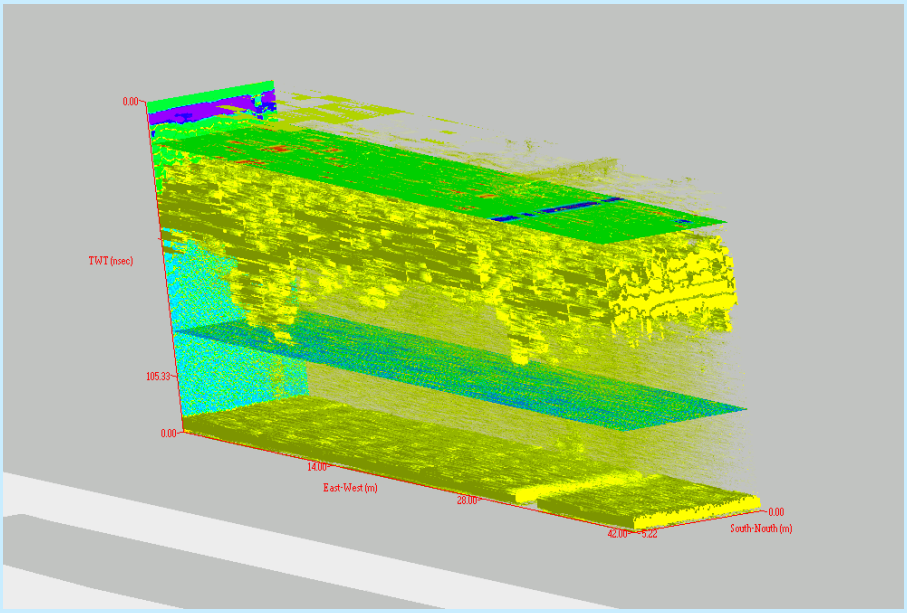
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ (ΜΕΤΑΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ ΤΙΜΩΝ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΦΑΝΕΙΑΣ): ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ PORTO PETROLI

ΣΟΦΙΑΚΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ.(επιβλέπων)

Κομνίτσας Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Κ.

Γαλετάκης Μιχαήλ, Λέκτορας Π.Κ.

ΧΑΝΙΑ

Σεπτέμβριος 2004

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την περάτωση της διπλωματικής αυτής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Αντώνιο Βαφείδη για την ανάθεση της εργασίας και τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη.

Τον κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα Αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και τον κ. Μιχάλη Γαλετάκη Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τον κ. Σπανουδάκη Ν. υποψήφιος Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για το χρόνο, την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τους κ. Κρητικάκη Γ. και κ. Hamdan Η. υποψήφιους Διδάκτορες και τη κ. Κουκαδάκη Μ. Μεταπτυχιακό του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για τη βοήθειά τους.

Τέλος την οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας όσο και των σπουδών μου γενικότερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της εφαρμογής μεθόδων ταξινόμησης σε δεδομένα που συλλέχθηκαν με το γεωραντάρ καθώς επίσης εξετάζεται η συνεισφορά της τεχνικής του γεωραντάρ στην προσπάθεια για εντοπισμό και οριοθέτηση της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών.

Ως εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα, εξετάζεται η περίπτωση ρύπανσης στην περιοχή *'Porto Petroli'* της Ιταλίας, όπου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα με γεωραντάρ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που ελήφθησαν κατά τη συγκεκριμένη διασκόπηση και σε αυτά εφαρμόζονται μέθοδοι ταξινόμησης, αυτόματης και καθοδηγούμενης προκειμένου να γίνει η επεξεργασία τους. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ερμηνεία και συσχέτιση με στοιχεία προηγούμενων ερευνών στην εν λόγω περιοχή μελέτης. Επιδιώκεται η ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και η συσχέτισή τους με πιθανούς ρυπογόνους παράγοντες.

Συμπεράσματα εξάγονται σχετικά με την ύπαρξη ρύπανσης στη συγκεκριμένη περιοχή, καθώς επίσης με την εφαρμογή των μεθόδων ταξινόμησης στα δεδομένα του γεωραντάρ και αξιολογείται η ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Παράλληλα, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των μαθηματικών αλγορίθμων επεξεργασίας, ως προς τη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των σημάτων γεωραντάρ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....**II**
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....**III**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....**1**
1.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....**1**
1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ.....**2**
1.3 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ.....**2**
1.4 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....**3**
1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....**3**
1.6 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣΕΡΓΑΣΙΑΣ.....**4**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....**6**
2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....**6**
2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....**7**
2.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....**9**
2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....**11**
2.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΡΕΥΝΑΣ.....**12**
2.5.1 Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου.....12
2.5.2 Γεωμετρία στόχου.....13
2.5.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης.....14
2.5.4 Περιβάλλον διασκόπησης.....15
2.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....**15**
2.7 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....**19**
2.7.1 Συχνότητα εκπομπής.....19
2.7.2 Ολικός χρόνος καταγραφής.....20
2.7.3 Διάστημα δειγματοληψίας.....20
2.7.4 Βήμα διασκόπησης.....21
2.7.5 Απόσταση κεραιών.....22
2.7.6 Προσανατολισμός κεραιών.....22

2.7.7 Κατακόρυφη υπέρθεση 24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ 25

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 25

3.2 ΦΙΛΤΡΑ 25

3.2.1 Φίλτρα διόρθωσης 26

3.2.2 Φίλτρο μέσου σημείου ή κινητού μέσου όρου 26

3.2.3 Φίλτρο μέσου ίχνους 27

3.2.4 Φίλτρο διαφοράς ιχνών 27

3.2.5 Φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων 28

3.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ 28

3.3.1 Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης 28

3.3.2 Εκθετική ενίσχυση σήματος λόγω απωλειών διασποράς 29

3.3.3 Σταθερή ενίσχυση 30

3.4 ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΜΙΓΑΔΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ 30

3.4.1 Στιγμιαίο πλάτος 31

3.4.2 Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα ‘decibel’ 31

3.4.3 Ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους 32

3.4.4 Στιγμιαίο φασματικό εύρος 32

3.4.5 Στιγμιαία φάση 32

3.4.6 Κανονικοποιημένο πλάτος 33

3.4.7 Γινόμενο του πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης 33

3.4.8 Γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης 33

3.4.9 Στιγμιαία συχνότητα 34

3.4.10 Σταθμισμένη μέση συχνότητα 34

3.4.11 Δείκτης λεπτών στρωμάτων 34

3.4.12 Επιτάχυνση της φάσης 35

3.4.13 Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας 35

3.4.14 Συνάφεια 35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 37

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 37

4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ 37

4.3 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΤΑΞΙΝΙΜΗΣΗ....38

4.3.1 Αυτόματη ταξινόμηση.... 39

4.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ Η΄ Κ-ΜΕΣΩΝ ΤΙΜΩΝ....39

4.4.1 Συνένωση, απαλοιφή και κατάτμηση ομάδων....41

4.5 ΚΑΘΟΔΗΓΟΥΜΕΝΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ....42

4.6 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΦΑΝΕΙΑΣ....43

4.6.1 Ο κανόνας απόφασης της ταξινόμησης μέγιστης πιθανοφάνειας....44

4.6.2 Κανονική κατανομή του Gauss....45

4.6.3 Όριο αποδοχής και απόρριψης....45

4.6.4 Περιορισμοί και πεδία εκπαίδευσης....48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 'PORTO PETROLI'….……49

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 49

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ PORTO PETROLI 49

5.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 50

5.4 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.... 51

5.5 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ PORTO PETROLI 51

5.5.1 Περιγραφή της τοποθεσίας και των προκαταρκτικών μελετών 52

5.5.2 Διεξαγωγή μετρήσεων και συλλογή δεδομένων γεωραντάρ 60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ PORTO PETROLI-ERMHNEIA…….....67

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.... 67

6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ....67

6.2.1 Αρχική επιλογή συνδυασμών μιγαδικών χαρακτηραστικών 68

6.2.2 Δοκιμαστική ταξινόμηση και τελική επιλογή των συνδυασμών μιγαδικών χαρακτηριστικών.... 75

6.3 ΚΥΡΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ....85

6.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΦΙΛ....88

6.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ TRANSFORM ΚΑΙ T3d.....88

6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ....98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 103

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας

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

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

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

1.2 Αποτελεσματικότητα γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα

Οι ρυπογόνες ουσίες του υπεδάφους συνήθως κατεισδύουν μέσω των γεωλογικών στρωμάτων και ρυπαίνουν το υπόγειο νερό. Από τη στιγμή που θα ξεκινήσει η αποκατάσταση του εδάφους και αρχίσει σταδιακά η απορρύπανση, ο βαθμός και η αποτελεσματικότητα του καθαρισμού πρέπει να ελέγχονται σε τακτά διαστήματα. Οι γεωφυσικές τεχνικές επιτρέπουν την παρακολούθηση της αποκατάστασης του εδάφους, προκειμένου να διαπιστώσουν την περαιτέρω ρύπανση. Παράλληλα, μειώνουν αισθητά το κόστος των γεωτρήσεων, καθώς με τη διεξαγωγή τους στο αρχικό στάδιο της μελέτης διαφωτίζουν τόσο την κατάσταση της υπεδάφειας ρύπανσης, όσο και τη στρωμάτωση του υπεδάφους.

Περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως ο εντοπισμός διαρροών καυσίμου από υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, η ανίχνευση και οριοθέτηση εγκαταλελειμμένων χωματερών, η εύρεση θαμμένων απορριμμάτων, η απεικόνιση της κατανομής της ρύπανσης (*contaminant plumes*) στο υπόγειο νερό, η χαρτογράφηση ρυπογόνων περιοχών και η παρακολούθηση μέτρων «θεραπείας» για την αποκατάσταση του προβλήματος, αντιμετωπίζονται πλέον με μεγαλύτερη ευκολία, μειωμένο κόστος και ασφαλή αποτελέσματα με τη βοήθεια της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

1.3 Εφαρμοσμένη γεωφυσική στη μελέτη της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών

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

Ειδικότερα, οι μέθοδοι της ηλεκτρικής αντίστασης και του γεωραντάρ είναι σε θέση να ανιχνεύσουν άμεσα την παρουσία ρύπανσης στο υπέδαφος, μετρώντας τη μεταβολή στην αγωγιμότητα του εδάφους, η οποία προκαλείται από τους ρυπογόνους παράγοντες. Αντίθετα, άλλες γεωφυσικές τεχνικές, όπως η σεισμική ανάκλαση και διάθλαση, η μαγνητομετρία και οι ακτίνες-γ, δεν είναι κατάλληλα εργαλεία για την "άμεση" ανίχνευση της ρύπανσης. Εντούτοις, προσδίδουν πληροφορίες στην αναγνώριση των λιθολογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών του υπεδάφους, οι οποίες με τη σειρά τους συμβάλλουν στη εξάπλωση της ρύπανσης.

Η γεωφυσική χρησιμοποιείται ως εργαλείο "έμμεσης" ανίχνευσης υπεδάφειας ρύπανσης. Ενδεικτικά αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις στις οποίες η ρύπανση υπογείου νερού είτε ανιχνεύεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, ώστε να μη μπορεί να επηρεάσει την ηλεκτρική αντίσταση ή αγωγιμότητα του νερού, είτε δεν επηρεάζει αισθητά καμία από τις φυσικές ιδιότητες του υγιούς πετρώματος

1.4 Συμβολή του γεωραντάρ

Το γεωραντάρ κατατάσσεται στις σύγχρονες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης. Αποτελεί μία από τις πλέον εύχρηστες, χαμηλού κόστους και υψηλής αποτελεσματικότητας γεωφυσικές μεθόδους.

Η υψηλή διακριτική ικανότητα και ακρίβεια με την οποία περιγράφει την κατανομή των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων στο υπέδαφος, προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα στην προσπάθεια για αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ο καθορισμός του πάχους γεωλογικών στρωμάτων και του βάθους των υδροφόρων οριζόντων, η ανίχνευση και οριοθέτηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά, η χαρτογράφηση της κατανομής των ρυπογόνων ουσιών σε υπεδάφειες περιοχές, αποτελούν βασικά αντικείμενα ενασχόλησης της τεχνικής του γεωραντάρ στον περιβαλλοντικό τομέα.

Θα πρέπει, τέλος, να τονισθεί ότι η αποτελεσματικότητα εφαρμογής του γεωραντάρ εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας του σήματος καταγραφής. Συνεπώς, με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, καθίσταται χρήσιμο εργαλείο απεικόνισης του υπεδάφους, διαρκώς εξελισσόμενο και με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών και δυνατοτήτων.

1.5 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Τα αντικείμενα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- Η επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ με μεθόδους αυτόματης και καθοδηγούμενης ταξινόμησης - Κ μέσων τιμών και μέγιστης πιθανοφάνειας, αντίστοιχα.

- ⇨ Η χρησιμότητα των παραπάνω μεθόδων σε περιβαλλοντικά προβλήματα και συγκεκριμένα στην περιοχή Porto Petroli της Ιταλίας.

Επιδιώκονται:

- Η κατανόηση και ανάδειξη της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα.
- Η εξέταση της χρησιμότητας των μεθόδων ταξινόμησης στα αρχικά δεδομένα των καταγραφών του γεωραντάρ.
- Η βελτίωση της απεικόνισης των αρχικών καταγραφών του γεωραντάρ.
- Ο προσδιορισμός των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση της μεθόδου του γεωραντάρ στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων.

1.6 Δομή διπλωματικής εργασίας

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

Κεφάλαιο 2: Περιγράφονται η αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ, οι κυριότερες εφαρμογές της μεθόδου και οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό μίας διασκόπησης.

Κεφάλαιο 3: Αναλύονται οι τεχνικές μαθηματικής επεξεργασίας που εφαρμόζονται στις καταγραφές γεωραντάρ (φίλτρα, τύποι ενίσχυσης, στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά). Περιγράφεται η συμβολή τους στη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των δεδομένων.

Κεφάλαιο 4: Περιγράφονται οι μέθοδοι ταξινόμησης που χρησιμοποήθηκαν για την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων από τις καταγραφές του γεωραντάρ. Οι μέθοδοι αυτές είναι η ταξινόμηση επαναλαμβανόμενης βελτιστοποίησης ή Κ μέσων τιμών (k-means Clustering) και η ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας (Discriminant Analysis).

Κεφάλαιο 5: Περιγράφεται η περιοχή 'PORTO PETROLI' στην οποία έγιναν οι μετρήσεις με το γεωραντάρ καθώς και οι γεωφυσικές εργασίες πεδίου.

Κεφάλαιο 6: Αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και τα στάδια που επιτελέστηκαν στην επεξεργασία των αρχικών δεδομένων καθώς και η σύγκριση με την επεξεργασία των δεδομένων των ηλεκτρομαγνητικών διαγραφιών και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 7: Το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που απορρέουν από τη συμβολή των τεχνικών ταξινόμησης όταν αυτές εφαρμόζονται σε δεδομένα γεωραντάρ για την ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων εδαφών, αλλά και από την εφαρμογή της μεθόδου σε χώρο ρύπανσης στην συγκεκριμένη περιοχή της Ιταλία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

2.1 Ιστορία του γεωραντάρ

Η τεχνολογία του ραντάρ (*Radio Detection And Ranging – RA.D.A.R*) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά με σκοπό τον εντοπισμό της θέσης κινητών και ακίνητων αντικειμένων από μεγάλη απόσταση. Οι πρώτοι σταθμοί ραντάρ κατασκευάστηκαν το 1930, ταυτόχρονα σχεδόν, στις Ηνωμένες Πολιτείες, Βρετανία, Γερμανία και πρώην ΕΣΣΔ. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε πολύ κατά το Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο για τη ραδιοανίχνευση εχθρικών πλοίων και αεροπλάνων, αλλά και μεταπολεμικά σε ειρηνικούς τομείς, όπως η πλοήγηση πλοίων, αεροπλάνων και πυραύλων, στους τεχνητούς δορυφόρους, τη μετεωρολογία, τη ραδιοαστρονομία κ.α.

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

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

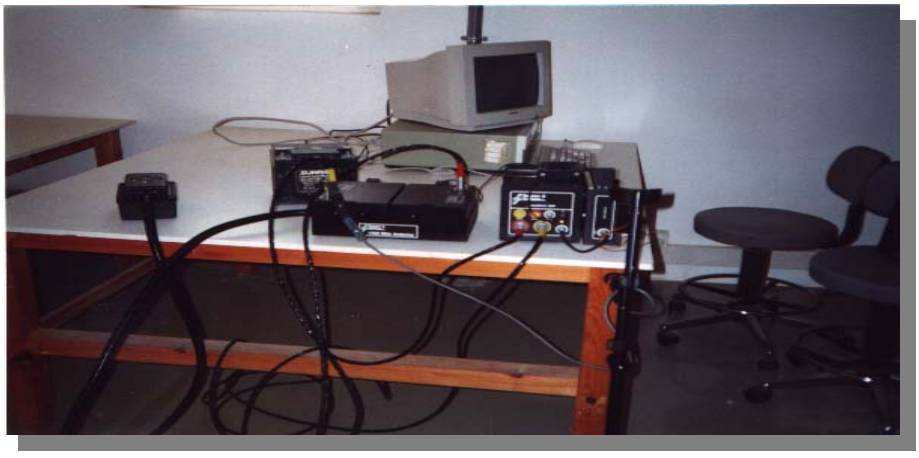
Παρόλα αυτά, οι γεωφυσικές διασκοπήσεις με τη χρήση του γεωραντάρ ξεκινούν μόλις τη δεκαετία του 1970. Σε αυτό συνέβαλε η ανάπτυξη της τεχνολογίας, οπότε και κατασκευάστηκαν φορητά και χαμηλότερου κόστους όργανα. Τη δεκαετία του 1980 η τεχνολογία του γεωραντάρ γνωρίζει μεγάλη άνθιση με την εισαγωγή των

ψηφιακών συστημάτων, τα οποία έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην επεξεργασία του σήματος και στην ανάπτυξη καινούργιων εφαρμογών.

2.2 Εφαρμογές

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

Η υψηλή ακρίβεια του ραντάρ προσφέρει λύσεις σε πολλά πρακτικά προβλήματα, όπως ο καθορισμός του πάχους γεωλογικών στρωμάτων και του βάθους υδροφόρων οριζόντων, ο εντοπισμός υπογείων εγκοίλων, στοών, και θαμμένων αρχαιοτήτων, η χαρτογράφηση των πάγων, και της έκτασης της ρύπανσης των υπογείων υδάτων, ο έλεγχος της κατάστασης της ασφάλτου, ο εντοπισμός θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, η ανεύρεση μεταλλικών και μη μεταλλικών αντικειμένων κ.α. Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιείται και για μετρήσεις σε γεωτρήσεις.



Εικόνα2.1: *Το σύστημα του γεωραντάρ (Σπανουδάκης, 2001).*

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

- ✓ Για γεωλογικούς σκοπούς, όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από τη διακριτική ικανότητα του ραντάρ. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως κεραίες συχνότητας 50MHz.

- ✓ Για εφαρμογές στις μη καταστροφικές δοκιμές (*Non Destructive Testing - NDT*). Σε αυτή την κατηγορία το ζητούμενο είναι η διακριτική ικανότητα του συστήματος και επομένως οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz.

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες εφαρμογές του γεωραντάρ.

Πίνακας 2.1: ***Εφαρμογές γεωραντάρ (Reynolds 1998, Mellet 1995, Al-Dajani 1990, Toshioka 1995, Tsoflias 1999, Al-Nuaimy 2000, Hugenschmidt 1998, Σπανουδάκης 2001)***

Γεωλογικές

Ανίχνευση εγκοίλων και ασυνεχειών

Χαρτογράφηση βυθισμάτων

Χαρτογράφηση επιφανειακών κοιτασμάτων

Έρευνα κοιτασμάτων και αξιολόγηση ορυκτών πόρων

Πάχος στρωμάτων τύρφης και αξιολόγηση της

Θέση σφηνών πάγου

Χαρτογράφηση ρωγμών σε ορυκτό αλάτι

Χαρτογράφηση προσχώσεων, επιπέδων ασυνεχειών κλπ

Χαρτογράφηση γεωλογικών δομών

Χαρτογράφηση λιμνιαίων και ποτάμιων ιζημάτων

Περιβαλλοντικές

Χαρτογράφηση ρυπογόνων περιοχών

Χαρτογράφηση ρύπων στο υπόγειο νερό

Έρευνα σε χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής

Εντοπισμός θαμμένων βυτίων και βαρελιών

Εντοπισμός διαρροής αερίων

Έρευνα για υπόγειο νερό

Επιστήμη μελέτης παγετώνων

Χαρτογράφηση του πάχους των πάγων

Προσδιορισμός εσωτερικής δομής των παγετώνων

Μελέτη κίνησης των πάγων

Ανίχνευση ρωγμών στη βάση των παγετώνων

Χαρτογράφηση καναλιών ροής νερού στους παγετώνες

Μελέτη της ισορροπίας της μάζας κάτω από τον παγετώνα

Χαρτογράφηση της στρωματογραφίας του πάγου

Κατασκευές

Ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους

Ανίχνευση αστοχιών / κενών

Προσδιορισμός οπλισμού στο τσιμέντο

Προσδιορισμός σωλήνων, καλωδίων

Μελέτη ακεραιότητας κατασκευαστικών υλικών

Δοκιμές στο τσιμέντο (concrete testing)

Αρχαιολογία

Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών

Εντοπισμός αρχαίων τάφων

Χαρτογράφηση πριν την ανασκαφή

Εντοπισμός, χαρτογράφηση αρχαίων δρόμων

Δικανικές επιστήμες

Εντοπισμός θαμμένων στόχων (πτώματα, μπάρες χρυσού κλπ)

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση του παρόντος κεφαλαίου, προέρχονται από τις διπλωματικές εργασίες των Πουλιούδη Γ. (1999), Σπανουδάκη Ν. (2001) και Κουκαδάκη Μαρίας-Τζιμούρτου Εμμανουήλ. Για οποιαδήποτε επιπλέον πληροφορία, ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στις άνωθεν διπλωματικές εργασίες.

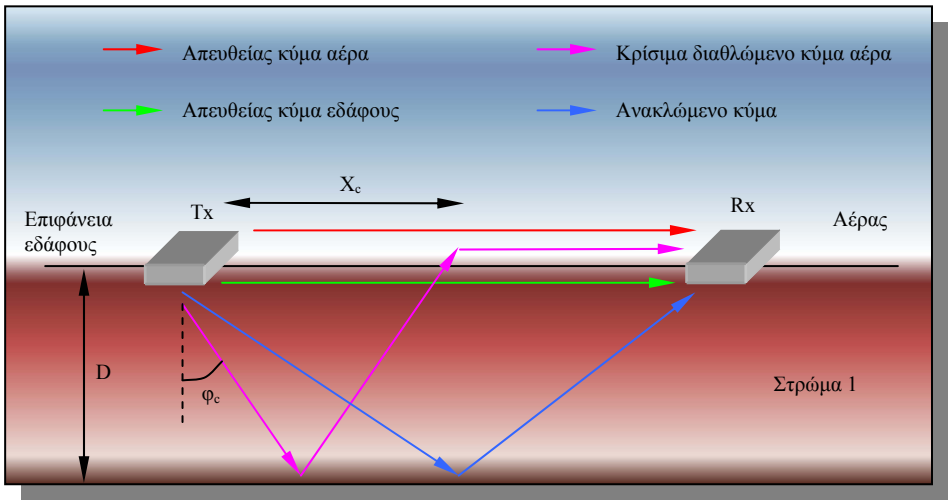
2.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

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

Το σύστημα του γεωραντάρ εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπό έρευνα υλικό. Ο παλμός, που διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec), «ταξιδεύει» στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Εκεί μέρος της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα

και η υπόλοιπη ανακλάται στην επιφάνεια, οπότε και επιστρέφει στην κεραία του δέκτη. Στη συνέχεια το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης προωθείται στη μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του κύματος. Η διάδοση του παλμού στο υπέδαφος είναι συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και της συχνότητας εκπομπής της κεραίας του πομπού. Η εκπομπή και λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από την ίδια κεραία (*monostatic mode*) ή από δύο διαφορετικές κεραίες (μία για την εκπομπή και μία για τη λήψη – *bistatic mode*).

Εκτός από τα ανακλώμενα κύματα η κεραία του δέκτη κατοπτεύει και τα απευθείας κύματα ή πρώτες αφίξεις (*first breaks*). Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στον δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια διεπιφάνεια (εικόνα 2.2). Εξαιτίας της μικρής διαδρομής που διανύουν καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη σε πολύ μικρούς χρόνους και πριν από όλα τα ανακλώμενα κύματα. Οι απώλειες σε ενέργεια των κυμάτων αυτών είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα.



***Εικόνα 2.2**: Γεωμετρία διάδοσης των κυριότερων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Πουλιούδης, 1999).*

Τα απευθείας κύματα είναι δύο ειδών: αυτά που διαδίδονται στον αέρα και αυτά που διαδίδονται κάτω ακριβώς από την επιφάνεια του εδάφους. Τα απευθείας κύματα του αέρα καταφθάνουν πρώτα στον δέκτη, ενώ ακολουθούν τα απευθείας του εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα στον αέρα παρά στο έδαφος.

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

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το χρόνο t_r που χρειάζεται ο παλμός για να ταξιδέψει από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη. Για τα ανακλώμενα κύματα ο χρόνος διαδρομής του παλμού t_r ισούται με:

$$t_r = \frac{\left(4D_r^2 + X^2\right)^{1/2}}{\upsilon} \Leftrightarrow t_r^2 = \frac{4D_r^2}{\upsilon^2} + \frac{X^2}{\upsilon^2} \qquad (2.1)$$

που δίδει:

$$D_r = \frac{\left[\left(t_r\upsilon\right)^2 - X^2\right]^{1/2}}{2} \qquad (2.2)$$

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

2.4 Σχεδιασμός διασκόπησης

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

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

2.5 Αξιολόγηση του πεδίου έρευνας

Οι πληροφορίες και τα δεδομένα που συλλέγονται στο αρχικό στάδιο αξιολογούνται, έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι εφικτό ή όχι να εφαρμοστεί η μέθοδος του γεωραντάρ. Προκειμένου να δοθεί επομένως απάντηση σε αυτό το ερώτημα, είναι καθοριστική η μελέτη των παρακάτω σημείων:

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

Μία σωστή αξιολόγηση προϋποθέτει την πραγματοποίηση διασκόπησης με τη μέθοδο του κοινού ενδιάμεσου σημείου, για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ταχύτητα και κατ' επέκταση η διηλεκτρική σταθερά του μέσου διάδοσης [1], είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διασκόπησης. Διαφορετικά ο υπολογισμός των διαφόρων παραμέτρων πρέπει να βασιστεί σε εκτιμήσεις, γεγονός, που ίσως οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα.

2.5.1 Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου

Είναι αυτονόητο, ότι εάν το βάθος του στόχου είναι μεγαλύτερο από το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ο στόχος δεν θα μπορέσει να εντοπιστεί. Το μέγιστο βάθος διείσδυσης ή διαφορετικά η ακτίνα δράσης του γεωραντάρ, εξαρτάται άμεσα από την ηλεκτρική αγωγιμότητα των γεωλογικών

---

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

σχηματισμών στους οποίους διαδίδεται. Όταν η αγωγιμότητα είναι μεγάλη, το βάθος διείσδυσης είναι μικρό.

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

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

$$d_{\max} = \frac{35}{\sigma} \tag{2.3}$$

$$d_{\max} < \frac{30}{\alpha} \tag{2.4}$$

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4} \tag{2.5}$$

όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης (S/m), α ο συντελεστής εξασθένισης (dB/m) και λ το μήκος κύματος. Η εξίσωση 2.4 ισχύει για μέσες και υψηλές τιμές εξασθένισης (<0,1dB/m) (Πουλιούδης, 1999).

2.5.2 Γεωμετρία στόχου

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

είναι δυνατόν πάντα να γνωρίζουμε τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό του στόχου.

2.5.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης, που ενδιαφέρουν την τεχνική του γεωραντάρ, είναι η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα (ε_r, σ). Εξαιτίας της ανομοιογένειάς του το μέσο διάδοσης μπορεί να παρουσιάσει διαφορές στις ηλεκτρικές ιδιότητες. Όταν οι διαφορές αυτές είναι συγκρίσιμες με την διαφορά των ηλεκτρικών ιδιοτήτων στόχου και μέσου διάδοσης, τότε ο στόχος δύσκολα αναγνωρίζεται.

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

$$P_r = \left[\frac{(\varepsilon_{r1}^{1/2} - \varepsilon_{r2}^{1/2})}{(\varepsilon_{r1}^{1/2} + \varepsilon_{r2}^{1/2})} \right]^2 \qquad (2.6)$$

όπου ε_{r1} και ε_{r2} είναι οι διηλεκτρικές σταθερές του μέσου διάδοσης και του στόχου αντίστοιχα. Όταν η αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες είναι μεγάλη και η ενέργεια των ανακλώμενων κυμάτων είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του θορύβου, τότε ο συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0,01 (τιμή αναφοράς για τον εντοπισμό οποιουδήποτε στόχου).

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

Πίνακας 2.2: *Συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας για διάφορα υλικά, όταν το μέσο διάδοσης είναι ο αέρας (Σπανουδάκης, 2001).*

Στόχος	ε_r	P_r
Οπλισμός από σίδηρο	16	0,01
Αέρας (ρωγμή)	1	0,1

Πίνακας 2.3: *Συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας για διάφορα υλικά, όταν το μέσο διάδοσης είναι τσιμέντο (Σπανουδάκης, 2001).*

2.5.4 Περιβάλλον διασκόπησης

Η μέθοδος του γεωραντάρ επηρεάζεται από περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Η χρήση της δεν ενδείκνυται σε περιοχές όπου υπάρχουν εγκατεστημένοι μεταδότες ραδιοκυμάτων και αυτό διότι οι ευαίσθητες κεραίες του γεωραντάρ κατοπτεύουν, τόσο αυτά τα ισχυρά ραδιοκύματα όσο και τον ανακλώμενο από το στόχο παλμό.

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

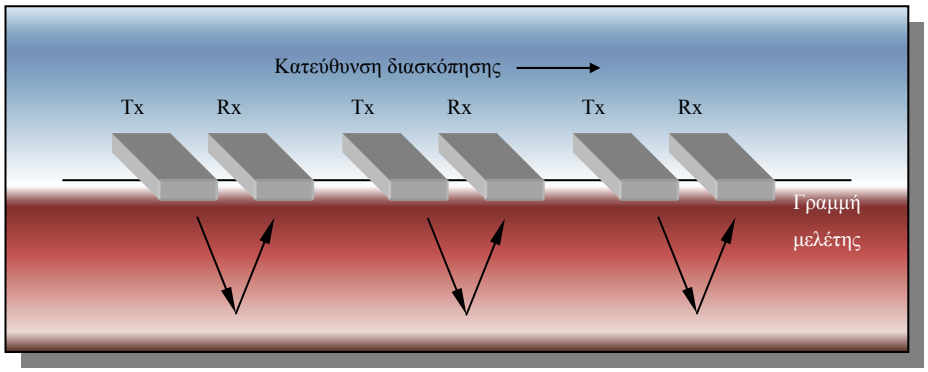
Οι κλιματικές συνθήκες επίσης επηρεάζουν τη λειτουργία του γεωραντάρ. Το ραντάρ δεν μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία και βρόχινες συνθήκες. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις κάτω από συνθήκες υψηλής εδαφικής υγρασίας ενδέχεται να παρουσιάσουν διαφοροποίηση σε σχέση με δεδομένα που συλλέγονται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

2.6 Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης

Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί διαφορετική διάταξη πομπού-δέκτη για τη συλλογή των δεδομένων, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε διασκόπησης. Τέσσερις από τις πιο συνηθισμένες διατάξεις είναι οι εξής:

- ***Διάταξη σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη:*** Είναι η πιο συνηθισμένη διάταξη και εφαρμόζεται στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων. Για το σκοπό

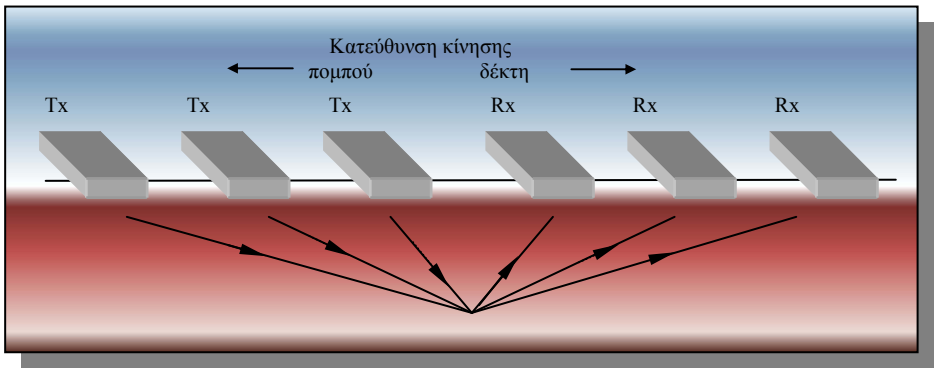
αυτό οι κεραίες του πομπού και του δέκτη κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης, διατηρώντας συγκεκριμένο προσανατολισμό και σταθερή απόσταση (εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: *Διασκόπηση με τη διάταξη σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη, όπου T_x είναι η κεραία του πομπού και R_x του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).*

- ***Διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Midpoint):*** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος. Για το λόγο αυτό οι δύο κεραίες απομακρύνονται από σταθερό σημείο κατά μήκος της γραμμής μελέτης και παράλληλα καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής του κύματος για τον ίδιο ανακλαστήρα (εικόνα 2.4).

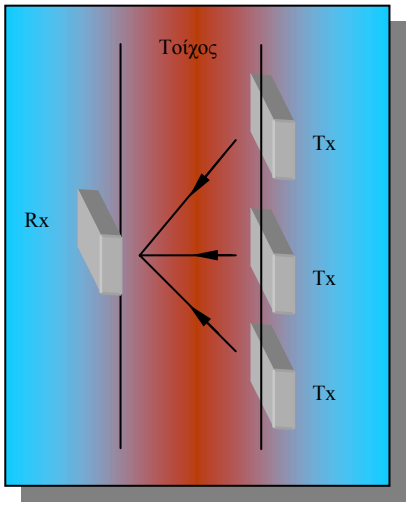
  Η βέλτιστη διάταξη των κεραιών είναι εκείνη όπου, ενώ οι κεραίες κινούνται κατά μήκος γραμμής μελέτης, κάθετης στο επίπεδο πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου (εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: *Η διάταξη του κοινού ενδιάμεσου σημείου, όπου Tx είναι η κεραία του πομπού και Rx του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).*

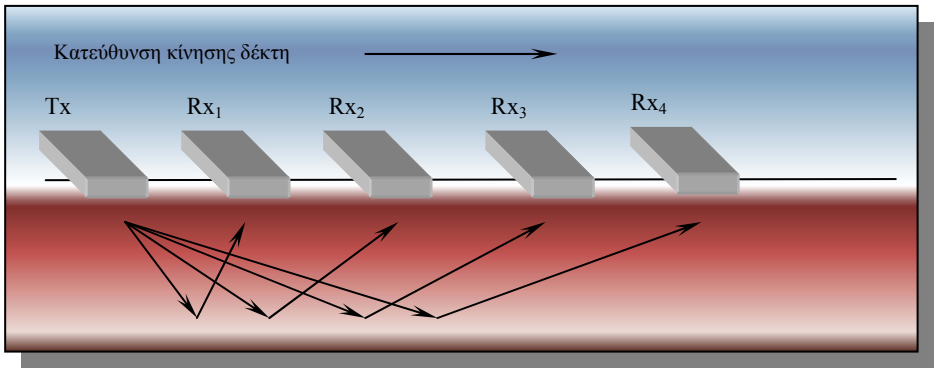
Η διασκόπηση με τη διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου είναι απλή. Σε πρώτο στάδιο προσδιορίζεται ένας ανακλαστήρας με τη βοήθεια της μεθόδου της ανάκλασης. Στη συνέχεια επιλέγεται σημείο της επιφάνειας του εδάφους ακριβώς επάνω από τον ανακλαστήρα, το οποίο θα αποτελέσει το κοινό ενδιάμεσο σημείο. Εκατέρωθεν του σημείου αυτού και στην ελάχιστη απόσταση πομπού – δέκτη τοποθετούνται οι κεραίες. Συνήθως, η αρχική ελάχιστη απόσταση είναι ίση με το βήμα διασκόπησης (βλέπε παρ.2.7.5), το οποίο επιλέχθηκε για τη διασκόπηση ανάκλασης που προηγήθηκε. Κατά τη διάρκεια της διασκόπησης η κάθε κεραία απομακρύνεται από το κοινό ενδιάμεσο σημείο κατά $n_x/2$ και η απόσταση πομπού - δέκτη αυξάνει σε ακέραια πολλαπλάσια του n_x. Η μέγιστη απόσταση πομπού – δέκτη δεν πρέπει να υπερβαίνει μία με δύο φορές το βάθος του ανακλαστήρα. Εάν η εξασθένιση είναι υψηλή, η ενέργεια του παλμού αποσβένει πριν επιτευχθεί η μέγιστη απόσταση.

- ***Μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination):*** Η μέθοδος αυτή δεν στηρίζεται στην ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως οι προηγούμενες, αλλά στη διέλευση του μέσα από τη μάζα του υλικού μελέτης. Οι κεραίες τοποθετούνται στις δύο απέναντι πλευρές του υλικού του οποίου θέλουμε να μελετήσουμε τις ιδιότητες, με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικρίζει η μία την άλλη (εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: *Διασκόπηση με τη μέθοδο της τομογραφίας, όπου Tx είναι η κεραία του πομπού και Rx του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).*

- ***Διάταξη σταθερού πομπού - κινούμενου δέκτη (Wide angle reflection and refraction):*** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης μέσα στο μέσο. Η διαφορά της από τη διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου έγκειται στο γεγονός ότι ο πομπός παραμένει σταθερός σε κάποιο σημείο, ενώ ο δέκτης κινείται πάνω στη γραμμή μελέτης με σταθερό βήμα (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: *Η διάταξη σταθερού πομπού - κινούμενου δέκτη, όπου Tx είναι η κεραία του πομπού (σταθερή) και Rx_i του δέκτη (κινούμενη) (Σπανουδάκης, 2001).*

2.7 Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης

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

- ✓ *συχνότητα εκπομπής*
- ✓ *ολικός χρόνος καταγραφής*
- ✓ *διάστημα δειγματοληψίας*
- ✓ *βήμα διασκόπησης*
- ✓ *απόσταση κεραιών*
- ✓ *προσανατολισμός κεραιών*
- ✓ *υπέρθεση*

2.7.1 Συχνότητα εκπομπής

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

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

$$f = \frac{150}{x\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (2.7)$$

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

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της συχνότητας είναι η χρήση του πίνακα 2.4. Οι τιμές του πίνακα βασίζονται στην πρακτική εμπειρία με την προϋπόθεση ότι η

απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα είναι περίπου το 25% του βάθους του στόχου. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας αυτός δεν θα πρέπει να αντικαταστήσει μία προσεκτική μελέτη του προβλήματος, αλλά απλά να αποτελέσει ένα πρόχειρο οδηγό αναφοράς.

Βάθος (m)	***0.5***	***1.0***	***2.0***	***5.0***	***10***	***30***	***50***
Κεντρική συχνότητα (MHz)	*1000*	*500*	*200*	*100*	*50*	*25*	*10*

Πίνακας 2.4: *Ενδεικτικές τιμές του βάθους διασκόπησης συναρτήσει της συχνότητας, υποθέτοντας ότι η χωρική διακριτική ικανότητα είναι το 25% του βάθους του στόχου (Πουλιούδης, 1999).*

2.7.2 Ολικός χρόνος καταγραφής

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

$$W = 1.3\frac{2d_{\max}}{\upsilon_{\min}} \qquad (2.8)$$

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

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

2.7.3 Διάστημα δειγματοληψίας

Μία από τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη λήψη των δεδομένων είναι το διάστημα δειγματοληψίας (*sampling interval*). Η παράμετρος αυτή εκφράζει το χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δύο σημείων μίας καταγραφείσας

κυματομορφής, όπου κάθε σημείο αντιπροσωπεύει δεδομένη χρονική στιγμή κατά την οποία λαμβάνεται η μέτρηση.

Το διάστημα δειγματοληψίας και πρέπει να είναι πάντα μικρότερο από το μισό της περιόδου του κύματος με τη μέγιστη συχνότητα εκπομπής. Η *συχνότητα Nyquist* f_N εξαρτάται από το διάστημα δειγματοληψίας. Τα περισσότερα συστήματα γεωραντάρ εκπέμπουν σε ένα εύρος συχνοτήτων που κυμαίνεται από $0,5f$ έως $1,5f$ (η f συμβολίζει την κεντρική συχνότητα εκπομπής). Τελικά, αν θεωρήσουμε ότι η f_N ισούται με τη μέγιστη συχνότητα εκπομπής $1,5f$ πολλαπλασιασμένη με συντελεστή ασφάλειας ίσο με δύο, τότε το διάστημα δειγματοληψίας δίνεται από την σχέση:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \rightarrow 1.5f = \frac{1}{2\Delta t} \xrightarrow{συντ.ασφάλειας2} \Delta t = \frac{1}{6f} \qquad (2.9)$$

όπου Δt το διάστημα δειγματοληψίας (sec).

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

2.7.4 Βήμα διασκόπησης

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

$$n_X = \frac{\lambda}{4} = \frac{75}{(\varepsilon_r)^{\frac{1}{2}} f} \qquad (2.10)$$

Όπου λ το μήκος κύματος.

2.7.5 Απόσταση κεραιών

Τα συστήματα γεωραντάρ προσφέρουν στο χρήστη τη δυνατότητα να μεταβάλλει, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, την απόσταση των κεραιών προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση της εξασθένισης του κύματος, αφού αυτό αναγκάζεται να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Μία εκτίμηση της βέλτιστης απόστασης των κεραιών S αποτελεί η ακόλουθη έκφραση:

$$S = \frac{2 \times d_{στόχου}}{\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \qquad (2.11)$$

όπου $d_{στ.}$ το βάθος του στόχου.

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

$$S = 0{,}2 * d_{στοχου} \qquad (2.12)$$

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

Πίνακας 2.5: *Συνοπτικός πίνακας κεντρικών συχνοτήτων εκπομπής και προτεινόμενης ελάχιστης απόστασης κεραιών (Πουλιούδης, 1999).*

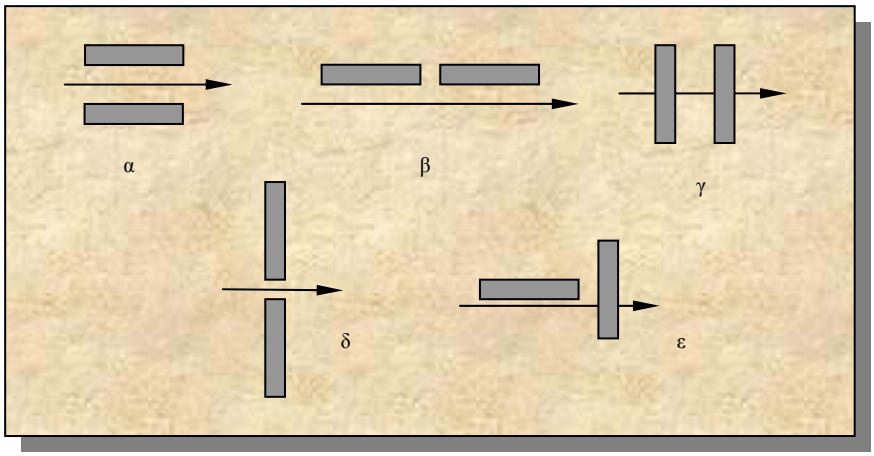
2.7.6 Προσανατολισμός κεραιών

Η παράμετρος που μελετάται στην παράγραφο αυτή είναι ο προσανατολισμός των κεραιών, δηλαδή η σχετική θέση μεταξύ τους και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης. Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γεωραντάρ είναι ωμικές,

διπολικές και ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός για την επιτυχή έκβαση των πειραμάτων. Η πιο συνηθισμένη διάταξη είναι αυτή κατά την οποία το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται παράλληλα με το μεγάλο άξονα των κεραιών (πομπού και δέκτη) και κάθετα ή παράλληλα με τη γραμμή μελέτης (εικόνα 2.7α και 2.7γ). Εάν οι κεραίες χρησιμοποιούν κυκλικά πολωμένο σήμα, ο προσανατολισμός των κεραιών είναι ασήμαντος. Τα περισσότερα όμως συστήματα γεωραντάρ του εμπορίου χρησιμοποιούν γραμμικώς πολωμένες κεραίες, οπότε ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός.

Όπως προαναφέρθηκε, ο προσανατολισμός των κεραιών περιλαμβάνει τόσο τη μεταξύ τους διάταξη όσο και τη σχετική τους θέση ως προς τη γραμμή μελέτης. Στην εικόνα 2.7 παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί προσανατολισμοί.

Η σπουδαιότητα του προσανατολισμού των κεραιών φαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα. Έστω γραμμή μελέτης η οποία διασχίζει κάθετα ένα θαμμένο μεταλλικό σωλήνα. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται παράλληλα με τον άξονα του σωλήνα (διάταξη εικόνας 2.7γ), τότε ο σωλήνας εμφανίζεται στα δεδομένα με τη μορφή υπερβολής σαν ένας εξαιρετικός ανακλαστήρας. Όταν οι κεραίες περιστραφούν κατά 90^{o} ο σωλήνας δύσκολα μπορεί να εντοπιστεί. Η διάταξη των παράλληλων ηλεκτρικών πεδίων (εικόνα 2.7α και 2.7γ) ενδείκνυται στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων.



Εικόνα 2.7: *Δυνατές διατάξεις των κεραιών πομπού και δέκτη,. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο με το μεγάλο άξονα των κεραιών (Πουλιούδης, 1999).*

Οι δύο κεραίες μπορούν να τοποθετηθούν και σε κάθετη διάταξη (κάθετα ηλεκτρικά πεδία), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7ε. Στην περίπτωση αυτή, το γεωραντάρ γίνεται περισσότερο ευαίσθητο σε σκεδαστές, όπως οι σωλήνες, χωρίς όμως η σχετική θέση σκεδαστή - κεραιών να επηρεάζει το αποτέλεσμα της καταγραφής. Η διάταξη αυτή δίνει φτωχά αποτελέσματα στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων.

2.7.7 Κατακόρυφη υπέρθεση

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

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

3.1 Εισαγωγή

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

Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται σε θεωρητικό υπόβαθρο τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά του σήματος (*instantaneous attributes*), καθώς και τα φίλτρα (*filters*) που εφαρμόζονται στα δεδομένα του γεωραντάρ (Σπανουδάκης 2002/2001, Πουλιούδης 1999, Taner et al. 1992-2001).

3.2 Φίλτρα

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

3.2.1 Φίλτρα διόρθωσης ίχνους (trace correction)

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

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

Οι δύο κύριοι τύποι φίλτρων αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων είναι:

i) ***Φίλτρο διόρθωσης Dewow:*** Πρόκειται για φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (*High pass filter*). Για κάθε μέτρηση του ίχνους υπολογίζεται η μέση τιμή των γειτονικών μετρήσεων που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, η οποία αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, για την επόμενη μέτρηση.

ii) ***Φίλτρο διόρθωσης DCshift:*** Το φίλτρο αυτό υπολογίζει τη μέση τιμή του ίχνους και την αφαιρεί από μέτρηση. Έτσι, απομακρύνεται η μέση τιμή της καταγραφής. Η εφαρμογή αυτού του φίλτρου σε δεδομένα που συλλέχθηκαν με κεραίες υψηλής συχνότητας μπορεί να έχει καλύτερα αποτελέσματα από την εφαρμογή του φίλτρου Dewow (Σπανουδάκης, 2001).

3.2.2 Φίλτρο κινητού μέσου όρου (down the trace average)

Σκοπός του φίλτρου κινητού μέσου όρου είναι η απομάκρυνση του τυχαίου θορύβου και των υψηλών συχνοτήτων από την καταγραφή. Η λειτουργία του στηρίζεται στον υπολογισμό της μέσης τιμής των μετρήσεων που ανήκουν στο ίδιο ίχνος και σε χρονικό παράθυρο προκαθορισμένης διάρκειας (Σπανουδάκης, 2002). Συγκεκριμένα, η η μέτρηση στο κεντρικό σημείο του παραθύρου αντικαθίσταται από την υπολογισμένη μέση τιμή. Στη συνέχεια το παράθυρο μετατοπίζεται κατά χρόνο ίσο με το διάστημα δειγματοληψίας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την επόμενη μέτρηση και για όλες τις μετρήσεις του ίχνους. Η διαφορά αυτού του φίλτρου σε σύγκριση με το φίλτρο διόρθωσης Dewow έγκειται στο ότι η υπολογισμένη μέση τιμή δεν αφαιρείται από την αντίστοιχη μετρούμενη.

Η λειτουργία του φίλτρου απαιτεί από τον χρήστη τον προσδιορισμό της χρονικής διάρκειας του παραθύρου (*window width*) η οποία περιγράφεται από ακέραιο θετικό

αριθμό που δηλώνει το πλήθος των μετρήσεων στο παράθυρο. Έτσι, αν ο χρήστης δώσει την τιμή 3 τότε η μέση τιμή των μετρήσεων 14,15 και 16 αντικαθιστά τη 15^{η} μέτρηση. Η τιμή 1 για τη χρονική διάρκεια του παραθύρου καθιστά το φίλτρο ανενεργό.

Η επιλογή της βέλτιστης τιμής της χρονικής διάρκειας του παραθύρου από το σήμα στις υψηλές συχνότητες που πρόκειται να αποκοπούν. Ένας τρόπος προσδιορισμού της είναι ο υπολογισμός της περιόδου αυτού του σήματος σε μονάδες χρόνου (nsec) και η διαίρεσή της με το διάστημα δειγματοληψίας (*sampling interval*).

3.2.3 Φίλτρο μέσου ίχνους (trace to trace average)

Σκοπός του φίλτρου μέσου ίχνους είναι να τονίσει μικρής κλίσης και οριζόντιους ανακλαστήρες στην εικόνα των δεδομένων. Παράλληλα, μειώνει το θόρυβο και τα κύματα περίθλασης από σημειακούς ανακλαστήρες (π.χ. σωλήνες, καλώδια, μεταλλικά αντικείμενα), που εμφανίζονται στην εικόνα σαν υπερβολές.

Το φίλτρο αυτό έχει παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με το κινητού μέσου όρου με τη διαφορά ότι υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ των μετρήσεων γειτονικών ιχνών. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον αριθμό των ιχνών (*traces*) που θα προστεθούν. Ο αριθμός 1 καθιστά και αυτό το φίλτρο ανενεργό.

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος που λειτουργεί, θεωρούμε παράδειγμα με αριθμό ιχνών τρία. Εάν βρισκόμαστε στο πέμπτο ίχνος της τομής, τότε οι οι μετρήσεις των ιχνών 4,5 και 6 που αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο αθροίζονται και υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Αυτό επαναλαμβάνεται για τις μετρήσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Έτσι, προκύπτει ένα νέο ίχνος, το μέσο ίχνος, το οποίο αντικαθιστά το ίχνος 5. Κατόπιν, η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για το ίχνος 6 λαμβάνοντας υπόψιν στους υπολογισμούς τα ίχνη 5,6 και 7 κ.ο.κ.

3.2.4 Φίλτρο διαφοράς ιχνών (trace difference)

Το φίλτρο διαφοράς ιχνών χρησιμοποιείται για να τονίσει σημειακούς ανακλαστήρες, οι οποίοι προκαλούν το φαινόμενο της περίθλασης (εμφανίζονται στην εικόνα σαν υπερβολές με τα κοίλα προς τα κάτω), ενώ αντενδείκνυται για τη χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών επειδή καταστρέφει πληροφορίες που

προέρχονται από οριζόντιους και μικρής κλίσης ανακλαστήρες. Κατά την εφαρμογή του κάθε ίχνος αντικαθίσταται από τη διαφορά του από το επόμενο (Σπανουδάκης, 2002).

3.2.5 Φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (High pass filter)

Το φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων τονίζει τοπικές λεπτομέρειες που στην αρχική εικόνα δεν διακρίνονται (Σπανουδάκης, 2002).

Το φίλτρο αυτό αποκόπτει συχνότητες κάτω από ένα όριο το οποίο καθορίζεται από τον χρήστη. Ορίζεται σαν ποσοστό της συχνότητας *Nyquist* (π.χ. f_N = 5000MHz, οπότε αν ο χρήστης επιλέξει 10% τότε αποκόπτονται συχνότητες κάτω των 500MHz, αν επιλέξει 20% αποκόπτονται συχνότητες κάτω των 1000MHz κ.ο.κ.).

3.3 Ενίσχυση του σήματος (Gain)

Καθώς ο παλμός διαδίδεται στο μέσο η ενέργειά του μειώνεται λόγω απορρόφησης, διάχυσης και γεωμετρικής διασποράς. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ενισχυθούν τα ασθενέστερα κύματα ώστε να μη χαθούν οι πληροφορίες που περιέχουν.

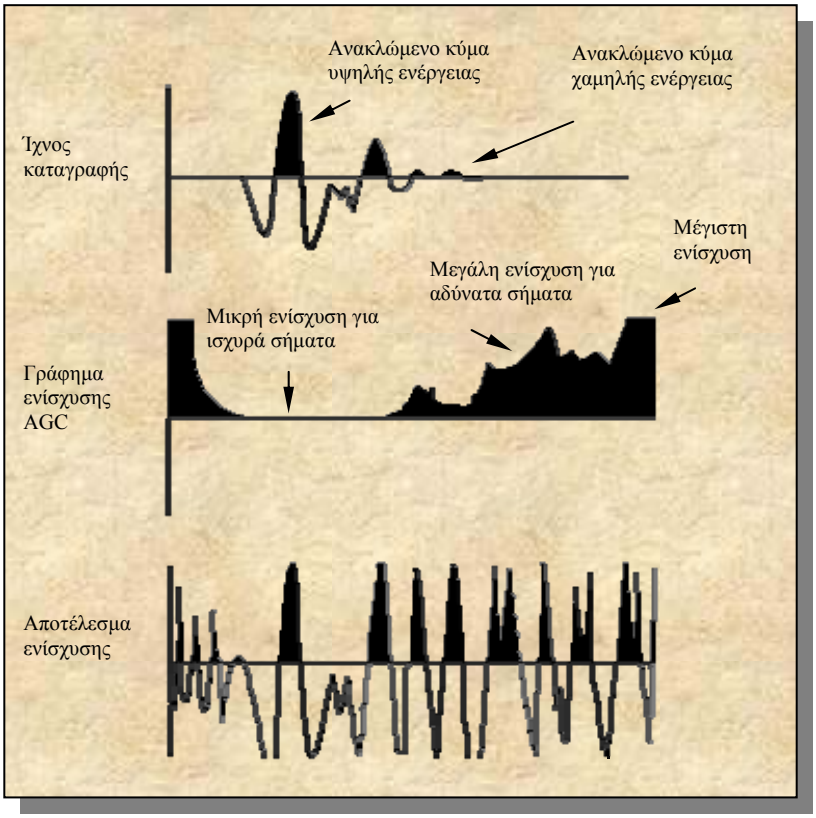
Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ενίσχυσης (Πουλιούδης, 1999):

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

3.3.1 Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (Automatic Gain Control - AGC)

Ο αλγόριθμος αυτός έχει σκοπό να ενισχύσει τα ασθενή ηλεκτρομαγνητικα κύματα. Ουσιαστικά επιτυγχάνει την ισοστάθμιση του σήματος καταγραφής για την ανάδειξη της συνέχειας των ανακλαστήρων και την καλύτερη παρουσίαση ασθενικών ανακλάσεων στην εικόνα. Η ενίσχυση που εφαρμόζεται στο σήμα , η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους του. Από τη στιγμή που θα εφαρμοστεί ο τύπος ενίσχυσης AGC, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα από τη συσχέτιση των πλατών των κυμάτων που προέρχονται από διαφορετικούς ανακλαστήρες

Η ενίσχυση του σήματος πραγματοποιείται σε κάθε μέτρηση του ίχνους χωριστά. Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει τη μέση τιμή (ή μέση ενέργεια) γειτονικών μετρήσεων και ακολούθως πολλαπλασιάζει τη μέτρηση με τον αντίστροφο της μέσης τιμής. Έτσι, τα μεγάλα πλάτη ενισχύονται λίγο ή και καθόλου, ενώ για τα μικρά πλάτη έχει μεγάλη τιμή (εικόνα 3.1).

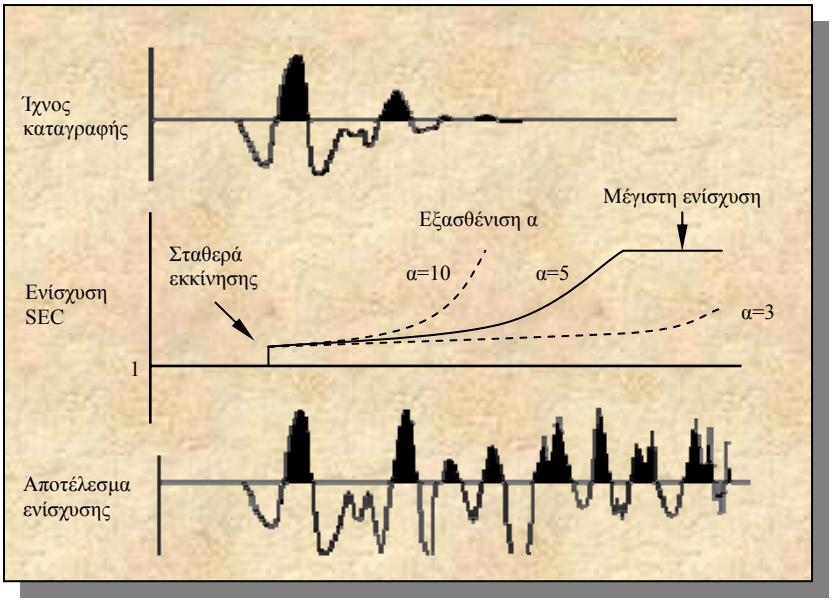


Εικόνα 3.1*: Απεικόνιση της ενίσχυσης AGC και της επίδρασής της στο σήμα καταγραφής (Πουλιούδης, 1999).*

3.3.2 Εκθετική ενίσχυση σήματος λόγω απωλειών διασποράς (SEC)

Η ενίσχυση SEC (*Spreading and Exponential Compensation*) αποτελεί σύνθεση γραμμικής και εκθετικής ενίσχυσης που εξαρτάται από το χρόνο (PulseEKKO 1000Run User Guide). Ο σκοπός της ενίσχυσης αυτής είναι η αναπλήρωση της ενέργειας από απώλειες που οφείλονται στην γεωμετρική διασπορά και την εκθετική εξασθένιση των

κυμάτων. Η ενίσχυση SEC μέχρι να προσεγγίσει την μέγιστη τιμή της πραγματοποιείται με εκθετικούς ρυθμούς, ενώ στη συνέχεια παραμένει σταθερή[2] (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: *Η ενίσχυση SEC (Πουλιούδης, 1999).*

3.3.3 Σταθερή ενίσχυση (Constant Gain)

Η σταθερή ενίσχυση είναι ο πιο απλός τύπος ενίσχυσης. Κατά την εφαρμογή της, όλα τα δεδομένα πολλαπλασιάζονται με μία σταθερά. Με τον τρόπο αυτό δε βελτιώνεται ουσιαστικά η εικόνα, αφού η αναλογία μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών στα δεδομένα παραμένει σταθερή.

3.4 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (Instantaneous Attributes)

Το σήμα που στέλνει και λαμβάνει το γεωραντάρ είναι πραγματικός αριθμός. Για μεγαλύτερη όμως ακρίβεια και ευκολία στους υπολογισμούς, το σήμα μετατρέπεται σε

---

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

μιγαδικό αριθμό (*complex trace*) [3]. Από το αναλυτικό σύνθετο σήμα (Σπανουδάκης, 2002), ανακτώνται επιπλέον πληροφορίες στην εικόνα του αρχικού σήματος, πολύ χρήσιμες για την αξιολόγηση και ερμηνεία των δεδομένων.

Τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (*instantaneous attributes*) εκφράζουν τις στιγμιαίες μεταβολές ποικίλων παραμέτρων. Οι στιγμιαίες τιμές των μιγαδικών χαρακτηριστικών (όπως το στιγμιαίο πλάτος και οι παράγωγες του, η στιγμιαία φάση και η στιγμιαία συχνότητα) μπορούν να προσδιοριστούν από το αναλυτικό σύνθετο σήμα (Taner et al., 1992-2001).

3.4.1 Στιγμιαίο πλάτος (Instantaneous Amplitude / Trace Envelope)

Το στιγμιαίο πλάτος *E(t)* εκφράζει την ανακλώμενη ισχύ, η οποία είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ολικής ενέργειας του σήματος σε δεδομένη χρονική στιγμή. Αποτελεί το μέτρο του αναλυτικού σύνθετου σήματος (σχέση 3.1) και χρησιμοποιείται κυρίως για να τονίσει αλλαγές στη λιθολογία όπως γεωλογικές ασυνέχειες.

$$E(t) = \sqrt{[f^2(t) + g^2(t)]} \qquad (3.1)$$

3.4.2 Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα 'decibel' (dB based Reflection Strength)

Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα '*decibel*' δίδεται από τη σχέση: *20logE(t)*. Η κλίμακα dB χρησιμοποιείται συνήθως στο πεδίο των συχνοτήτων για τη απεικόνιση του φάσματος ισχύος (*power spectrum*). Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB. Η κλασματική ανάλυσή του (*fractal analysis*) δίδει πληροφορίες σχετικά με στρωματογραφικές σειρές και ανωμαλίες λόγω της ύπαρξης υδρογονανθράκων.

---

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

3.4.3 Ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους (Time Derivative of the Envelope)

Ο ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους $\frac{d[E(t)]}{dt}$ δείχνει τη μεταβολή της ανακλώμενης ισχύος και πιθανές περιοχές έντονης απορρόφησης της ενέργειας των κυμάτων. Επίσης, σχετίζεται με ασυνέχειες όταν υπάρχει πλευρική διακύμανση στις τιμές του. Η πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους ως προς το χρόνο υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{d[E(t)]}{dt} = E(t) * diff(t) \tag{3.2}$$

όπου το σύμβολο $*$ δηλώνει συνέλιξη και $diff(t)$ είναι ο διαφορικός τελεστής.

3.4.4 Στιγμιαίο φασματικό εύρος (Instantaneous Band Width)

Το στιγμιαίο φασματικό εύρος δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma_f^2(t) = \frac{d[E(t)]/dt}{2\pi E(t)} \tag{3.3}$$

Από τη σχέση 3.3 μπορεί να υπολογιστεί η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους $d[E(t)]/dt$. Μονάδα μέτρησης του στιγμιαίου φασματικού εύρους είναι η οκτάβα.

3.4.5 Στιγμιαία φάση (Instantaneous Phase)

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

$$Ph(x,t) = \arctan\left[\frac{g(x,t)}{f(x,t)}\right] \tag{3.4}$$

3.4.6 Κανονικοποιημένο πλάτος (Normalized Amplitude/Envelope)

Το κανονικοποιημένο πλάτος *normenv(x,t)* υπολογίζεται ως το συνημίτονο της στιγμιαίας φάσης (σχέση 3.5). Περιέχει όλες τις λεπτομέρειες της στιγμιαίας φάσης χωρίς, όμως, να περιλαμβάνει τις απότομες μεταβολές, με αποτέλεσμα να τονίζει την πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων. Το μιγαδικό χαρακτηριστικό αυτό δεν περιέχει πληροφορίες σχετικά με την ισχύ των ανακλάσεων, ενώ οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ –1 και +1.

$$normenv(x,t) = \cos[Ph(x,t)] \tag{3.5}$$

3.4.7 Γινόμενο του πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης (Product of real Amplitude and cosine of Instantaneous Phase)

Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό, που δίδεται από τη σχέση: $f(t)\cos[Ph(x,t)]$, ενισχύει τα μέγιστα και ελάχιστα (*peaks and troughs*) της καταγραφής και μετατρέπει τα ελάχιστα σε «ψευδοαιχμές» για την καλύτερη ερμηνεία της στρωματογραφίας.

3.4.8 Γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης (Product of filtered Instantaneous Amplitude and cosine of Instantaneous Phase)

Για τον υπολογισμό αυτού του μιγαδικού χαρακτηριστικού, αρχικά υπολογίζεται η μέση τιμή του στιγμιαίου πλάτους κάθε ίχνους και αφαιρείται από το αρχικό ίχνος (εφαρμογή φίλτρου διόρθωσης *DCshift* στο στιγμιαίο πλάτος). Το αποτέλεσμα, δηλαδή το φιλτραρισμένο στιγμιαίο πλάτος, πολλαπλασιάζεται με το συνημίτονο της στιγμιαίας φάσης. Το γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης χρησιμοποιείται στην ανάλυση των ανωμαλιών του στιγμιαίου πλάτους ενισχύοντας παράλληλα τα ασθενή σήματα και τους συνεχείς ανακλαστήρες.

3.4.9 Στιγμιαία συχνότητα (Instantaneous Frequency)

Ο ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας φάσης (σχέση 3.6) είναι η στιγμιαία συχνότητα *Freq(x,t)*. Είναι το μέτρο της συχνότητας του ανακλώμενου κύματος και χρησιμοποιείται για να αναδείξει τις αλλαγές στη λιθολογία, τη μεταβολή του πάχους των σχηματισμών, τις διεπιφάνειες και την ύπαρξη ασυνεχειών. Ουσιαστικά δρα σαν φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων.

$$Freq(x,t) = \frac{\partial[Ph(x,t)]}{\partial(t)} \tag{3.6}$$

3.4.10 Σταθμισμένη μέση συχνότητα (Weighted Mean Frequency)

Για να εξαλειφθούν οι ψευδείς τιμές της στιγμιαίας συχνότητας για σήμα κακής ποιότητας, ο μέσος σταθμισμένος όρος της σε μικρό χρονικό παράθυρο. Η σχέση που περιγράφει τη σταθμισμένη μέση συχνότητα $\overline{\omega}(t)$ είναι:

$$\overline{\omega}(t) = \frac{\sum_{T} [E(t)\ Freq(t)]}{\sum_{T} E(t)} \tag{3.7}$$

όπου T χρονικό παράθυρο.

3.4.11 Δείκτης λεπτών στρωμάτων (Thin Bed Indicator)

Οι περιοχές όπου η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις στις τιμές της ή λαμβάνει αρνητικές τιμές, έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού σχετίζονται με ανακλάσεις που λαμβάνουν χώρα σε λεπτά γεωλογικά στρώματα. Ο ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας φάσης *ω(t)* (δηλ. η στιγμιαία συχνότητα) λειτουργεί ως δείκτης λεπτών στρωμάτων όταν η μεταβολή είναι μεγάλη, ενώ η σταθμισμένη μέση τιμή του $\overline{\omega}(t)$ δείχνει τα χαρακτηριστικά τους. Ο δείκτης λεπτών στρωμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$thin-bed(t) = \omega(t) - \overline{\omega}(t) \tag{3.8}$$

3.4.12 Επιτάχυνση της φάσης (Acceleration of the Phase)

Με παραγώγιση ως προς το χρόνο της στιγμιαίας συχνότητας προκύπτει η στιγμιαία επιτάχυνση *accel(t)*. Με τον τρόπο αυτό τονίζονται οι τοπικές απότομες διακυμάνσεις της στιγμιαίας συχνότητας και αναδεικνύονται τα λεπτά στρώματα. Παράλληλα, η στιγμιαία επιτάχυνση λειτουργεί έως ένα βαθμό και ως δείκτης της απορρόφησης της ενέργειας των κυμάτων, αναδεικνύοντας την κατανομή της κυρίαρχης συχνότητας των κυμάτων καθώς διαδίδονται στο υπέδαφος.

$$accel(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} \tag{3.9}$$

3.4.13 Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας (Instantaneous Q/Quality Factor)

Ο στιγμιαίος δείκτης ποιότητας *q(t)* δίδεται από τη σχέση:

$$Q(t) = \frac{-\pi Freq(t)}{decay(t)} \overset{(\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta 3.3)}{=} \frac{-Freq(t)}{2\sigma_f^2(t)} \tag{3.10}$$

όπου $decay(t) = \dfrac{d[E(t)]/dt}{E(t)}$ ο στιγμιαίος ρυθμός εξασθένισης των κυμάτων [4].

3.4.14 Συνάφεια (Semblance)

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

---

4 Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων χαρακτηρίζεται από το *συντελεστή Q*. Ορίζεται ως ο λόγος της ολικής ενέργειας του κύματος που επιστρέφει στον δέκτη και της ενέργειας που χάνεται κατά την διάρκεια μιας περιόδου. Είναι: $Q = \omega/2\upsilon\alpha = f\pi/\upsilon\alpha$, όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής, α ο συντελεστής εξασθένισης και υ η ταχύτητα διάδοσης του Η/Μ κύματος (Πουλιούδης, 1999).

$$Semblance(t) = \frac{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \{\sum_{m=1}^{M} f_m(t+\tau)\}^2 - \sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \{\sum_{m=1}^{M} f_m^2(t+\tau)\}}{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \{\sum_{m=1}^{M} f_m^2(t+\tau)\}} \quad (3.11)$$

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει η επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ ήταν δύο. Αρχικά τα δεδομένα ταξινομήθηκαν με τη μέθοδο της **επαναλαμβανόμενης βελτιστοποίησης ή K-μέσων τιμών (k-Means Clustering)**. Στη συνέχεια στα ήδη ταξινομημένα δεδομένα έγινε δεύτερη ταξινόμηση με τη μέθοδο της **μέγιστης πιθανοφάνειας (Discriminant Analysis)**.

4.2 Ταξινόμηση

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

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

υπόλοιπα αταξινόμητα δεδομένα σε τάξεις(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.3 Αυτόματη Ταξινόμηση

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

Κατόπιν ο αλγόριθμος της ταξινόμησης προσδιορίζει τις ‘αποστάσεις’ μεταξύ των δεδομένων και εκτιμά την ‘εγγύτητά’ τους. Επίσης, προσδιορίζονται τα πρωτογενή κέντρα συγκέντρωσης ομοειδών δεδομένων καθώς καθορίζονται από τους περιορισμούς του αναλυτή. Πολλές φορές, η τάξη μπορεί να αντιπροσωπευτεί από ένα μοναδικό σημείο, που θεωρείται ως το κέντρο συγκέντρωσης για μια συγκεκριμένη ομάδα δεδομένων.

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

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος προσδιορίζει νέα κέντρα για κάθε ομάδα, καθώς η προσθήκη νέων δεδομένων συνεπάγεται και αλλαγή της αρχικής θέσης του κέντρου κάθε ομάδας. Κατόπιν όλα τα δεδομένα ταξινομούνται εκ νέου με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων ομάδων. Αν οι νέες ομάδες διαφέρουν από εκείνες που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Κατά αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η διαδικασία της αυτόματης ταξινόμησης(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.3.1 Αλγόριθμοι αυτόματης ταξινόμησης

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

$$\mathbf{d_e(x, \mu_i)=[(x- \mu_i)^T (x- \mu_i)]^{(1/2)}= [(x_1- \mu_{i,1})^2+ (x_2- \mu_{i,2})^2+\ldots+ (x_p- \mu_{i,p})^2]^{1/2}} \qquad (4.1)$$

και η απόσταση της διαφοράς των απόλυτων τιμών :

$$\mathbf{d_\alpha(x, \mu_i)=[|x_1- \mu_{i,1}|+ |x_2- \mu_{i,2}|+\ldots+ |x_p- \mu_{i,p}|]} \qquad (4.2)$$

Σαφώς η απόσταση της διαφοράς των απόλυτων τιμών είναι υπολογιστικά γρηγορότερο να καθοριστεί, εντούτοις μπορεί να θεωρηθεί λιγότερο ακριβής από την Ευκλείδεια απόσταση(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.4 Ταξινόμησης Επαναλαμβανόμενης Βελτιστοποίησης ή Κ- Μέσων Τιμών (k-Means Clustering)

Η διαδικασία ταξινόμησης επαναλαμβανόμενης βελτιστοποίησης, αποκαλούμενη επίσης και τεχνική Κ-μέσων τιμών, είναι ουσιαστικά ο αλγόριθμος ISODATA. Περιγράφεται ο βασικός αλγόριθμος των Κ-μέσων τιμών των ομάδων. Αποτελείται από τα εξής βήματα υπολογισμού :

1. Η διαδικασία αρχίζει με την επιλογή C σημείων στο χώρο που χρησιμεύουν ως τα πιθανά κέντρα συσσώρευσης των υποψήφιων τάξεων. Έστω ότι τα σημεία αυτά είναι: **m_i', i= l, 2, 3,…... C**. (Σχήμα 4.1)

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

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

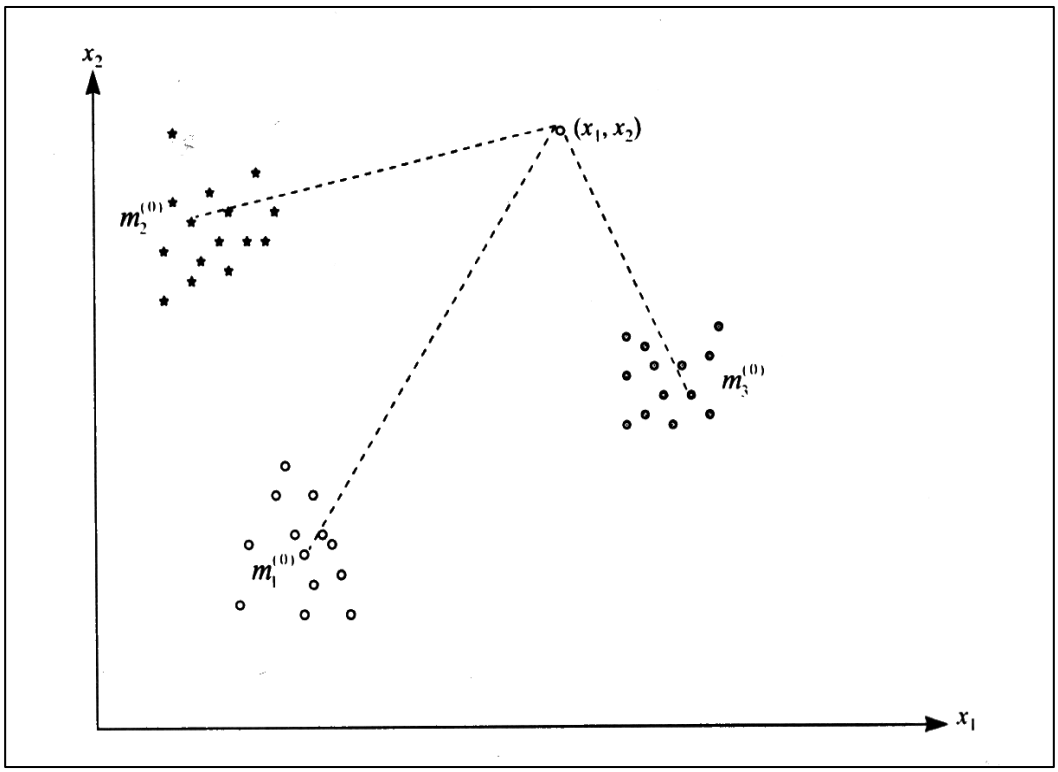
2. Η θέση x κάθε στοιχείου στα δεδομένα που ταξινομούνται εξετάζεται και το στοιχείο καταχωρείται στην κοντινότερη υποψήφια τάξη. Αυτή η καταχώρηση

γίνεται βάσει της Ευκλείδειας απόστασης ή της απόστασης της διαφοράς των απόλυτων τιμών που δόθηκαν παραπάνω.

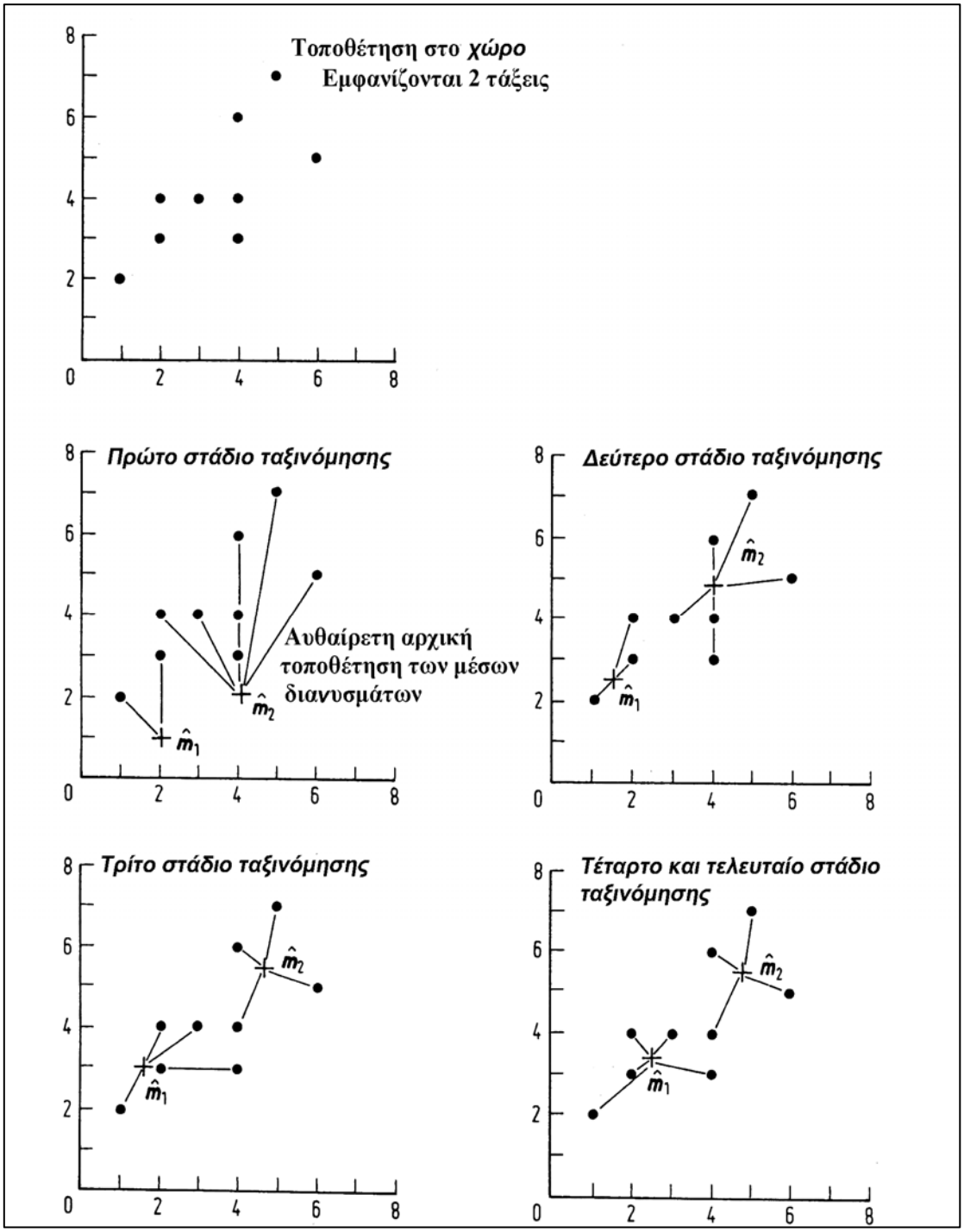
3. Δημιουργείται ένα νέο σύνολο κέντρων συσσώρευσης των στοιχείων από την ομαδοποίηση του βήματος 2, το οποίο είναι: $\mathbf{m_i, i= l, 2, 3,\ldots\ldots C}$

4. Αν ισχύει $\mathbf{m_i = m_i'}$, για όλα τα i, η διαδικασία ολοκληρώνεται. Διαφορετικά το m_i' επαναπροσδιορίζεται σαν η παρούσα αξία του m_i και η διαδικασία επιστρέφει στο βήμα 2 και συνεχίζεται η ομαδοποίηση.

Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι σχεδιασμένη για ένα απλό σύνολο δισδιάστατων στοιχείων στο Σχήμα 4.2(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).



Εικόνα4.1: *Η διαδικασία της ομαδοποίησης των Κ-μέσων τιμών στην αυτόματη ταξινόμηση(Richards, J.A, John Alan, 1993).*



Εικόνα4.2*: Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδιασμένη για ένα απλό σύνολο δισδιάστατων στοιχείων(Richards, J.A, John Alan, 1993).*

4.4.1 Συνένωση, απαλοιφή και κατάτμηση ομάδων

Βασιζόμενοι στον προηγούμενο αλγόριθμο, οι Ball και Hall (Ball and Hall 1965) προσθέτουν δύο επιπλέον βήματα ώστε να βελτιωθεί η διαδικασία ομαδοποίησης των

στοιχείων. Τα βήματα αυτά αφορούν τη συνένωση ή απαλοιφή ομάδων και την κατάτμηση ομάδων.

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

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

Υπάρχει ένας κανόνας για το βήμα (i) που αναφέρει ότι για να χρησιμοποιηθεί μια ομάδα στην εκπαίδευση ενός ταξινομητή μέγιστης πιθανοφάνειας θα πρέπει να περιέχει 10N στοιχεία, όπου N ο αριθμός των στοιχείων.

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

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

Στον αλγόριθμο των K-μέσων τιμών, η ταξινόμηση μπορεί να μην ολοκληρωθεί, επειδή η διαδικασία της ομαδοποίησης ενδέχεται να μη συγκλίνει. Επομένως θα πρέπει να καθοριστεί ένας μέγιστος αριθμός διαδοχικών προσεγγίσεων, ώστε να τερματίζεται η διαδικασία ταξινόμησης(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.5 Καθοδηγούμενη Ταξινόμηση

Ως καθοδηγούμενη ταξινόμηση μπορεί να οριστεί η διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται ήδη ταξινομημένα δεδομένα ώστε τελικά με βάσει αυτά να ταξινομηθούν και κάποια άλλα δεδομένα.

Στα πλεονεκτήματα της καθοδηγούμενης ταξινόμησης μπορούν να συμπεριληφθούν και τα ακόλουθα :

Πρώτον, ο αναλυτής επιλέγει τις τάξεις ετσι ώστε η ταξινόμηση να είναι συμβατή με κάποια άλλη γειτονικών δεδομένων. Δεύτερον, ο αναλυτής δε χρειάζεται να κάνει αντιστοίχηση των ομάδων με τις πληροφορίες που αντιπροσωπεύουν. Τρίτον, ο αναλυτής είναι σε θέση να αναγνωρίσει σοβαρά σφάλματα στην ταξινόμηση, αν εξετάσει τα δεδομένα της εκπαίδευσης.

Στα μειονεκτήματα και στους περιορισμούς της καθοδηγούμενης ταξινόμησης συμπεριλαμβάνονται τα εξής :

Πρώτον, ο αναλυτής επιβάλλει το δικό του τρόπο ταξινόμησης των δεδομένων. Δεύτερον, τα δεδομένα εκπαίδευσης καθορίζονται από τα είδη της πληροφορίας, κατά κύριο λόγο, και κατά δεύτερο λόγο από τις ιδιότητές τους. Τρίτον, τα δεδομένα εκπαίδευσης που θα επιλεγούν μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά για το σύνολο των δεδομένων. Τέταρτον, η καθοδηγούμενη ταξινόμηση μπορεί να μην είναι ικανή να αναγνωρίσει και να αντιπροσωπεύσει ιδιομορφίες που δεν αποκαλύπτονται στα δεδομένα εκπαίδευσης, πιθανόν επειδή δεν είναι γνωστές στον αναλυτή(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.6 Ταξινόμηση της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Discriminant Analysis)

Η ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας είναι η πιο συνήθης μέθοδος καθοδηγούμενης ταξινόμησης.

Έστω οι τάξεις w_i όπου i=1, 2, 3, …M, όπου το M είναι ο συνολικός αριθμός των τάξεων. Στην προσπάθεια να καθοριστεί η τάξη ή η κατηγορία στην οποία ανήκει ένα στοιχείο μιας θέσης x μας ενδιαφέρει η δεσμευμένη πιθανότητα:

$$\mathbf{P(w_i|x),\ i=1,\ 2,\ 3,\ \ldots M} \qquad (4.3)$$

Δηλαδή το $P(w_i|x)$ δίνει την πιθανότητα το στοιχείο της θέσης x να ανήκει στην τάξη w_i. Επιλέγεται η τάξη εκείνη που μεγιστοποιεί την πιθανοφάνεια, δεδομένης της πληροφορίας των στοιχείων αναφοράς (εκπαίδευσης). Το είδος αυτής της τεχνικής ονομάζεται **ταξινόμηση μέγιστης πιθανοφάνειας.** Έτσι ο κανόνας για τη λήψη μιας απόφασης για ταξινόμηση ενός στοιχείου x στην τάξη w_i και όχι στην w_j έχει ως εξής:

$$\mathbf{x \; E \; w_i \;\; εάν \; P(w_i|x) > P(w_j|x) \; για \; όλα \; τα \; j \neq i} \qquad (4.4)$$

Δηλαδή το στοιχείο της θέσης x ανήκει στην κατηγορία w_i αν η $P(w_i|x)$ είναι η μεγαλύτερη. Η γενική αυτή προσέγγιση ονομάζεται ταξινόμηση Bayes(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.6.1 Ο κανόνας απόφασης της Ταξινόμησης Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Η δεσμευμένη πιθανότητα $P(w_i|x)$ δεν είναι γνωστή, παρόλα αυτά θα θεωρηθεί ότι υπάρχουν επαρκή στοιχεία εκπαίδευσης για τον προσδιορισμό κάθε διαφορετικής τάξης. Άρα μπορεί να εκτιμηθεί η συνάρτηση κατανομής για τη συγκεκριμένη κατηγορία που περιγράφει την πιθανότητα να βρεθεί στοιχείο θέσης x στην τάξη w_i. Η ζητούμενη πιθανότητα $P(w_i|x)$ και η διαθέσιμη $P(x|w_i)$ που υπολογίζεται από τα δεδομένα εκπαίδευσης σχετίζεται με το θεώρημα Bayes της Στατιστικής (Freund και Walpole, 1987) ως:

$$\mathbf{P(w_i|x) = P(x|w_i)P(w_i)/P(x)} \qquad (4.5)$$

Όπου $P(w_i)$ είναι η πιθανότητα η τάξη w_i να υπάρχει στην εικόνα.

Η πιθανότητα $P(w_i)$ ονομάζεται πιθανότητα a priori (εκ των προτέρων), επειδή προσδιορίζεται πριν ακόμα ξεκινήσει η ταξινόμηση, ενώ η πιθανότητα $P(w_i|x)$ ονομάζεται πιθανότητα a posteriori και ζητείται να προσδιοριστεί.

Σύμφωνα με τον προηγούμενο κανόνα ταξινόμησης και τη σχέση Bayes έχουμε:

$$\mathbf{x \; E \; w_i \; εάν \; P(x|w_i)P(w_i) > P(x|w_j)P(w_j) \; για \; όλα \; τα \; j \neq i} \qquad (4.6)$$

όπου η πιθανότητα P(x) έχει απαλειφθεί. Ο κανόνας της σχέσης (4.6) είναι πιο λογικός από αυτόν της (4.4) δεδομένου ότι η $P(w_i|x)$ μπορεί να προσδιοριστεί από τα δεδομένα εκπαίδευσης και επίσης ότι η $P(w_i)$ μπορεί να προσδιοριστεί από την εικόνα.

Λογαριθμίζοντας την παραπάνω σχέση καταλήγουμε στην:

$$\begin{aligned} \mathbf{g_i(x)} &= \mathbf{\ln\{ P(x|w_i)P(w_i)\}} \qquad (4.7) \\ &= \mathbf{\ln P(x|w_i) + \ln P(w_i)} \end{aligned}$$

Άρα ο τελικός κανόνας ταξινόμησης μέγιστης πιθανοφάνειας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathbf{x E w_i \text{ εάν } g_i(x) > g_j(x) \text{ για όλα τα } j \neq i} \quad (4.8)$$

Οι συναρτήσεις $g_i(x)$ ονομάζονται διακρίνουσες συναρτήσεις (discriminant functions) (Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.6.2 Κανονική κατανομή του Gauss

Θεωρείται ότι οι συναρτήσεις κατανομης των στοιχείων x, με την προϋπόθεση ότι ανήκουν σε κάποια τάξη w_i, είναι κανονικές κατανομές του Gauss σε p διαστάσεις (πολυδιάστατη κατανομή) και είναι της μορφής:

$$\mathbf{P(x|w_i)=(2\pi)^{-N/2}|\Sigma_i|^{-1/2}exp\{-1/2(x-m_i)^t\Sigma_i^{-1}(x-m_i)} \quad (4.9)$$

όπου m_i και Σ_i είναι το διάνυσμα της μέσης τιμής και ο πίνακας συν-μεταβλητότητας των δεδομένων στη συγκεκριμένη κατηγορία w_i, αντίστοιχα.

Άρα ο τύπος της διακρίνουσας συνάρτησης για την περίπτωση της κανονικής κατανομής θα είναι:

$$\mathbf{gi(x)=ln\ P(w_i)-1/2\ ln|\Sigma_i|-1/2(x-m_i)^t\Sigma_i^{-1}(x-m_i)} \quad (4.10)$$

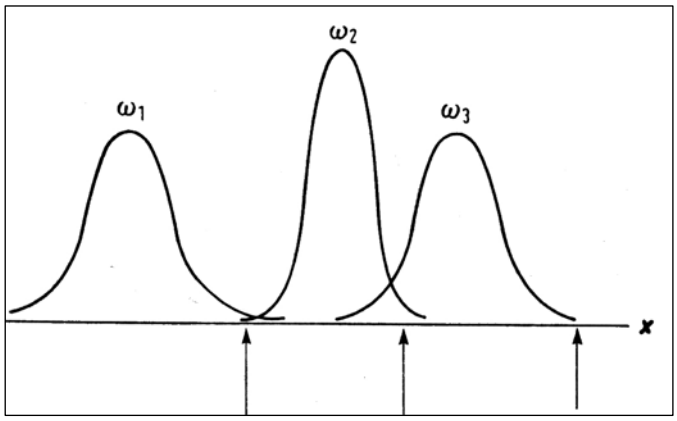
Συχνά δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για την πιθανότητα $P(w_i)$, οπότε σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι οι πιθανότητες όλων των τάξεων w_i είναι ίδιες και επομένως ο παράγοντας $\ln P(w_i)$ εξαλείφεται για όλα τα w_i στην παραπάνω σχέση. Άρα η διακρίνουσα συνάρτηση γίνεται:

$$\mathbf{gi(x)= -1/2ln\ |\Sigma_i|-1/2(x-m_i)^t\Sigma_i^{-1}(x-m_i)} \quad (4.11)$$

4.6.3 Όριο αποδοχής και απόρριψης

Τα στοιχεία x θα πρέπει να ταξινομηθούν σε κάποια από τις διαθέσιμες τάξεις w_i, ανεξάρτητα από το πόσο μικρές είναι οι πιθανότητες εμφάνισης μιας

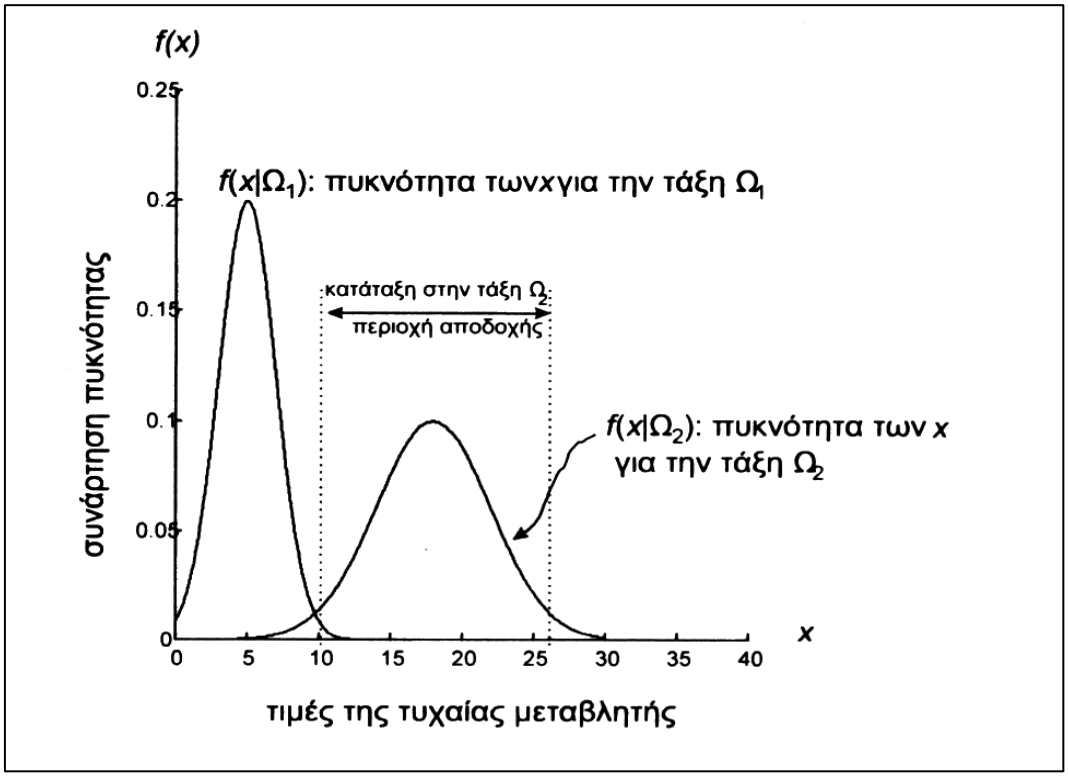
συγκεκριμένης τάξης w_i (Σχήμα 4.3). Στην πράξη, τα όρια αποδοχής-απόρριψης εφαρμόζονται στις διακρίνουσες συναρτήσεις και όχι στις συναρτήσεις κατανομών, δεδομένου ότι οι τελευταίες δεν υπολογίζονται ποτέ στην πράξη.



Στοιχεία τάξης ω_1 (αμφισβητούμενα) Στοιχεία τάξης ω_2 (λογικά) Στοιχεία τάξης ω_3 (αμφισβητούμενα)

Εικόνα4.3 *Ανεπαρκής ταξινόμηση δειγμάτων που εξαπλώνονται κοντά στις άκρες της διαδικασίας κατανομής όλων των τάξεων*(Richards, J.A, John Alan, 1993).

Το όριο αποδοχής-απόρριψης (threshold), που στη στατιστική ονομάζεται κρίσιμο όριο, φαίνεται στην Εικόνα 4.4 η οποία αναφέρεται σε μονοδιάστατα δεδομένα x για κατανόηση.



Εικόνα 4.4: *Η ταξινόμηση σε δύο τάξεις για τη μονοδιάστατη περίπτωση(Μερτίκας, 1999).*

Το κριτήριο για την καταχώρηση ενός στοιχείου x στην τάξη w_i είναι:

$$\mathbf{x E \omega_i \text{ εάν } g_i(x) > g_j(x) \text{ για κάθε } j \neq i \quad \text{και} \quad g_i(x) > T_i} \tag{4.12}$$

όπου το T_i είναι το κρίσιμο όριο που φαίνεται να είναι σημαντικό για την τάξη w_i. Είναι τώρα απαραίτητο να εξεταστεί πώς μπορεί να υπολογιστεί το T_i. Από τη σχέση (4.10) και (4.12) μια ταξινόμηση είναι αποδεκτή εάν:

$$\mathbf{\ln p(w_i) - 1/2 \ln |\Sigma_i| - 1/2 (x-m_i)^t \Sigma_i^{-1} (x-m_i) > T_i} \tag{4.13}$$

ή

$$\mathbf{(x-m_i)^t \Sigma_i^{-1} (x-m_i) < -2\, T_i - \ln |\Sigma_i| + 2 \ln p(w_i)} \tag{4.14}$$

Το αριστερό μέλος της σχέσης (4.14) έχει μια κατανομή x^2 με N βαθμούς ελευθερίας, εάν το x είναι 'κανονικά' κατανεμημένο (Swain and Davis 1978). Ο αριθμός N δηλώνει τις διαστάσεις του χώρου. Κατά συνέπεια από τους πίνακες της συνάρτησης κατανομής x^2 ή από αλγόριθμους μπορεί να καθοριστεί εκείνη η τιμή της

δευτεροβάθμιας συνάρτησης $[(x-m_i)^t\Sigma_i^{-1}(x-m_i)]$ για την οποία ένα ποσοστό των στοιχείων θα βρίσκεται κάτω από αυτό το κρίσιμο όριο(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

4.6.4 Περιορισμοί στα πεδία εκπαίδευσης

Η αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης της Μέγιστης Πιθανοφάνειας εξαρτάται λογικά από την ακριβή εκτίμηση του διανύσματος της μέσης τιμής m_i και του πίνακα συν-μεταβλητότητας Σ για κάθε τάξη. Αυτό προϋποθέτει ότι υπάρχει επαρκής αριθμός στοιχείων εκπαίδευσης για όλες τις τάξεις. Σε αντίθετη περίπτωση θα προσδιοριστούν ανακριβείς τιμές για τα στατιστικά μεγέθη και επομένως η ταξινόμηση θα είναι ελλιπής ή και εσφαλμένη(Μερτίκας, 1999, Richards, J.A, John Alan, 1993).

.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 'PORTO PETROLI'

5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε επεξεργασία δεδομένων από καταγραφές γεωραντάρ που προέρχονται από την Ιταλία και συγκεκριμένα από την περιοχή Porto Petroli, της Γένοβας. Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις έγιναν από το Πολυτεχνείο του Μιλάνου τον Ιανουάριο του 2003 και μέσα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος HYGEIA.

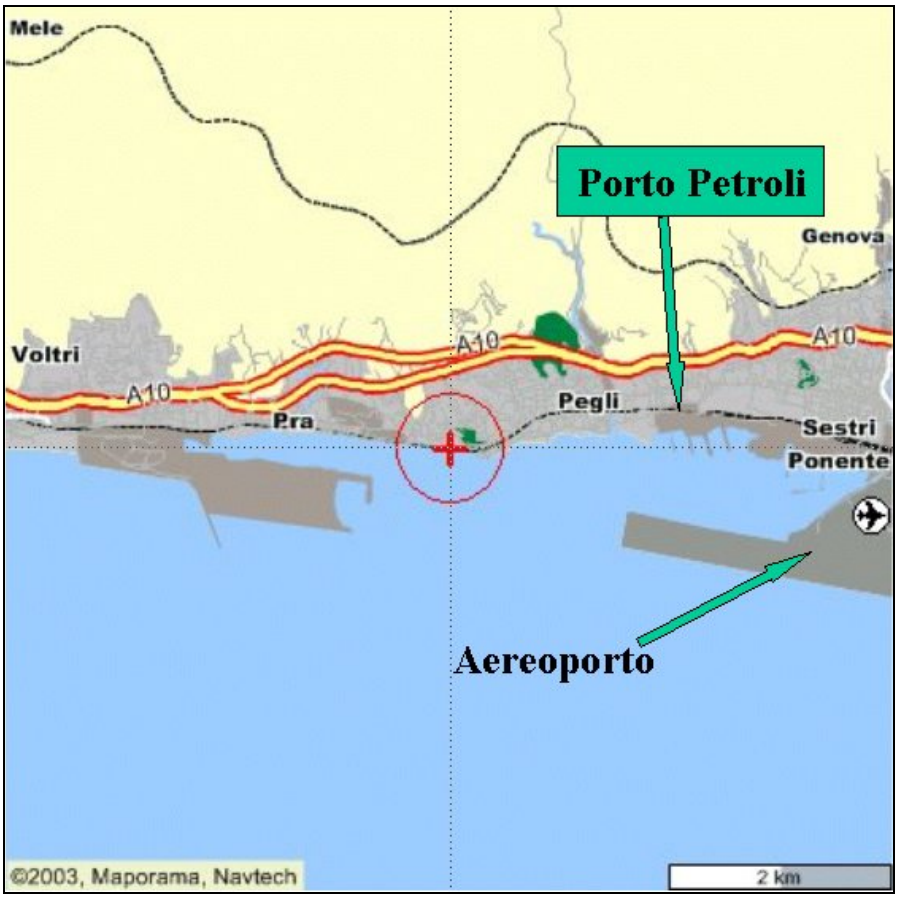
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο προέρχονται στην τεχνική έκθεση για το Porto Petroli του Πολυτεχνείου του Μιλάνου.

5.2 Περιγραφή της περιοχής του Porto Petroli

Το λιμάνι πετρελαίου στο Multedo του δήμου της Γένοβα (Ιταλία) διοικείται από την εταιρεία Porto Petroli της Γένοβα.

Η περιοχή έχει έκταση 345.000 m^2 από την οποία τα 134.000 m^2 είναι στην ξηρά και 211.000 m^2 στην επιφάνεια της θάλασσας. Μέσα στο λιμάνι βρίσκονται αρκετοί σταθμοί αντλιών (ενισχυτές) που συνδέονται με παράκτια αποθέματα μέσω θαμμένων σωλήνων. Οι ενισχυτές ελέγχονται από πέντε εταιρείες που είναι οι παρακάτω: Praoil, Sigemi, Iplom, Superba και Continentale.

Οι δραστηριότητες που πραγματοποιήθηκαν στο λιμάνι Multedo συνίστανται στη μετατόπιση των προϊόντων πετρελαίου από και προς τα πλοία τα οποία μπορούν να αγκυροβολήσουν σε τέσσερις προβλήτες εκφόρτωσης, που ονομάζονται α, β, γ και δ. Η ροή των σκαφών εκτιμάται σε περίπου 500 σκάφη/έτος με την διακίνηση σχεδόν 17 χιλιάδων τόνων.



Εικόνα 5.1: *Χάρτης της περιοχής του Porto Petroli.*

5.3 Γεωλογία της περιοχής

Το υπέδαφος στο Porto Petroli αποτελείται από τεταρτογενή θαλάσσια και προσχωματικά ιζήματα. Τα ιζηματογενή στρώματα βρίσκονται σε ένα υπόστρωμα που έχει δημιουργηθεί γενικά από μεταμορφωμένους οφιόλιθους και μετα-ιζήματα. Η όλη περιοχή χαρακτηρίζεται από φερτά υλικά, φτιαγμένα από χονδρόκοκκα εδάφη, με στρωμάτωση που μπορεί να φτάσει σε κάποιες ζώνες αρκετά μέτρα.

Οι γεωτρήσεις που έγιναν κατά τη χαρτογράφηση δείχνουν τη στρωματογραφία των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους:

- 0,0-2,0 m από την επιφάνεια έχουμε λασπώδη άμμο με χαλίκι: Καφέ άμμος από λεπτόκοκκο έως μεσαίο μέγεθος. Χαλίκι από μεσαίο μέγεθος έως χονδρόκοκκο με μέγιστη διάμετρο 8 cm.

- 2,4-4,5 m από την επιφάνεια έχουμε άμμο με χαλίκι: Γκρι άμμος από λεπτόκοκκο έως χονδρόκοκκο μέγεθος. Χαλίκι από λεπτόκοκκο έως μεσαίο μέγεθος, μεταμορφωσιγενούς προέλευσης.
- 4,5-6,0 m από την επιφάνεια έχουμε χαλίκι με άμμο: Χαλίκι από λεπτόκοκκο έως μεσαίο μέγεθος, γκρι άμμος από λεπτόκοκκο έως χονδρόκοκκο μέγεθος.

Τα στρώματα αυτά βρίσκονται πάνω σε υπόστρωμα από πέτρα, το οποίο δεν είχε βρεθεί από τις γεωτρήσεις. Το υπόστρωμα αυτό αποτελείται από θραυσμένους οφιόλιθους και είναι τοποθετημένο σε περίπου 6-8 μέτρα βάθος στο βόρειο τμήμα της περιοχής και είναι πιθανότατα βαθύτερα προς τη θάλασσα.

5.4 Υδρογεωλογία της περιοχής

Η στάθμη του νερού είναι σε βάθος που κυμαίνεται από 1,3 έως 0,4 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας όταν έχουμε πλημμυρίδα και από 1,0 έως 0,2 μέτρα σε κανονικές συνθήκες.

Το νερό πέφτει από το Βορρά προς το Νότο με υδραυλική κλίση μεταξύ 0,45 και 0,6 %. Η κίνηση του επιφανειακού νερού επηρεάζεται από την παρουσία των θαμμένων υποδομών και από την επίδραση της θάλασσας.

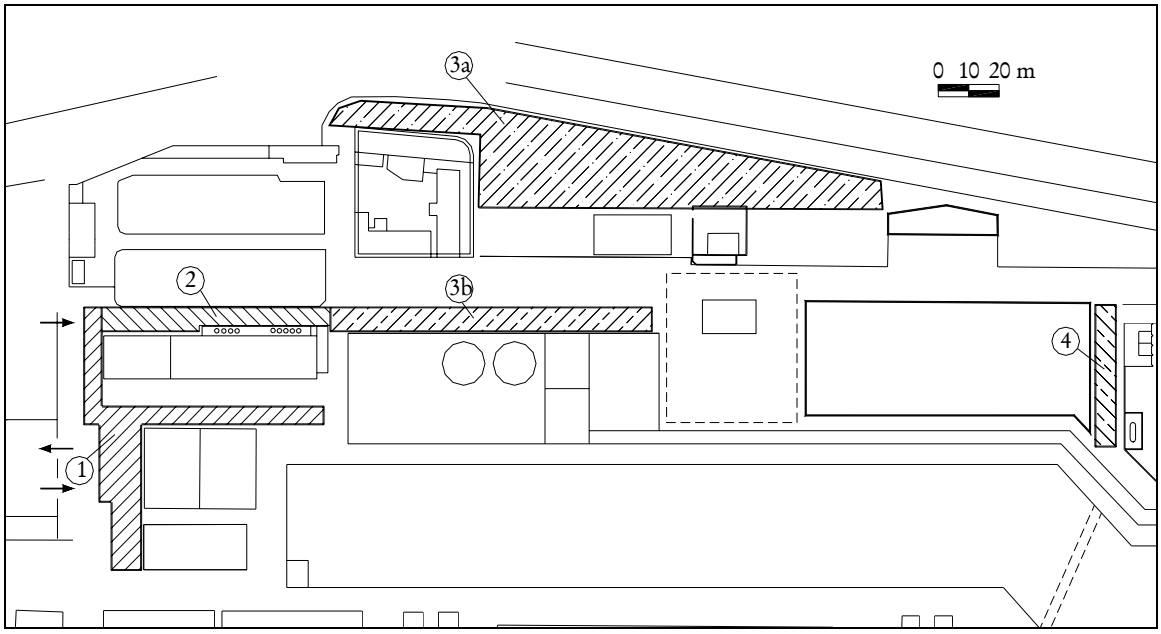
5.5 Γεωφυσικές διασκοπήσεις στην περιοχή Porto Petroli

Οι πρώτες γεωφυσικές διασκοπήσεις στο Porto Petroli πραγματοποιήθηκαν στην εβδομάδα ανάμεσα στις 20 και 25 Ιανουαρίου 2003. Ακολουθεί η λίστα των δραστηριοτήτων που πραγματοποιήθηκαν εκείνες τις μέρες:

- GPR, από το POLIMI το Πολυτεχνείο του Μιλάνου, το UNITS το Πανεπιστήμιο της Τεργέστης και το EOST-ULP το Πανεπιστήμιο του Στρασβούργου.
- Ηλεκτρικές διαγραφίες, από το UNITS.
- Σεισμικά, από το Ι.Γ.Μ.Ε. της Γαλλίας.
- Ηλεκτρομαγνητικές διαγραφίες με εξοπλισμό CORIM από το Ι.Γ.Μ.Ε της Γαλλίας.

5.5.1 Περιγραφή της τοποθεσίας και των προκαταρτικών μελετών

Ο τομέας του λιμανιού έχει διαιρεθεί σε τέσσερις περιοχές (Εικόνα 5.2), που τα κύρια χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 5.1**.**



Εικόνα 5.2: *Οι τέσσερις περιοχές των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην περιοχή Porto Petroli.*

Περιοχές	Διαστάσεις	Επιφανειακή κάλυψη	Στόχος της έρευνας	Εικόνες	Τεχνολογία
1	1236 m^2	Άσφαλτος	Θαμμένες δομές, παρουσία και βάθος της μόλυνσης	5.3-5.4	GPR, CORIM
2	514 m^2	Άσφαλτος	Θαμμένες δομές, παρουσία και βάθος της μόλυνσης, γεωλογική δομή	5.5	GPR CORIM Σεισμικά
3a	1300 m^2	Ελεύθερο έδαφος	Παρουσία και βάθος της μόλυνσης, γεωλογική δομή	5.6-5.7	Ηλεκτρικά, Σεισμικά, ανάλυση του ενδιάμεσου αερίου
3b	848 m^2	Άσφαλτος	Παρουσία και βάθος της μόλυνσης, γεωλογική δομή	5.5	GPR CORIM Σεισμικά
4	322 m^2	Ελεύθερο έδαφος	Θαμμένες δομές, παρουσία και βάθος της μόλυνσης, γεωλογική δομή	5.8	GPR Ηλεκτρικά Σεισμικά

Πίνακας 5.1: *Περιγραφή των περιοχών του Porto Petroli.*

Ακολουθούν οι εικόνες από τις περιοχές που αναφέρονται στον Πίνακα 1:



Εικόνα 5.3: *Περιοχή 1 όπου έγιναν διασκοπήσεις γεωραντάρ.*



Εικόνα 5.4: *Περιοχή 1 όπου έγιναν διασκοπήσεις γεωραντάρ.*



Εικόνα 5.5: *Περιοχή 2 και 3b όπου έγιναν διασκοπήσεις γεωραντάρ και σεισμικά.*



Εικόνα 5.6: *Περιοχή 3a όπου έγιναν ηλεκτρικές και σεισμικές διασκοπήσεις.*



Εικόνα 5.7: *Περιοχή 3a όπου έγιναν ηλεκτρικές και σεισμικές διασκοπήσεις*



Εικόνα 5.8: *Περιοχή 4 όπου έγιναν διασκοπήσεις γεωραντάρ, ηλεκτρικές και σεισμικές.*

Για κάθε περιοχή έχει σχεδιαστεί ένα δίκτυο με προφίλ (Εικόνα 5.11):

- Για τις περιοχές 1, 2 και 3b τα προφίλ είναι ορθογώνια, με ισαπόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών προφίλ ένα μέτρο.
- Κανένα δίκτυο προφίλ δεν έχει σχεδιαστεί στην περιοχή 3a, λόγω των επιφανειακών συνθηκών (Εικόνα 5.6-5.7).
- Στην περιοχή 4, έχουν σχεδιαστεί μόνο τα προφίλ με κατεύθυνση Βορράς-Νότος, με απόσταση ενός μέτρου ανάμεσα σε δύο από αυτά.

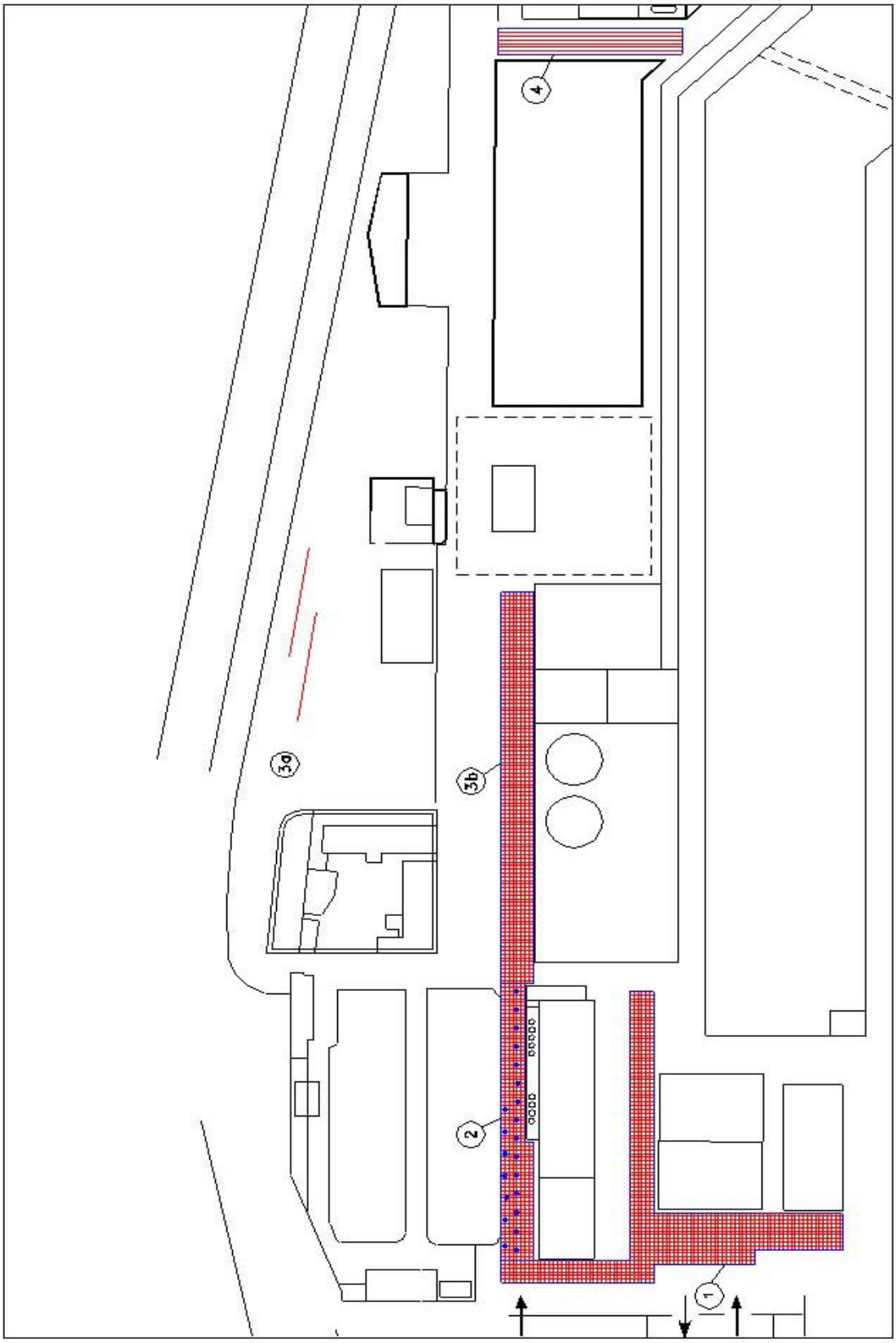
Στις περιοχές 3a και 4 χάρη στην παρουσία άστρωτου εδάφους, πραγματοποιήθηκαν τυπικές ηλεκτρομαγνητικές διαγραφίες. Στην περιοχή 4 τα προφίλ έχουν τοποθετηθεί με ισαπόσταση δύο μέτρα. Στην περιοχή 3a μόνο δύο προφίλ πραγματοποιήθηκαν σχεδόν 30 μέτρα μήκος (Εικόνα 5.11).



Εικόνα 5.9: *Ηλεκτρικές διασκοπήσεις στην περιοχή 3a.*



Εικόνα 5.10: *Εξοπλισμός για τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις.*



Εικόνα 5.11: *Σχεδιασμός των προφίλ της περιοχής Porto Petroli.*

Στις περιοχές 1, 2 και 3b πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικές διαγραφίες(CORIM)(Εικόνα 5.12).



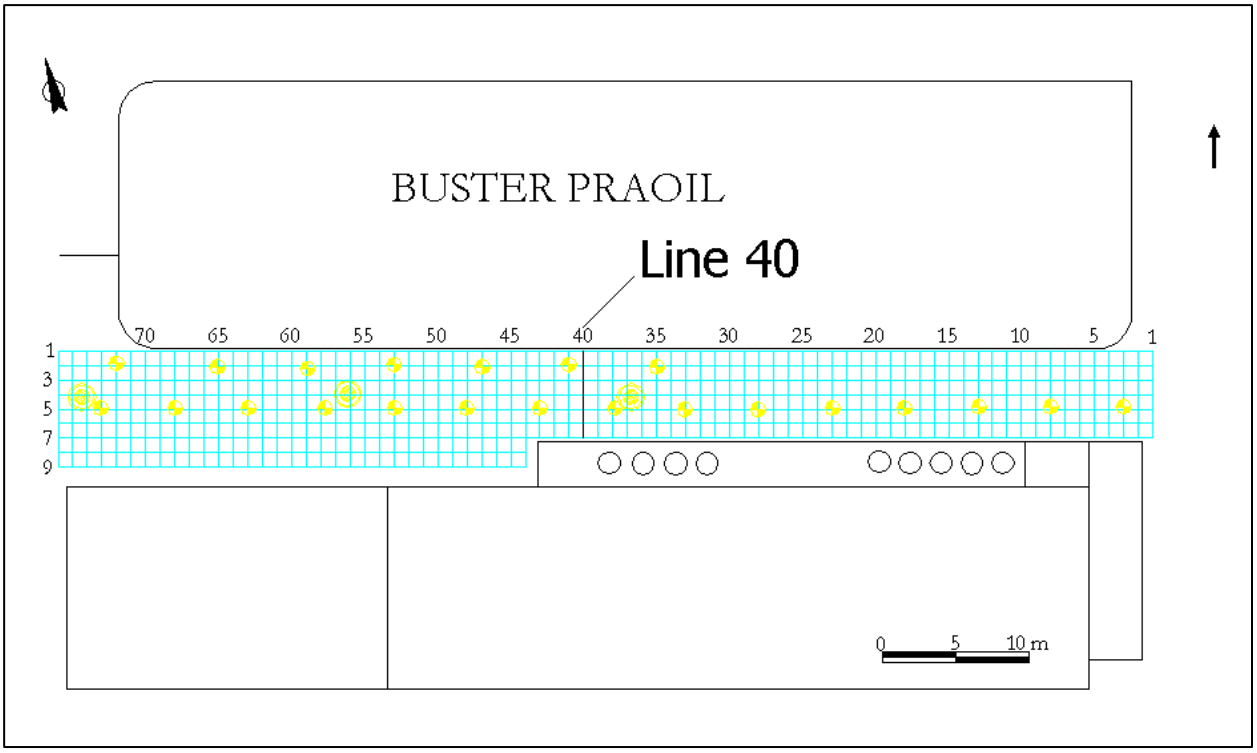
Εικόνα 5.12

Η σεισμική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στις περιοχές 2, 3a, 3b και 4 ήταν με γεώφωνα Gimball και σφυρί (βαριά) ως πηγή (Εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13: *Διάταξη σεισμικής μεθόδου.*

Η Εικόνα 5.14 δείχνει την περιοχή 2 και τα προφίλ της. Τα οριζόντια προφίλ πραγματοποιήθηκαν με κατεύθυνση Δύση-Ανατολή, ξεκινώντας από το βορειότερο προφίλ. Τα κάθετα προφίλ πραγματοποιήθηκαν με κατεύθυνση από το Βορρά προς Νότο, ξεκινώντας από το ανατολικότερο προφίλ.



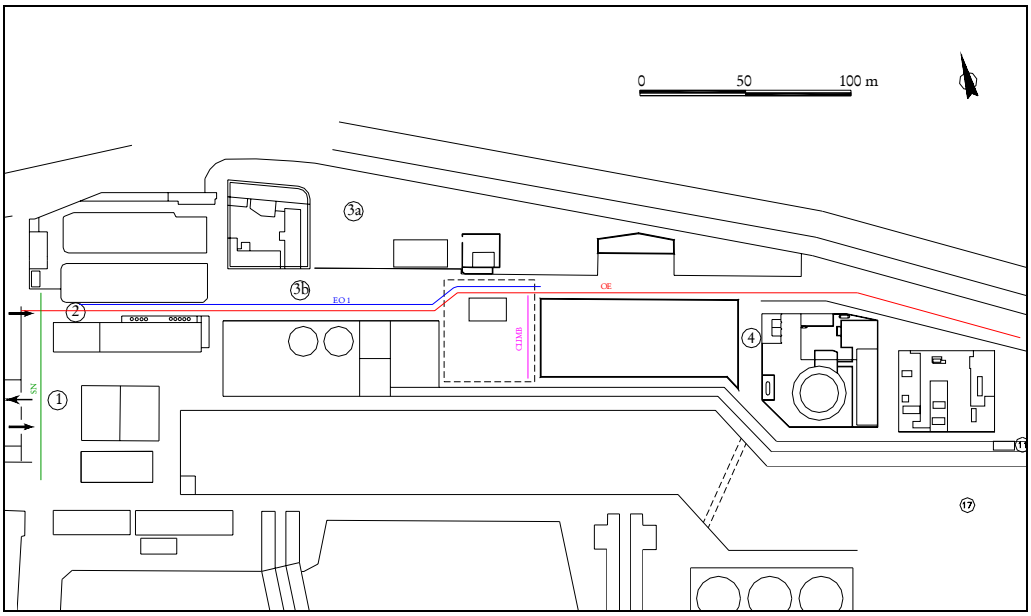
Εικόνα 5.14: *Τα προφίλ της περιοχής 2 και οι αριθμοί των φακέλων τους. Στο σχέδιο οι γεωτρήσεις της περιοχής φαίνονται στη θέση τους.*

5.5.2 Διεξαγωγή μετρήσεων και συλλογή δεδομένων γεωραντάρ

Ακολουθεί η περιγραφή των πειραμάτων γεωραντάρ που συλλέχθηκαν από το POLIMI το Πολυτεχνείο του Μιλάνου και κάποια από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το POLIMI το Πολυτεχνείο του Μιλάνου και το UNITS το Πανεπιστήμιο της Τεργέστης.

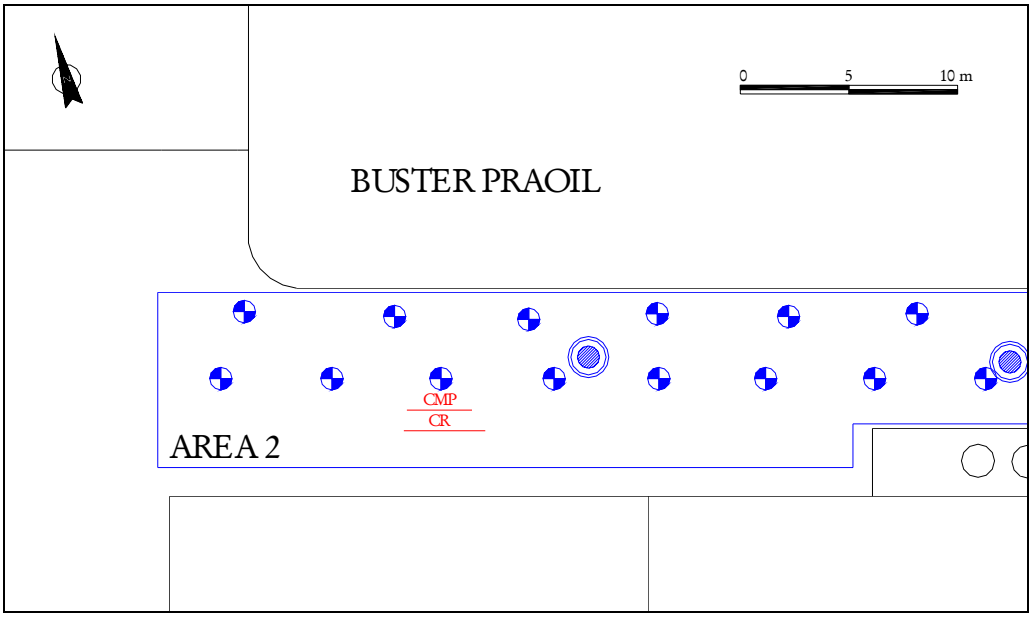
Τα δεδομένα συλλέχθηκαν με διάφορους τρόπους. Τα προφίλ που φαίνονται στην Εικόνα 5.14 συλλέχθηκαν με τη διάταξη της σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη. Η συχνότητα δειγματοληψίας και οι άλλες παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 5.21.

Στην Εικόνα 5.15 φαίνονται τα υπόλοιπα προφίλ που συλλέχθηκαν με τη διατάξη της σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη. Οι παράμετροι των διασκοπήσεων περιγράφονται στον Πίνακα 5.21.



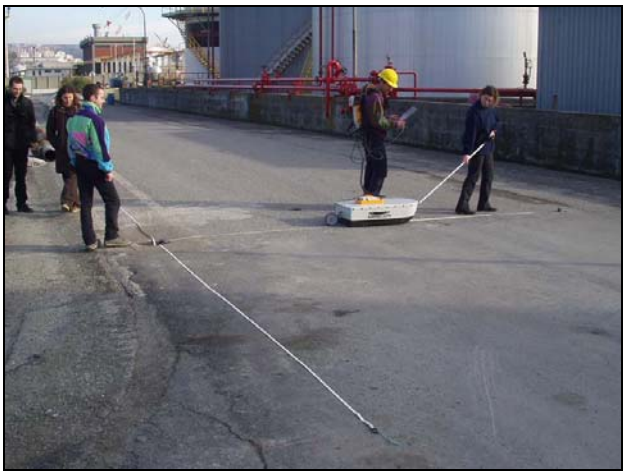
Εικόνα 5.15: *Απεικόνιση των προφίλ που συλλέχθηκαν στην περιοχή Porto Petroli.*

Άλλα προφίλ με τις μεθόδους κοινού δέκτη και κοινού ενδιάμεσου σημείου συλλέχθηκαν στην περιοχή 2 (Εικόνα 5.16).



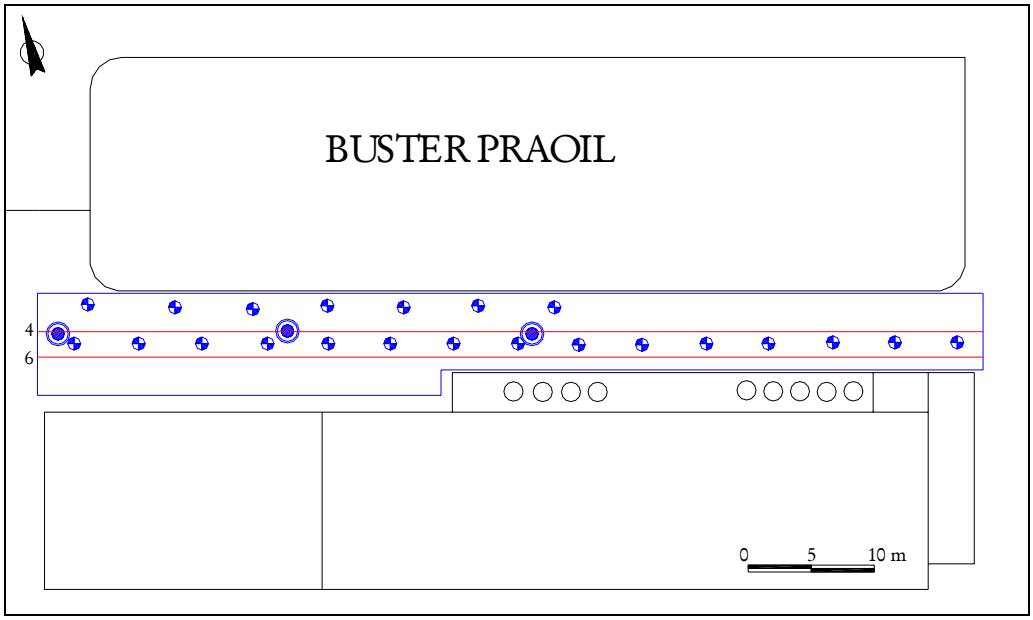
Εικόνα 5.16: *Τα προφίλ που συλλέχθηκαν στην περιοχή 2 με τις μεθόδους ενδιάμεσου κοινού σημείου (CPM) και κοινού δέκτη (CR).*

Κάποια άλλα προφίλ έγιναν κοντά στη γεώτρηση NMW6 (Εικόνα 5.17).



Εικόνα 5.17: *Προφίλ κοντά στη γεώτρηση NMW6.*

Στο τέλος της εβδομάδας δύο από τα προφίλ στην περιοχή 2 συλλέχθηκαν ξανά για να υπάρξει σύγκριση (Εικόνα 5.18). Στην πραγματικότητα κατά τη διάρκεια της πρώτης συλλογής δεδομένων το έδαφος ήταν υγρό εξαιτίας βροχής.

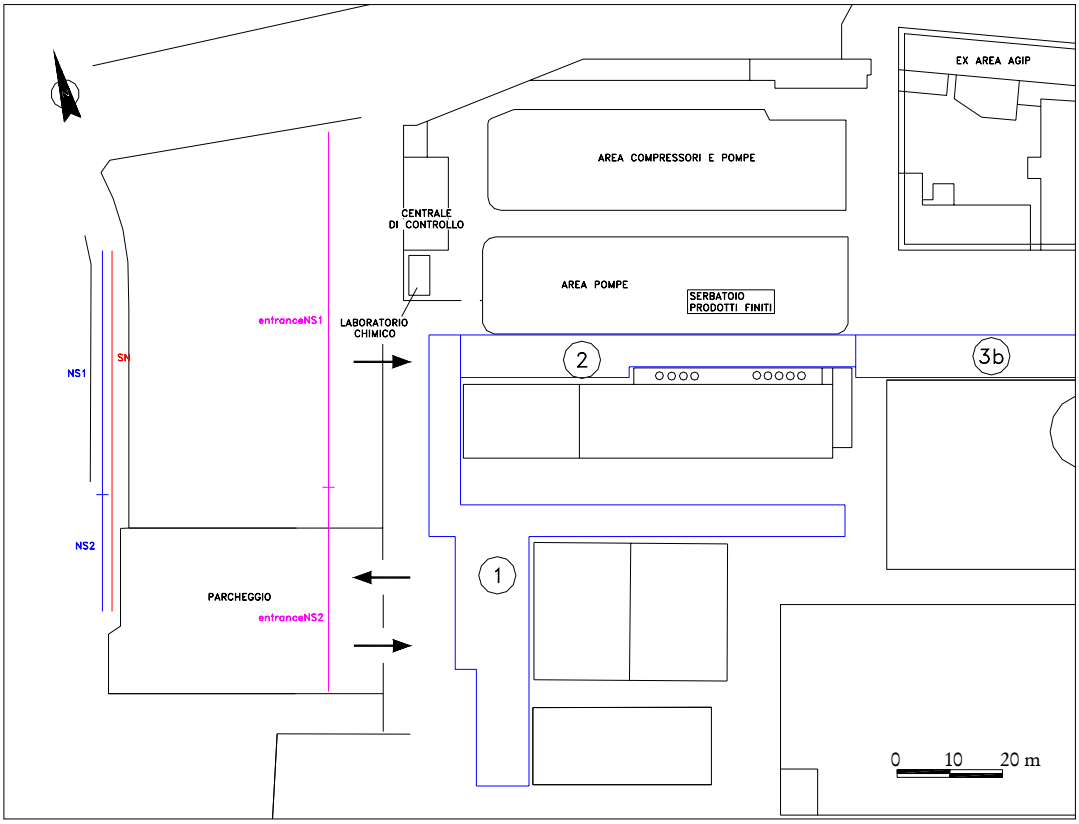


Εικόνα 5.18: *Τα προφίλ που συλλέχθηκαν στο τέλος της εβδομάδας.*

Τελικά κάποια προφίλ συλλέχθηκαν έξω από το Porto Petroli. Επιλέχθηκαν ένας στενός δρόμος δίπλα στο λιμάνι (Εικόνα 5.19) και ένας μεγαλύτερος που περνά από την είσοδο του πάρκινγκ (Εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.19: *Δρόμος διεξαγωγής μετρήσεων δίπλα στο λιμάνι.*



Εικόνα 5.20: *Τα προφίλ NS1,NS2,SN που εκτλεστηκαν έξω από το Porto Petroli.*

Όνομα του προφίλ	**Περιοχή διασκόπησης**	**Εικόνες**	**Προσανατολισμός προφίλ**	**Μέθοδος διασκόπησης**	**Ισαπόσταση ιχνών**	**Υπέρθεση**	**Συνολικός χρόνος καταγραφής**	**Συχνότητα δειγματοληψίας**
GEPParea2oens1	Περιοχή 2	Εικόνα 5.14	Δύση-Ανατολή	Κοινή μετατόπιση	3 cm	8	140 ns	2433 MHz
.	.	.	.Δύση-Ανατολή	.	.	.	.	.
GEPParea2oens9	Περιοχή 2	Εικόνα 5.14	.	.	3 cm	8	140 ns	2433 MHz
GEPParea2nseo1	Περιοχή 2.	Εικόνα 5.14	Βορράς-Νότος	Κοινή μετατόπιση	3 cm	8	140 ns	2433 MHz
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.GEPParea2nseo70	Περιοχή 2	Εικόνα 5.14	Βορράς-Νότος	.	3 cm	8	140 ns	2433 MHz
PP240103oe	Περιοχή 2	Εικόνα 5.18	Δύση-Ανατολή	Κοινή μετατόπιση	3 cm	8	140 ns	2399 MHz
PP240103oe1	Περιοχή 2	Εικόνα 5.18	.	.	3 cm	.	140 ns	2399 MHz
						8		
PP240103camminataOE / EO	Porto Petroli	Εικόνα 5.15	Δύση-Ανατ. Ανατ.-Δύση	Κοινή μετατόπιση	10 cm 50 cm	64 256	123 ns 100 ns	1247 MHz 1006 MHz
PP240103salita	Περιοχή της ετ.Superba	Εικόνα 5.15	Βορράς-Νότος	Κοινή μετατόπιση	50 cm	256	100 ns	1006 MHz
PP240103SN	Περιοχή 1	Εικόνα 5.15	Νότος-Βοράς	Κοινή μετατόπιση	3 cm	8	140 ns	2399 MHz
PortoPetroliCMP	Περιοχή 2	Εικόνα 5.16	-	Κοινού Ενδιάμ.Σημείου	10 cm	128	140 ns	2433 MHz
CR	Περιοχή 2	Εικόνα 5.16	Δύση-Ανατολή	Κοινού Δέκτη	3 cm	64	99 ns	1587 MHz
CR1	Περιοχή 2	Εικόνα 5.16			1 cm	64	99 ns	1587 MHz
StradinaNS1	Έξω από το Porto Petroli	Εικόνα 5.20	Βορράς-Νότος	Κοινή μετατόπιση	5 cm	8	123 ns	2281 MHz
StradinaNS2					5 cm	8	123 ns	2281 MHz
StradinaSN					10 cm	256	98 ns	1230 MHz
Ingressoportopetroli NS1					3 cm	16	109 ns	2330 MHz
Ingressoportopetroli NS2					3 cm	16	109 ns	2330 MHz
P6_NS2	ΓεώτρησηMW6	Εικόνα 5.17	Βορράς-Νότος Δύση-Ανατ. NO-SE Βορράς-Νότος NE-SO Δύση-Ανατ.	Κοινή μετατόπιση Κοινού Δέκτη Κοινού Ενδιάμ.Σημείου	2.5 cm	16	204 ns	2510 MHz
P6_WE e P6_WE1					2.5 cm	16	204 ns	2510 MHz
SH1 to SH24					5 cm	32	204 ns	2510 MHz
CDPNWSE					2.5 cm	128	204 ns	2510 MHz
CDPNS					2.5 cm	128	204 ns	2510 MHz
CDPNESW					2.5 cm	128	204 ns	2510 MHz
CDPWE					2.5 cm	128	204 ns	2510 MHz

Εικόνα 5.21: *Παράμετροι των προφίλ που συλλέχθηκαν στην περιοχή Porto Petroli.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 'Porto Petroli'- ΕΡΜΗΝΕΙΑ

6.1 Εισαγωγή

Σκοπός της επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ είναι να εξεταστεί η χρησιμότητα των μεθόδων ταξινόμησης στην ομαδοποίηση των δεδομένων ώστε να φανούν με καλύτερο τρόπο τα αποτελέσματα και να γίνει παρουσίαση της στρωμάτωσης της συγκεκριμένης περιοχής και εντοπισμός τυχόν δειγμάτων ρύπανσης.

6.2 Επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ

Η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ στην περιοχή ρύπανσης '*Porto Petroli*' πραγματοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (Πολυτεχνείο Κρήτης). Βασικό αντικείμενο είναι η εφαρμογή μεθόδων ταξινόμησης των αρχικών δεδομένων του γεωραντάρ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ευρέως και χωρίς προβλήματα το λογισμικό πακέτο επεξεργασίας δεδομένων '*Matlab*' της εταιρείας Mathworks® καθώς και τα προγράμματα Transform3 και T3d ως βοηθητικά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

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

- Στο πρώτο στάδιο εφαρμόστηκε φίλτρο διόρθωσης για τη διέλευση υψηλών συχνοτήτων (Dewow) και πραγματοποιήθηκε αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης του σήματος (AGC) στα ακατέργαστα δεδομένα (βλ. Κεφάλαιο 3). Στη

συνέχεια εφαρμόστηκαν διάφοροι συνδυασμοί μιγαδικών χαρακτηριστικών (attributes) και έγινε μια δοκιμαστική ταξινόμηση ώστε να επιλεγούν οι τελικοί συνδυασμοί που δίνουν τη βέλτιστη ποιότητα απεικόνισης των δεδομένων.

- Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η κύρια επεξεργασία των δεδομένων με δύο μεθόδους ταξινόμησης, των K-μέσων τιμών και της μέγιστης πιθανοφάνειας, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη γεωλογία και τη ρύπανση της περιοχής.

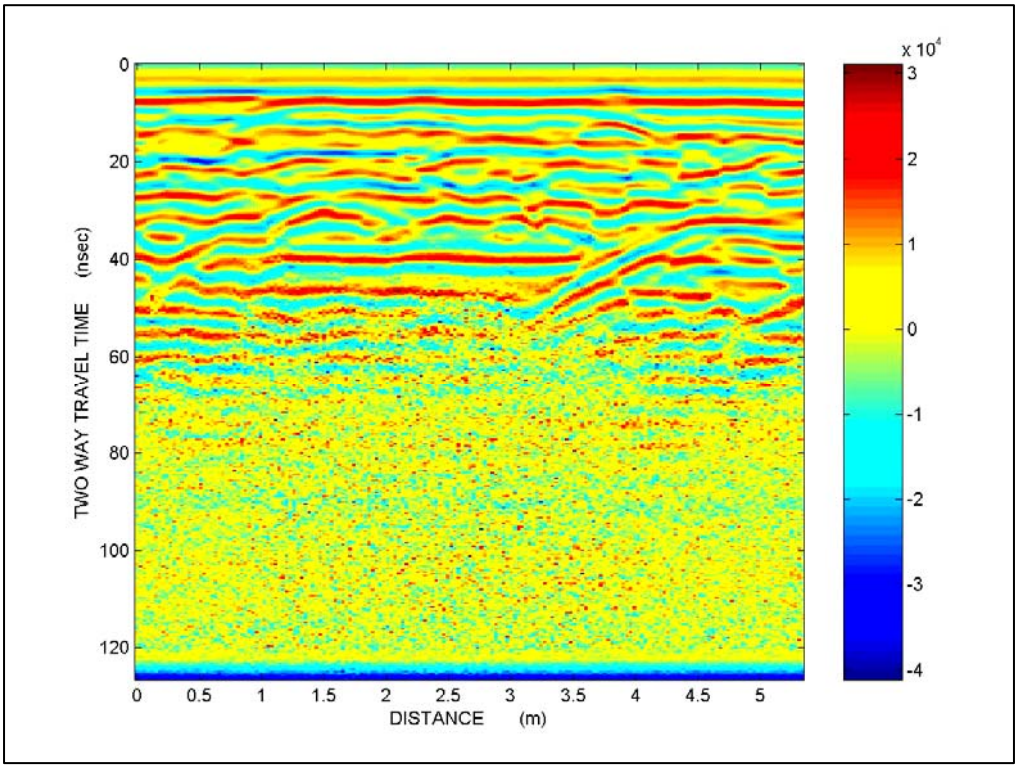
6.2.1 Αρχική επιλογή συνδυασμών μιγαδικών χαρακτηριστικών

Τα ακατέργαστα δεδομένα του γεωραντάρ που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από εβδομήντα γραμμές με προσανατολισμό Βορράς-Νότος.

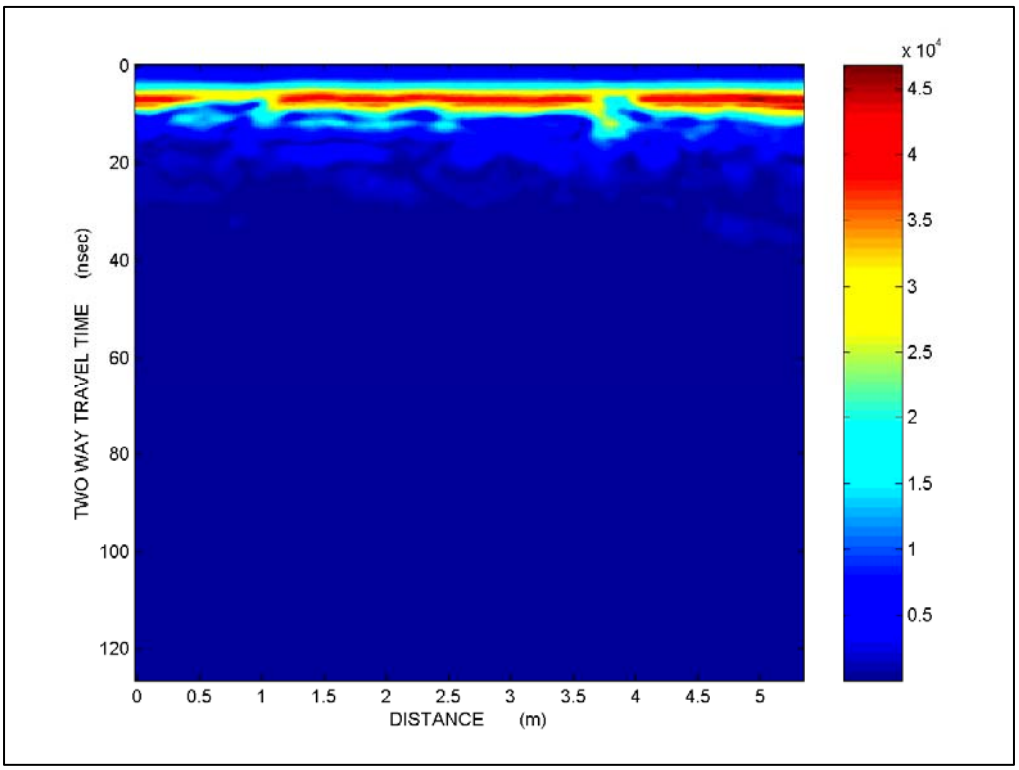
Για την επεξεργασία, όπως προαναφέρθηκε έγινε αρχική ενίσχυση AGC στα δεδομένα και χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά (attributes) για κάθε γραμμή:

1. Στιγμιαίο Πλάτος (Instantaneous Envelope)
2. Στιγμιαίο Πλάτος σε κλίμακα dB (dB Instantaneous Envelope)
3. Στιγμιαία Φάση (Instantaneous Phase)
4. Κανονικοποιημένο Πλάτος (Normalized Envelope)
5. Στιγμιαία Συχνότητα (Instantaneous Frequency Fast)
6. Δείκτης Λεπτών Στρωμάτων (Thin Bed Indicator Fast)
7. Συνάφεια (Semblance)
8. Γινόμενο του φιλτραρισμένου Πλάτους και του συνημίτονου της Στιγμιαίας Φάσης (Product Of Envelope And Cosine Of Phase)
9. Γινόμενο του Πλάτους και του συνημίτονου της Στιγμιαίας Φάσης (Product Of Real Trace And Cosine Of Phase)
10. Συνοχή εικόνας (Event Continuity)
11. Ρυθμός μεταβολής του Στιγμιαίου Πλάτους (Time Derivative Of Envelope Fast)

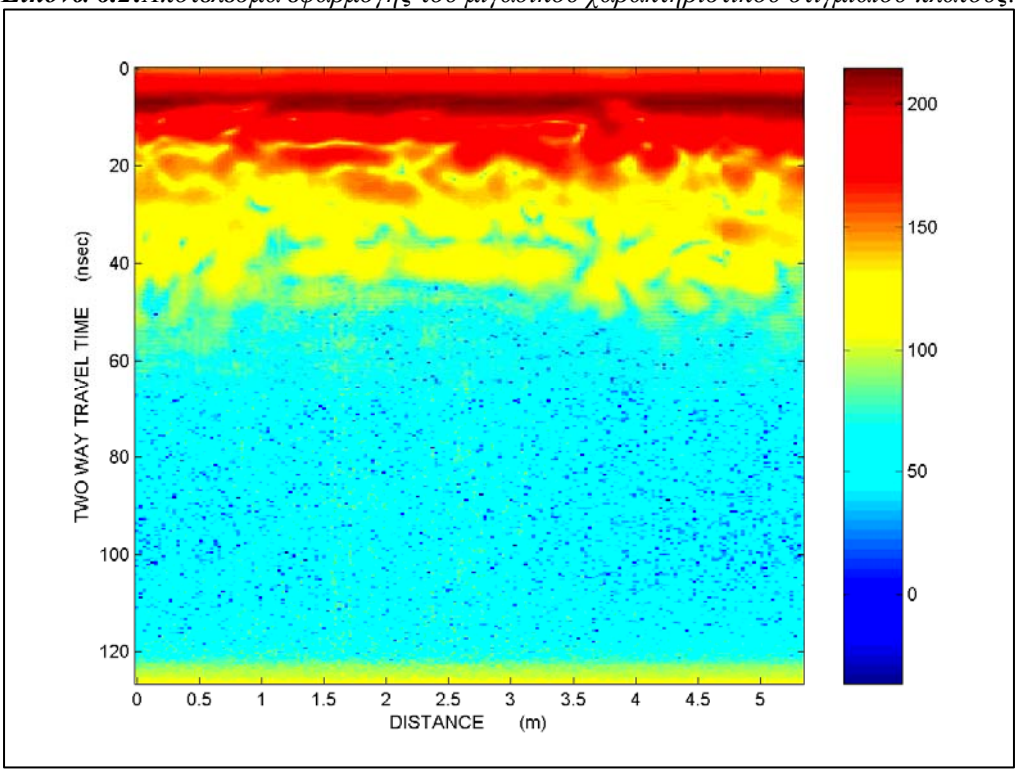
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής των στιγμιαίων μιγαδικών χαρακτηριστικών στα ακατέργαστα δεδομένα της γραμμής 40 Βορράς-Νότος:



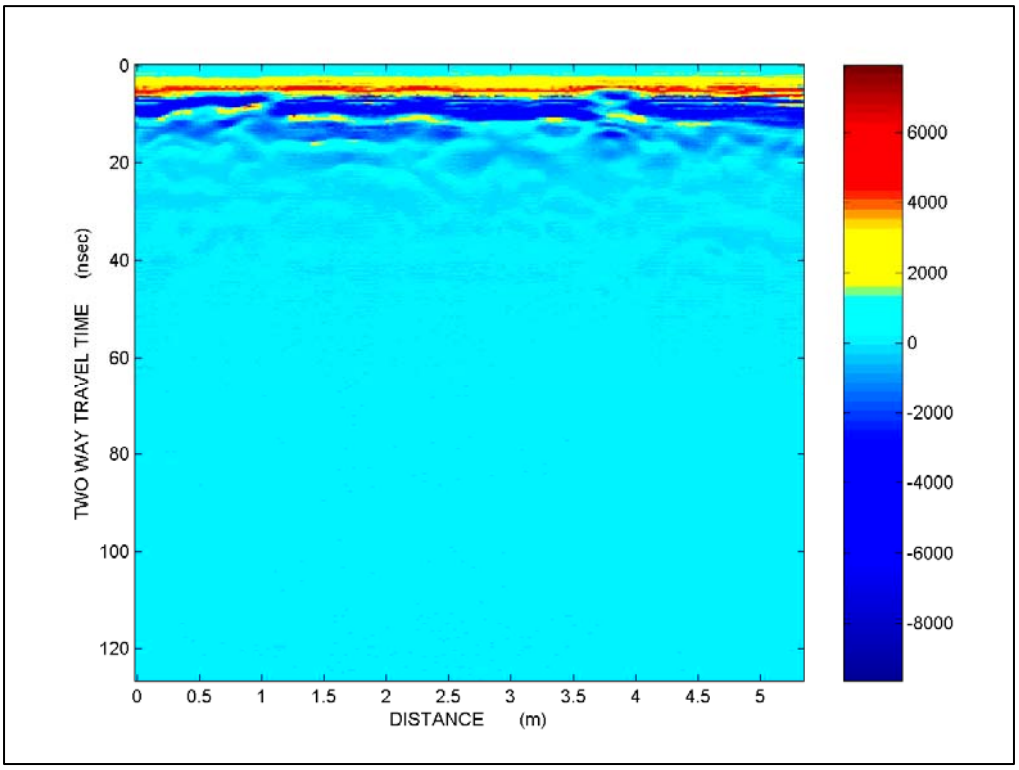
Εικόνα 6.1:*Αποτέλεσμα εφαρμογής αυτόματου ελέγχου ενίσχυσης (Automatic Gain Control - AGC).*



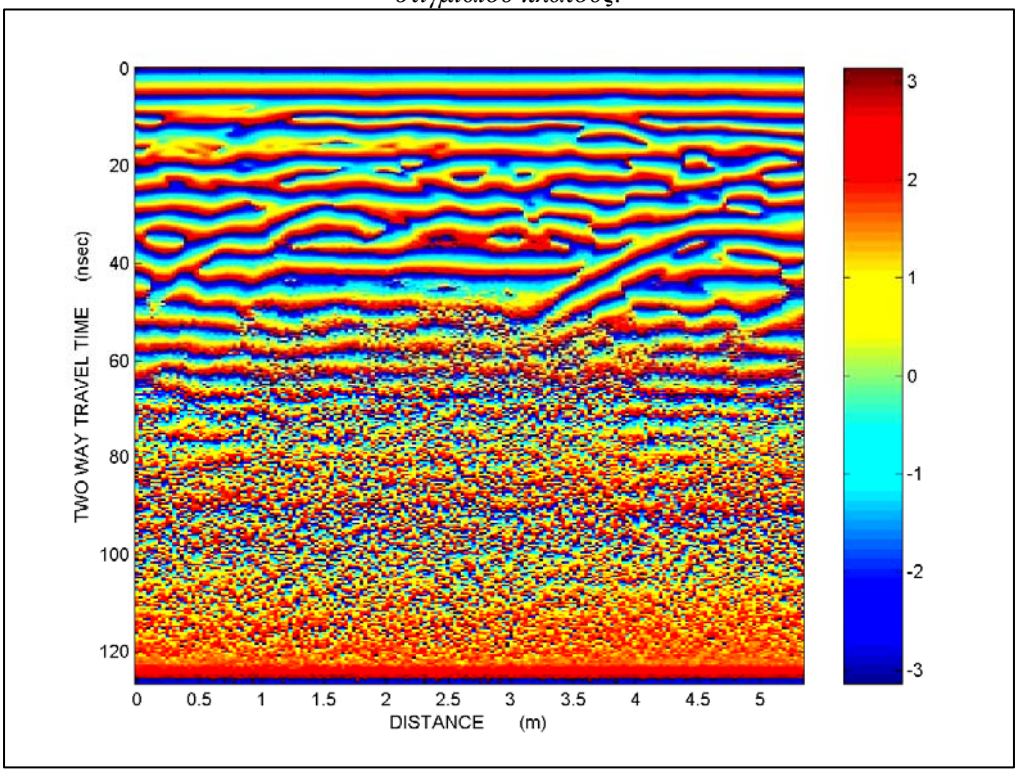
Εικόνα 6.2:*Αποτέλεσμα εφαρμογής του μιγαδικού χαρακτηριστικού στιγμιαίου πλάτους.*



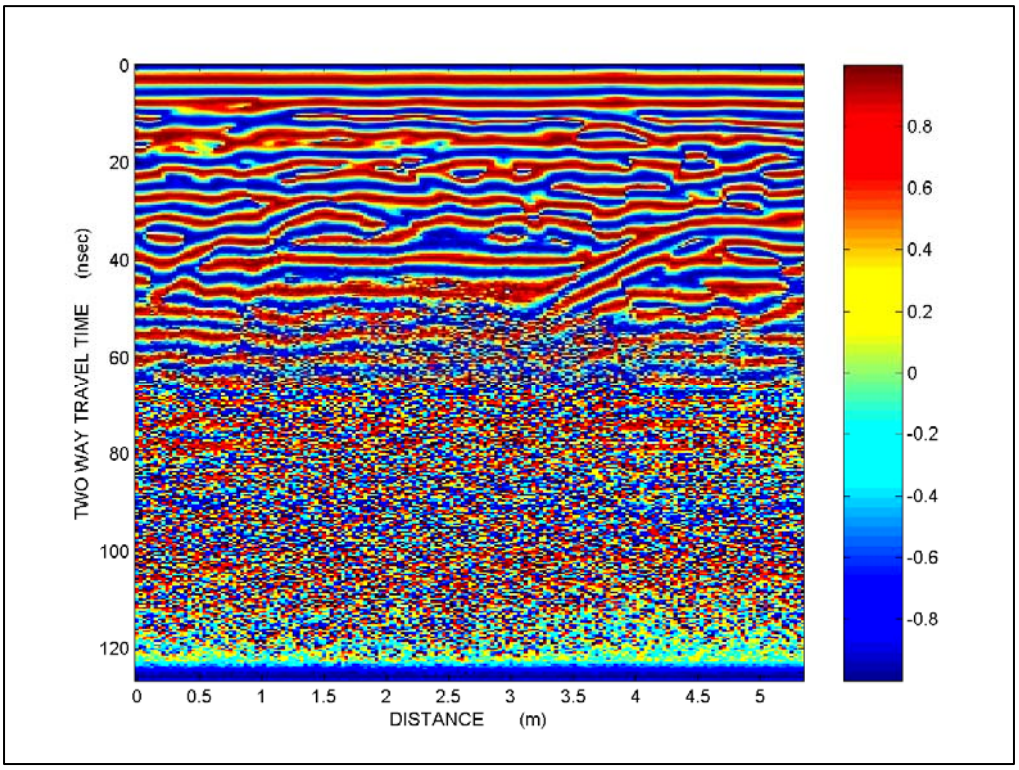
Εικόνα 6.3:*Αποτέλεσμα εφαρμογής του μιγαδικού χαρακτηριστικού στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB.*



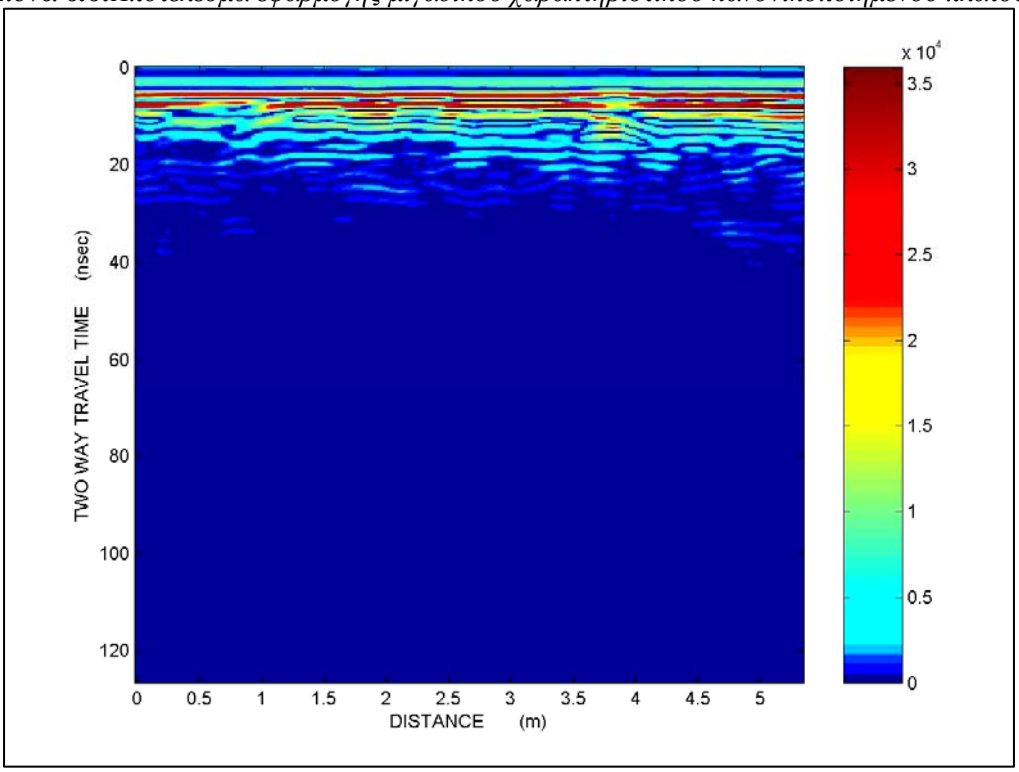
Εικόνα 6.4:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους.*



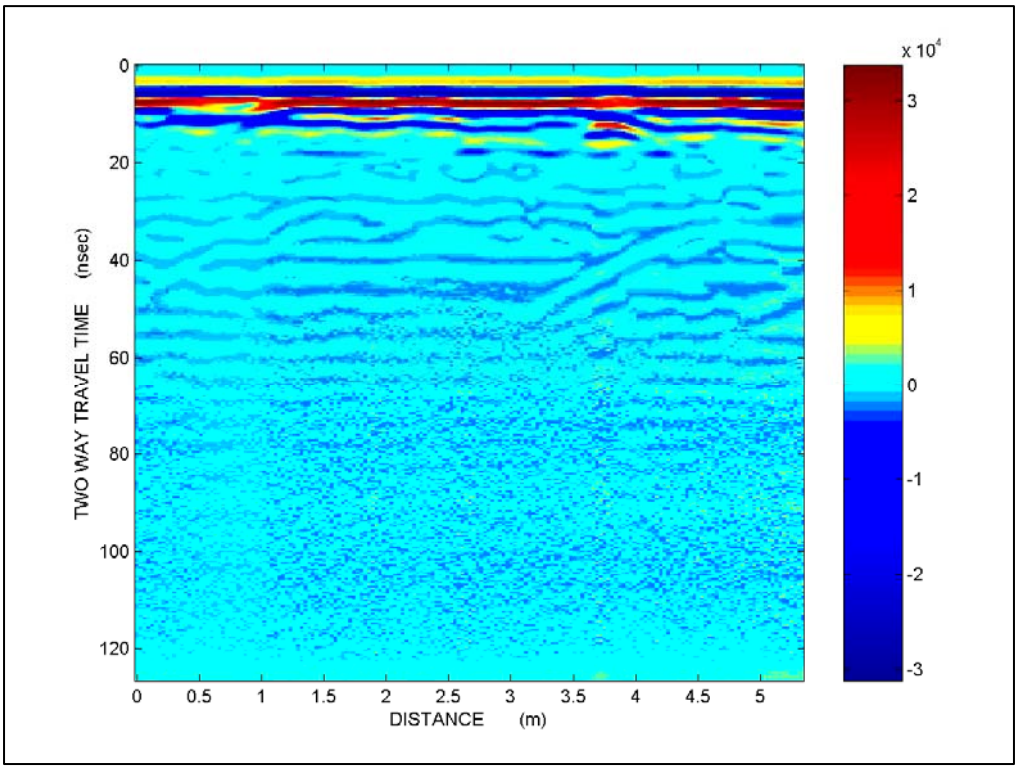
Εικόνα 6.5:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού στιγμιαίας φάσης.*



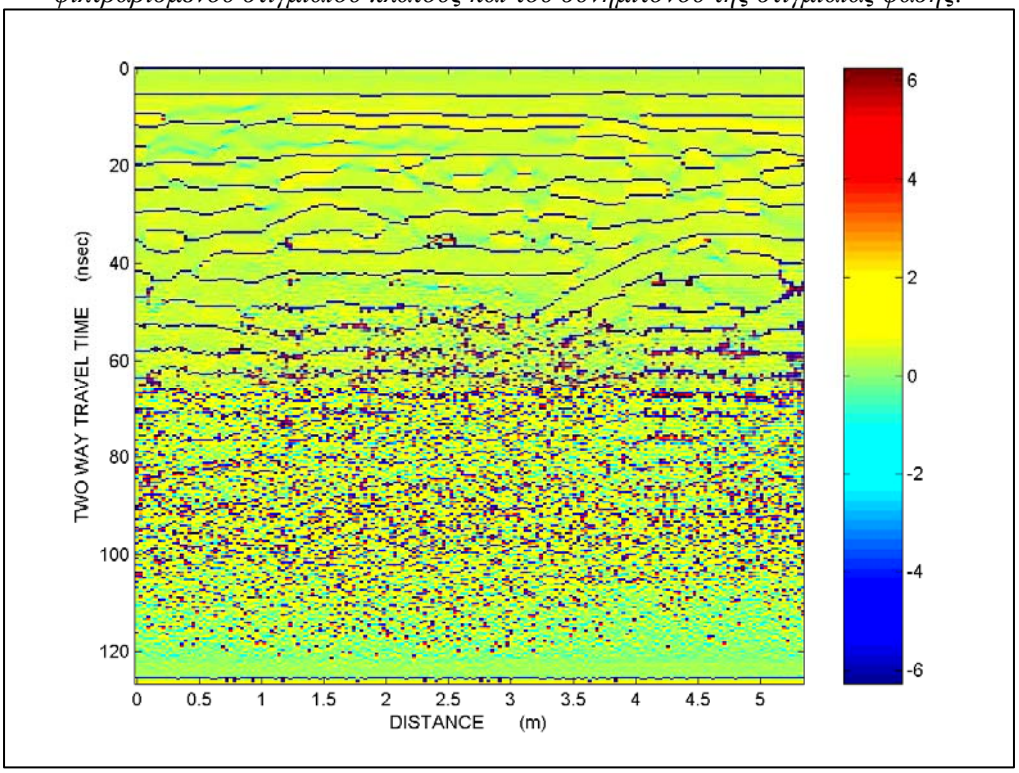
Εικόνα 6.6:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού κανονικοποιημένου πλάτους.*



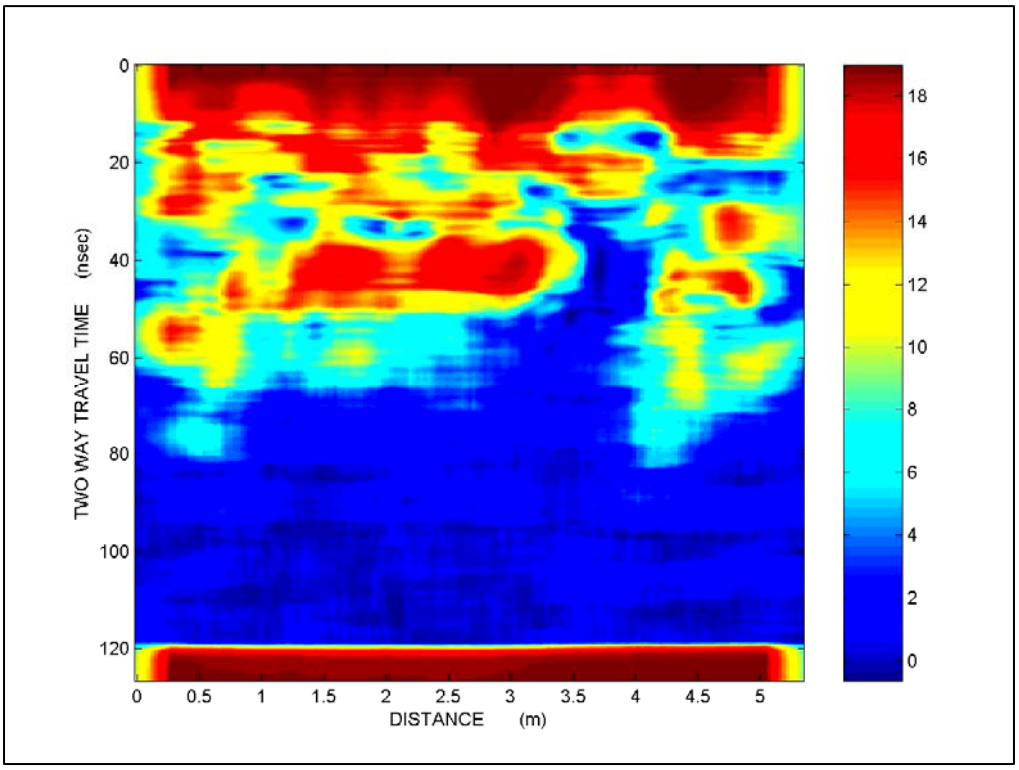
Εικόνα 6.7:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού του γινομένου του πλάτους και του συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης.*



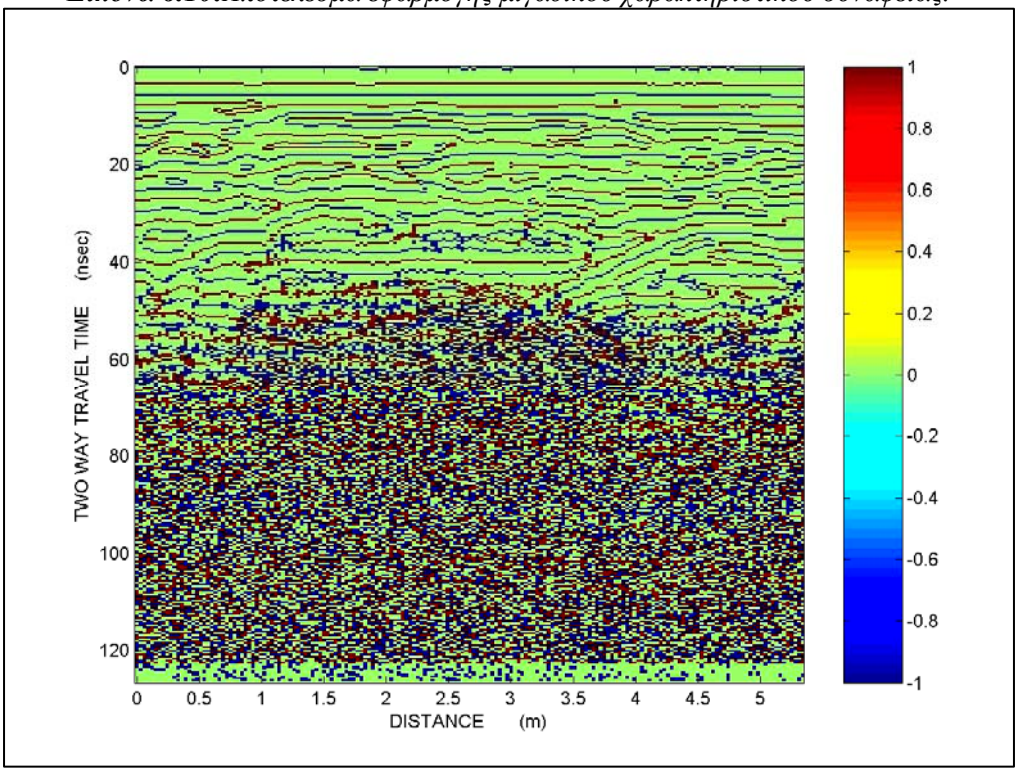
Εικόνα 6.8:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού του γινομένου του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης.*



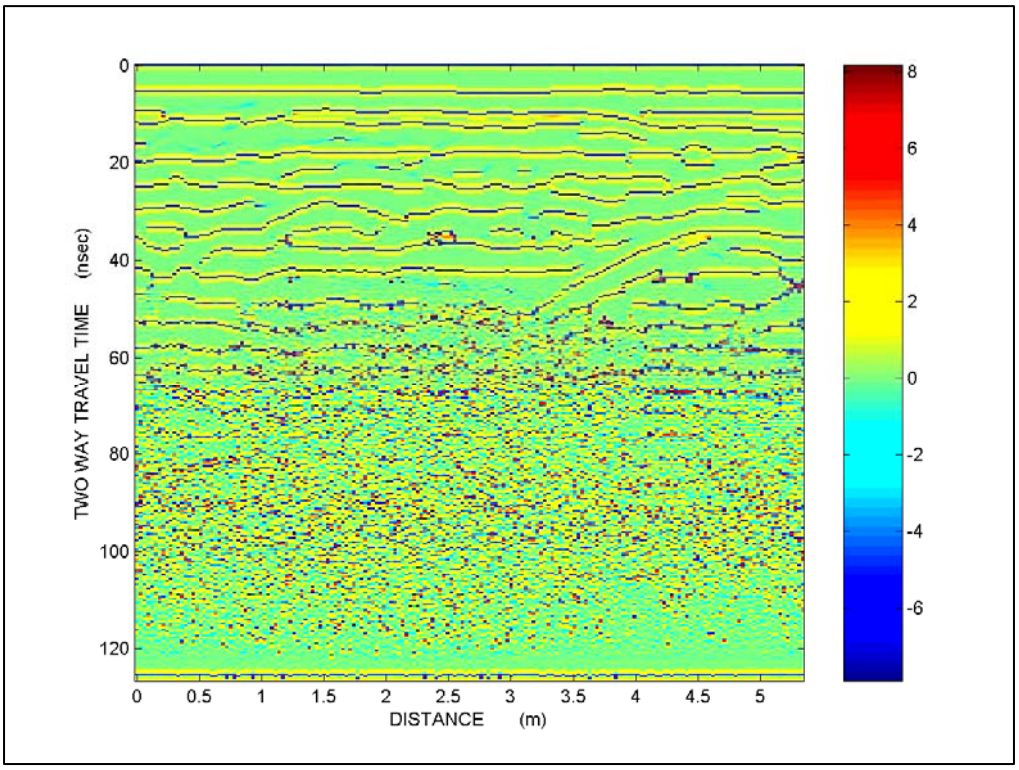
Εικόνα 6.9:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού της στιγμιαίας συχνότητας.*



Εικόνα 6.10:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού συνάφειας.*



Εικόνα 6.11:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού συνοχής της εικόνας.*



Εικόνα 6.12:*Αποτέλεσμα εφαρμογής μιγαδικού χαρακτηριστικού δείκτη λεπτών στρωμάτων.*

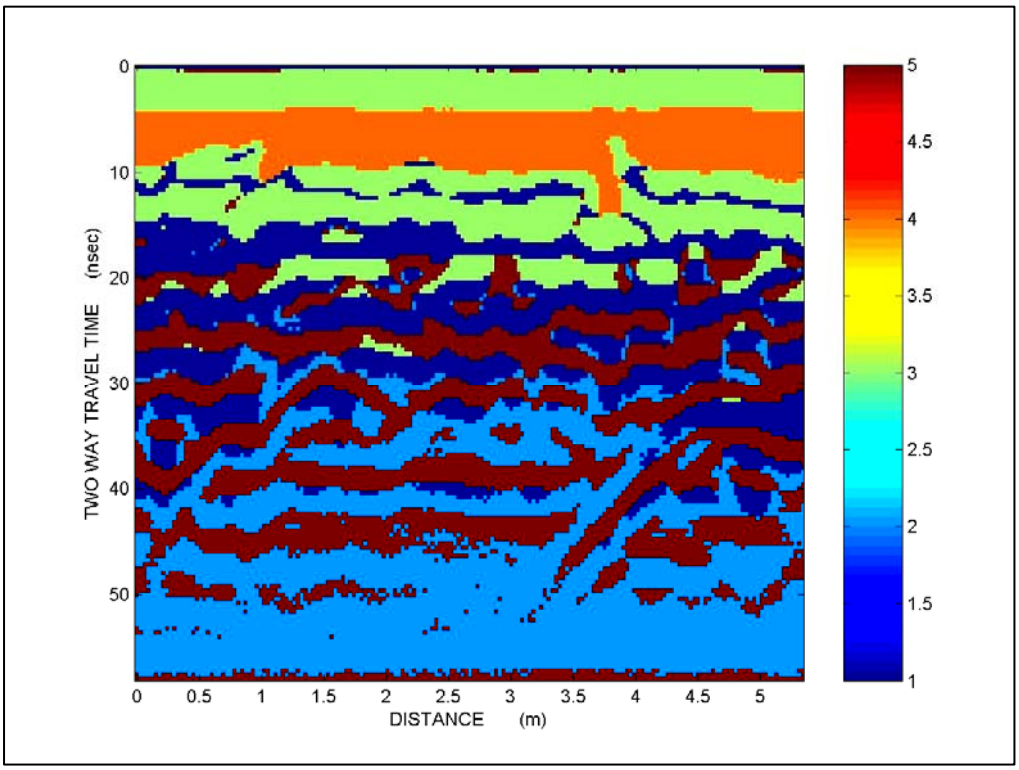
6.2.2 Δοκιμαστική ταξινόμηση και τελική επιλογή των συνδυασμών των μιγαδικών χαρακτηριστικών

Προκειμένου να γίνουν συνδυασμοί ορισμένων μιγαδικών χαρακτηριστικών που να έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στον τρόπο που παρουσιάζουν τη γεωφυσική εικόνα, επιλέχθηκε η γραμμή σαράντα με κατεύθυνση Βορράς-Νότος.

Στους συνδυασμούς αυτούς των μιγαδικών χαρακτηριστικών έγινε δοκιμαστική ταξινόμηση Fuzzy C-means σε πέντε, δέκα και δεκαπέντε τάξεις για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα και να επιλεγούν τελικά οι συνδυασμοί οι οποίοι θα εφαρμοστούν στη συνέχεια στο σύνολο των δεδομένων σε όλες τις γραμμές.

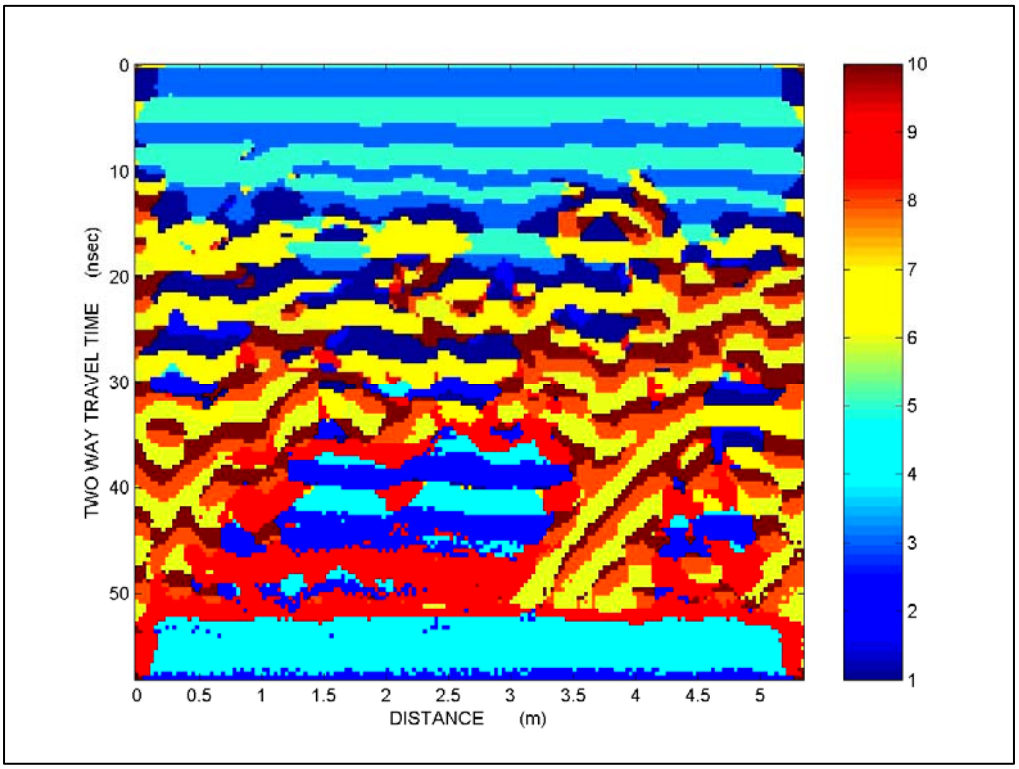
Οι αρχικοί συνδυασμοί για τις δοκιμές ήταν σαράντα έξι και από αυτούς ξεχώρισαν για τα αποτελέσματα που έδιναν οι δεκαοκτώ οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμαστική ταξινόμηση Fuzzy C-means στα δεδομένα της γραμμής 40 με διάφορους συνδυασμούς μιγαδικών

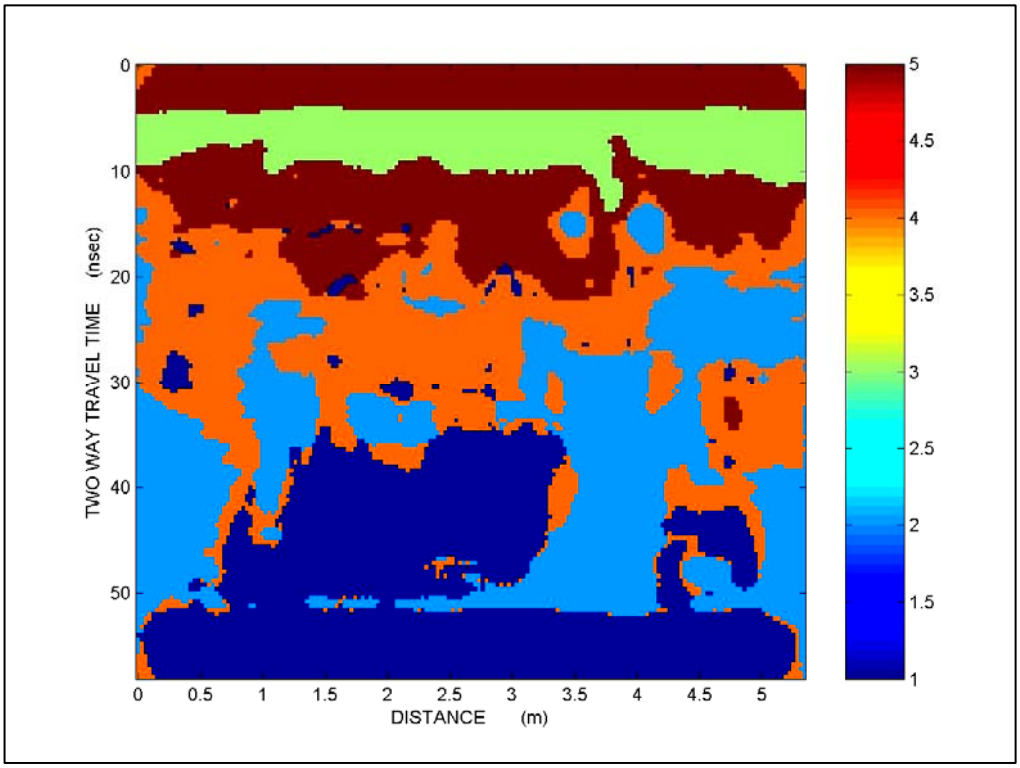


χαρακτηριστικών (attributes):

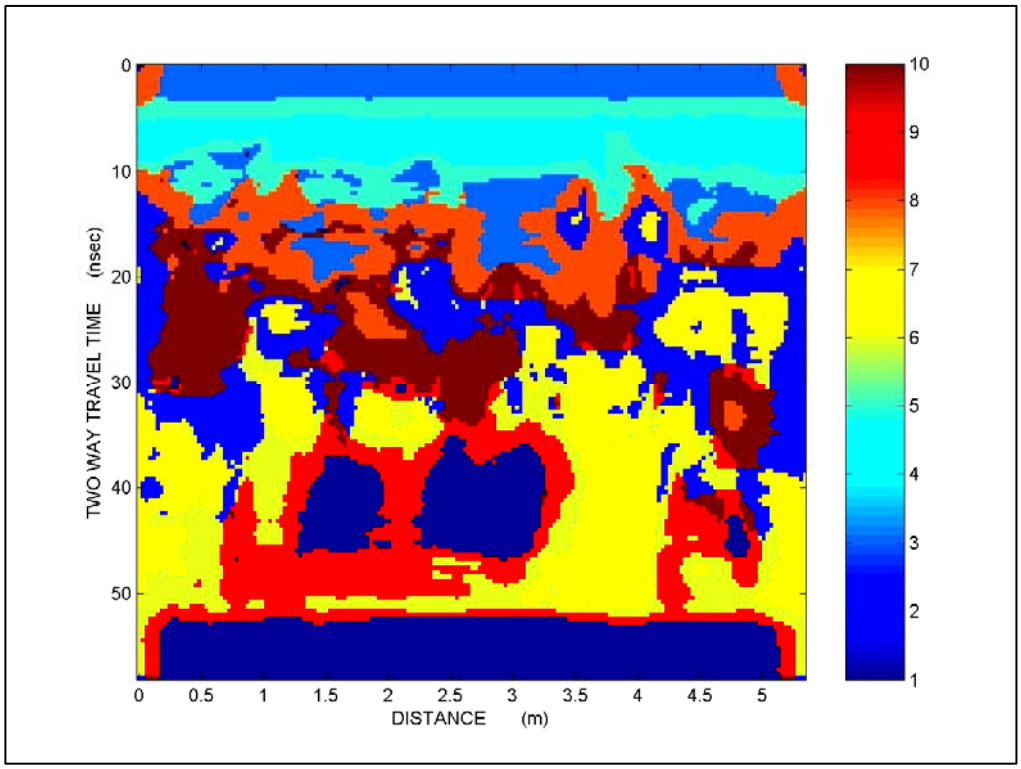
Εικόνα 6.13: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 5 τάξεις με attributes στιγμιαίου πλάτους, στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB και στιγμιαίας φάσης*



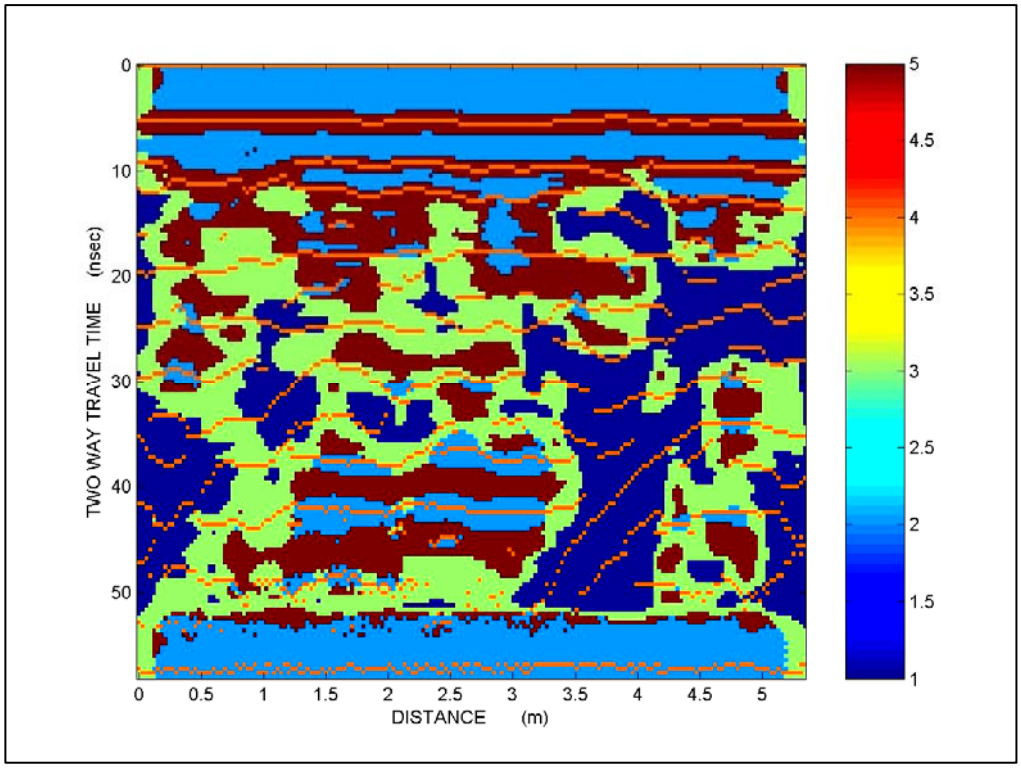
Εικόνα 6.14: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις με attributes στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB, στιγμιαίας φάσης και συνάφειας.*



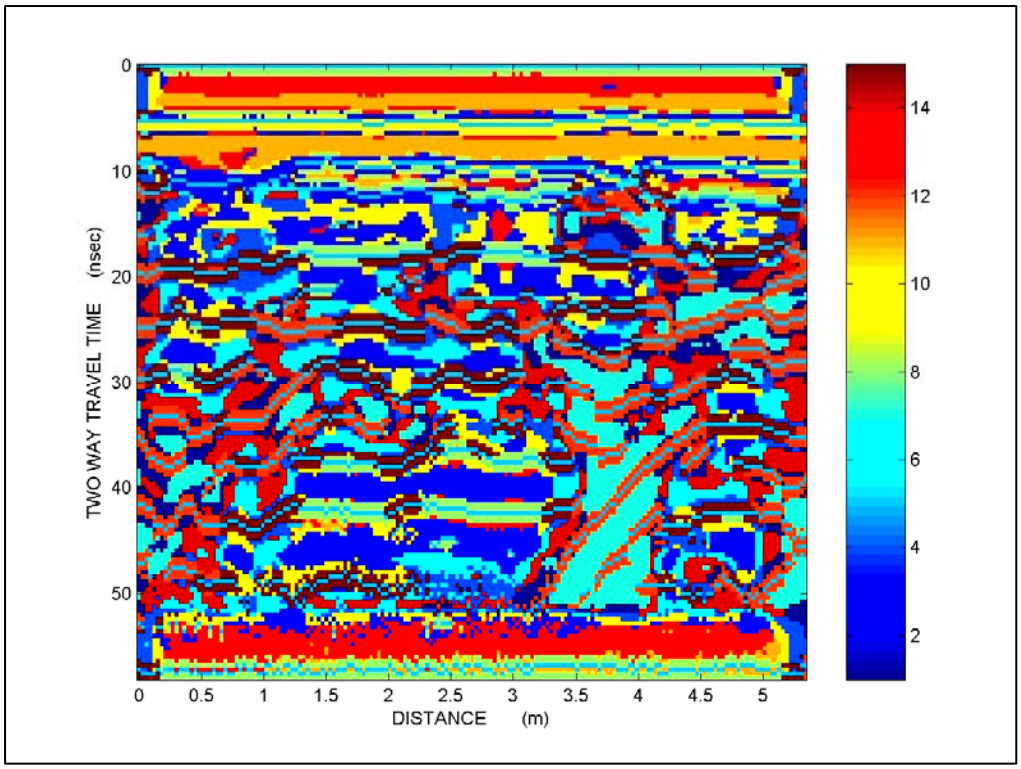
Εικόνα 6.15: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 5 τάξεις με attributes στιγμιαίου πλάτους, στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB, δείκτη λεπτών στρωμάτων και συνάφειας.*



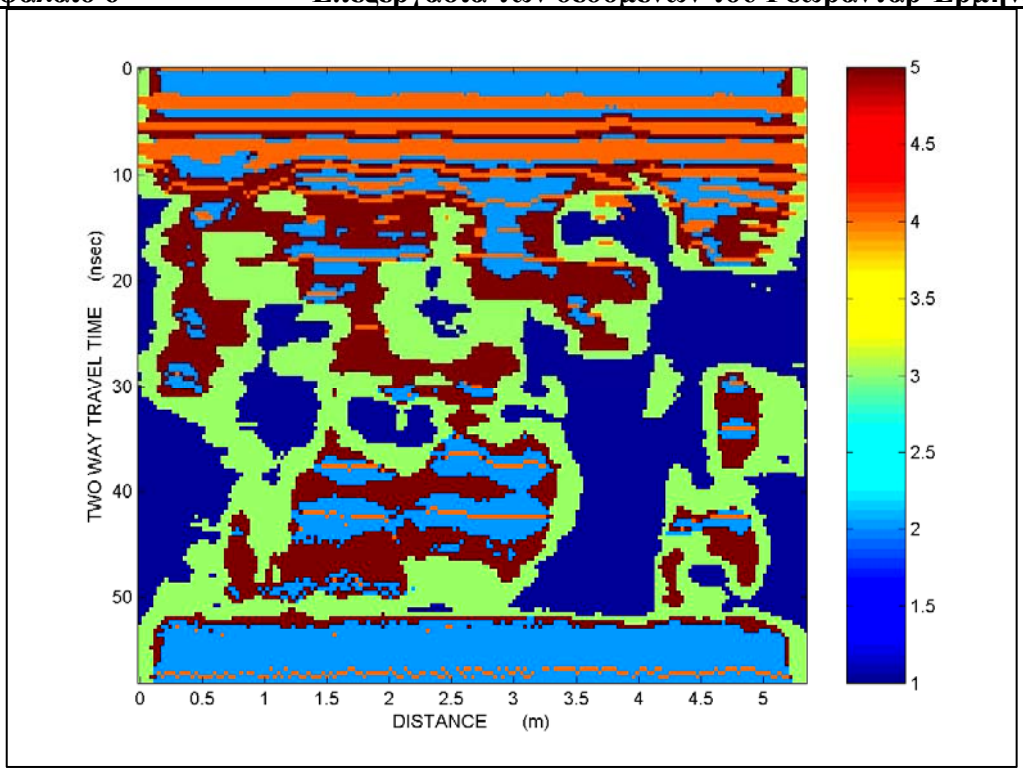
Εικόνα 6.16: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις με attributes στιγμιαίου πλάτους, στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB, δείκτη λεπτών στρωμάτων και συνάφειας.*



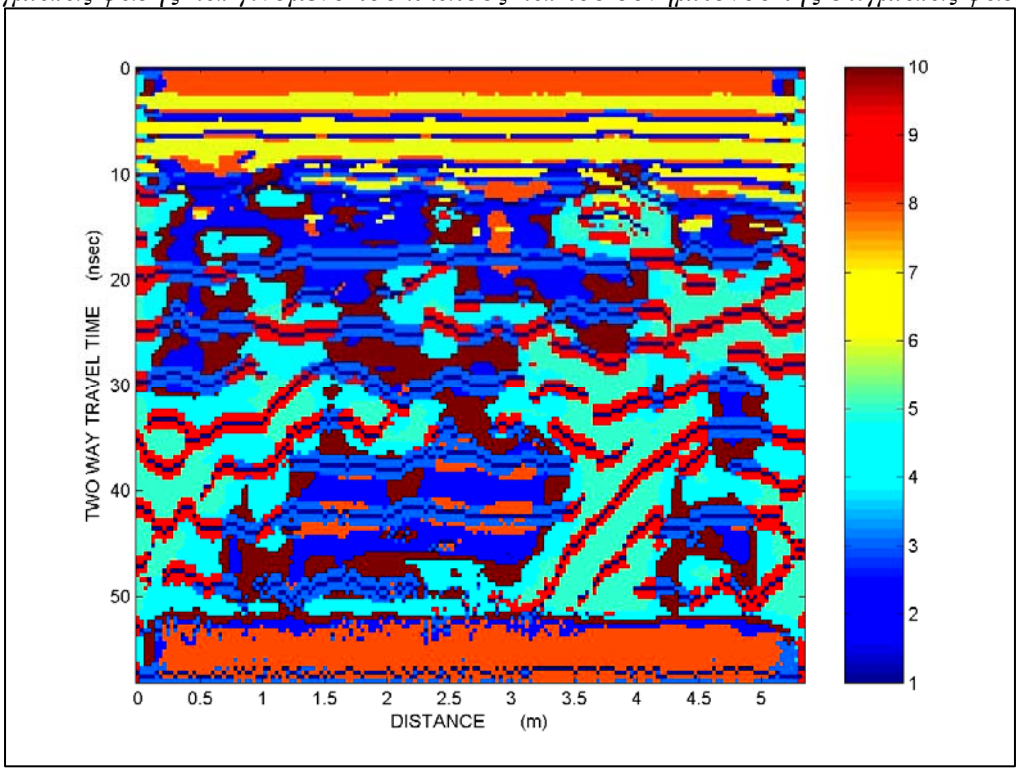
Εικόνα 6.17: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 5 τάξεις με μιγαδικά χαρακτηριστικά στιγμιαίας συχνότητας δείκτη λεπτών στρωμάτων, συνάφειας, γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης.*



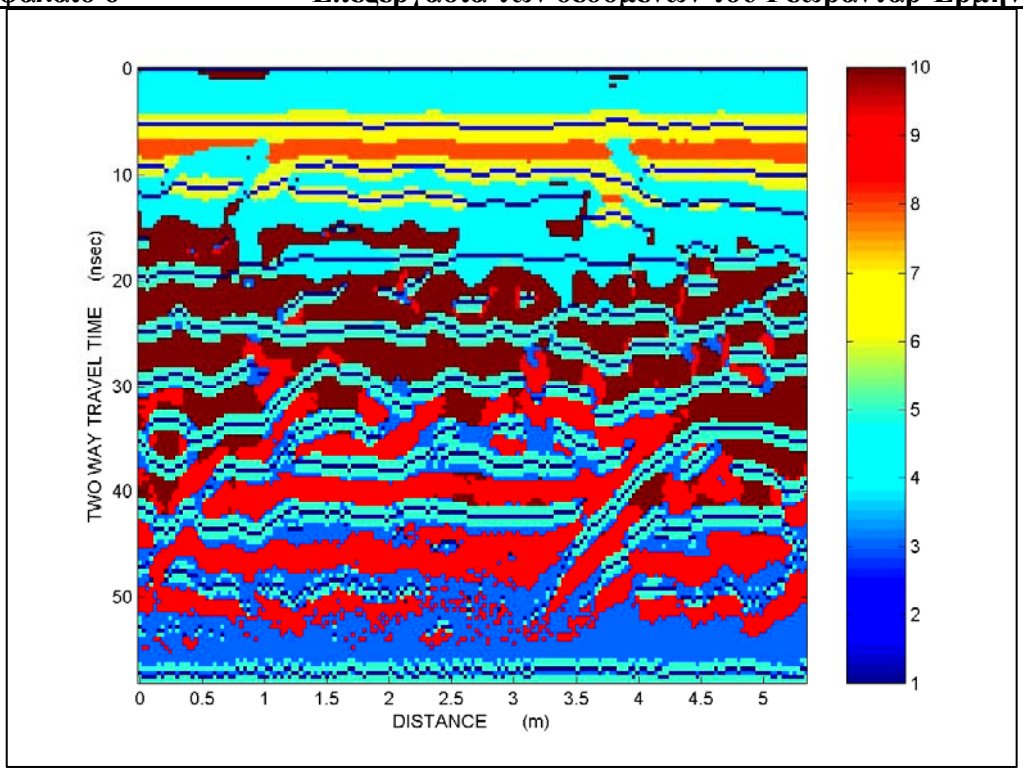
Εικόνα 6.18: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 15 τάξεις με attributes στιγμιαίας συχνότητας δείκτη λεπτών στρωμάτων, συνάφειας , γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης.*



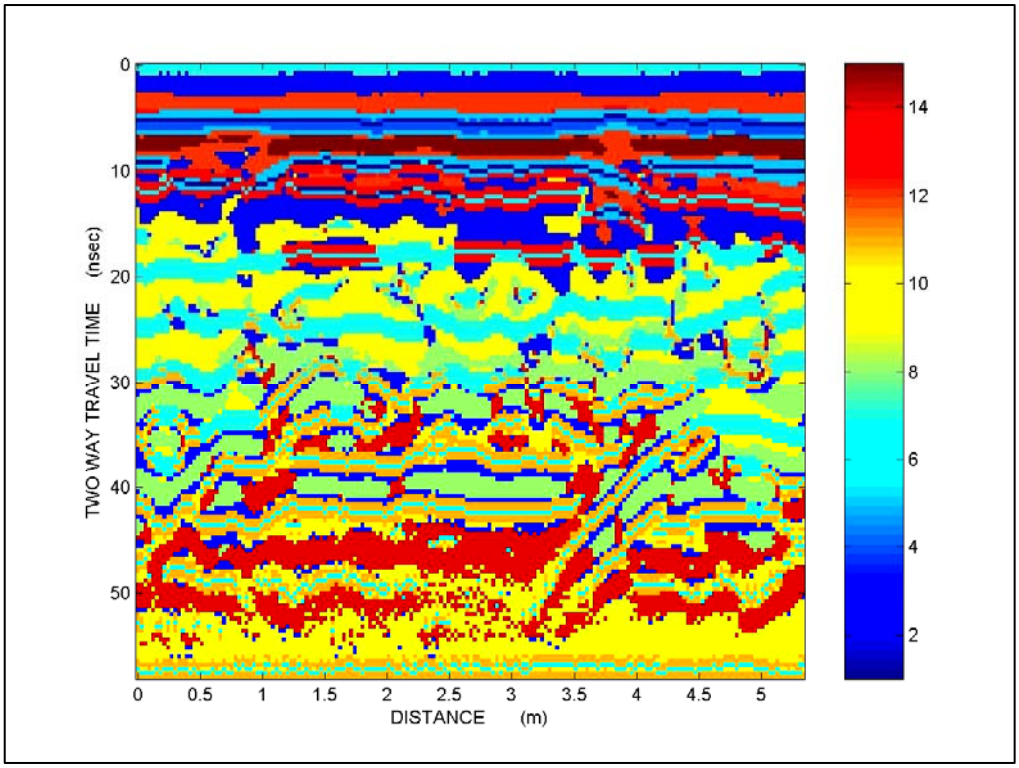
Εικόνα 6.19: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 5 τάξεις με attributes δείκτη λεπτών στρωμάτων, συνάφειας, γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης και γινόμενο του πλάτους και του συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης.*



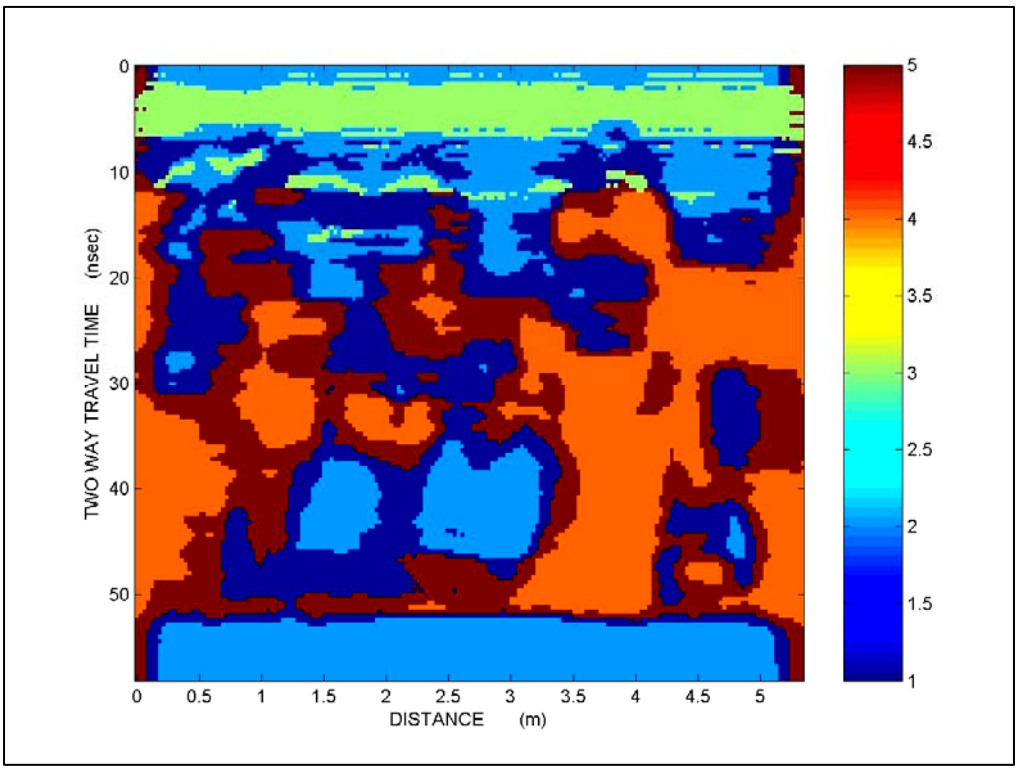
Εικόνα 6.20: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις με attributes δείκτη λεπτών στρωμάτων, συνάφειας, γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμ.πλάτους και του συνημίτονου της στιγμ.φάσης και το γινόμενο του στιγμ. πλάτος και της στιγμ.φάσης.*



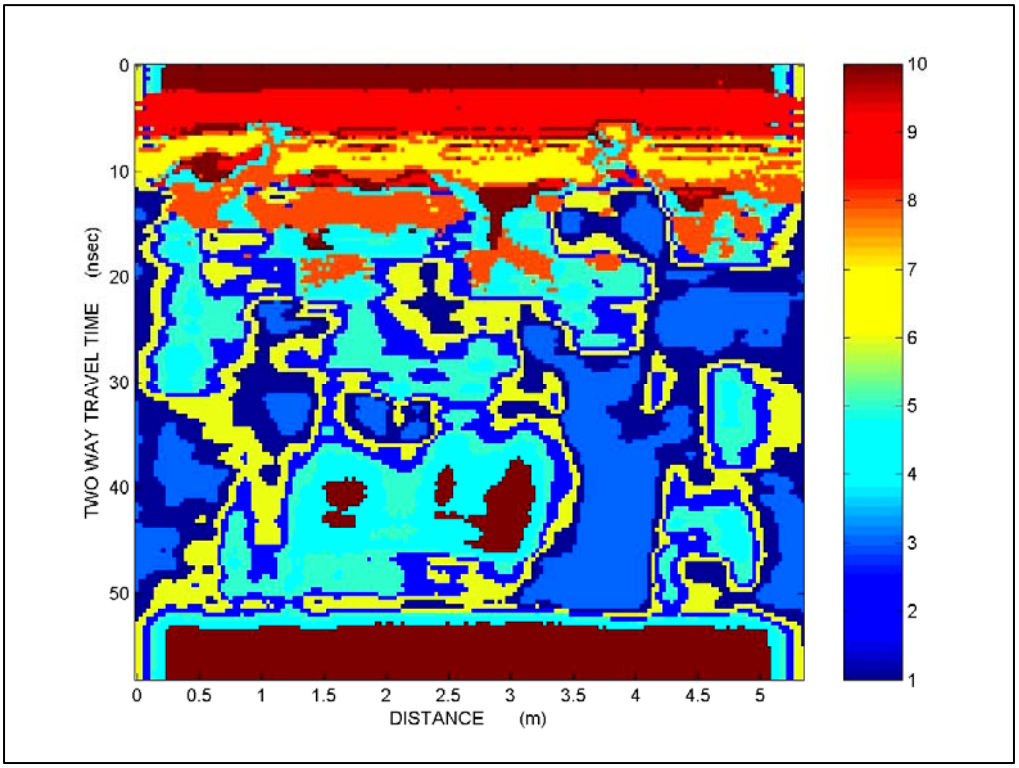
Εικόνα 6.21: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις με attributes στιγμ.πλάτους, στιγμ.πλάτους σε κλίμακα dB, στιγμιαίας συχνότητας,, δείκτη λεπτών στρωμάτων, γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμ.πλάτους και του συνημίτονου της στιγμ.φάσης.*



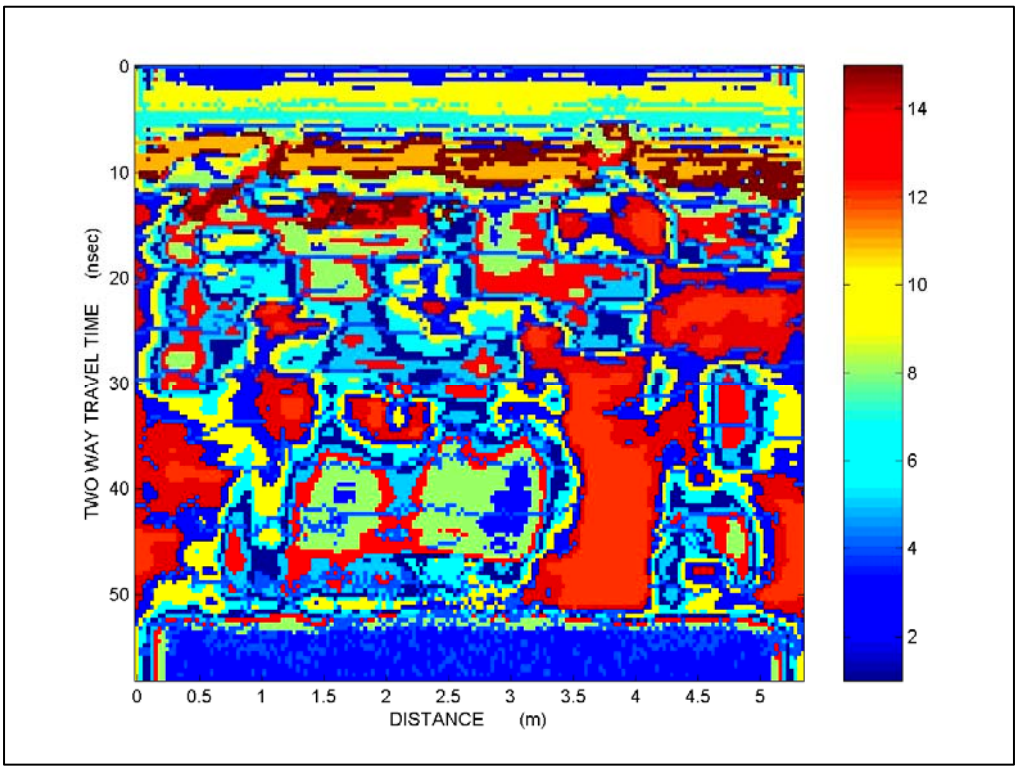
Εικόνα 6.22: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις attributes στιγμ.πλάτους, στιγμ.πλάτους σε κλίμακα dB, στιγμ.συχνότητας,, δείκτη λεπτών στρωμάτων, γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμ.πλάτους και του συνημίτονου της στιγμ.φάσης.*



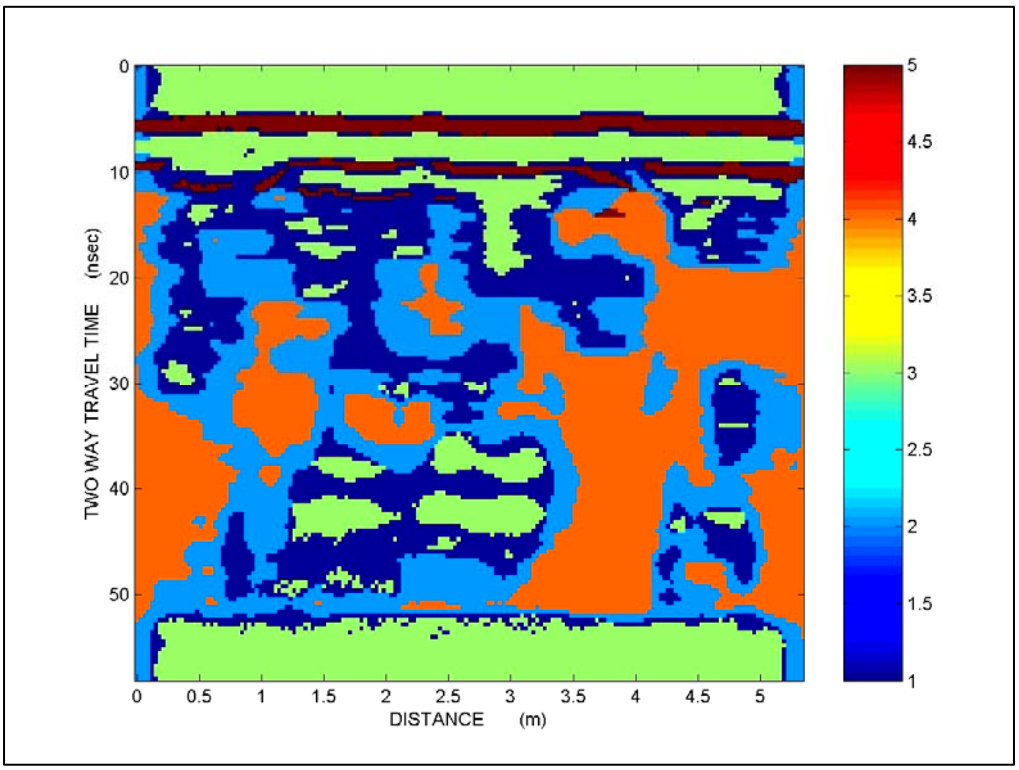
Εικόνα 6.23: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 5 τάξεις με attributes, συνάφεια, ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους, συνοχή της εικόνας.*



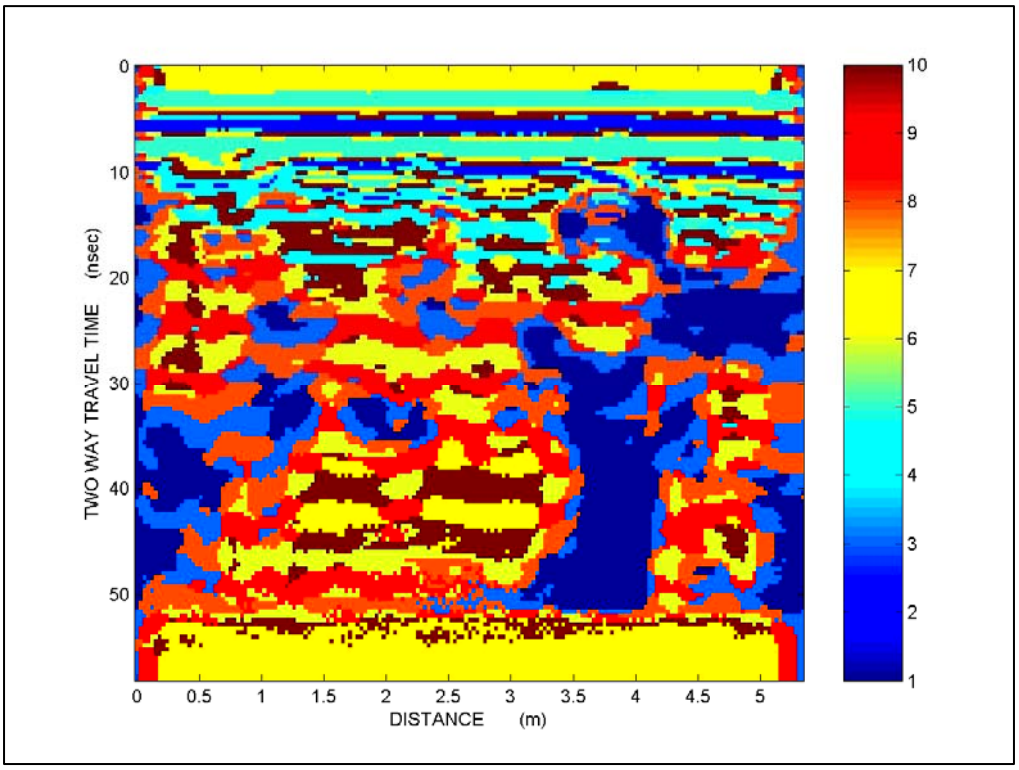
Εικόνα 6.24: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις με attributes συνάφειας,, ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους, συνοχή της εικόνας.*



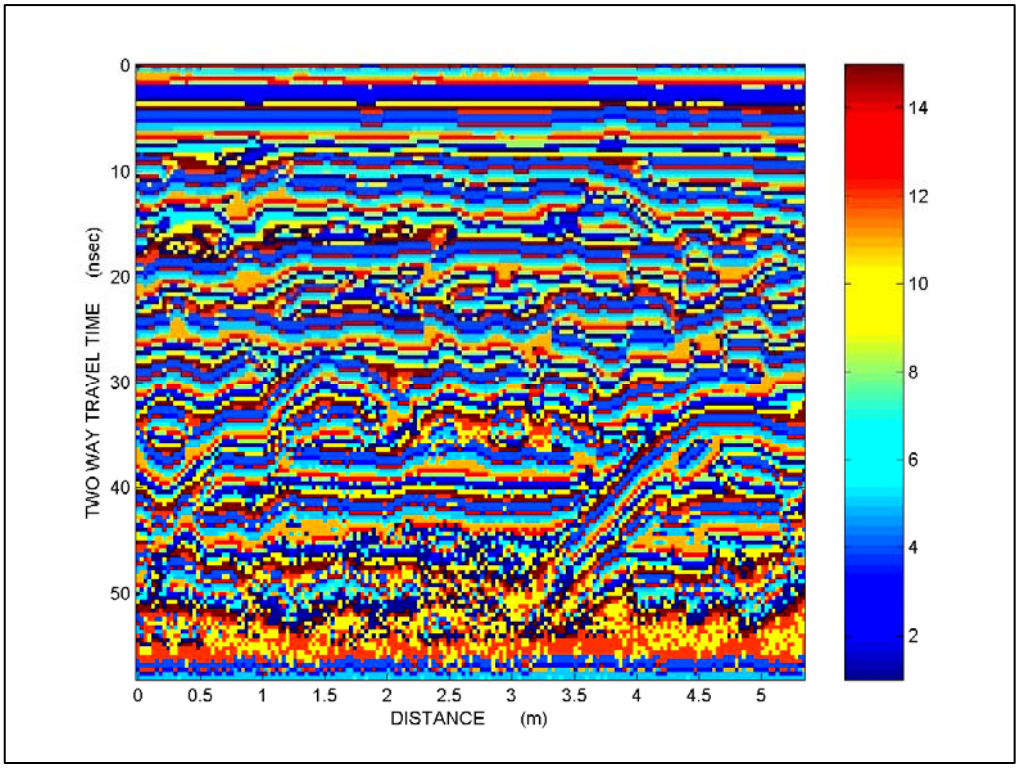
Εικόνα 6.25: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 15 τάξεις με attributes συνάφειας,, ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους ,συνοχή της εικόνας.*



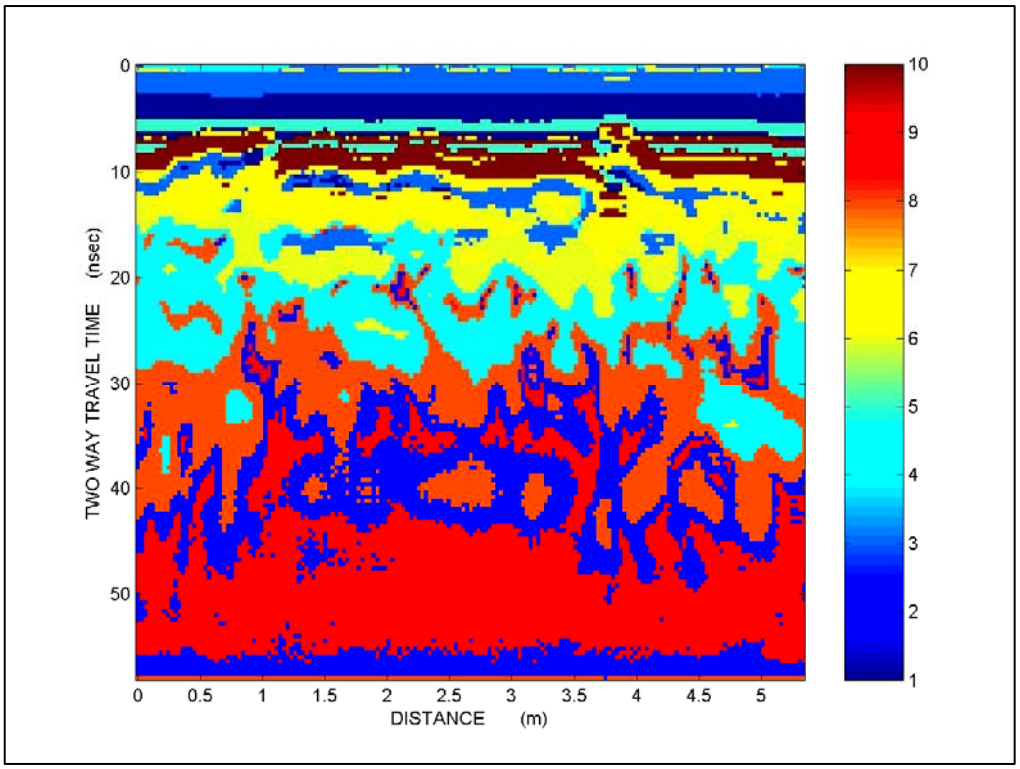
Εικόνα 6.26: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 5 τάξεις με attribute, συνάφειας, γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμ.πλάτους και του συνημίτονου της στιγμ.φάσης., γινόμενο του στιγμ. πλάτος και της στιγμ.φάσης, συνοχή της εικόνας.*



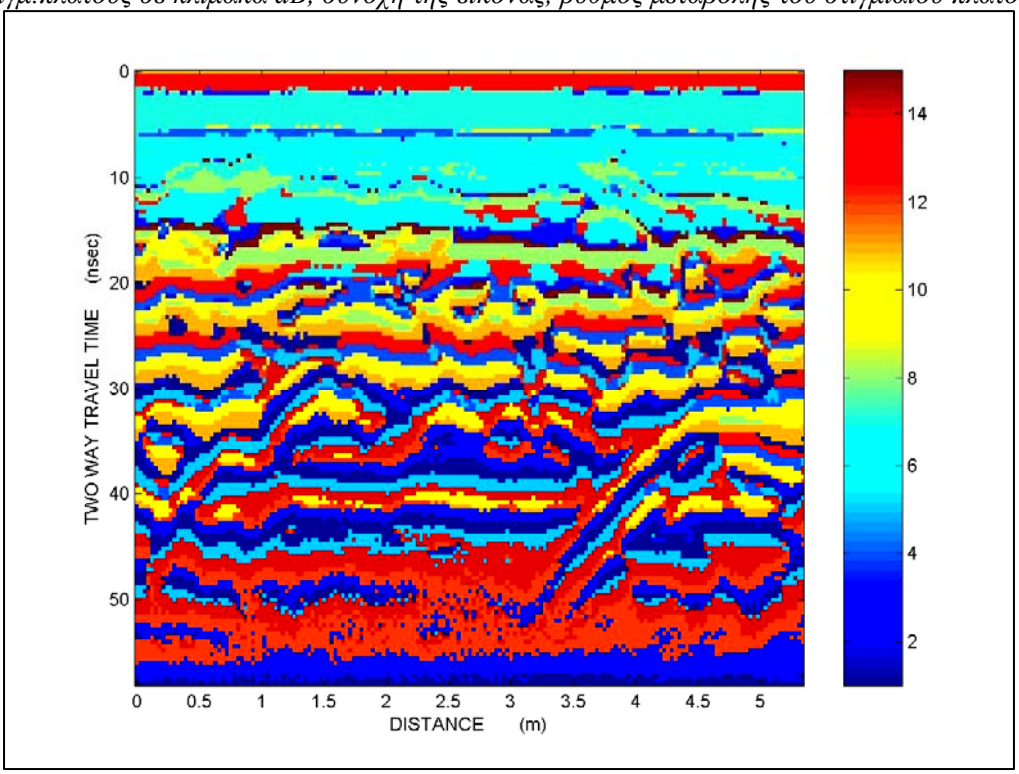
Εικόνα 6.27: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις με attributes συνάφειας, γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμ.πλάτους και του συνημίτονου της στιγμ.φάσης., γινόμενο του στιγμ. πλάτος και της στιγμ.φάσης, συνοχή της εικόνας.*



Εικόνα 6.28: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 15 τάξεις με attributes στιγμιαίας φάσης, δείκτη λεπτών στρωμάτων ,συνοχή της εικόνας, ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους.*



Εικόνα 6.29: *Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 10 τάξεις με attributes στιγμ.πλάτους, στιγμ.πλάτους σε κλίμακα dB, συνοχή της εικόνας, ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους*



Εικόνα 6.30:*Ταξινόμηση Fuzzy C-means σε 15 τάξεις attributes στιγμ.πλάτους σε κλίμακα dB, στιγμ.φάσης, Γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης, συνοχή της εικόνας, Ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους.*

Στη συνέχεια από τους δεκαοκτώ αυτούς συνδυασμούς μιγαδικών χαρακτηριστικών που παρουσιάστηκαν παραπάνω έγινε αξιολόγηση και τελικά επιλέχθηκαν τρεις οι οποίοι έδιναν καλύτερα αποτελέσματα και είναι οι παρακάτω:

- **Συνδυασμός Α** : Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά στιγμιαίου πλάτους, στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB, δείκτης λεπτών στρωμάτων, συνάφειας σε πέντε τάξεις (βλ. Εικόνα 6.15).
- **Συνδυασμός Β** : Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά στιγμιαίου πλάτους, στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB, δείκτης λεπτών στρωμάτων, συνάφειας σε δέκα τάξεις (βλ. Εικόνα 6.16).
- **Συνδυασμός Γ** : Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά στιγμιαίας συχνότητας, δείκτη λεπτών στρωμάτων, συνάφειας, γινόμενο του στιγμιαίου πλάτους και της στιγμιαίας φάσης σε πέντε τάξεις (βλ. Εικόνα 6.17).

6.3 Κύρια επεξεργασία

Το επόμενο στάδιο αφορά την κύρια επεξεργασία των δεδομένων η οποία έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab.

Με τη βοήθεια του Matlab έγιναν και οι δύο ταξινομήσεις. Πρώτα η αυτόματη ταξινόμηση K-μέσων τιμών και στη συνέχεια η καθοδηγούμενη ταξινόμηση μέγιστης πιθανοφάνειας (βλ. Κεφάλαιο 4).

Αρχικά φορτώθηκαν τα δεδομένα της πρώτης γραμμής στο Matlab. Στο παράθυρο εργασίας του Matlab συντάχθηκαν οι εντολές για να πραγματοποιηθεί η ταξινόμηση K-μέσων τιμών.

Η σύνταξη της εντολής για τη συγκεκριμένη ταξινόμηση έχει την ακόλουθη μορφή:

[.....] = kmeans (…, ΄param1’, val1, ‘param2’, val2…)

Με αυτό τον τύπο σύνταξης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει τις τιμές ορισμένων παραμέτρων προκειμένου να ελένξει τον επαναληπτικό αλγόριθμο

που χρησιμοποιεί η ταξινόμηση K-μέσων τιμών. Έτσι οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζονται με τη μορφή ζευγαριών, παράμετρος-τιμή.

Οι παράμετροι που ορίζονται προκειμένου να γίνει η διαδικασία αυτή και αφορούν τον τρόπο που θα γίνει η ταξινόμηση ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα που επιθυμούμε, είναι οι παρακάτω:

Παράμετροι	**Τιμή**
Distance=Απόσταση	sqEuclidean=Τετραγωνική Ευκλείδεια απόσταση
Start=Αρχή	uniform=Ομοιόμορφη επιλογή k σημείων τυχαία ως προς το σύνολο τιμών του X
Replicates=Επαναλήψεις της ταξινόμησης με καινούριο κέντρο κάθε φορά	3
Maxiter=Maximum number of iterations Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	300
Emptyaction=Πραγματοποιείται όταν η ομάδα χάσει όλα τα μέλη παρακολούθησης	drop=Απομάκρυνση των ομάδων που είναι άδειες
Display=Έκθεση αποτελεσμάτων	iter=εκθέτει τις πληροφορίες για κάθε επανάληψη και περιλαμβάνει τον αριθμό επανάληψης, τη βελτιστοποίηση φάσης, τον αριθμό των σημείων που μετακινήθηκαν και το συνολικό άθροισμα των αποστάσεων

Η ίδια ταξινόμηση γίνεται στη συνέχεια για όλες τις γραμμές και μάλιστα κρατώντας το κέντρο της προηγούμενης γραμμής κάθε φορά, το οποίο αντικαθιστά

στην τιμή ‘uniform’ της παραμέτρου ‘start’ και χρησιμοποιείται στην επόμενη ταξινόμηση.

Στη συνέχεια ομαδοποιούνται τα κέντρα που έχουν προκύψει και ανάλογα με τον αριθμό των τάξεων που έχουν επιλεγεί, πέντε ή δέκα δημιουργούνται πίνακες T. Στη συνέχεια όλοι οι πίνακες T ομαδοποιούνται σε έναν πίνακα T_c.

Π.χ. T = [1 2 3 4 5]’ αν έχουμε πέντε τάξεις

T_c= cat (1,T,T,T...,T) για όσους πίνακες T έχουμε.

Το επόμενο βήμα είναι η δεύτερη ταξινόμηση, η καθοδηγούμενη, η οποία βασίζεται στα αποτελέσματα της αυτόματης. Η ταξινόμηση αυτή, όπως έχουμε ήδη αναφέρει είναι αυτή της μέγιστης πιθανοφάνειας.

Σύμφωνα με αυτή, και πάντα στο περιβάλλον του Matlab συντάσσονται εντολές που δημιουργούν τις τάξεις ταξινομώντας τα δεδομένα σύμφωνα με τα κέντρα που έχουν προκύψει από την προηγούμενη ταξινόμηση και τον πίνακα T_c**.**

Η μορφή σύνταξης της εντολής για την ταξινόμηση μέγιστης πιθανοφάνειας (Discriminant Analysis) είναι η παρακάτω:

class = classify (sample, training, group)

Όπου, sample =δείγμα

training =δεδομένα εκπαίδευσης

group =ομάδα

Το δείγμα και τα δεδομένα εκπαίδευσης πρέπει να είναι πίνακες με τον ίδιο αριθμό στηλών, ενώ η ομάδα και τα δεδομένα εκπαίδευσης πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό γραμμών.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας καταλήγουμε στη δημιουργία τάξεων όπως αυτές προέκυψαν τόσο για την ταξινόμηση K-μέσων τιμών όσο και για την ταξινόμηση μέγιστης πιθανοφάνειας.

6.4 Δημιουργία προφίλ

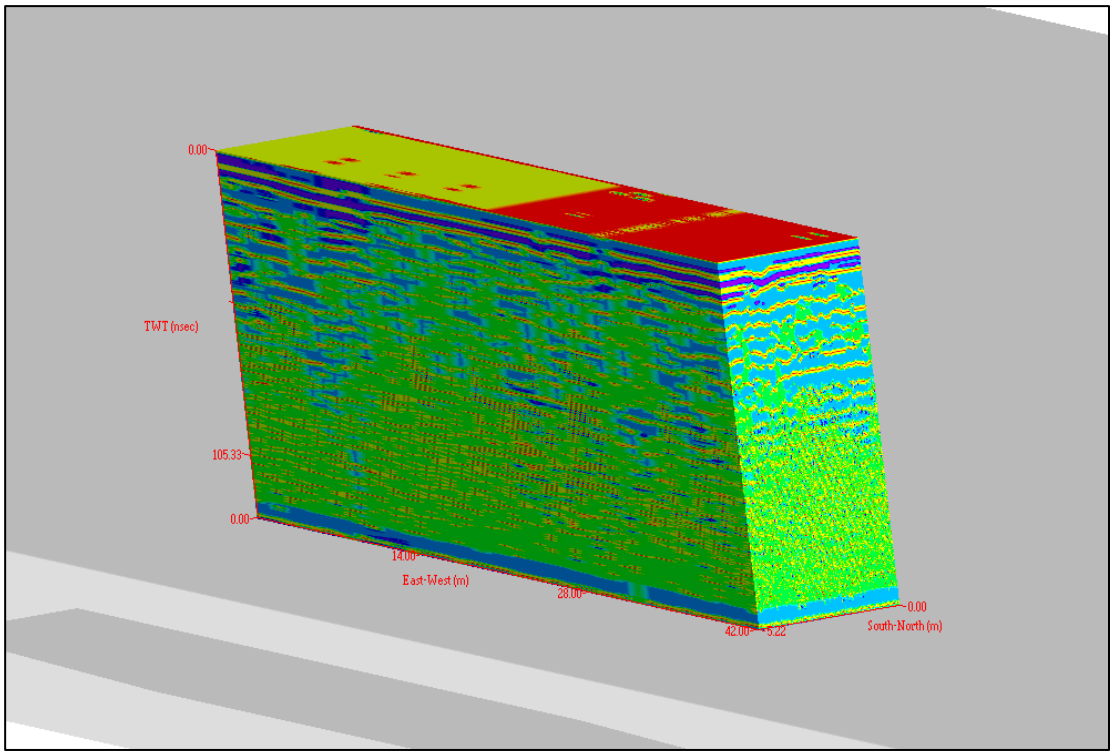
Η επόμενη φάση της επεξεργασίας είναι η δημιουργία μέσω του προγράμματος του Matlab δύο προφίλ για τα αποτελέσματα και των δύο ταξινομήσεων. Το προφίλ 1 αφορά την πρώτη μέχρι και την τεσσαρακοστή τρίτη γραμμή με κατεύθυνση Βορράς-Νότος. Ενώ το δεύτερο προφίλ συνεχίζει από τη γραμμή σαράντα τέσσερα μέχρι και την τελευταία, δηλαδή την εβδομήντα, Βορράς-Νότος.

6.5 Επεξεργασία με τη βοήθεια των προγραμμάτωνTransform 3 και T3d

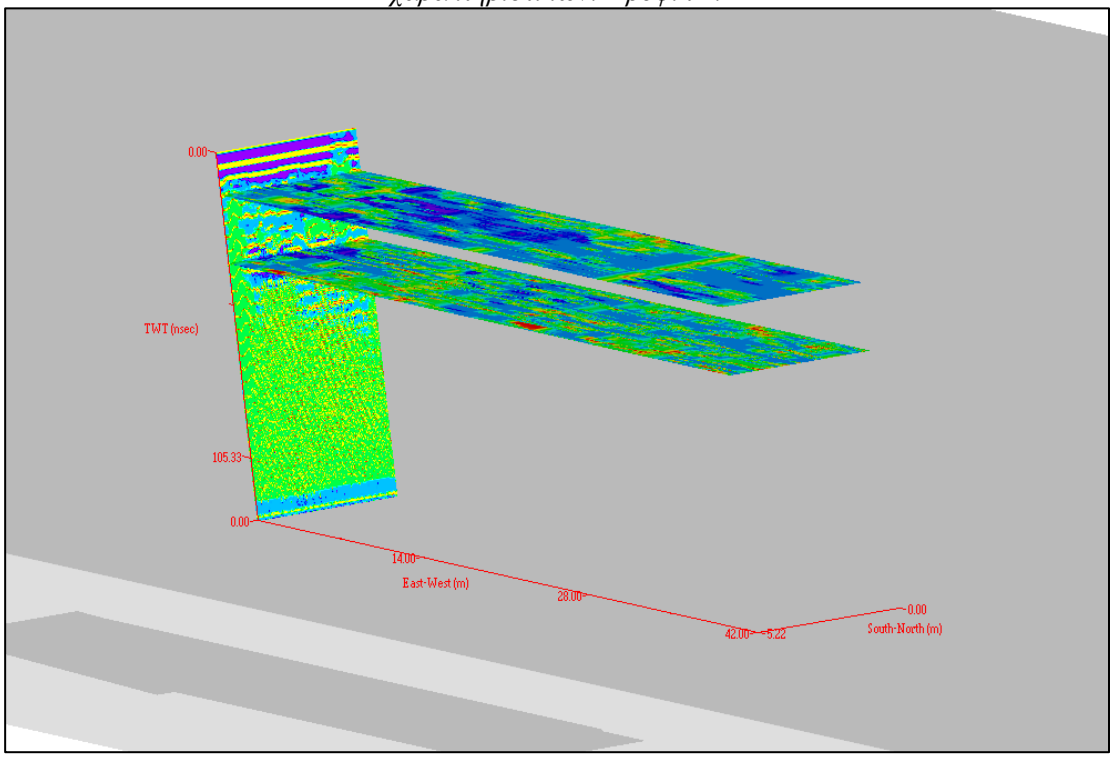
Το πρόγραμμα Transform 3 χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση κάθε γραμμής ξεχωριστά. Έτσι δημιουργείται η τομή κάθε γραμμής.

Όλα τα δεδομένα εισάγονται στη συνέχεια στο πρόγραμμα T3d για την τρισδιάστατη απεικόνιση τους. Δημιουργούνται όγκοι στους οποίους διακρίνονται οι τάξεις που έχουν δημιουργηθεί από τις ταξινομήσεις.

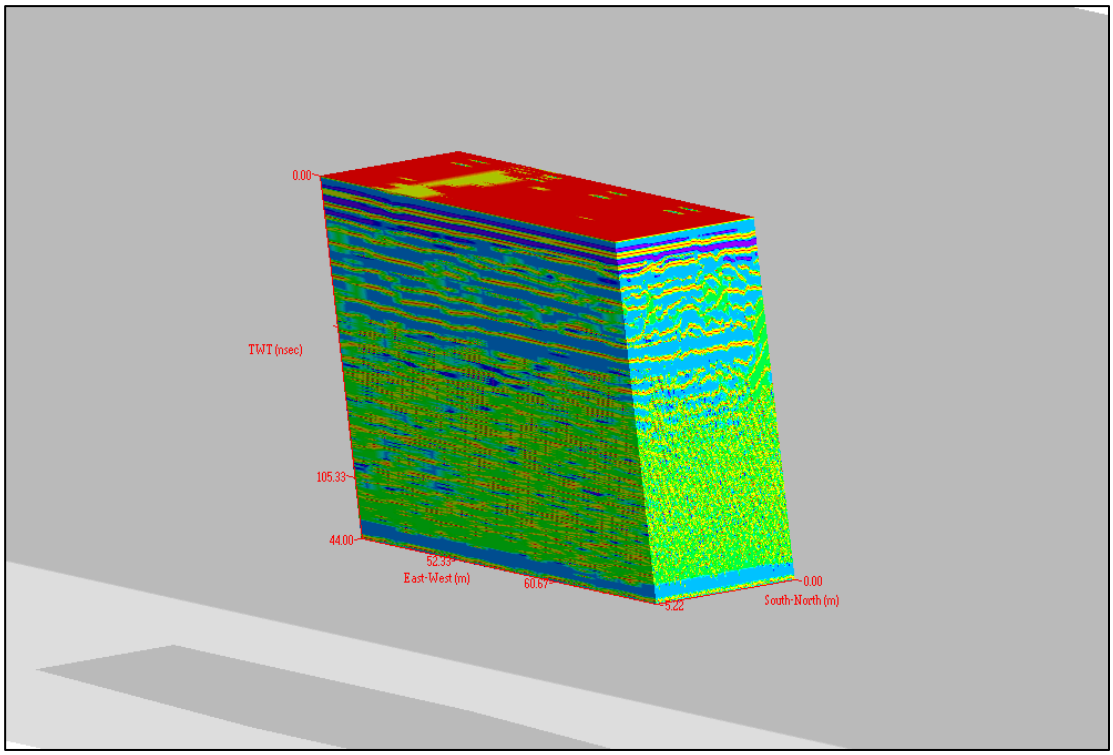
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες εικόνες που προέκυψαν από το πρόγραμμα T3d.



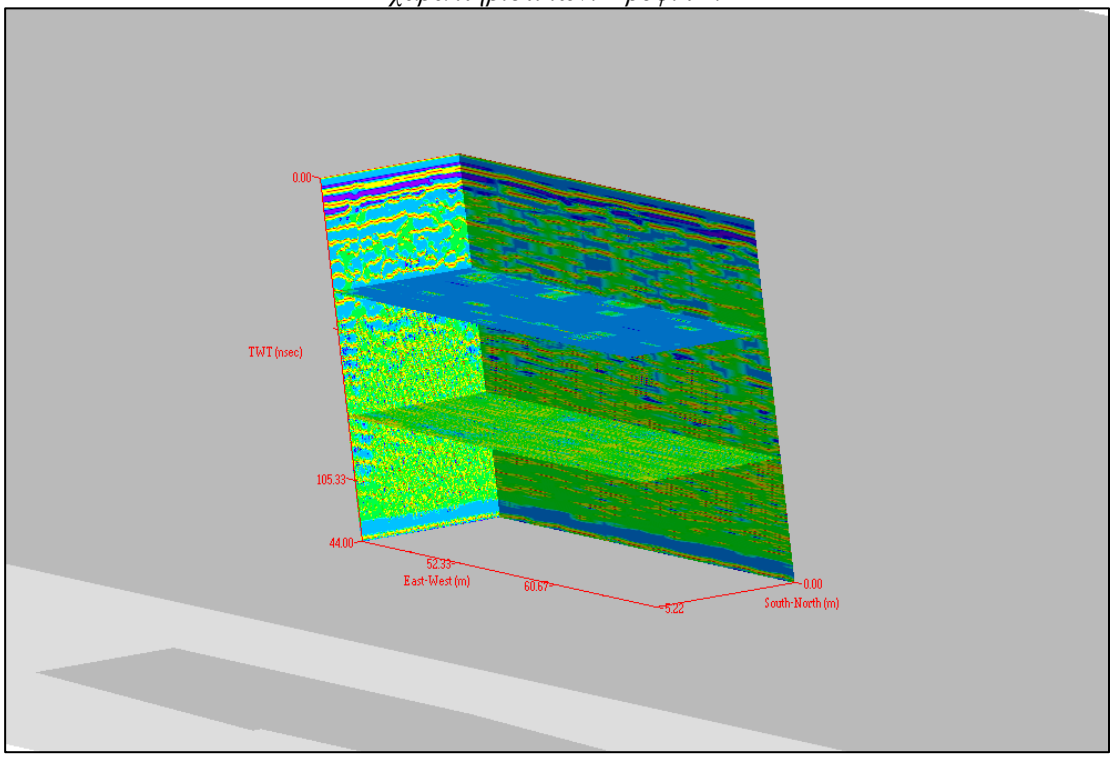
Εικόνα 6.31: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Α των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 1.*



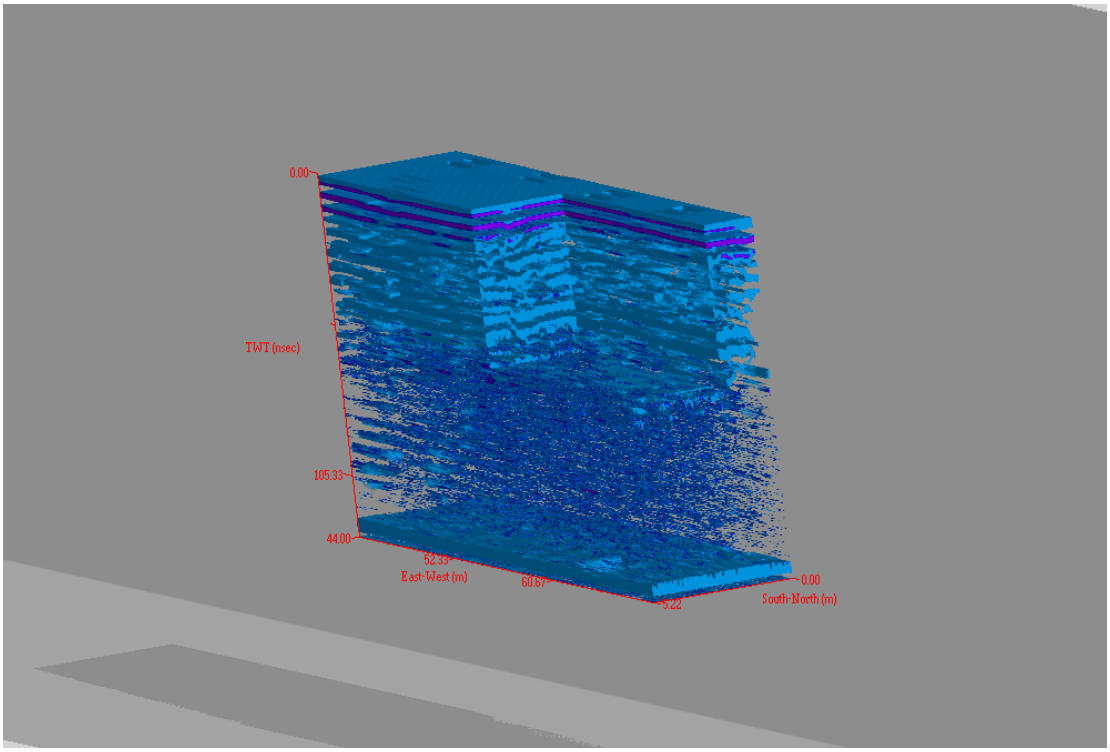
Εικόνα 6.32: *Τρισδιάστατη απεικόνιση τομών της ταξινόμησης με το συνδυασμό Α των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 1.*



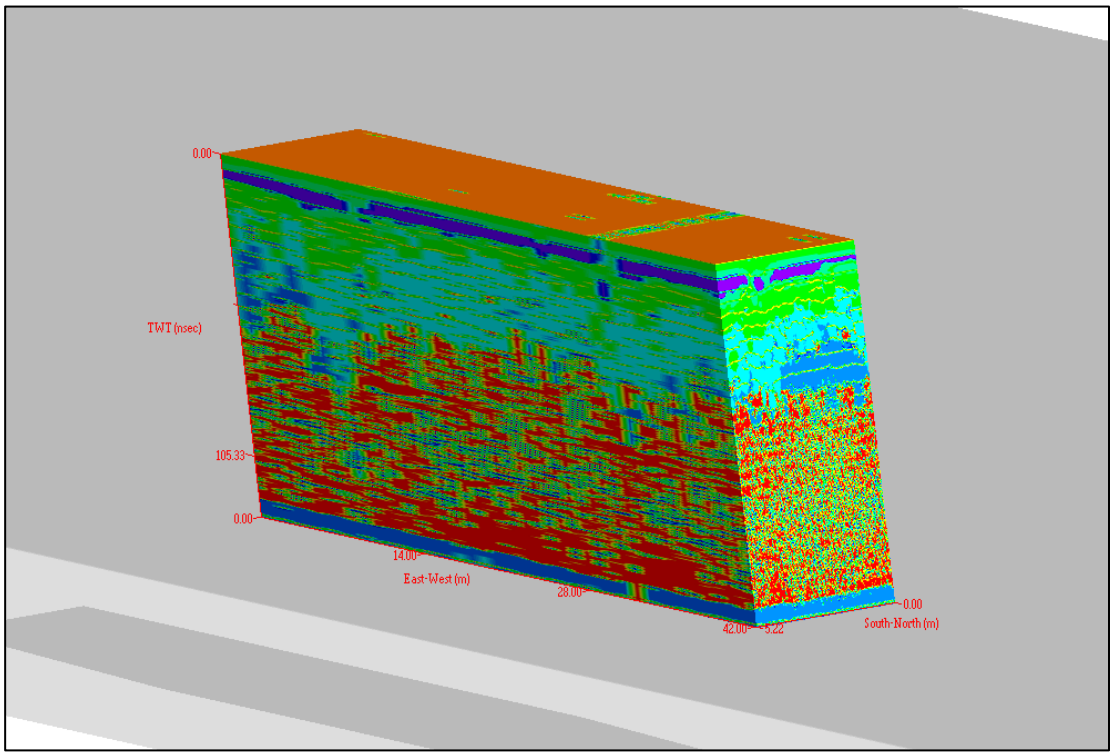
Εικόνα 6.33: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Α των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 2.*



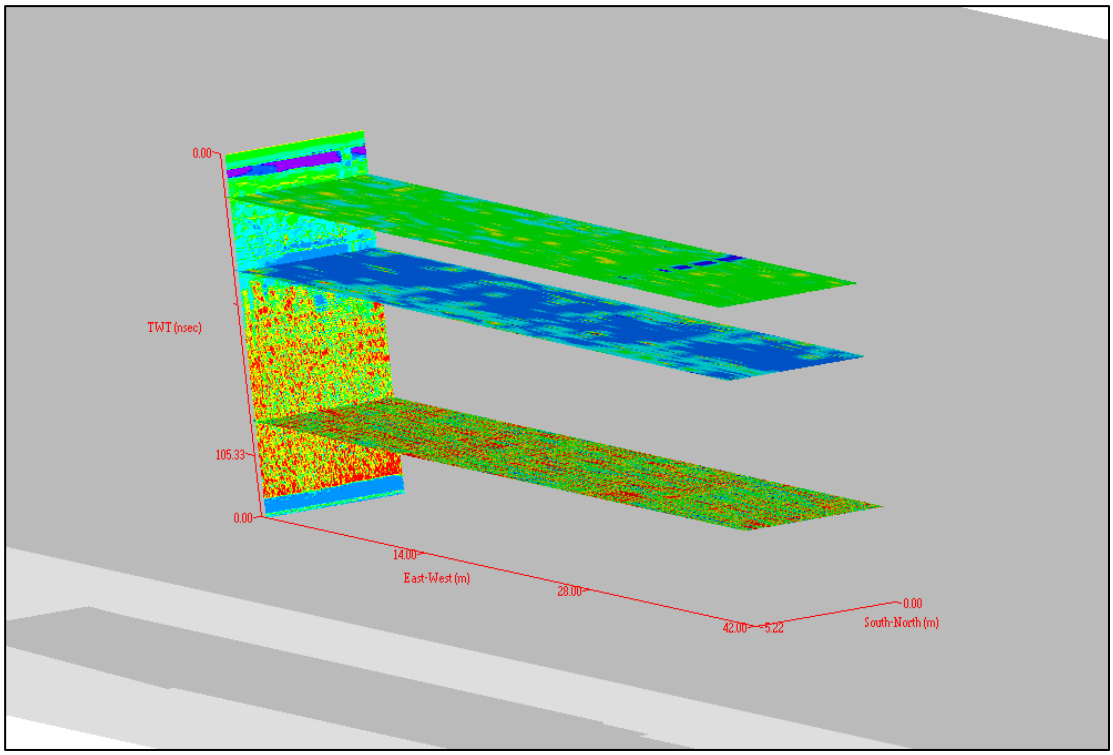
Εικόνα 6.34: *Τρισδιάστατη απεικόνιση τομών της ταξινόμησης με το συνδυασμό Α των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 2.*



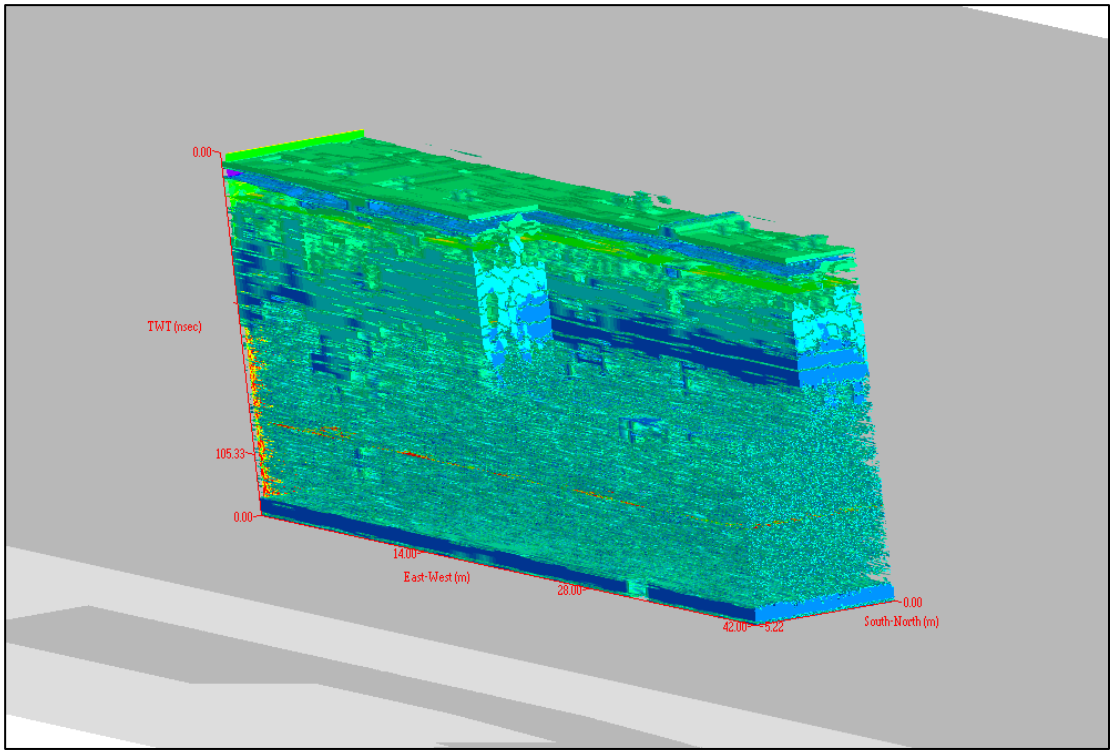
Εικόνα 6.35: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Α των μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπου φαίνονται τρεις από τις πέντε τάξεις και έχει αφαιρεθεί ένα τμήμα. Προφίλ 2.*



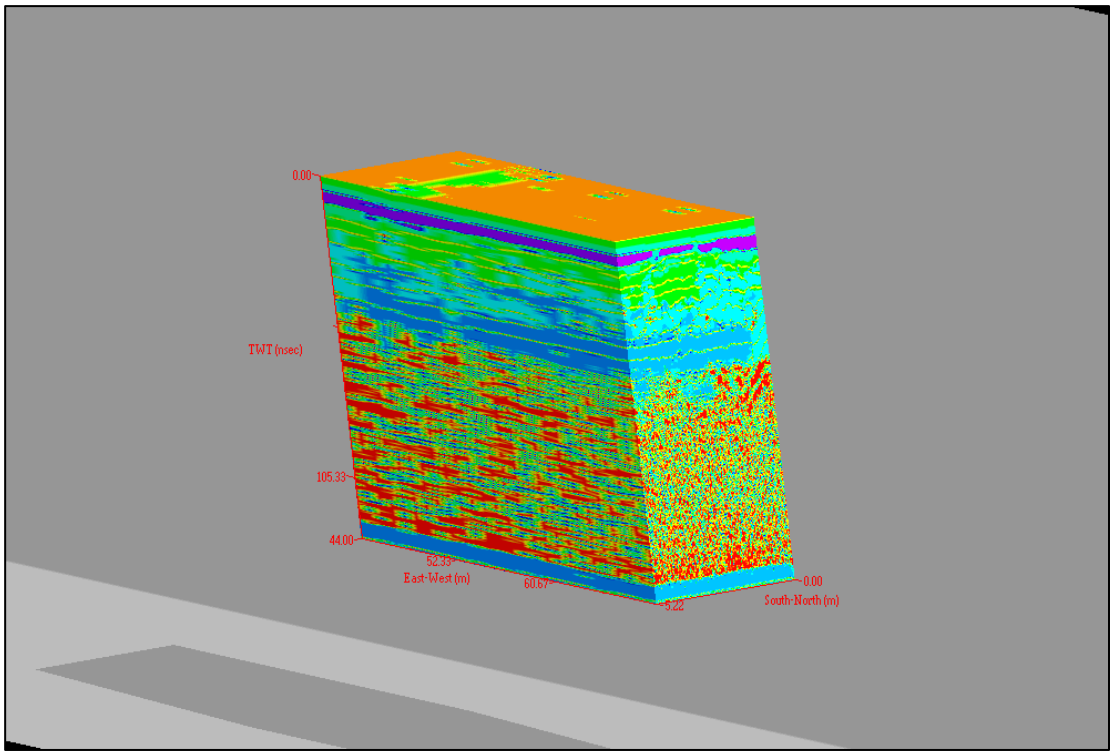
Εικόνα 6.36: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Β των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 1.*



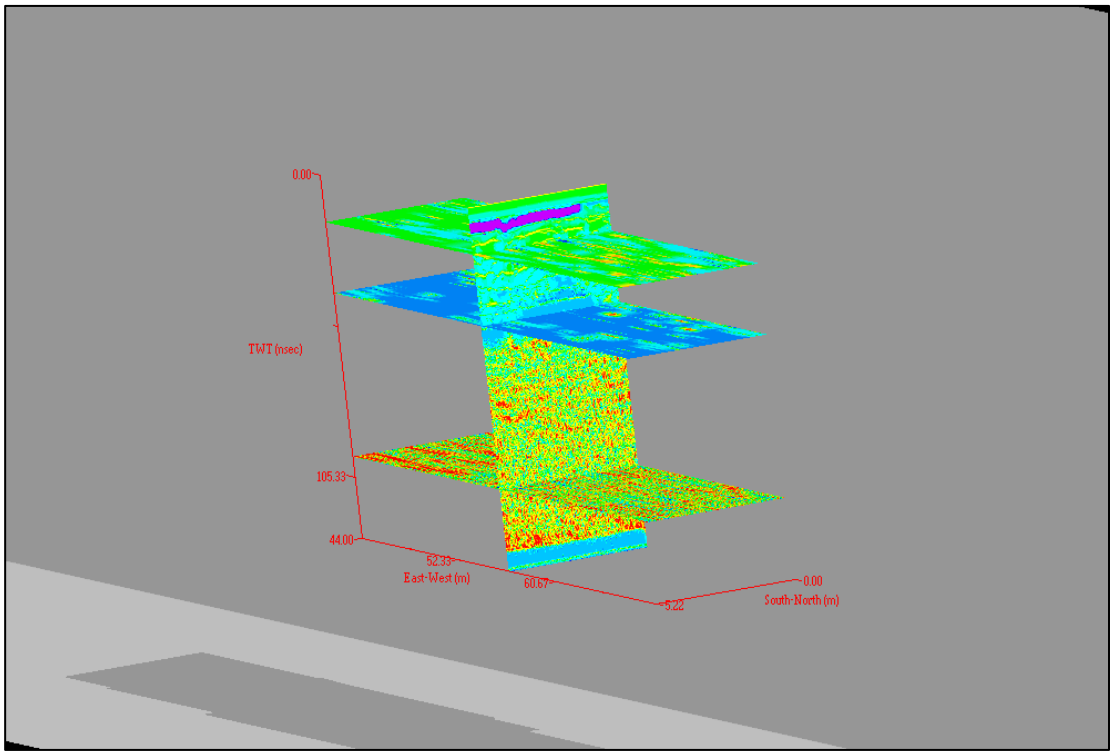
Εικόνα 6.37: *Τρισδιάστατη απεικόνιση τομών της ταξινόμησης με το συνδυασμό Β των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 1.*



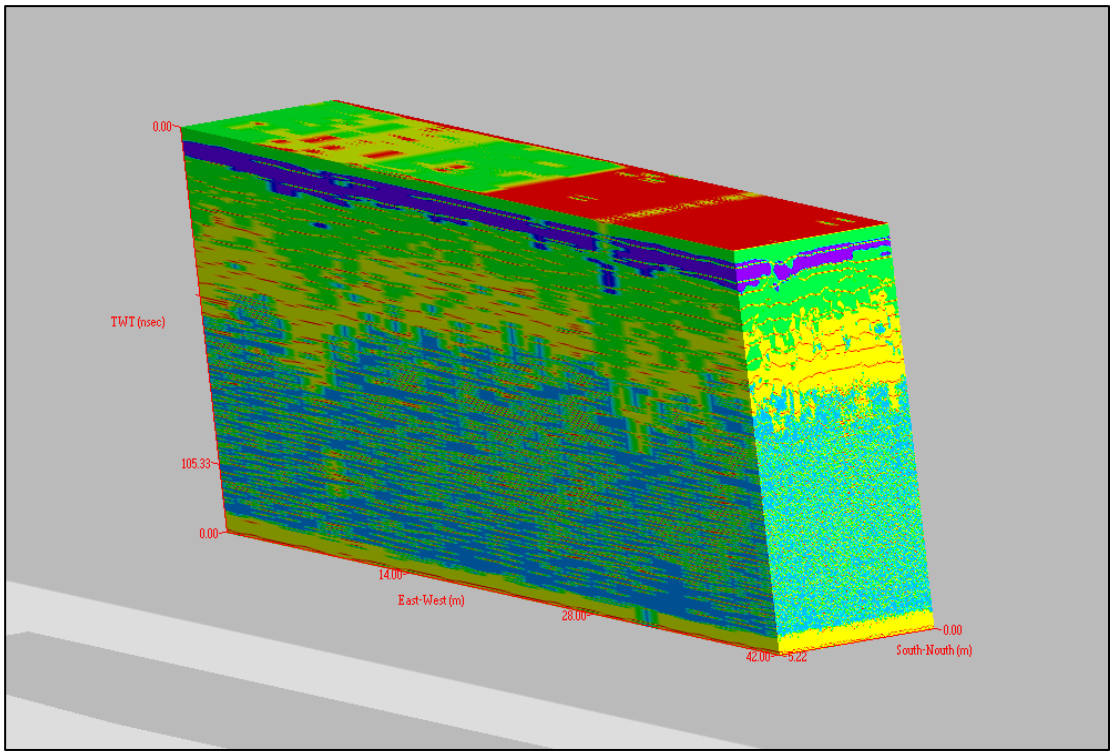
Εικόνα 6.38: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Β των μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπου φαίνονται τρεις από τις δέκα τάξεις. Προφίλ 1.*



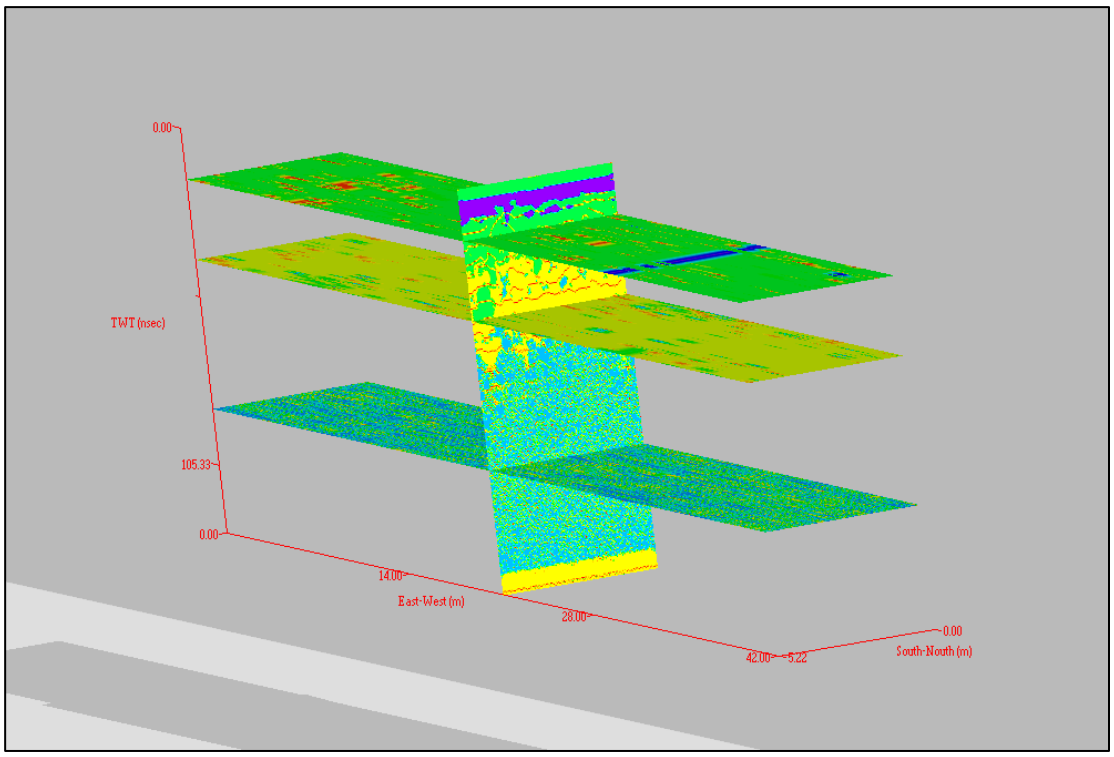
Εικόνα 6.39: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Β των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 2.*



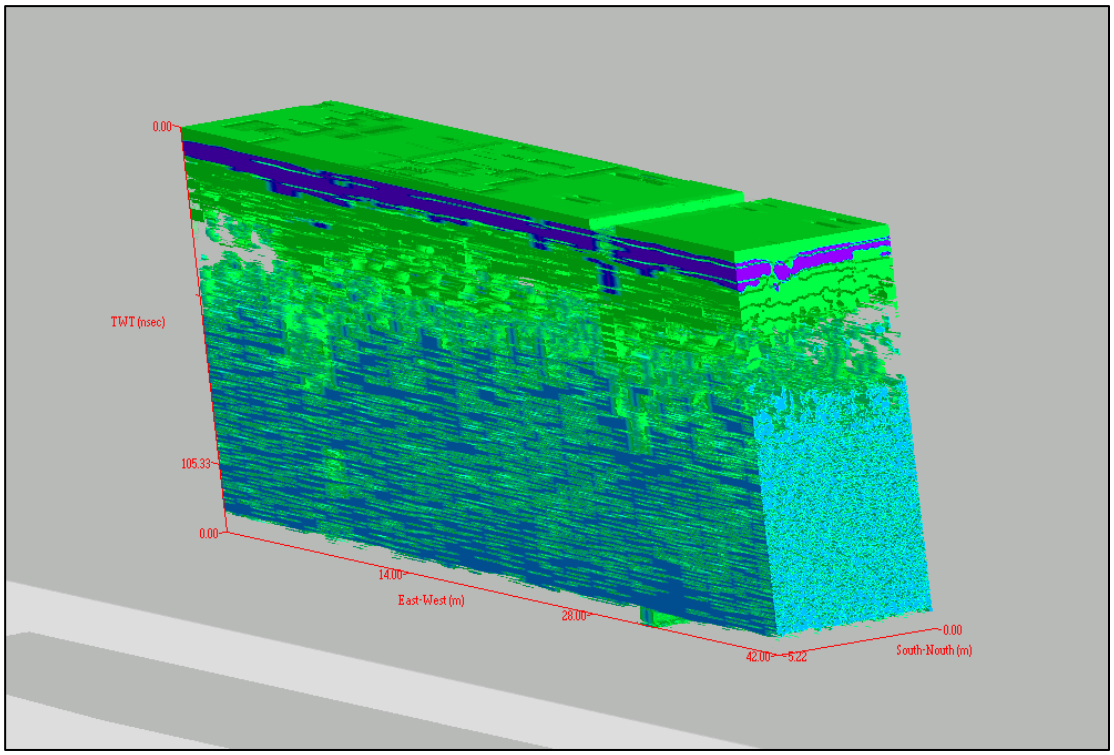
Εικόνα 6.40: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Β των μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπου διακρίνονται οι πέντε από τις δέκα τάξεις. Προφίλ 2.*



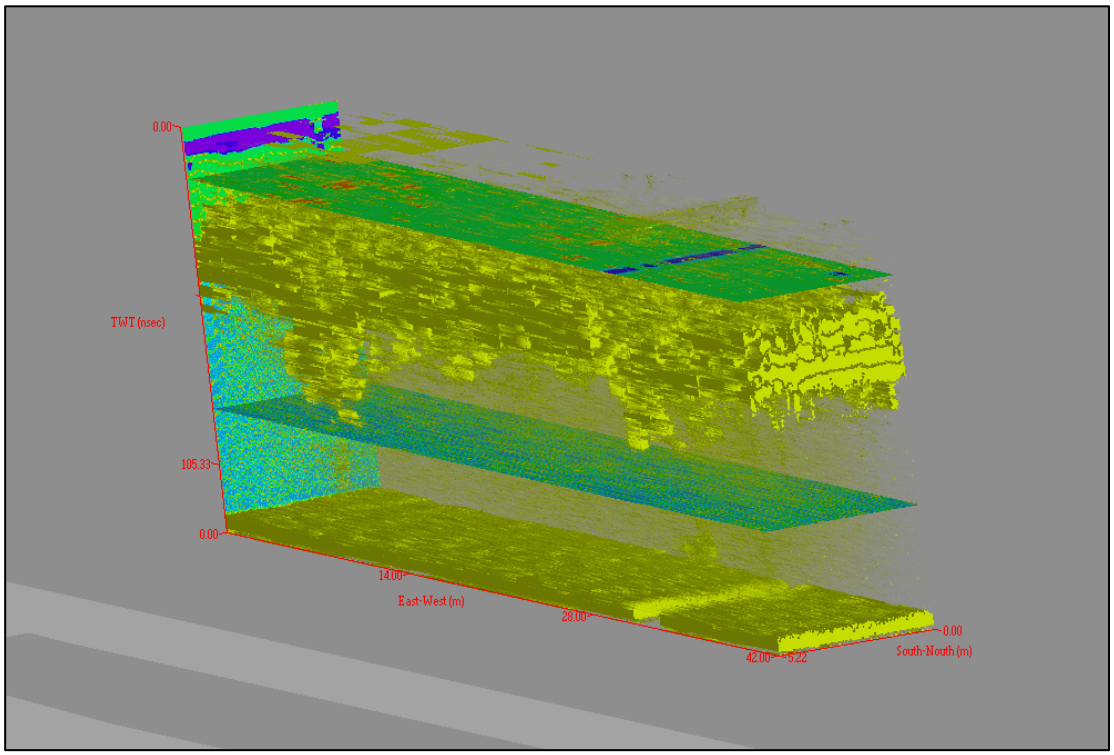
Εικόνα 6.41: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 1.*



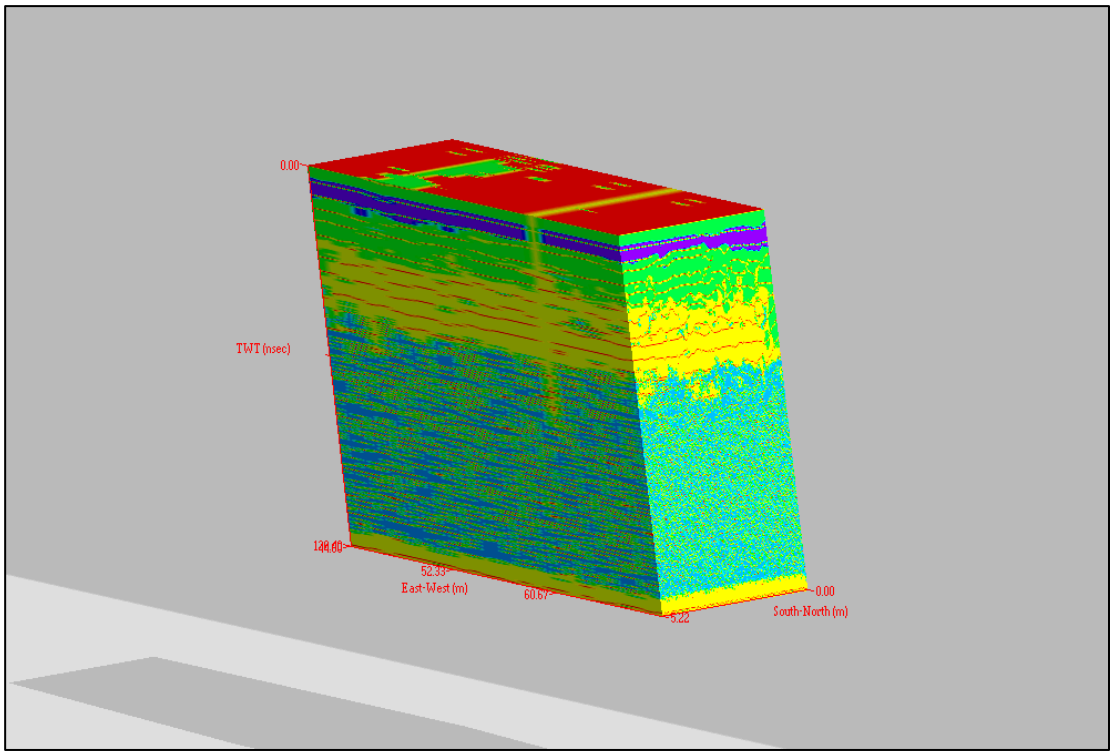
Εικόνα 6.42: *Τρισδιάστατη απεικόνιση τομών της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 1.*



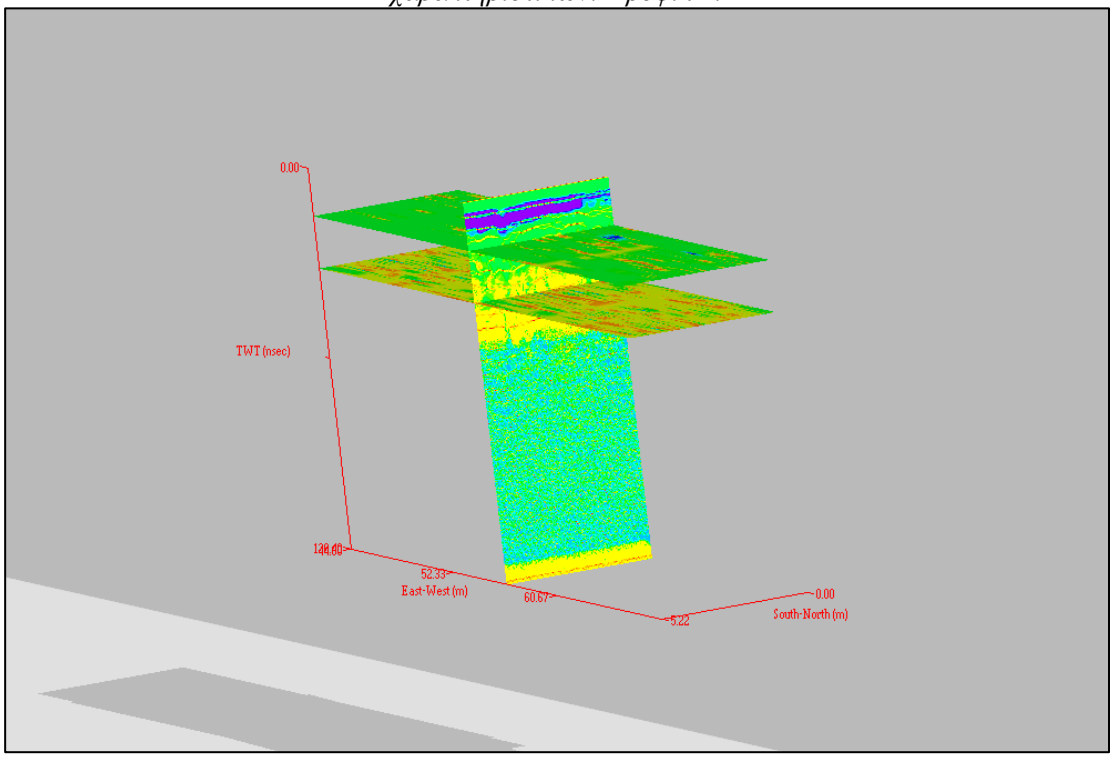
Εικόνα 6.43: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπου διακρίνονται τρεις από τις πέντε τάξεις.. Προφίλ 1*



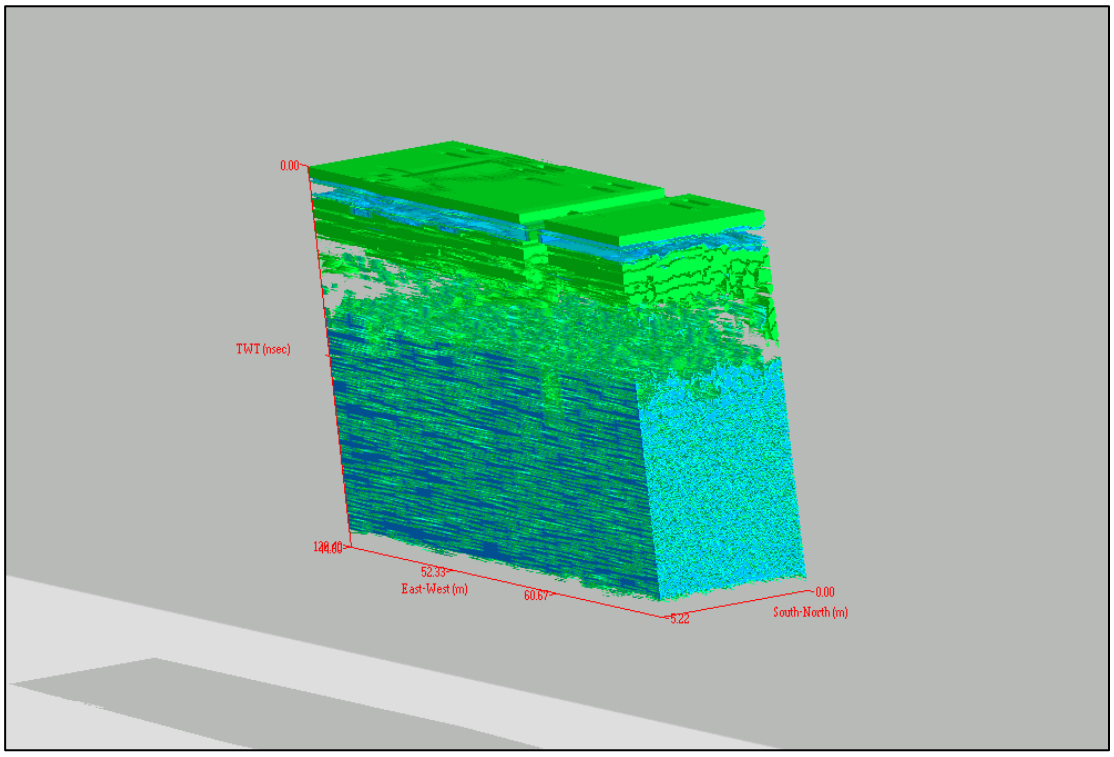
Εικόνα 6.44: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπου διακρίνονται οι τομές και μία από τις πέντε τάξεις. Προφίλ 1.*



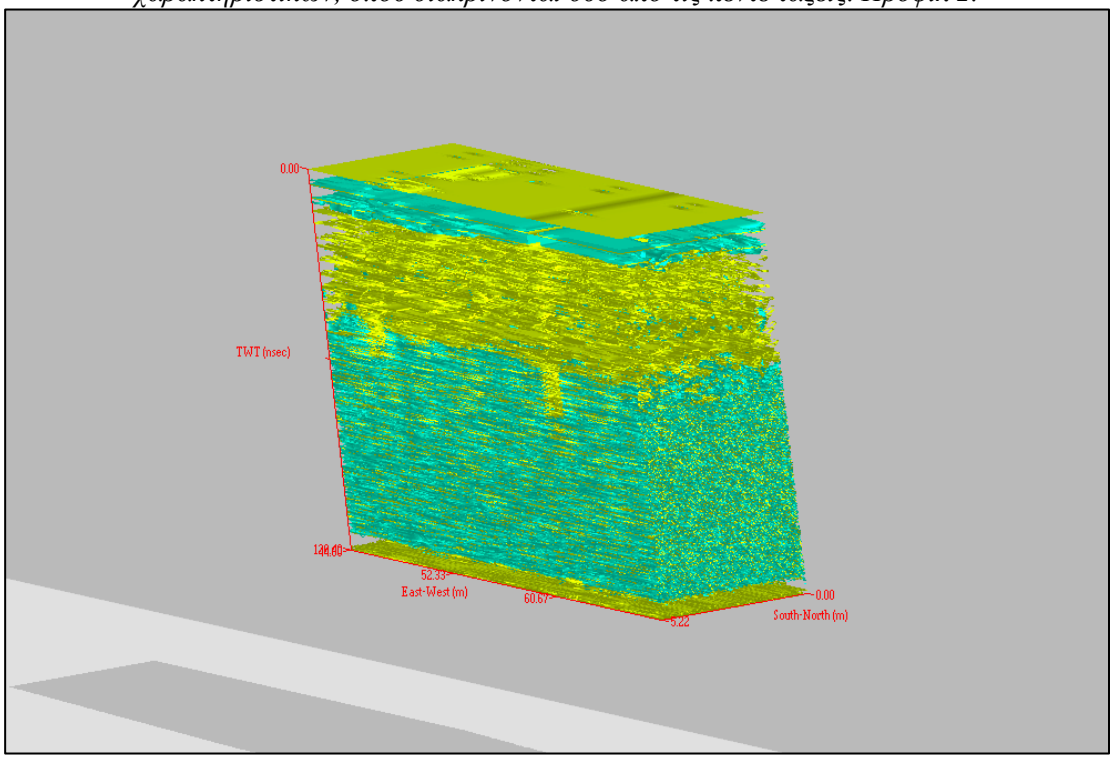
Εικόνα 6.45: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 2.*



Εικόνα 6.46: *Τρισδιάστατη απεικόνιση τομών της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών. Προφίλ 2.*



Εικόνα 6.47: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπου διακρίνονται δύο από τις πέντε τάξεις. Προφίλ 2.*



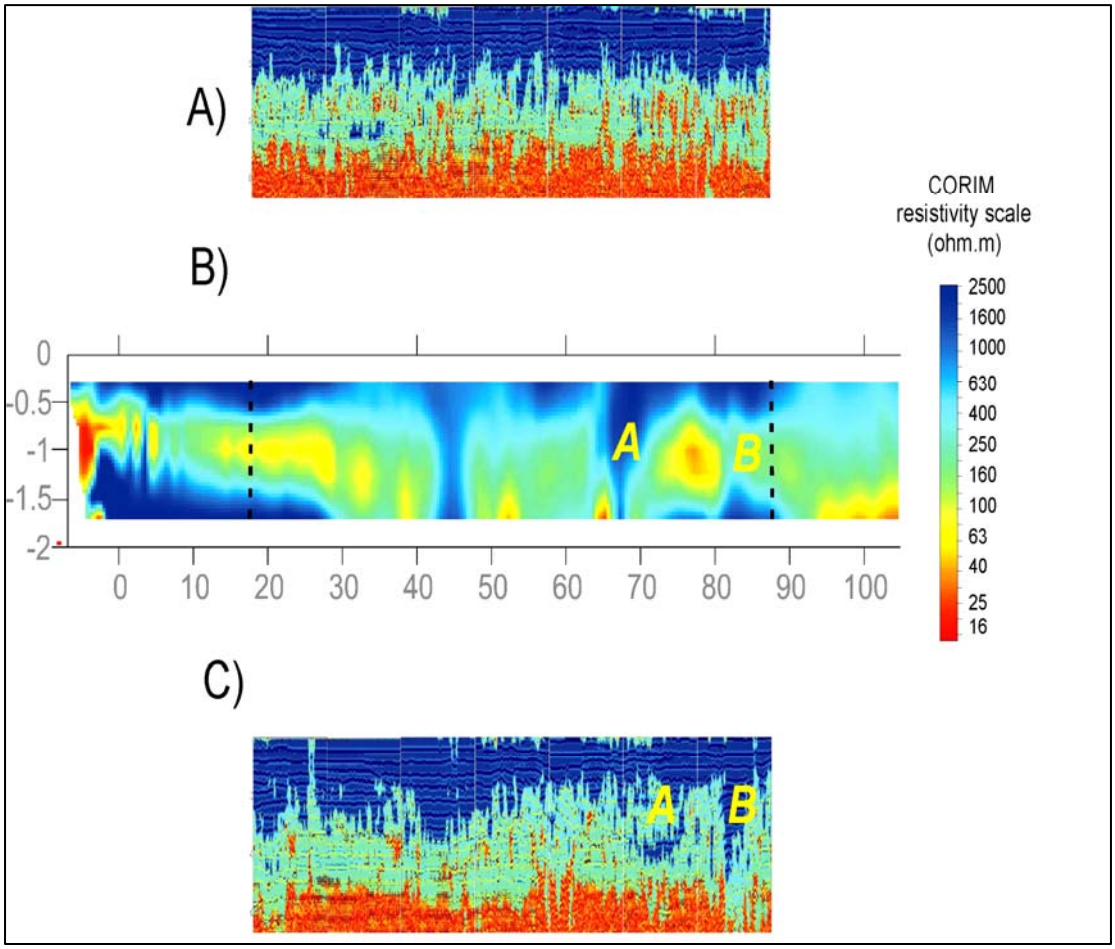
Εικόνα 6.48: *Τρισδιάστατη απεικόνιση της ταξινόμησης με το συνδυασμό Γ των μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπου διακρίνεται δύο από τις πέντε τάξεις. Προφίλ 2.*

Στις Εικόνες 6.41 και 6.45 η ταξινόμηση ομαδοποιεί τα δεδομένα σε τρεις κύριες ομάδες χρώματος πράσινου, κίτρινου και μπλε που πιθανόν να αντιστοιχούν σε γεωηλεκτρικά στρώματα. Το πάχος των γεωηλεκτρικών στρωμάτων παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση στην εικόνα 6.41.

Το στρώμα με το κίτρινο χρώμα έχει μεγάλη αγωγιμότητα, ενώ αυτό με το πράσινο είναι ανθεκτικό και έχει μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

6.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων γεωραντάρ με τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου (CORIM)- Ερμηνεία

Το ηλεκτρομαγνητικό όργανο CORIM αποτελείται από πομπό με συχνότητα εκπομπής περίπου 12 kHz και έξι δέκτες τοποθετημένους σε απόσταση 1m μεταξύ τους, ενώ η ελάχιστη απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη είναι 1 m και η μέγιστη 6 m για τη μέτρηση της μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η ηλεκτρική τομή (Εικόνα 6.49 Β) πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Β με βήμα 0,5 m.



Εικόνα 6.49: Αποτελέσματα δεδομένων Α) Γεωραντάρ γραμμής 4, Β) CORIM, C) Γεωραντάρ γραμμής 6, στην περιοχής 2.

Στις Εικόνες 6.49 Α) και Β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης των δεδομένων γεωραντάρ για τις γραμμές 4 και 6. Ο άξονας Χ αντιστοιχεί σε απόσταση 70 m και ο άξονας Ψ στο διπλό χρόνο διαδρομής μέχρι τα 66,66 nsec, τα οποία αντιστοιχούν σε βάθος 2 m για ταχύτητα κύματος 0,06 m/nsec.

Η γεωηλεκτρική τομή από την ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση (CORIM) (Εικόνα 6.49 Β) αντιστοιχεί σε βάθος 2 m.

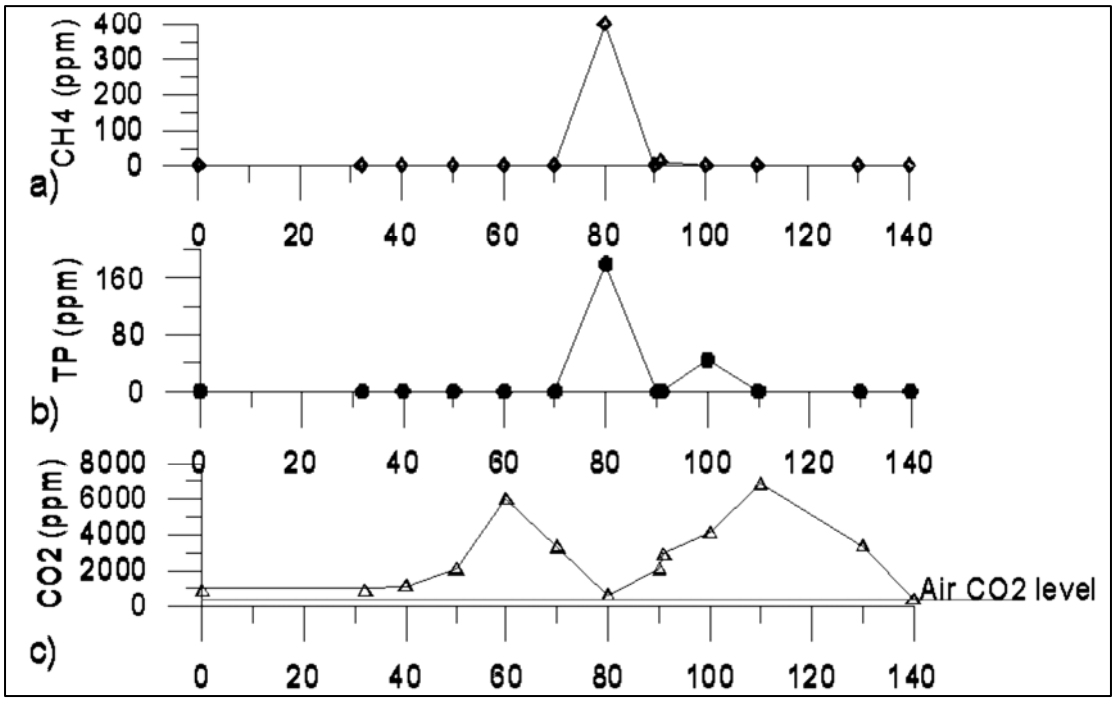
Από την υπέρθεση των παραπάνω εικόνων (6.49 Α και Β), η τάξη με το πράσινο χρώμα των δεδομένων του γεωραντάρ σύμφωνα με τη γεωηλεκτρική τομή αντιστοιχεί σε στρώμα χαμηλής τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό δικαιολογεί τη χαμηλή ποιότητα σήματος κάτω από τα 60 nsec περίπου. Το στρώμα

αυτό δηλαδή δρα σαν φίλτρο που εμποδίζει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να διεισδύσει σε μεγαλύτερο βάθος.

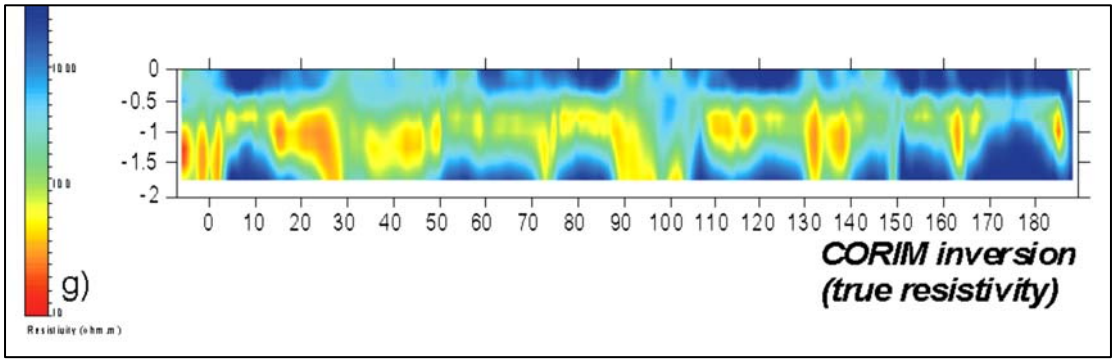
Από τα 20 m μέχρι τα 45 m, το στρώμα χαμηλής αντίστασης παρουσιάζει μικρότερο πάχος ενώ για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 m, το πάχος αυξάνεται. Επίσης το υπερκείμενο αυτού στρώμα που βρίσκεται σε μικρό βάθος, (μπλε χρώμα στις τομές του γεωραντάρ), αντιστοιχεί στο υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχηματισμό όπου πιθανότατα υπάρχει ρύπανση από πετρελαιοειδή, καθώς σε παρακείμενη γραμμή από αναλύσεις προέκυψαν υψηλές τιμές μεθανίου (CH_4) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στις θέσεις που εμφανίζονται υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο στρώμα αυτό (Εικόνα 6.50).

Στην εικόνα 6.49 C), και στο δυτικό τμήμα της γραμμής 6 από τα 20 m έως τα 50 m ,παρατηρείται αύξηση του πάχους του στρώματος που αντιστοιχεί στις υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πράγμα που πιθανόν να σχετίζεται με μεγαλύτερου πάχους ρυπασμένη ζώνη. Αντίστοιχα στη γραμμή 4 που είναι βορειότερα, η ρύπανση είναι πιθανόν ομοιόμορφα κατανεμημένη αλλά με μεγαλύτερο συνολικά πάχος.

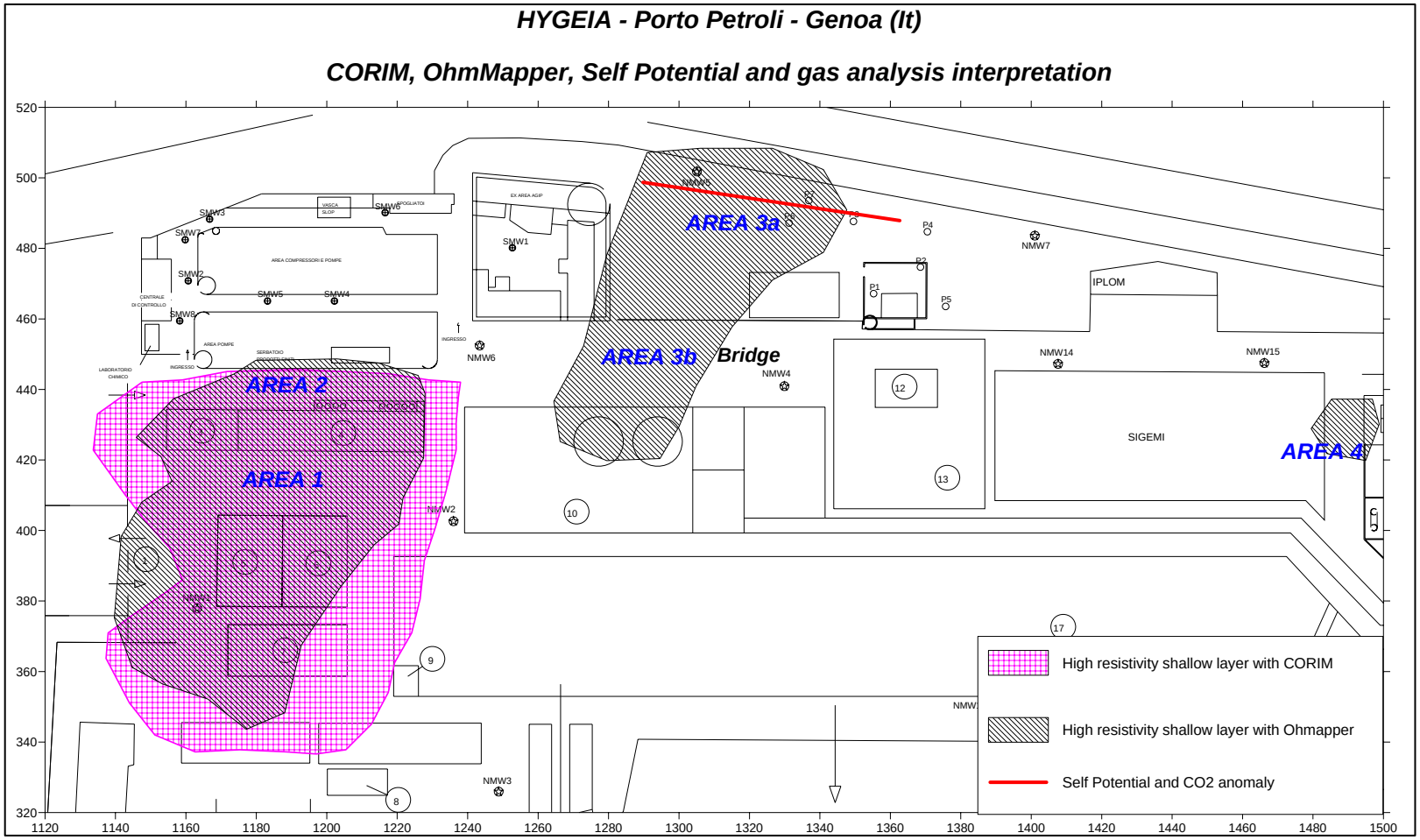
Η εικόνα 6.52 παρουσιάζει την έκταση της ρύπανσης όπως προέκυψε από το συνδυασμό όλων των στοιχείων.



Εικόνα 6.50: *Περιοχή 3: Ανάλυση αερίων a) Ποσοστά μεθανίου (CH_4) b) Ποσοστά υδρογονάνθρακα c)Ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).*



Εικόνα 6.51: *Κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψε από διαγραφίες CORIM στην περιοχή 3.*



Εικόνα 6.52: *Χάρτης των περιοχών που έγιναν οι διασκοπήσεις και βρέθηκαν στρώματα με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή του γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης του εδάφους και την ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Παράλληλα, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των τεχνικών μαθηματικής επεξεργασίας, που εφαρμόζονται στις αρχικές καταγραφές του γεωραντάρ. Συγκεκριμένα για τις δύο ταξινομήσεις που χρησιμοποιήθηκαν, την K- μέσων τιμών και τη μέγιστης πιθανοφάνειας συμπεραίνεται ότι έδωσαν χρήσιμα αποτελέσματα στην ομαδοποίηση των δεδομένων και συνέβαλαν στην ερμηνεία τους.

Η γεωφυσική διασκόπηση που διεξήχθη με την τεχνική του γεωραντάρ στο '*Porto Petroli*' της Ιταλίας, έδειξε την ύπαρξη ενός στρώματος υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που πιθανόν να αντιστοιχεί σε ρύπανση από πετρελαιοειδή σύμφωνα με σύγκριση που έγινε με άλλα στοιχεία. Επίσης διαπιστώθηκε η ύπαρξη στρώματος χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης το οποίο δρα σαν φίλτρο και εξασθενεί το κύμα που προέρχεται από μεγαλύτερο βάθος.

Η συνδυασμένη επομένως εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης πλεονεκτεί, καθώς με τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την καθεμία ξεχωριστά, οδήγησαν σε αρχικά συμπεράσματα σχετικά με τη ρύπανση. Για το λόγο αυτό έγινε συσχέτιση των αποτελεσμάτων του γεωραντάρ με τα αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών διαγραφιών (CORIM) ώστε να προκύψει λεπτομερής απεικόνιση στους συνδυασμούς.

Μετά την εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας στις αρχικές καταγραφές γεωραντάρ, επιτεύχθηκε η βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των σημάτων, ενώ με χρήση στιγμιαίων μιγαδικών χαρακτηριστικών εμφανίζονται επιπλέον πληροφορίες.

Διαπιστώνεται ότι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου για ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα της τεχνικής επεξεργασίας. Συνεπώς, με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, το γεωραντάρ καθίσταται χρήσιμο εργαλείο συλλογής και ερμηνείας δεδομένων, διαρκώς εξελισσόμενο και με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών και δυνατοτήτων.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η επεξεργασία με τις μεθόδους ταξινόμησης, τόσο της αυτόματης όσο και της καθοδηγούμενης είναι χρήσιμη σε συνδυασμό με την προεπεξεργασία με τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά, άρα θα είναι καλό να υπάρξει παραπέρα αξιοποίησή τους και να γίνουν ακόμη περισσότερες διαφορετικές δοκιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαφείδης Α. (2001). Εφαρμοσμένη Γεωφυσική ΙΙ.

2. Μερτίκας Σ. (1999). Τηλεπισκόπιση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Ιων.

3. Hamdan H. (2002). "Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του Νομού Χανίων". Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

4. Κρητικάκης Γ. (2001). "Συμβολή των σεισμικών μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης σε γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές μελέτες". Εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού μαθήματος 'Ειδικά Κεφάλαια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας'. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

5. Πάνας Σ. (1987). "Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων". University Studio Press. Θεσσαλονίκη.

6. Παπαζάχος Β. (1986). "Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική". Θεσσαλονίκη.

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

8. Σπανουδάκης Ν. (2002). "Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά θέματα". Μεταπτυχιακή εργασία σε εξέλιξη. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

9. Σπανουδάκης Ν. (2001). "Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στην ανίχνευση στόχων μικρών διαστάσεων". Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

10. Κουκαδάκη Μ.-Τζιμούρτος Ε. (2002). "Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και των υπογείων νερών". Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά

11. Richards, J.A, John Alan (1993). "Remote sensing digital analysis: an introduction".

12. Pipan M. Politecnico di Milano(2003). "Technical report of Porto Petroli, Genova Italy".

13. Hamran S.E., Gjessing D.T., Hjelmstad J., Aarholt E. (1995). "Ground penetrating synthetic pulse radar: dynamic range and modes of operation". Journal of Applied Geophysics, vol. 33.

14. Reynolds J. (1998). "An introduction to applied and environmental geophysics". John Willey and Sons.

15. Tsoflias G. (1999). "Detection of vertical fractures in geologic formations using the polarization properties of ground penetration radar signal". SEG 1999, Expanded Abstracts.

16. Toshioka T., Tsuchida T., Sasahara K. (1995). "Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes". Journal of Applied Geophysics, vol. 33, pp. 119-124.

17. Mellett J.S. (1995). "Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management and geology". Journal of Applied Geophysics, vol. 33, pp. 157-166.