



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ  
ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΑ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ (ΕΛ.ΠΕ)

ΚΙΚΙΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΔΙΤΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΒΑΦΕΙΔΗΣ Α. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΑΡΑΤΖΑΣ Γ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΣΑΔΑΚΗΣ Ν. ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2007

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος “Έλεγχος”, με τίτλο ‘Εκτίμηση και παρακολούθηση της ρύπανσης Εδαφών από πετρελαιοειδή με σύγχρονες γεωφυσικές μεθόδους’, της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Ανάπτυξης. Σκοπός του προγράμματος είναι η ανάπτυξη αξιόπιστης μη καταστροφικής τεχνολογίας, χαμηλού κόστους, η οποία να είναι ικανή να απεικονίσει το υπέδαφος και να εξάγει λεπτομερή πληροφορία για την ύπαρξη της ρύπανσης και την χωρική μεταβολή της.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν στο χώρο των διυλιστηρίων Ασπροπύργου της εταιρίας ΕΛ.ΠΕ. Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει αρχική επεξεργασία των μετρήσεων η οποία συνίσταται στην εφαρμογή φίλτρων και στον υπολογισμό των κατάλληλων μιγαδικών χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια ακολουθεί ταξινόμηση των δεδομένων με συμβατικές μεθόδους καθώς και με την βοήθεια των νευρωνικών δικτύων. Στο τελικό στάδιο πραγματοποιείται συνδυασμός των επεξεργασμένων δεδομένων με δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας και διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας στις γεωτρήσεις, οι οποίες έγιναν στις περιοχές των διασκοπήσεων.

Με την ερμηνεία των παραπάνω αποτελεσμάτων εξάγονται συμπεράσματα όσον αφορά στον προσδιορισμό των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους και την ανίχνευση ρύπανσης του υπεδάφους καθώς επίσης και στην αποτελεσματικότητα των χρησιμοποιηθέντων μεθόδων ως προς την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι με βοήθησαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνιο Βαφείδη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές του.

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

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Νικόλαο Σπανουδάκη, κ. Νικόλαο Οικονόμου και κ. Hamdan Hamdan, υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Ορυκτών Πόρων, όπως επίσης και τον κ. Αντώνιο Αντωνίου, διπλωματούχο του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για την βοήθεια και συνεχή υποστήριξη τους.

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

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Ρύπανση και τεχνολογίες εντοπισμού

1.1 Ρύπανση του υπεδάφους από οργανικές ουσίες.....	1
1.2 Οι κυριότεροι τύποι ρυπαντών και η μεταφορά τους στο υπέδαφος.....	1
1.3 Τεχνολογίες εντοπισμού και εκτίμησης της ρύπανσης.....	3
1.4 Γεωφυσικές τεχνικές σε περιβαλλοντικά θέματα.....	4
1.5 Εφαρμογές περιβαλλοντικής γεωφυσικής.....	5

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας και συλλογή πληροφοριών

2.1 Αντικείμενο και σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	15
2.2 Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης.....	17
2.3 Συλλογή δεδομένων – Διασκοπήσεις.....	19
2.3.1 Συλλογή μετρήσεων με την μέθοδο του γεωραντάρ.....	21
2.3.2 Συλλογή μετρήσεων με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.....	22

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Οι γεωφυσικές μέθοδοι του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας

3.1 Γεωραντάρ.....	23
3.1.1 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.....	23
3.1.2 Γεωμετρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	24
3.1.3 Ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση.....	25
3.1.4 Χρήσεις Γεωραντάρ.....	27
3.2 Ηλεκτρική τομογραφία.....	28
3.2.1 Εισαγωγή.....	28
3.2.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας.....	29
3.3 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας.....	30

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ

4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Φίλτρα.....	32
4.2.1 Μονοδιάστατα Φίλτρα.....	32



4.2.2 Δισδιάστατα φίλτρα.....	34
4.2.3 Ενίσχυση του σήματος.....	34
4.3 Μιγαδικά χαρακτηριστικά.....	36
4.3.1 Εισαγωγή.....	36
4.4 Οριζόντιες τομές (Slices).....	38
4.5 Μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών (principal components analysis).....	38
4.6 Ταξινόμηση δεδομένων γεωραντάρ.....	39
4.6.1 Αυτόματη ταξινόμηση.....	40
4.6.1.1 Μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης K- μέσων τιμών (k-means).....	40
4.6.1.2 Χάρτες αυτοδιοργάνωσης (Self Organizing Maps, SOM).....	41
4.6.2 Καθοδηγούμενη ταξινόμηση.....	42
4.7 Επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ.....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>	
<b>Ερμηνεία εικόνων γεωραντάρ και συνδυασμός γεωφυσικών μεθόδων</b>	
5.1 Εισαγωγή.....	50
5.2 Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ της περιόδου Ιουλίου 2005 και Νοεμβρίου 2005 και συνδυασμός τους με δεδομένα διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας.....	50
5.3 Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ σε συνδυασμό με δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας.....	55
5.4 Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ σε συνδυασμό με δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας, διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας και χημικών αναλύσεων.....	59
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>	
<b>Συμπεράσματα και Προτάσεις</b>	
6.1 Συμπεράσματα.....	62
6.2 Προτάσεις.....	63
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>65</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>66</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Ρύπανση και τεχνολογίες εντοπισμού

### 1.1 Ρύπανση του υπεδάφους από οργανικές ουσίες

Το πρόβλημα της ρύπανσης του υπεδάφους από απόβλητα ή διαρροή κατά την μεταφορά και αποθήκευση υδρογονανθράκων ή των προϊόντων τους σε πολλές εγκαταστάσεις είναι μία πραγματικότητα.

Οι επιβαρημένες περιοχές με επικίνδυνες οργανικές ουσίες σε όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα της περιβαλλοντικής και οικονομικής πολιτικής. Οι κυριότερες πηγές ρύπανσης είναι οι χημικές βιομηχανίες, τα πετροχημικά εργοστάσια, οι κλωστοϋφαντουργίες, τα πρατήρια καυσίμων, οι μονάδες επεξεργασίας ξύλου και οι μηχανολογικές βιομηχανίες. Επίσης οι γεωργικές καλλιέργειες, τα ορυχεία, τα στρατόπεδα και οι χωματερές αποτελούν πηγές ρύπανσης του υπεδάφους από οργανικά απόβλητα. Το κόστος αποκατάστασης των ρυπασμένων περιοχών είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Για παράδειγμα στην Γερμανία, η Εθνική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος έχει εκτιμήσει ότι υπάρχουν περίπου 160.000 μολυσμένες περιοχές και το κόστος για τον καθαρισμό τους ανέρχεται σε 26-175 MECU. Το κόστος αυτό υπολογίστηκε με βάση τις εφαρμοζόμενες μεθόδους απορρύπανσης, όπως η άντληση και επεξεργασία των ρύπων ή εκχύλιση των με ατμό.

### 1.2 Οι κυριότεροι τύποι ρυπαντών και η μεταφορά τους στο υπέδαφος

Οι κυριότεροι τύποι των ρυπαντών αυτών είναι τα ορυκτέλαια, οι οργανικές πτητικές ενώσεις (π.χ. η ομάδα βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλ-βενζόλιο και ξυλένιο, BTEX) και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH).

Η ύπαρξη και η πιθανή μεταφορά ρύπων υδρογονανθράκων στο υπέδαφος καθορίζεται από τις ιδιότητες των ρευστών αλλά και από τις αντίστοιχες πετροφυσικές του γεωλογικού μέσου εντός του οποίου βρίσκονται. Οι ιδιότητες των υγρών που καθορίζουν κυρίως τη συμπεριφορά αυτή είναι η πυκνότητα, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση. Το πορώδες και η διαπερατότητα του εδάφους καθορίζουν τη μεταφορά και την διασπορά της ελαϊκής φάσης. Επιπλέον ιδιότητες όπως οι τριχοειδείς πιέσεις, η σχετική διαπερατότητα, το είδος της διαβροχής, ο βαθμός κορεσμού και ο υπολειμματικός βαθμός κορεσμού οι οποίες διαμορφώνονται και από

τους υδρογονάνθρακες και από το έδαφος επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος και τη διασπορά της ρύπανσης. Υδρογεωλογικές μελέτες δείχνουν ότι οι υδρογονάνθρακες δεν διαχέονται ομοιόμορφα στο υπέδαφος αλλά τείνουν να συγκεντρώνονται τοπικά στην ζώνη κορεσμού ή ακολουθούν συγκεκριμένες διαδρομές μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα. Επιπλέον, η μετακίνηση τους επηρεάζεται από το μέγεθος κόκκων και τις φυσικο-χημικές ιδιότητες του εδάφους, και μεταβάλλεται εποχιακά.

Το αργό πετρέλαιο (crude oil) και τα προϊόντα διύλισης του αποτελούν τους κυριότερους, από ποσοτική άποψη, ρυπαντές. Οι πλέον συνηθισμένες περιπτώσεις ρύπανσης δημιουργούνται από βενζίνες (gasoline), τα μεσαία κλάσματα (middle distillates) και τα βαρέα καύσιμα (heavy fuel oils). Τα κλάσματα αυτά παράγονται σε μεγάλες ποσότητες και συχνά αποθηκεύονται σε υπόγειες δεξαμενές, οι διαρροές των οποίων οδηγούν σε ρύπανση του εδάφους.

Οι βενζίνες είναι μίγματα πετρελαϊκών υδρογονανθράκων και οργανικών προσθέτων όπως αλκοόλες ή αιθέρες (MTBE). Σε σχέση με τα άλλα καύσιμα στο υπέδαφος έχουν τη μεγαλύτερη κινητικότητα λόγω χαμηλού ιξώδους και σχετικά υψηλής διαλυτότητας στο νερό. Περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αρωματικών υδρογονανθράκων με συνηθέστερους την ομάδα BTEX. Τα μεσαία κλάσματα (ντίζελ, κηροζίνη, βενζίνες αεροπορίας) αποτελούν επίσης σύνθετα μίγματα υδρογονανθράκων και εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα, μικρότερη πτητικότητα και διαλυτότητα στο νερό από την βενζίνη. Συστατικά όπως τα BTEX εμφανίζονται στα μεσαία κλάσματα σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις και μόνο σε πρόσφατες διαρροές λόγω της ευκολίας με την οποία εξατμίζονται, βιοδιασπώνται ή διαλύονται στο υπόγειο νερό αν παραμείνουν για παρατεταμένο χρόνο στο υπέδαφος. Τα βαριά κλάσματα (μαζούτ λιπαντικά) έχουν παρόμοια σύσταση με τα μεσαία κλάσματα, εμφανίζουν όμως υψηλότερο ιξώδες, είναι πρακτικά αδιάλυτα στο νερό και έχουν μικρή κινητικότητα στο υπέδαφος.

Οι οργανικοί ρυπαντές συναντώνται σε τέσσερις φάσεις στο υπέδαφος: στην αέρια, την ελεύθερη, την προσροφημένη και σε διάλυση. Όταν οι υγροί υδρογονάνθρακες διαρρέουν στο υπέδαφος κινούνται υπό την επίδραση της βαρύτητας και των τριχοειδών πιέσεων. Στην ακόρεστη ζώνη (ζώνη αερισμού) συναντώνται στην αέρια φάση στο εσωτερικό των πόρων αλλά και προσροφημένοι στο έδαφος. Αν ο όγκος της διαρροής είναι μεγαλύτερος από τον όγκο που μπορεί να συγκρατήσει η συγκεκριμένη ζώνη, τότε μετακινούνται βαθύτερα στη ζώνη κορεσμού. Στο ανώτερο τμήμα αυτής της ζώνης (ζώνη τριχοειδών φαινομένων)

συναντώνται στην ελεύθερη φάση και βαθύτερα διαλυμένοι στο νερό. Ποσοστό της ελεύθερης και προσροφημένης φάσης θα εξατμιστεί ή θα διαλυθεί περαιτέρω δημιουργώντας μάζες υδρογονανθράκων βαρύτερες και κατά συνέπεια περισσότερο δυσκίνητες. Το ποσοστό των ρύπων που βρίσκονται ήδη στην αέρια φάση μετακινείται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω διόδων όπως ρήγματα, στρώματα διαπερατών πετρωμάτων κ.α.

Ένα σημαντικό εργαλείο όσον αφορά την εκτίμηση της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων είναι ένα απλό σύστημα ταξινόμησης το οποίο βασίζεται αποκλειστικά στη πυκνότητα του ρυπαντή. Σύμφωνα λοιπόν με το σύστημα αυτό οι κύριοι τύποι ρυπαντών είναι οι εξής:

- LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού, όπως είναι η βενζίνη.
- DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού, όπως το τριχλωροαιθυλαίνιο ή τα βαριά πετρέλαια. (Αντωνοπούλου και Μποτωνάκης 2006)

### **1.3 Τεχνολογίες εντοπισμού και εκτίμησης της ρύπανσης**

Η απειλή της ρύπανσης των εδαφών είναι ένα οξύ θέμα το οποίο χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα για τον εντοπισμό και την εκτίμηση του επιπέδου ρύπανσης από πετρελαιοειδή και γενικά από οργανικούς ρύπους συνίσταται στην λήψη δειγμάτων αέρα, εδάφους και νερού από επιλεγμένα σημεία της υπό μελέτη περιοχής. Η δειγματοληψία συνήθως απαιτεί διάτρηση γεωτρήσεων και πυρηνοληψία των διατρηθέντων γεωλογικών στρωμάτων, γεγονός που αυξάνει το κόστος. Η ανάλυση των δειγμάτων είναι χρονοβόρα δεδομένου ότι σπάνια ολοκληρώνεται επί τόπου αλλά σε εξειδικευμένα εργαστήρια. Επιπλέον, δεδομένης της πολυπλοκότητας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ εδάφους και ρύπων, τα αποτελέσματα από τα σημειακά δείγματα των γεωτρήσεων δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτικά της διασποράς των ρύπων στην ευρύτερη περιοχή.

Σήμερα, δεν υπάρχει τεχνολογία χαρτογράφησης της ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων υδάτων που να μπορεί να προσφέρει αξιόπιστες πληροφορίες υψηλής ανάλυσης για την μεγάλη ποικιλία εδαφικών συνθηκών. Είναι επομένως απαραίτητη η ανάπτυξη αξιόπιστης, μη καταστροφικής και χαμηλού κόστους τεχνολογίας, που να

είναι ικανή να απεικονίσει την ρύπανση στο υπέδαφος και να παρέχει λεπτομερή πληροφορία σχετικά με τη χωρική και την χρονική της μεταβολή.

#### **1.4 Γεωφυσικές τεχνικές σε περιβαλλοντικά θέματα**

Συνολικά οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ρύπανσης (πετρέλαιο, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, μεταλλικά συντρίμια, χώροι υγειονομικής ταφής κα), εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία και είναι σε θέση να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες.

Ατυχήματα η ανεξέλεγκτη απόρριψη των αποβλήτων μπορούν ανα προκαλέσουν σημαντική συγκέντρωση ρύπανσης στο υπέδαφος. Η παρουσία διαλυμένων οργανικών φάσεων στο πόσιμο νερό, ακόμα και σε πολύ χαμηλά επίπεδα(ppb), είναι εξαιρετικά επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία.

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

Νέα επιτεύγματα στη ψηφιακή τεχνολογία και στην μαθηματική μοντελοποίηση έχουν οδηγήσει σε βελτιωμένες τεχνικές απόκτησης δεδομένων και στην άριστη ερμηνεία τους. Συγκεκριμένα νέες εφαρμοζόμενες τεχνικές συλλογής και επεξεργασίας στις μεθόδους του γεωραντάρ, της ρηχής σεισμικής ανάκλασης, της επαγόμενης πόλωσης, της ηλεκτρικής αντίστασης και των παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κατάφεραν να ενισχύσουν την διακριτική τους ικανότητα στην ανίχνευση υπογείων στόχων βελτιώνοντας θεαματικά τα αποτελέσματα.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν ανα απεικονίσουν το υπέδαφος στην ανάμεσα από γεωτρήσεις παρακολούθησης και να προσθέσουν πολύτιμες στρωματογραφικές πληροφορίες πάνω σε οποιοδήποτε γεωλογικό μοντέλο της ρυπασμένης περιοχής. Σε συνδυασμό με γεωχημικές μετρήσεις υπάρχει άριστη δυνατότητα για τη καλύτερη επιλογή της θέσης των γεωτρήσεων και των συνθηκών πραγματοποίησής τους. Οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν πλέον αυτοτελή τμήματα των προγραμμάτων αποκατάστασης του περιβάλλοντος. (Αντωνοπούλου και Μποτωνάκης 2006)

Οι κυριότερες γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση περιοχών ρύπανσης είναι :

- Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Electrical Resistivity~ER)

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

### 1.5 Εφαρμογές περιβαλλοντικής γεωφυσικής

Στον πίνακα 1.1 συνοψίζονται οι δημοσιεύσεις που αφορούν την Περιβαλλοντική Γεωφυσική, ανάλογα με το αντικείμενο της μελέτης και την εκάστοτε μεθοδολογία εφαρμογής της γεωφυσικής τεχνικής.

Κατηγορία μελέτης περιβαλλοντικής γεωφυσικής	Τοποθεσία διεξαγωγής έρευνας	Είδος ρύπανσης υπό εξέταση και βασικός σκοπός διασκόπησης	Γεωφυσική τεχνική που εφαρμόζεται
<i>Ηλεκτρικές - Ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις και τεχνική του Γεωραντάρ σε «επικίνδυνες» περιοχές ρύπανσης και απόρριψης αποβλήτων</i>	Αεροπορική βάση Ogden, Utah, Η.Π.Α. Απόρριψη αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής.	Τριχλωροαιθυλένιο / υγρά απόβλητα πετρελαίου. Καθορισμός ορίων περιοχής ρύπανσης.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Φυσικού Δυναμικού Μαγνητικές Διασκοπήσεις
	Bahia, Βραζιλία. Ρύπανση υδροφόρου ορίζοντα.	Ακατέργαστα υλικά /υγρά απόβλητα από πετροχημικό συγκρότημα. Ανίχνευση ρύπανσης σε υδροφόρο ορίζοντα.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση
	Ponte Malnome / Regione Lazio, Ρώμη, Ιταλία. Εγκαταλελειμμένα μεταλλεία ως χώροι αποθήκευσης απορριμμάτων.	Οικιακά / βιομηχανικά απορρίμματα, χαλάσματα κτιρίων. Καθορισμός ορίων και είδους ρύπανσης.	Γεωραντάρ Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις Ηλεκτρική Τομογραφία Σεισμική Ανάκλαση

	Pau, Γαλλία. (αναφέρεται στο νόμο Archie).	Ποσοτικός προσδιορισμός εδαφικής υγρασίας και πορώδους.	Γεωραντάρ Σεισμική Ανάκλαση Σεισμική Διάθλαση Ηλεκτρικές Μέθοδοι
	Ορυχείο Ranger, Αυστραλία. Περιβαλλοντικά προβλήματα κατά τη λειτουργία του ορυχείου.	Ανίχνευση διαρροής σε χώρους αποθήκευσης νερού, το οποίο προέρχεται από εργοστάσιο επεξεργασίας ουρανίου.	Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις Φυσικού Δυναμικού Επαγόμενης Πολικότητας
<i>Ανίχνευση και οριοθέτηση ηλεκτρικά αγώγιμων περιοχών του υπεδάφους συσχετιζόμενες με την παρουσία παραγόντων ρύπανσης</i>	Carson City, Michigan, Η.Π.Α. Ρύπανση ποταμού.	Διέλευση υδρογονανθράκων από εγκαταστάσεις καθαρισμού. Κατανομή ρύπανσης / εντοπισμός περιοχής υψηλής αγωγιμότητας επάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.	Γεωραντάρ Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις
	Αεροπορική βάση Wurtsmith, Michigan, Η.Π.Α. Μακροχρόνια ρύπανση.	Αυξημένα ποσά βενζολίου / τολουολίου. Αξιολόγηση της αιτίας εξασθένησης σημάτων του υπεδάφειου ραντάρ.	Γεωραντάρ Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις Φυσικού Δυναμικού
<i>Ελεγχόμενες πειραματικές μελέτες και συνεισφορά τους στην περιγραφή μετανάστευσης ρύπων NAPL</i>	Βάση ενόπλων δυνάμεων, Toronto, Καναδάς.	Ελεγχόμενη έγχυση τετραχλωροαιθυλενίου. Ανίχνευση και περιγραφή μετανάστευσης ρύπων DNAPL.	Γεωραντάρ Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση Τεχνική Ανάκλασης Διαγραφίες Νετρονίου Διαγραφίες Πυκνότητας
	Πανεπιστήμιο Ohio / εργοστάσιο αποθήκευσης βενζίνης, Indiana, Η.Π.Α.	Πλαστικά δοχεία με κηροζίνη / διαρροή βενζίνης. Χρήση του υπεδάφειου ραντάρ για ανίχνευση ρύπανσης LNAPL.	Γεωραντάρ

Άλλες γεωφυσικές τεχνικές	Διαρροή από πρατήρια βενζίνης σε Cleveland, Ohio, Indiana (Η.Π.Α).	Ρύπανση από υδρογονάνθρακες. Ικανότητα γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης με τη μορφή ελεύθερης φάσης ( <i>free phase</i> ) και φάσης ατμού ( <i>vapor phase</i> ).	Γεωραντάρ
	Βόρεια Ιταλία. Διαρροή σε αγωγό πετρελαίου.	Ρύπανση από βενζίνη / πετρέλαιο. Συνεισφορά μεθόδου του γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης LNAPL.	Γεωραντάρ
	Αλπικό συγκρότημα Ελβετίας. Αποκατάσταση χώρων υγειονομικής ταφής.	Βιομηχανικά απορρίμματα / απόβλητα πετρελαίου. Προσδιορισμός βάθους και γεωμετρίας σε δύο χώρους υγειονομικής ταφής. Απόρριψη αστικών αποβλήτων σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Καθορισμός γεωμετρικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν χώρους υγειονομικής ταφής.	Τομογραφία Διάθλασης Γεωραντάρ Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή
	Caprarola / Pisana, Ιταλία. Χώροι απόρριψης αστικών αποβλήτων.	Απόρριψη αστικών αποβλήτων σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Καθορισμός γεωμετρικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν χώρους υγειονομικής ταφής.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Σεισμική Διάθλαση
	Utah, Η.Π.Α. Διαρροή από υπόγεια δεξαμενή βενζίνης.	Ρύπανση από βενζίνη. Χαρτογράφηση περιοχής ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Μετρήσεις Γωνίας Κλίσης Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις
	Oak Ridge Reservation, Tennessee, Η.Π.Α.	Πυρηνικά υλικά / μεταλλικά συντρίμια. Χαρακτηρισμός των γεωλογικών και υδρογεωλογικών παραμέτρων σε περιοχές απόρριψης αποβλήτων.	Αερομαγνητικές Μετρήσεις Ραδιομετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις

**Πίνακας 1.1:** Σύνοψη μελετών περιβαλλοντικής γεωφυσικής. (Τζιμούρτος και Κουκαδάκη, 2002)



Παρακάτω αναφέρονται εφαρμογές γεωφυσικής έρευνας σε περιοχές ρυπασμένες από υδρογονάνθρακες διεθνώς, περιγράφονται οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στις περιοχές αυτές, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών .

1. Μία συστηματική γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε σε περιοχή μελέτης στην αεροπορική βάση Wurtsmith, στην πόλη Oscoda (Michigan, Η.Π.Α) (Sauck et al, 1998). Μία ποσότητα καύσιμου είχε διεισδύσει από το 1982 στο υπέδαφος, με αποτέλεσμα πρόσφατες εκθέσεις να αναφέρουν αυξημένα ποσά βενζολίου, τολουολίου, αιθυλικού βενζολίου, ενώσεων ξυλολίων, καθώς και υψηλές τιμές αγωγιμότητας των υπογείων υδάτων.

Βασικός στόχος της έρευνας ήταν η εφαρμογή και ολοκλήρωση διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, προκειμένου να αξιολογηθεί η αιτία της εξασθένησης των σημάτων του γεωραντάρ, τα οποία παρουσιάζονται με τη μορφή σκιαγραφημένων περιοχών (shadow zones) και συμπίπτουν με τις περιοχές ρύπανσης υδρογονανθράκων (ρύποι LNAPL).

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε κατά την έρευνα περιλάμβανε εφαρμογή γεωραντάρ, μετρήσεις ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και διασκοπήσεις φυσικού δυναμικού σε κάρναβο διαστάσεων 15,24m x 15,24m. Γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Γεωλογικό Ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) διασαφηνίζουν τη στρωματογραφία του υπεδάφους, ενώ προηγούμενες έρευνες και πειράματα πεδίων προσφέρουν περισσότερες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης.

Συμπερασματικά, η παρουσία των σκιαγραφημένων ζωνών οφείλεται στην εξασθένηση των σημάτων του γεωραντάρ, πάνω από περιοχές που παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα και συνδέονται με τη βιοδιάσπαση του πλουμίου LNAPL στο υπέδαφος. Η εξήγηση αυτή υποστηρίζεται από τα αποτελέσματα ηλεκτρικής τομογραφίας, ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και φυσικού δυναμικού, τα οποία όλα εμφανίζουν ένα αγωγίμο σώμα στις περιοχές που συσχετίζονται με τη ρύπανση των υδρογονανθράκων. Η απουσία ρύπανσης στην ακόρεστη ζώνη μέσα στις καταγραφές του υπεδάφους ραντάρ αποδεικνύει ότι η μέθοδος ειδικής αντίστασης είναι πιο ευαίσθητη μέθοδος ανίχνευσης της αυξημένης αγωγιμότητας των ρηχών ακόρεστων ζωνών (vadose zones), σε σύγκριση με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Αντίθετα, η εξασθένηση των ανακλάσεων των σημάτων του γεωραντάρ αποτελεί ένα άριστο

εργαλείο χαρτογράφησης της αυξημένης αγωγιμότητας κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

2. Στην καναδική βάση ενόπλων δυνάμεων κοντά στο Toronto διεξήχθη ελεγχόμενο πείραμα σε χώρο διαστάσεων 9m x 9m x 3,3m. 7701t τετραχλωροαιθυλενίου (PCE) ελευθερώθηκαν εντός της απομονωμένης περιοχής και το πείραμα παρακολουθούνταν επί 984 ώρες με τη βοήθεια πληθώρας γεωφυσικών μεθόδων (Brewster et al, 1995). Σκοπός του ελεγχόμενου αυτού πειράματος ήταν η ανίχνευση και παρατήρηση ρύπανσης DNAPL κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς και η περιγραφή της μετανάστευσης και τελικής κατανομής της ελεγχόμενης ρύπανσης.

Κατά την πραγματοποίηση του πειράματος εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες γεωφυσικές μέθοδοι: Υπεδάφειο ραντάρ (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). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι υπήρξε καλή συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του γεωραντάρ και της ανάλυσης των πυρήνων δειγματοληψίας, καθώς οι λίμνες ρύπανσης που εμφανίζονταν ήταν 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.

3. Στο εργαστήριο ηλεκτρονικής του πανεπιστημίου του Ohio (Η.Π.Α) πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα μέσα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο από άμμο (5m x 5m x 2,9m) (Daniels et al, 1992). Σκοπός του πειράματος ήταν η χρησιμοποίηση του γεωραντάρ για την ανίχνευση ρύπανσης LNAPL. Εκτός από το παραπάνω πείραμα πραγματοποιήθηκε από την ίδια ομάδα μία ελεγχόμενη έρευνα σε εργοστάσιο αποθήκευσης βενζίνης στη βόρειο Indiana (ΗΠΑ). Συνεχείς μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τον Αύγουστο, Οκτώβριο και Δεκέμβριο του 1990, καθώς και κατά τον Ιανουάριο του 1991.

Στο πρώτο πείραμα (test pit) μία σειρά πλαστικών δοχείων γεμάτα με κηροζίνη, νερό και αέρα έπρεπε να εντοπιστούν από το γεωραντάρ. Υπήρχαν, όμως,

επιπλέον και άλλα δοχεία, τα οποία περιείχαν είτε συγκεκριμένη αναλογία μεταξύ κηροζίνης νερού είτε άμμο κορεσμένη σε νερό και κηροζίνη. Όλα τα δοχεία είχαν περιεκτικότητα 191t με διαστάσεις 0,305m x 0,305m x 0,229m. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτομερές δίκτυο γραμμών γεωραντάρ με κάθε μία από τις κεραίες των 100, 300 και 500MHz, οι οποίες απείχαν μεταξύ τους 15cm. Έγινε, επίσης, χρήση μίας κεραίας στα 80MHz, αλλά παρεμβολές από αντικείμενα πάνω από την επιφάνεια κατέστησαν τα δεδομένα μη αξιοποιήσιμα.

Όλες οι πληροφορίες υπέστησαν επεξεργασία με φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (low frequency cut-off filter) και με φίλτρο στο χώρο κυματαριθμού συχνότητας (2-D frequency-wave number filter). Εντούτοις, παρουσιάστηκαν προβλήματα στον ακριβή καθορισμό του χρόνου πρώτων αφίξεων (timezero).

Από τα δεδομένα διαπιστώθηκε ότι η κεραία των 500MHz εμφάνισε ευδιάκριτες ανωμαλίες στις μετρήσεις κατά μήκος των δοχείων. Οι ανωμαλίες αυτές ήταν λιγότερο εμφανείς για τα δοχεία γεμάτα με κηροζίνη, σε σχέση με αυτά που περιείχαν νερό. Παράλληλα, στις ενδείξεις του γεωραντάρ πάνω από τα δοχεία με κηροζίνη αέρα διαπιστώθηκε μία αλλαγή φάσης 1800, συγκριτικά με τα δοχεία που περιείχαν νερό. Αξίζει να αναφερθεί ότι στα στοιχεία από την κεραία των 300MHz το πλάτος των σημάτων ήταν περισσότερο ευδιάκριτο για τα δοχεία τα μερικώς γεμάτα με κηροζίνη, σε αντίθεση με τα δεδομένα από την κεραία των 500MHz.

Όσον αφορά το δεύτερο πείραμα (field example), πραγματοποιήθηκαν δύο γραμμές μελέτης, προκειμένου να δοθεί ερμηνεία στη μείωση του πλάτους των σημάτων που λαμβάνονταν από το γεωραντάρ. Η γραμμή A διεξήχθη μακριά από το χώρο του εργοστασίου βενζίνης, ενώ η γραμμή C βρισκόταν στην περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης της ρύπανσης.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων έδειξαν το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (μετά τα 7m) και την επίδραση των εποχικών μεταβολών και της υψηλής βροχόπτωσης στις μετρήσεις του υπεδάφειου ραντάρ. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του πανεπιστημίου του Ohio, απέδειξαν την ύπαρξη μίας υψηλής ανωμαλίας στο πλάτος του γεωραντάρ πάνω από τα πλαστικά δοχεία τα οποία ήταν γεμάτα με κηροζίνη. Αντίθετα, οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στη βόρειο Indiana έδειξαν μία συσχέτιση μεταξύ της μείωσης του πλάτους των σημάτων του γεωραντάρ με την παρουσία της βενζίνης. Πιθανή εξήγηση για την αντίθεση μεταξύ του παρατηρούμενου υψηλού πλάτους των ανακλάσεων πάνω από πηγές ρύπανσης στο εργαστηριακό πείραμα και των εξασθενημένων ανακλάσεων που εμφανίζονται

στο εργοστάσιο βενζίνης, δίνεται παρακάτω: α) Το προϊόν ρύπανσης (βενζίνη) είναι πιθανόν να περιέχεται σε μικρές, διασκορπισμένες συγκεντρώσεις μέσα στην ακόρεστη ζώνη (vadose zone), και β) Τα προϊόντα των υδρογονανθράκων που δημιουργούν ρύπανση είναι δυνατόν να εμφανίζουν υψηλό βαθμό εξασθένησης.

Αυτή η αιτιολόγηση θα μπορούσε να ερμηνεύσει τόσο την παρατηρούμενη μείωση στο πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διαδίδονται μέσω των τριχοειδών αγγείων, όσο και το υψηλό ποσοστό ανάκλασης που εντοπίζεται στους κορεσμένους υδρογονάνθρακες.

4. Κατά το έτος 1993 διεξήχθησαν πειραματικές μελέτες σε πρατήρια βενζίνης σε περιοχές κοντά στο Cleveland, Ohio και στη βόρειο Indiana των ΗΠΑ, τα οποία έκλεισαν εξαιτίας διαρροής υδρογονανθράκων (Grumman et al, 1995). Στις περιοχές αυτές παρατηρήθηκε βενζίνη με τη μορφή ελεύθερης φάσης, καθώς και ρύπανση με τη μορφή ατμού. Η στρωματογραφία των περιοχών χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφη και ημι-ομοιογενής (semi-homogenous).

Οι έρευνες με χρήση γεωραντάρ είχαν σαν σκοπό την παρατήρηση της ικανότητας του γεωραντάρ να ανιχνεύσει την παρουσία ρύπανσης με τη μορφή ελεύθερης φάσης (free phase) και φάσης ατμού (vapor phase). Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν ελεγχόμενα πειράματα προκειμένου να αξιολογηθεί η ευαισθησία του γεωραντάρ σε οργανικούς ρυπογόνους παράγοντες κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες.

Οι εργαστηριακές μελέτες με το γεωραντάρ διεξήχθησαν σε πολλαπλές γραμμές με ισαπόσταση γραμμών 0,6m. Οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν συχνότητες 300MHz, 100MHz και 80MHz. Η ψηφιακή επεξεργασία των μετρήσεων του υπεδάφειου ραντάρ περιελάμβανε ρύθμιση ενίσχυσης (simple time varying gain adjustment) και ειδικό φίλτρο για τη μείωση θορύβου χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων. Οι δισδιάστατες και τρισδιάστατες τομές χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω ερμηνεία. Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε υπό ελεγχόμενες συνθήκες, χρησιμοποιήθηκε δεξαμενή από πλεξιγκλάς, προκειμένου να αξιολογηθεί η διακριτική ικανότητα του υπεδάφειου ραντάρ σε διάφορα εδάφη, ποσοστά εδαφικής υγρασίας και ρυπογόνους παράγοντες. Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν νερό, βενζίνη και καύσιμο τύπου ντίζελ. Η δοκιμή γεωραντάρ εκτελέστηκε με κεραίες συχνότητας 500MHz ή 900MHz πάνω από τη δεξαμενή και στη μία πλευρά της. Τα στοιχεία συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας 17 έως 20 γραμμές μελέτης και επεξεργάστηκαν έτσι ώστε να προκύψουν δισδιάστατες και τρισδιάστατες τομές.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες γεωτρήσεις και χημικές δοκιμές για αρκετές ημέρες. Οι εργασίες αυτές είχαν σαν σκοπό να προσφέρουν πληροφορίες για την κατανομή της ρύπανσης συναρτήσει του χρόνου.

Οι τρισδιάστατες αναλύσεις από τα στοιχεία της περιοχής της βορειοδυτικής Indiana, εντοπίζουν μια ευδιάκριτη περιοχή ασθενών ανακλάσεων του γεωραντάρ, η οποία συμπίπτει με την περιοχή της παρατηρηθείσας ρύπανσης υδρογονανθράκων σύμφωνα με τις γεωτρήσεις παρακολούθησης. Τα στοιχεία από την περιοχή του Cleveland ωστόσο, δεν παρουσίασαν καμία αντιστοιχία με την ελεύθερη φάση και τη φάση ατμού της ρύπανσης που εντοπίζονται στην περιοχή.

Συμπερασματικά, μπορεί να αναφερθεί ότι ο παράγοντας ο οποίος αναφέρεται ως "vapor phase", είναι ικανός να διαδραματίσει πρωτεύοντα ρόλο στη μετανάστευση οργανικής ρύπανσης διαμέσου της ακόρεστης ζώνης (vadose zone). Η ανίχνευση, όμως, αυτής της διαδικασίας δεν είναι εφικτή με τη χρήση του γεωραντάρ. Για αυτόν ακριβώς το λόγο απαιτούνται περισσότερα ελεγχόμενα πειράματα.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών και ελεγχόμενων μελετών δείχνουν ότι πραγματικά εμφανίζονται ευδιάκριτες αλλαγές στις μετρήσεις του γεωραντάρ, πάνω από περιοχές που χαρακτηρίζονται από οργανική ρύπανση. Τα πειραματικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι οι τρισδιάστατες τομές που προκύπτουν μπορούν να συνεισφέρουν στην ερμηνεία των εδαφολογικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένης και της οργανικής ρύπανσης, όταν φυσικά επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες. Σε αντίθεση, οι αρχικές ενδείξεις από την ελεγχόμενη μελέτη, δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της οργανικής ρύπανσης μέσα στη ακόρεστη ζώνη είναι δύσκολο να αποκρυπτογραφηθούν με τη χρησιμοποίηση μονάχα του γεωραντάρ.

**5.** Στη βόρεια Ιταλία μία ολόκληρη περιοχή υπέστη ρύπανση από βενζίνη και πετρέλαιο τύπου ντίζελ λόγω διαρροής σε αγωγό πετρελαίου (Orlando, 2002). Η αποκατάσταση του χώρου ξεκίνησε αρκετά χρόνια αργότερα.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να τονιστεί η συνεισφορά της μεθόδου του γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης LNAPL και τον καθορισμό του πάχους του στρώματος, το οποίο έχει υποστεί τη ρύπανση. Είναι σημαντικό η έρευνα να περιλαμβάνει τόσο ρυπογόνες, όσο και μη ρυπογόνες περιοχές, ώστε να μπορεί να γίνει σαφέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από αλλουβιακά ιζήματα με εναλλαγές

διαπερατών και αδιαπέρατων στρωμάτων άμμου και χαλικιών ποικίλου πάχους.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μελέτη, διεξήχθησαν δύο έρευνες με γεωραντάρ (1996-1997, δύο χρόνια μετά το συμβάν) κατά την τελική φάση της αποκατάστασης. Ακολούθησε σύγκριση των τομών του γεωραντάρ, οι οποίες προήλθαν από την ίδια γραμμή μελέτης, αλλά σε διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετικό πάχος ρύπανσης LNAPL. Παράλληλα, κατασκευάστηκαν θεωρητικά μοντέλα με βάση τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατός ο υπολογισμός των αναμενόμενων τομών του γεωραντάρ και η σύγκρισή τους με τις πραγματικές τομές που προέκυψαν από την έρευνα. Για την πραγματοποίηση της γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιήθηκε το όργανο PulseEKKO 100, εφοδιασμένο με κεραία των 200MHZ. Για την απαλοιφή του θορύβου και την καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων, εφαρμόστηκαν στις τομές του γεωραντάρ φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (70-180 MHZ) καθώς και εκθετική ενίσχυση.

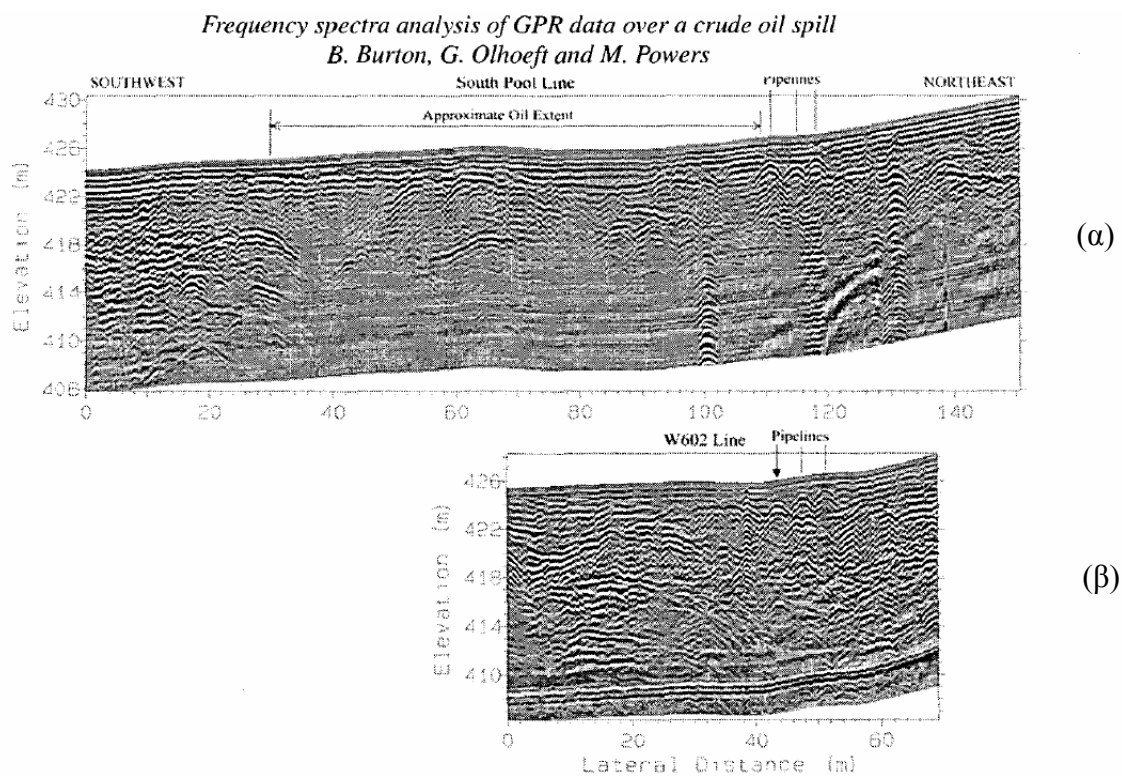
Από τη μελέτη της περιοχής διαπιστώθηκε ότι το βόρειο τμήμα της χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ρύπανση. Αντιθέτως, στη νότια ζώνη η ρύπανση εντοπίστηκε τόσο κατά την πρώτη, όσο και κατά τη δεύτερη διασκόπηση. Στην προβληματική νότιο περιοχή οι ταχύτητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, στο τμήμα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, είναι σαφώς μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της περιοχής χωρίς ρύπανση. Παράλληλα, οι ανακλάσεις των σημάτων του γεωραντάρ, που προέρχονται από τον υδροφόρο ορίζοντα, παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλάτος στη ρυπογόνο ζώνη γεγονός που δεν μπορεί να αποδοθεί σε γεωλογικούς παράγοντες.

Όσον αφορά το σχεδιασμό των θεωρητικών μοντέλων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το είδος της ρύπανσης και η χρονική στιγμή της μέτρησης. Διαπιστώθηκε ωστόσο, ότι αν και η στιγμιαία φάση του σήματος του γεωραντάρ τονίζει ικανοποιητικά τους ανακλαστές, στην περίπτωση αυτή δεν παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση στις ανακλάσεις που εμφανίζονται πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα.

Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι τόσο το πάχος μίας ρυπογόνου περιοχής, όσο και οι πλευρικές διακυμάνσεις της, μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια από τη συνδυασμένη μελέτη των τριών μεγεθών του σήματος του ραντάρ (στιγμιαίο πλάτος, συχνότητα, φάση) και από την τιμή του πλάτους της ανάκλασης. Στη συγκεκριμένη μάλιστα μελέτη υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ θεωρητικών και

πραγματικών αποτελεσμάτων.

6. Οι παρακάτω τομές γεωραντάρ προέρχονται από μια σειρά διασκοπήσεων που έγινε το 2000 στο Κολοράντο των Η.Π.Α. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με σκοπό την εκτίμηση της εξάπλωσης ρύπανσης από πετρέλαιο (LNAPLs) που προήλθε από διαρροή μεταλλικών σωληνώσεων μεταφοράς πετρελαίου το 1979. Στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 1.1(α) αποσβένει το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο πλούμιο της ρύπανσης, η οποία περιέχει βιοαποδομημένα πετρελαιοειδή. Το πλούμιο της ρύπανσης κατά κανόνα παρουσιάζει χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση που προκαλεί απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 1.1(β) απεικονίζονται μετρήσεις σε μη ρυπασμένη περιοχή όπου δεν διακρίνεται αντίστοιχη απόσβεση του πλάτους των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.



**Εικόνα 1.1:** Δεδομένα γεωραντάρ από διασκοπήσεις για εντοπισμό ρύπανσης LNAPLs στο Κολοράντο των Η.Π.Α.(Burton and Olhoeft 2004). α) Τομή γεωραντάρ επάνω από πλούμιο ρύπανσης και β) Τομή γεωραντάρ σε περιοχή όπου δεν υπάρχει ρύπανση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας και συλλογή πληροφοριών

#### 2.1 Αντικείμενο και σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Ανάπτυξης . Ο τίτλος του προγράμματος αυτού είναι : Εκτίμηση και παρακολούθηση της ρύπανσης εδαφών από πετρελαιοειδή με σύγχρονες γεωφυσικές μεθόδους. Το οποίο ονομάζεται Έλεγχος.

Όπως ειπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο σήμερα δεν υπάρχει τεχνολογία που να μπορεί να προσφέρει αξιόπιστες πληροφορίες υψηλής ανάλυσης για την μεγάλη ποικιλία εδαφών. Είναι επομένως απαραίτητη η ανάπτυξη αξιόπιστης τεχνολογίας που να είναι ικανή να απεικονίσει το υπέδαφος και να εξάγει λεπτομερή πληροφορία για την ύπαρξη της ρύπανσης και την χωρική μεταβολή της.

Το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα (ΕΛΕΓΧΟΣ) έχει σχεδιαστεί για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος με τη ανάπτυξη χαμηλού κόστους μη καταστροφικής τεχνολογίας η οποία είναι κατάλληλη για την χαρτογράφηση ετερογενειών στο έδαφος σε βάθη 0-50 μέτρα, την διασκόπηση κατά μήκος γραμμών μελέτης (πληροφορίες σε δύο διαστάσεις), ή ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος (πληροφορίες σε τρεις διαστάσεις) και την άμεση (In Situ) μέτρηση του βαθμού κορεσμού σε ρύπους (υδρογονάνθρακες) στο υπέδαφος.

Η προτεινόμενη τεχνολογία παρέχει (α) τρισδιάστατη απεικόνιση της ρύπανσης εδαφών μέχρι το βάθος ενδιαφέροντος (μέγιστο 50 μέτρα), (β) εντοπισμό της πηγής ρύπανσης και (γ) προσδιορισμό της πορείας ροής και της συγκέντρωσης των ρύπων.

Η νέα τεχνολογία βασίζεται στον συνδυασμό γεωφυσικών μεθόδων που να εφαρμόζεται σε εδάφη με ρύπανση από πετρελαιοειδή (ηλεκτρική τομογραφία, ηλεκτρομαγνητικά, υπεδάφειο ραντάρ, σεισμικά και διαγραφίες). Αυτό το πρότυπο σύνολο μεθόδων είναι εργαλείο, ικανό να περιχαρακώνει την ρυπασμένη ζώνη απεικονίζοντας το υπέδαφος σε τρεις διαστάσεις, σε βάθη 50 μέχρι μέτρων. Το πρωτότυπο αυτό εργαλείο δοκιμάστηκε σε επιλεγμένες περιοχές επεξεργασίας και διανομής υδρογονανθράκων (διυλιστήρια, αποθήκες και αγωγούς αργού πετρελαίου, βενζινάδικα). Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση αυτών των πληροφοριών για ρύπανση



των εδαφών με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνολογίας για να αξιολογηθούν οι γεωφυσικές τεχνικές.

Η προτεινόμενη τεχνολογία έχει σαν στόχο την μείωση του κόστους έρευνας για την εκτίμηση της ρυπασμένης περιοχής. Επιπρόσθετα η ολοκληρωμένη προσέγγιση της προτεινόμενης τεχνολογίας έχει σαν στόχο την έγκαιρη εκτίμηση των φυσικών υπεδάφινων παραμέτρων, την παρακολούθηση και πρόβλεψη της μετακίνησης των ρυπαντών και τον σχεδιασμό συγκεκριμένων ενεργειών απορρύπανσης.

Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα θα προσφέρει νέα τεχνολογία για εντοπισμό περιοχών με ρύπανση από πετρελαιοειδή, χρήσιμη στην στρατηγική της περιβαλλοντικής προστασίας και απορρύπανσης των εδαφών. Θα δημιουργηθούν εργαλεία, για τον χαμηλού κόστους χαρακτηρισμό του υπεδάφους, όσον αφορά την ρύπανση από πετρελαιοειδή και την μείωση των περιβαλλοντικών κινδύνων που σχετίζονται με αυτή. Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα εστιάζει στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών για την χαμηλού κόστους και άμεση διαδικασία λήψης αποφάσεων στον τομέα της διαχείρισης φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς.

Οι μονάδες επεξεργασίας και διανομής υδρογονανθράκων, στο άμεσο μέλλον και στην χώρα μας, θα υποχρεωθούν να παρακολουθούν την διασπορά της υπεδάφειας ρύπανσης που δημιουργείται από διαρροές ή άλλα αίτια (π.χ. ατυχήματα).

Επίσης η αλλαγή χρήσης γης θα απαιτεί έλεγχο των εδαφών τα οποία στο παρελθόν πιθανόν έγιναν αποδέκτες οργανικών ρυπαντών. Έτσι θα δημιουργηθεί έντονο ενδιαφέρον για χαμηλού κόστους τεχνολογίες έρευνας και παρακολούθησης της ρύπανσης στο υπέδαφος. Σήμερα μόνο σε μεγάλες μονάδες επεξεργασίας υδρογονανθράκων υπάρχει πρόβλεψη και εκτίμηση της ρύπανσης με την βοήθεια περιορισμένου αριθμού γεωτρήσεων. Στο μέλλον θα είναι αναγκαίο οι επιχειρήσεις αυτές να βρουν έγκυρο και χαμηλού κόστους τρόπο εκτίμησης της ρύπανσης η οποία θα μπορεί να υλοποιηθεί με τις τεχνολογίες όπως αυτές που θα αναπτυχθούν στο προτεινόμενο ερευνητικό πρόγραμμα.

Η απειλή της ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων νερών είναι ένα οξύ θέμα το οποίο χρήζει εφαρμογής μη καταστροφικών μεθόδων. Οι γεωτρήσεις δεν είναι ικανές να παράγουν γρήγορους και χαμηλού κόστους δείκτες της εξάπλωσης της ρύπανσης στο υπέδαφος. Σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανόν να δημιουργήσουν διόδους μεταξύ των ρυπαντών και του υδροφόρου ορίζοντα. Έγκαιρη εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνολογίας θα επιτρέψει το έμμεσο εντοπισμό της ρύπανσης και θα αποτρέψει περαιτέρω επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Η προτεινόμενη τεχνολογία θα επιτρέπει γρήγορο εντοπισμό της ρύπανσης στο υπέδαφος και θα συμβάλλει στην απορρύπανση, ελαχιστοποιώντας την επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος της ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων νερών από υδρογονάνθρακες έχει σαν σκοπό τον προσδιορισμό του όγκου και των χαρακτηριστικών υπεδάφειων ρυπαντών, την παρακολούθηση μετανάστευσης των ρυπαντών και την μείωση του κόστους απορρύπανσης. Θα επιτρέψει στις εταιρίες διύλισης και διανομής υδρογονανθράκων να είναι ανταγωνιστικές στην Ευρώπη, σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος.

Επίσης θα δώσει έναυσμα σε εταιρίες που ασχολούνται με την ρύπανση του περιβάλλοντος να αποκτήσουν χαμηλού κόστους, τεχνολογία εντοπισμού της ρύπανσης των εδαφών από υδρογονάνθρακες.

Όπως είναι κατανοητό το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι περιορισμένο σε σχέση με το αντικείμενο και τους σκοπούς του ερευνητικού προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα στα διυλιστήρια του Ασπρόπυργου 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. Το συγκεκριμένο λοιπόν αντικείμενο αυτής της διπλωματικής είναι :

- Η επεξεργασία των εικόνων που πάρθηκαν με τη μέθοδο του γεωραντάρ
- Η υπέρθεση αυτών των εικόνων με τις αντίστοιχες της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας
- Η παρατήρηση των παραπάνω και εξαγωγή συμπερασμάτων
- Η σύγκριση αλλά και σύνθεση των εικόνων με τα δεδομένα χημικών αναλύσεων και διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας από γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή
- Τελικά συμπεράσματα για την ρύπανση στην περιοχή αλλά και για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν

## **2.2 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:

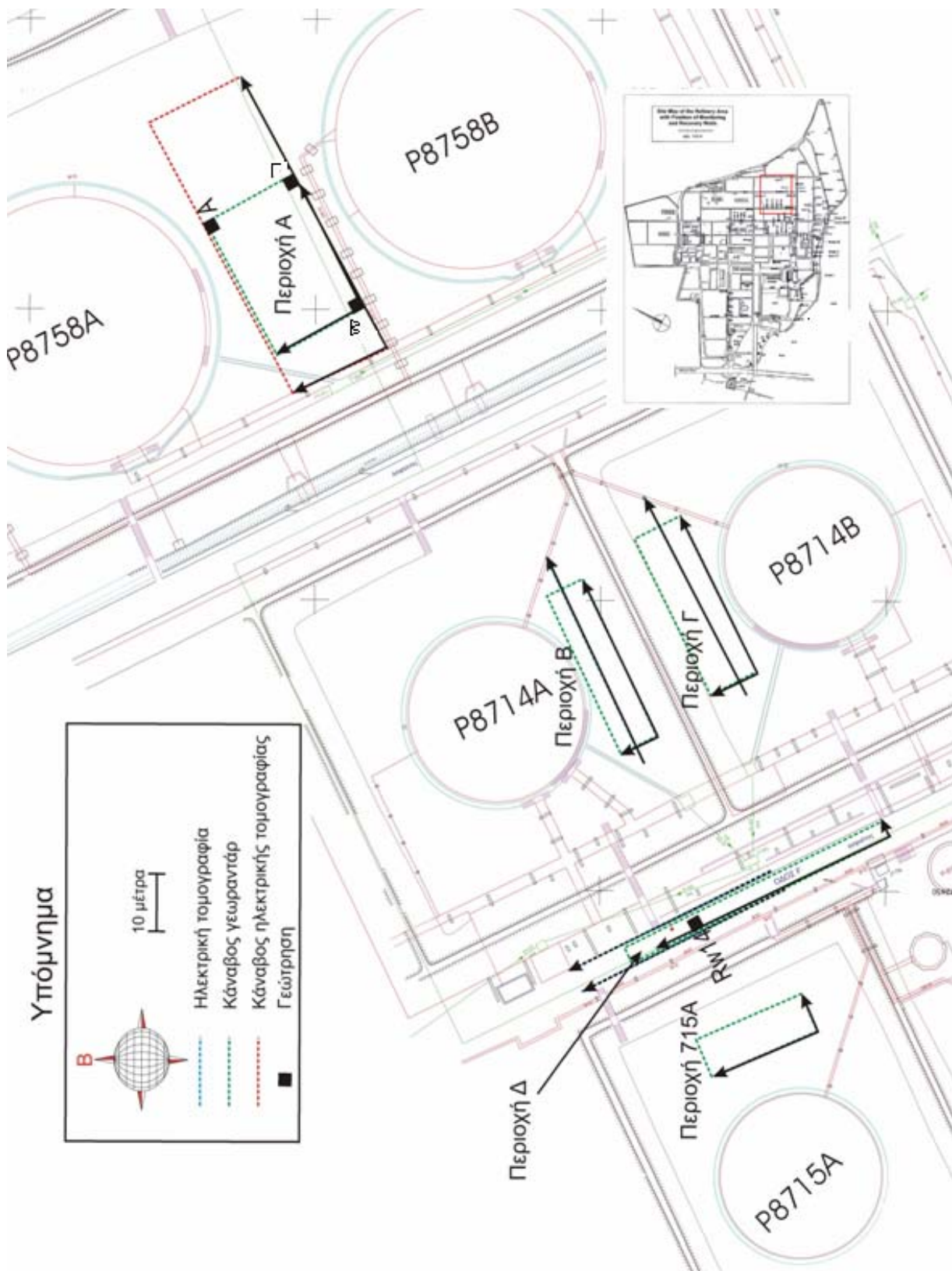
- στην υπόγεια απορροή,
- στην εξάπλωση του εδαφικού αέρα,

- στον εντοπισμό της θέσης και της έκτασης των πλουμίων της ελεύθερης φάσης στον υπόγειο υδροφόρο. (Αντωνίου 2007)

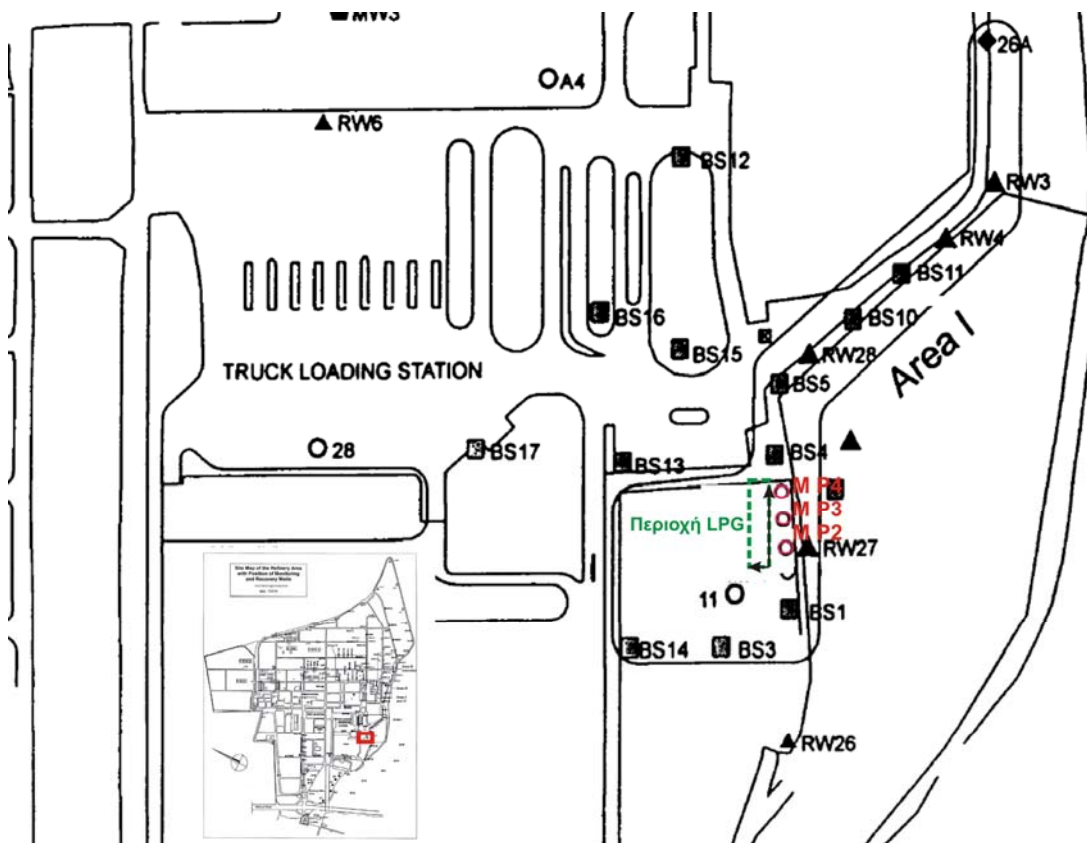
### **2.3 Συλλογή δεδομένων – Διασκοπήσεις**

Τον Ιούλιο του 2005 διασκοπήθηκε η περιοχή Α, που βρίσκεται ανάμεσα στις δεξαμενές P8758A και P8758B (Εικόνα 2.1) στην οποία διατρήθηκαν τρεις γεωτρήσεις συνολικού μήκους 20 m. 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. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 14 γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας συνολικού μήκους 696m, 42 γραμμές γεωραντάρ συνολικού μήκους 1092m, 4 κάνναβοι ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης συνολικού εμβαδού 1088 τετραγωνικών μέτρων. 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.



**Εικόνα 2.1:** Οι θέσεις των γραμμών μελέτης της γεωφυσικής έρευνας και των γεωτρήσεων στο ΝΑ τμήμα των διυλιστηρίων Ασπρόπυργου.



**Εικόνα 2.2:** Οι θέσεις των γραμμών μελέτης της γεωφυσικής έρευνας και των γεωτρήσεων στο ΝΔ τμήμα των δυλιστηρίων Ασπρόπυργου (Κανελλοπούλου, 2004).

### 2.3.1 Συλλογή μετρήσεων με την μέθοδο του 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 (σχήμα 2.1). Η κεντρική συχνότητα εκπομπής ήταν 110 MHz, το διάστημα δειγματοληψίας, 500 picoseconds ( $1 \text{ picosecond} = 10^{-12} \text{ second}$ ), ενώ το βήμα διασκόπησης ήταν 0.25m, η ισαπόσταση των γραμμών μελέτης 2m και το μήκος κάθε γραμμής 26m. 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 (Εικόνες 2.1 και 2.2) με ισαπόσταση γραμμών

μελέτης 1m. Στις περιοχές Β, Γ και 715Α διασκοπήθηκαν με το γεωραντάρ οι κάρναβοι της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης. Στην περιοχή Δ, διασκοπήθηκε κάρναβος διαστάσεων 3.5 x 50m με ισαπόσταση γραμμών μελέτης 0.5m. Στην ίδια περιοχή υπάρχει η γεώτρηση RW14 παρακολούθησης της στάθμης της ελαιώδους φάσης.

### 2.3.2 Συλλογή μετρήσεων με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας

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. Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας διεξήχθησαν επάνω στους αντίστοιχους κάρναβους της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης.

Στην περιοχή Δ, με την ηλεκτρική τομογραφία σαρώθηκαν δύο παράλληλες γραμμές μελέτης στα άκρα του δρόμου. 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

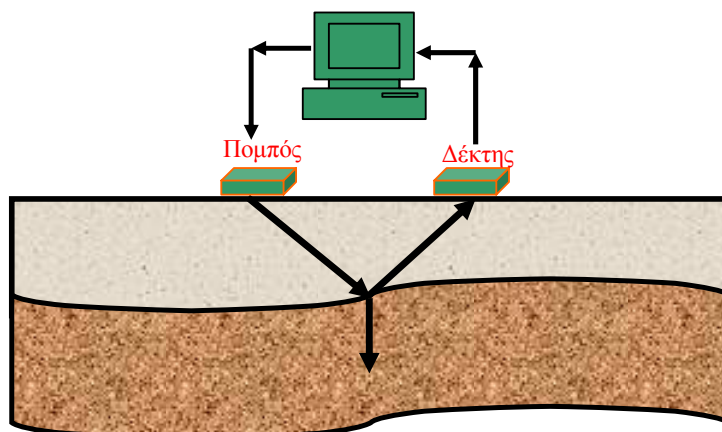
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Οι γεωφυσικές μέθοδοι του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας

### 3.1 Γεωραντάρ

#### 3.1.1 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνοτήτων από 1 έως 1200 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. 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 εκπομπή και λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από την ίδια κεραία (monostatic mode) ή από δύο διαφορετικές κεραίες (μία για την εκπομπή και μία για τη λήψη – bistatic mode). (Χορεντάκη 2006)



Εικόνα 3.1: Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ



### 3.1.2 Γεωμετρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το πλάτος του παλμού και το χρόνο που κάνει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από τον πομπό στον δέκτη. Ο δέκτης κατοπτρεύει τα ακόλουθα τρία είδη κυμάτων:

- 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:

$$t_r = (4D^2 + X^2)/v$$

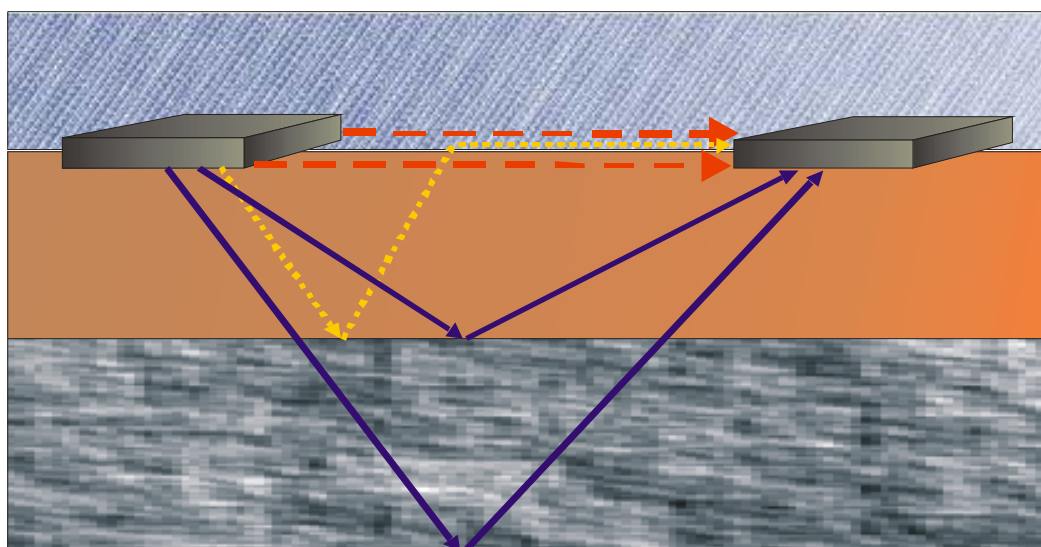
όπου  $X$  είναι η απόσταση πομπού-δέκτη,  $D$  το βάθος του εμποδίου και  $v$  η ταχύτητα των κυμάτων στο μέσο διάδοσης.

- 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:

$$t = X / v_{\text{αέρα}}$$

$$t = X / v_{\text{εδάφους}}$$

- 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 δέκτη μέσω του αέρα. (Σπανουδάκης 2002)



----- Απ' ευθείας κύματα

..... Κρίσιμα διαθλώμενα κύματα

———— Ανακλώμενα κύματα

**Εικόνα 3.2:** Γεωμετρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

### 3.1.3 Ηλεκτρομαγνητική εξασθένιση

Τα αποτελέσματα των καταγραφών του γεωραντάρ εξαρτώνται από την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία καθορίζει το βάθος της διασκόπησης. Η εξασθένιση εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών.
- Την γεωμετρία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Την συχνότητα εκπομπής.

Οι κυριότερες από τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζουν την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι: η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα, η μαγνητική υστέρηση, το πορώδες και η συγκέντρωση ιόντων αλάτων στα ρευστά.

Από τις ιδιότητες αυτές η πιο σημαντική είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, γιατί όσο πιο αγωγίμο είναι το μέσο διάδοσης τόσο πιο μεγάλη είναι η εξασθένιση. Το μέρος της ενέργειας που χάνεται εξαιτίας της αγωγιμότητας οφείλεται στους εξής μηχανισμούς:

1. Απαραίτητη για την κίνηση των ηλεκτρονίων είναι η απορρόφηση ποσού ενέργειας.
2. Κατά την κίνησή τους μέσα στην μάζα του αγωγού συγκρούονται με άλλα σωματίδια και μέρος της ενέργειας τους μετατρέπεται σε θερμική.
3. Η κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο αποσβένει μέρος της ενέργειας.

Στα διηλεκτρικά υλικά τα οποία έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση η εξασθένιση είναι μικρότερη και οφείλεται κυρίως στην ενέργεια που καταναλώνουν τα ηλεκτρόνια για να υπερνικήσουν τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις των μορίων και να προσανατολιστούν στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Απώλειες ενέργειας που οφείλονται στην μαγνητική διαπερατότητα – μαγνητική υστέρηση δεν είναι σημαντικές για μη μαγνητικά υλικά. Στην περίπτωση αυτή η εξασθένιση οφείλεται στην περιστροφή των ηλεκτρονίων (spin) στα μοριακά τροχιακά και στην παρουσία σιδήρου και άλλων μετάλλων.

Την εξασθένιση επίσης ευνοούν το πορώδες και τα περιεχόμενα σε αυτό ρευστά, με υψηλή συγκέντρωση ιόντων αλάτων.

Όσον αφορά την γεωμετρία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παρατηρούνται απώλειες σε ενέργεια ανάλογες της απόστασης που έχει διατρέξει το κύμα, των διεπιφανειών που συναντάει και της επιφάνειας του μετώπου του κύματος η οποία συνεχώς διευρύνεται. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συντελούν στην διασπορά της ενέργειας και κατά επέκταση στην εξασθένισή της. Τέλος ο βαθμός εξασθένισης αυξάνεται στις υψηλές συχνότητες εκπομπής και μειώνεται στις χαμηλές.

Τα αποτελέσματα της εξασθένησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι τα εξής:

- Η μείωση του πλάτους: Η αρχική τιμή  $A_0$  του πλάτους του κύματος μειώνεται σύμφωνα με την σχέση:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Όπου  $x$  η απόστασης που έχει διανύσει το κύμα στο μέσο διάδοσης και  $\alpha$  η σταθερά απόσβεσης.

- Η μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας: Η κεντρική συχνότητα του φάσματος της ακτινοβολίας που λαμβάνει η κεραία του δέκτη είναι χαμηλότερη από την κεντρική συχνότητα εκπομπής.

- Μικρότερο βάθος διασκόπησης: Όσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένιση τόσο μικρότερο είναι το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αν η διεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος θεωρηθεί κατακόρυφη το βάθος διείσδυσης δίνεται από την σχέση:

$$z = \frac{\kappa}{\sqrt{f \cdot \sigma}}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι το βάθος διείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του γινομένου  $f\sigma$ , όπου  $f$  η συχνότητα του κύματος,  $\sigma$  η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους και  $\kappa = -\ln(Hy-Ho)$ , όπου  $Hy$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο υπέδαφος και  $Ho$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της γης (Βαφείδης, 2001).

#### 3.1.4 Χρήσεις Γεωραντάρ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των ηλεκτρονικών συστημάτων αλλά και γενικότερα της τεχνολογίας, το γεωραντάρ μετατράπηκε σε ένα πολύ εύχρηστο όργανο με πολυάριθμες χρήσεις. Με την βοήθεια των ψηφιακών συστημάτων βελτιώθηκαν σημαντικά οι μέθοδοι ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ συμβάλλοντας στην καλύτερη και γρηγορότερη ερμηνεία των μετρήσεων. Επίσης, λόγω της φορητότητάς του, η συλλογή των δεδομένων είναι σχετικά γρήγορη και η επεξεργασία τους μπορεί να γίνει επιτόπου πολλές φορές, εξοικονομώντας χρόνο.

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν να διακριθούν ουσιαστικά σε δύο κατηγορίες βάση της κεντρικής συχνότητας εκπομπής. Στους γεωλογικούς σκοπούς, όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα, χρησιμοποιούνται κεραίες των 50MHz ή και μεγαλύτερες. Ενώ για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing, NDT), όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο, οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz. (Παπακωσταντίνου 2005)

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 3.1) παρουσιάζονται ορισμένες από τις κυριότερες εφαρμογές του γεωραντάρ.

<b>Γεωλογικές</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαρτογράφηση βυθισμάτων</li> <li>• Χαρτογράφηση επιφανειακών κοιτασμάτων</li> <li>• Χαρτογράφηση ρωγμών σε ορυκτό αλάτι</li> <li>• Χαρτογράφηση γεωλογικών δομών</li> <li>• Χαρτογράφηση λιμναίων και ποτάμιων ιζημάτων</li> <li>• Ανίχνευση εγκοίλων, ασυνεχειών</li> </ul>
<b>Περιβαλλοντικές</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαρτογράφηση μολυσμένων περιοχών</li> <li>• Έρευνες σε χωματερές</li> <li>• Χαρτογράφηση ρύπων στο υπεδάφειο νερό</li> <li>• Έρευνες για εντοπισμό νερού</li> <li>• Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων</li> </ul>
<b>Κατασκευές</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους</li> <li>• Ανίχνευση αστοχιών και κενών</li> <li>• Προσδιορισμός οπλισμού στο τσιμέντο</li> <li>• Προσδιορισμός σωλήνων καλωδίων</li> <li>• Δοκιμές στο τσιμέντο</li> </ul>
<b>Αρχαιολογία</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών</li> <li>• Χαρτογράφηση πριν την εκσκαφή</li> </ul>

**Πίνακας 3.1:** Χρήσεις γεωραντάρ (Reynolds 1998, Mellet 1995, Al-Dajani 1990, Toshioka 1995, Tsoflias 1999, Al-Nuaimy 2000, Hugenschmidt 1998).

### 3.2 Ηλεκτρική τομογραφία

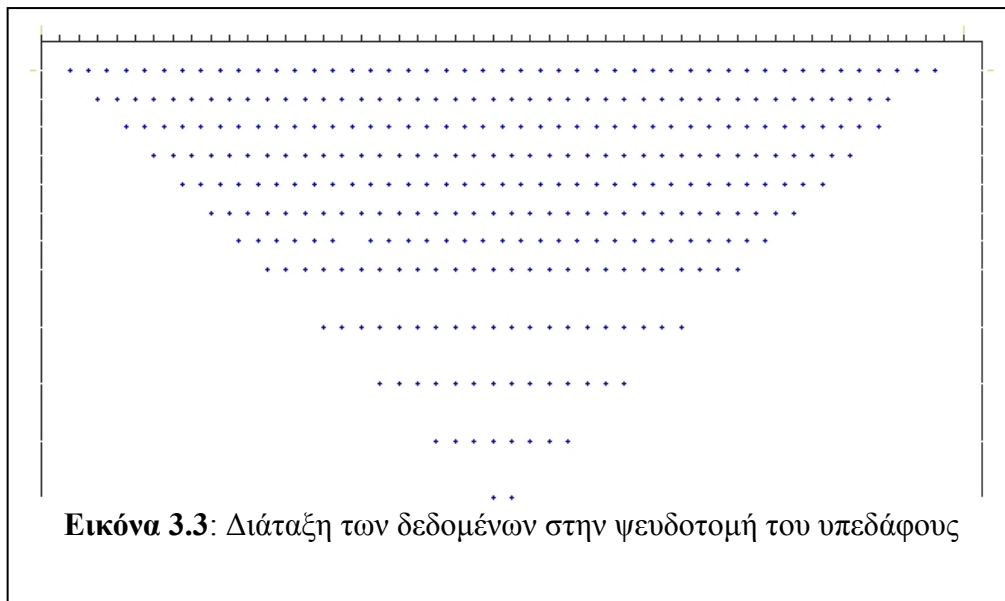
#### 3.2.1 Εισαγωγή

Ο όρος τομογραφία παράγεται από τη λέξη «τομή» και σημαίνει απεικόνιση τομής π.χ. του υπεδάφους. Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι μεταβολές κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως ρήγματα.

Μία σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Συλλέγονται επομένως τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της γραμμής μελέτης και για διάφορα βάθη. Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμών της πραγματικής 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.

### 3.2.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

Για τη συλλογή των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου, η οποία θα μας απασχολήσει, τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή δυο ζευγάρια ηλεκτροδίων (δίπολα) όπου τα ηλεκτρόδια κάθε διπόλου απέχουν μεταξύ τους ίση απόσταση  $a$ . Το ένα ζευγάρι αποτελείται από τα ηλεκτρόδια ρεύματος και το άλλο από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Σε κάθε γραμμή μελέτης τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια που απέχουν απόσταση  $a$  μεταξύ τους. Η γραμμή σαρώνεται πολλές φορές αυξάνοντας διαδοχικά τόσο την απόσταση μεταξύ των διπόλων όσο και αυτή μεταξύ των ηλεκτροδίων του ίδιου δίπολου. Η απόσταση μεταξύ των διπόλων παραμένει σταθερή για μετρήσεις που αντιστοιχούν σε ένα επίπεδο από την επιφάνεια του εδάφους, που ονομάζεται επίπεδο δεδομένων. Η απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα είναι πάντα ακέραιο πολλαπλάσιο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων του ίδιου δίπολου. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους (εικόνα 3.3).



Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που δίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με τη διαδικασία αυτή υπολογίζεται 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 μετρήσεις.

Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές οι οποίες αναφέρονται στην ίδια γραμμή. Η πρώτη είναι η ψευδοτομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, η δεύτερη είναι η ψευδοτομή που αντιστοιχεί στις υπολογισμένες τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή. (Χορευτάκη 2006)

### 3.3 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας

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

Η διαγραφή ακτίνων γάμμα σε ιζηματογενείς σχηματισμούς συνήθως δίνει πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ραδιενεργά στοιχεία τείνουν να συγκεντρώνονται στα αργιλικά πετρώματα.

Ιζηματογενείς σχηματισμοί χωρίς αργλικές 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 αργλικών σχιστόλιθων και σχηματισμών που περιέχουν αργλικές προσμίξεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ

#### 4.1 Εισαγωγή

Τα δεδομένα του γεωραντάρ 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 των δεδομένων 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 των δεδομένων.
- 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 ίχνων (complex trace analysis), εξασφαλίζει την τοπική πληροφορία (Taner 1979).

#### 4.2 Φίλτρα

##### 4.2.1 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) αντίστοιχα. (Σπανουδάκης, 2001).

Τα κυριότερα μονοδιάστατα φίλτρα είναι τα εξής:

- Φίλτρο διόρθωσης Dewow
- Φίλτρο κινητού μέσου όρου (Down the trace average)
- Φίλτρο μέσου ίχνους (Trace to trace average)
- Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal)

Στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας (Πίνακας 4.1) στον οποίο περιγράφονται το φίλτρο διόρθωσης και το φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία των εικόνων.

Όνομα	Υπολογισμός-Χαρακτηριστική σχέση	Χρησιμότητα
Φίλτρο διόρθωσης Dewow	<p>Υπολογίζει το μήκος του τελεστή (M) από τη σχέση <math>2/(f \cdot \Delta t)</math> όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής (MHz) και <math>\Delta t</math> το διάστημα δειγματοληψίας (nsec). Ο τελεστής της 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:</p> $\frac{1}{M} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}_{(M \times 1)}$	Πρόκειται για φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων κάθε ίχνους ξεχωριστά

Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal)	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 ανεπιθύμητα φαινόμενα (Σπανουδάκης 2001)	Το φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου εφαρμόζεται για να εξαλειφθεί το φαινόμενο της αντήχησης των κεραιών (antenna ringing) κατά το οποίο εμφανίζονται στα δεδομένα, σήματα που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες. Τέτοιοι οριζόντιοι ανακλαστήρες εμφανίζονται και λόγω της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το περιβάλλον (Σπανουδάκης 2001)
--	---	--

**Πίνακας 4.1:** Συνοπτική περιγραφή του φίλτρου διόρθωσης Devow και του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal).

#### 4.2.2 Δισδιάστατα φίλτρα

Τα δισδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε κατά την εφαρμογή της να λαμβάνουν υπόψη μια ομάδα δεδομένων που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη και γειτονικούς χρόνους. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο σε τομές γεωραντάρ όσο και σε οριζόντιες τομές (Σπανουδάκης, 2001).

Τα κυριότερα δισδιάστατα φίλτρα είναι τα εξής:

- Φίλτρο μέσης τιμής (mean)
- Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

#### 4.2.3 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)

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε η εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (SEC).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2) περιγράφεται συνοπτικά η εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (SEC).

Όνομα	Περιγραφή	Χρησιμότητα
Εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (SEC).	<p>Αποτελεί σύνθεση γραμμικής και εκθετικής ενίσχυσης που εξαρτάται από το χρόνο. Η συνάρτηση που περιγράφει την ενίσχυση SEC είναι</p> $g(t) = C + \left( 1 + \frac{t - (\tau_w + t_0)}{\tau_w} \right) e^{\beta t},$ <p>όπου C είναι η σταθερά εκκίνησης, <math>t_0</math> ο χρόνος άφιξης του πρώτου σήματος (timezero), <math>\tau_w</math> το εύρος του παλμού και το <math>\beta = (\text{εξασθένιση } \alpha \text{ σε db/m επί ταχύτητα παλμού } 0,1 \text{ m/ns}) / 8,69</math> (Πουλιούδης, 1999)</p>	<p>Σκοπός της ενίσχυσης της είναι η αναπλήρωση της ενέργειας των σημάτων από απώλειες που οφείλονται στην γεωμετρική διασπορά και την εκθετική εξασθένιση της ενέργειας των κυμάτων (Πουλιούδης, 1999)</p>

**Πίνακας 4.2:** Συνοπτική περιγραφή της εκθετικής ενίσχυσης για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (SEC).

### 4.3 Μιγαδικά χαρακτηριστικά

#### 4.3.1 Εισαγωγή

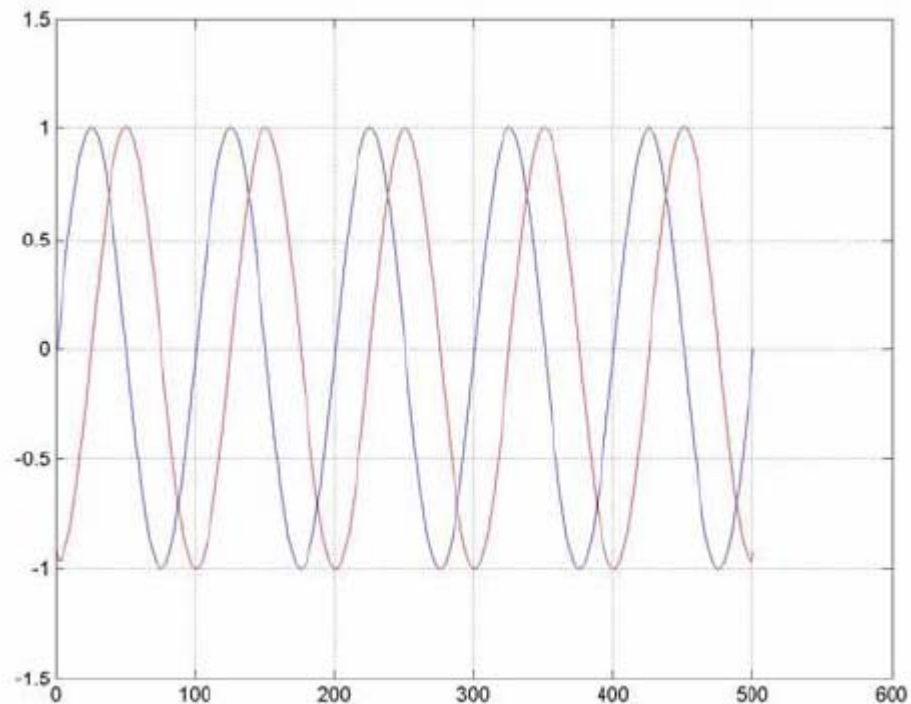
Η σύνθετη ή μιγαδική ανάλυση σήματος αντιμετωπίζει ένα ίχνος  $x(t)$  σαν το πραγματικό μέρος ενός αναλυτικού σήματος το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$f(t) = x(t) + jx^*(t)$$

Το φανταστικό μέρος  $x^*(t)$  είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά  $90^\circ$  πραγματικό μέρος και μπορεί να προσδιοριστεί από το πραγματικό βάσει καταλλήλων απαιτήσεων.

Αν θεωρηθεί ότι η  $x(t)$  μπορεί να εκφραστεί από χρονικά μεταβαλλόμενο πλάτος  $E(t)$  και μια χρονικά μεταβαλλόμενη φάση  $\theta(t)$  δηλαδή  $x(t)=E(t)\cos\theta(t)$  τότε η φασικά μετατοπισμένη κατά  $90^\circ$  κυματομορφή είναι  $x^*(t)=E(t)\sin\theta(t)$  και η σύνθετη κυματομορφή είναι:

$$f(t) = x(t) + jx^*(t) = E(t)[\cos\theta(t) + j\sin\theta(t)] = E(t)e^{j\theta(t)}$$



**Σχήμα 4.1:** Μια ημιτονοειδής συνάρτηση (μπλε γραμμή) και η φασικά μετατοπισμένη κατά  $90^\circ$  συνάρτηση (κόκκινη γραμμή).

Αν τα  $f(t)$  και  $f^*(t)$  είναι γνωστά τότε η σχέση μπορεί να επιλυθεί ως προς  $E(t)$  και  $\theta(t)$ :

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

$$\theta(t) = \tan^{-1} [x^*(t) / x(t)]$$

Το  $E(t)$  είναι το στιγμιαίο πλάτος, ενώ το  $\theta(t)$  είναι η στιγμιαία φάση. Ο ρυθμός μεταβολής της φάσης εκφράζεται από τη χρονικά μεταβαλλόμενη στιγμιαία συχνότητα  $\omega(t) = d\theta(t) / dt$ . Αυτά είναι τα βασικά μιγαδικά χαρακτηριστικά (attributes).

Στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας (Πίνακας 4.3) με τα κυριότερα μιγαδικά χαρακτηριστικά

Όνομα	Περιγραφή ή Χαρακτηριστική σχέση	Χρησιμότητα
Στιγμιαίο πλάτος	$E(t) = \sqrt{x^2(t) + x^{*2}(t)}$	Χρησιμεύει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες. Επειδή αποτελεί το μέτρο του σύνθετου ίχνους χάνει στην ανάλυση κατά την διεύθυνση του χρόνου
Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db	$20\log E(t)$	Χρησιμοποιείται για την μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα db.
Στιγμιαία φάση	$\theta(t) = \arctan (x^*(t)/x(t))$	Τείνει να ενισχύσει τους αδύναμους ανακλαστήρες εφόσον είναι ανεξάρτητη του πλάτους. Έχει ευαισθησία στο θόρυβο
Συνημίτονο της στιγμιαίας φάσης	Παραγόμενο από την στιγμιαία φάση	Λόγω των συγκεκριμένων ορίων του (από -1 έως 1) χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την στιγμιαία φάση για την καλύτερη κατανόηση της
Στιγμιαία συχνότητα	$d\theta(t) / dt$	Τονίζει τους ανακλαστήρες καθώς και την λεπτή υφή των καταγραφών. Είναι πολύ ευαίσθητη στο θόρυβο

Συνάφεια		Δείχνει το βαθμό ομοιότητας μεταξύ των ιχνών
----------	--	--

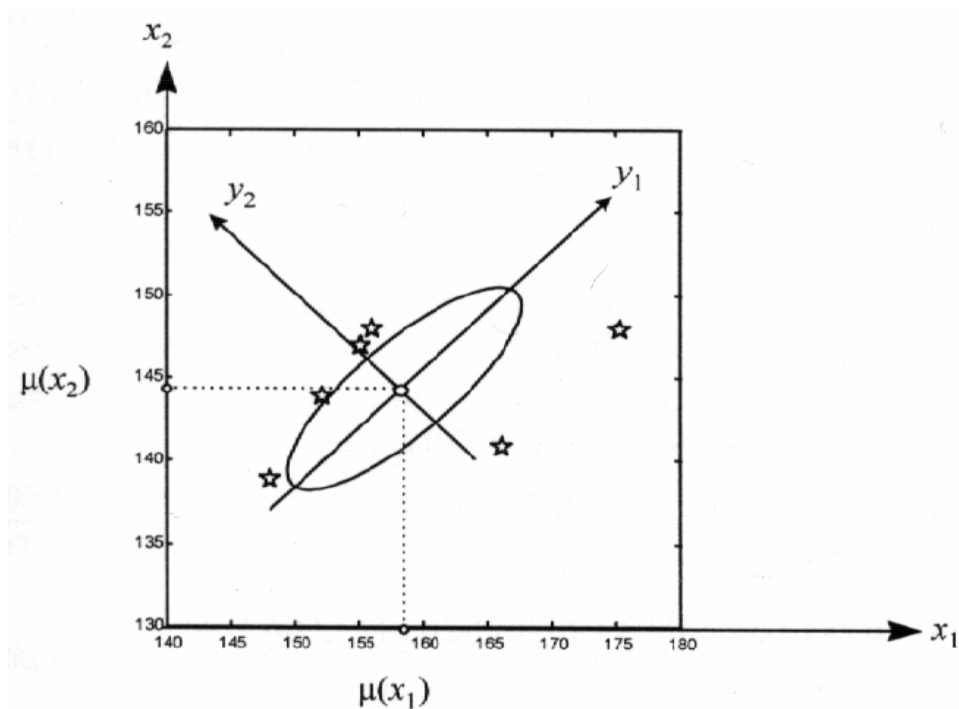
**Πίνακας 4.3:** Συνοπτική περιγραφή των κυριότερων μιγαδικών χαρακτηριστικών. (Chen και Sidney1997)

#### 4.4 Οριζόντιες τομές (Slices)

Η δημιουργία οριζόντιων τομών προϋποθέτει την ύπαρξη μετρήσεων σε ορθογώνιο κάναβο. Έστω ένας όγκος δεδομένων διαστάσεων  $M \times N \times O$  όπου  $M$  ο αριθμός των μετρήσεων ανά ίχνο,  $N$  ο αριθμός των ιχνών ανά γραμμή μελέτης και  $O$  ο αριθμός των γραμμών μελέτης (sections). Μια οριζόντια τομή ορίζεται σαν ο μέσος όρος μεταξύ  $m$  διαδοχικών σημείων για όλα τα ίχνη και όλες τις τομές (Σπανουδάκης, 2002).

#### 4.5 Μετασχηματισμός κύριων συνιστωσών (principal components analysis)

Ο σκοπός της ανάλυσης κύριων συνιστωσών είναι να εξηγήσει τη δομή του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας  $\Sigma$  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  $\Sigma$  διασποράς (μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας) να μετασχηματιστεί σε διαγώνιο πίνακα. (Μερτίκας, 1999)



**Σχήμα 4.2:** Ο μετασχηματισμός των κυρίων συνιστωσών (Μερτίκας, 1999)

#### 4.6 Ταξινόμηση δεδομένων γεωραντάρ

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 γεωραντάρ πραγματοποιείται ταξινόμηση έτσι ώστε τα μιγαδικά χαρακτηριστικά των δεδομένων να τοποθετηθούν σε ομάδες που παρουσιάζουν την ίδια μορφή, που έχουν δηλαδή τις ίδιες περίπου τιμές.

Ανάλογα με την επιλογή των κέντρων συγκεντρώσεων (δειγμάτων) βάση των οποίων θα επιτευχθεί ο διαχωρισμός των δεδομένων, οι μέθοδοι ταξινόμησης διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.



#### 4.6.1 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. (Αντωνίου, 2007)

##### 4.6.1.1 Μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης K- μέσων τιμών (k-means)

Στον αλγόριθμο των K 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:

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

Όπου  $m_j$  τα κέντρα συγκέντρωσης,  $k$  ο αριθμός των κέντρων συγκέντρωσης και  $x$  τα δείγματα.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα (4) βήματα:

1. Επιλέγονται (είτε τυχαία είτε αυτά είναι γνωστά)  $K$  αρχικά κέντρα ομάδων  $m_1(1), m_2(2), \dots, m_K(1)$ .
2. Κάθε άγνωστο δείγμα  $x$  αντιστοιχείται στην ομάδα  $\omega_j$  εάν:

$$\|m_j(k) - \mathbf{x}\| < \|m_i(k) - \mathbf{x}\|$$

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

3. Υπολογίζονται τα νέα κέντρα ομάδων από τη σχέση:

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

όπου  $n$ , ο αριθμός των δειγμάτων στην ομάδα  $j$ .

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

Η επιλογή του πλήθους  $K$  των κέντρων συγκέντρωσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, γιατί αλλάζοντας τον αριθμό  $K$  των κέντρων προκύπτουν τελείως διαφορετικές ομάδες. Κρίσιμη είναι επίσης και η επιλογή των αρχικών κέντρων συγκέντρωσης  $m_1(1), m_2(2), \dots, m_k(1)$ , επειδή κάποιες ομάδες μπορεί να μείνουν άδειες αν τα κέντρα απέχουν μακριά από την κατανομή των δεδομένων. Ο αλγόριθμος των  $K$  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).

#### 4.6.1.2 Δίκτυα αυτο-οργανωμένης απεικόνισης (Self Organizing Maps, SOM)

Τα δίκτυα 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 τοπολογικός 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 αυτο-οργάνωσης 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 δικτύου αυτο-οργάνωσης 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 τοπολογική συνέχεια στον τοπογραφικό χάρτη. (Αντωνίου, 2007)

#### 4.6.2 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. (Αντωνίου, 2007)

#### **4.7 Επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ**

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα επεξεργασμένα δεδομένα του γεωραντάρ. Δηλαδή θα παρουσιαστούν αποτελέσματα από την επεξεργασία μίας γραμμής ενδεικτικά. Επιλέχτηκε η γραμμή 04 της περιοχής Α η οποία έχει υποστεί όλη την διαδικασία της επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκε. Στην συνέχεια θα ακολουθήσουν εικόνες με σειρά αντιπροσωπευτική της ροής με την οποία έγινε η επεξεργασία.

Χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα, μιγαδικά χαρακτηριστικά, μέθοδοι ταξινόμησης, οριζόντιες τομές και μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών. Αρχικά εφαρμόζεται φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (Dewow), έτσι ώστε να απομακρυνθεί η επαγωγική συνιστώσα. Στη συνέχεια (εικόνα 4.3) εφαρμόζεται γραμμική και εκθετική ενίσχυση (Sec) κατά την οποία αναπληρώνεται η ενέργεια των σημάτων από απώλειες.

Επιπρόσθετα εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background Noise Removal) (εικόνα 4.4) για να εξαλειφθούν περιθλώμενα κύματα τα οποία προέρχονται από μεταλλικές κατασκευές, ηλεκτροφόρα καλώδια και σωλήνες που βρίσκονταν κοντά στις γραμμές μετρήσεων.

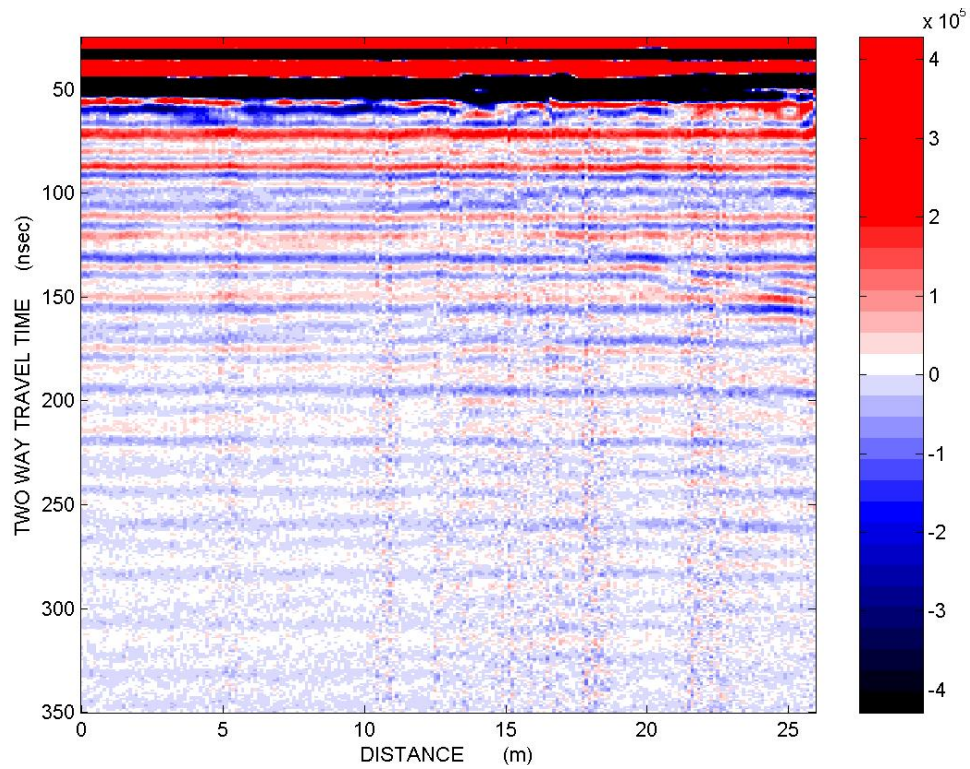
Αφού έγινε η επεξεργασία με τη βοήθεια των φίλτρων χρησιμοποιήθηκε μια σειρά από μιγαδικά χαρακτηριστικά. Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά χωρίζονται ανά 2 σε 3 ομάδες:

- Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB (εικόνες 4.5, 4.6)
- Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα (εικόνες 4.7, 4.8)
- Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης (εικόνες 4.9, 4.10)

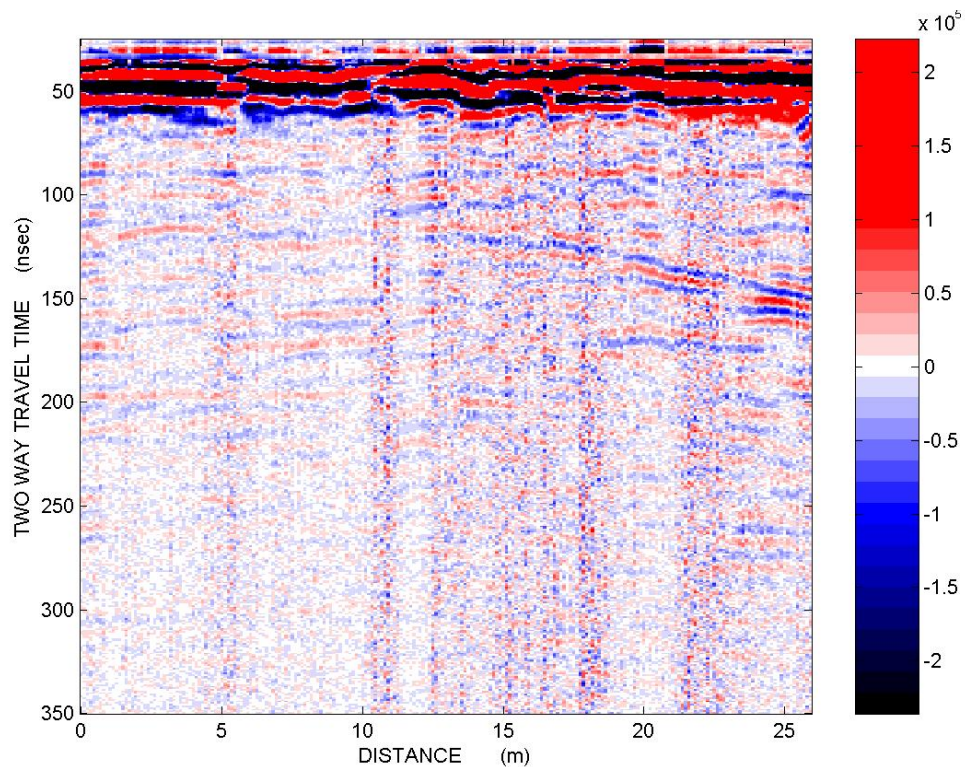
Έπειτα πραγματοποιείται μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών σε κάθε ζευγάρι ξεχωριστά. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται ο όγκος των δεδομένων και γίνεται συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας..

Στη συνέχεια έγινε ταξινόμηση αρχικά με την αυτόματη μέθοδο ταξινόμησης των K-μέσων τιμών (εικόνα 4.11) κατά την οποία τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 50 ομάδες

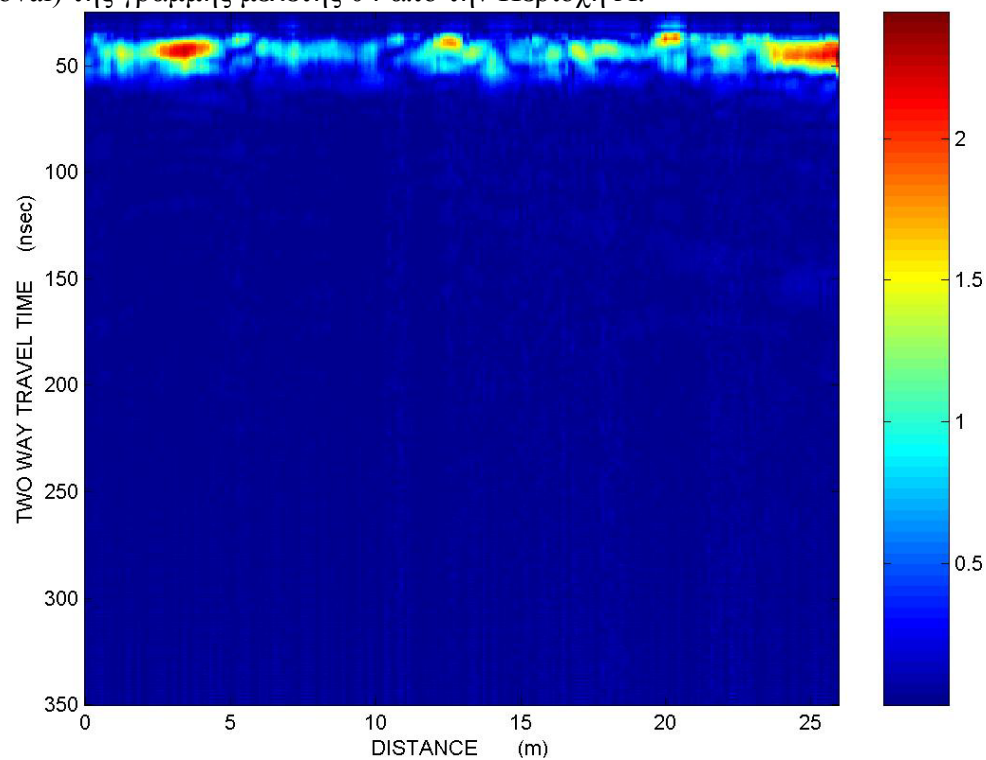
και μετά με τον αλγόριθμο του Kohonen (Self Organizing Maps) (εικόνα 4.12) κατά την οποία τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 20 ομάδες.



**Εικόνα 4.3:** Εφαρμογή φίλτρου σταθερής ενίσχυσης (Sec) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α, μετά από Devow.

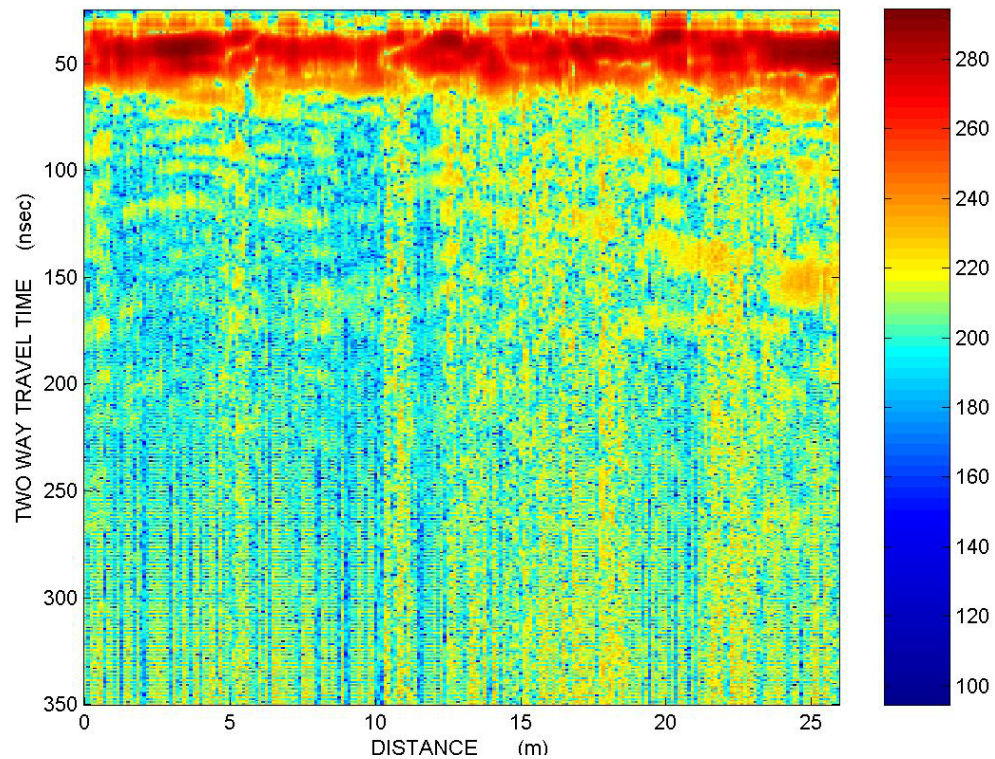


**Εικόνα 4.4:** Εφαρμογή φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background Noise Removal) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α.

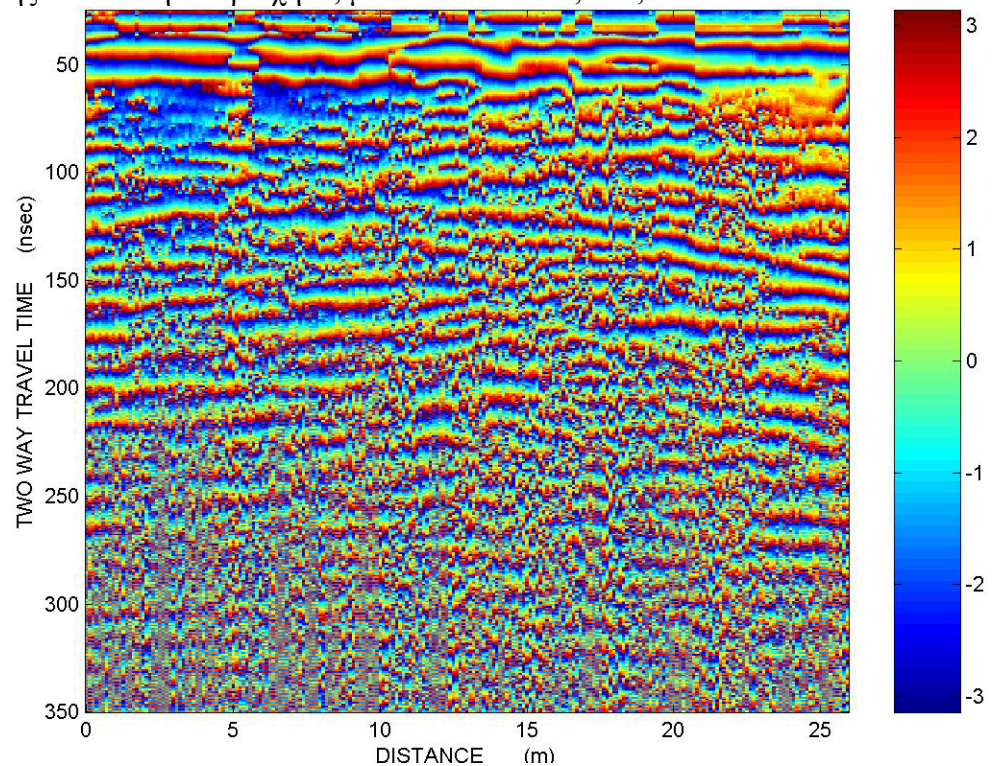


**Εικόνα 4.5:** Στιγμαϊκό πλάτους (Instantaneous Envelope) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α, μετά από Dewow, Sec, Background Noise Removal.



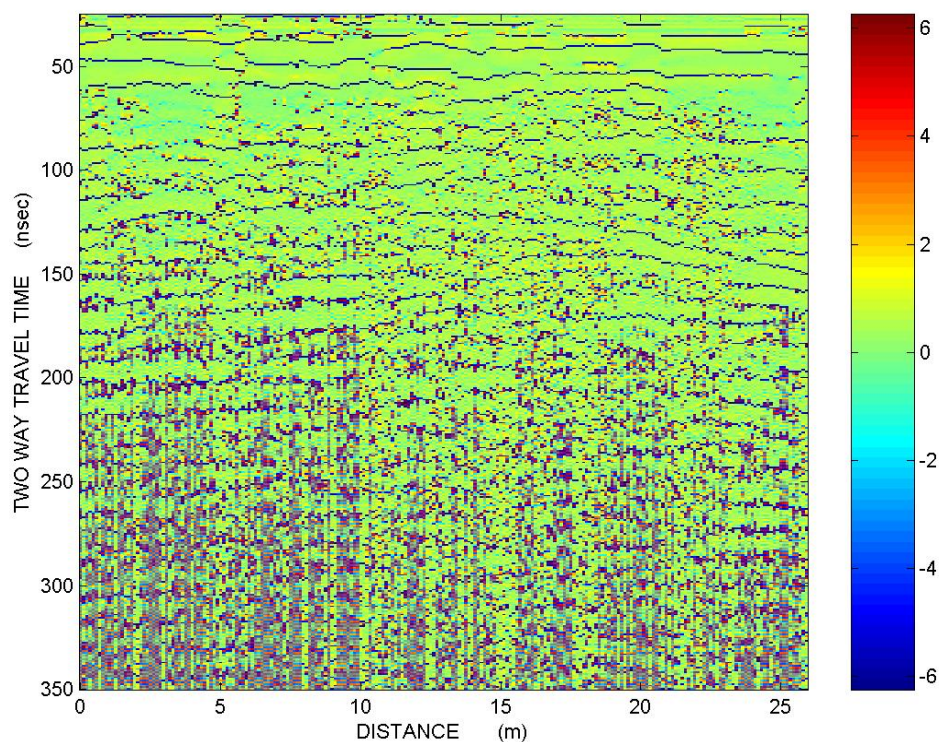


**Εικόνα 4.6:** Στιγμιαίο πλάτους σε κλίμακα dB (dB Instantaneous Envelope) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α, μετά από Dewow, Sec, Background Noise Removal.

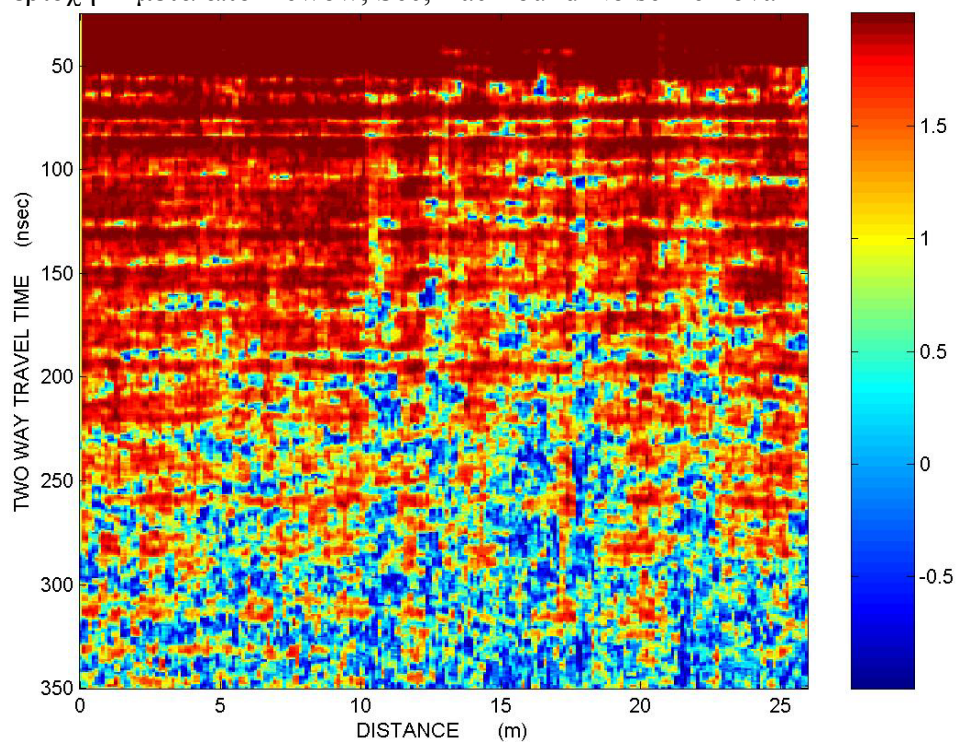


**Εικόνα 4.7:** Στιγμιαία φάση (instantaneous phase) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α μετά από Dewow, Sec, Background Noise Removal.



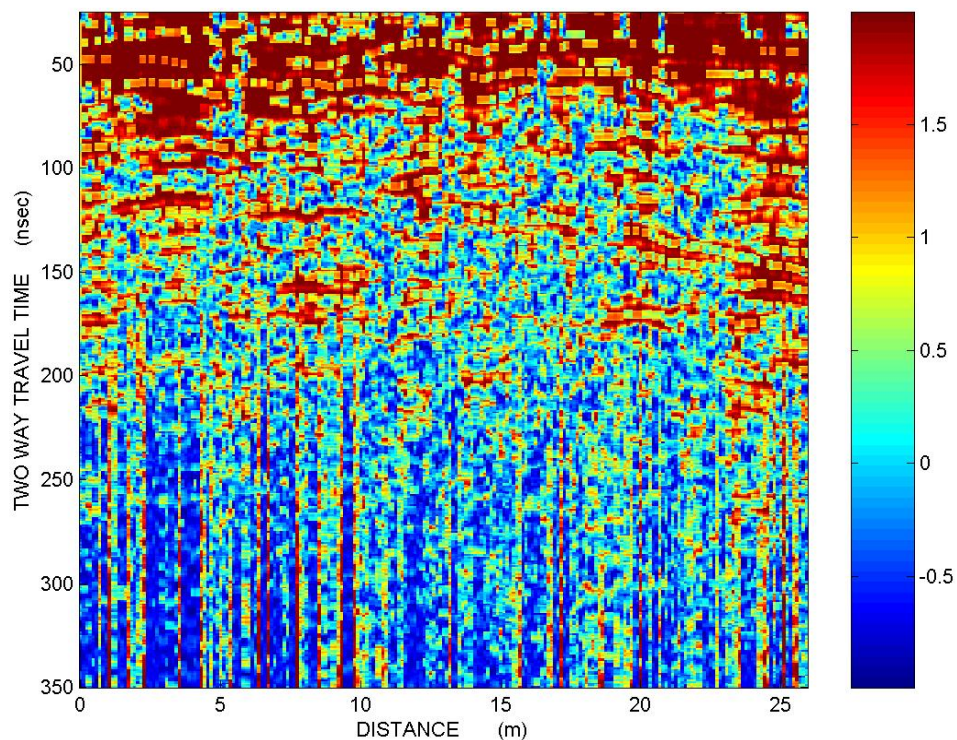


**Εικόνα 4.8 :** Στιγμαία συχνότητα (instantaneous frequency) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α μετά από Dewow, Sec, Background Noise Removal

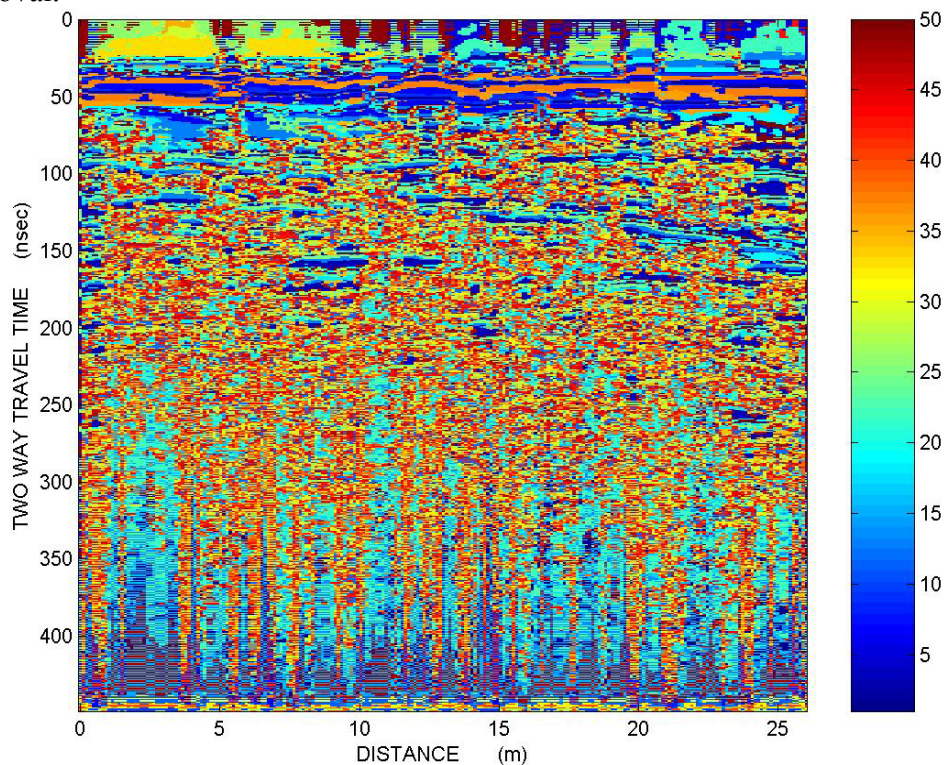


**Εικόνα 4.9:** Συνάφειας (semblance) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α μετά από Dewow, Sec.

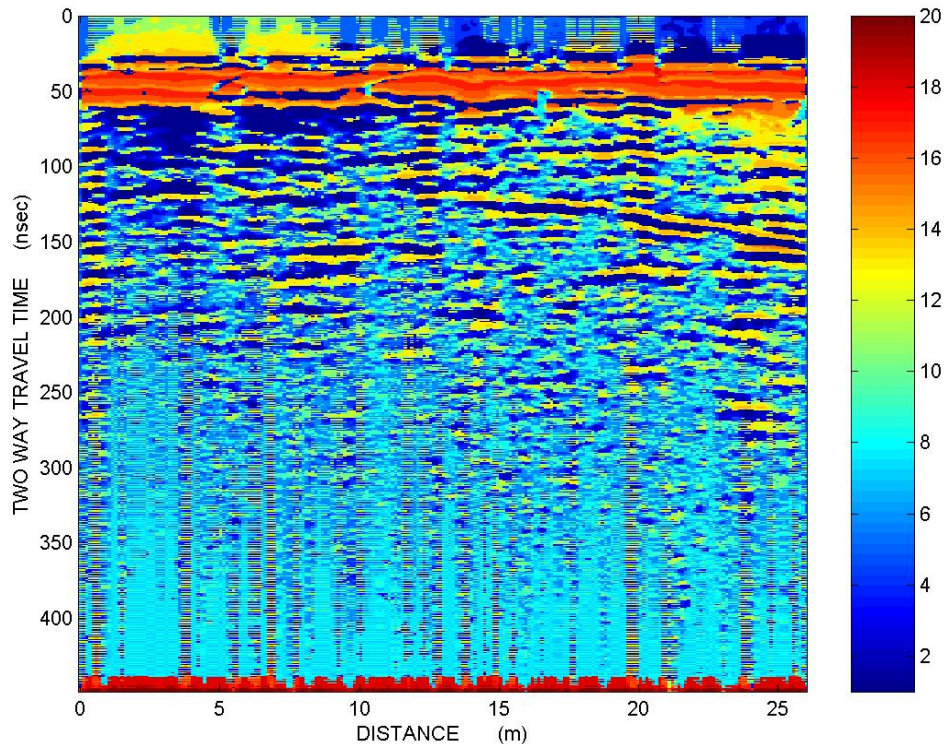




**Εικόνα 4.10:** Συνάφεια της στιγμιαίας φάσης (semblance of instantaneous phase) της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α μετά από Dewow, Sec, Background Noise Removal.



**Εικόνα 4.11:** Εικόνα αυτόματης ταξινόμησης (K - means) σε 50 τάξεις της γραμμής μελέτης 04 από την Περιοχή Α.



**Εικόνα 4.12:** Εικόνα αυτο-οργάνωσης (SOM) σε 20 τάξεις της γραμμής 04 από την Περιοχή Α.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Ερμηνεία εικόνων γεωραντάρ και συνδυασμός γεωφυσικών μεθόδων

#### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τομές γεωραντάρ και συνδυασμός τομών γεωραντάρ με αποτελέσματα άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Σκοπός του συνδυασμού των διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων είναι η πιο έγκυρη ερμηνεία των δεδομένων γεωραντάρ. Παρακάτω παρουσιάζονται επιλεγμένες γεωφυσικές τομές και υπερθέσεις ώστε να προκύψουν συμπεράσματα ως προς την γεωλογία του υπεδάφους και τις θέσεις της πιθανής ρύπανσης.

Παρόλο που κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε επεξεργασία που αφορούσε και τις έξι περιοχές των διασκοπήσεων τελικά κρίθηκε σωστό να παρατεθούν δεδομένα και συγκρίσεις μόνο για την περιοχή Α.

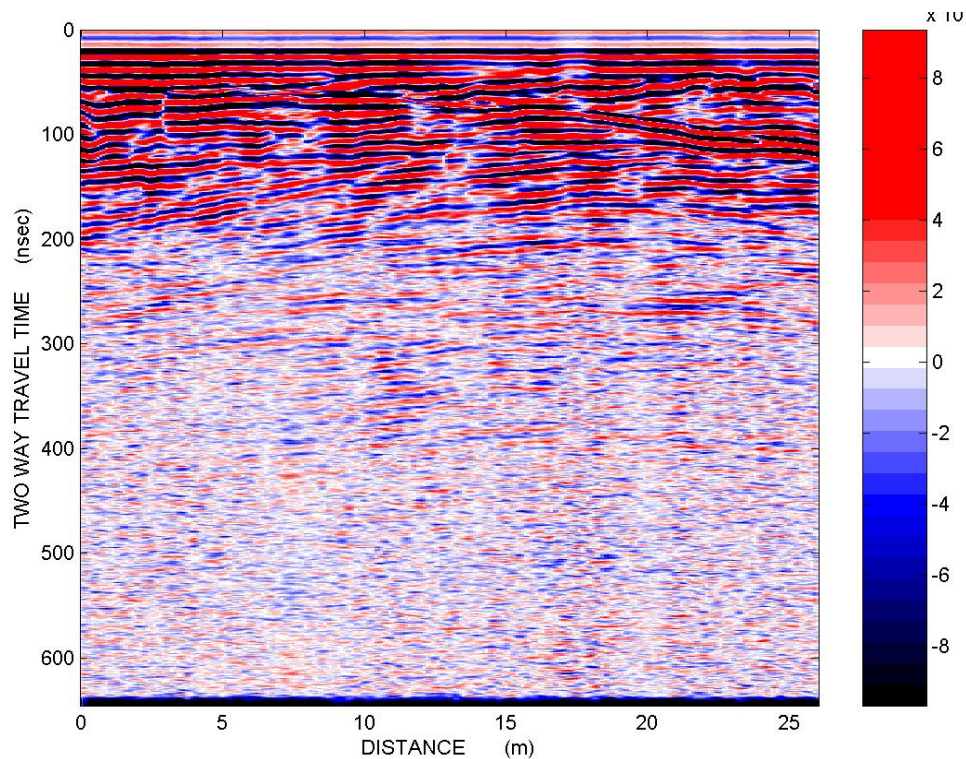
#### 5.2 Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ της περιόδου Ιουλίου 2005 και Νοεμβρίου 2005 και συνδυασμός τους με δεδομένα διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν τομές γεωραντάρ και συνδυασμός τομών γεωραντάρ με διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας των περιόδων Ιουλίου και Νοεμβρίου 2005. Επιπλέον γίνεται σύγκριση των δεδομένων των δύο χρονικών φάσεων.

Οι τομές γεωραντάρ που παρουσιάζονται στη συνέχεια έχουν υποστεί επεξεργασία με φίλτρα denow, σταθερής ενίσχυσης και μέσης τιμής.

Στην τομή γεωραντάρ εικόνας 5.1, η οποία αντιστοιχεί στη γραμμή μελέτης 00 της περιόδου Ιουλίου 2005, παρατηρείται εξασθένηση του σήματος μετά τα 300nsec. Στην τομή αυτή οι ανακλαστήρες που εμφανίζονται πριν από τα 300nsec πιθανώς να οφείλονται στην ανομοιογένεια της αργίλου. Μετά τα 300nsec, πιθανώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε άργιλο. Οι ανακλαστήρες εμφανίζουν διαφορετική υφή στην υπερκείμενη αμμώδη άργιλο σε σχέση με τη υποκείμενη ιλυώδη άργιλο.

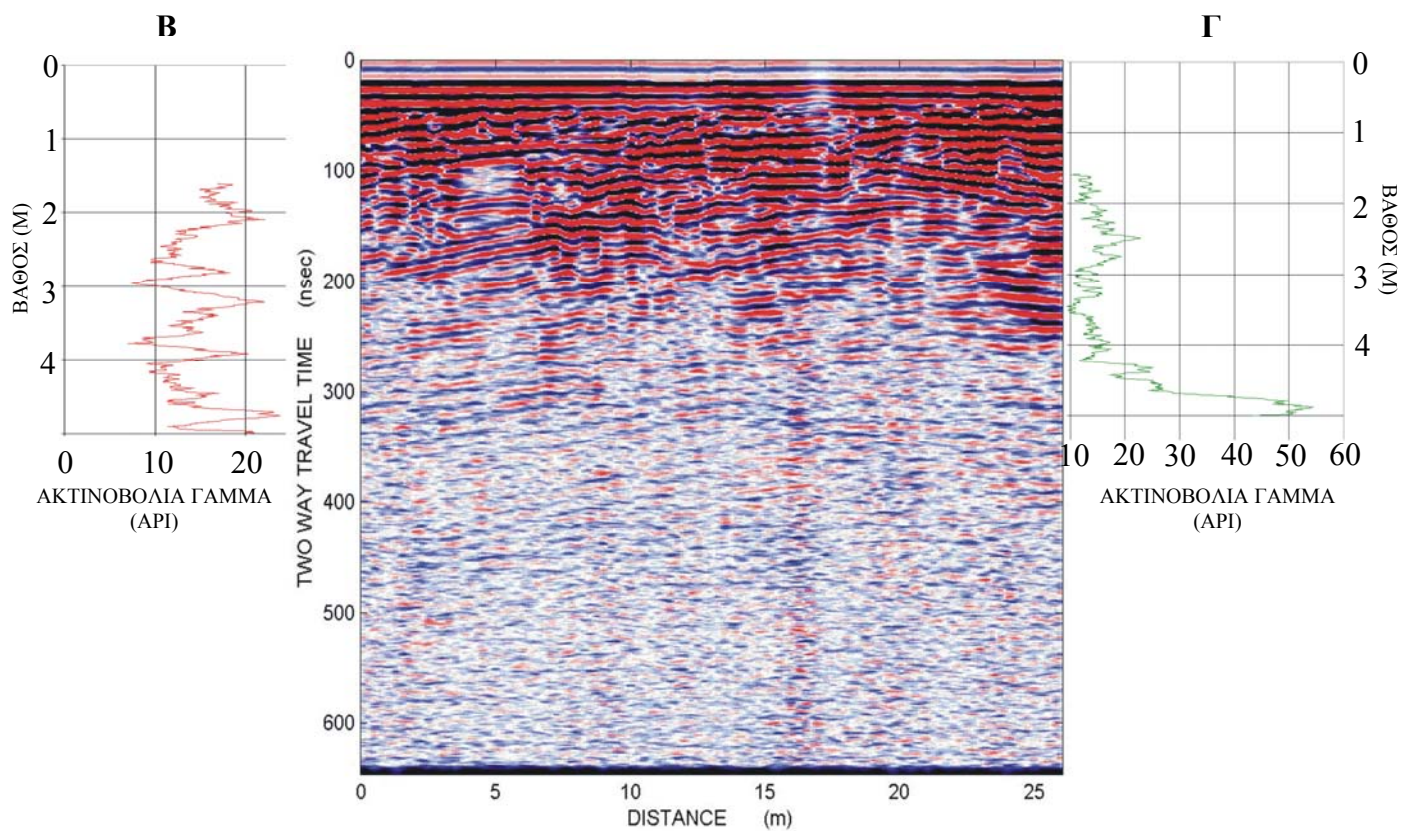




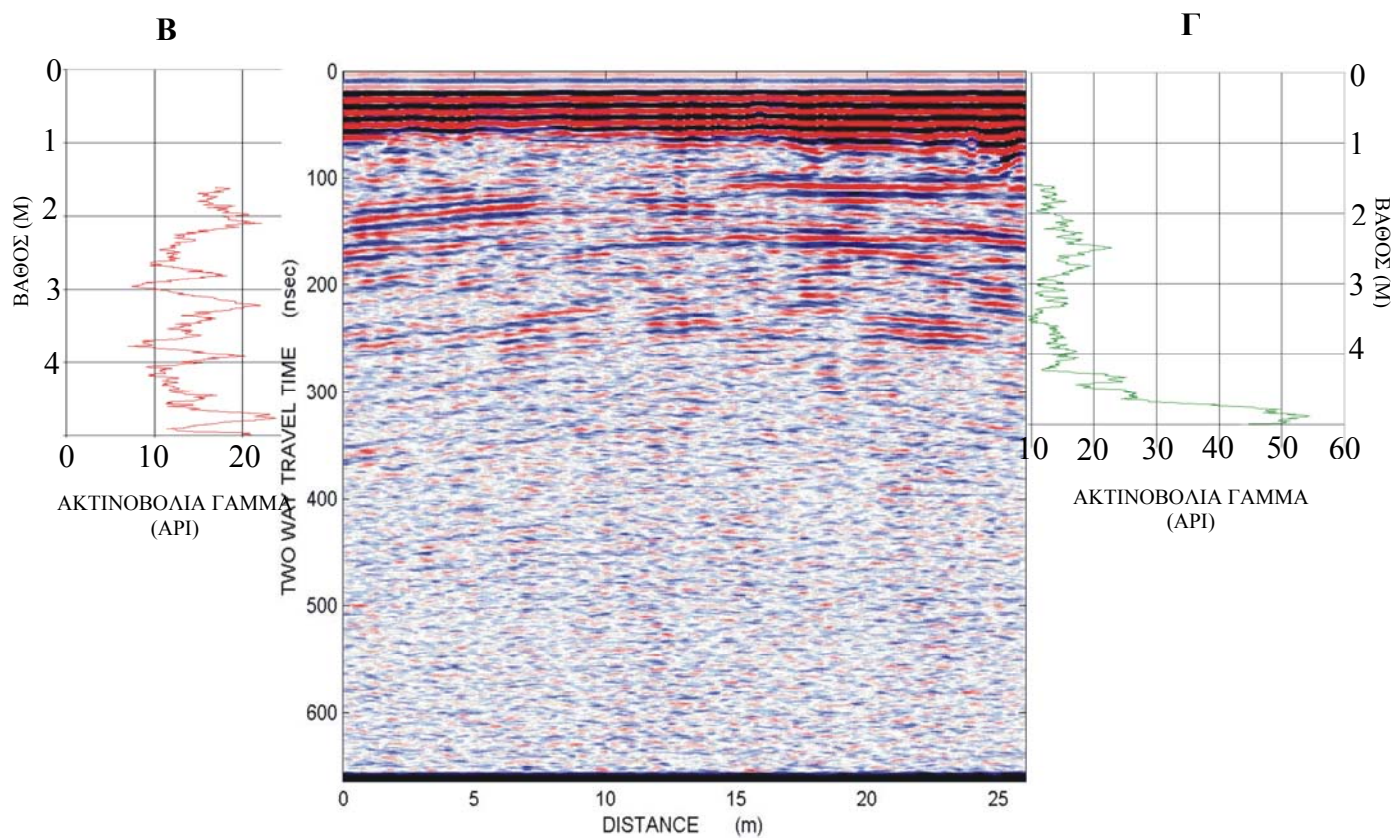
**Εικόνα 5.1:** Τομή γεωραντάρ 00, Ιουλίου 2005. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο η απόσταση σε μέτρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τομές γεωραντάρ της περιόδου Ιουλίου 2005 σε συνδυασμό με αντίστοιχα δεδομένα διαγραφιών των γεωτρήσεων. Η γραμμή μελέτης 02 παρουσιάζεται σε συνδυασμό με τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας των γεωτρήσεων Β και Γ (εικόνα 5.2). Η γραμμή μελέτης 10 και η γραμμή μελέτης 18 παρουσιάζονται σε συνδυασμό με τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας των γεωτρήσεων Β και Γ (εικόνα 5.3 και 5.4 αντίστοιχα). Η γραμμή μελέτης 18 παρουσιάζεται σε συνδυασμό με τη διαγραφή φυσικής ραδιενέργειας της γεώτρησης Α (εικόνα 5.4).

Στις παραπάνω τομές γεωραντάρ παρατηρείται ότι οι ανακλαστήρες που εμφανίζονται συνδέονται με δεδομένα των διαγραφιών. Πιο συγκεκριμένα, στις τομές του γεωραντάρ και στις διαγραφίες, στους ίδιους περίπου χρόνους καταγραφής, εμφανίζεται μια σειρά ανακλαστήρων και παράλληλα απότομη μεταβολή της φυσικής ραδιενέργειας, αντίστοιχα.

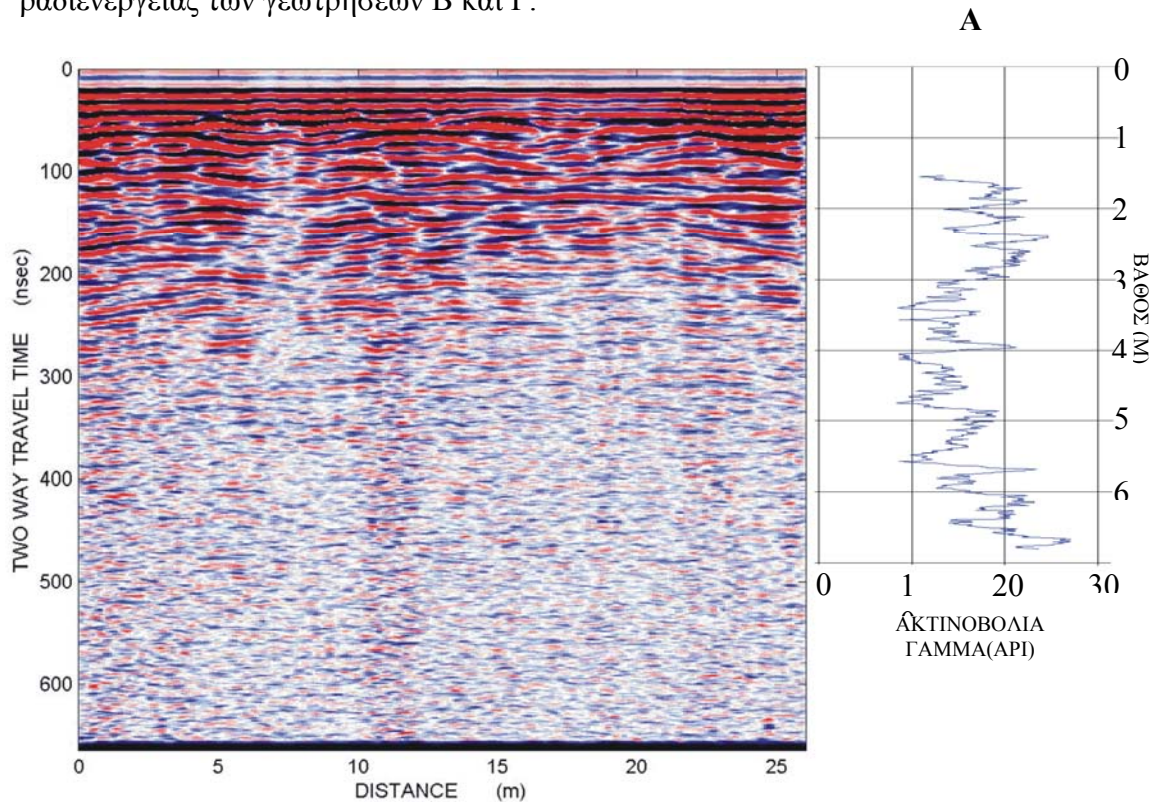


**Εικόνα 5.2:** Παράθεση τομής γεωραντάρ 02, Ιουλίου 2005, με τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργεια των γεωτρήσεων Β και Γ.



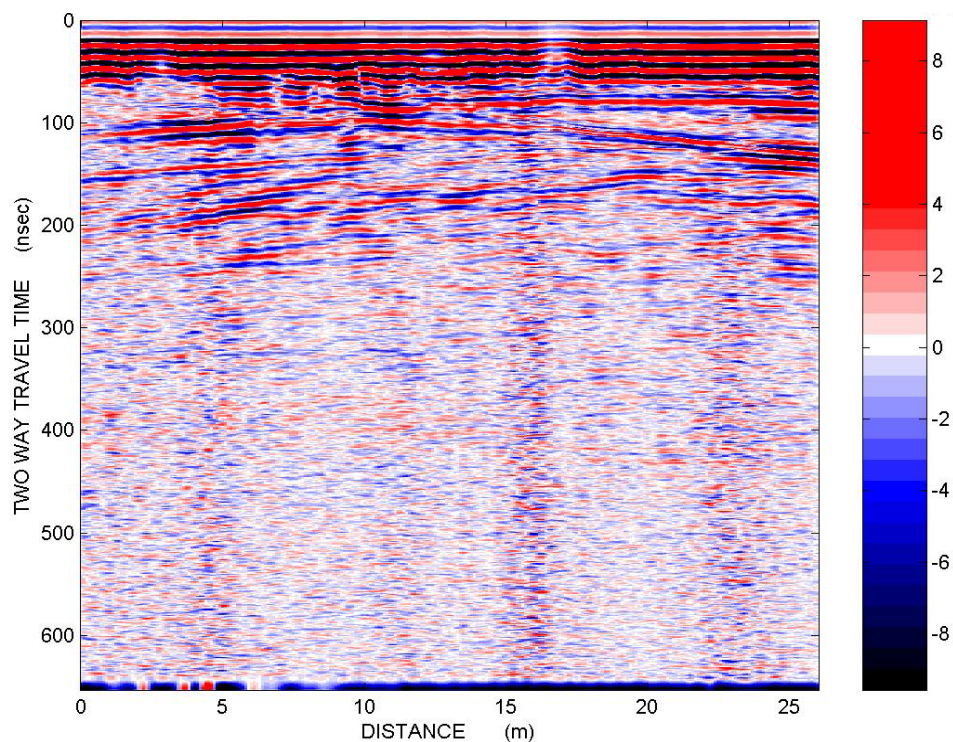


**Εικόνα 5.3:** Παράθεση τομής γεωραντάρ 10, Ιουλίου 2005, με τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας των γεωτρήσεων Β και Γ.

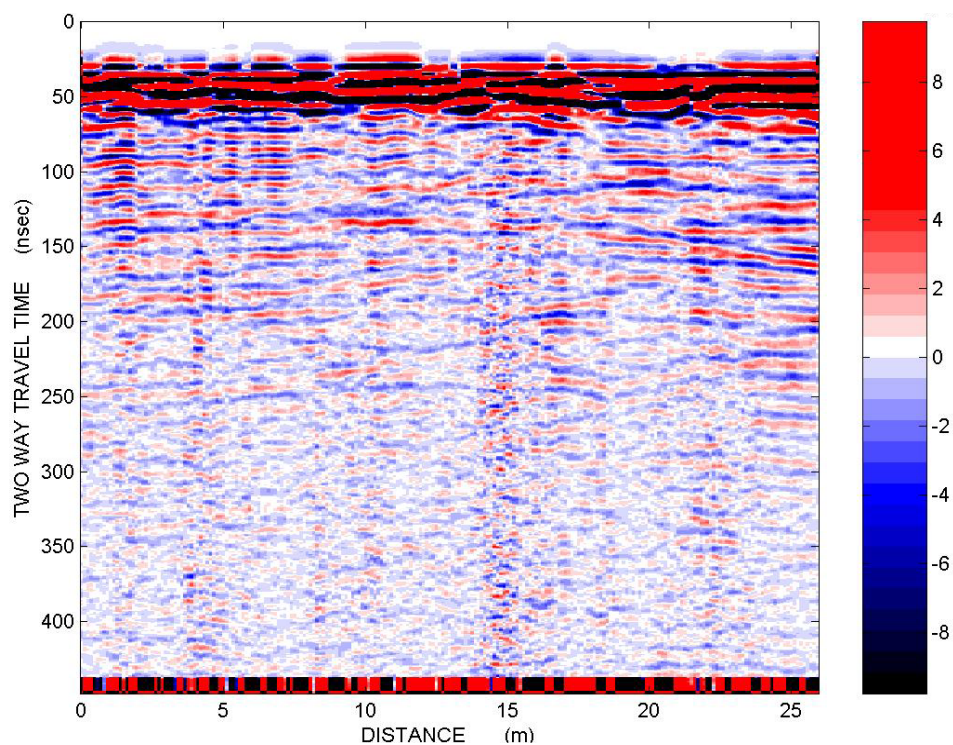


**Εικόνα 5.4:** Παράθεση τομής γεωραντάρ 18 ,Ιουλίου 2005, με τη διαγραφή φυσικής ραδιενέργειας της γεώτρησης Α.

Οι εικόνες 5.5 και 5.6 που ακολουθούν είναι τομές γεωραντάρ της ίδιας γραμμής μελέτης (γραμμή 06), διαφορετικής περιόδου διασκόπησης. Η τομή γεωραντάρ της εικόνας 5.5 είναι της περιόδου Ιουλίου 2005 και η τομή γεωραντάρ της εικόνας 5.6 είναι της περιόδου Νοεμβρίου 2005. Παρατηρείται ότι οι ανακλαστήρες που εμφανίζονται και στις δύο τομές σχετίζονται με αντίστοιχες εναλλαγές των γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι αποτελούνται από ιλυώδη άργιλο, χαλίκια και άμμους. Οι όποιες διαφορές τους, ίσως να οφείλονται στο ότι η περίοδος των μετρήσεων του Νοεμβρίου του 2005 ήταν ακριβώς μετά από πολύ ισχυρές βροχοπτώσεις στην περιοχή. Οι διαφοροποιήσεις στις γραμμές μελέτης 00 και 02 πιθανώς να οφείλονται σε σωληνώσεις που τοποθετήθηκαν στις γεωτρήσεις Β και Γ μετά την πρώτη περίοδο μετρήσεων.



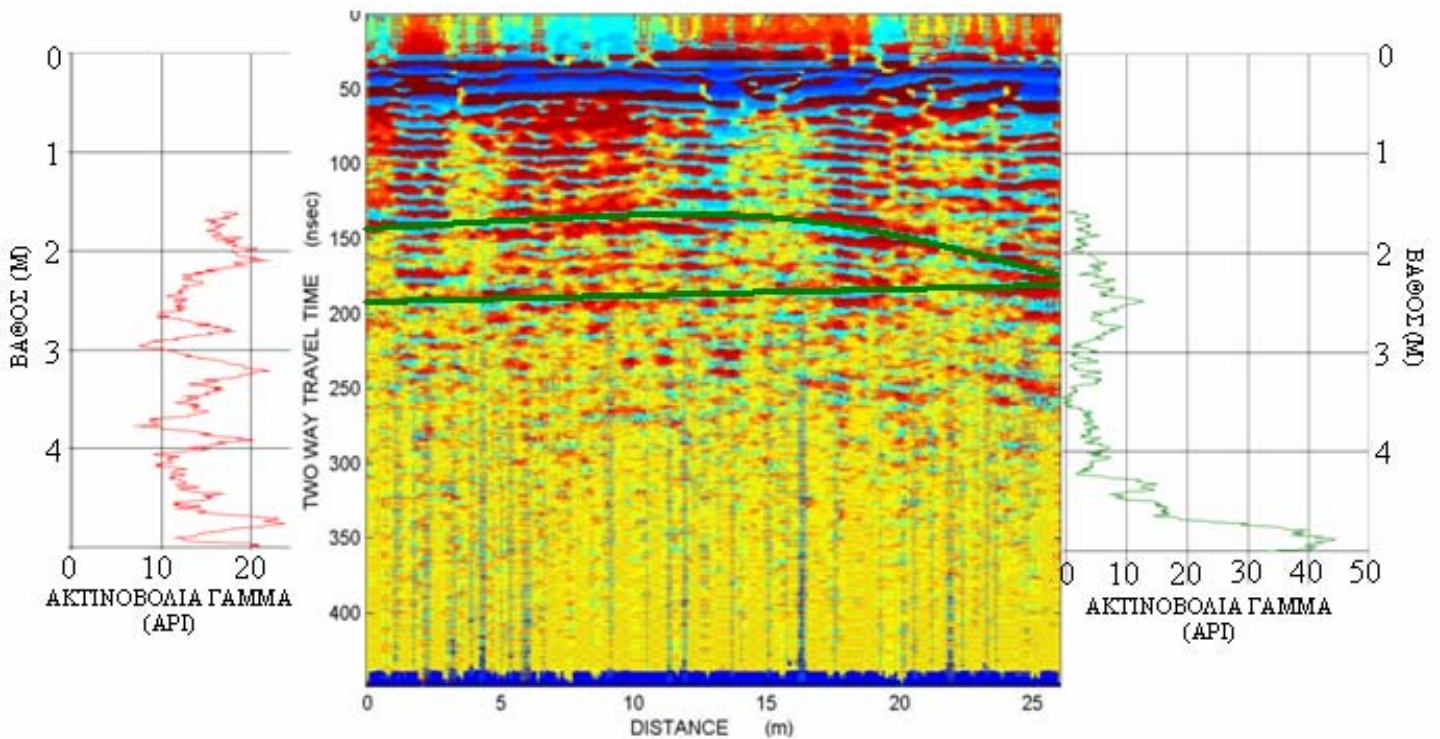
**Εικόνα 5.5:** Τομή γεωραντάρ 06, Ιουλίου 2005. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο η απόσταση σε μέτρα.



**Εικόνα 5.6:** Τομή γεωραντάρ 06, Νοεμβρίου 2005. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο η απόσταση σε μέτρα.



Τέλος, παρουσιάζεται μια ταξινομημένη τομή γεωραντάρ (εικόνα 5.7) της περιόδου Νοέμβριου 2005 σε παράθεση με τις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας των γεωτρήσεων Β και Γ. Σε αυτή την εικόνα παρατηρείται ότι οι απότομες μεταβολές της φυσικής ραδιενέργειας των διαγραφιών συμπίπτουν με σειρές ανακλαστήρων στην τομή του γεωραντάρ.



**Εικόνα 5.7:** Ταξινομημένη τομή γεωραντάρ 08 Νοεμβρίου 2005 και διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας των γεωτρήσεων Β και Γ.

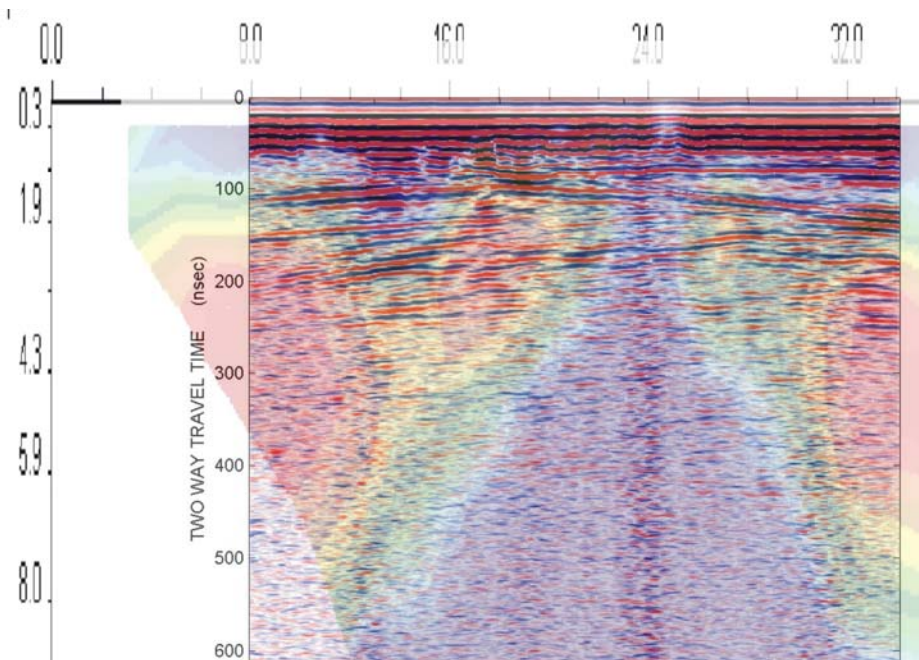
### 5.3 Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ σε συνδυασμό με δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας

Στην ενότητα που ακολουθεί θα παρουσιαστούν υπερθέσεις τομών γεωραντάρ με γεωηλεκτρικές τομές και στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των υπερθέσεων των δύο περιόδων.

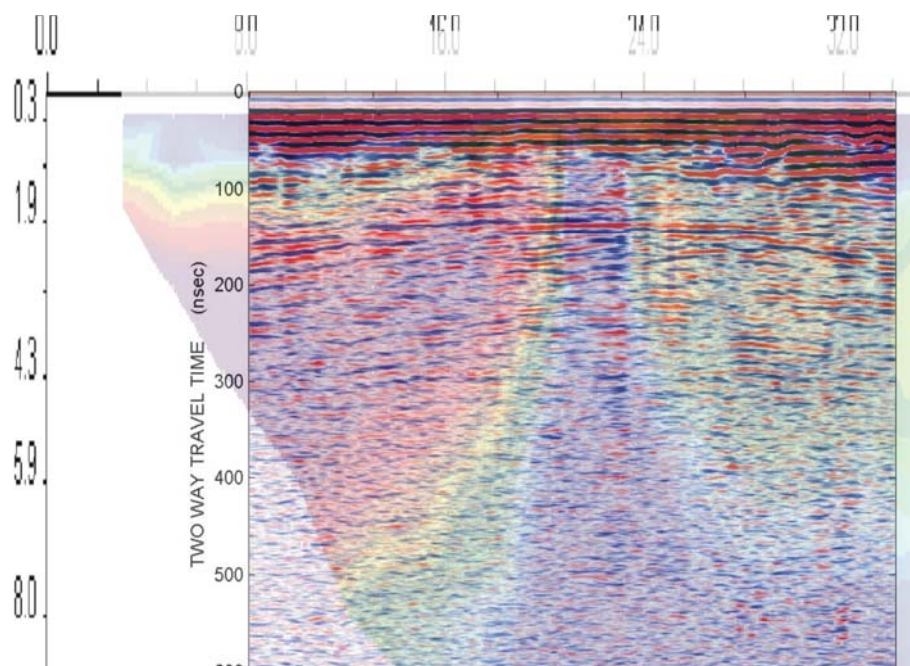
Στις εικόνες 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται υπερθέσεις τομών γεωραντάρ και γεωηλεκτρικών τομών στις γραμμές μελέτης 06 και 14 της περιόδου Ιουλίου 2005. Παρατηρώντας τις δύο αυτές εικόνες φαίνεται ότι στις τομές του γεωραντάρ σε σημεία όπου υπάρχουν ανακλαστήρες παρατηρούνται αντίστοιχα εναλλαγές χαμηλών και



υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι υπερθέσεις αυτές είναι οι πιο χαρακτηριστικές της σύμπτωσης των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Χαρακτηριστική είναι η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η εξασθένηση των ανακλάσεων του γεωραντάρ στην εικόνα 5.8 στα 24m περίπου από την αρχή της γραμμής μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας.



**Εικόνα 5.8:** Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή μελέτης 06, Ιουλίου 2005.

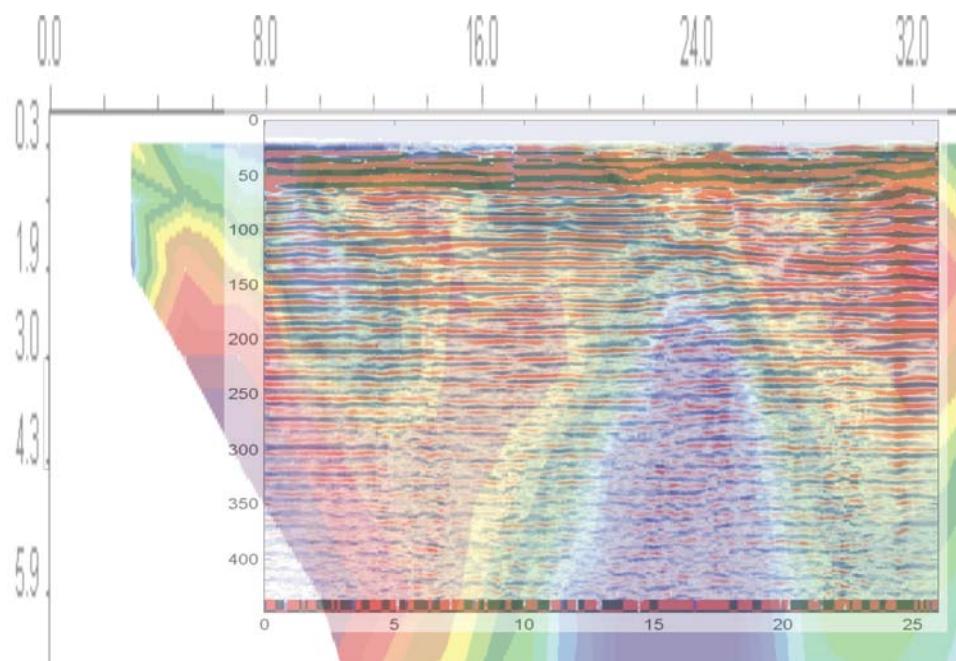


**Εικόνα 5.9:** Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή μελέτης 14, Ιουλίου 2005.

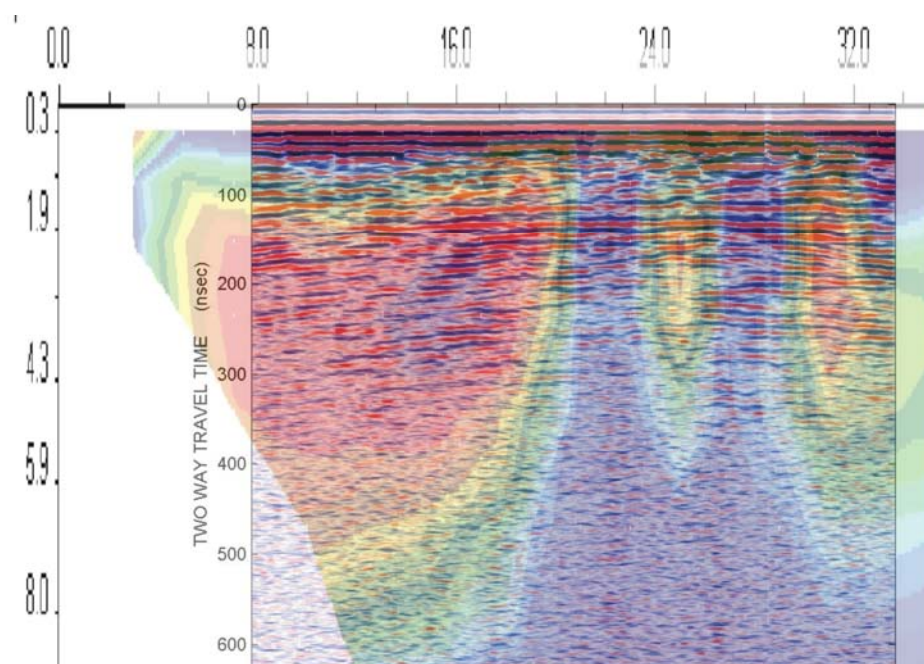
Στη συνέχεια ακολουθούν οι εικόνες 5.10, 5.11 και 5.12 οι οποίες απεικονίζουν υπερθέσεις τομών γεωραντάρ με γεωηλεκτρικές τομές. Η πρώτη υπέρθεση αναφέρεται στην γραμμή μελέτης 02 της περιόδου Νοεμβρίου 2005. Στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση δύο υπερθέσεων γεωηλεκτρικών τομών και τομών γεωραντάρ της ίδιας γραμμής μελέτης αλλά των δύο διαφορετικών περιόδων.

Στην εικόνα 5.10, στις τομές του γεωραντάρ σε σημεία όπου υπάρχουν ανακλαστήρες παρατηρούνται αντίστοιχα εναλλαγές χαμηλών και υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας.

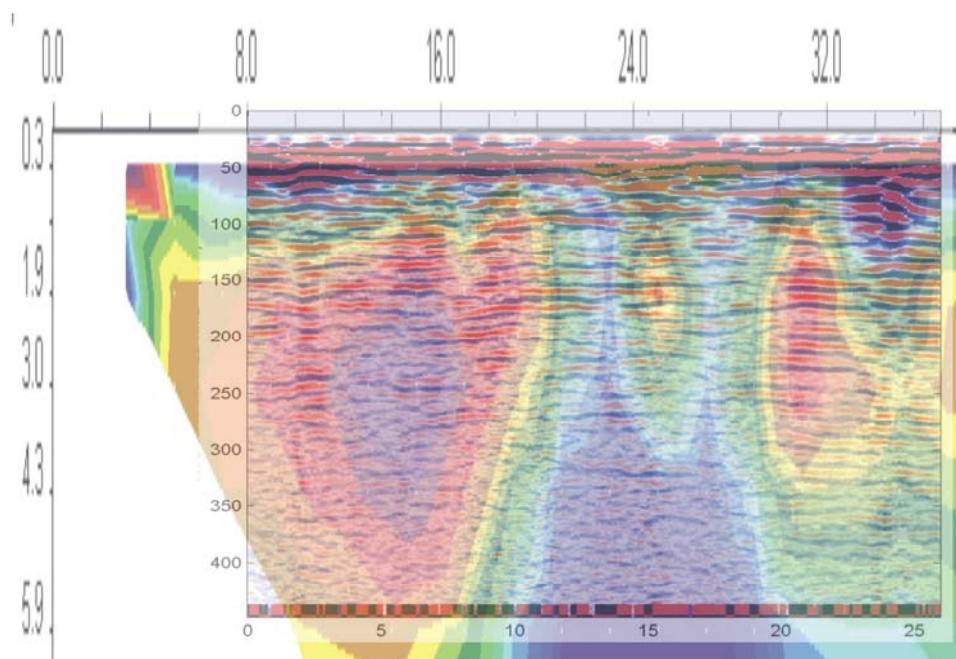
Στις εικόνες 5.11 και 5.12 παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία όχι μόνο ανάμεσα στα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ αλλά και ανάμεσα στα δεδομένα υπέρθεσης των δύο χρονικών φάσεων. Στις γεωηλεκτρικές τομές εμφανίζεται μια ζώνη χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία συμφωνεί με την αντίστοιχη εξασθένηση των καταγραφών του γεωραντάρ, γεγονός που επιδεικνύει την αυξημένη αργιλότητα.



**Εικόνα 5.10:** Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή μελέτης 02, Νοεμβρίου 2005.



**Εικόνα 5.11:** Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή μελέτης 16, Ιουλίου 2005.



**Εικόνα 5.12:** Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή μελέτης 16, Νοεμβρίου 2005.

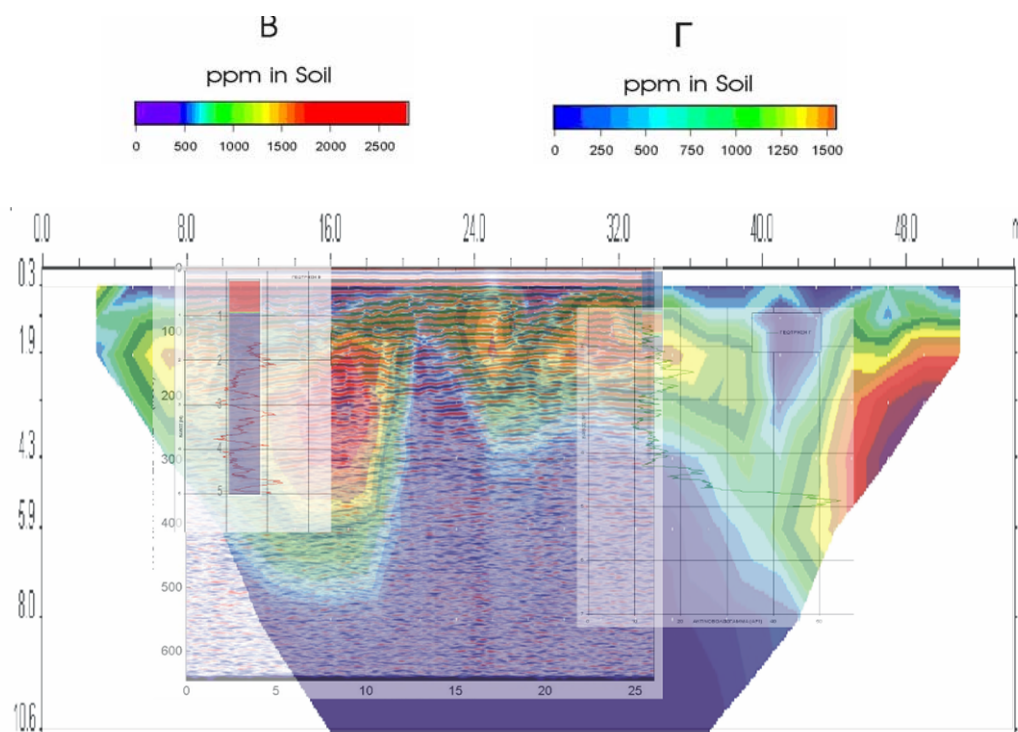
#### **5.4 Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ σε συνδυασμό με δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας, διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας και χημικών αναλύσεων**

Τέλος παρουσιάζονται δύο υπερθέσεις τομών γεωηλεκτρικής τομογραφίας με τομές γεωραντάρ με παράθεση διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας και αποτελέσματα χημικών αναλύσεων από τις γεωτρήσεις Β και Γ στην γραμμή μελέτης 02 (Εικόνα 5.13) και από την γεώτρησης Α στην γραμμή μελέτης 18 (Εικόνα 5.14).

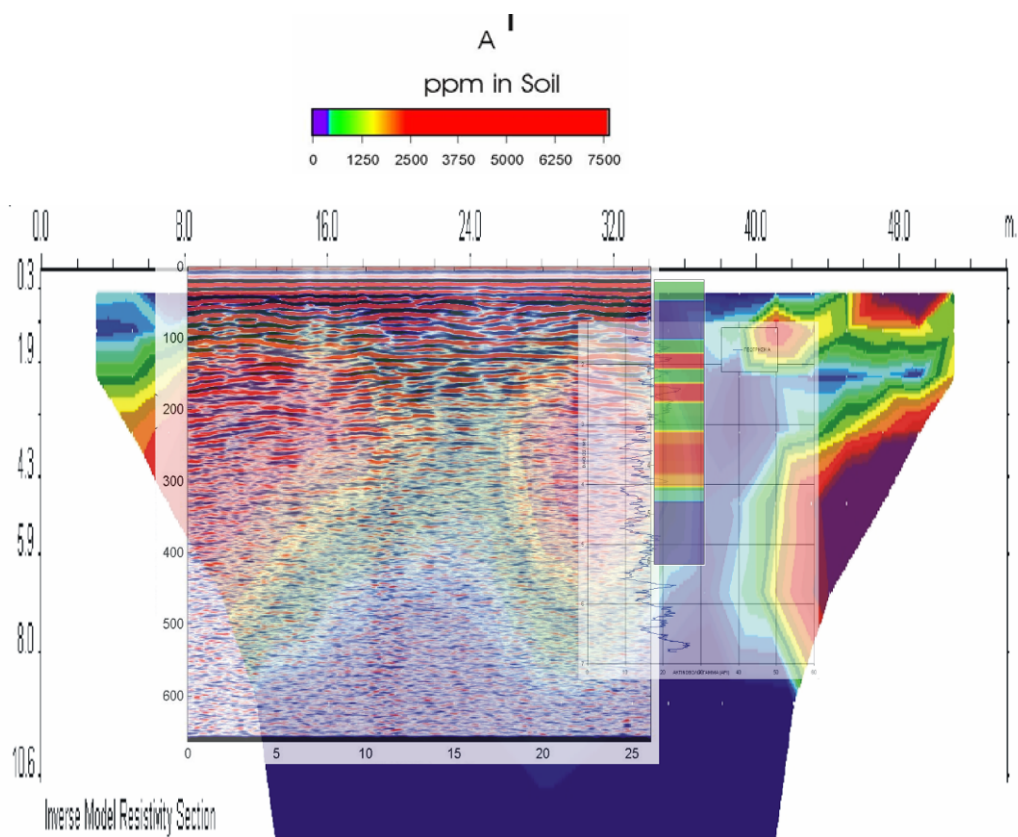
Στην εικόνα 5.13 στις γεωτρήσεις Β και Γ, παρατηρείται χαρακτηριστική διπλή απότομη μεταβολή της φυσικής ραδιενέργειας στις διαγραφίες, το οποίο συμπίπτει με την εμφάνιση μίας σειράς ανακλαστήρων στην γραμμή μελέτης 02 του γεωραντάρ σε χρόνους καταγραφής περίπου 200 nsec. Στις γεωτρήσεις Β και Γ, σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις, η ρύπανση των εδαφών περιορίζεται σε βάθη μικρότερα των 1.5. Σε αυτό το βάθος η ειδική ηλεκτρική αντίσταση έχει σχετικά χαμηλές τιμές. Η ρύπανση από πετρελαιοειδή παρουσιάζει χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όταν είναι παλαιότερη, εξαιτίας βιοαποδόμησης.



Στην εικόνα 5.14 παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση ρύπανσης (2500-7500 ppm) στη γεώτρηση Α, η οποία συμπίπτει με ζώνη υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων την γεωηλεκτρική τομή 18.



**Εικόνα 5.13:** Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής, τομής γεωραντάρ, διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας και χημικών αναλύσεων των γεωτρήσεων Β και Γ για την γραμμή μελέτης 02, Ιουλίου 2005.



**Εικόνα 5.14:** Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής, τομής γεωραντάρ, διαγραφίας φυσικής ραδιενέργειας και χημικών αναλύσεων της γεώτρησης A για τη γραμμή μελέτης 18, Ιουλίου 2005.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Συμπεράσματα και Προτάσεις

#### 6.1 Συμπεράσματα

Κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν κάποια συμπεράσματα για τον ρόλο της γεωφυσικής μεθόδου του γεωραντάρ σε συνδυασμό με άλλες γεωφυσικές μεθόδους στην απεικόνιση της δομής του υπεδάφους και στην ανίχνευση ρύπανσης.

Ένα από τα αρχικά συμπεράσματα είναι ότι η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων έχει ιδιαίτερη σημασία για την παραγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, έγιναν πολλές δοκιμές για την εύρεση κατάλληλης μεθοδολογίας επεξεργασίας. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν διάφορα φίλτρα και στην συνέχεια διαφορετικές μέθοδοι ταξινόμησης και επιλέχτηκε η καταλληλότερη μεθοδολογία επεξεργασίας. Οι εικόνες που παράχθηκαν τονίζουν ανωμαλίες που δεν διακρίνονται καθαρά στις ανεπεξέργαστες εικόνες, γεγονός το οποίο δείχνει την αποτελεσματικότητα της επιλεγμένης μεθοδολογίας επεξεργασίας. Για παράδειγμα, στη τομή γεωραντάρ 08 (Νοεμβρίου 2005) η ταξινόμηση τόνισε δύο κύριους ανακλαστήρες, από τους οποίους μόνο ο ένας διακρίνεται στα μη ταξινομημένα δεδομένα.

Με το συνδυασμό των διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων ανακτώνται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες αυτές.

Η γενική αξιολόγηση της γεωλογικής δομής και της έκτασης της ρύπανσης έγινε με βάση το δίκτυο γεωτρήσεων που υπήρχε στην περιοχή. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των γεωτρήσεων είναι πιο αξιόπιστα μεν αλλά είναι σημειακά. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση των επιφανειακών γεωφυσικών μεθόδων.

Η μέθοδος του γεωραντάρ εντόπισε εναλλαγές λεπτών εδαφικών στρωμάτων διαφορετικής αργιλότητας στο επιφανειακό αργιλικό στρώμα.

Ο συνδυασμός γεωηλεκτρικών τομών και τομών γεωραντάρ έδειξε ότι οι εναλλαγές χαμηλών και υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συνδέονται με ανακλαστήρες σε αντίστοιχα βάθη.

Παρατηρείται ότι στον συνδυασμό τομών γεωραντάρ και διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας οι ανακλαστήρες στις τομές του γεωραντάρ συμπίπτουν με διπλή ανωμαλία στις διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας.

Συγκρίνοντας τις δύο χρονικές περιόδους γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Οι όποιες διαφορές τους, ίσως να οφείλονται στο ότι η περίοδος των μετρήσεων του Νοεμβρίου του 2005 ήταν ακριβώς μετά από πολύ ισχυρές βροχοπτώσεις στην περιοχή. Οι διαφοροποιήσεις σε κάποιες γραμμές μελέτης πιθανώς να οφείλονται σε σωληνώσεις που τοποθετήθηκαν στις γεωτρήσεις Β και Γ μετά την πρώτη περίοδο μετρήσεων.

Ειδικότερα, στην περιοχή Α παρατηρείται στις γεωτρήσεις Β και Γ χαρακτηριστική διπλή απότομη μεταβολή της φυσικής ραδιενέργειας στις διαγραφίες, πράγμα το οποίο συμπίπτει με την εμφάνιση μίας σειράς ανακλαστήρων στην γραμμή μελέτης 02 του γεωραντάρ (Ιουλίου 2005) σε χρόνους καταγραφής περίπου 200 nsec. Στις γεωτρήσεις Β και Γ, σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις η ρύπανση των εδαφών περιορίζεται σε βάθη μικρότερα των 1.5m. Σε αυτό το βάθος η ειδική ηλεκτρική αντίσταση έχει σχετικά χαμηλές τιμές. Η ρύπανση από πετρελαιοειδή παρουσιάζει χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όταν είναι παλαιότερη, εξαιτίας της βιοαποδόμησης. Στη γεώτρηση Α παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση ρύπανσης (2500-7500 ppm) η οποία συμπίπτει με ζώνη υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στην γεωηλεκτρική τομή 18.

Ο συνδυασμός γεωραντάρ, ηλεκτρικής τομογραφίας, διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας και χημικών αναλύσεων, έδειξε ότι με τις παραπάνω μεθόδους μπορεί η σημειακή πληροφορία των διαγραφιών και χημικών αναλύσεων σε γεωτρήσεις να επεκταθεί με την χρήση γεωφυσικών μεθόδων.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι ο συνδυασμός των γεωφυσικών μεθόδων αλλά και άλλων μη γεωφυσικών μεθόδων επιφέρει πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα και συμπεράσματα σε σχέση με τα συμπεράσματα που επιφέρει η μεμονωμένη ερμηνεία δεδομένων μίας γεωφυσικής μεθόδου.

## 6.2 Προτάσεις

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας αυτής θα ήταν χρήσιμο να παρουσιαστούν κάποιες προτάσεις οι οποίες θα μπορούσαν να βοηθήσουν σε πιθανή περαιτέρω έρευνα των περιοχών οι οποίες ερευνήθηκαν.



Στις περιοχές στις οποίες έχει βρεθεί ρύπανση βάσει γεωτρήσεων θα ήταν πολύ χρήσιμο να διεξάγονται γεωφυσικές διασκοπήσεις για την οριζόντια επέκταση της πληροφορίας.

Επιπρόσθετα μία πρόταση θα ήταν, στις περιοχές στις οποίες υπάρχει μία μόνο γεωφυσική μέθοδος να πραγματοποιηθούν μετρήσεις και με άλλες γεωφυσικές μεθόδους.

Ακόμη για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εικόνας, όσον αφορά στη ζητήματα που ενδιαφέρουν την έρευνα, θα μπορούσαν να κατασκευαστούν τρισδιάστατες εικόνες με βάση τη θέση των διασκοπήσεων και το χρόνο μέτρησης-βάθος σε συνδυασμό με τα δεδομένα μίας γεωφυσικής μεθόδου ή και το συνδυασμό δεδομένων παραπάνω γεωφυσικών μεθόδων.

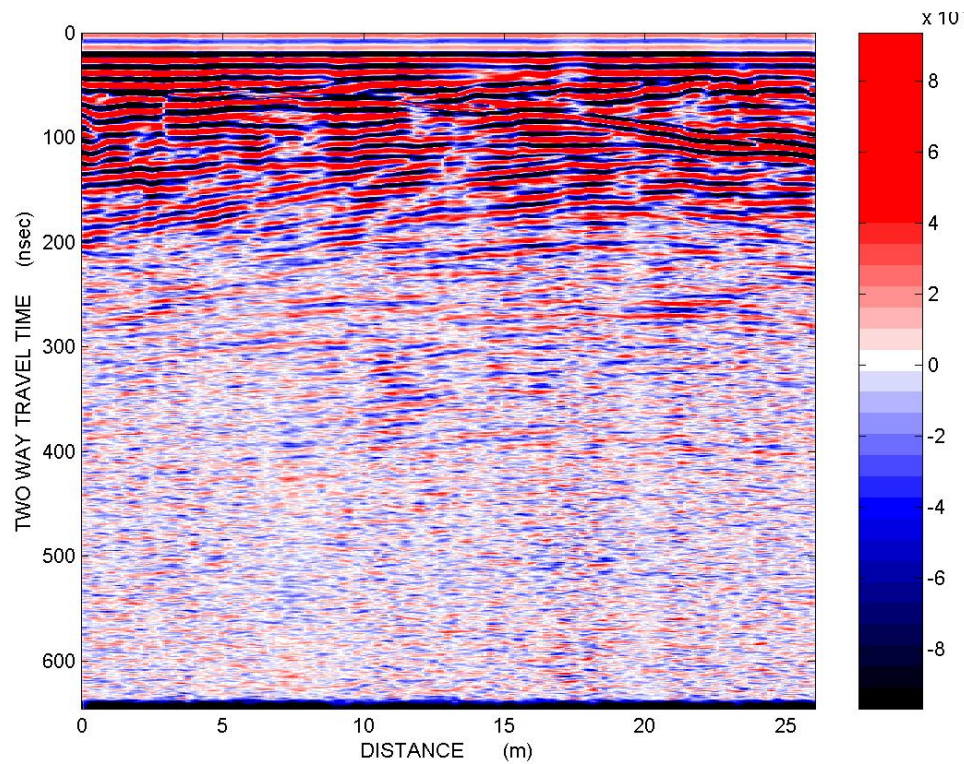
Και τέλος, κάτι το οποίο πρέπει να έχει γίνει ήδη αντιληπτό, η γενική πρόταση για την βέλτιστη εξαγωγή συμπερασμάτων είναι ο συνδυασμός διαφόρων δεδομένων, χρησιμοποιώντας όχι μόνο γεωφυσικές μεθόδους αλλά και άλλες επιστημονικές μεθόδους.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

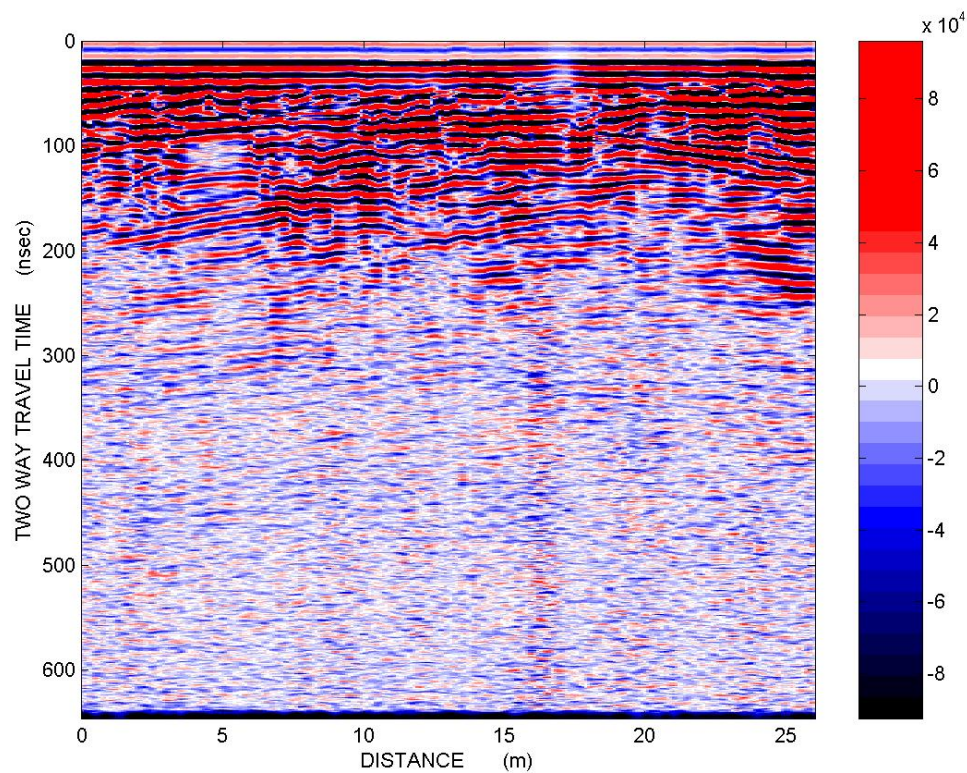
Η δομή του παραρτήματος που ακολουθεί είναι η εξής:

- A.1) Τομές γεωραντάρ της περιόδου Ιουλίου 2005 στην περιοχή Α.
- A.2) Τομές γεωραντάρ της περιόδου Νοεμβρίου 2005 στην περιοχή Α.
- A.3) Υπερθέσεις γεωηλεκτρικών τομών με τομές γεωραντάρ της περιόδου Ιουλίου 2005 στην περιοχή Α.
- A.4) Υπερθέσεις γεωηλεκτρικών τομών με τομές γεωραντάρ της περιόδου Νοεμβρίου 2005 στην περιοχή Α.

**A.1) Τομές γεωραντάρ της περιόδου Ιουλίου 2005 στην περιοχή Α**

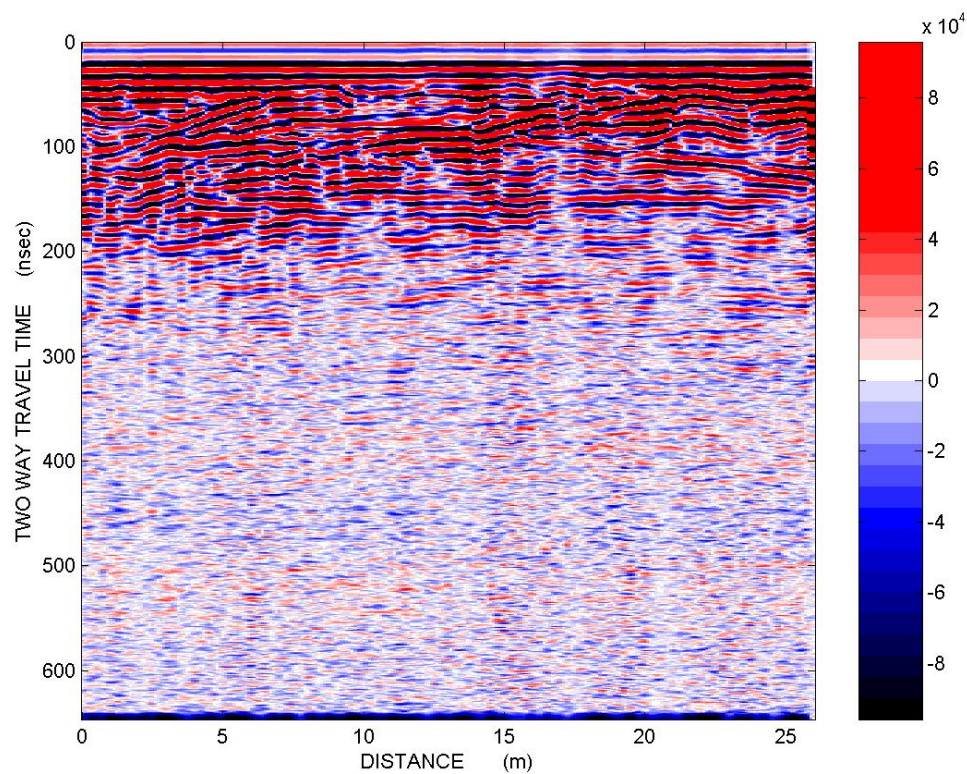


Τομή γεωραντάρ 00. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.

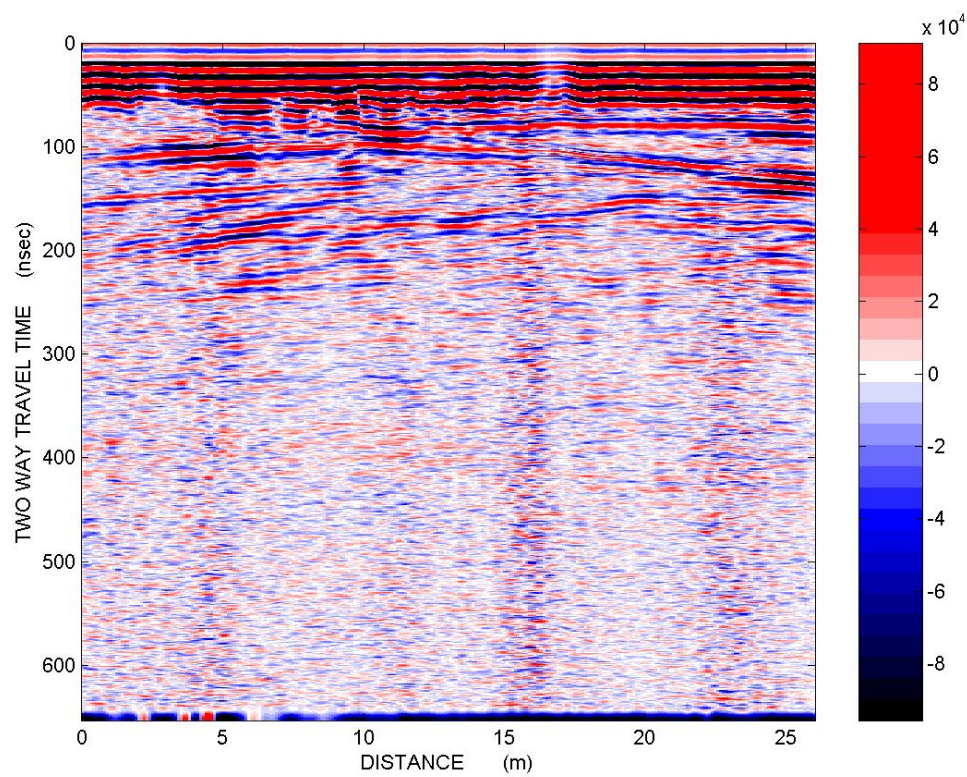


Τομή γεωραντάρ 02. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.



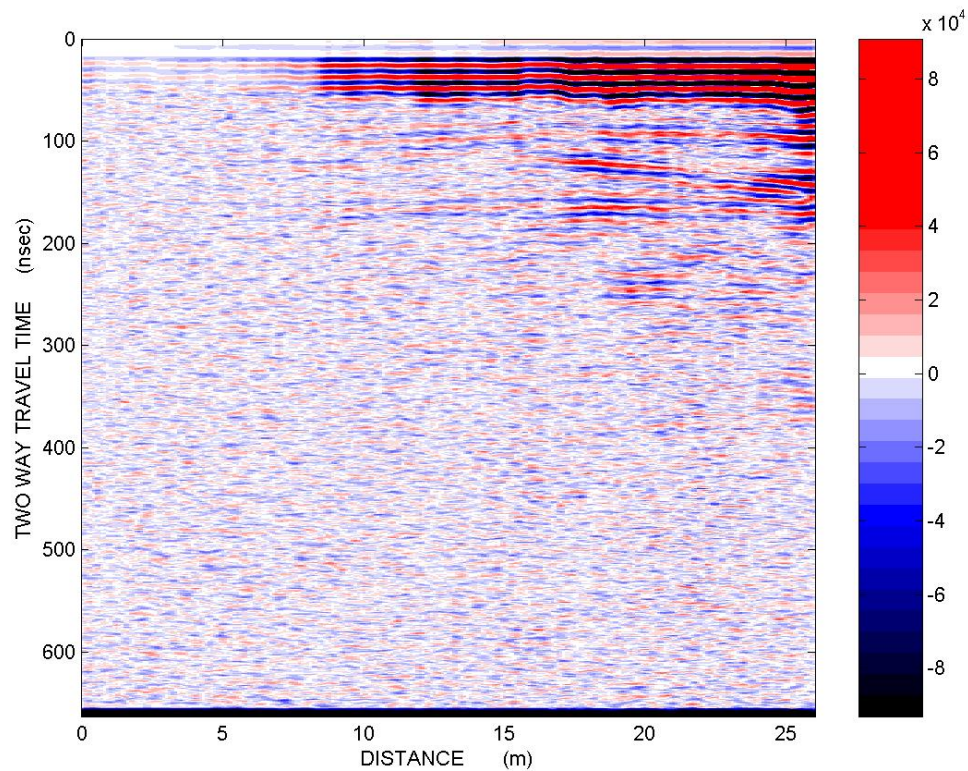


Τομή γεωραντάρ 04. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.

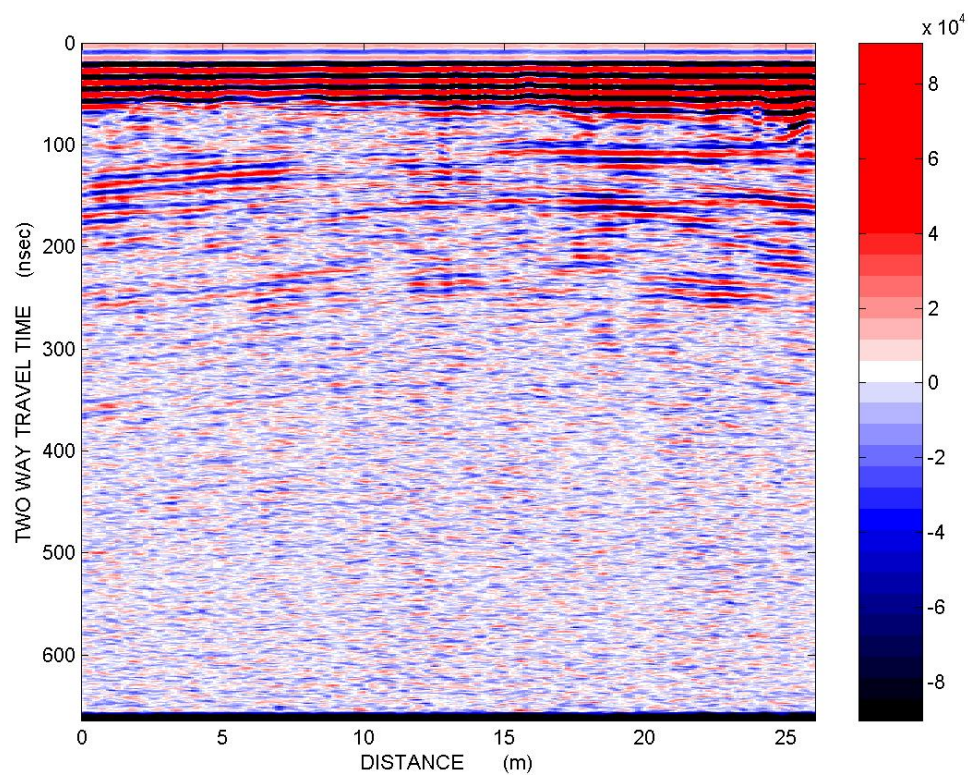


Τομή γεωραντάρ 06. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.



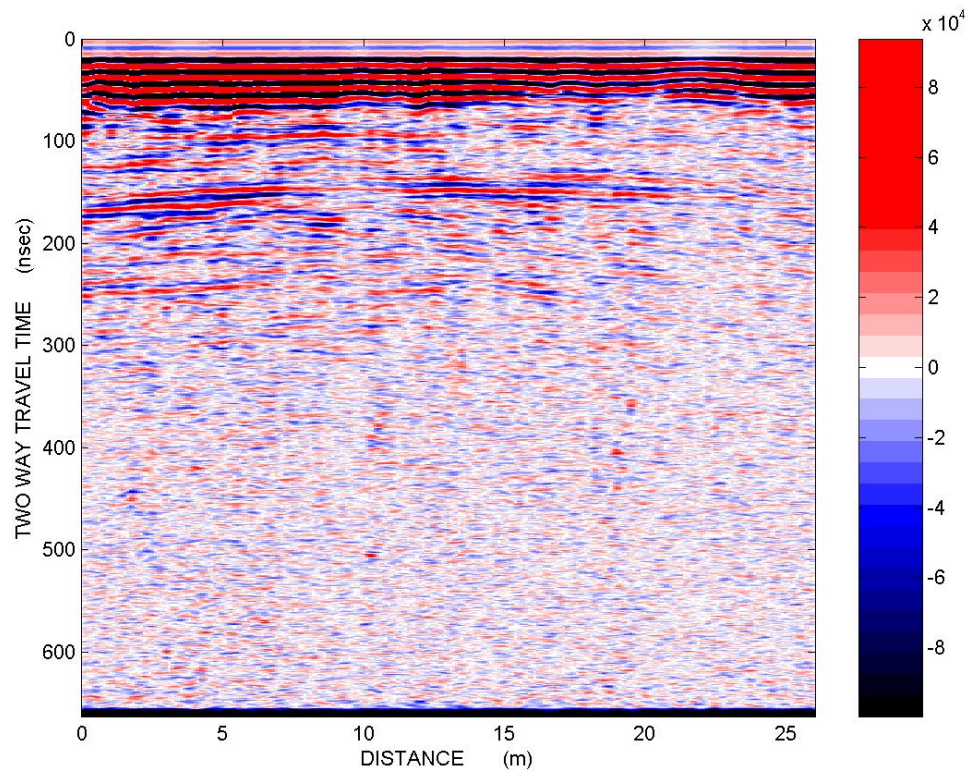


Τομή γεωραντάρ 08. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.

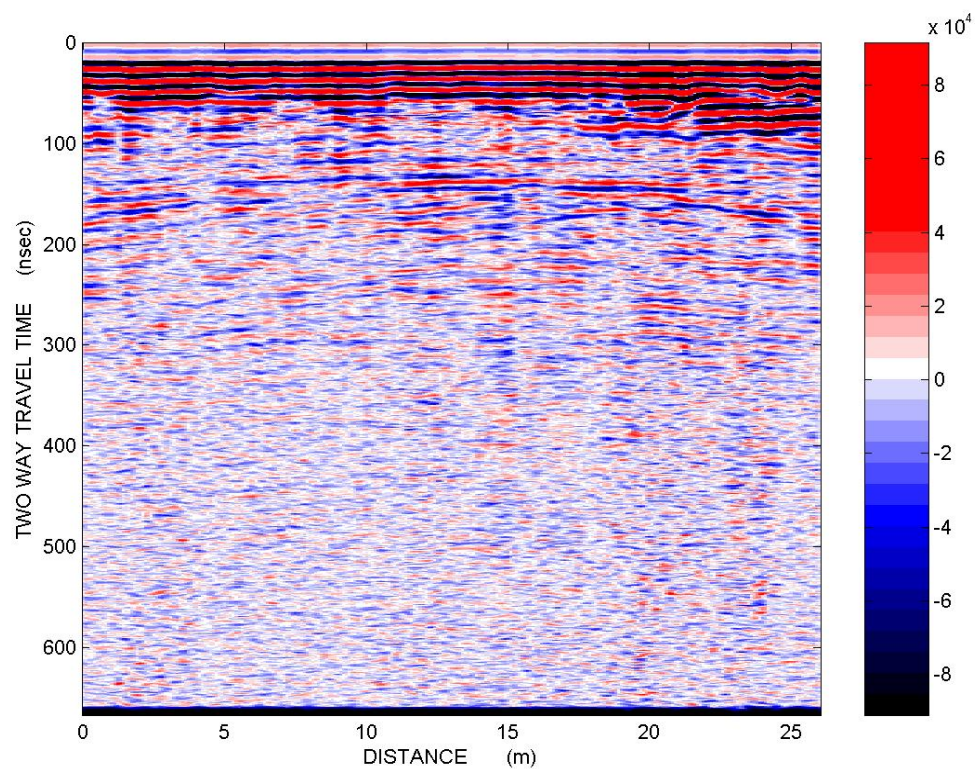


Τομή γεωραντάρ 10. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.



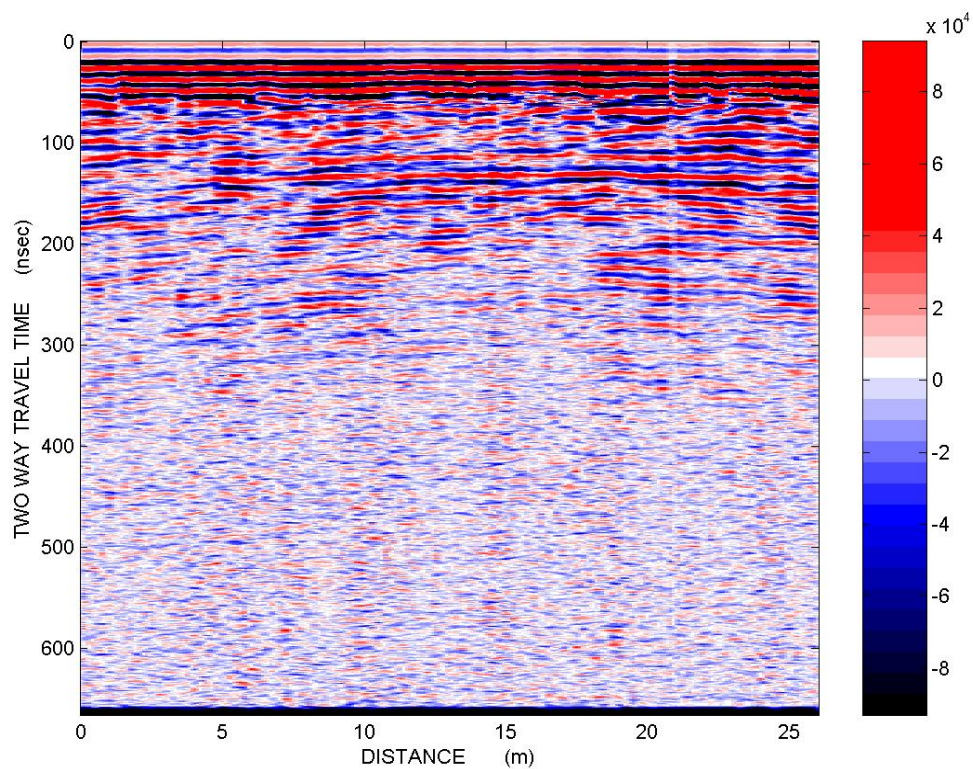


Τομή γεωραντάρ 12. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.

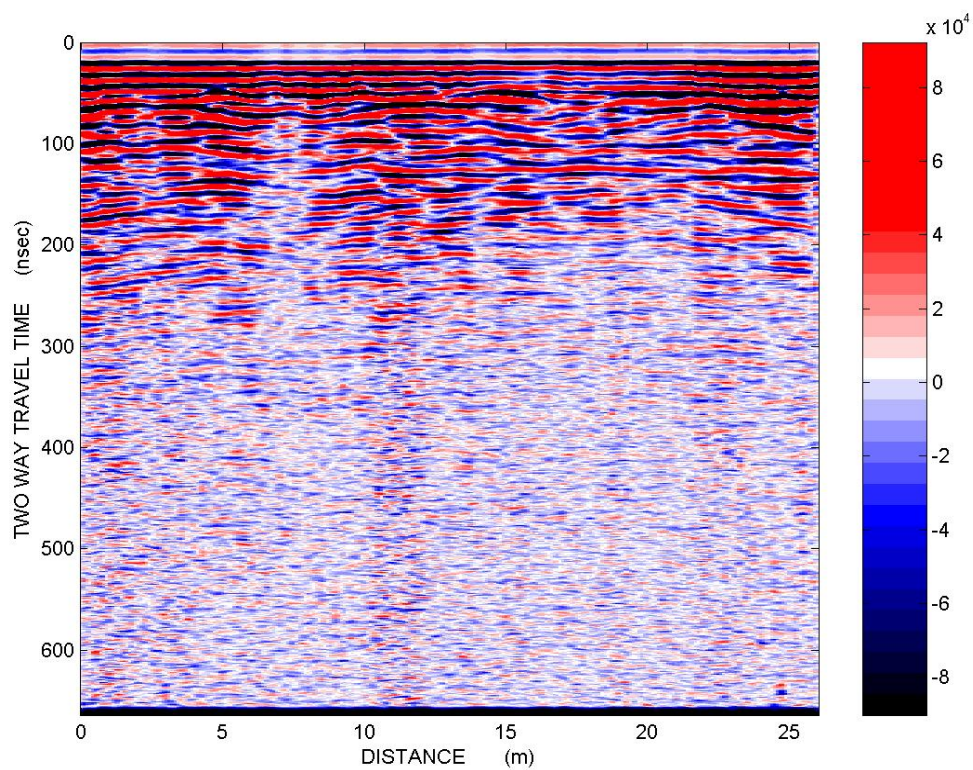


Τομή γεωραντάρ 14. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.





Τομή γεωραντάρ 16. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.



Τομή γεωραντάρ 18. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο διπλός κατακόρυφος χρόνος σε nsec και στον οριζόντιο, η απόσταση σε μέτρα.

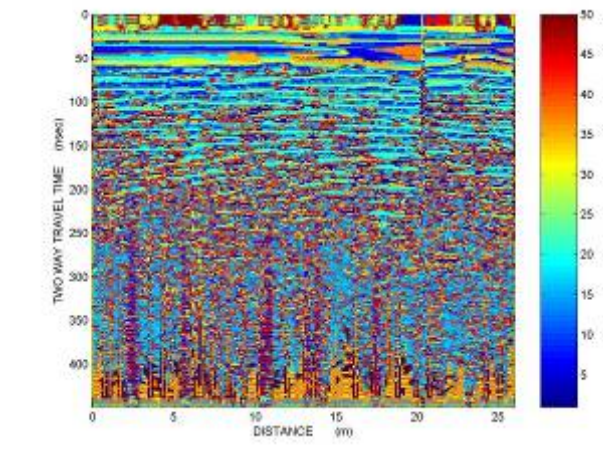
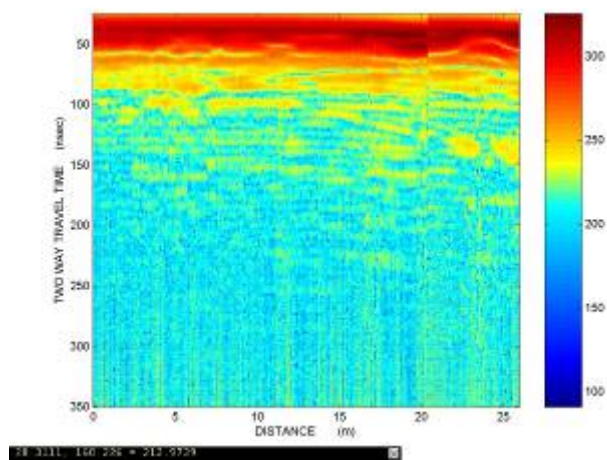
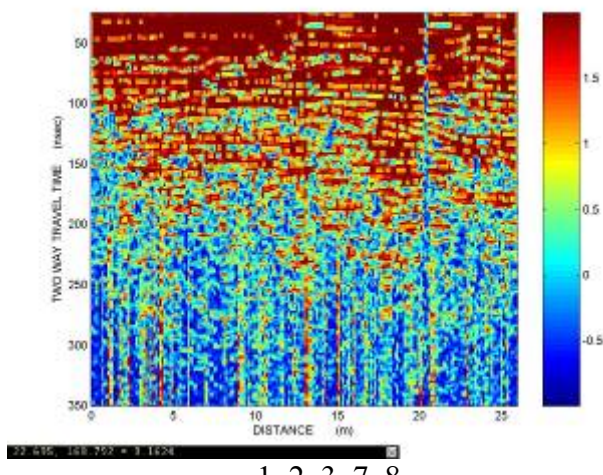
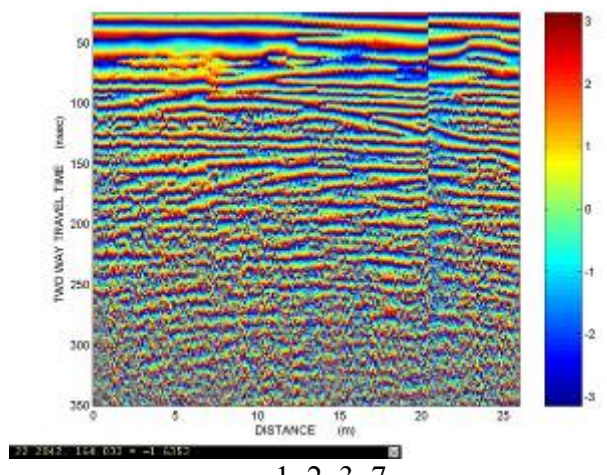
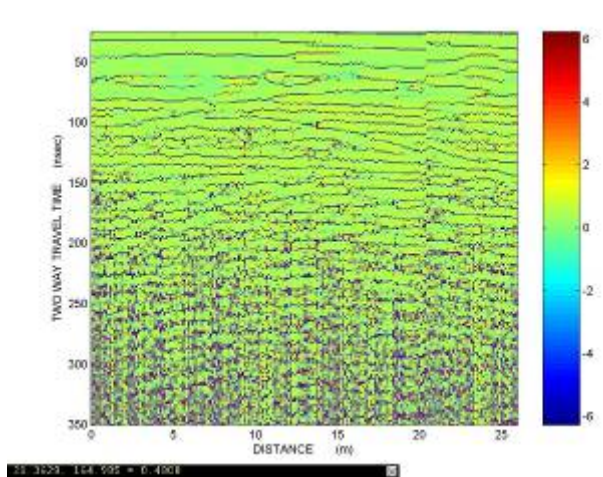
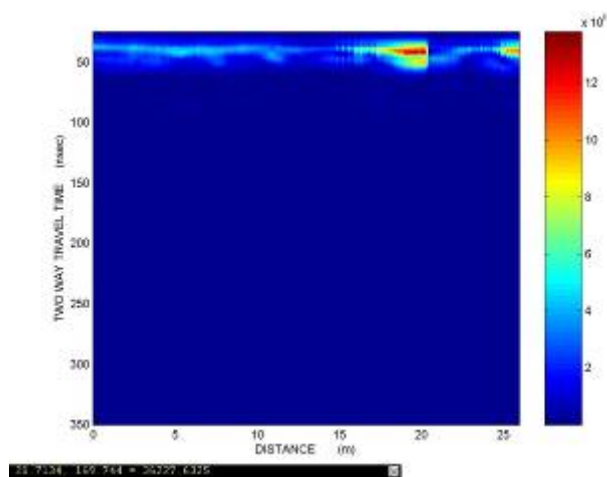
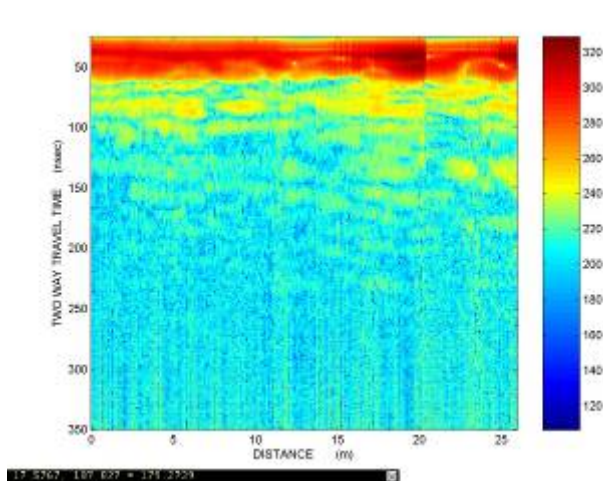
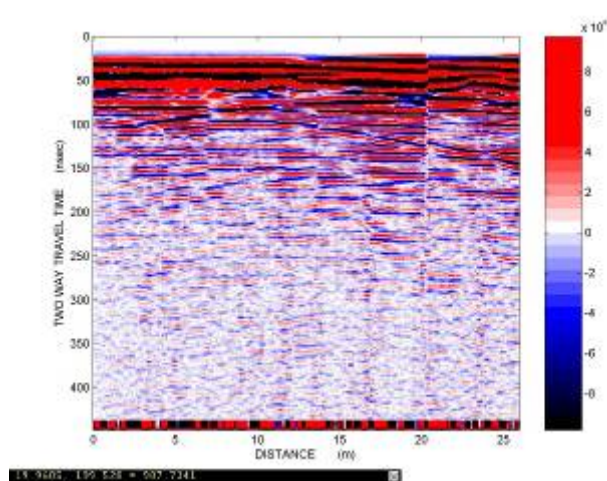
## **A.2) Τομές γεωραντάρ της περιόδου Νοεμβρίου 2005 στην περιοχή Α.**

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.

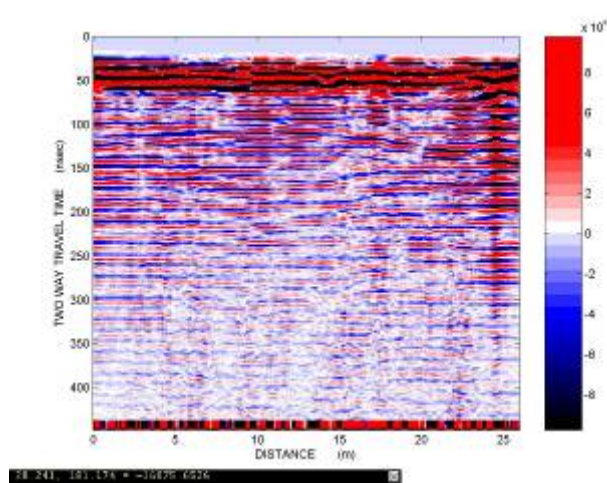
1. Διόρθωση (dewow)
2. Ενίσχυση σήματος (SEC)
3. Αποκοπή θορύβου υποβάθρου (background noise removal)
4. Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db (db instantaneous envelope)
5. Στιγμιαίο πλάτος (instantaneous envelope)
6. Στιγμιαίο συχνότητα (instantaneous frequency fast)
7. Στιγμιαία φάση (instantaneous phase)
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)



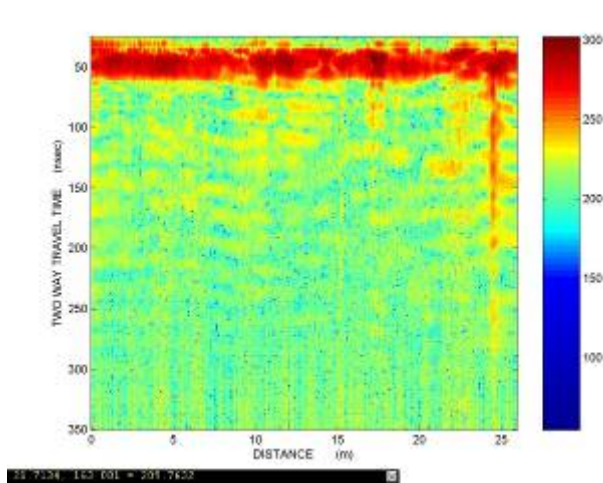




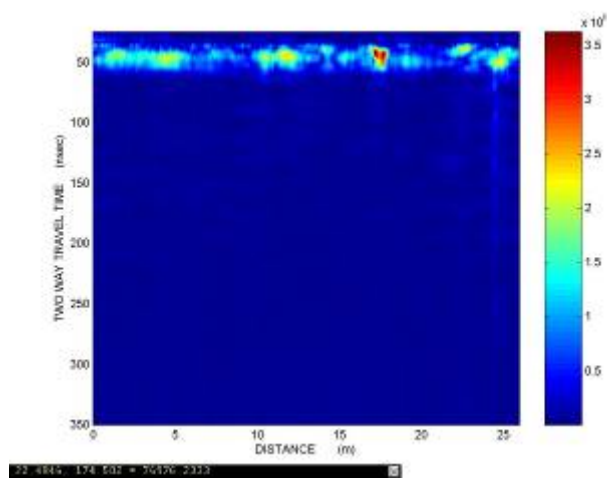




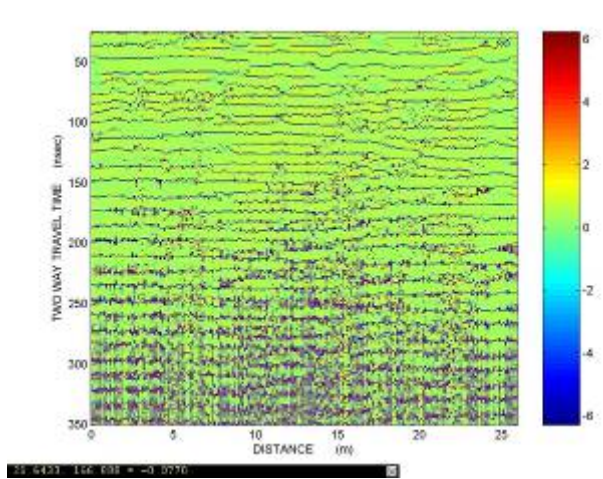
1, 2, 3



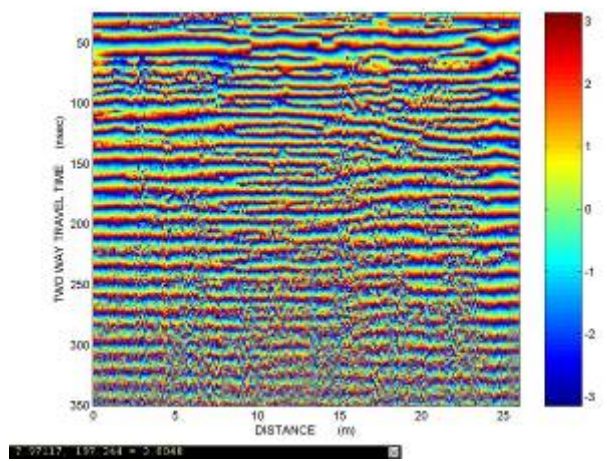
1, 2, 3, 4



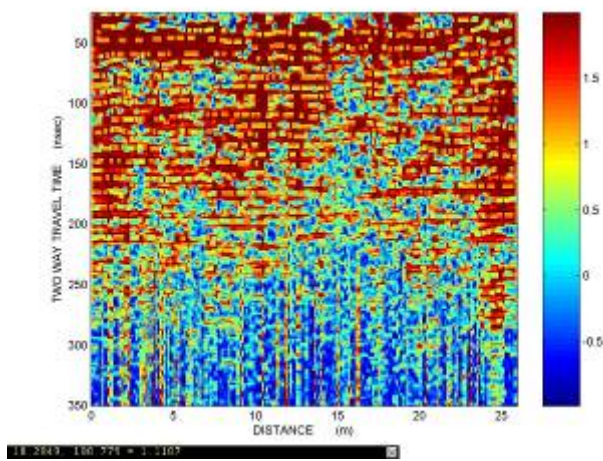
1, 2, 3, 5



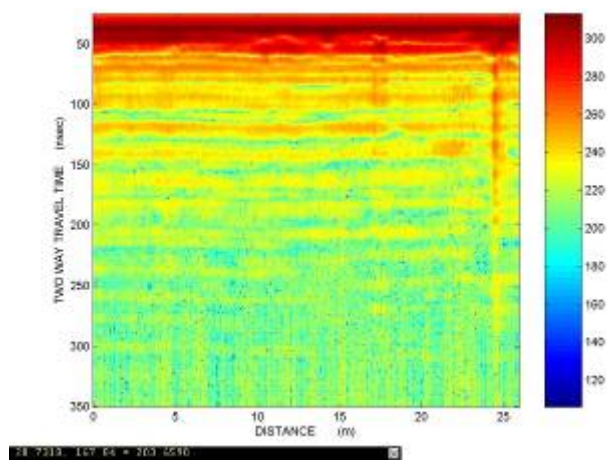
1, 2, 3, 6



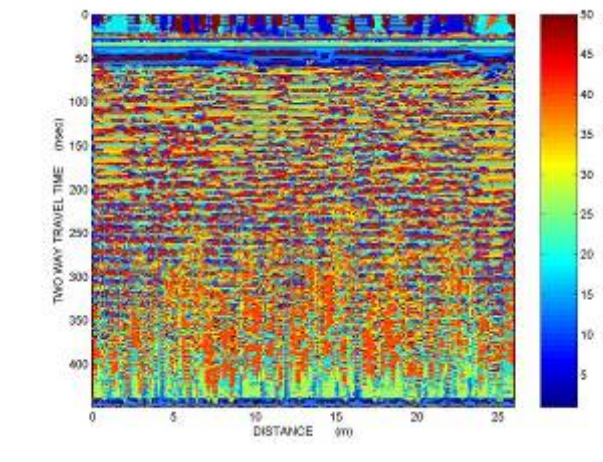
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



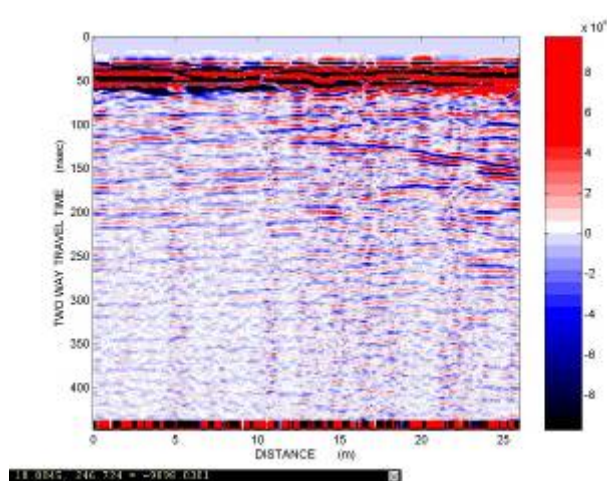
1, 2, 4



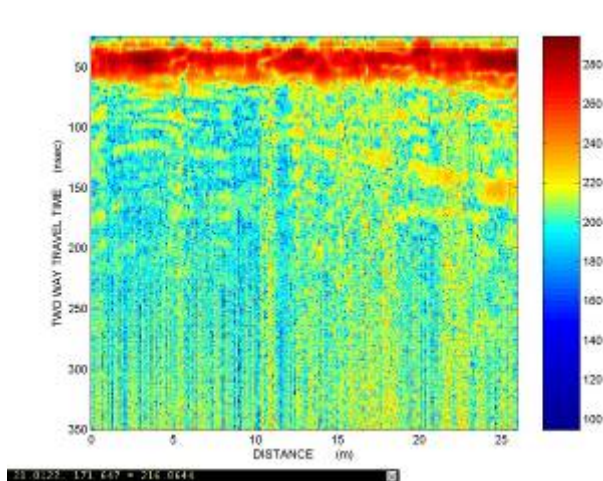
9



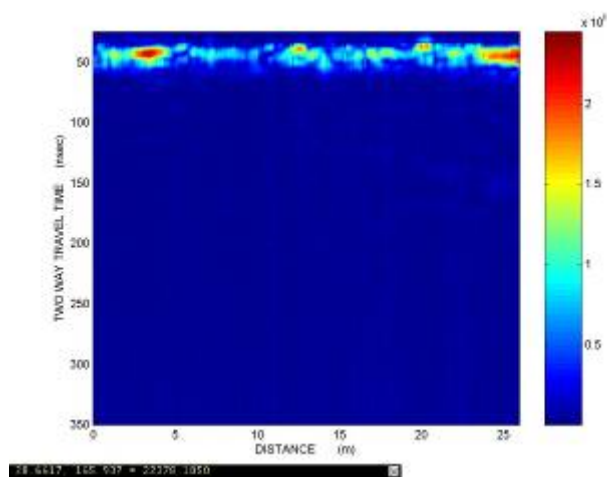




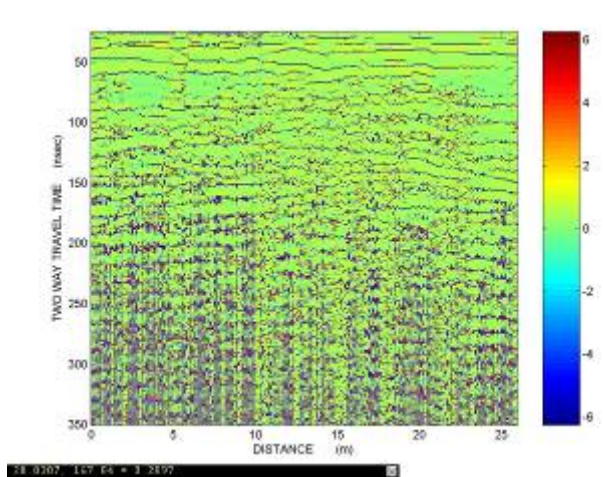
1, 2, 3



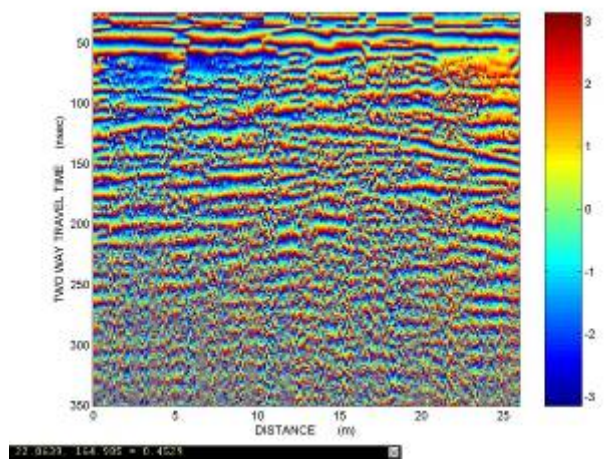
1, 2, 3, 4



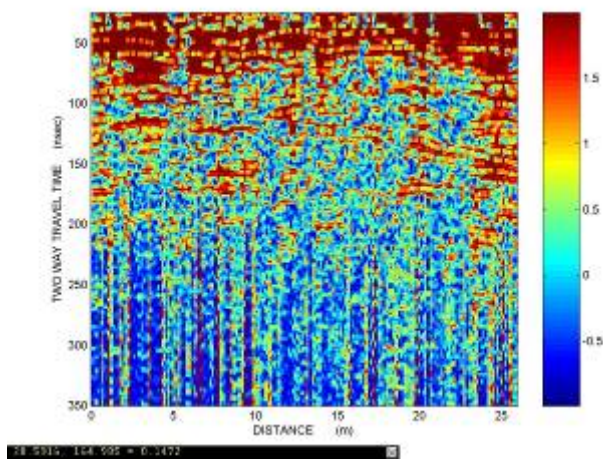
1, 2, 3, 5



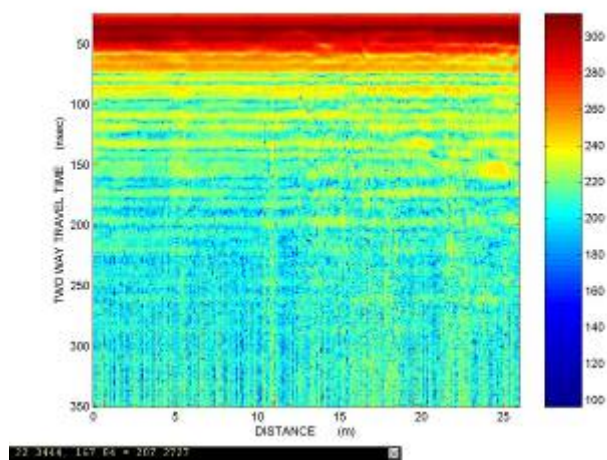
1, 2, 3, 6



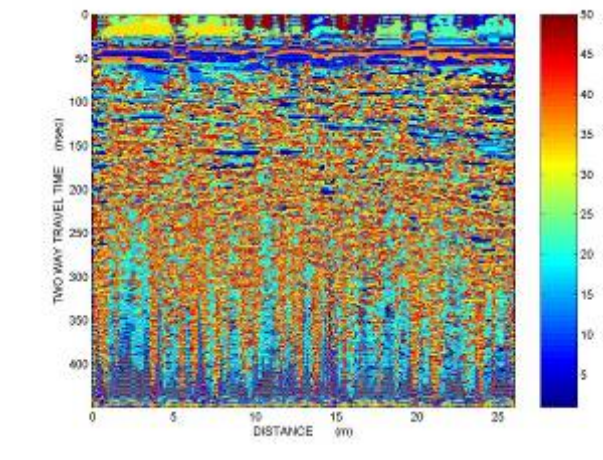
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



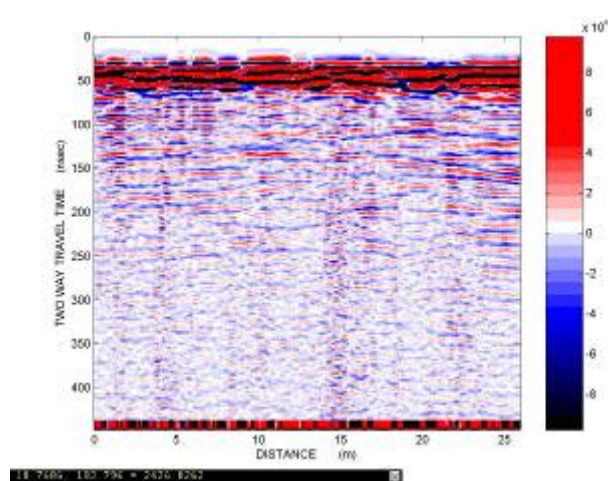
1, 2, 4



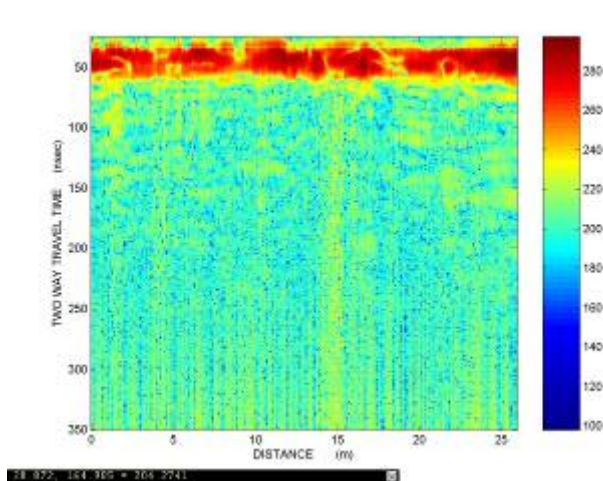
9

Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 06

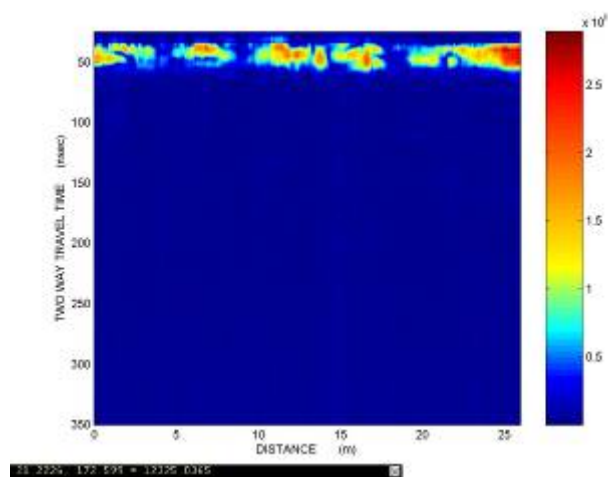




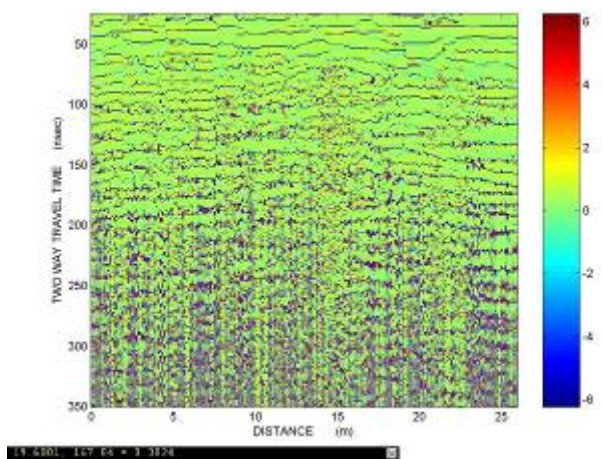
1, 2, 3



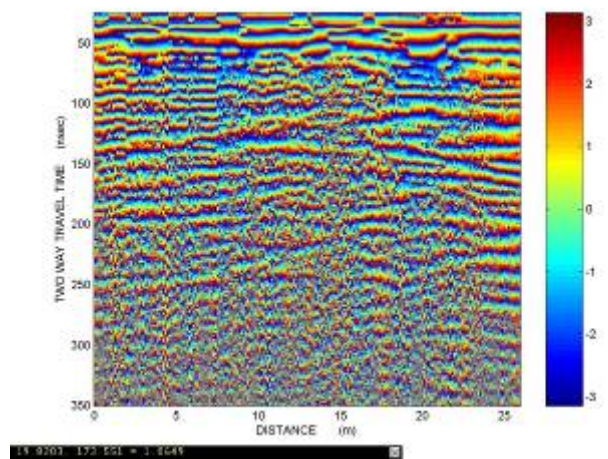
1, 2, 3, 4



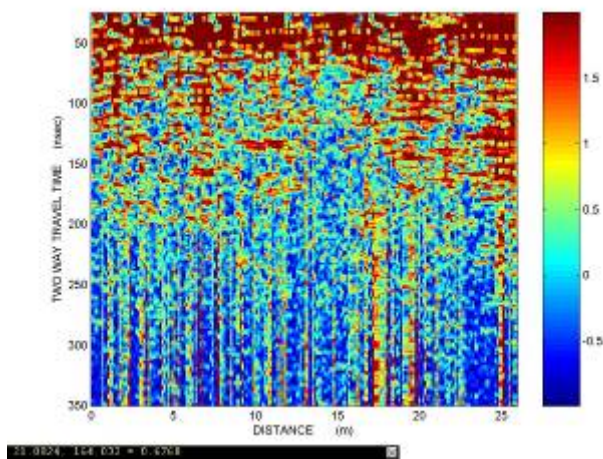
1, 2, 3, 5



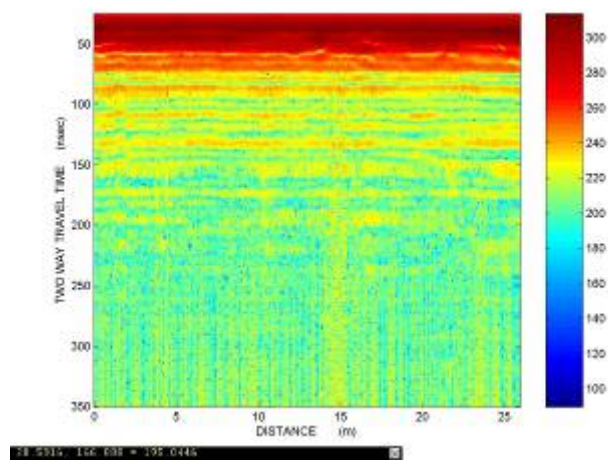
1, 2, 3, 6



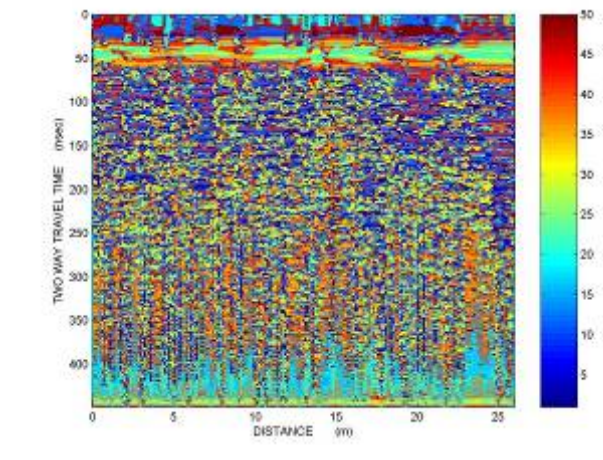
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



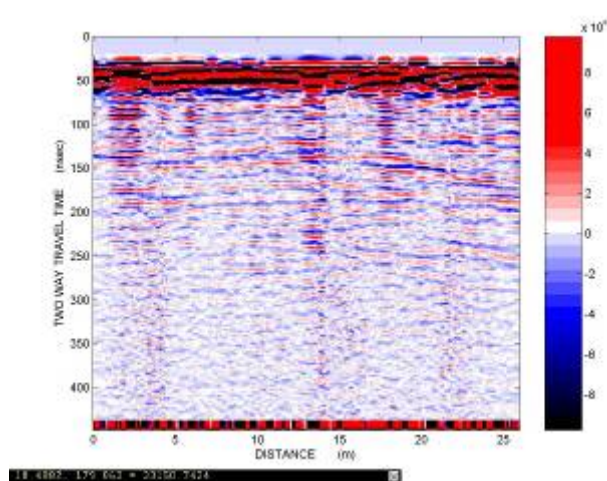
1, 2, 4



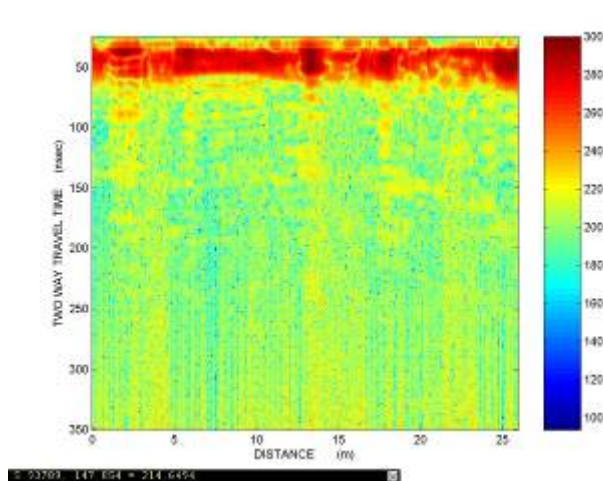
9

Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 08

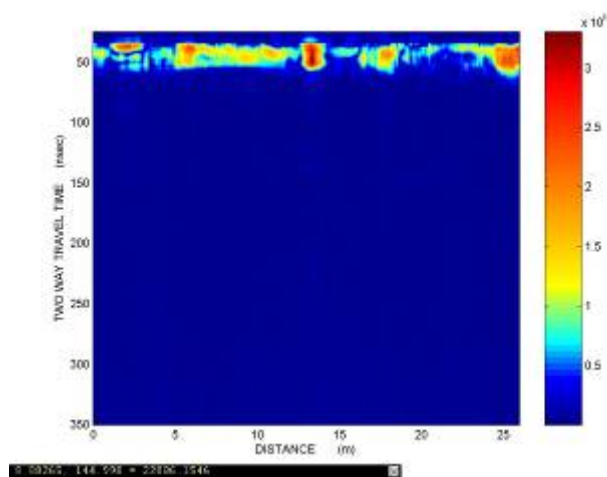




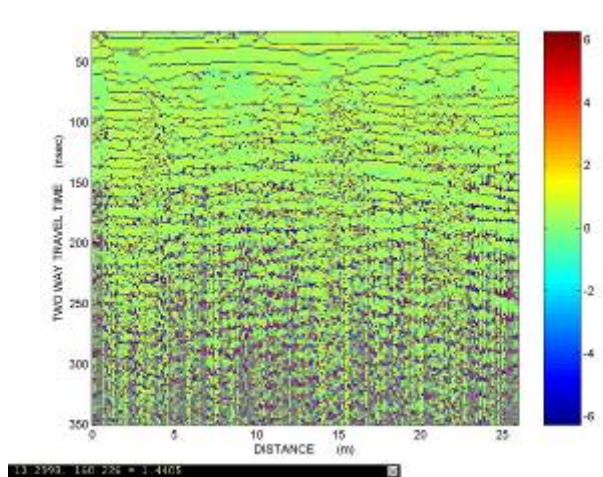
1, 2, 3



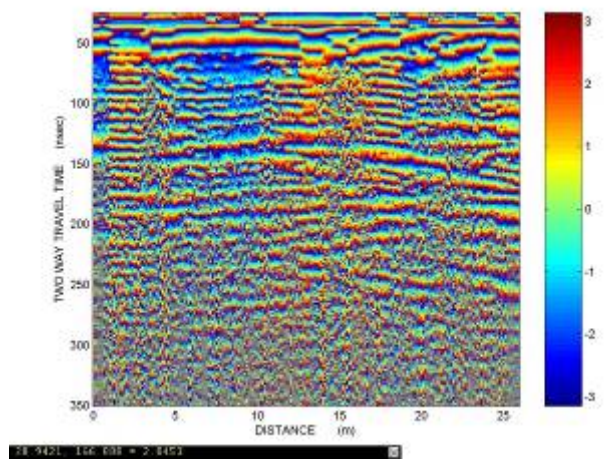
1, 2, 3, 4



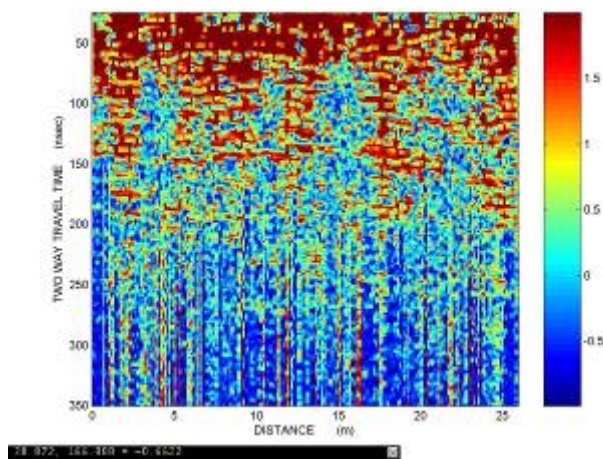
1, 2, 3, 5



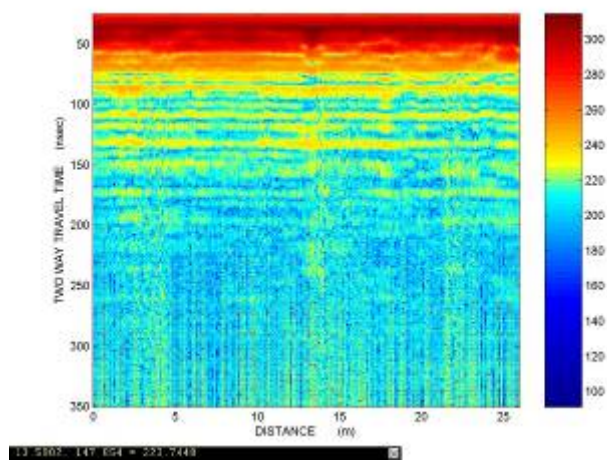
1, 2, 3, 6



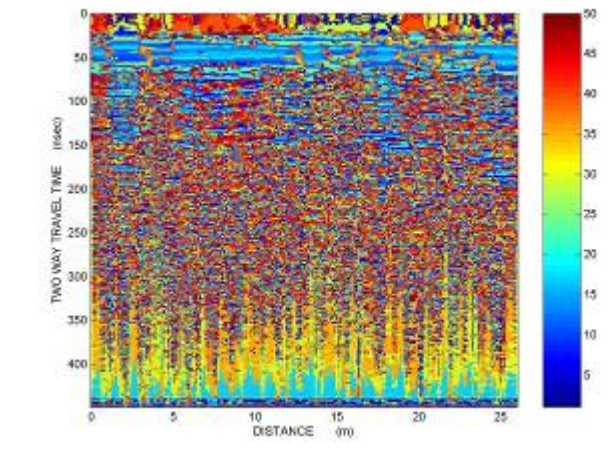
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



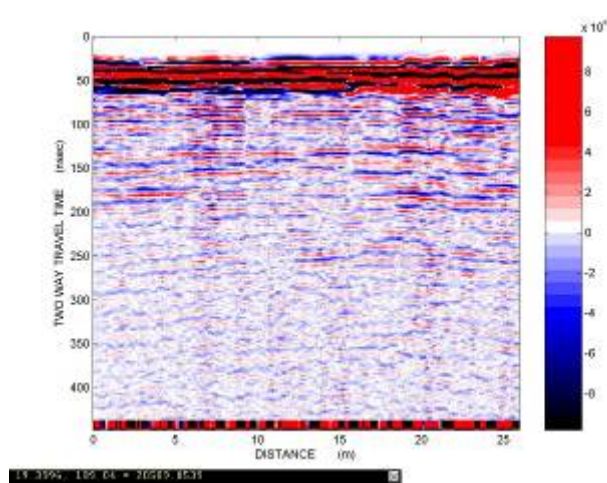
1, 2, 4



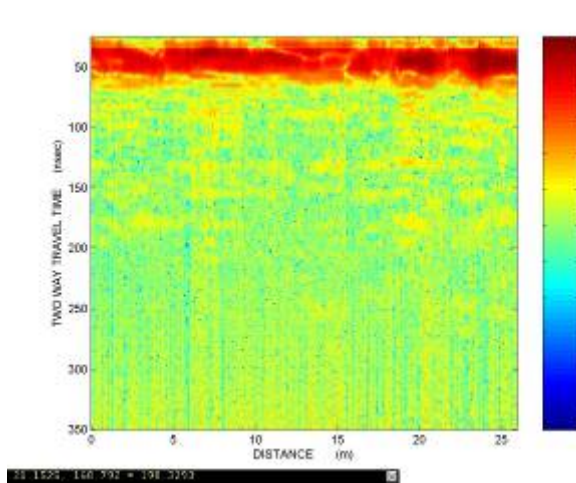
9

Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 10

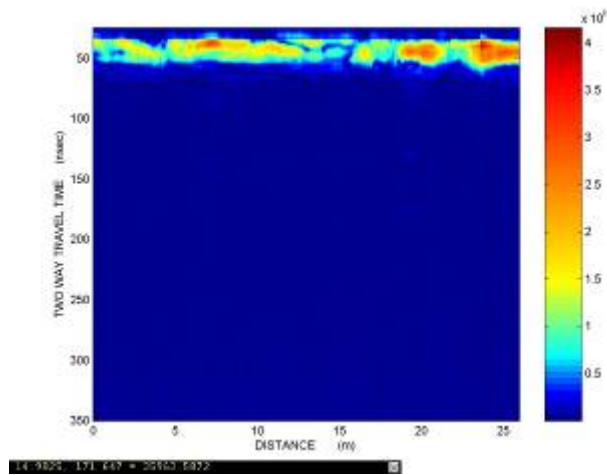




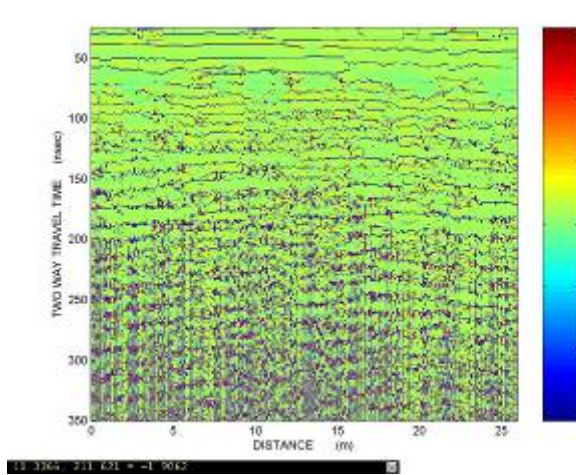
1, 2, 3



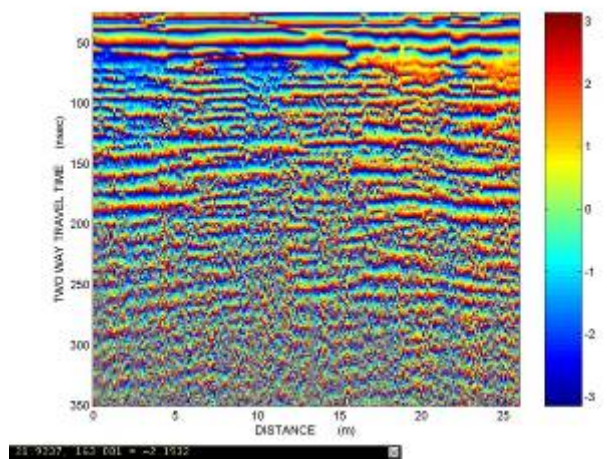
1, 2, 3, 4



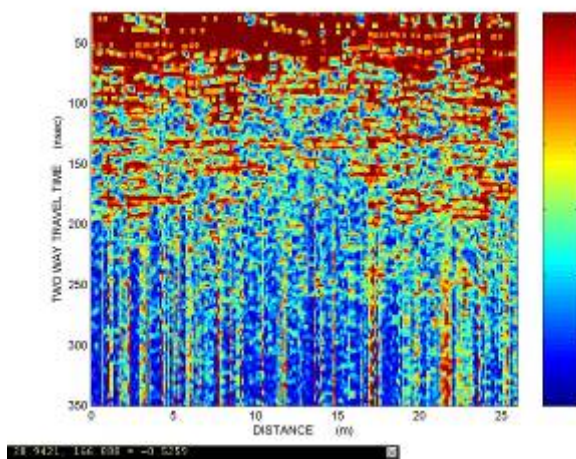
1, 2, 3, 5



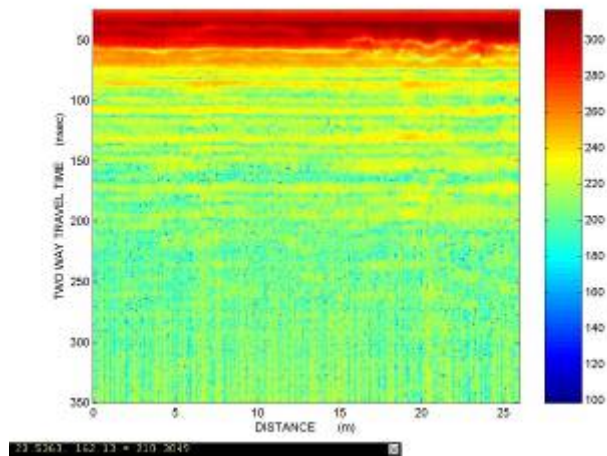
1, 2, 3, 6



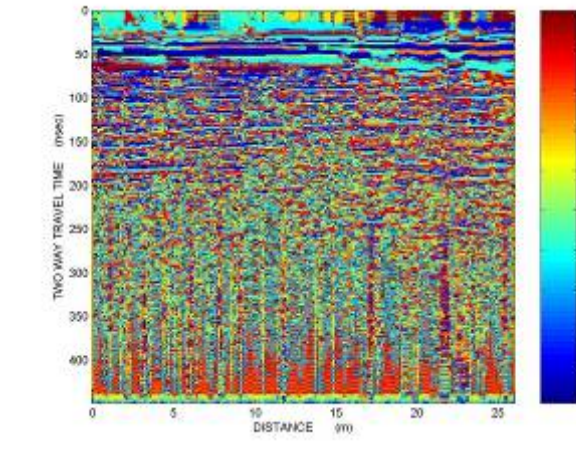
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



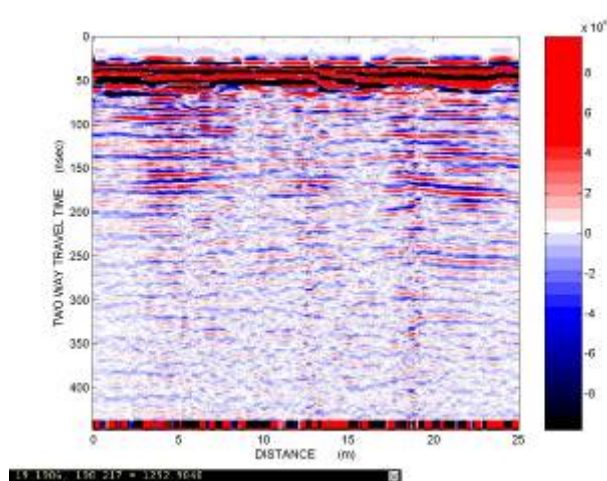
1, 2, 4



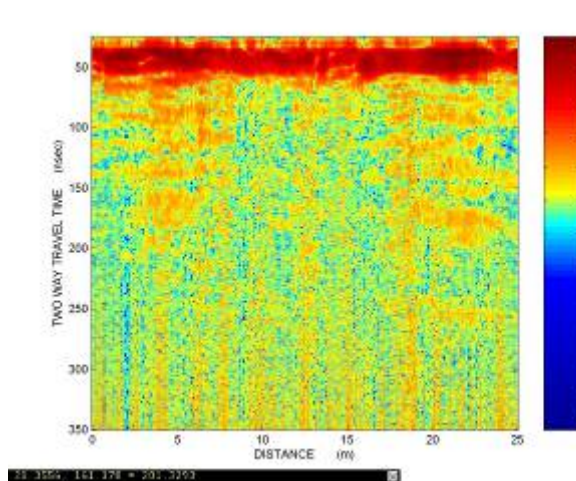
9

Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 12

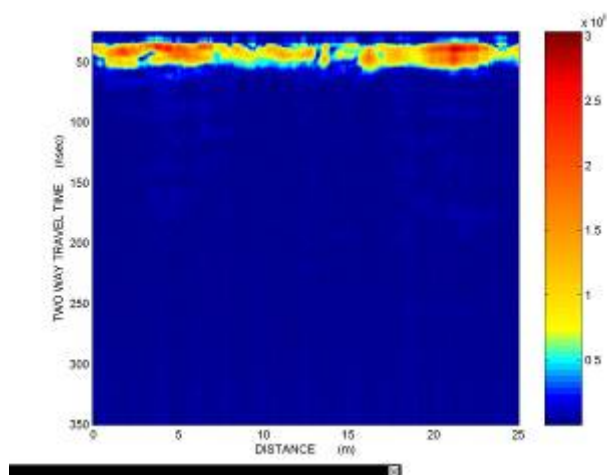




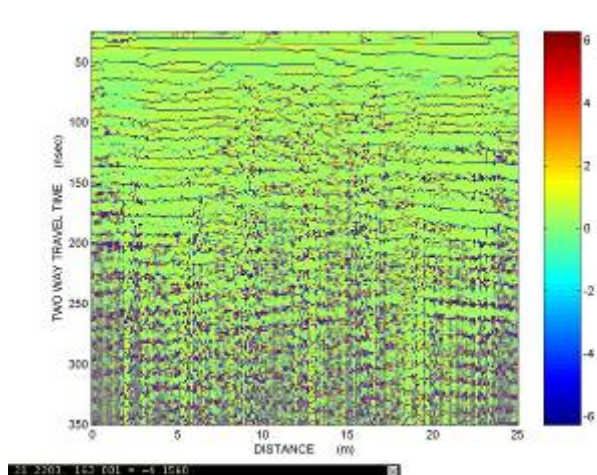
1, 2, 3



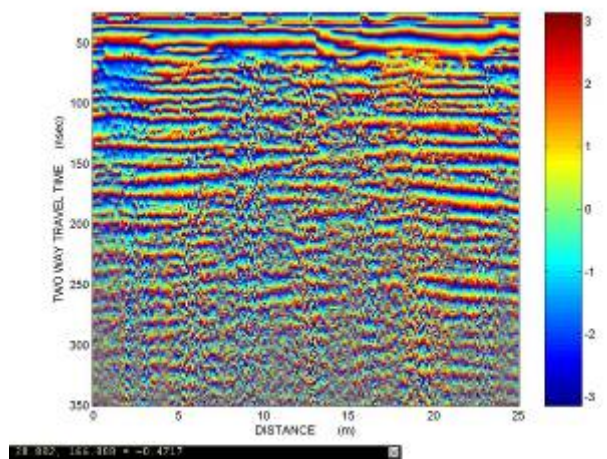
1, 2, 3, 4



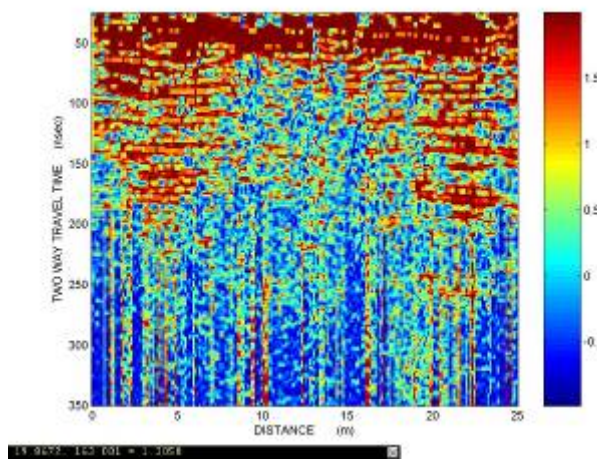
1, 2, 3, 5



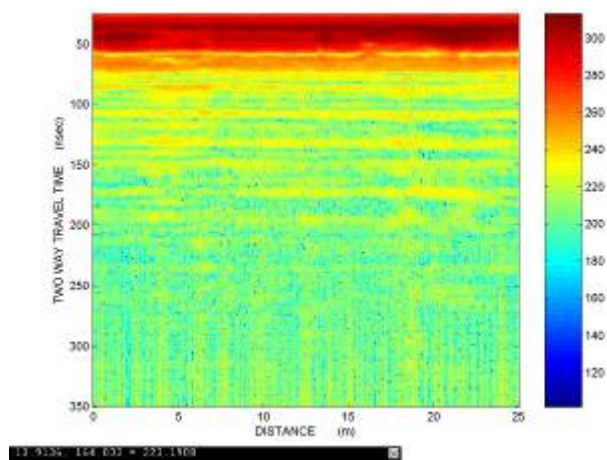
1, 2, 3, 6



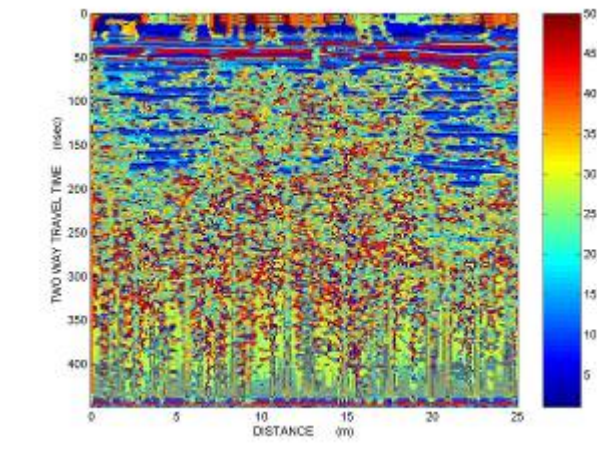
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



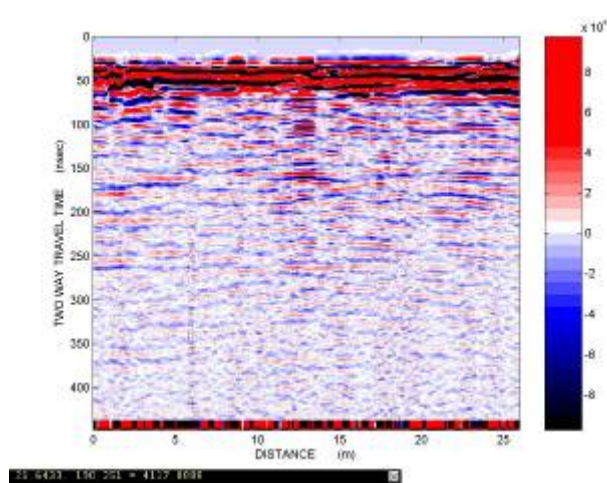
1, 2, 4



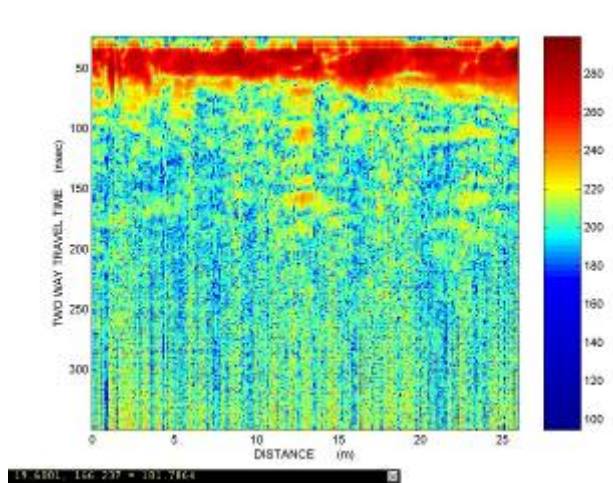
9

Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 14

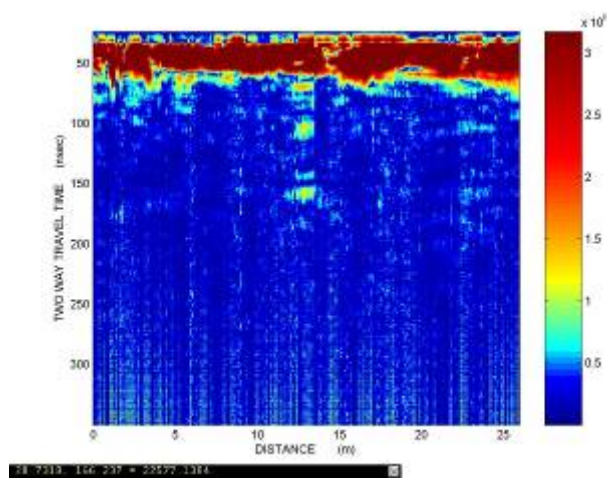




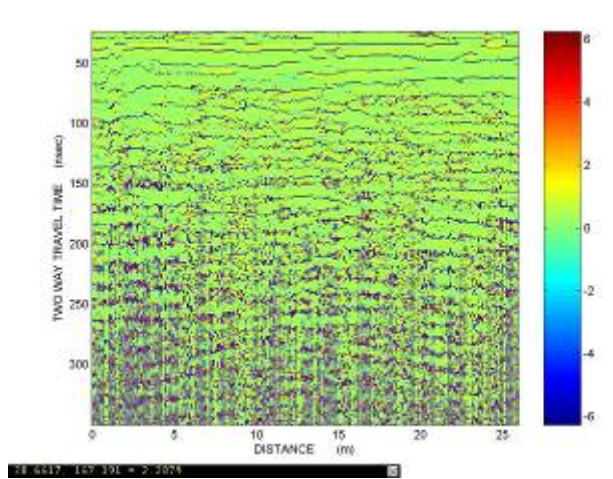
1, 2, 3



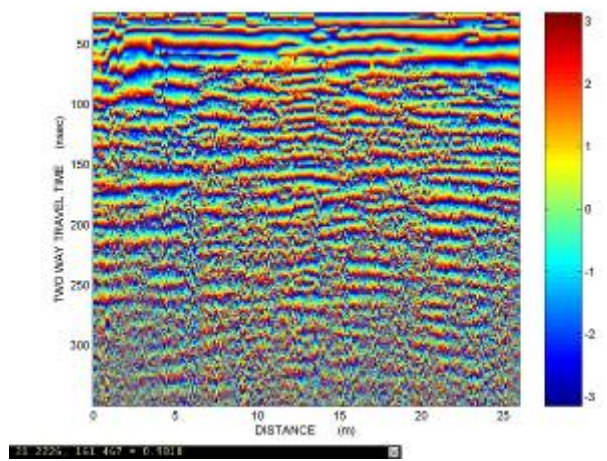
1, 2, 3, 4



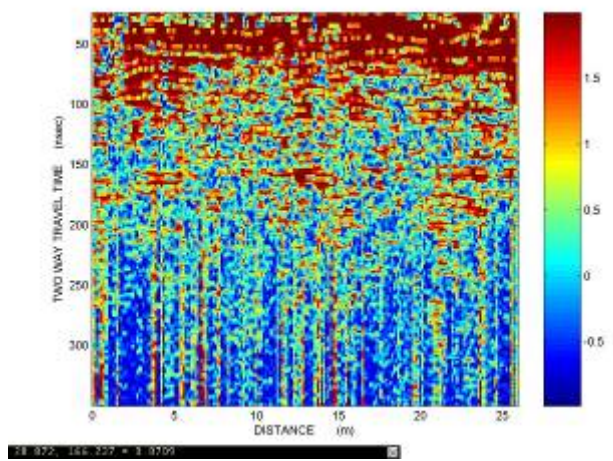
1, 2, 3, 5



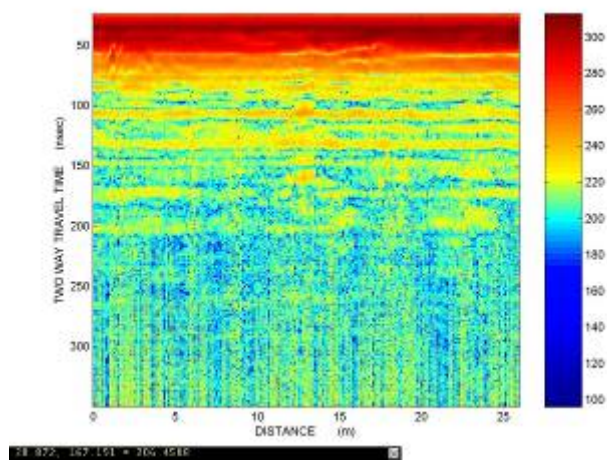
1, 2, 3, 6



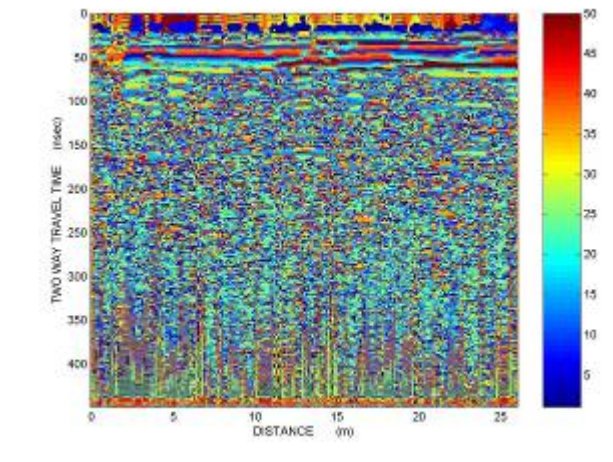
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



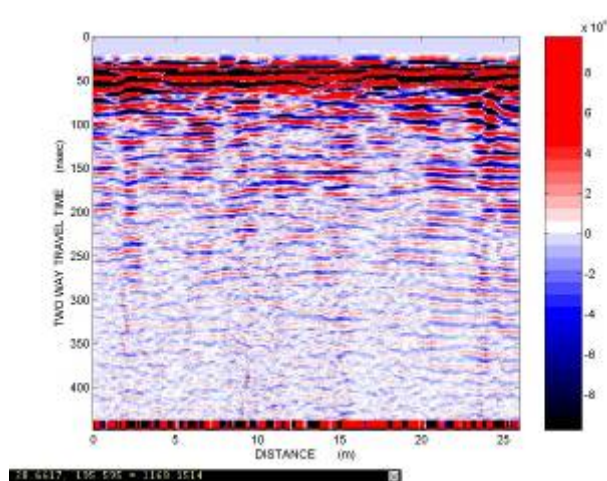
1, 2, 4



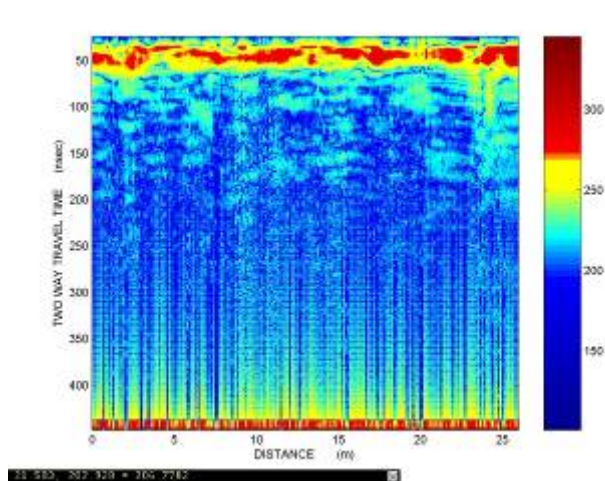
9

Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 16

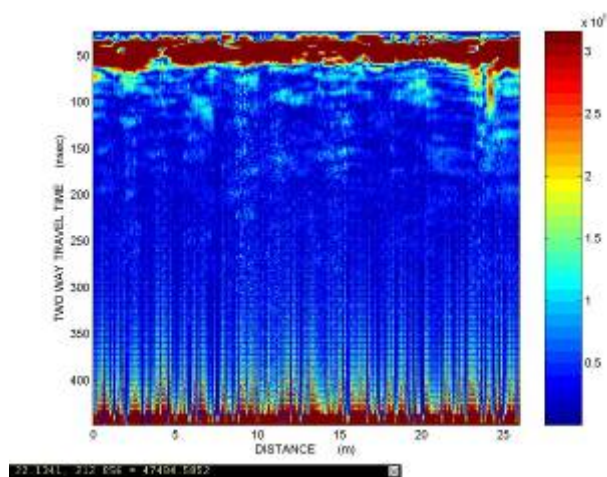




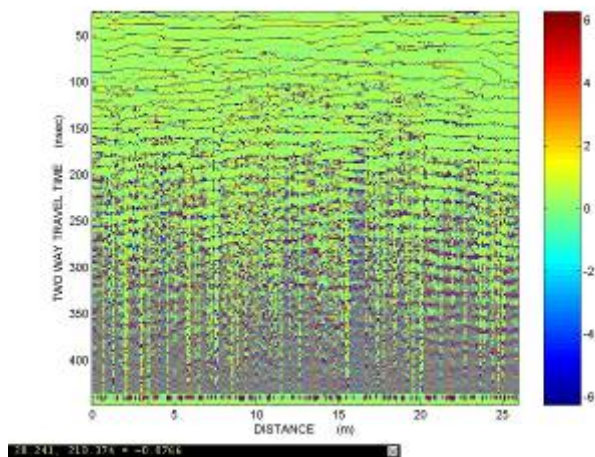
1, 2, 3



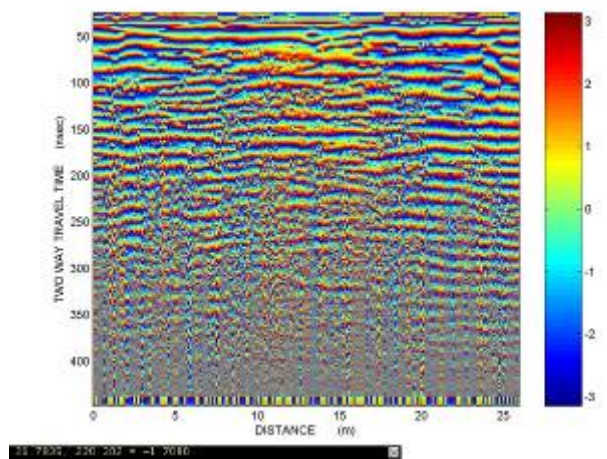
1, 2, 3, 4



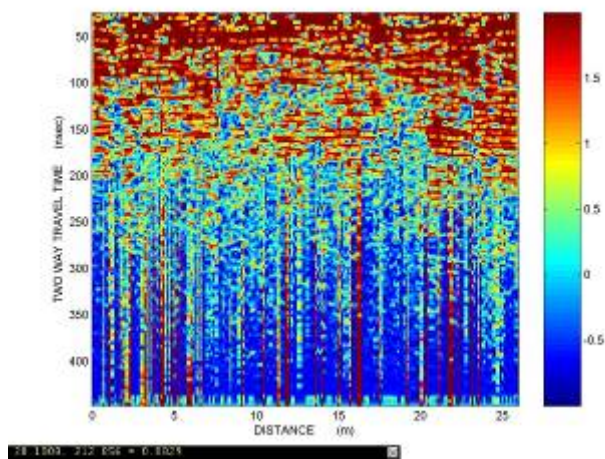
1, 2, 3, 5



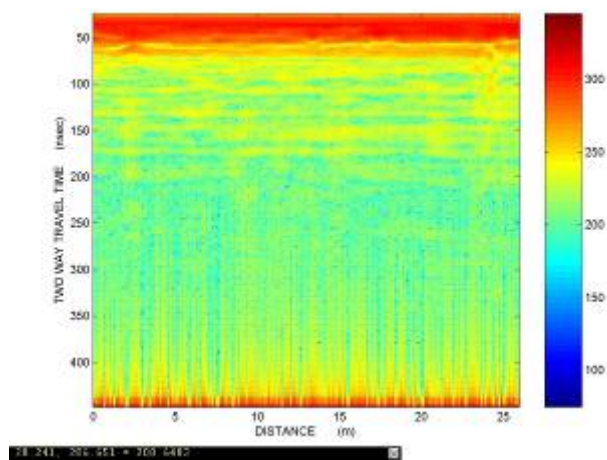
1, 2, 3, 6



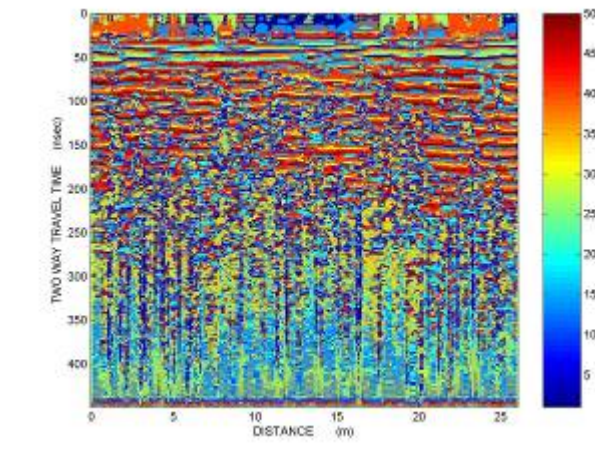
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



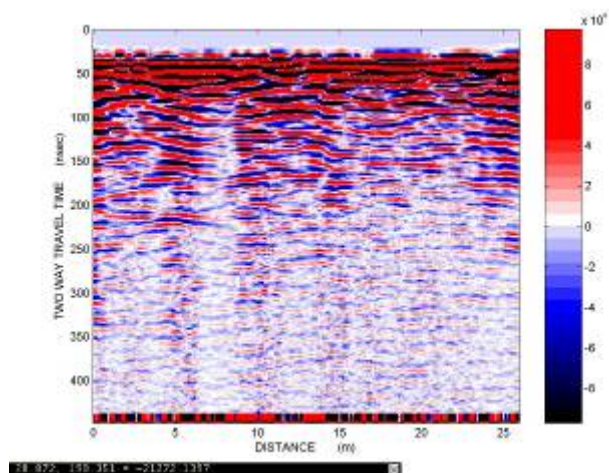
1, 2, 4



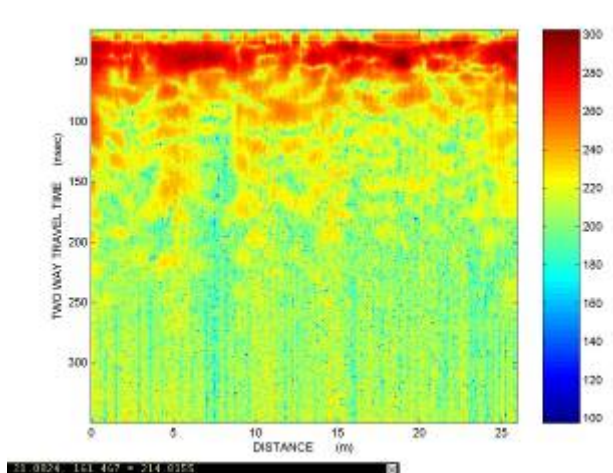
9

Περιοχή Α, Γραμμή μελέτης 18

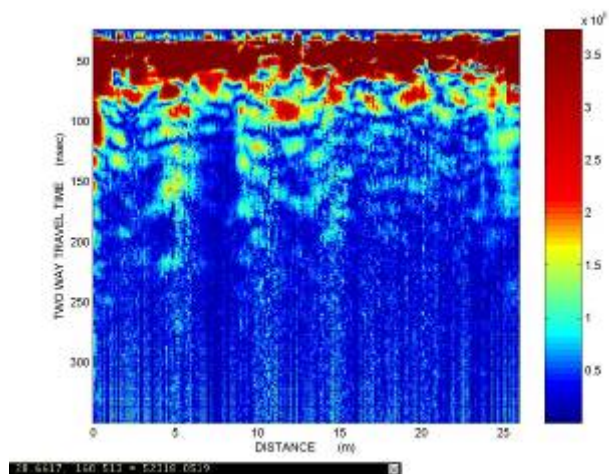




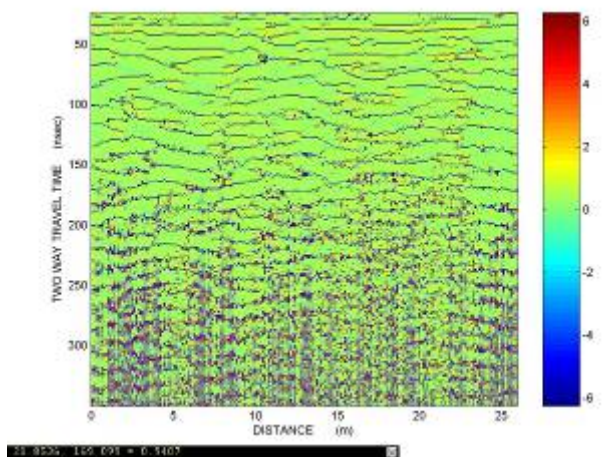
1, 2, 3



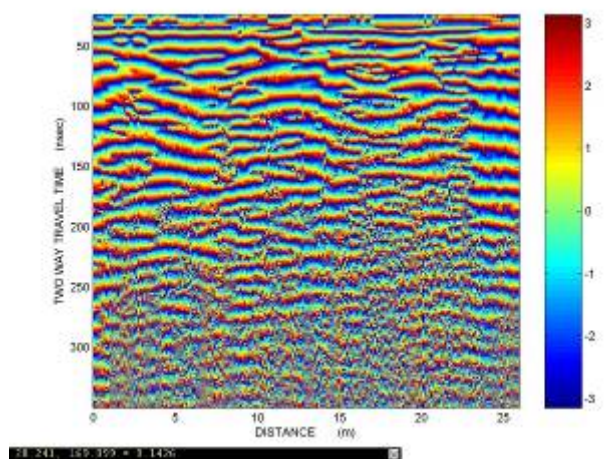
1, 2, 3, 4



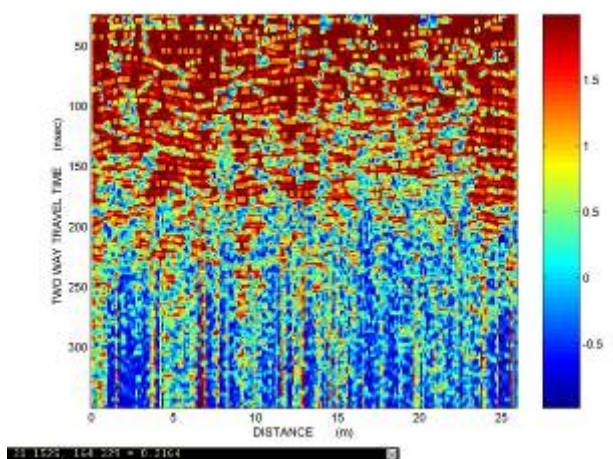
1, 2, 3, 5



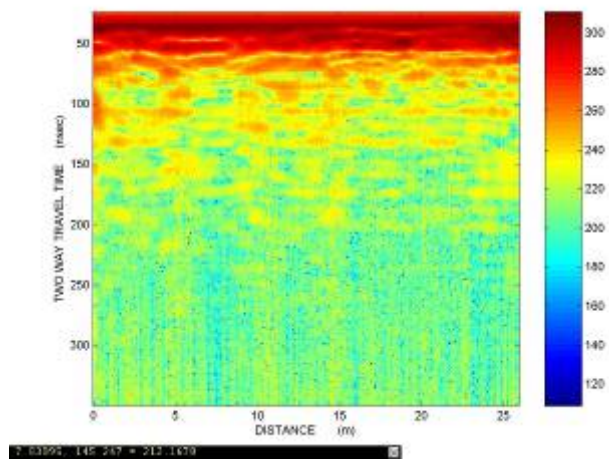
1, 2, 3, 6



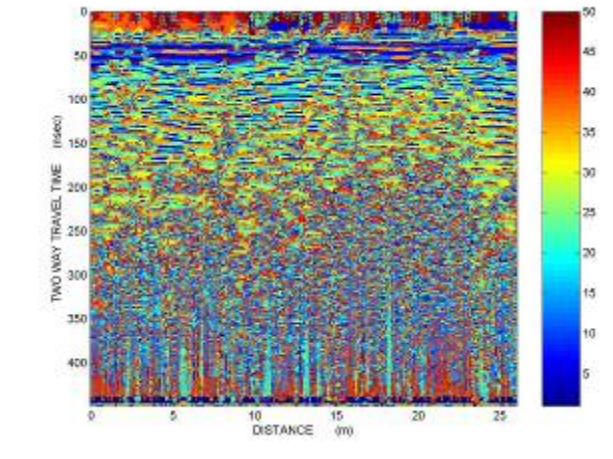
1, 2, 3, 7



1, 2, 3, 7, 8



1, 2, 4

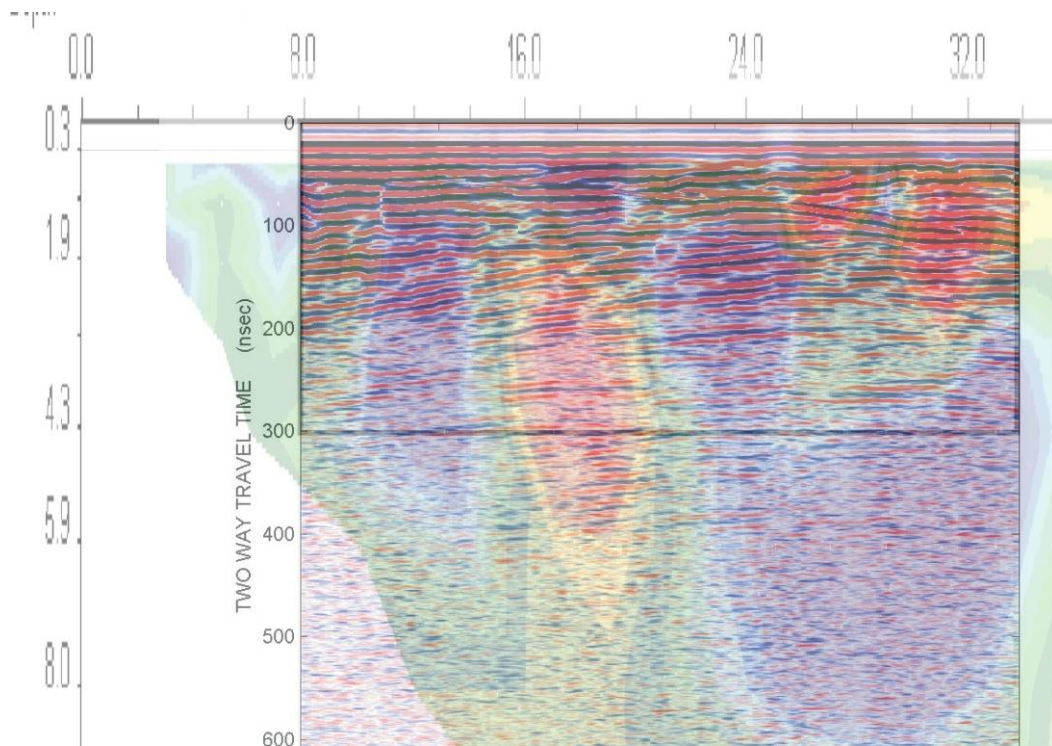


9

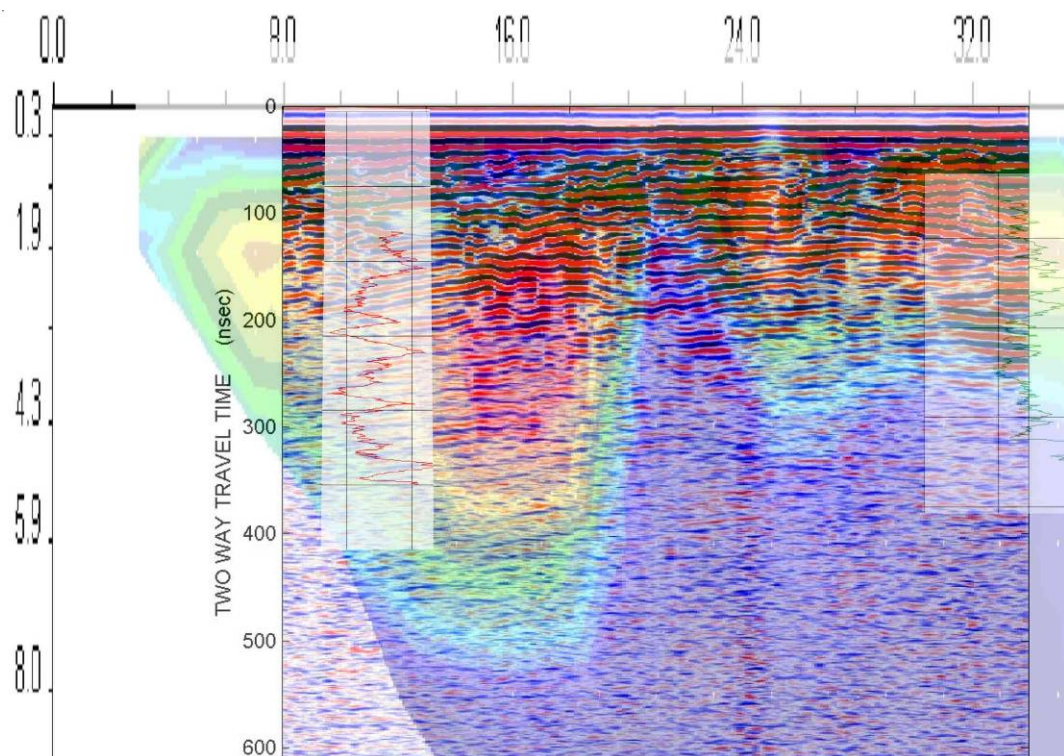




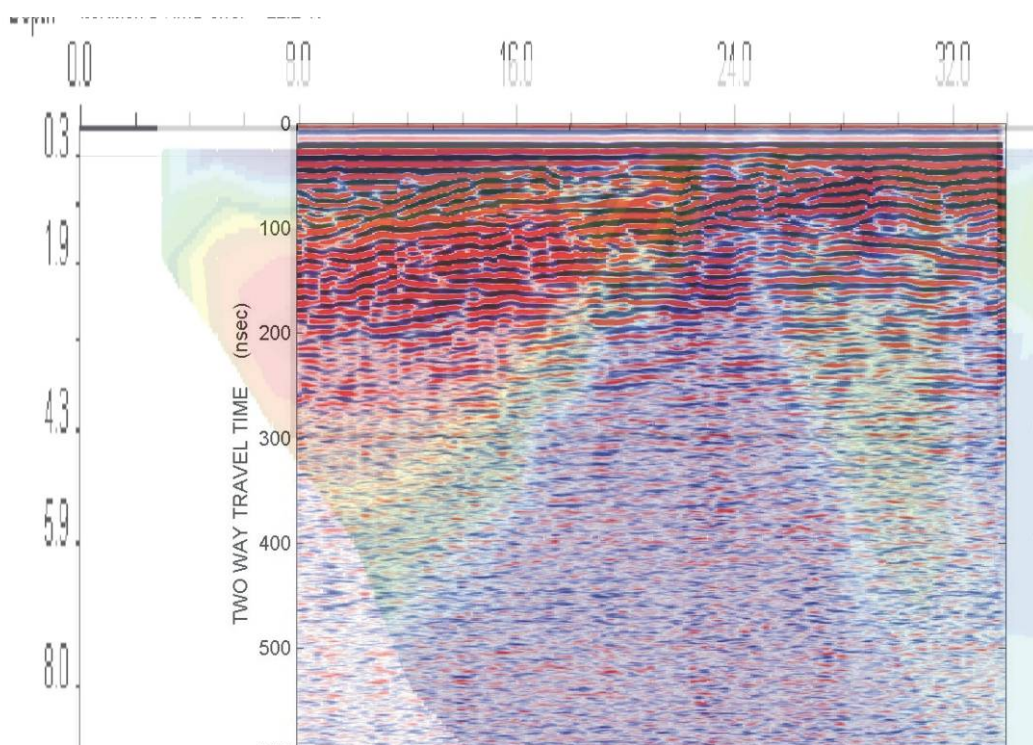
**A.3) Υπερθέσεις γεωηλεκτρικών τομών με τομές γεωραντάρ και διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας της περιόδου Ιουλίου 2005 στην περιοχή Α.**



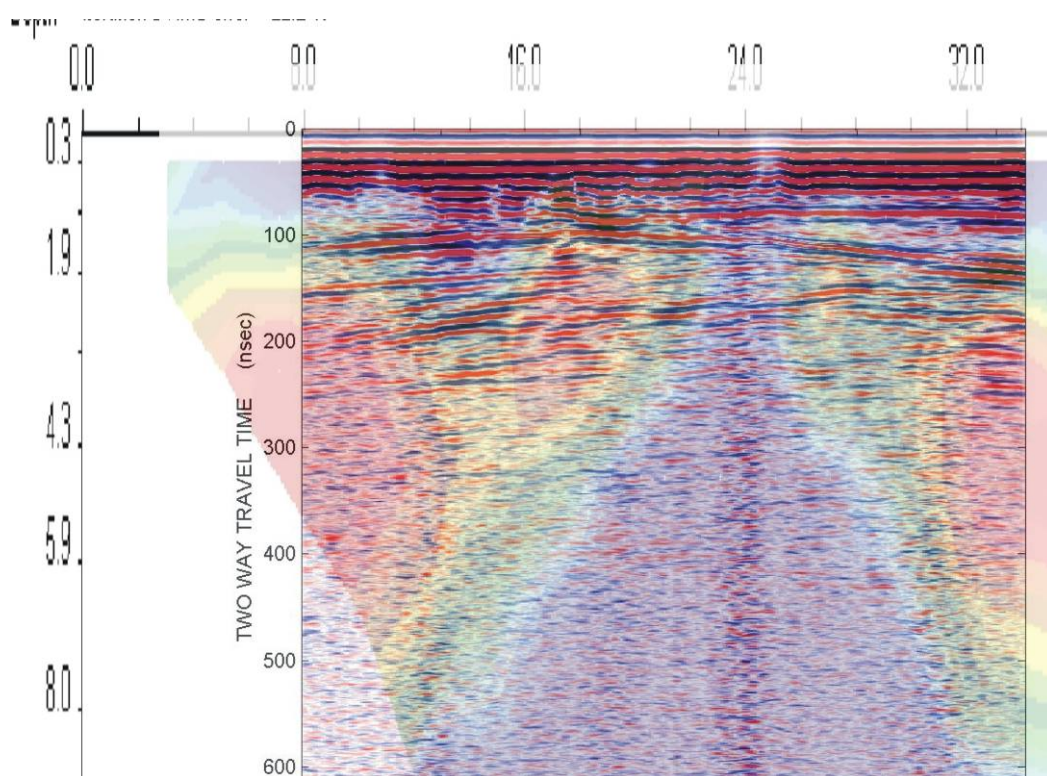
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 00.



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

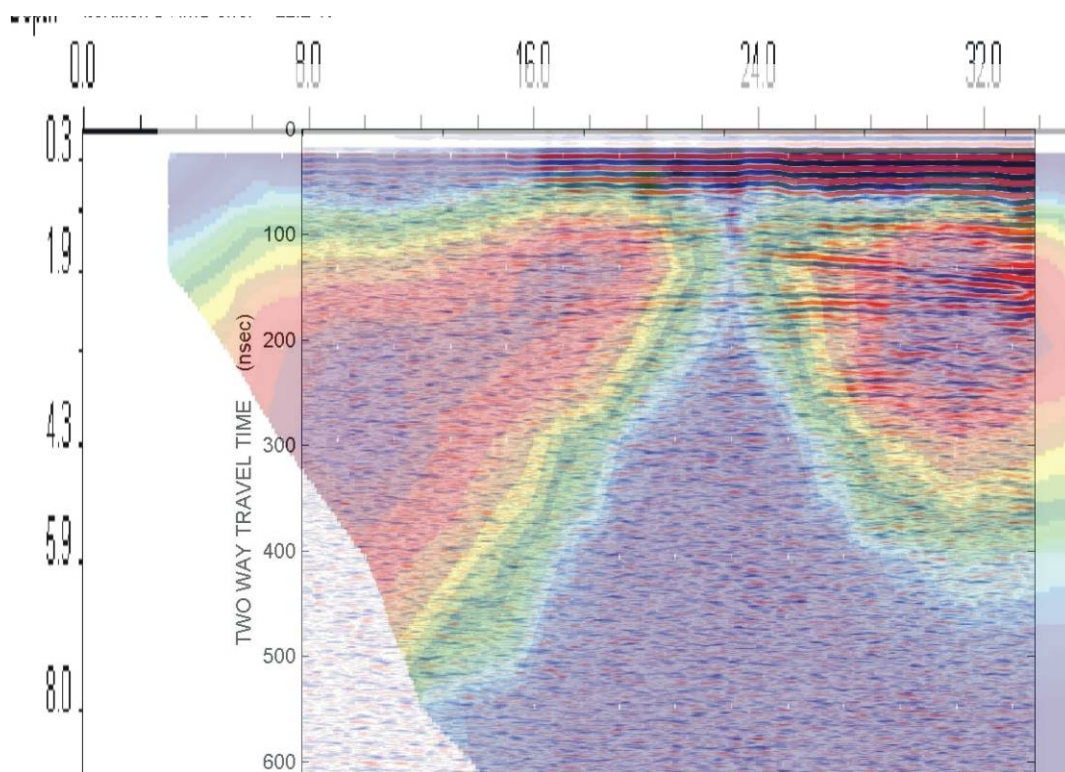


Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 04.

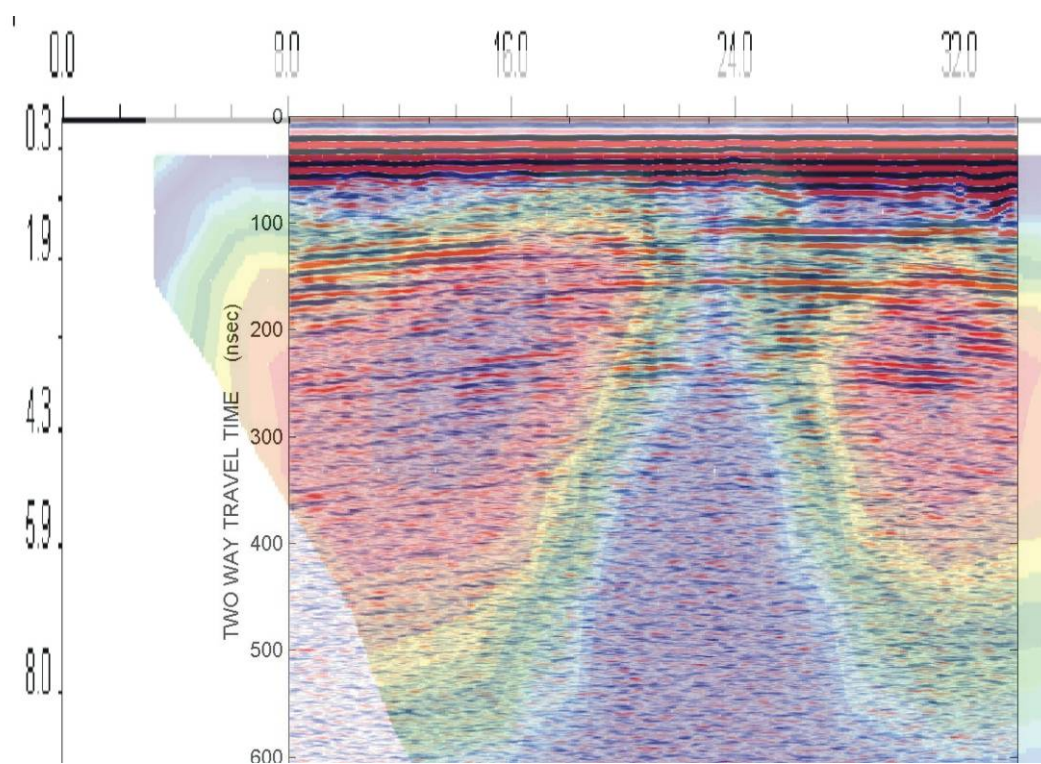


Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 06.

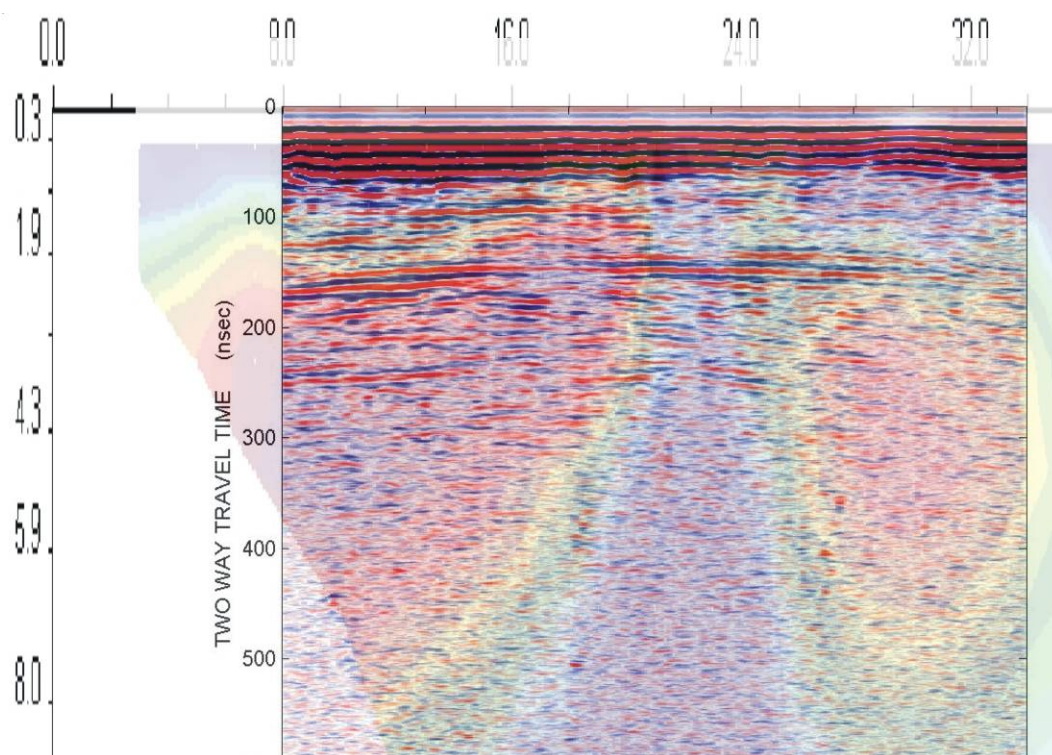




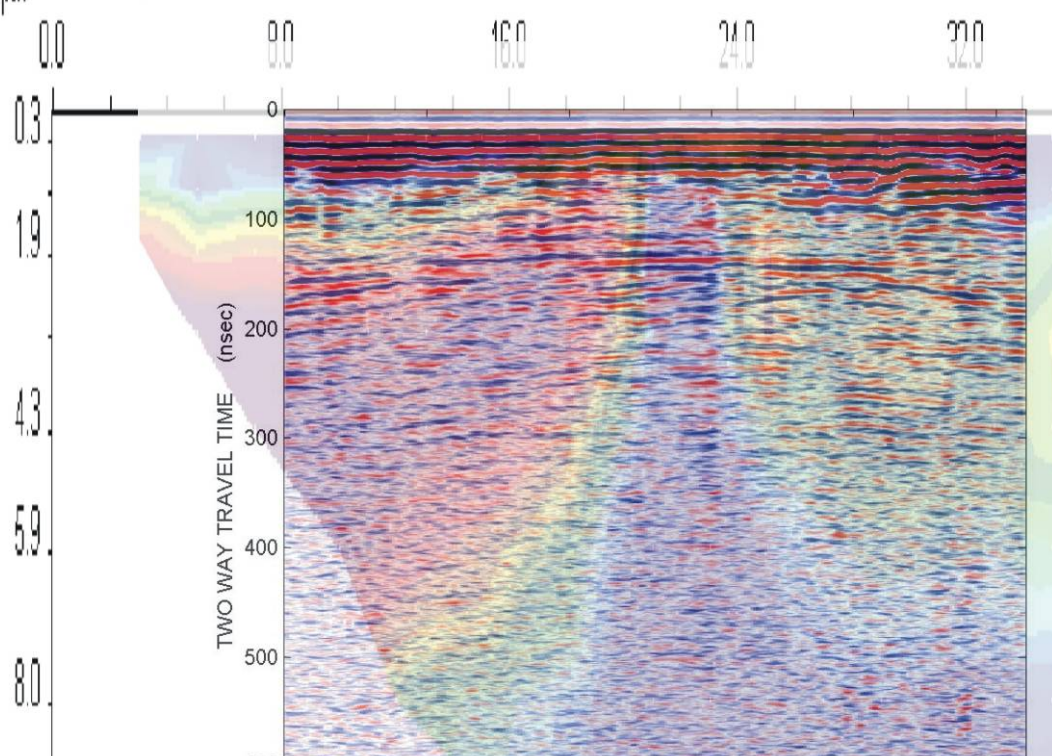
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 08.



Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 10.

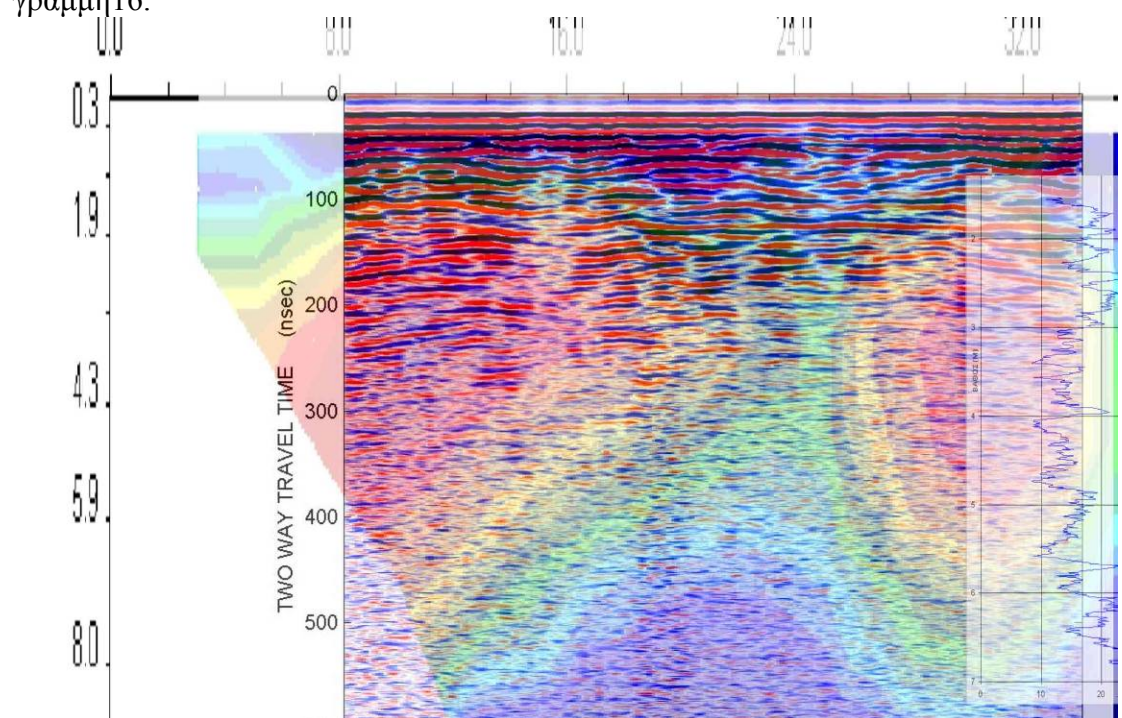
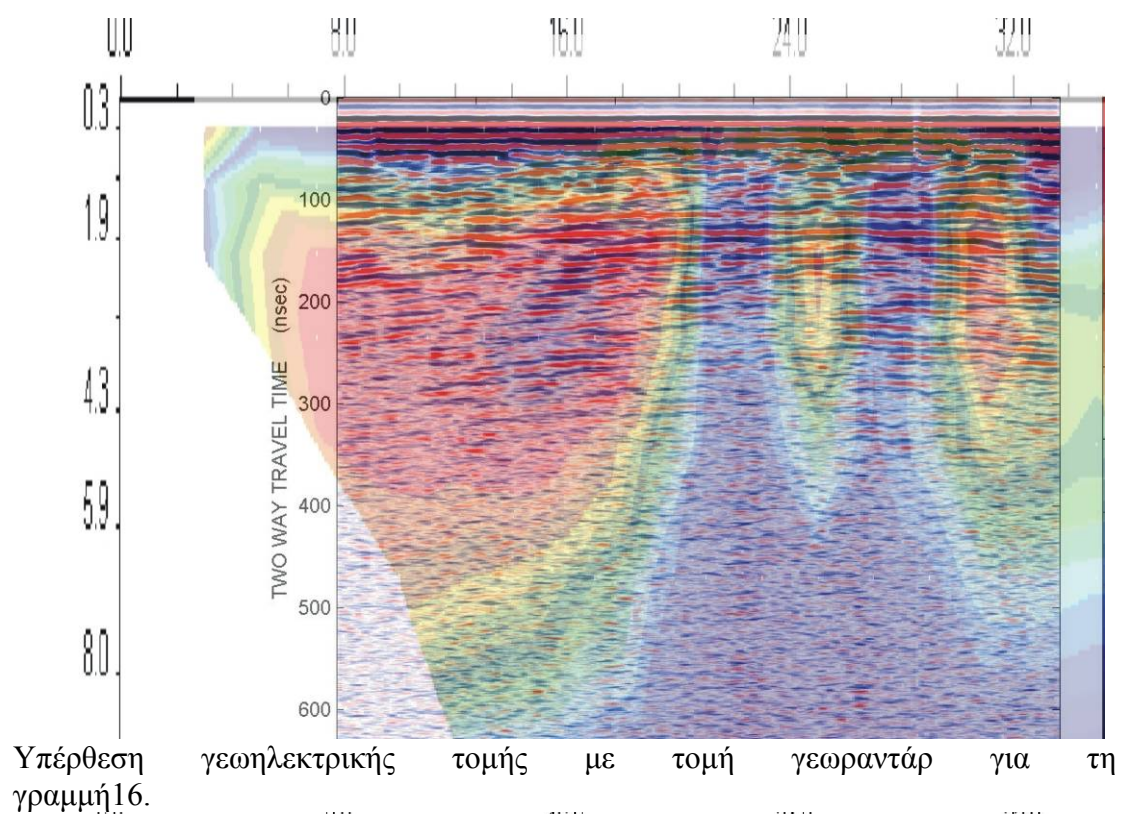


Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 12.



Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 14.

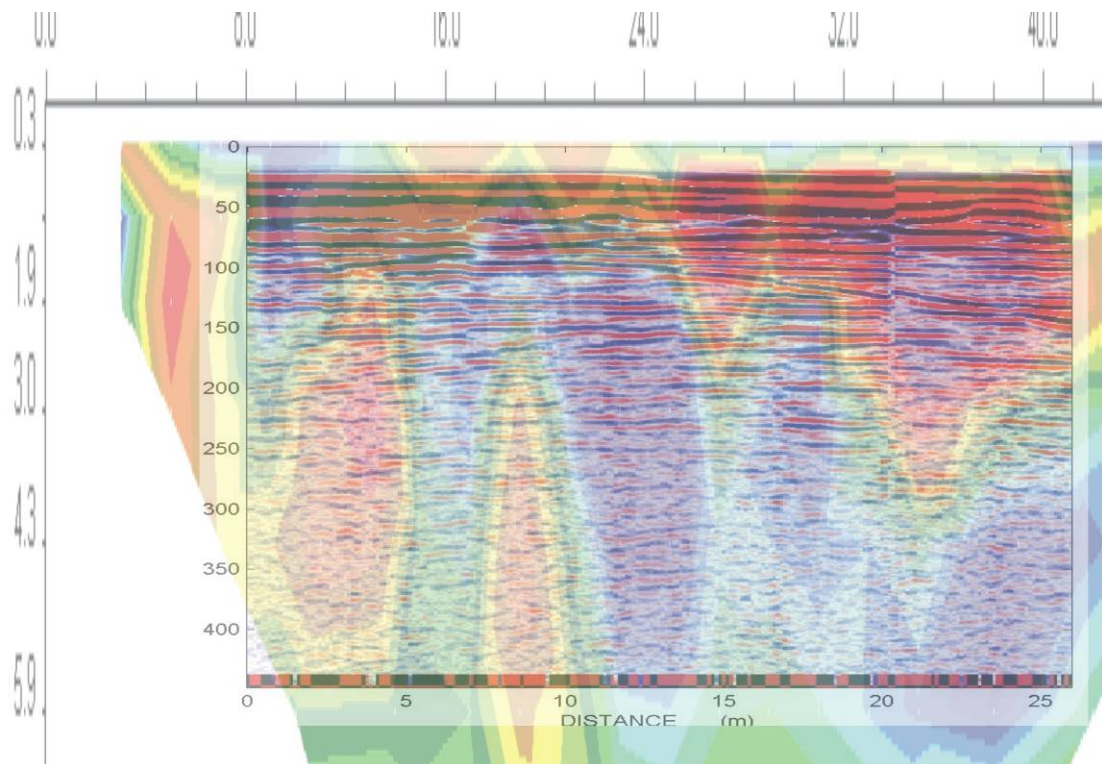




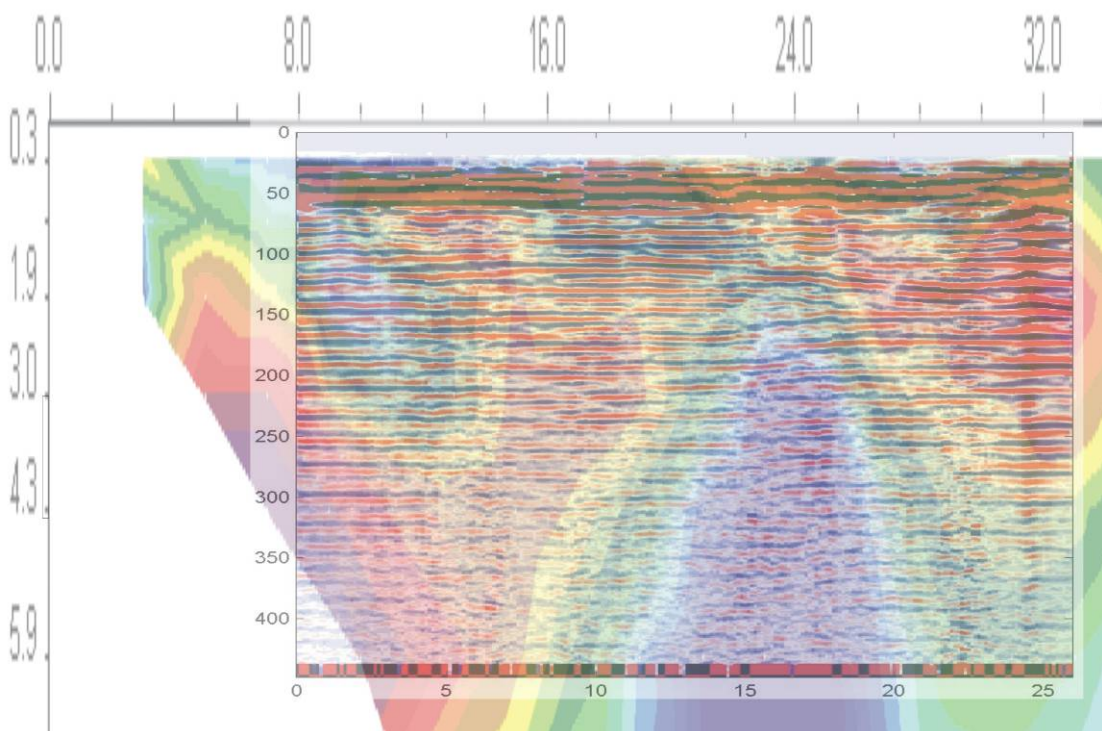
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 18 και την διαγραφή φυσικής ραδιενέργειας στην γεώτρηση Α.



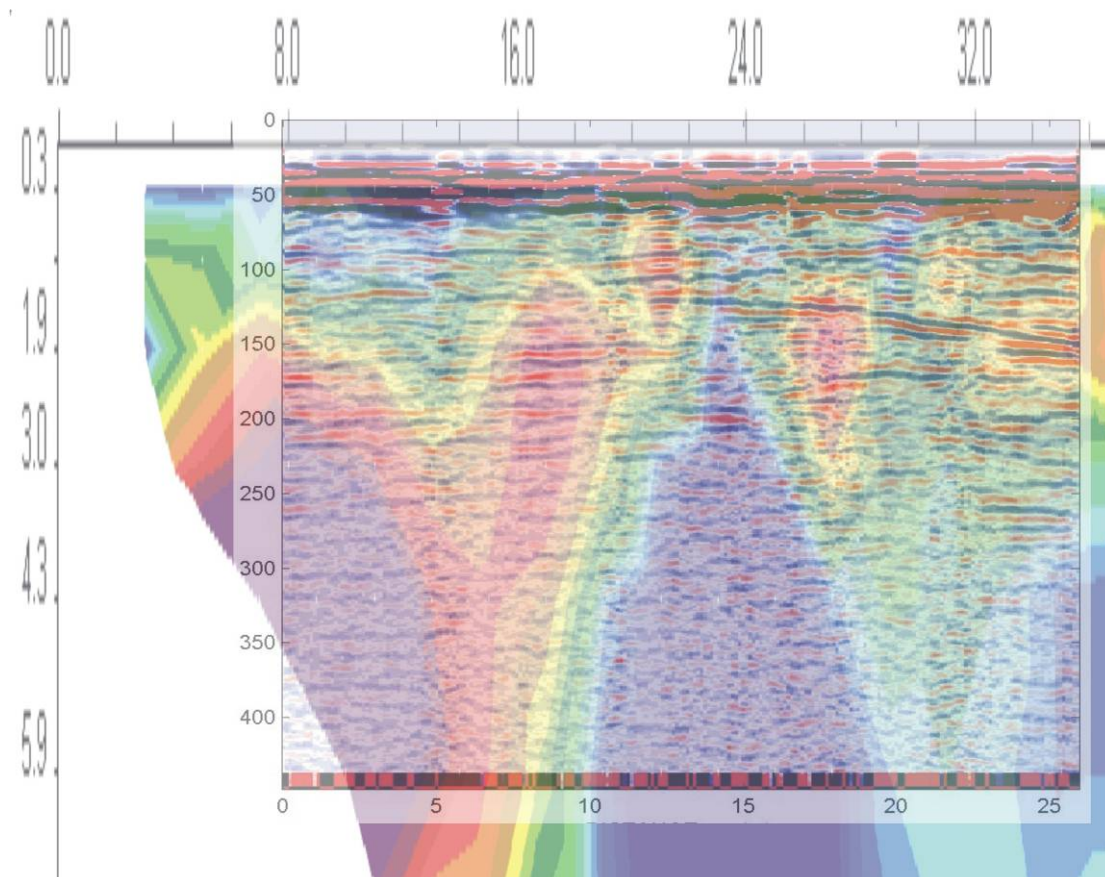
**A.4) Υπερθέσεις γεωηλεκτρικών τομών με τομές γεωραντάρ και με διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας της περιόδου Νοεμβρίου 2005 στην περιοχή Α**



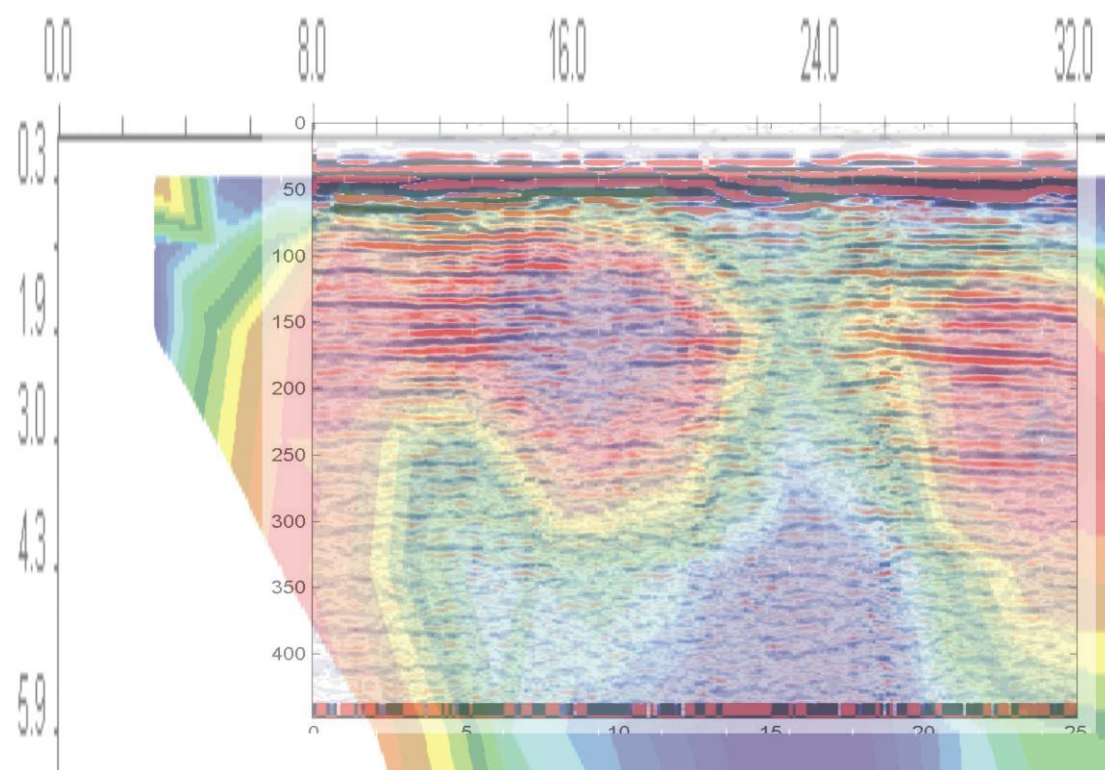
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 00. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



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

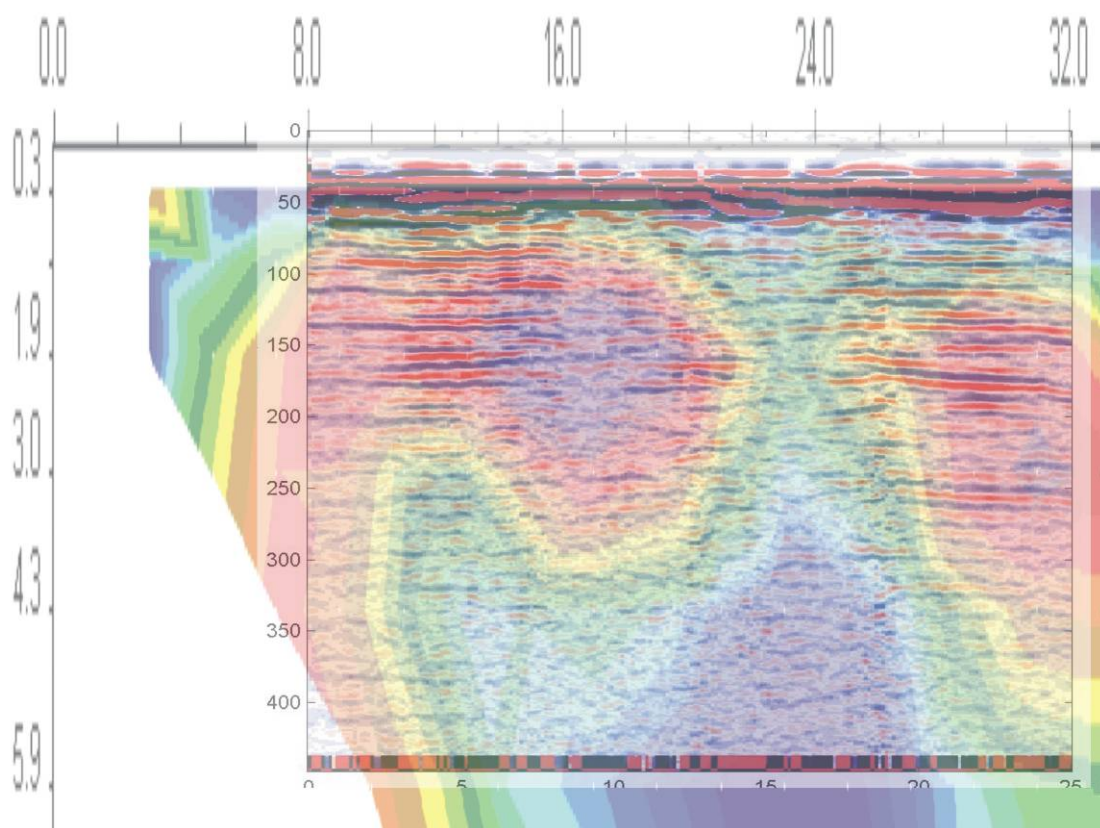


Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 04. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

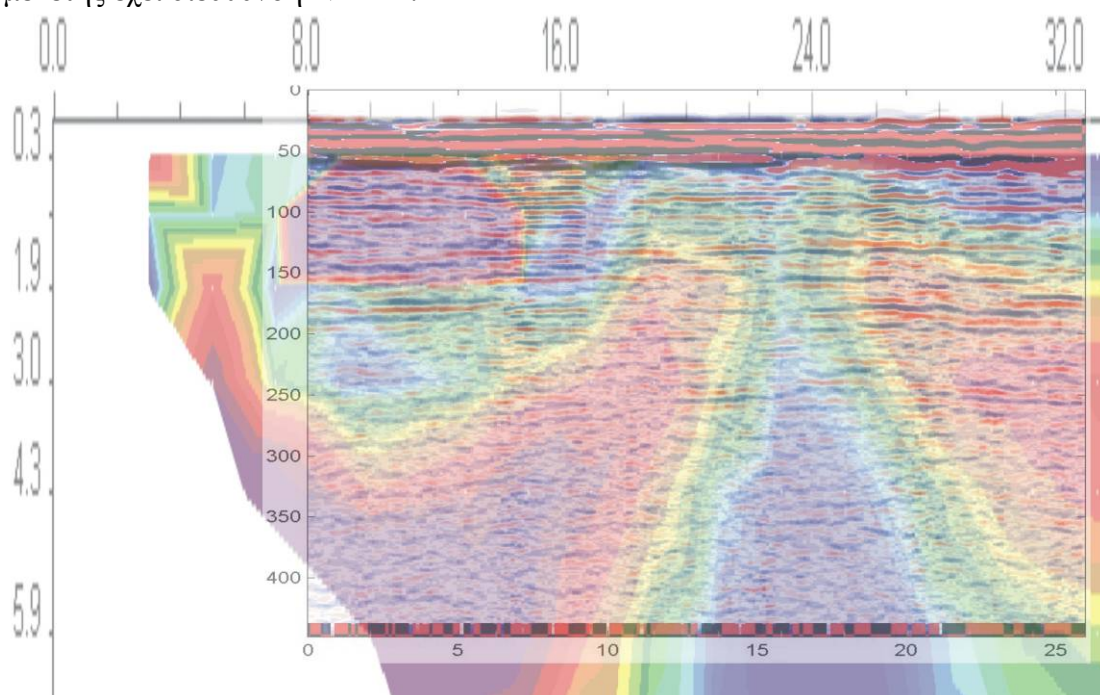


Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 06. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

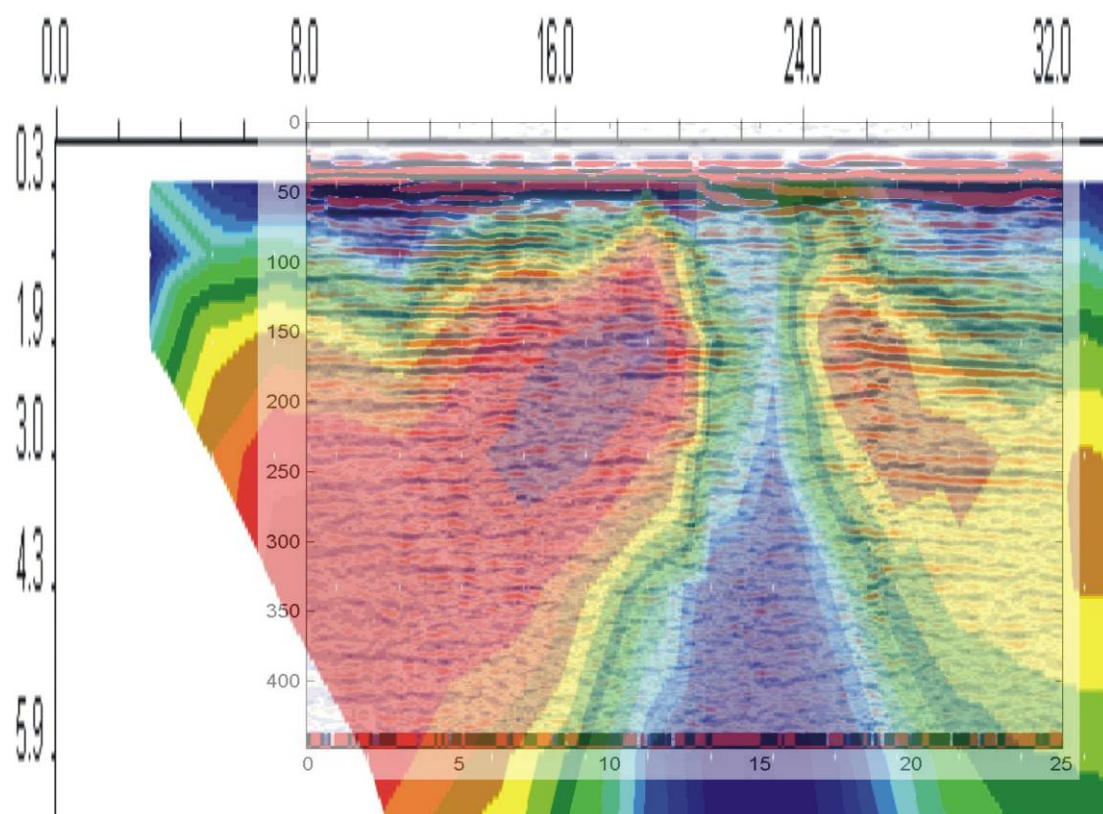




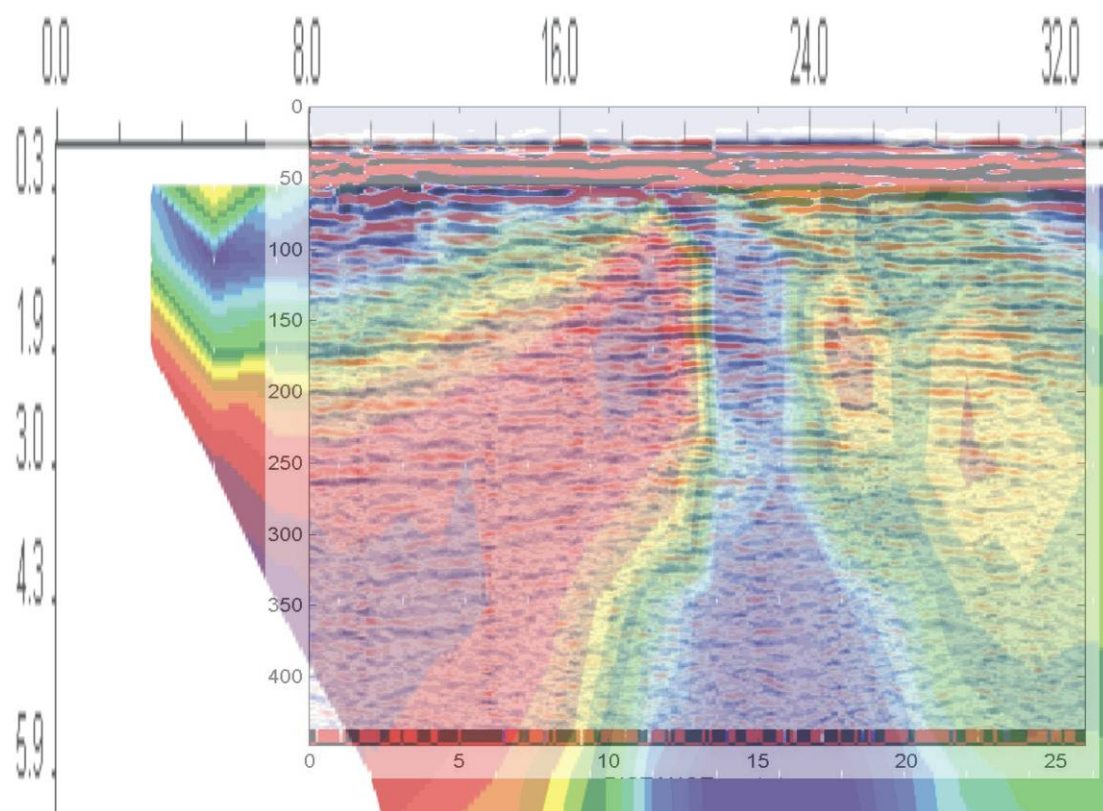
Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 08. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



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

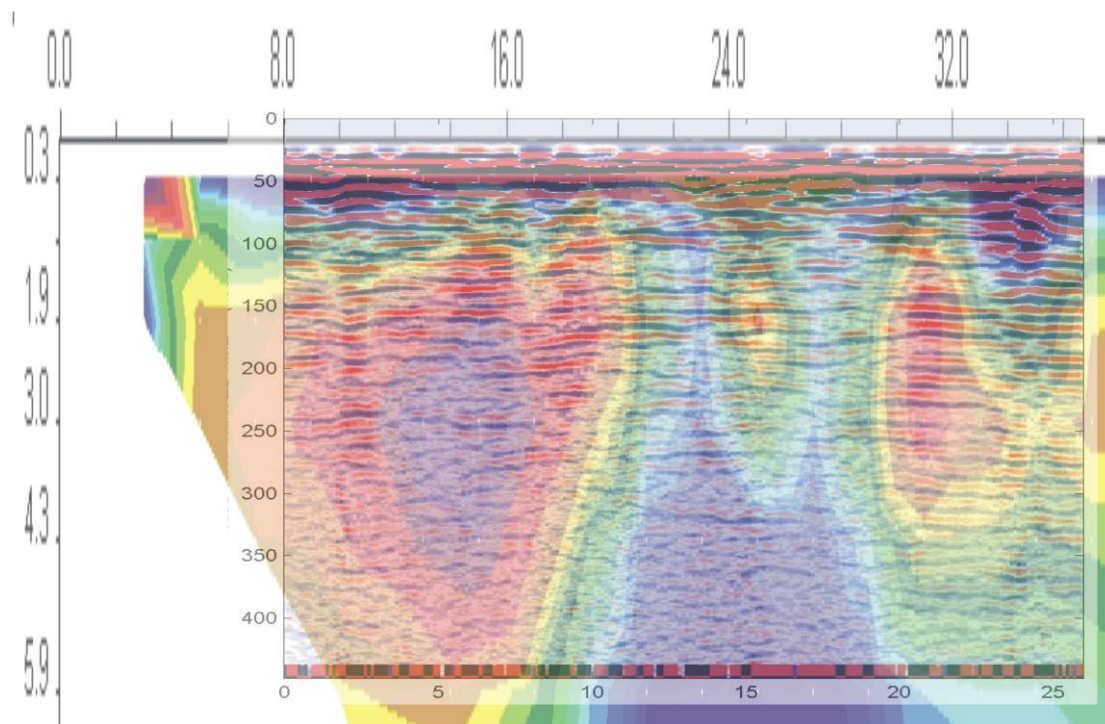


Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 12. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.

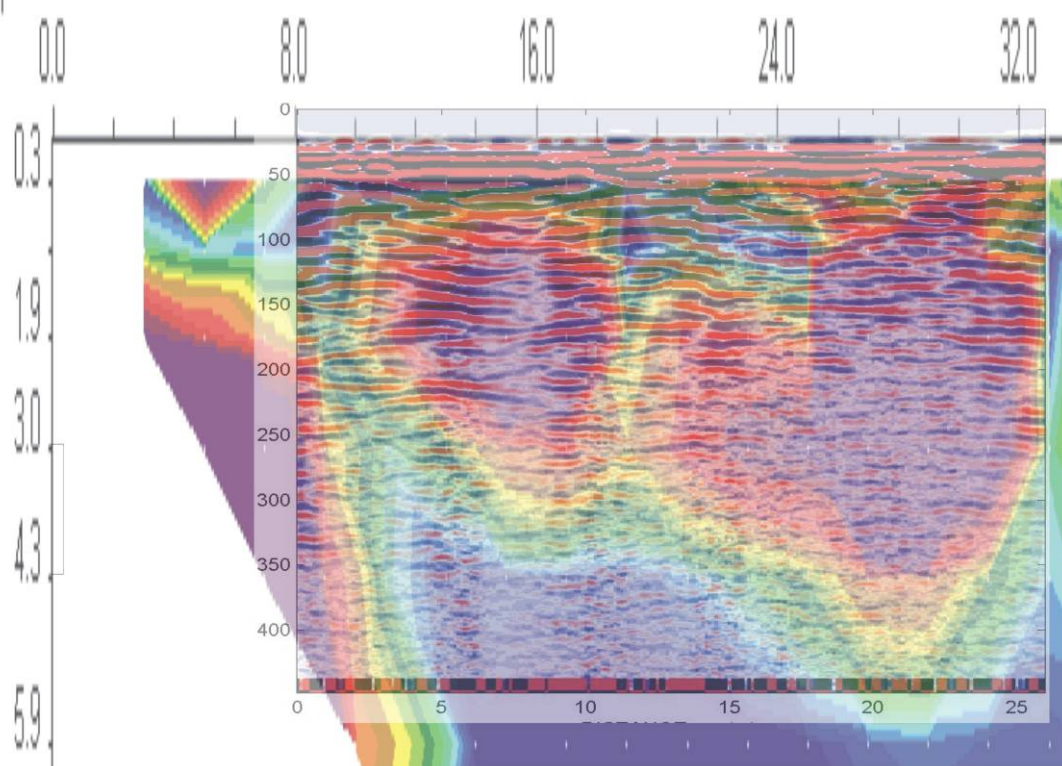


Υπέρθεση γεωηλεκτρικής τομής με τομή γεωραντάρ για τη γραμμή 14. Η γραμμή μελέτης έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.





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



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

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αντωνίου Α. (2007). Συμβολή της μεθόδου του γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης από υδρογονάνθρακες, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. Αντωνοπούπου Κ., Μποτωνάκης Δ. (2006). Γεωφυσική διασκόπηση με τις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ σε περιοχή ρυπασμένη από χλωριομένους υδρογονάνθρακες, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
3. Βαφειδής Α. (2001). Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II.
4. Μερτίκας Σ. (1999). Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Ιων.
5. Παπαβασιλείου Α. (2004). Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ με την χρήση νευρωνικών δικτύων – εφαρμογές σε περιβαλλοντικά προβλήματα, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
6. Παπακωνσταντίνου Π. (2006). Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ για τον εντοπισμό καρστικών δομών στο οροπέδιο Ομαλού Χανίων, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
7. Πουλιούδης Γ. (2001). Μέθοδοι επεξεργασίας καταγραφών γεωραντάρ, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
8. Σπανουδάκης Ν. (2001). Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
9. Σπανουδάκης Ν. (2002). Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

10. Τζιμούρτος Μ., Κουκαδάκη Μ. (2002). Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων νερών, Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
11. Χορευτάκη Γ. (2006). Ανάπτυξη μεθόδου επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ για τον εντοπισμό διάκενων και εγκοίλων σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Εφαρμογή σε δεδομένα από το λατομείο Ζωφόρων, Ν.Ηρακλείου, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

#### **Διεθνής Βιβλιογραφία**

1. Chen Q., Sidney S. (1997). Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring, The Leading Edge, 1997 Yearbook, Vol 16, No 5, pp 445-456.
2. Kulkarni A. (1998). Artificial Neural Networks for Image Understanding.
3. Taner M. T. (1992-2000). Attributes Revisited.