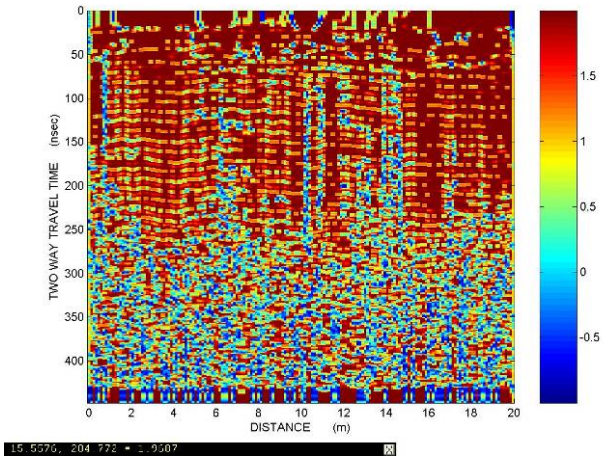
1, 2, 3, 5



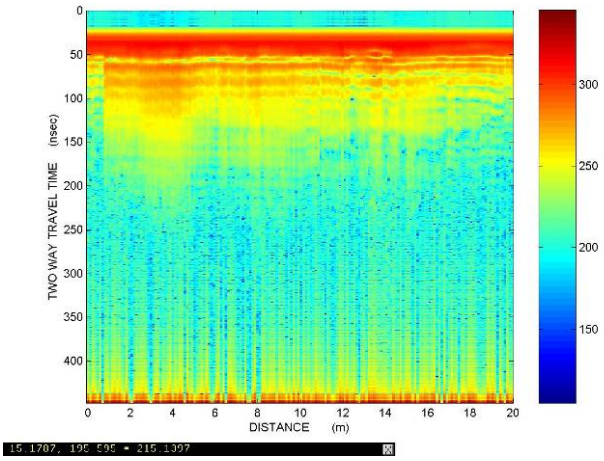
1, 2, 3, 6



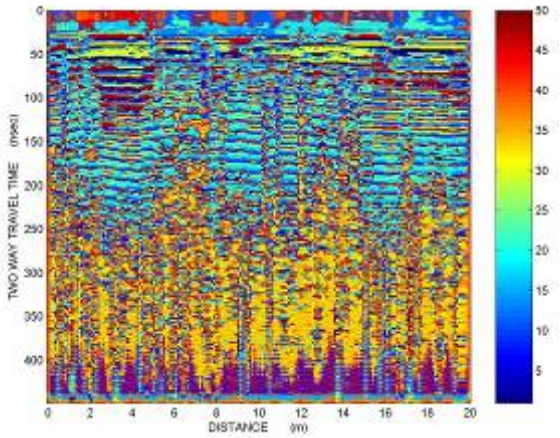
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

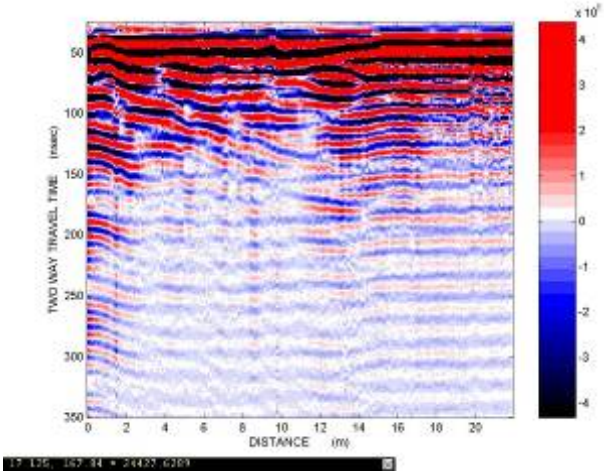


1, 2, 4

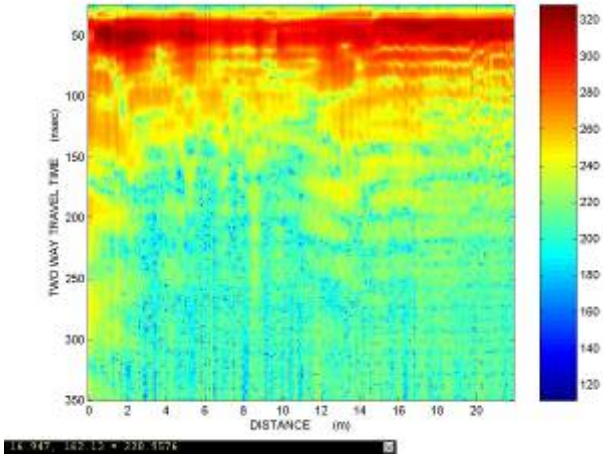


9

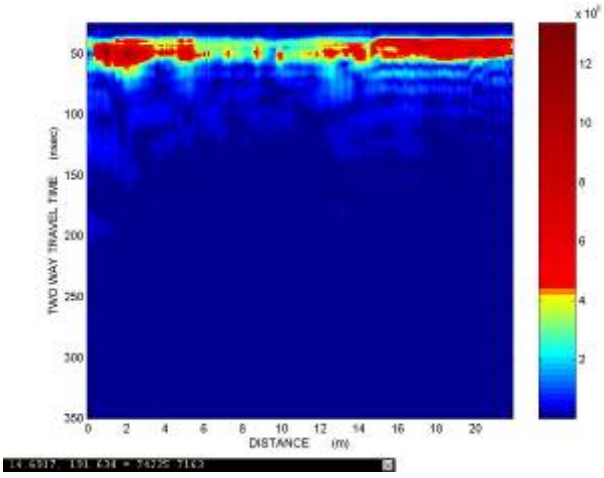
Περιοχή ELPG, Γραμμή μελέτης 01



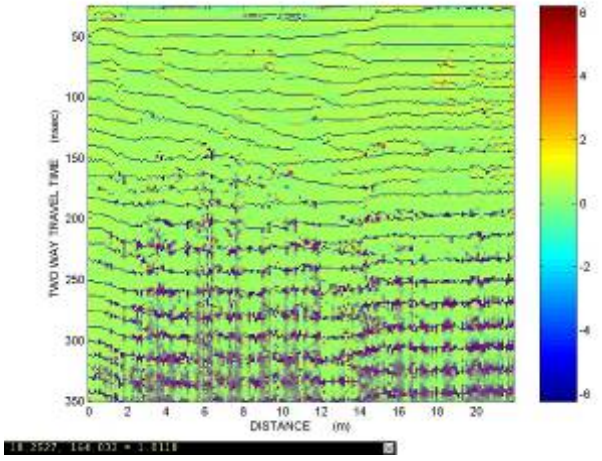
1, 2, 3



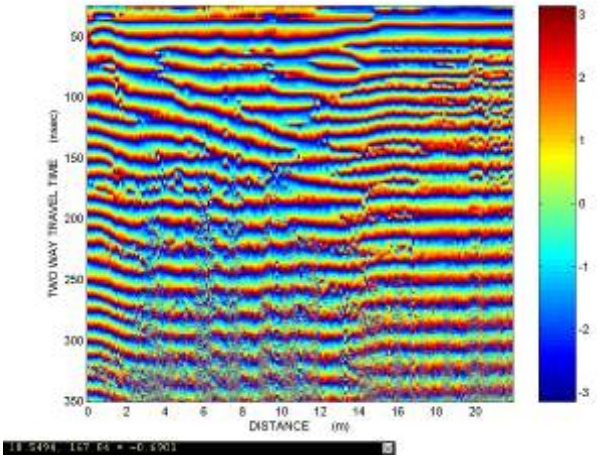
1, 2, 3, 4



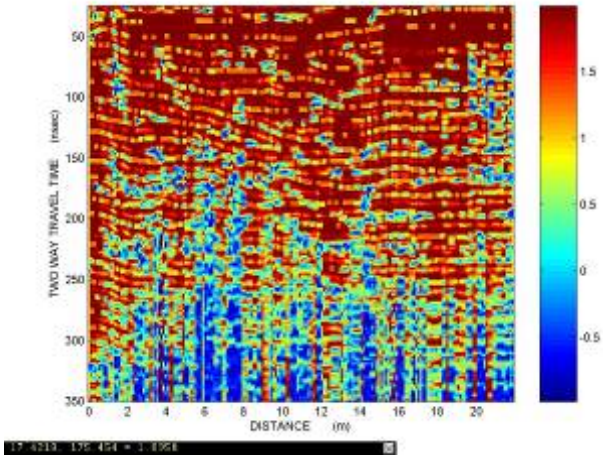
1, 2, 3, 5



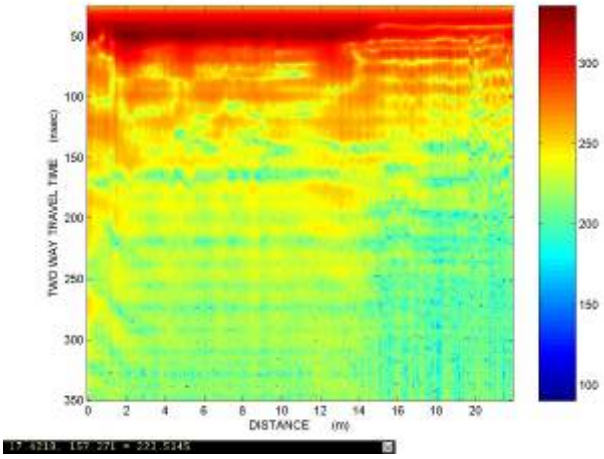
1, 2, 3, 6



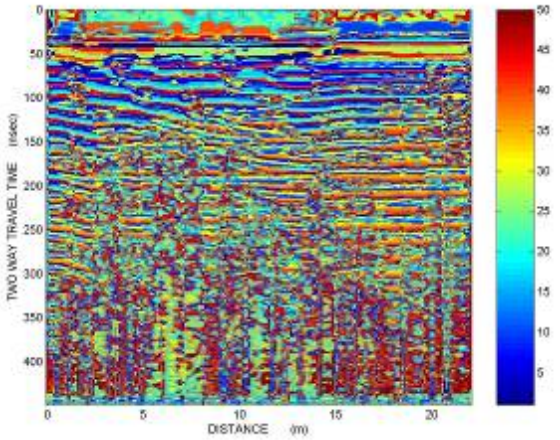
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

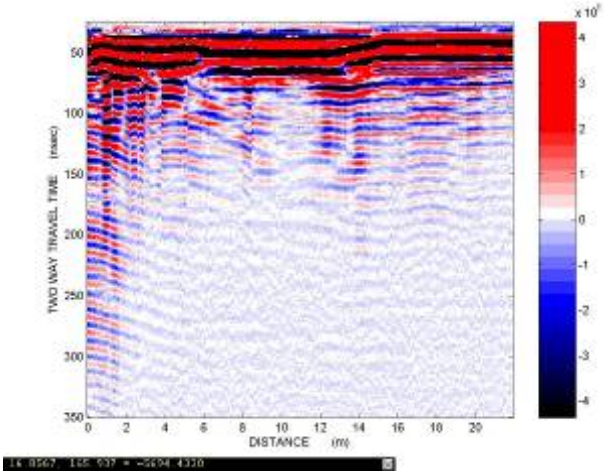


1, 2, 4

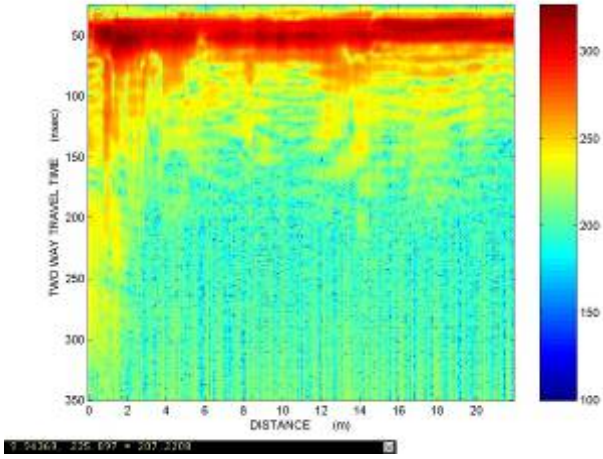


9

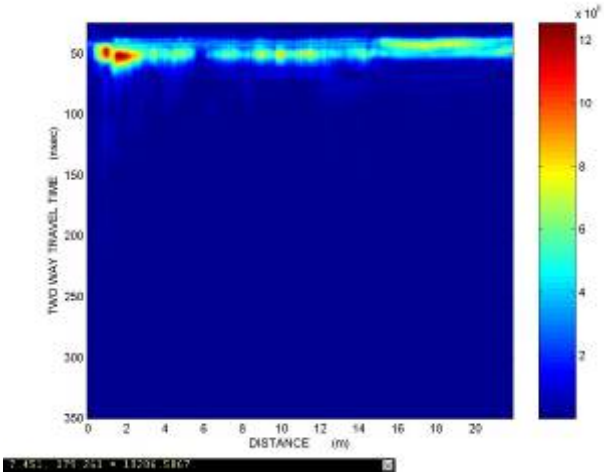
Περιοχή ELPG, Γραμμή μελέτης 02



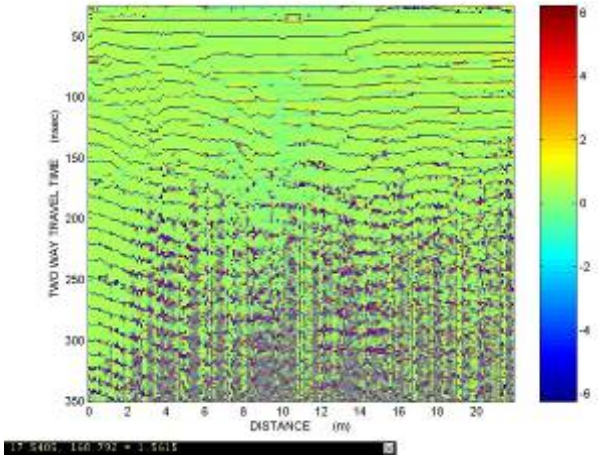
1, 2, 3



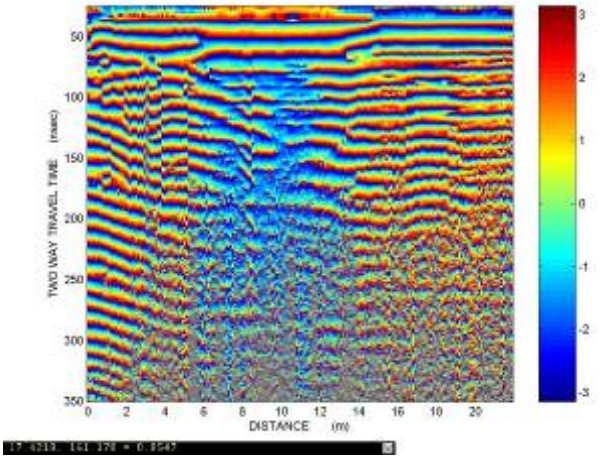
1, 2, 3, 4



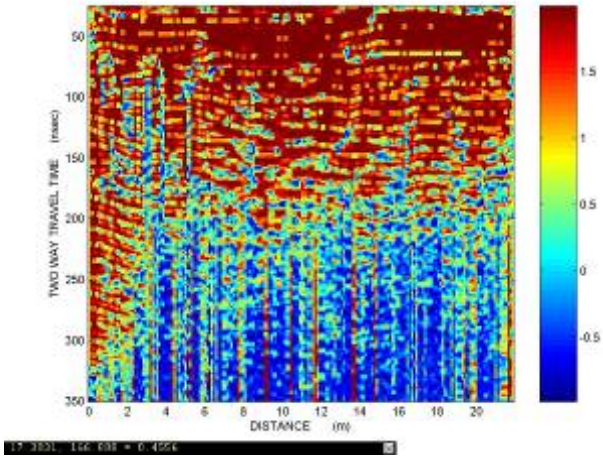
1, 2, 3, 5



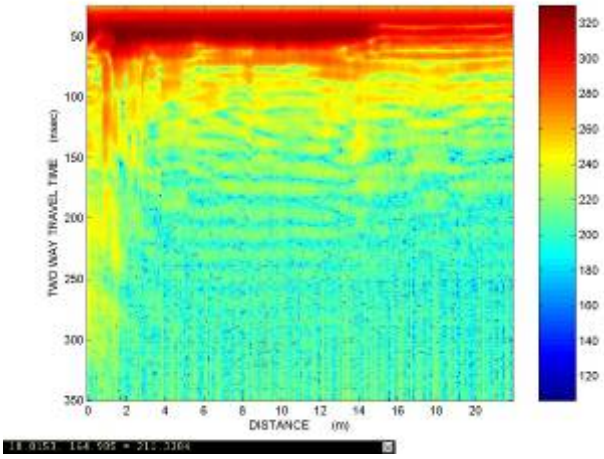
1, 2, 3, 6



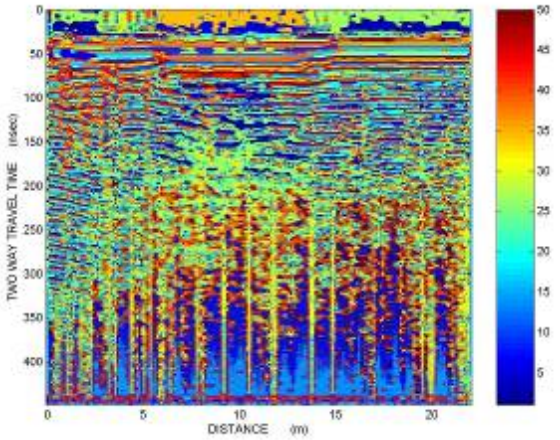
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

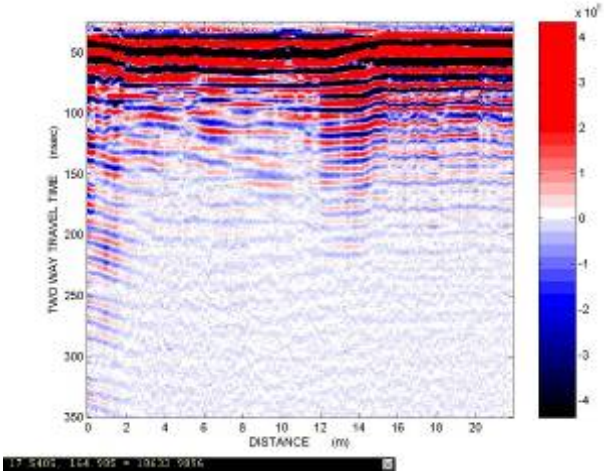


1, 2, 4

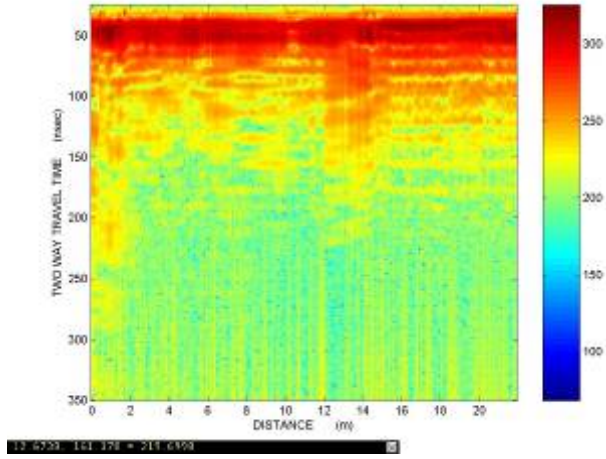


9

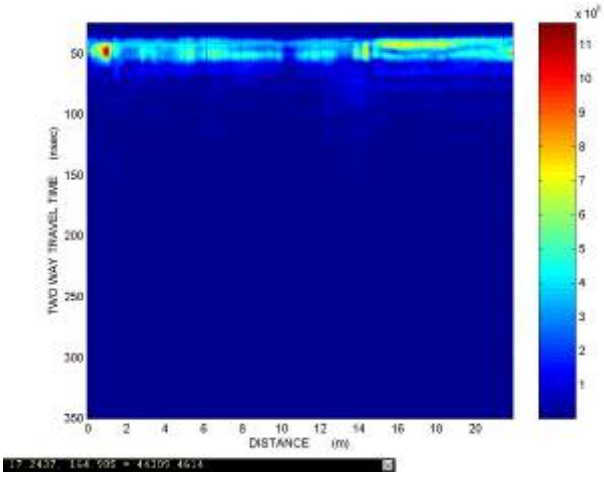
Περιοχή ELPG, Γραμμή μελέτης 03



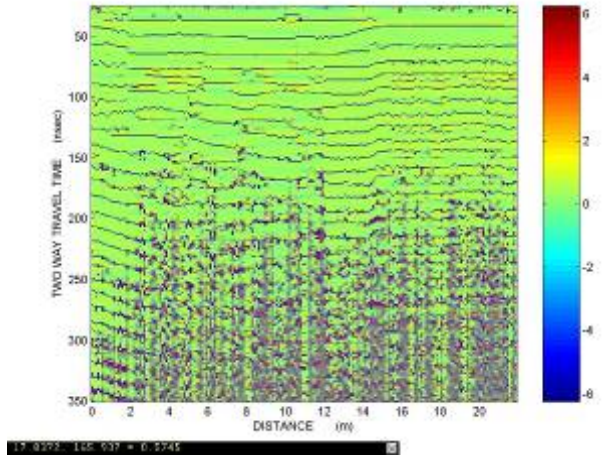
1, 2, 3



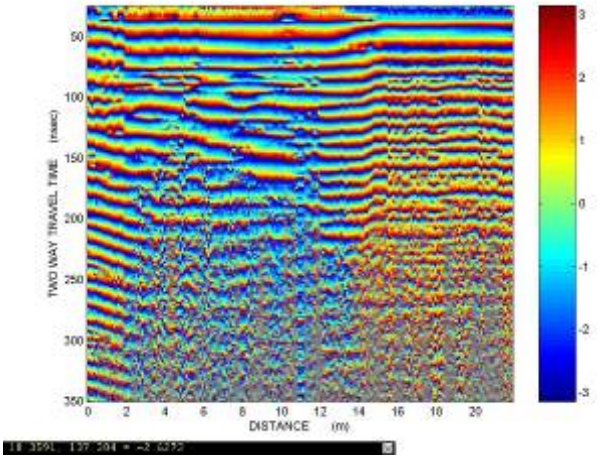
1, 2, 3, 4



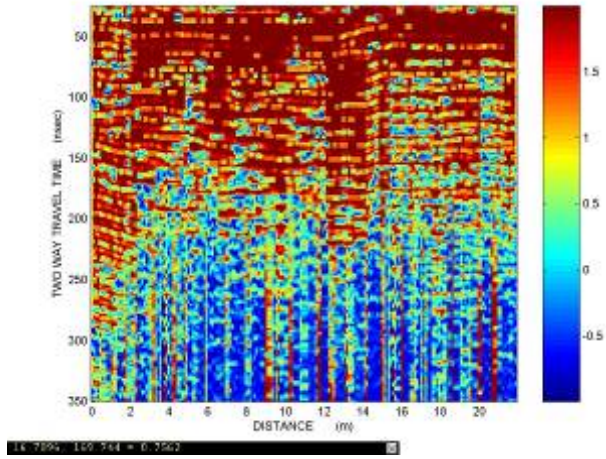
1, 2, 3, 5



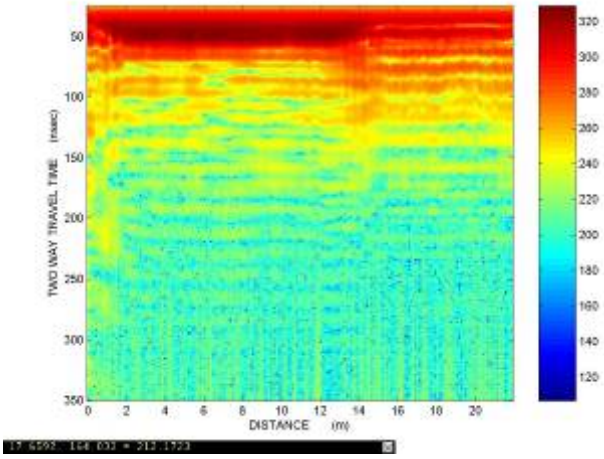
1, 2, 3, 6



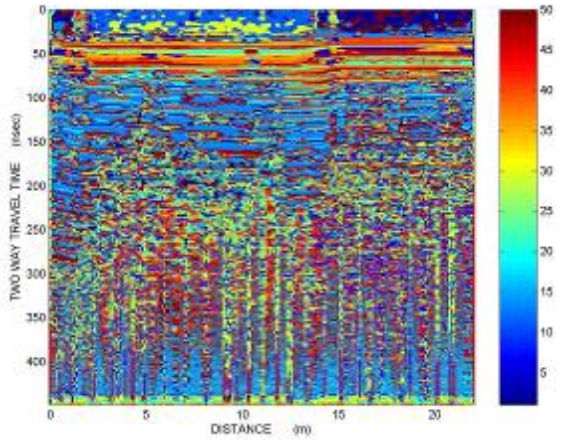
1, 2, 3, 7



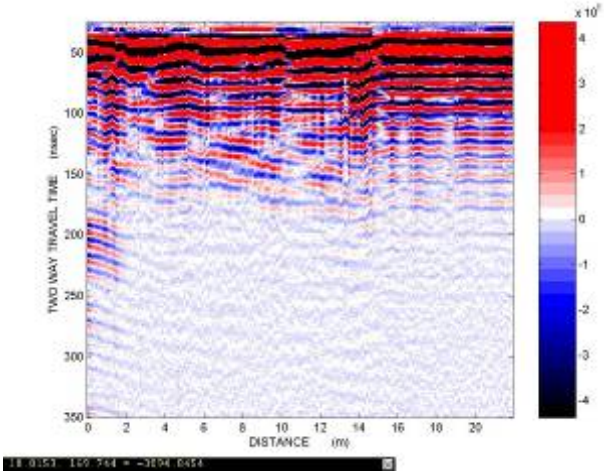
1, 2, 3, 7, 8



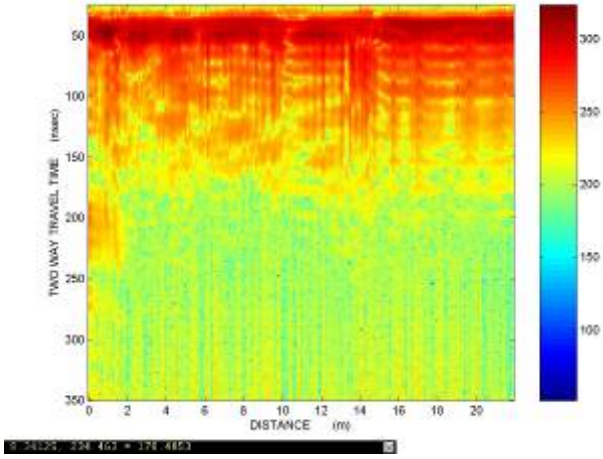
1, 2, 4



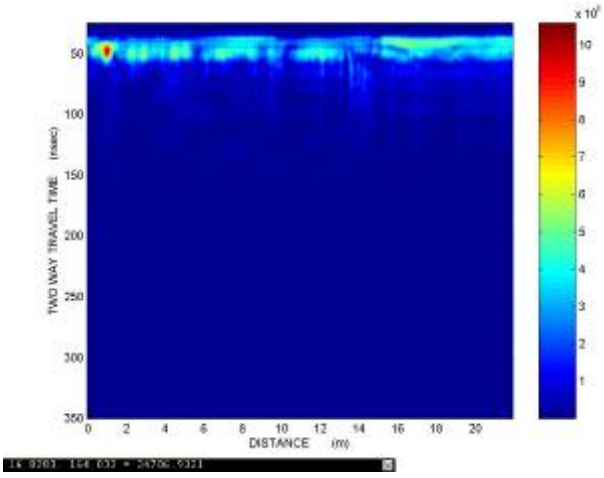
Περιοχή ELPG, Γραμμή μελέτης 04



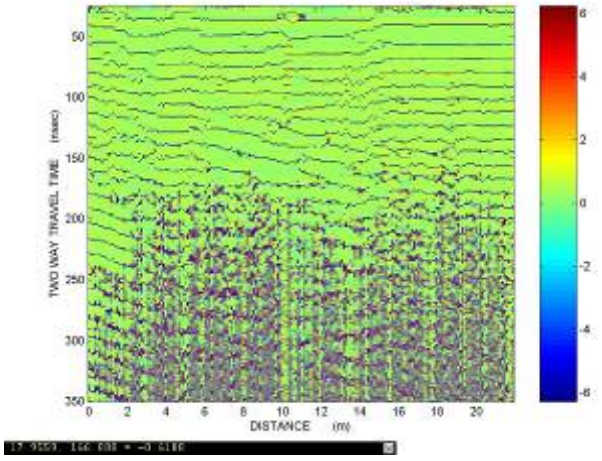
1, 2, 3



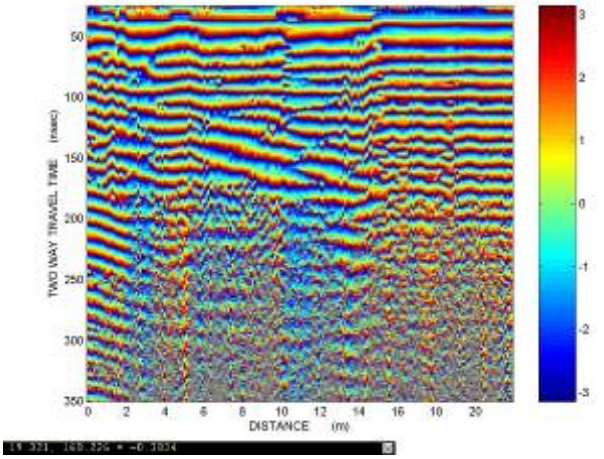
1, 2, 3, 4



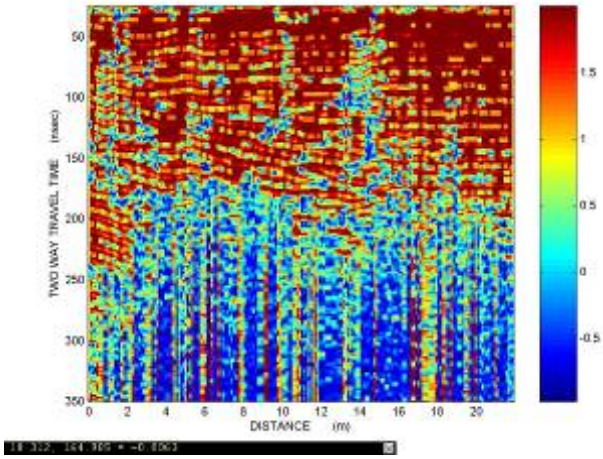
1, 2, 3, 5



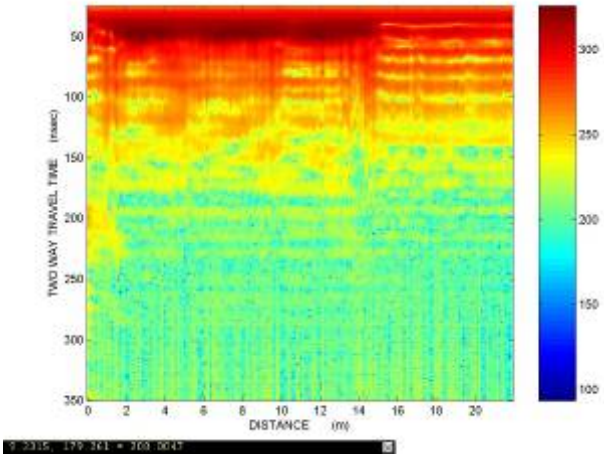
1, 2, 3, 6



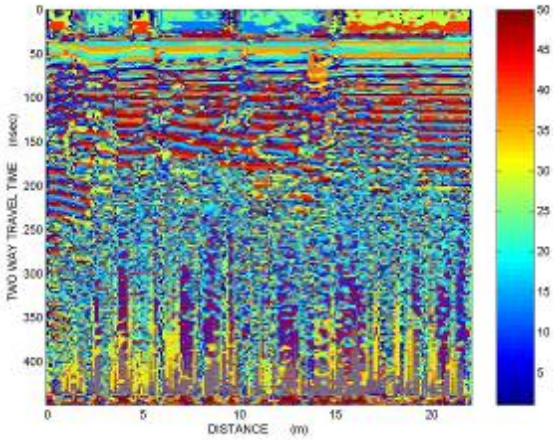
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

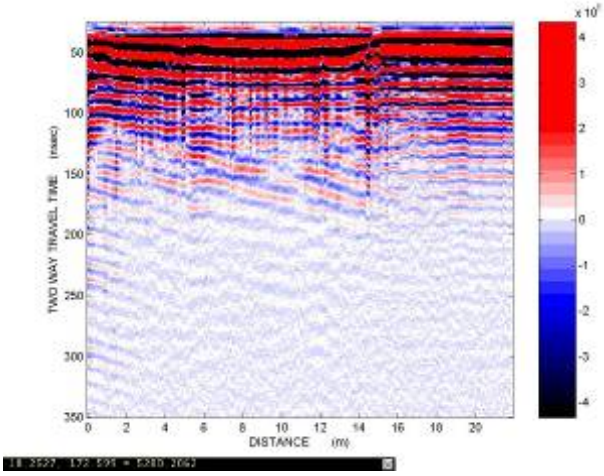


1, 2, 4

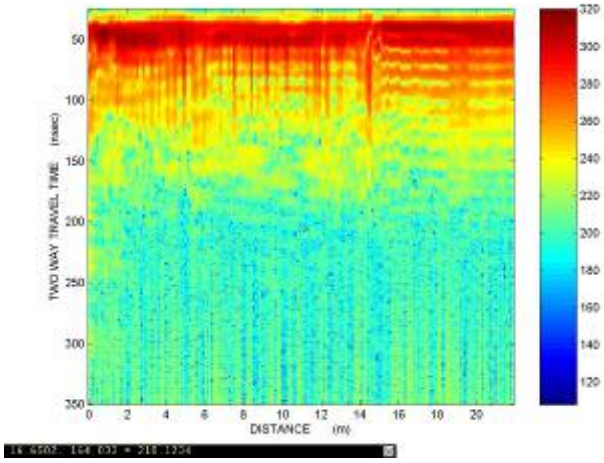


9

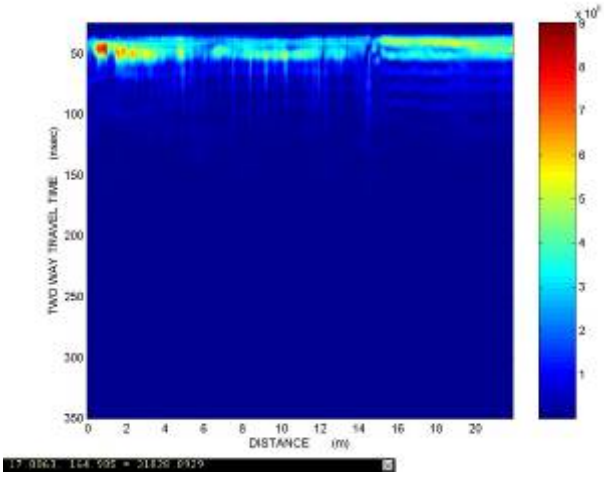
Περιοχή ELPG, Γραμμή μελέτης 05



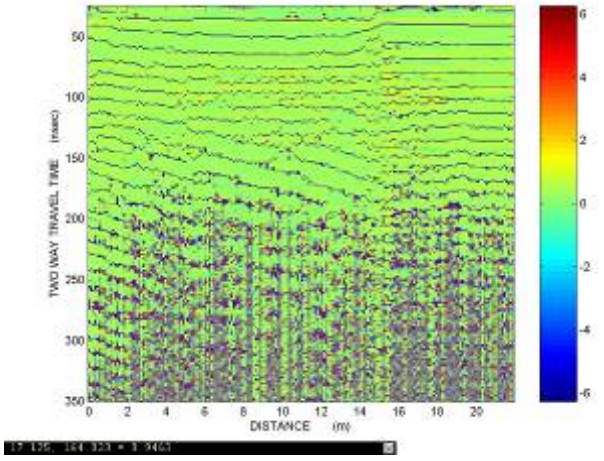
1, 2, 3



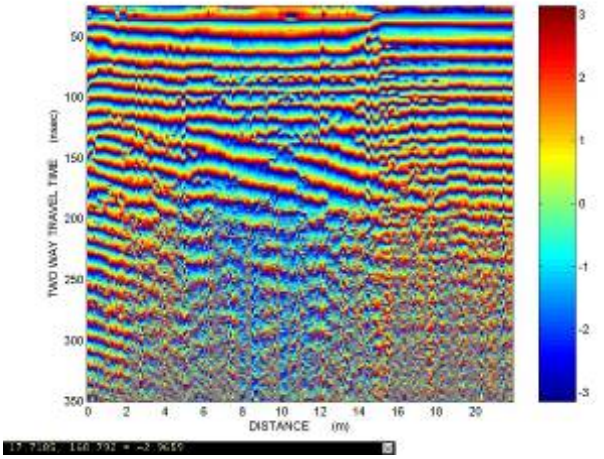
1, 2, 3, 4



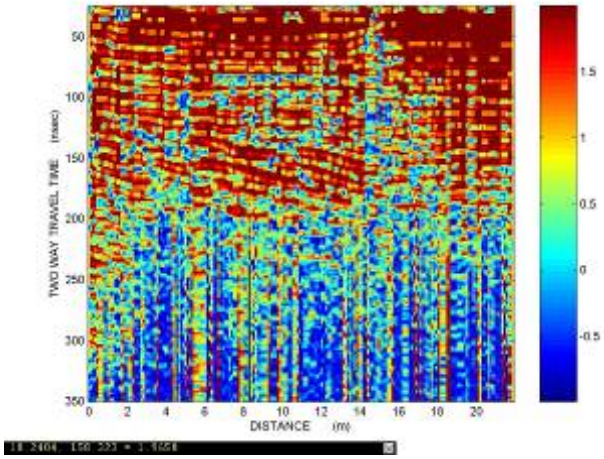
1, 2, 3, 5



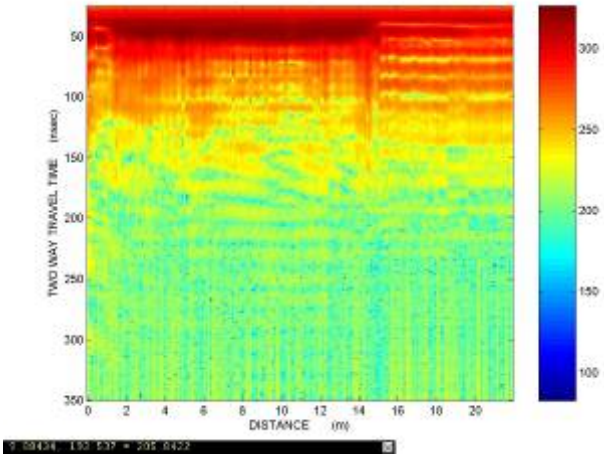
1, 2, 3, 6



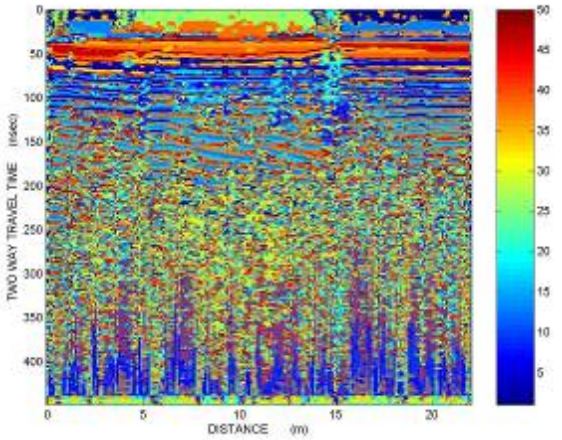
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8

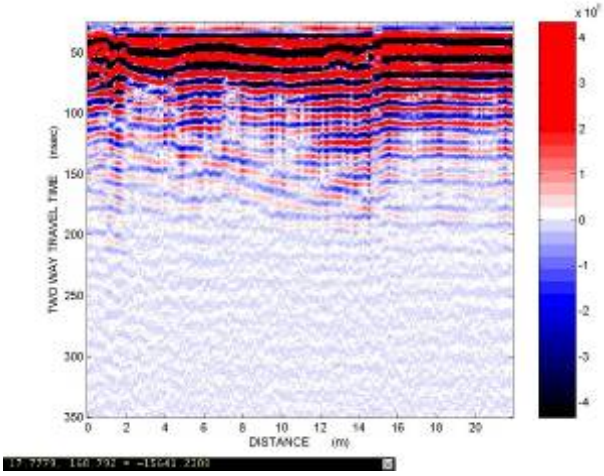


1, 2, 4

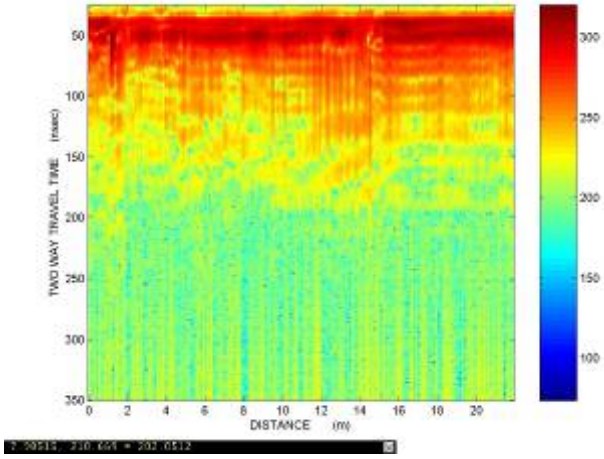


9

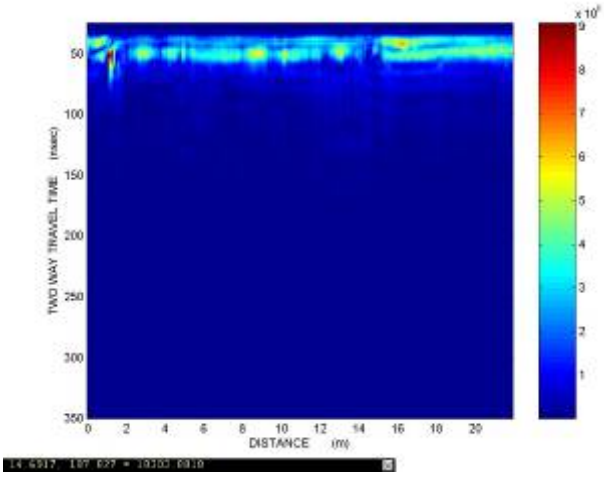
Περιοχή ELPG, Γραμμή μελέτης 06



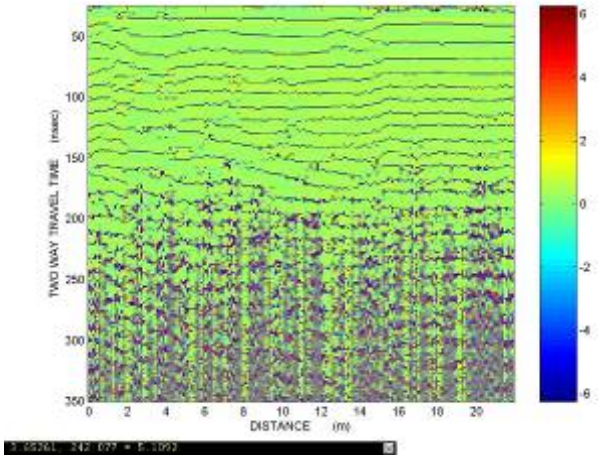
1, 2, 3



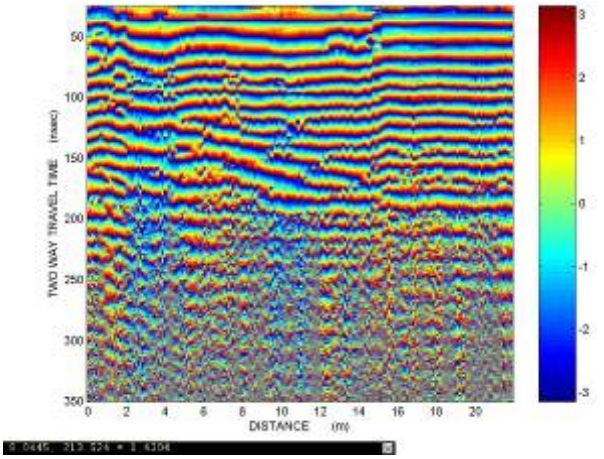
1, 2, 3, 4



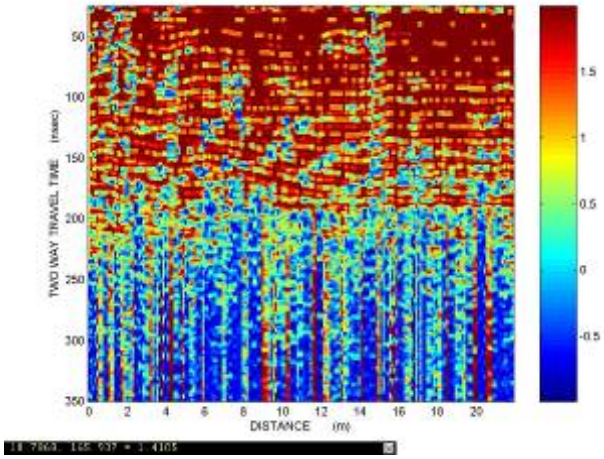
1, 2, 3, 5



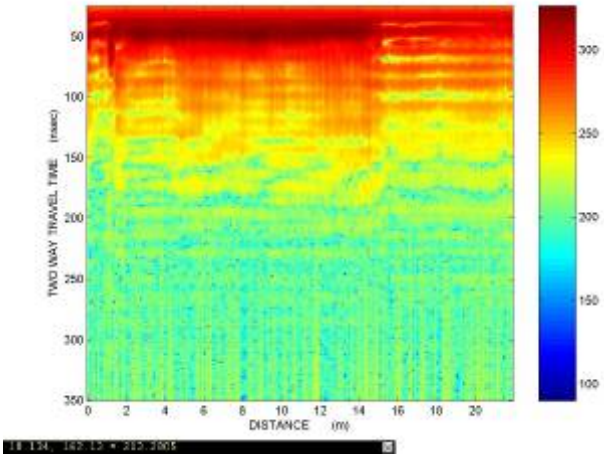
1, 2, 3, 6



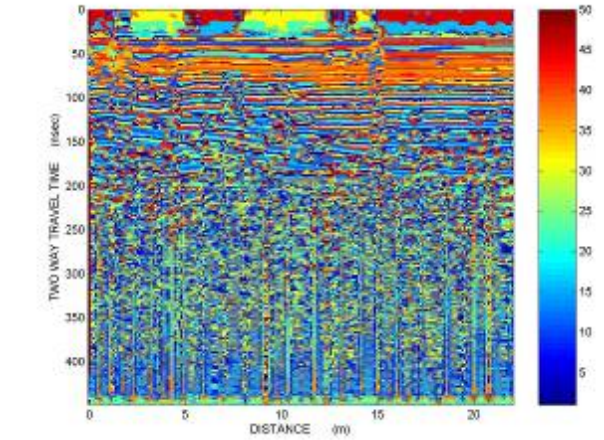
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



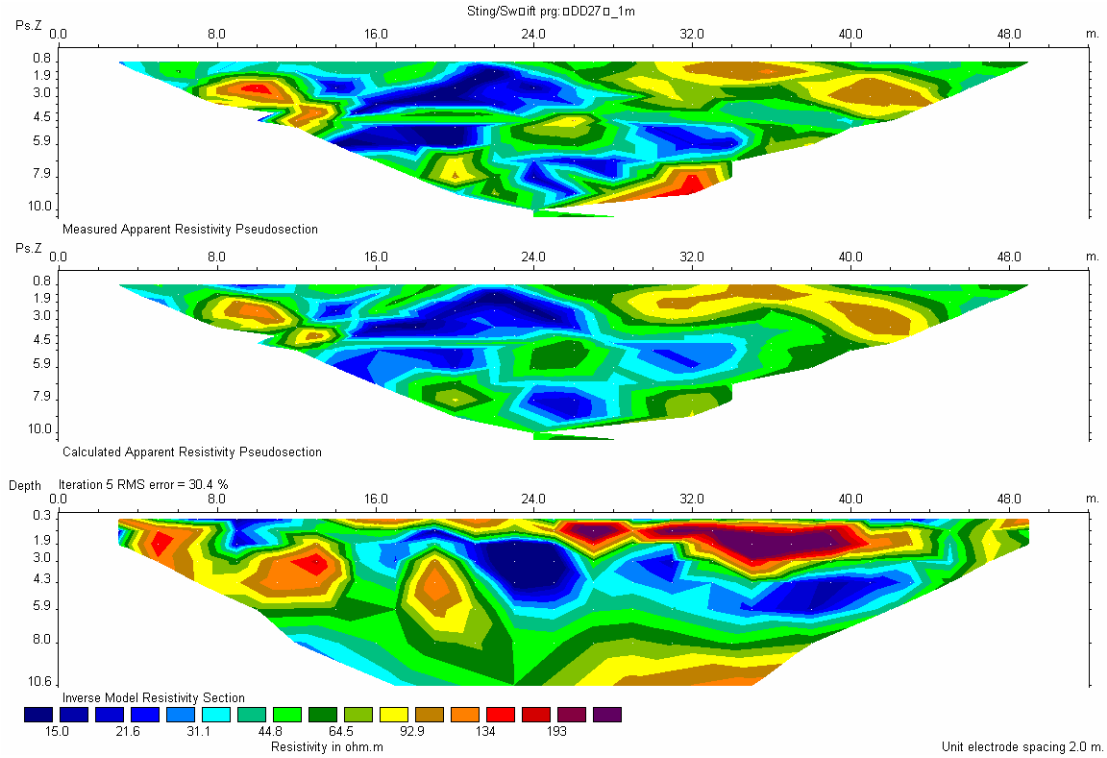
1, 2, 4



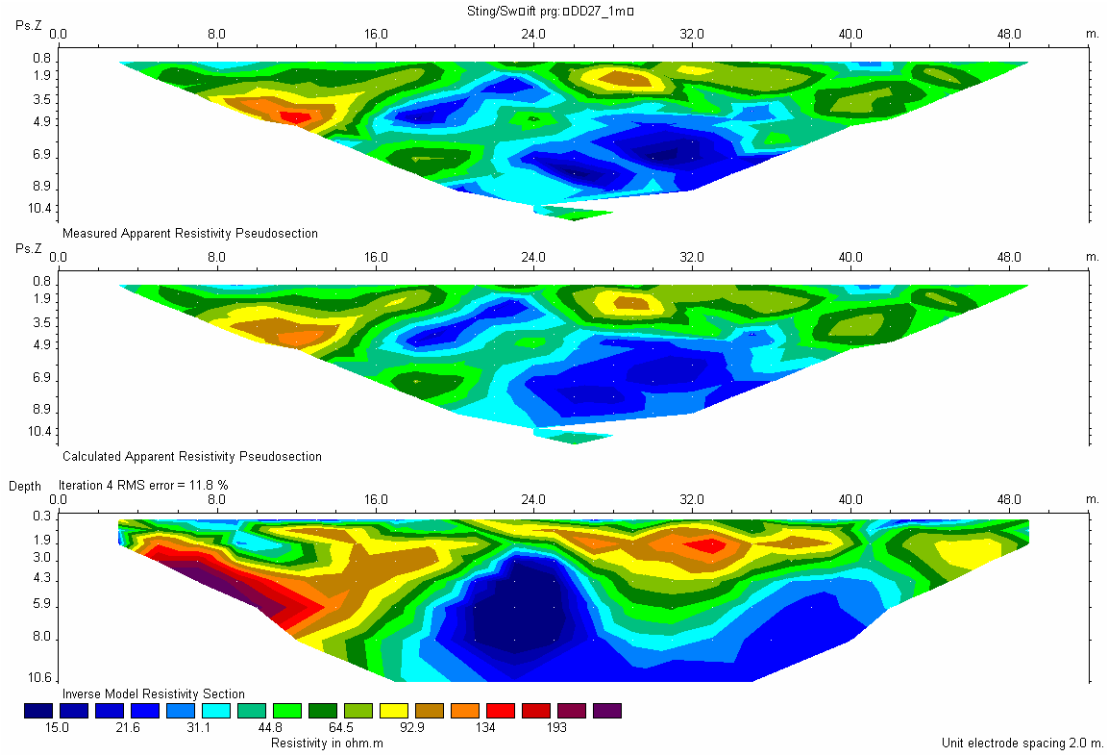
9

Παράρτημα Β:

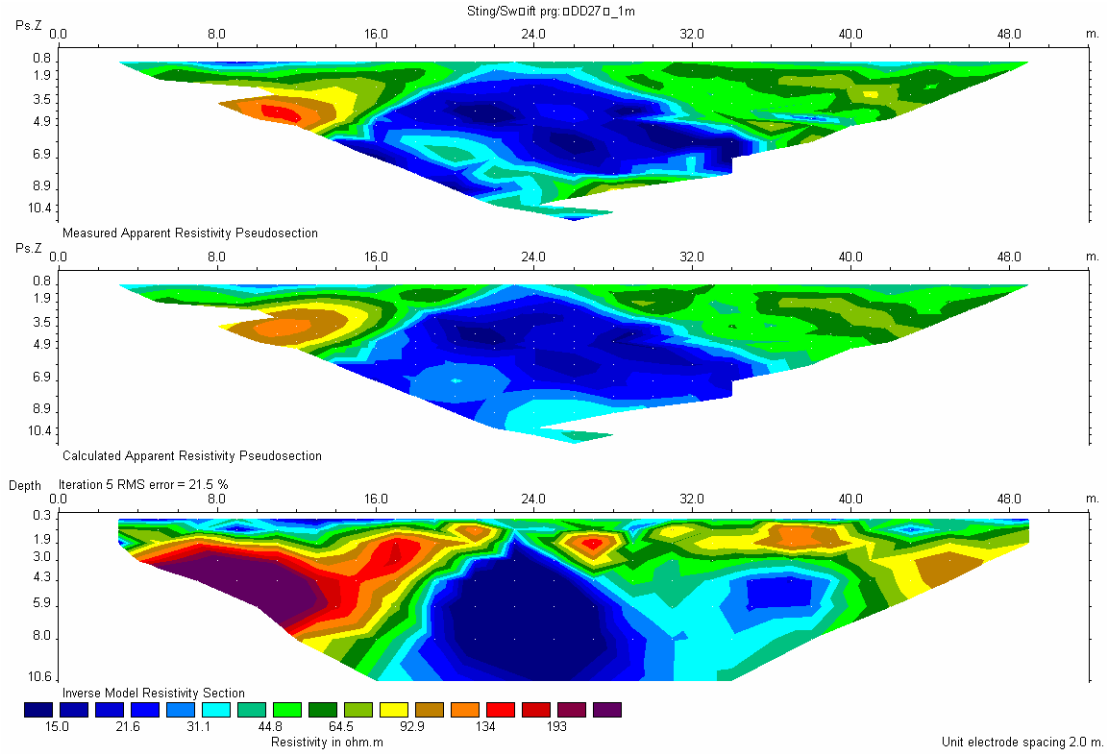
Ψευδοτομές ηλεκτρικής τομογραφίας



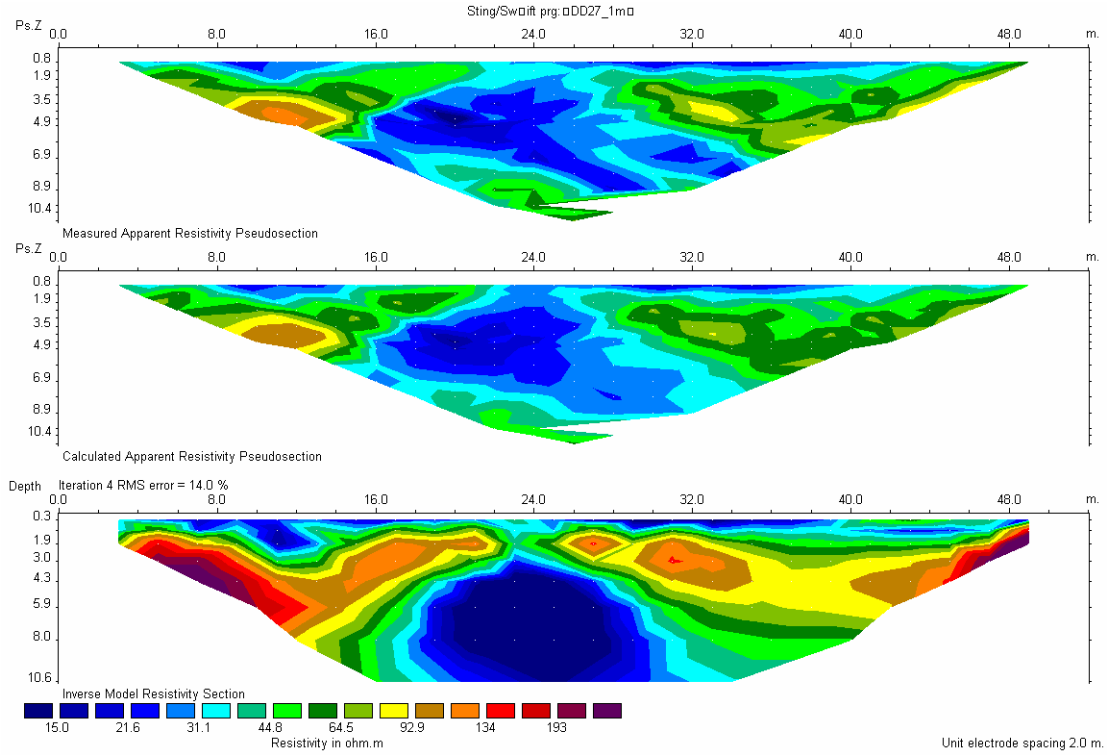
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 00. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



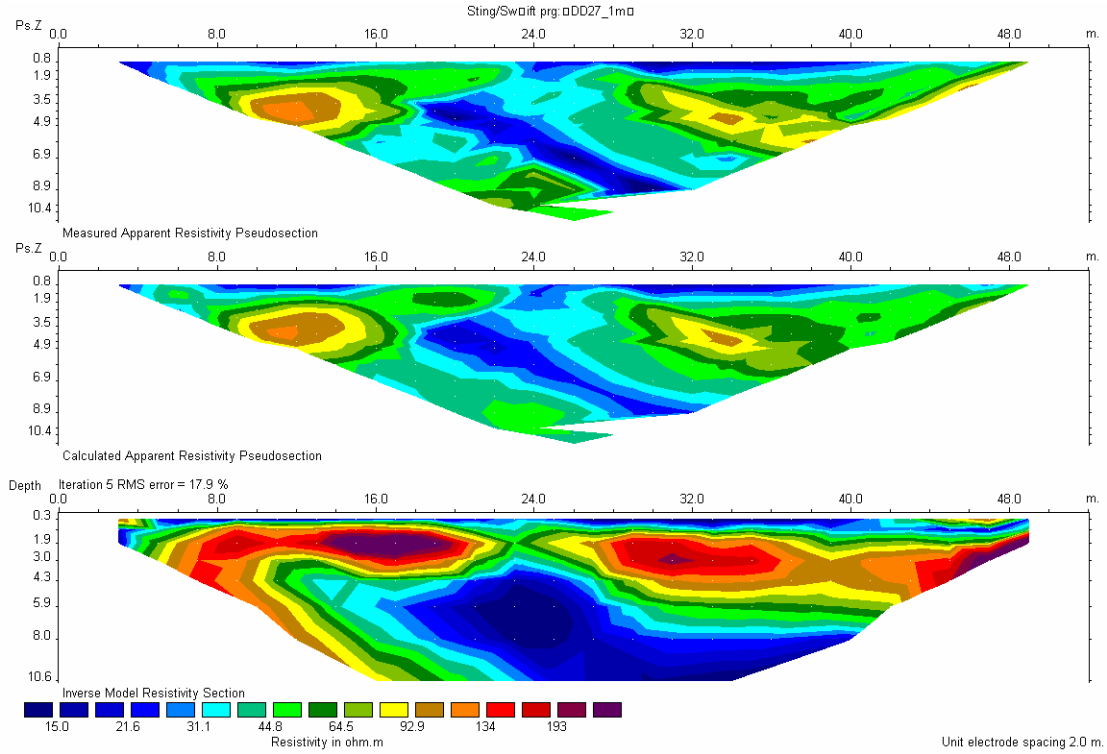
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 02. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



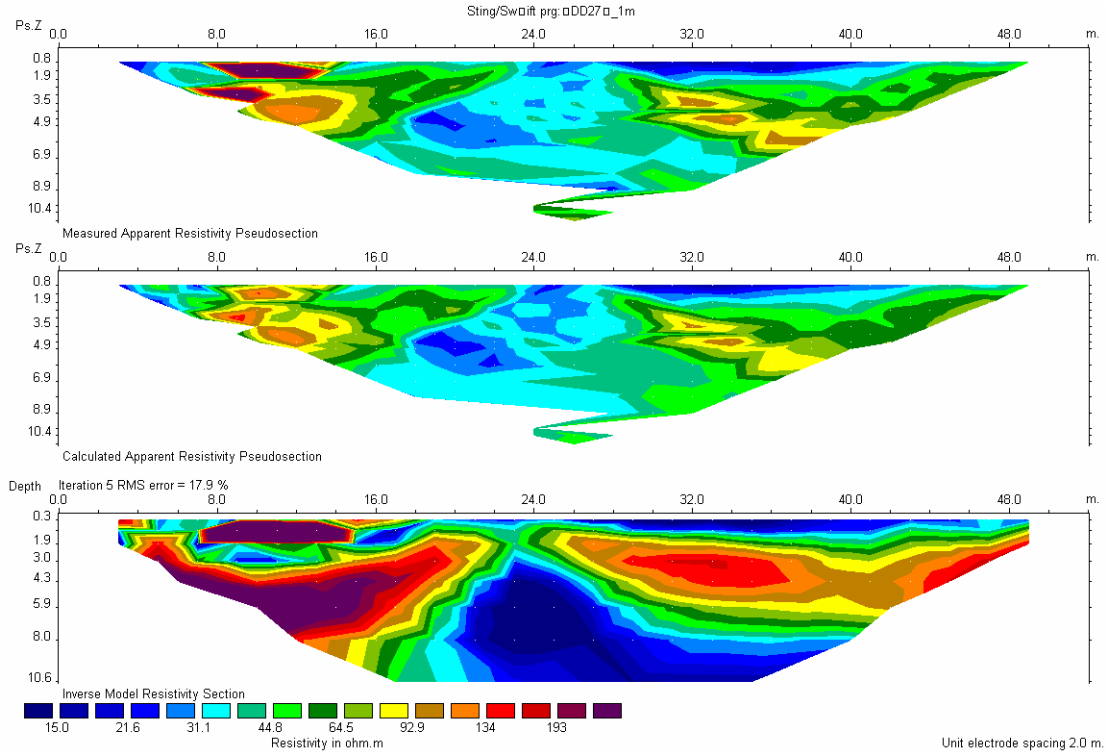
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 04. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



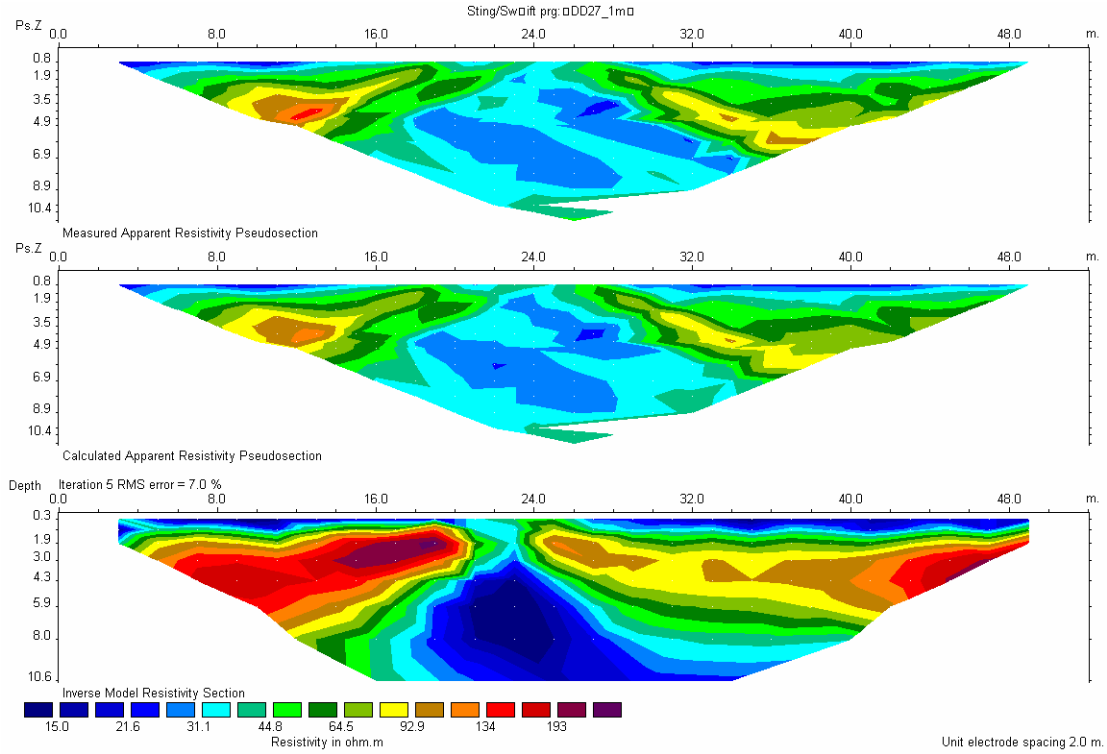
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 06. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



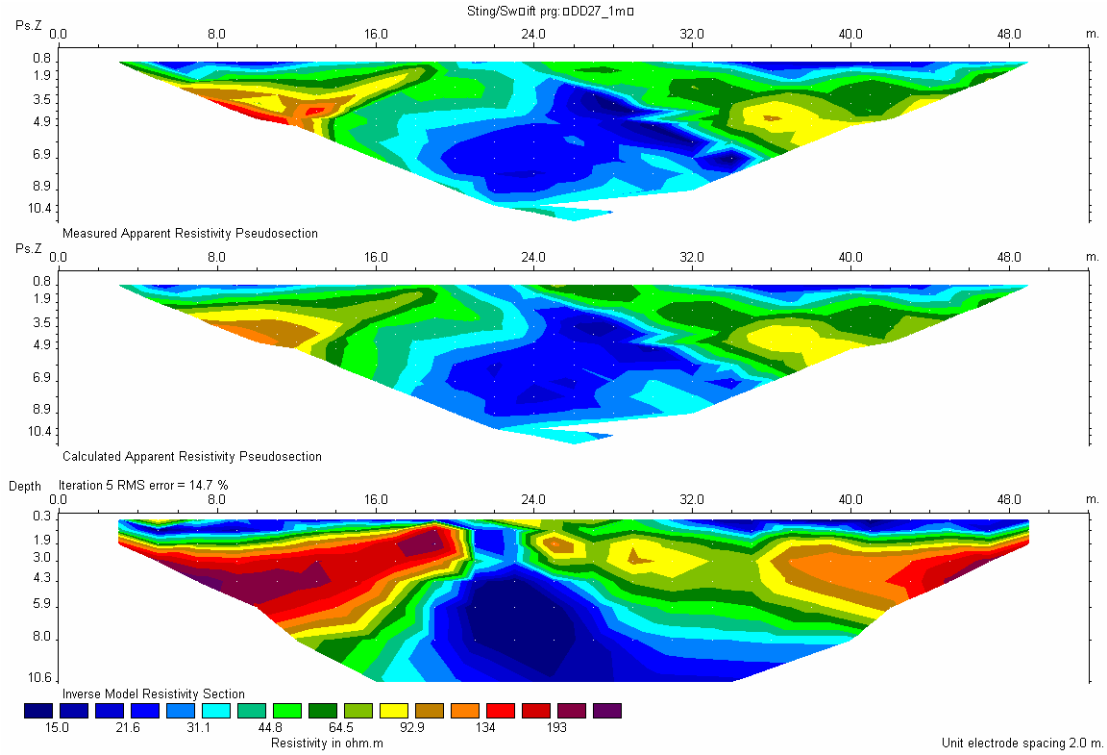
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 08. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



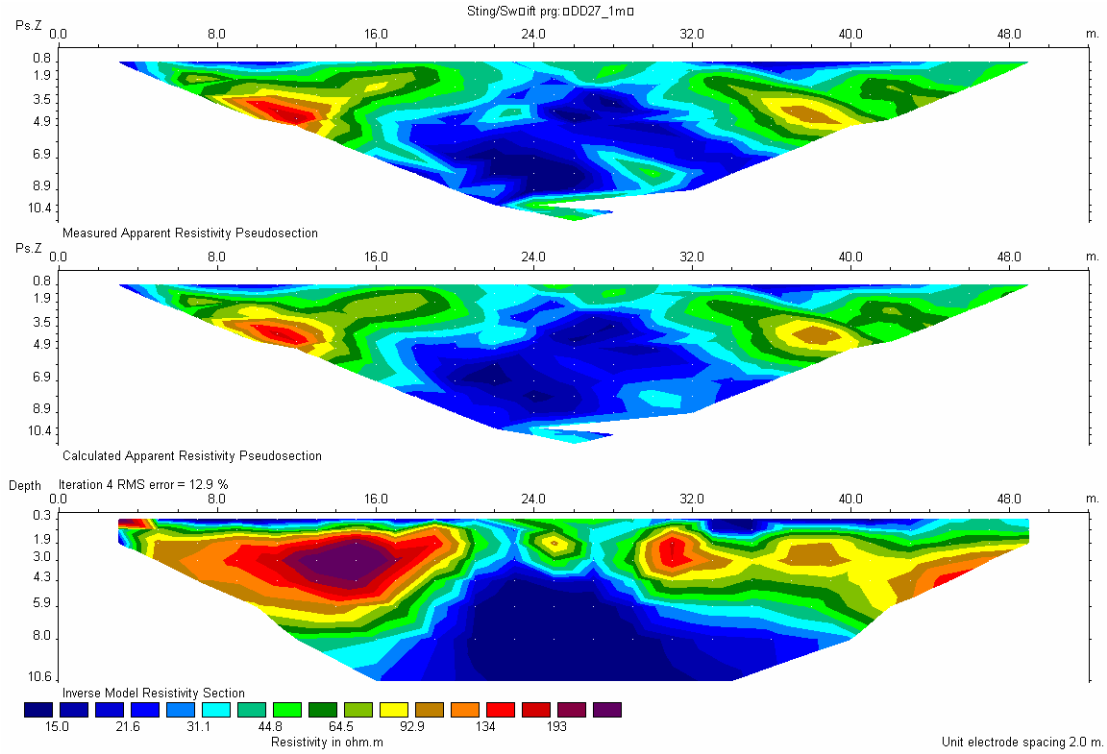
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 10. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



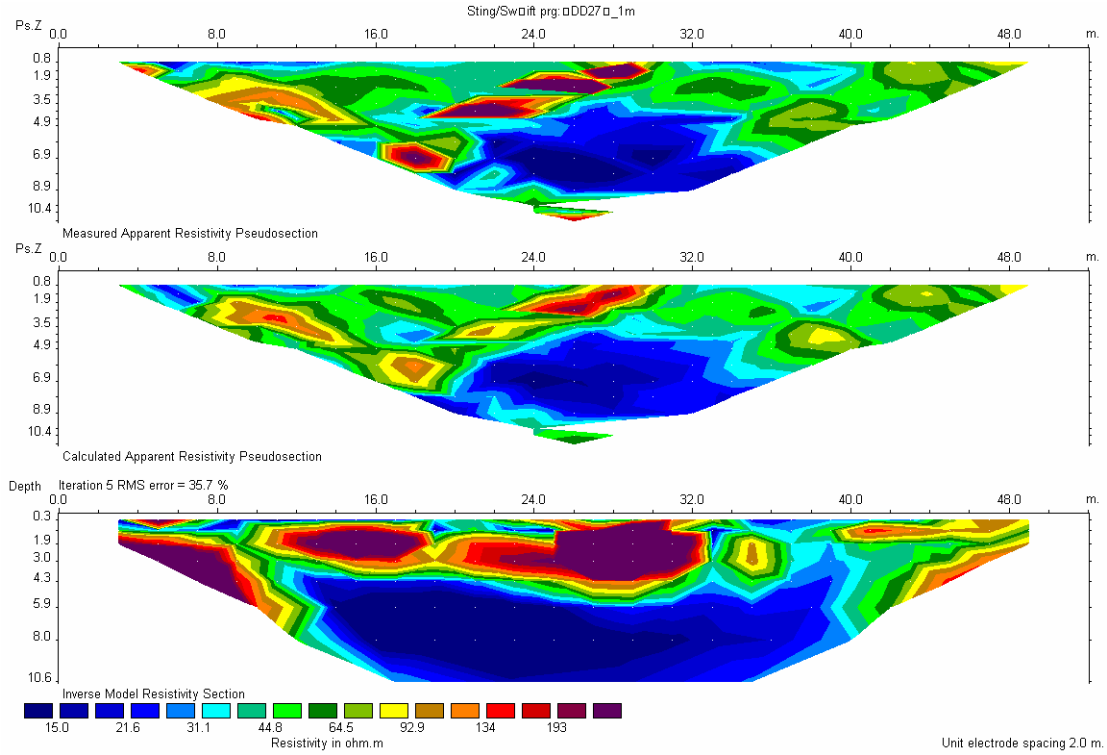
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 12. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



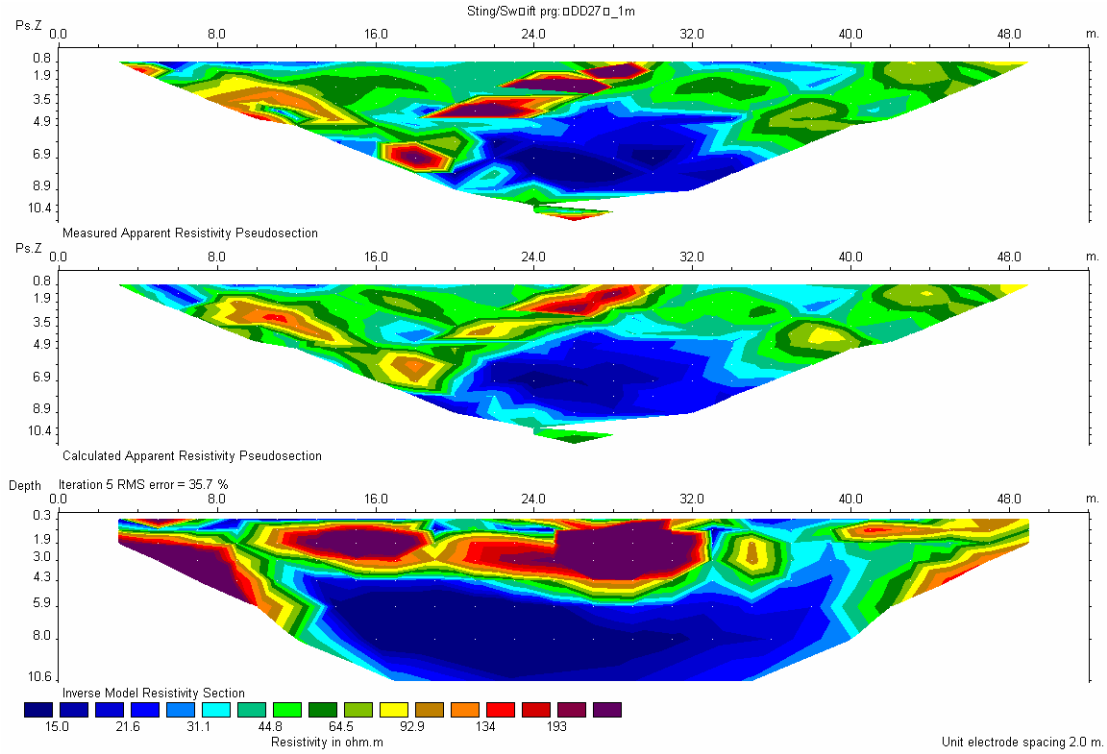
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 14. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



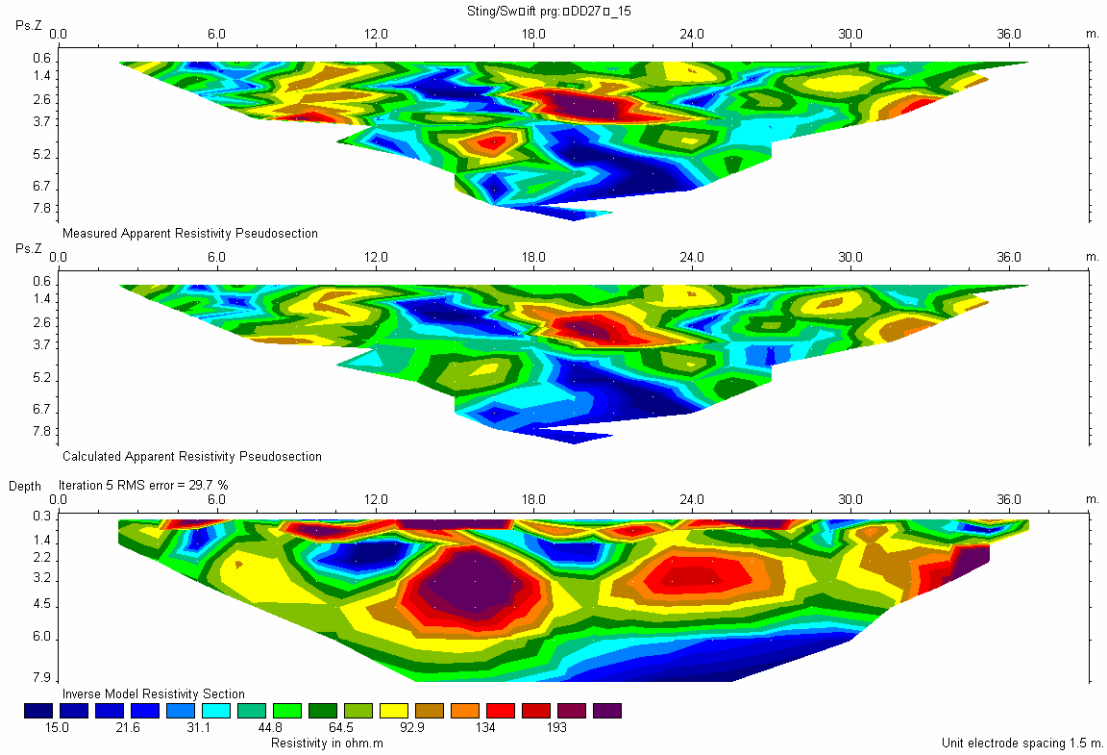
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 16. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



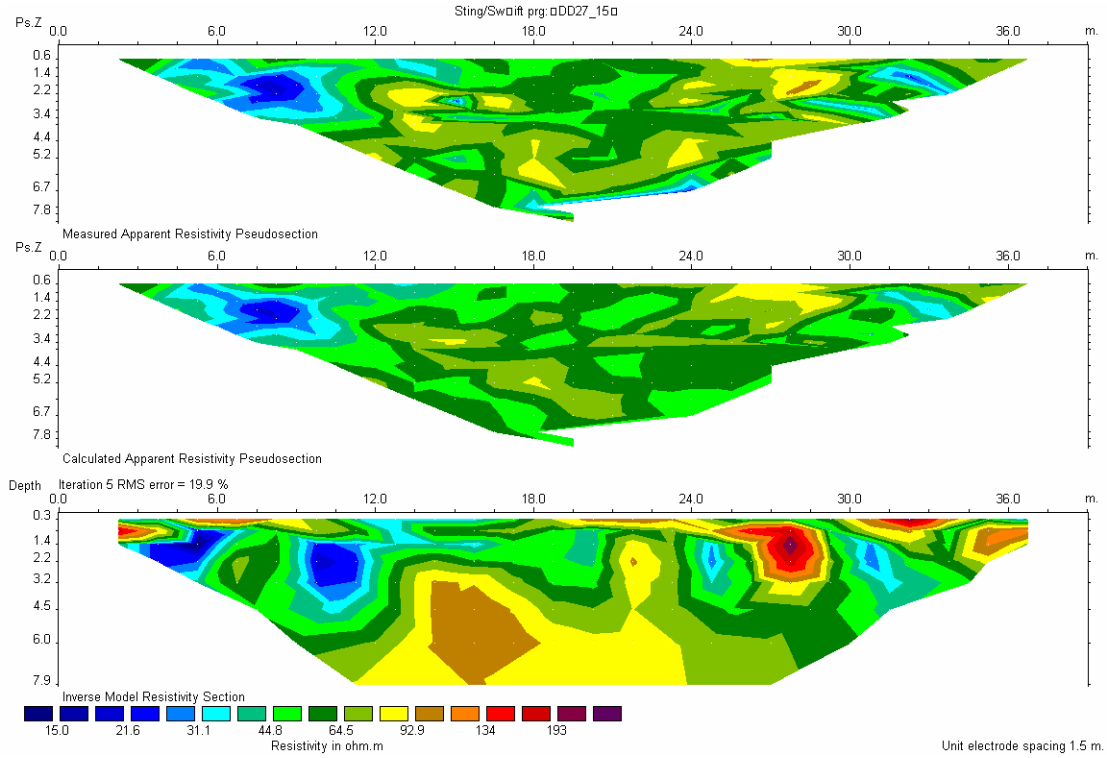
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 18. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



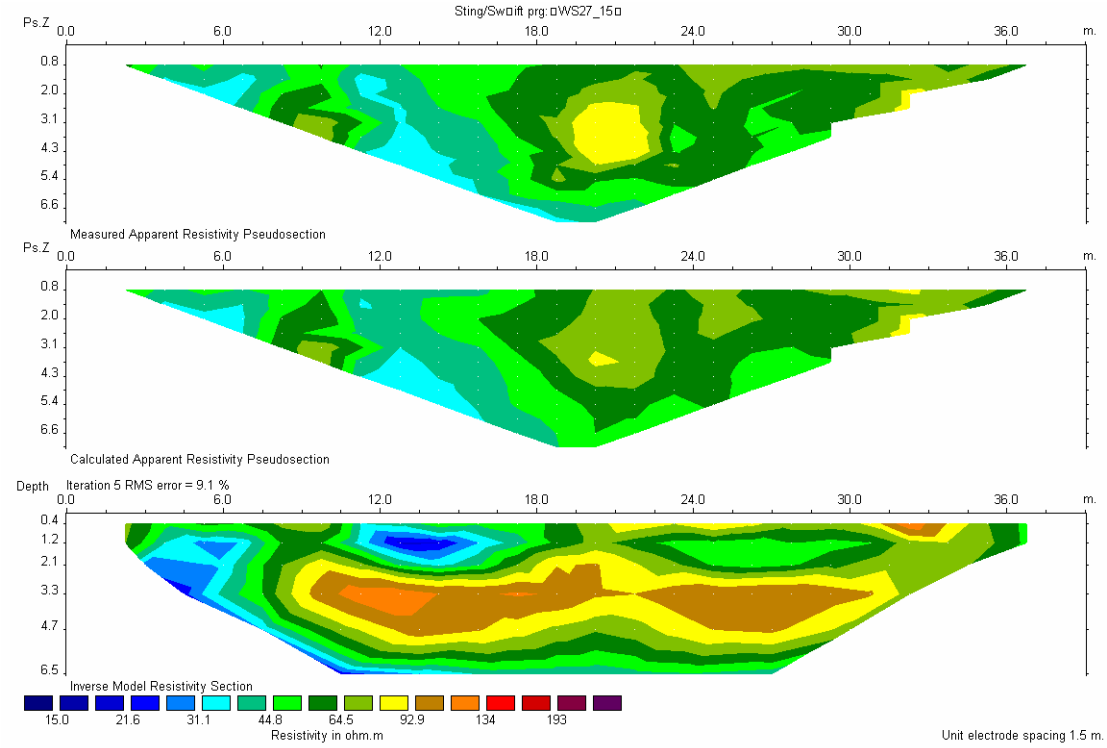
Περιοχή Α: Γραμμή μελέτης 18. Διάταξη Wenne.



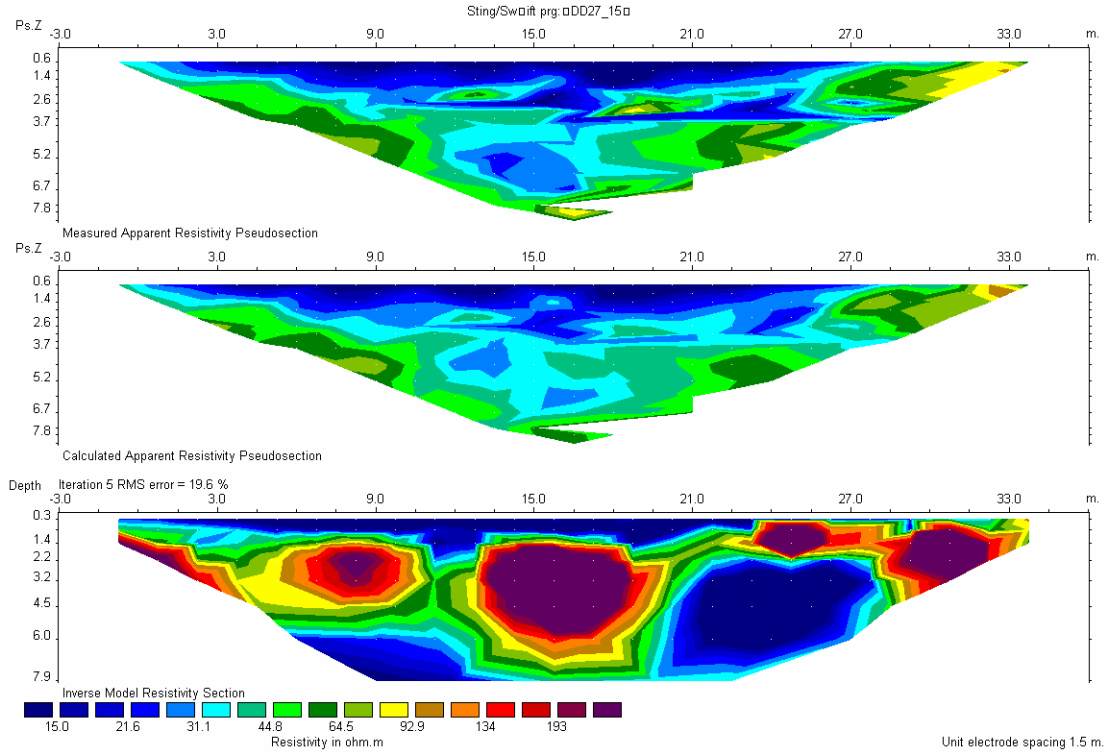
Περιοχή Δ: Γραμμή μελέτης 01. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



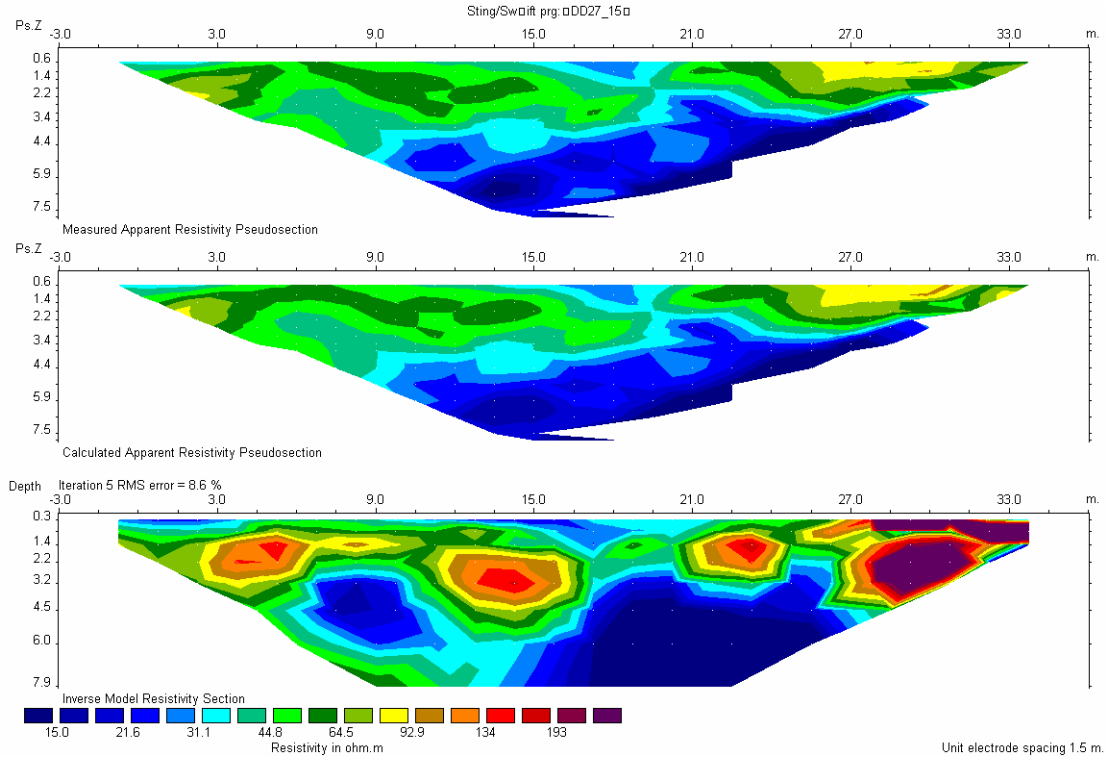
Περιοχή Δ: Γραμμή μελέτης 02. Διάταξη διπόλου-διπόλου.



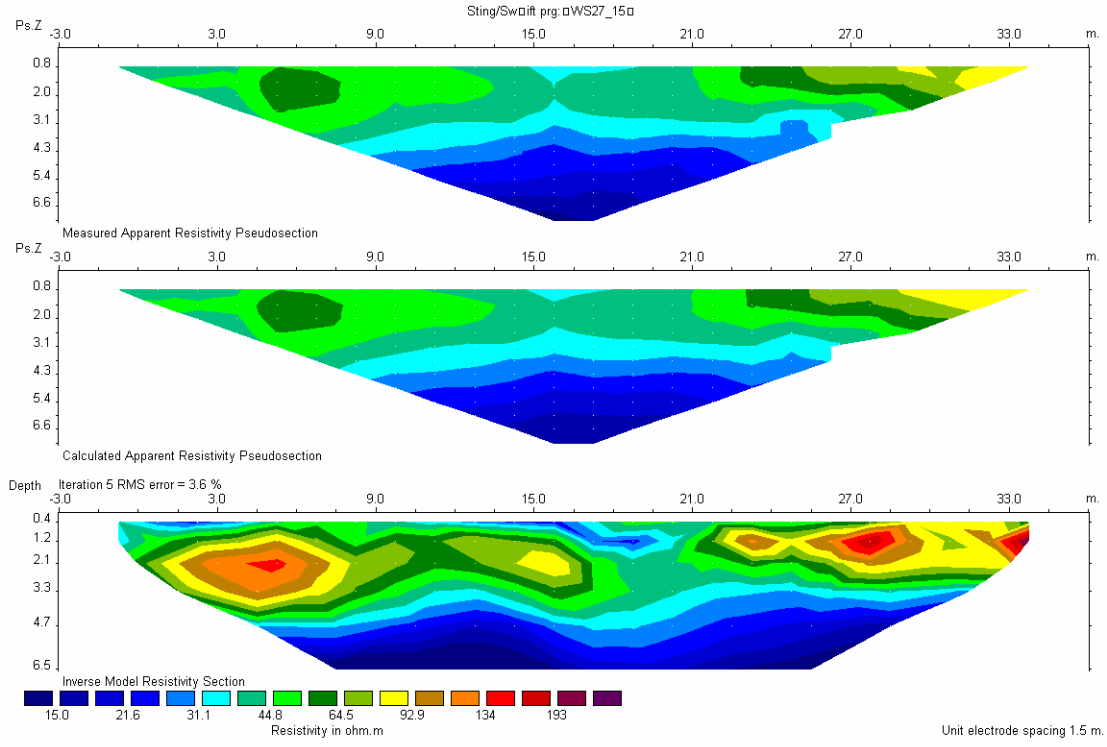
Περιοχή Δ: Γραμμή μελέτης 02. Διάταξη Wenner.



Περιοχή Β: Γραμμή μελέτης 01. Διάταξη διπόλου-διπόλου



Περιοχή Γ: Γραμμή μελέτης 01. Διάταξη διπόλου-διπόλου

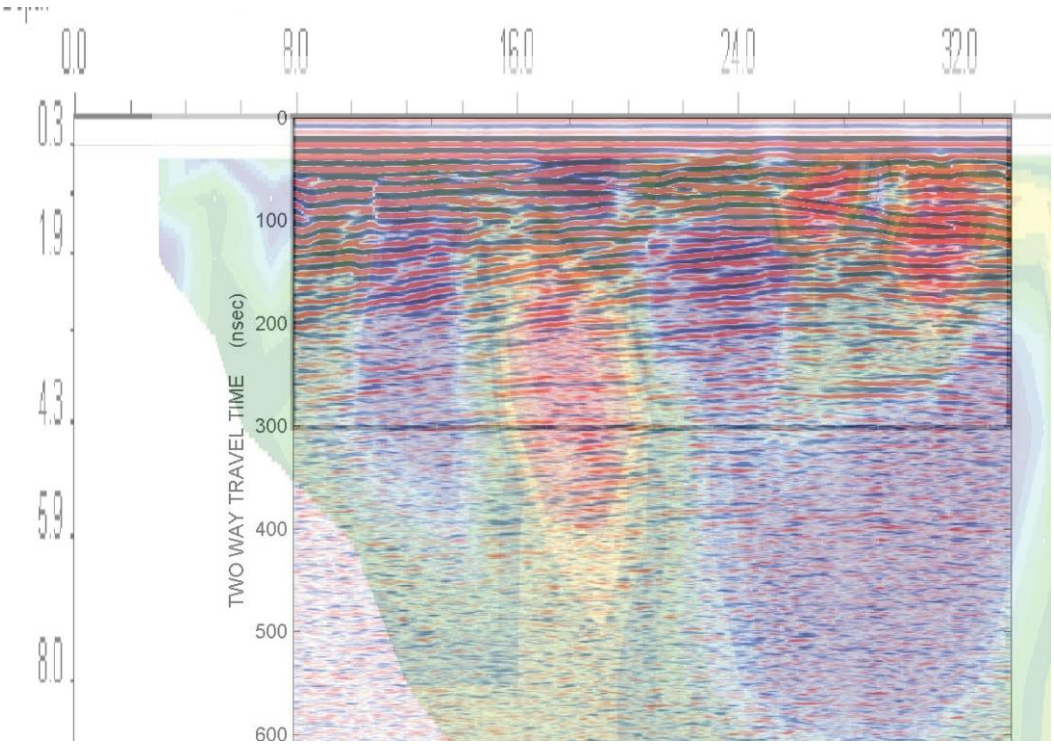


Περιοχή Γ: Γραμμή μελέτης 01. Διάταξη Wenner.

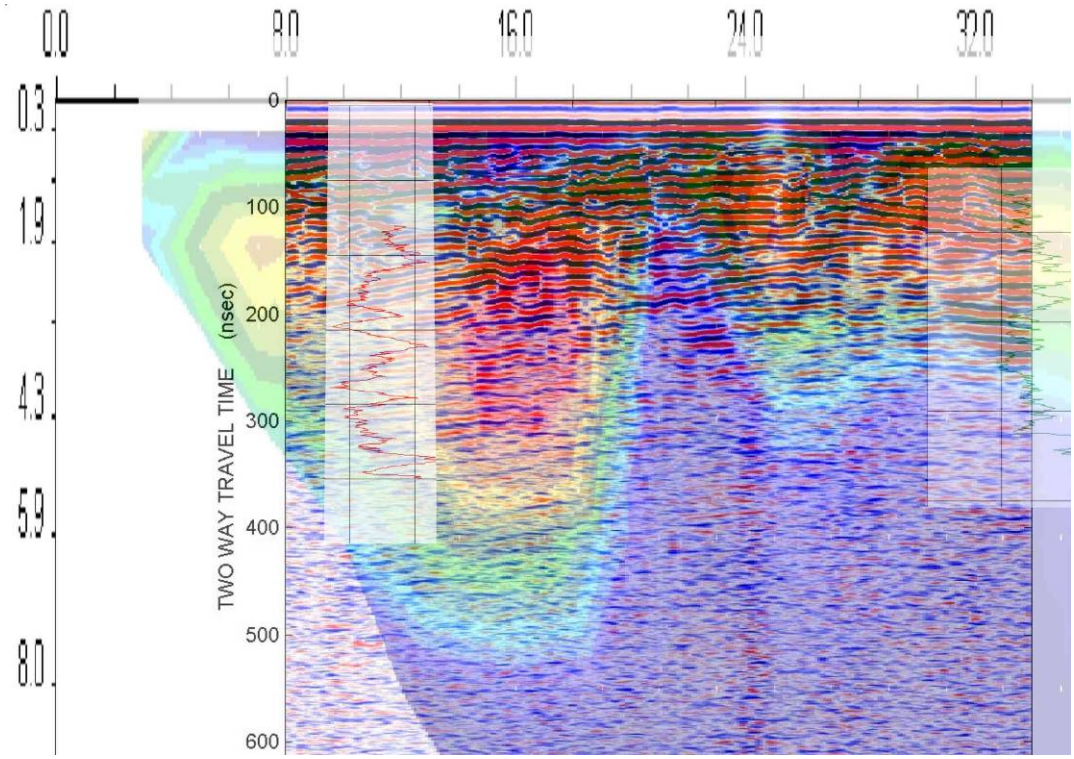
Παράρτημα Γ:

Υπερθέσεις τομών Γεωραντάρ με τομές ηλεκτρικής τομογραφίας και διαγραφίες

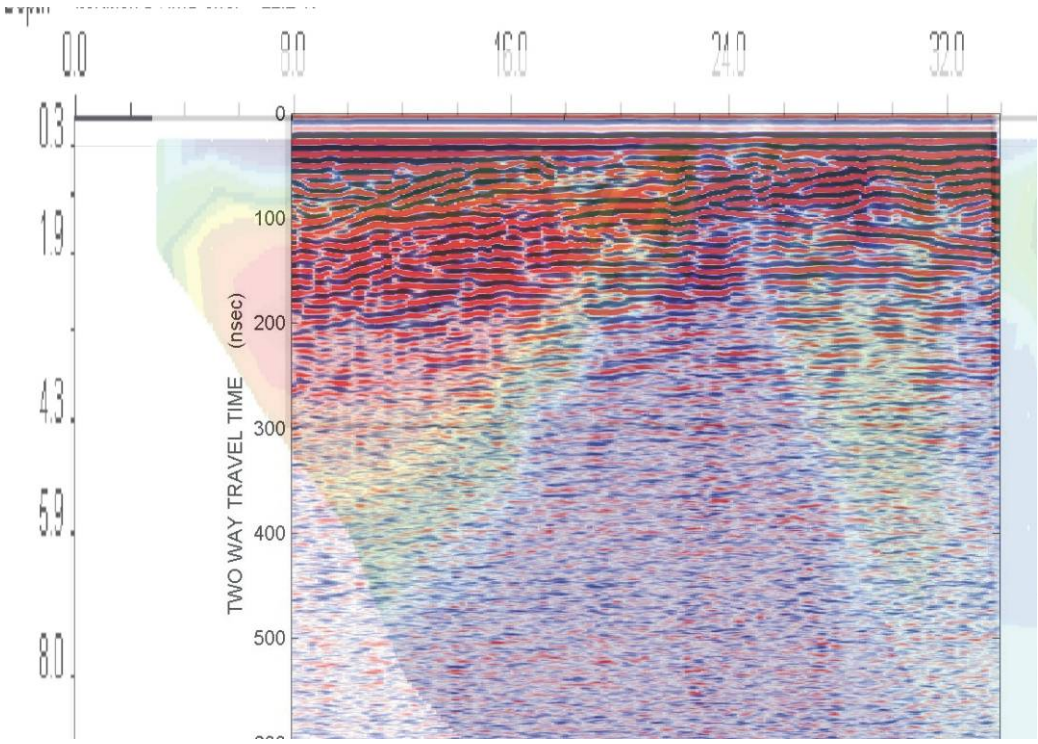
Υπερθέσεις Γεωρανταρ – Ηλεκτρική Τομογραφία – Διαγραφίες Ιουλίου 2005



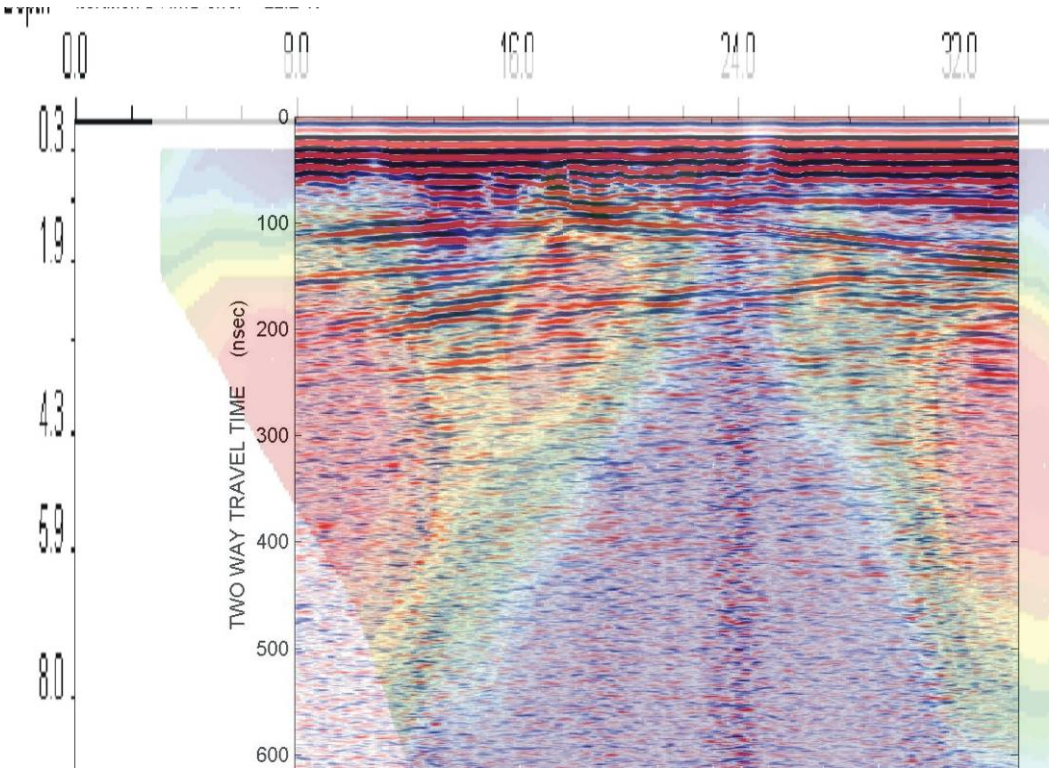
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 00.



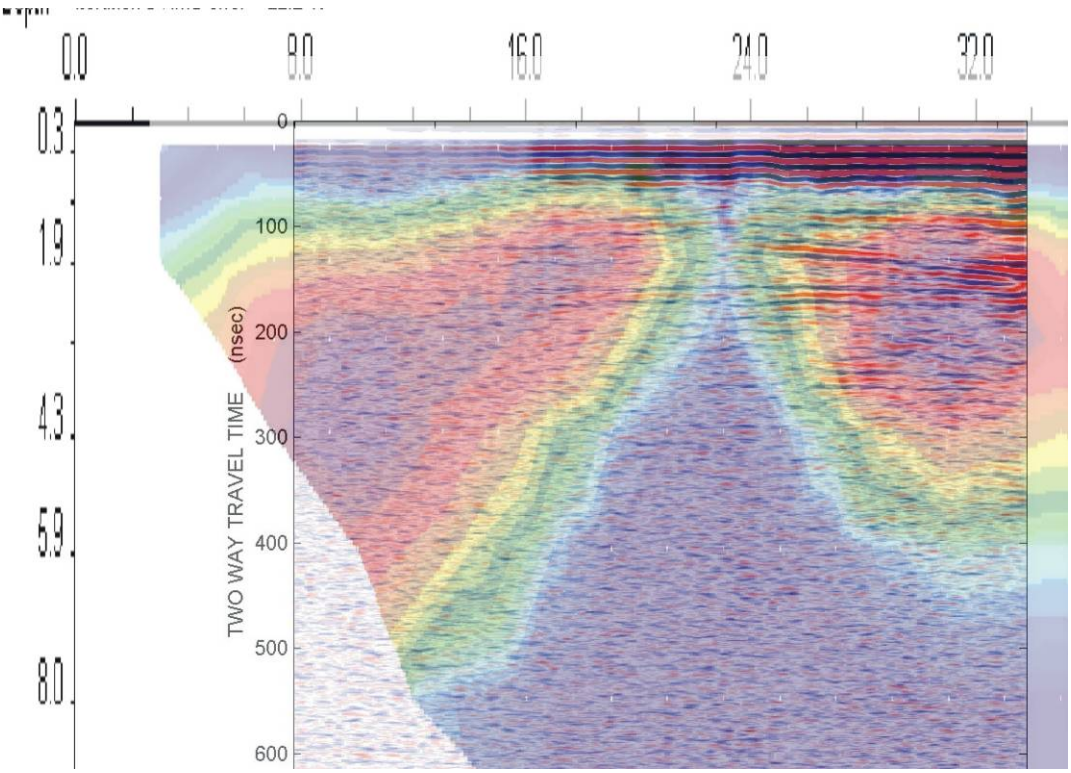
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 02 και τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας στις γεωτρήσεις Β και Γ.



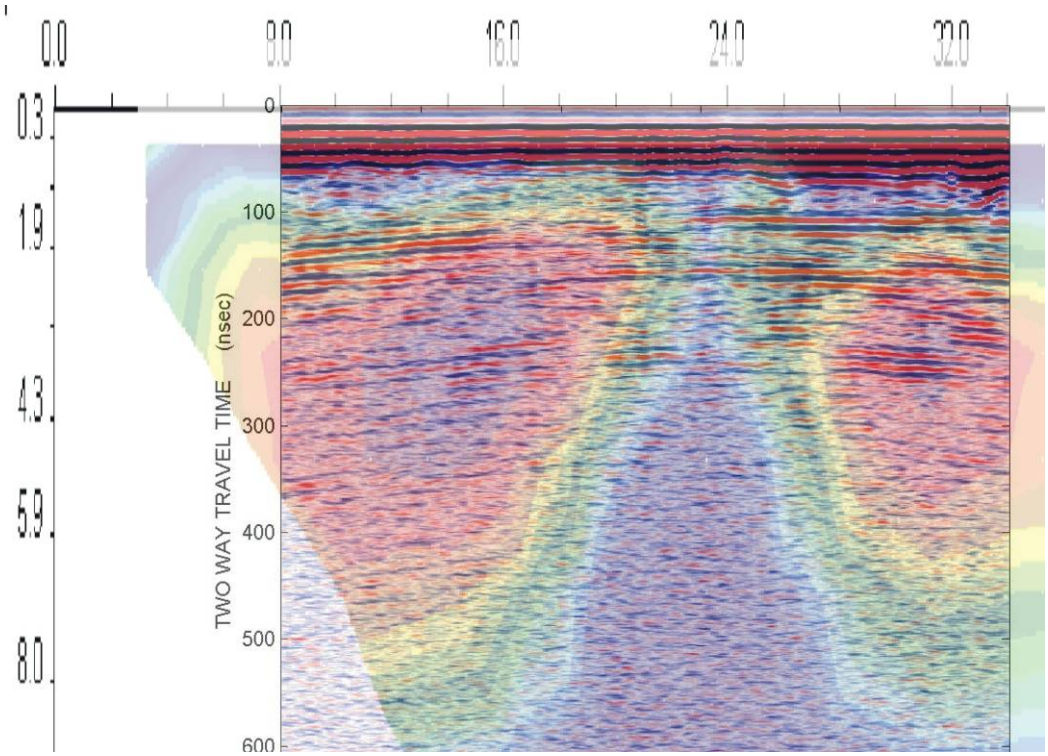
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 04.



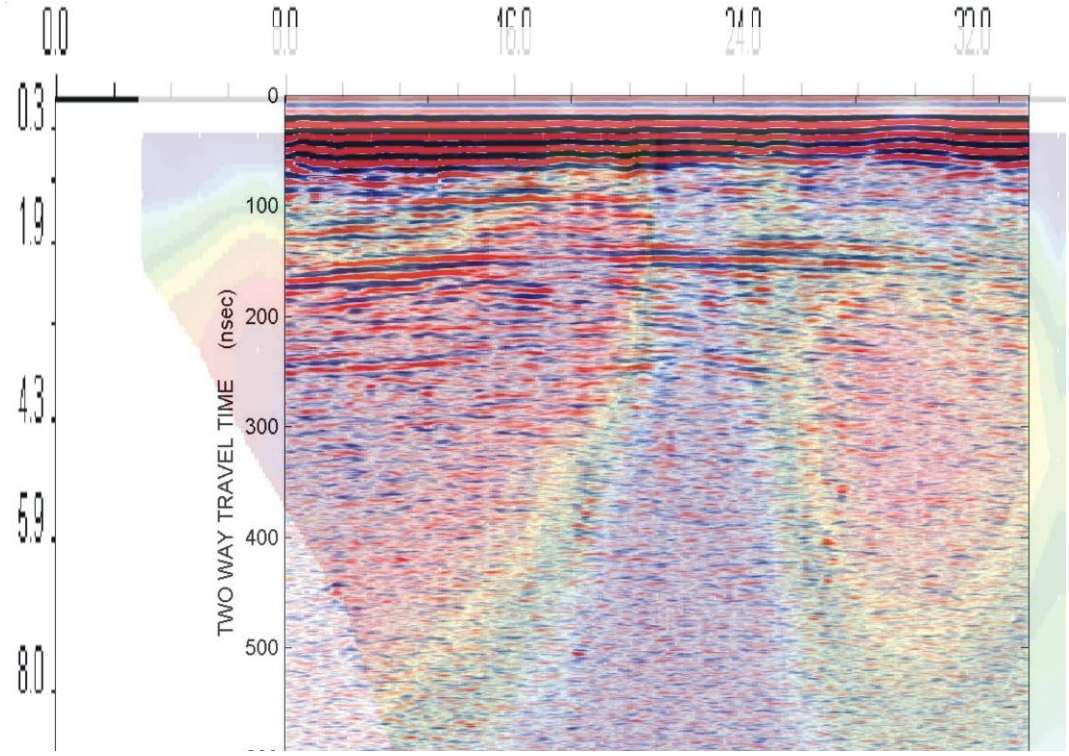
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 06.



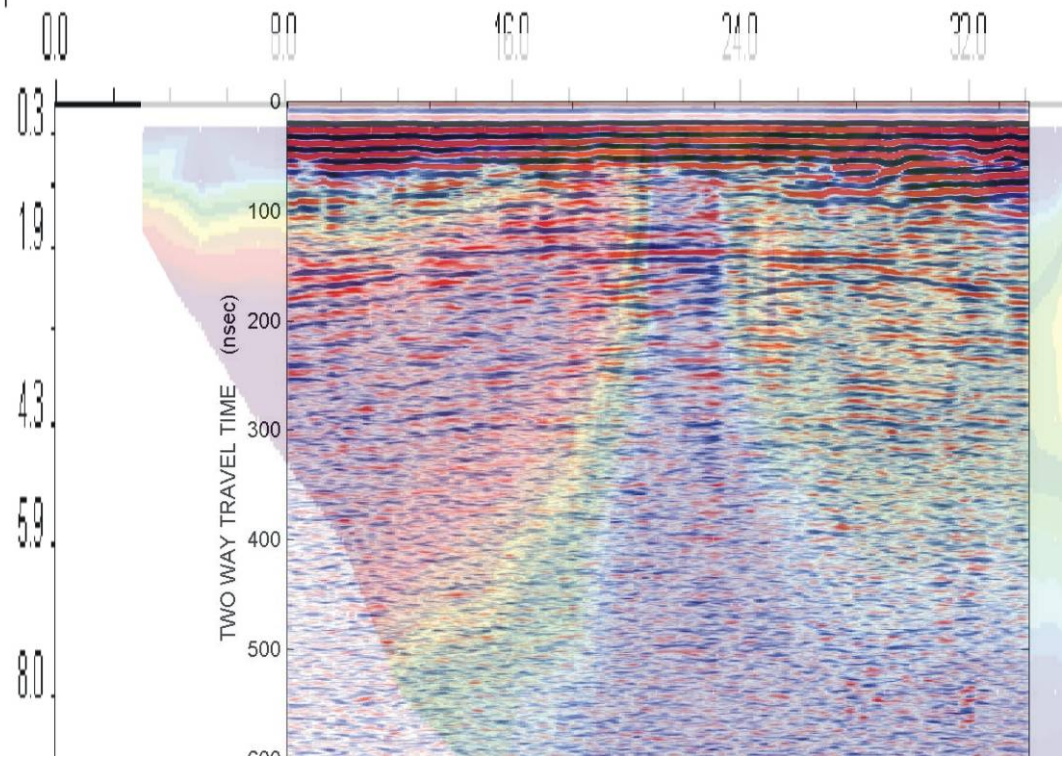
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 08.



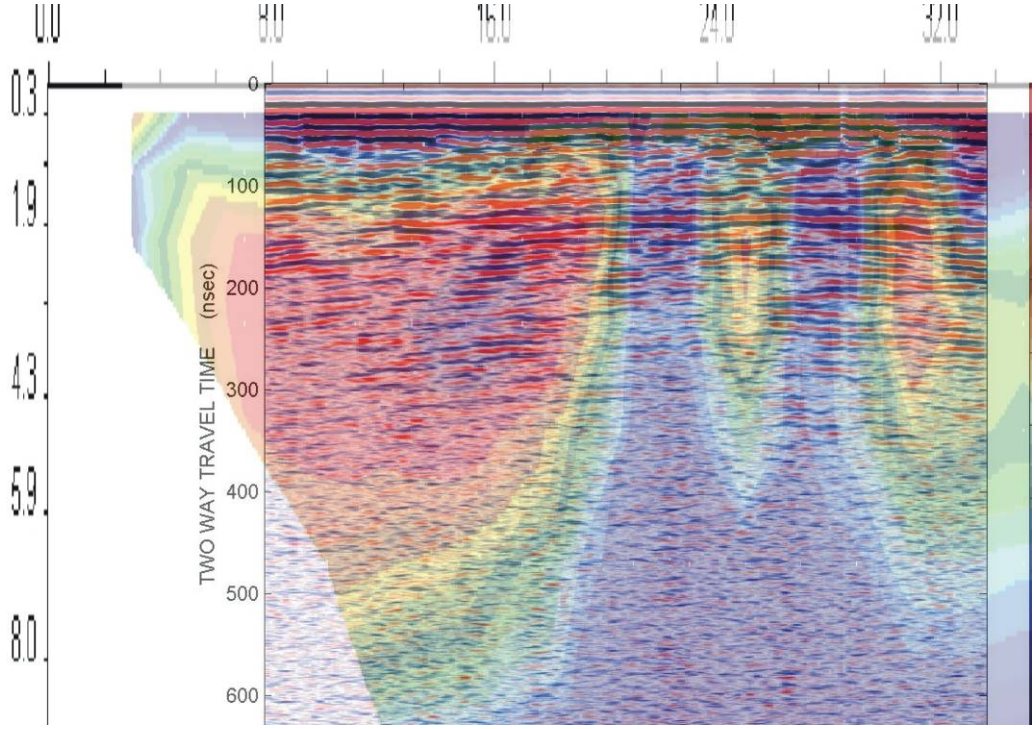
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 10.



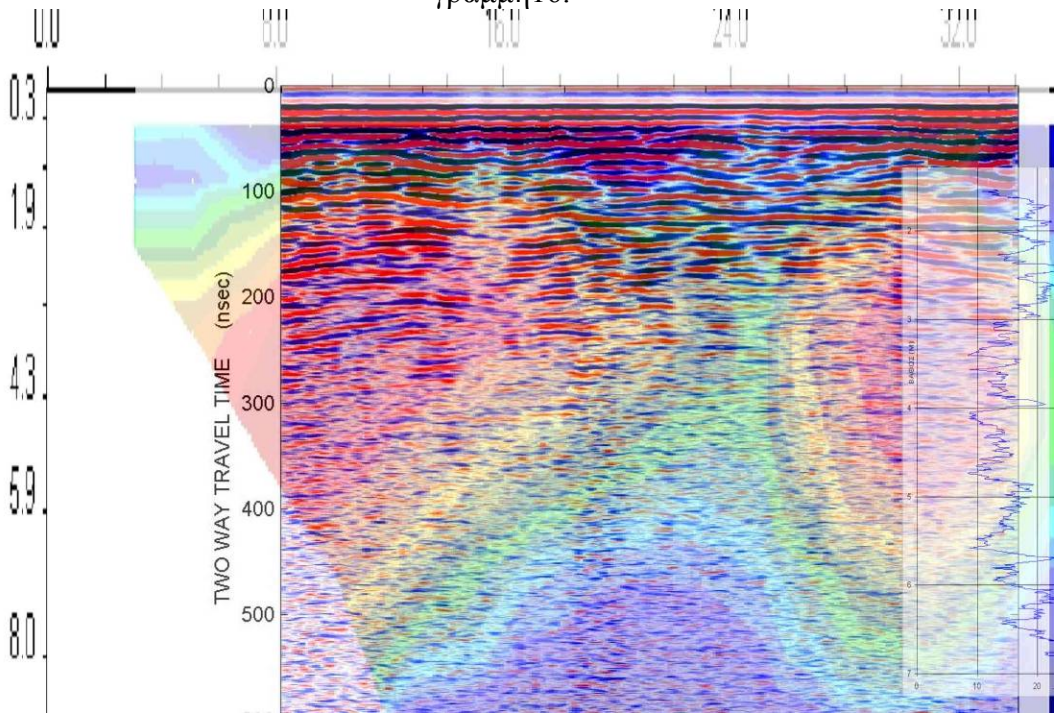
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 12.



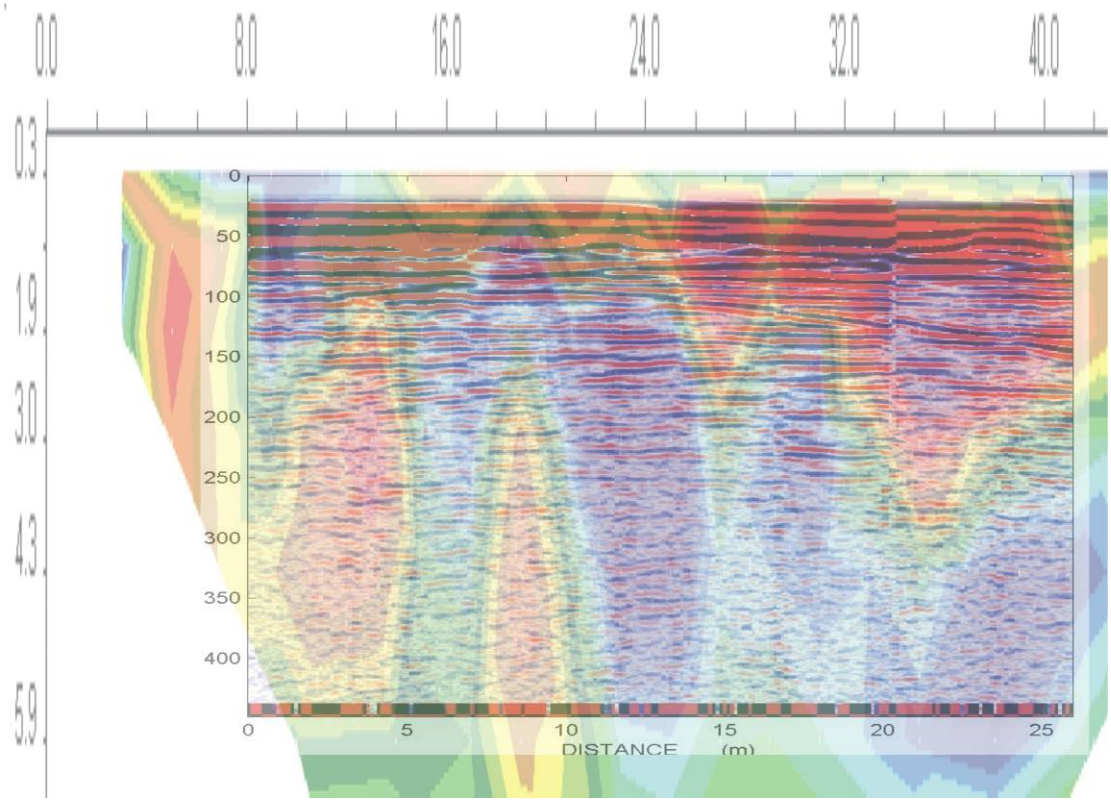
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 14.



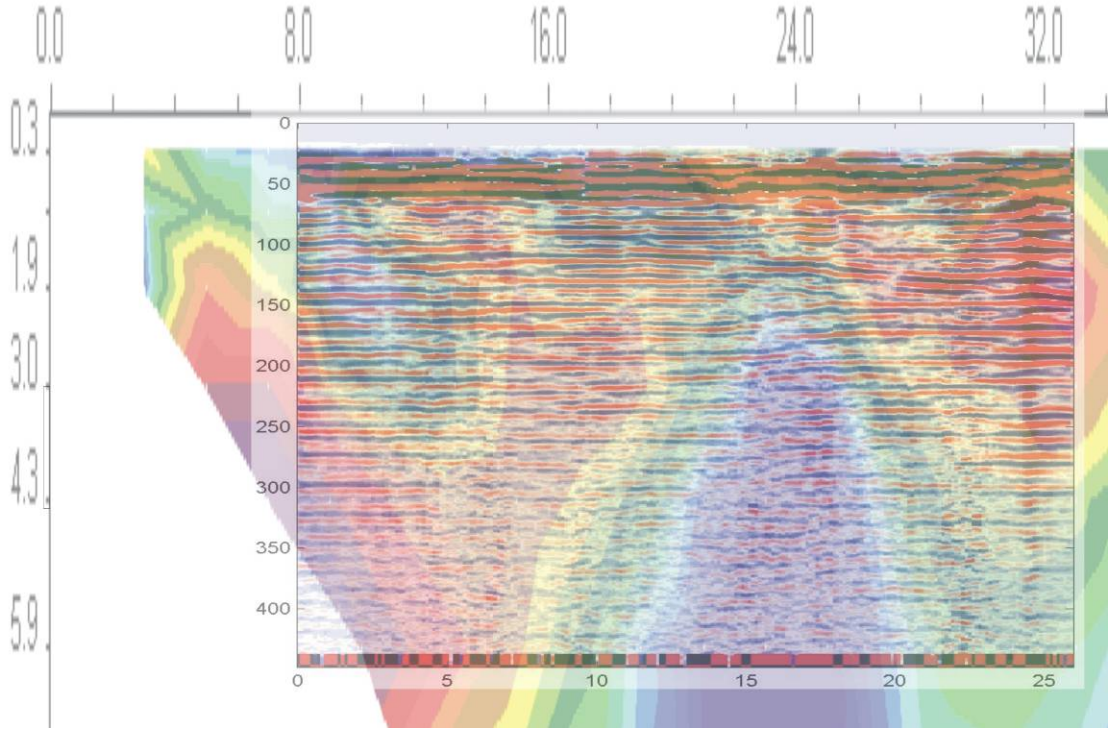
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή16.



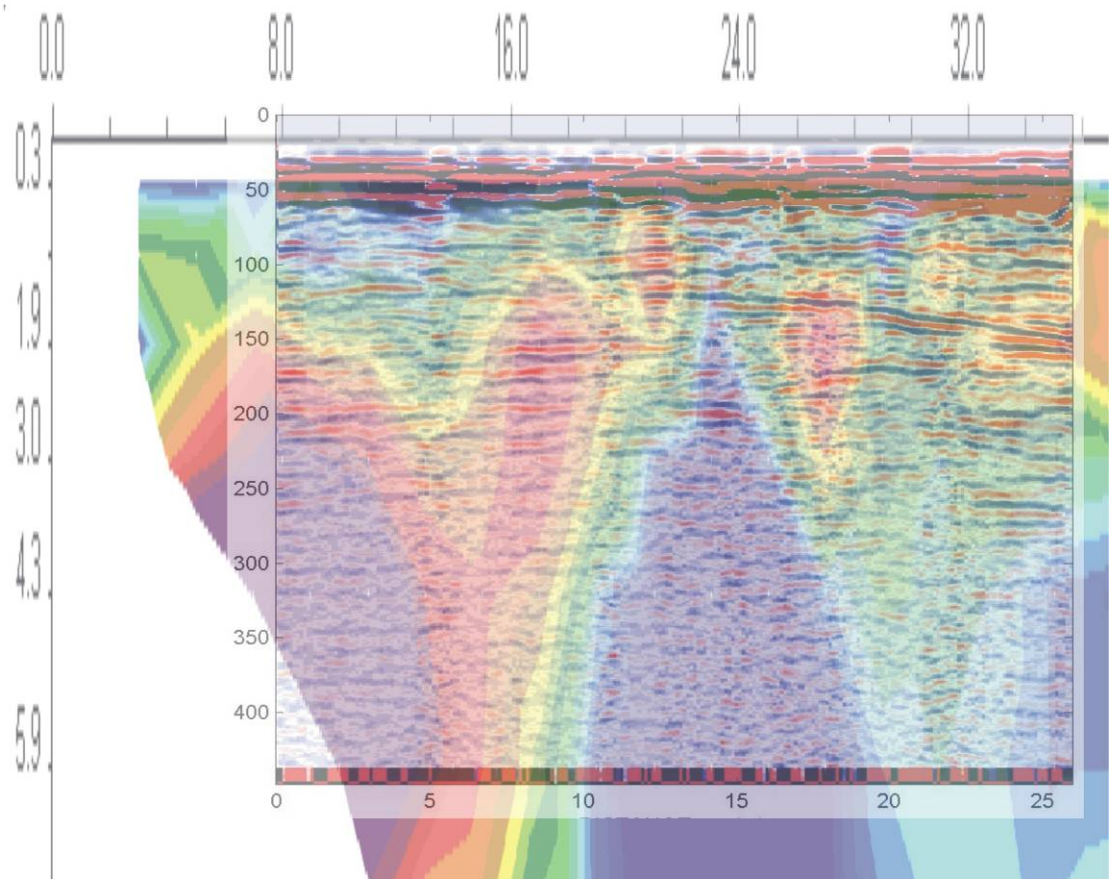
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 18 και την διαγραφία φυσικής ραδιενέργειας στην γεώτρηση Α.



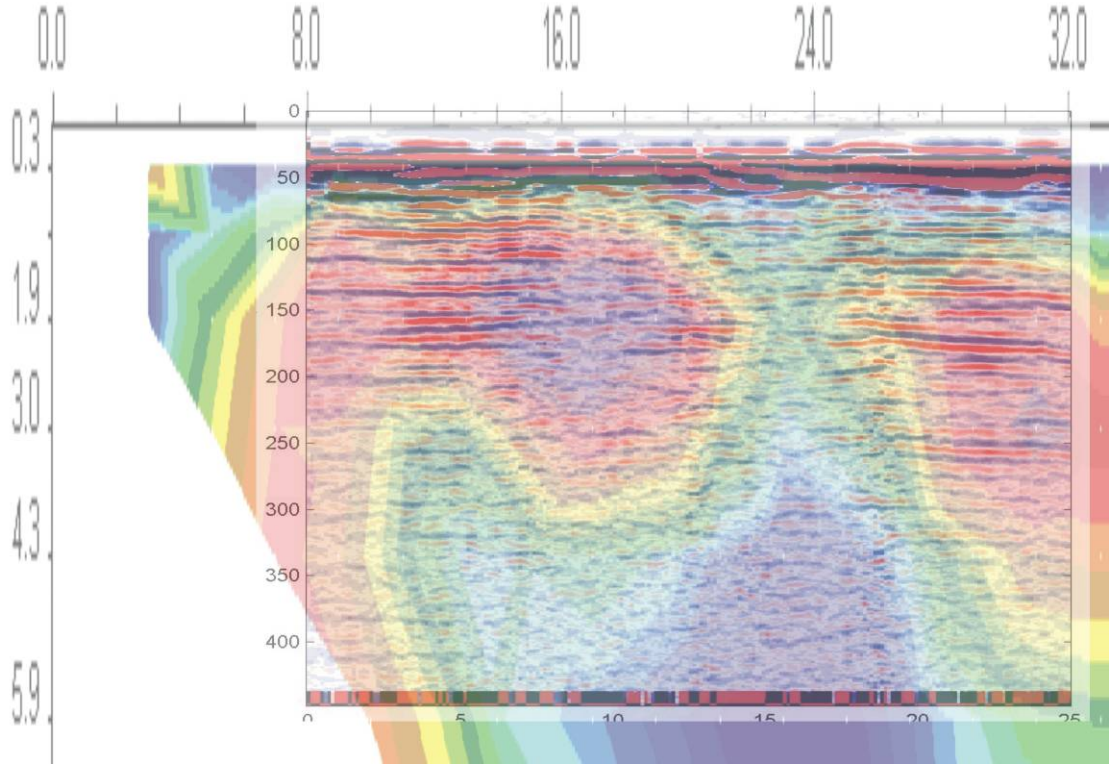
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 00. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



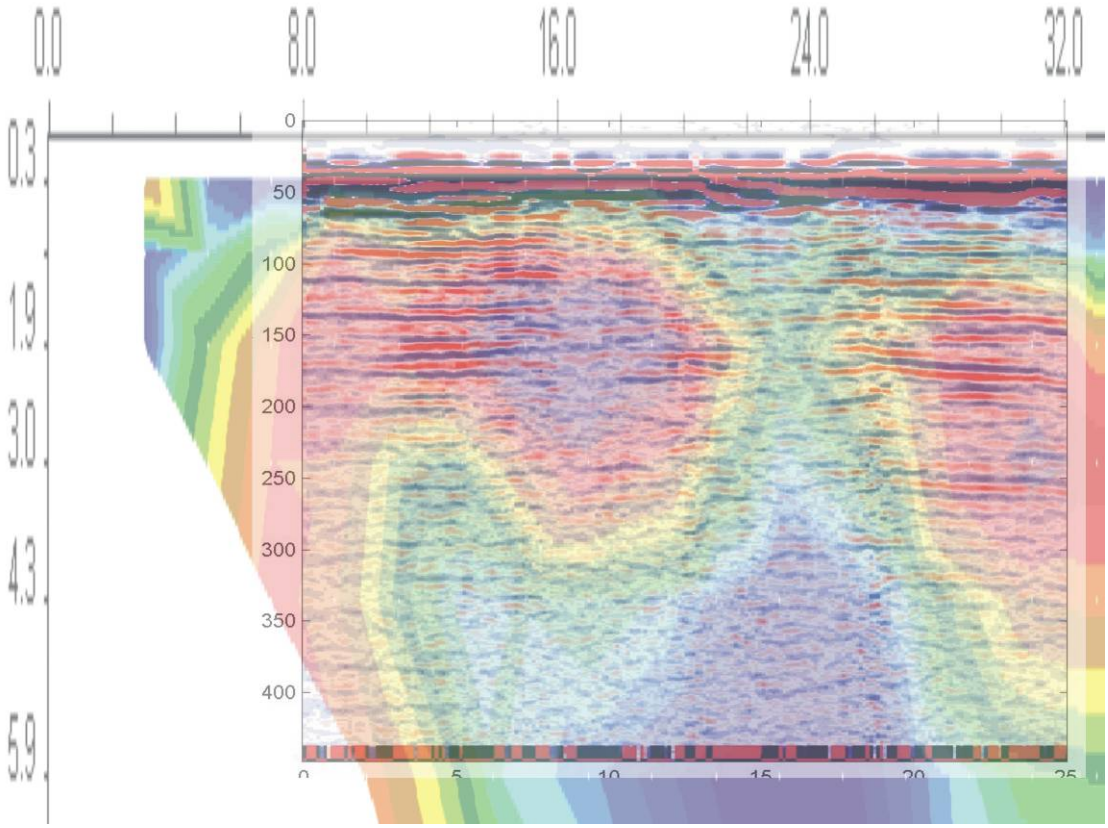
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 02. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



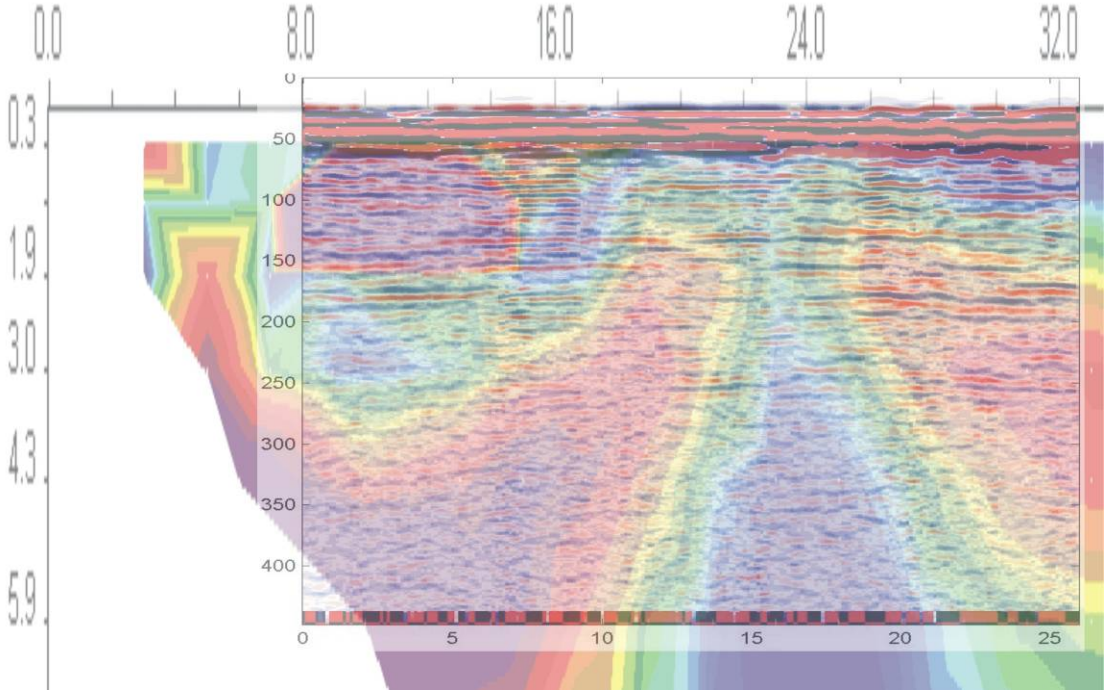
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 04. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



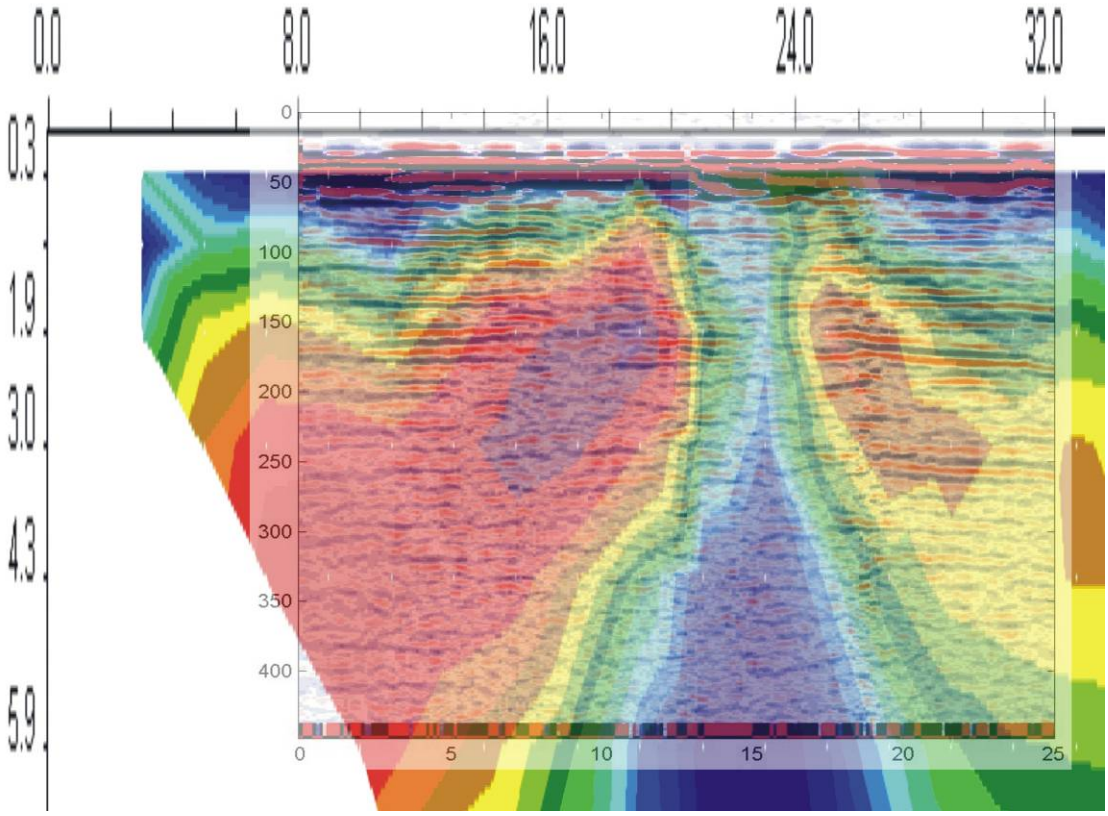
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 06. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



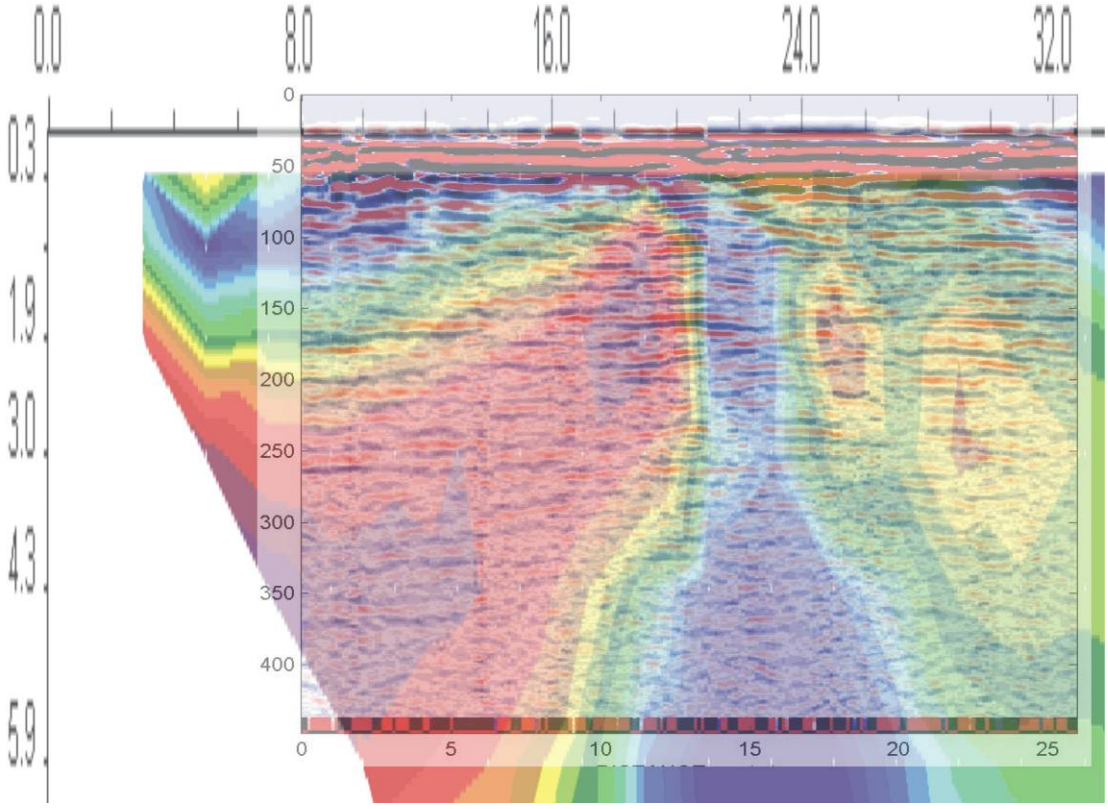
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 08. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



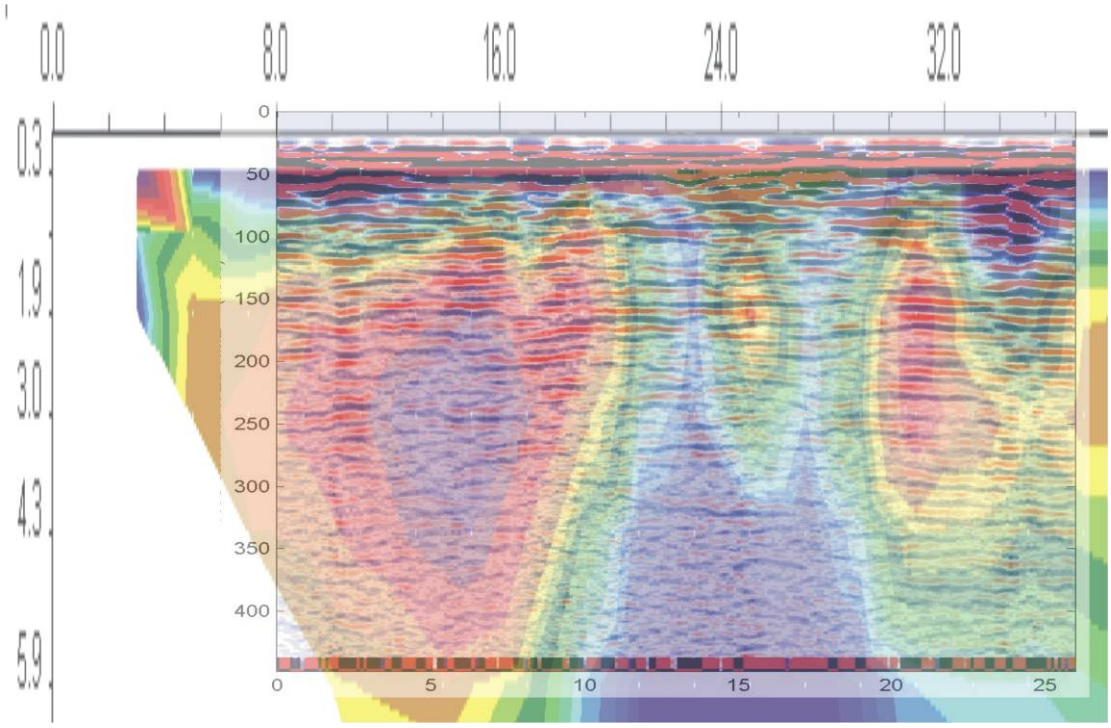
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 10. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



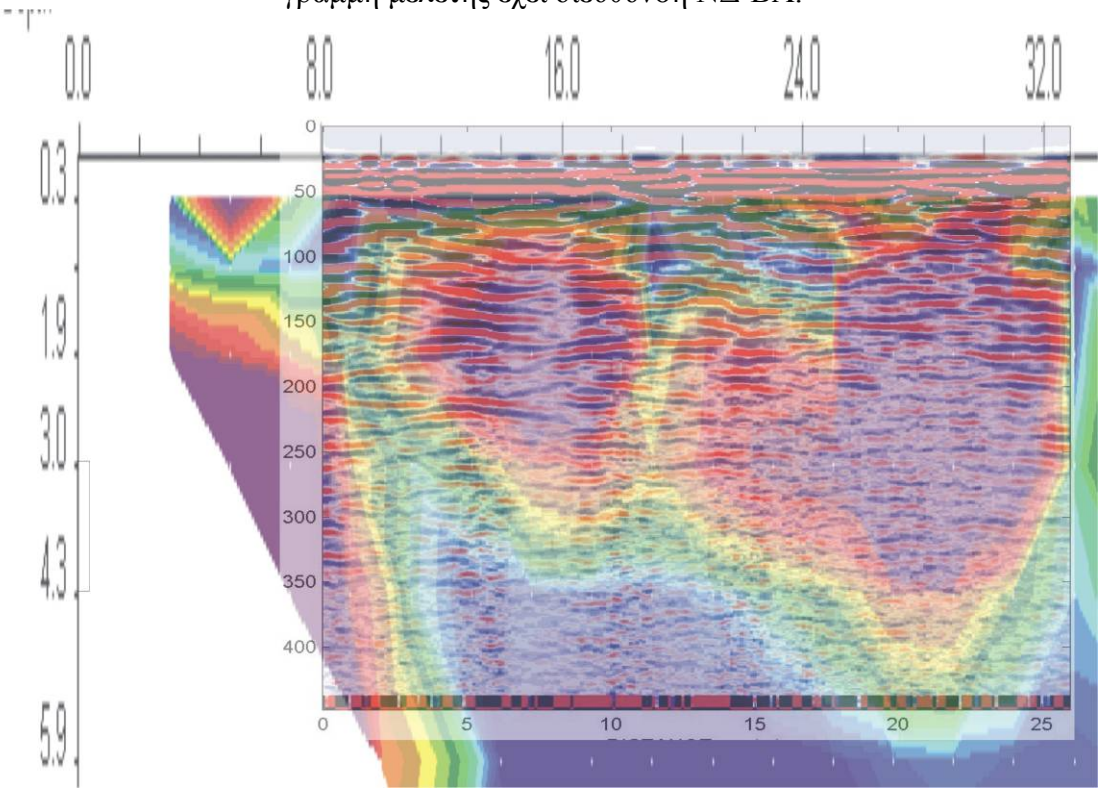
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 12. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



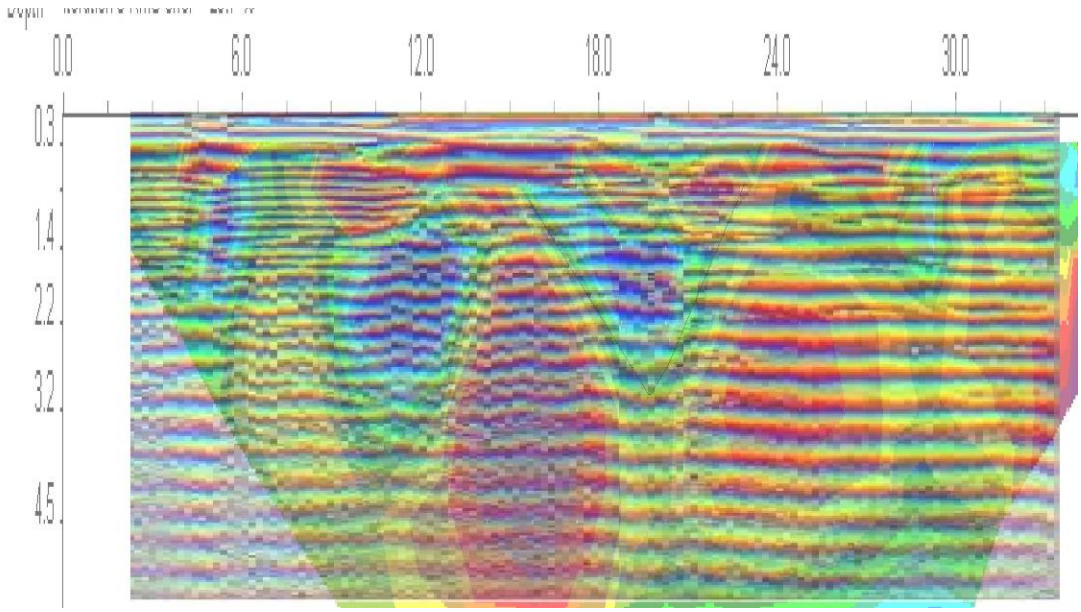
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 14. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



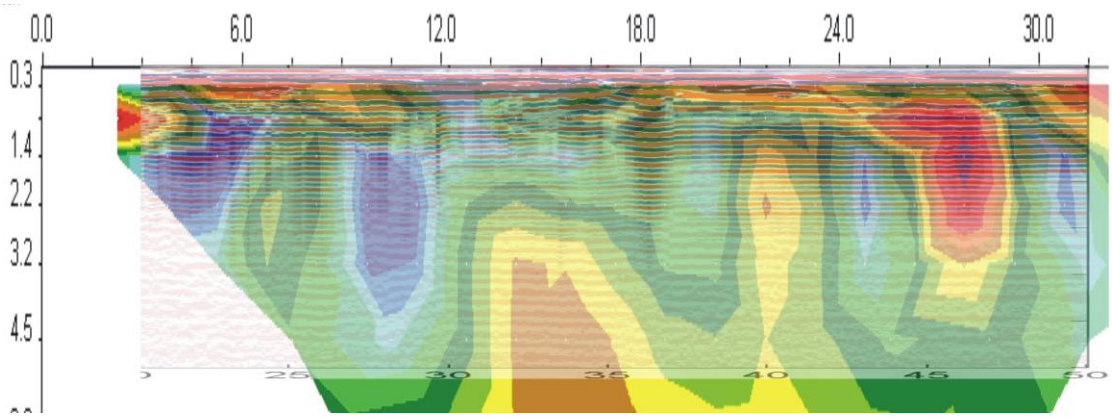
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 16. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



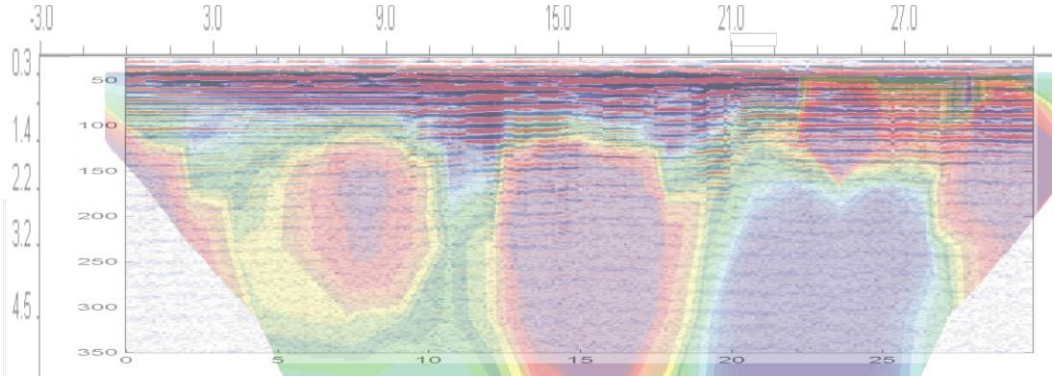
Περιοχή Α: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 18. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



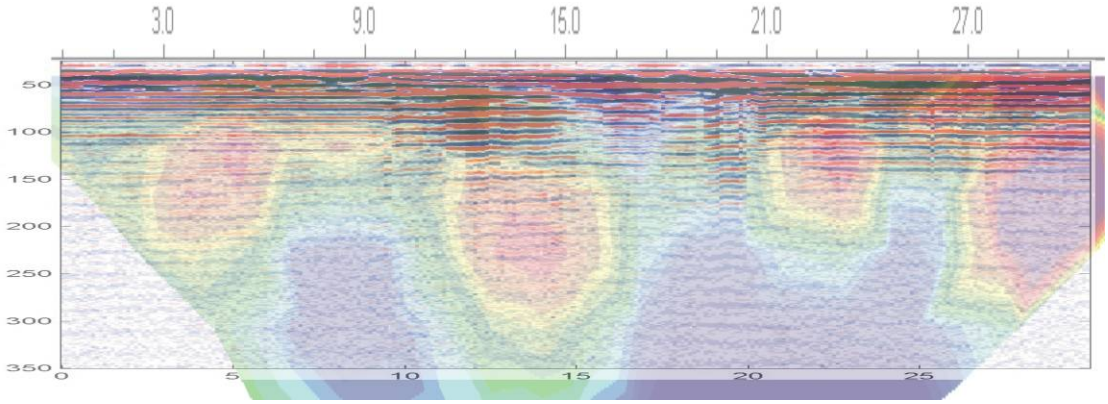
Περιοχή Δ: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής 01 με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 08. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.



Περιοχή Δ: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής 02 με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 02. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΑΔ.



Περιοχή Β: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής 01 με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 05. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

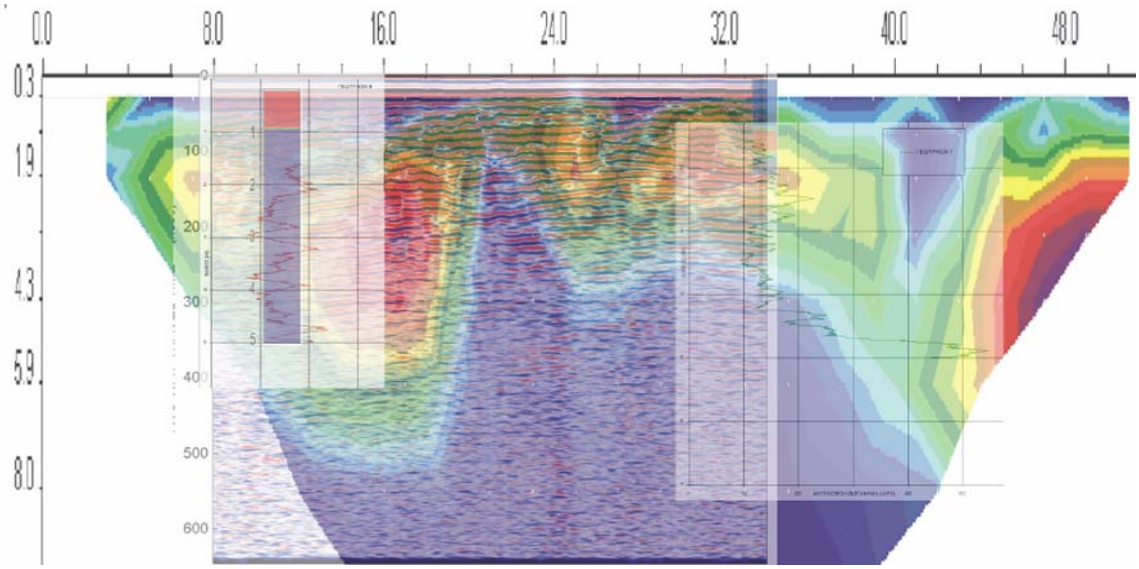


Περιοχή Γ: Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής 01 με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 04. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΔΕ: ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ»



ΑΝΤΩΝΙΟΥ Ι. ΑΝΤΩΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ
Καθηγητής

Χανιά, 2007

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΔΕ: ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ»

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Ι. ΑΝΤΩΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΒΑΦΕΙΔΗΣ Α. Καθηγητής
ΚΑΡΑΤΖΑΣ Γ. Καθηγητής
ΠΑΣΑΔΑΚΗΣ Ν. Λέκτορας

Χανιά, 2007