

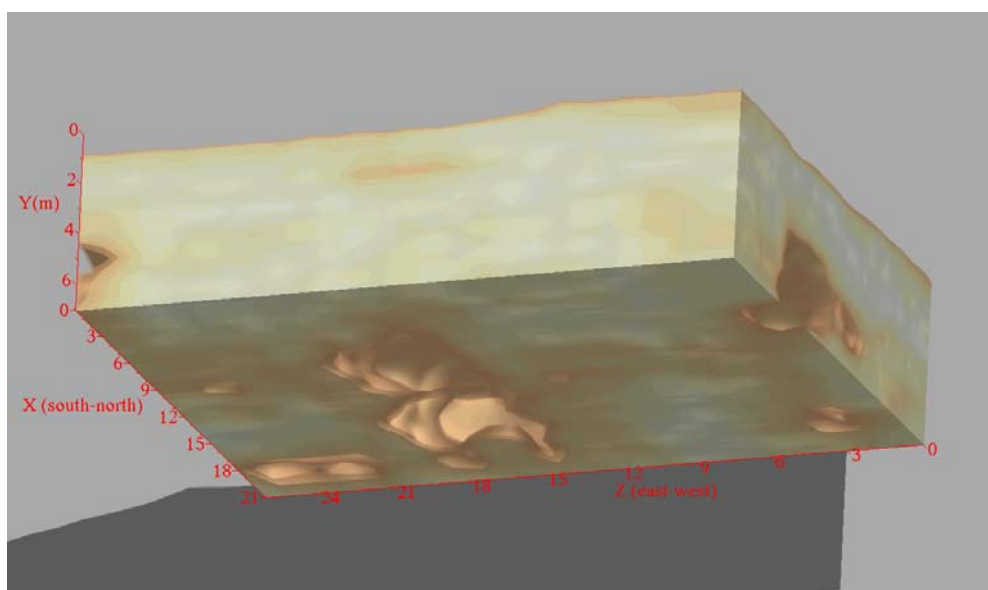


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΣΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ
ΤΟΥ ΟΜΑΛΟΥ ΧΑΝΙΩΝ***



ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

**ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΒΑΦΕΙΔΗΣ (επιβλέπων), ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Χανιά 2006

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να παρουσιάσει μία μέθοδο επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ η οποία θα μπορεί να συνεισφέρει στον πιο γρήγορο και ακριβή εντοπισμό γεωλογικών ανωμαλιών και θαμμένων αντικειμένων.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των μετρήσεων που καταγράφηκαν από το όργανο του γεωραντάρ συνίσταται στην εφαρμογή φίλτρων κυρίως εξομάλυνσης και απαλοιφής θορύβου, στον υπολογισμό των κατάλληλων μιγαδικών χαρακτηριστικών όπου προτιμάται ο συνδυασμός στιγμιαίων φυσικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών για την συγκέντρωση περισσότερης πληροφορίας και στον μετασχηματισμό κυρίων συνιστωσών, που αποσκοπεί στην μείωση του όγκου των δεδομένων και στη συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας. Στη συνέχεια ακολουθεί η ταξινόμηση των δεδομένων με συμβατικές μεθόδους (K-μέσων τιμών) και με την βοήθεια των νευρωνικών δικτύων. Η ταξινόμηση πραγματοποιείται τον διαχωρισμό δεδομένων σε δύο ή περισσότερες τάξεις με βάση κατάλληλο αλγόριθμο (Kohonen).

Η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία εργαστηριακών μετρήσεων, αποσκοπώντας στη διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία επεξεργασίας, και μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο οροπέδιο του Ομαλού Χανίων για τον εντοπισμό καρστικών δομών.

Από την επεξεργασία των εργαστηριακών μετρήσεων ανιχνεύθηκε και οριοθετήθηκε η θέση του στόχου με ακρίβεια ενώ από τις μετρήσεις στο οροπέδιο του Ομαλού προσδιορίστηκαν η θέση, το σχήμα και το μέγεθος των υπόγειων εγκοίλων.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα κύριο **Αντώνη Βαφείδη** για τις πολύτιμες γνώσεις, ιδέες και συμβουλές του καθώς και την άψογη μεταξύ μας συνεργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κύριους **Θ. Μαρκόπουλο** και **Εμμ. Μανούτσογλου**, οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες **Νικόλαο Σπανουδάκη** και **Hamdan Hamdan** για την πολύτιμη προσφορά, βοήθεια, γνώσεις και συμβουλές τους.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ αξίζει στην οικογένεια μου που με την αμέριστη συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου υπήρξαν η κινητήρια δύναμη από το πρώτο έτος μέχρι την αποφοίτηση μου από το Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	1
1.1 Ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ	1
1.2 Χρήσεις γεωραντάρ	2
1.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ	4
1.4 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	4
1.5 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	5
1.6 Σχεδιασμός διασκόπησης	7
1.6.1 Αξιολόγηση του πεδίου της έρευνας	8
1.6.2 Μέθοδοι διασκόπησης	10
1.6.3 Παράμετροι της διασκόπησης	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	16
ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
2.1 Εισαγωγή	16
2.2 Παράθυρα – Μάσκες	16
2.3 Μονοδιάστατα Φίλτρα	18
2.3.1 Φίλτρο διόρθωσης Dewow	18
2.3.2 Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal)	20
2.4 Δισδιάστατα Φίλτρα	21
2.4.1 Φίλτρο μέσης τιμής (Median)	21
2.5 Μιγαδικά χαρακτηριστικά (Instantaneous Complex Attributes)	22
2.5.1 Βασικά μιγαδικά χαρακτηριστικά	24
2.5.2 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά	25
2.6 Μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών (principal components analysis)	26
2.7 Μέθοδοι Ταξινόμησης	28
2.7.1 Μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης K- μέσων τιμών (k-means).	30
2.7.2 Χάρτες αυτοδιοργάνωσης (Self Organizing Maps)	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	34
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	34
3.1 Εισαγωγή	34
3.2 Περιγραφή εργαστηριακών μετρήσεων	34
3.3 Επεξεργασία μετρήσεων	37
3.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων εργαστηριακών μετρήσεων	38
3.5 Συμπεράσματα	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	55
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΟΜΑΛΟΥ ΧΑΝΙΩΝ	55
4.1 Εισαγωγή	55
4.2 Η γεωλογία στην περιοχή του Ομαλού	55
4.3 Σχεδιασμός διασκόπησης	60
4.4 Επεξεργασία δεδομένων	61
4.5 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	64
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων με επιφανειακές καταγραφές και ηλεκτρικές τομογραφίες	88
4.7 Συμπεράσματα	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

1.1 Ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ

Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar) αποτελεί όργανο γεωφυσικών διασκοπήσεων και χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό υπεδάφινων ανωμαλιών χωρίς να προκαλεί την καταστροφή των υπό μελέτη εδαφών. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που αναπτύχθηκε από τους Maxwell(1864) και Hertz(1886).

Το πρώτο σύστημα ραντάρ ανέπτυξε το 1935, ο βρετανός Sir Robert Watson-Watt, για να κατασκευαστεί στη συνέχεια ολόκληρο δίκτυο ραντάρ, έτσι ώστε να έχουν τη δυνατότητα οι βρετανικές ένοπλες δυνάμεις να ανιχνεύουν τα εχθρικά αεροσκάφη κατά τη διάρκεια του δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου.

Την πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικά σήματα για τον προσδιορισμό της θέσης θαμμένων αντικειμένων ήταν το 1910, στη Γερμανία. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν συνεχή κύματα (CW) στις έρευνες μέχρι να εφαρμοστεί η διάδοση παροδικών κυμάτων. Στη συνέχεια, τις επόμενες πέντε δεκαετίες, η τεχνική της διάδοσης παροδικών κυμάτων εξελίχθηκε σημαντικά, με αποτέλεσμα να γίνουν εκτεταμένες μελέτες σε παγετώνες από πολλούς επιστήμονες, ενώ αργότερα το ενδιαφέρον στράφηκε στη μελέτη κατασκευών όπως σήραγγες, δρόμοι, κτλ.

Τη δεκαετία του '70 πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις με τη βοήθεια του γεωραντάρ που κατασκευάστηκε από τους Moffat και Puskar (1976). Οι τιμές των μετρήσεων που λαμβάνονταν ήταν πιο ακριβείς λόγω της βελτιωμένης κεραίας που χρησιμοποιήθηκε, με αποτέλεσμα να γίνει δυνατή η χρησιμοποίηση του συστήματος για τον προσδιορισμό υπόγειων ανωμαλιών, τούνελ, ορυχείων καθώς και της περιεχόμενης υγρασίας των εδαφών. Επίσης σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη

των γεωφυσικών διασκοπήσεων ήταν και η ανάπτυξη μεθόδων υπολογισμού ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Moffat και Puskar 1976).

Τις τελευταίες δεκαετίες, το γεωραντάρ (GPR), χρησιμοποιήθηκε από γεωφυσικούς, γεωλόγους και αρχαιολόγους για την πραγματοποίηση μελετών. Χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του πάχους στρωμάτων πάγου, την ανίχνευση ρωγμών σε κοιτάσματα αλατιού, τη μελέτη κρυσταλλικών πετρωμάτων αλλά και σε γεωλογικές εφαρμογές για τον καθορισμό της στρωματογραφίας, την έρευνα κοιτασμάτων και τη χαρτογράφηση σπηλαίων. Επίσης συνέβαλε στον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των θαμμένων ερειπίων σε αρχαιολογικές ανασκαφές.

Το γεωραντάρ εξελίχθηκε σημαντικά κατά τη διάρκεια του πολέμου στο Βιετνάμ, από τον Αμερικανικό στρατό για τον εντοπισμό των σηράγγων που χρησιμοποιούσαν οι Βιετκόνγκ. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν μέθοδοι για αστικούς σκοπούς, αρχικά από την GSSI (Geophysical Survey Systems Inc) αλλά και από νεότερες κατασκευάστριες εταιρίες συστημάτων γεωρανταρ όπως η Sensors and Software Ltd, η ERA Technologies Ltd και η Radarteam AB, Sweden.

1.2 Χρήσεις γεωραντάρ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των ηλεκτρονικών συστημάτων αλλά και γενικότερα της τεχνολογίας, το γεωραντάρ μετατράπηκε σε ένα πολύ εύχρηστο



όργανο με πολυάριθμες χρήσεις. Με την βοήθεια των ψηφιακών συστημάτων βελτιώθηκαν σημαντικά οι μέθοδοι ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων GPR συμβάλλοντας στην καλύτερη και γρηγορότερη ερμηνεία των μετρήσεων. Επίσης, η συλλογή των δεδομένων είναι σχετικά γρήγορη και η επεξεργασία τους μπορεί να γίνει επιτόπου πολλές φορές, εξοικονομώντας χρόνο.

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν να διακριθούν ουσιαστικά σε δύο κατηγορίες βάση της κεντρικής συχνότητας εκπομπής. Στις γεωλογικές, όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα, χρησιμοποιούνται κεραίες των 50MHz ή και μεγαλύτερες. Ενώ για εφαρμογές στις επιστήμες των

μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing, NDT), όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο, οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες από τις κυριότερες εφαρμογές του γεωραντάρ.

Πίνακας 1.1

Χρήσεις γεωραντάρ

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

(Σπανουδάκης 2002)

1.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Ο τρόπος που λειτουργεί το γεωραντάρ είναι ο εξής: Ο πομπός παράγει ηλεκτρομαγνητικό παλμό ο οποίος διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec). Ο παλμός αυτός “ταξιδεύει” στο υπό έρευνα υλικό ωσότου συναντήσει επιφάνεια ή υλικό με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο υλικό (διάθλαση), και ένα μέρος θα ανακλαστεί και θα επιστρέψει στον δέκτη. Έτσι η μονάδα ελέγχου καταγράφει το χρόνο διαδρομής και το πλάτος του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η διάδοση του κύματος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού καθώς και από τη συχνότητα εκπομπής της κεραίας του πομπού.

1.4 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

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

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

$$t_r = \sqrt{(X^2 + 4D^2)} / u \quad (1.1)$$

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

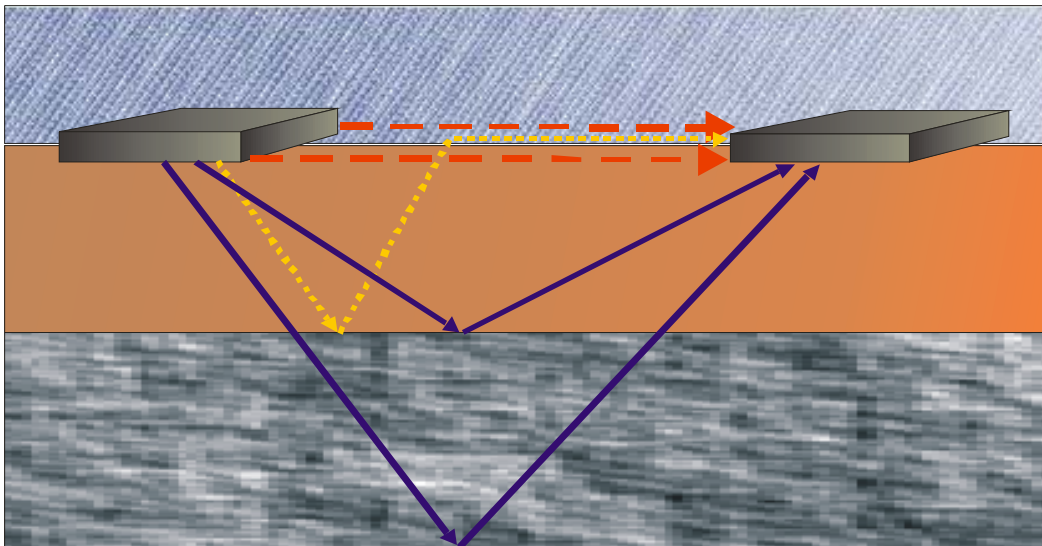
Απ' ευθείας κύματα: Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: απ' ευθείας κύματα αέρα και εδάφους. Τα κύματα αυτά διανύουν μικρές αποστάσεις οπότε οι απώλειες είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα. Τα απ' ευθείας κύματα του αέρα φτάνουν πρώτα στο δέκτη επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι η

μέγιστη δυνατή. Αμέσως μετά φτάνουν τα απ' ευθείας κύματα εδάφους. Οι εξισώσεις που δίνουν το χρόνο διαδρομής γι' αυτά τα κύματα είναι αντίστοιχα:

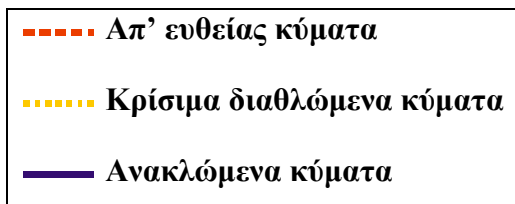
$$t = X / v_{\text{αέρα}} \quad (1.2)$$

$$t = X / v_{\text{εδάφους}} \quad (1.3)$$

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



Σχήμα 1.1 Γεωμετρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων



1.5 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

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

- Τις ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών.
- Την διανυθείσα απόσταση.
- Την συχνότητα εκπομπής.

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

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

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

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

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

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

Επίσης παρατηρούνται απώλειες σε ενέργεια ανάλογες της απόστασης που έχει διατρέξει το κύμα και των διεπιφανειών που συναντάει. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συντελούν στην διασπορά της ενέργειας και κατά επέκταση στην εξασθένισή της. Τέλος ο βαθμός εξασθένισης αυξάνεται στις υψηλές συχνότητες εκπομπής και μειώνεται στις χαμηλές.

Τα αποτελέσματα της εξασθένησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι τα εξής:

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

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1.4)$$

Όπου x η απόσταση που έχει διανύσει το κύμα στο μέσο διάδοσης και α η σταθερά απόσβεσης.

- Η μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας: Η κεντρική συχνότητα της ακτινοβολίας που λαμβάνει η κεραία του δέκτη είναι χαμηλότερη από την κεντρική συχνότητα εκπομπής.
- Μικρότερο βάθος διασκόπησης: Όσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένηση τόσο μικρότερο είναι το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αν η διεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος θεωρηθεί κατακόρυφη το βάθος διείσδυσης δίνεται από την σχέση:

$$z = \frac{\kappa}{\sqrt{f \cdot \sigma}} \quad (1.5)$$

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

1.6 Σχεδιασμός διασκόπησης

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

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

1.6.1 Αξιολόγηση του πεδίου της έρευνας

Σε αυτό το στάδιο ο ερευνητής καλείται να απαντήσει σε μία καθοριστική ερώτηση: είναι το γεωραντάρ το κατάλληλο όργανο για τη συγκεκριμένη έρευνα; Για να απαντηθεί αυτή η ερώτηση πρέπει να μελετηθούν τα παρακάτω σημεία:

1. Το βάθος και η γεωμετρία του στόχου
2. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης
3. Το περιβάλλον της διασκόπησης

α) Βάθος και γεωμετρία του στόχου

Το βάθος του στόχου και η γεωμετρία του είναι καθοριστικά μεγέθη και πάντα μελετώνται σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διακριτική ικανότητα. Το πρόβλημα που τίθεται είναι ότι το βάθος διείσδυσης επιδρά σε βάρος της διακριτικής ικανότητας. Έτσι ο ερευνητής πρέπει να σκεφτεί: έχει νόημα να φτάσει σε μεγάλα βάθη χωρίς όμως να ανιχνεύσει το στόχο; Ή έχει νόημα να πετύχει υψηλή διακριτική ικανότητα χωρίς όμως το σήμα να φτάσει μέχρι το στόχο; Άρα ανάλογα με την περίπτωση πρέπει να γίνουν κάποιες παραχωρήσεις.

Η ανάλυση αυτή είναι επίπονη για αυτό οι Annan και Cosway (1975) προτείνουν τρεις εμπειρικές σχέσεις εκ των οποίων οι δυο πρώτες προσδιορίζουν το μέγιστο βάθος διείσδυσης ενώ η τρίτη την διακριτική ικανότητα:

$$Z_{\max} = 35/\sigma \quad (1.6)$$

$$Z_{\max} = 30/\alpha \quad (1.7)$$

$$\Delta R = \lambda/4 \quad (1.8)$$

Όπου σ είναι η αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης (mS), α η εξασθένιση που προκαλεί το μέσον διάδοσης στον ηλεκτρομαγνητικό παλμό και λ είναι το μήκος κύματος του παλμού.

β) Ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης που ενδιαφέρουν την τεχνική του γεωραντάρ είναι οι αντίστοιχες διηλεκτρικές σταθερές και αγωγιμότητες (ϵ_r , σ). Η γνώση τους επιτρέπει στο χρήστη να διαπιστώσει εάν η αντίθεσή τους είναι τέτοια ώστε να υπάρξει ικανή ανάκλαση. Μέτρο της ενέργειας που ανακλάται από το στόχο είναι ο συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας P_r ο οποίος δίδεται από τη σχέση:

$$P_r = \left[\frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \right]^2 \quad (1.9)$$

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

γ) Περιβάλλον της διασκόπησης

Το περιβάλλον είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία της διασκόπησης. Περιοχές που βρίσκονται κοντά σε πηγές ραδιοκυμάτων (αναμεταδότες τηλεόρασης, ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ κλπ) είναι ακατάλληλες διότι ο ευαίσθητος δέκτης του γεωραντάρ κατοπτρεύει τόσο τα ανακλώμενα από το στόχο κύματα όσο και τα ισχυρότερα από τη γύρω περιοχή.

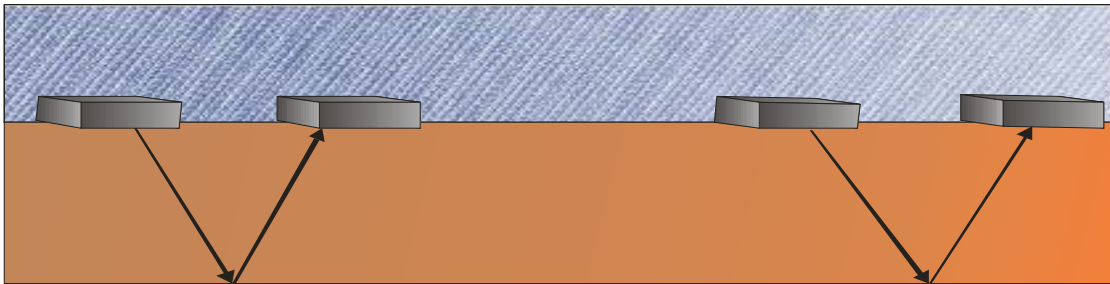
Περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές είναι επίσης ακατάλληλες για τη διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Οι ισχυρότατες ανακλάσεις που προέρχονται από τις κατασκευές αυτές υποβαθμίζουν την ποιότητα των μετρήσεων.

Τέλος οι κλιματικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη επιτυχή έκβαση της διασκόπησης. Περιβάλλον υπό βρόχινες συνθήκες και υψηλή υγρασία θεωρούνται ακατάλληλο αφού η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αέρα βελτιώνονται, με συνέπεια μέρος του μεταδιδόμενου παλμού να διαχέεται σ' αυτόν. Έχει παρατηρηθεί ότι οι μετρήσεις υπό αυτές τις συνθήκες διαφοροποιούνται σε σχέση με τις μετρήσεις υπό ξηρές συνθήκες.

1.6.2 Μέθοδοι διασκόπησης

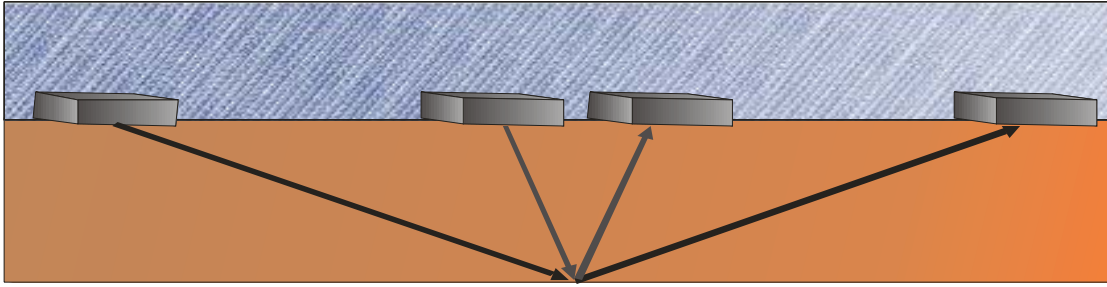
Ανάλογα με το σκοπό της διασκόπησης το γεωραντάρ χρησιμοποιείται με τους εξής τέσσερις τρόπους:

Μέθοδος της ανάκλασης (Reflection). Χρησιμοποιείται για τη γεωλογική χαρτογράφηση και είναι η πιο διαδεδομένη. Οι κεραίες διατηρούνται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους και κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Πολλές φορές πραγματοποιούνται μετρήσεις πάνω στην ίδια γραμμή μελέτης αλλά με διαφορετικό προσανατολισμό των κεραιών ώστε να εξαχθούν το δυνατό περισσότερες πληροφορίες.



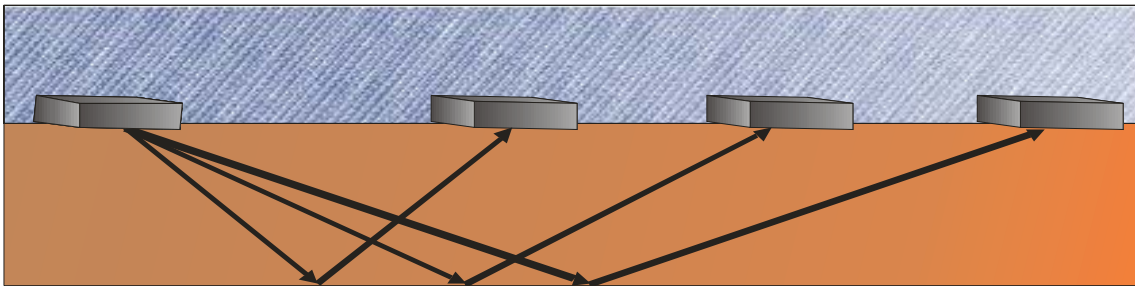
Σχήμα 1.2 Η μέθοδος της ανάκλασης.

Μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Mid Point). Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο μέσο. Αρχικά προσδιορίζεται κάποιο σημείο του ανακλαστήρα που θα αποτελέσει το ενδιάμεσο σημείο και οι κεραίες τοποθετούνται στην ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση (ίση με το βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x) με τα ηλεκτρικά τους πεδία παράλληλα. Κάθε κεραία απομακρύνεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης κατά $n_x/2$. Η μέγιστη απόσταση δεν πρέπει να ξεπεράσει το βάθος του ανακλαστήρα.



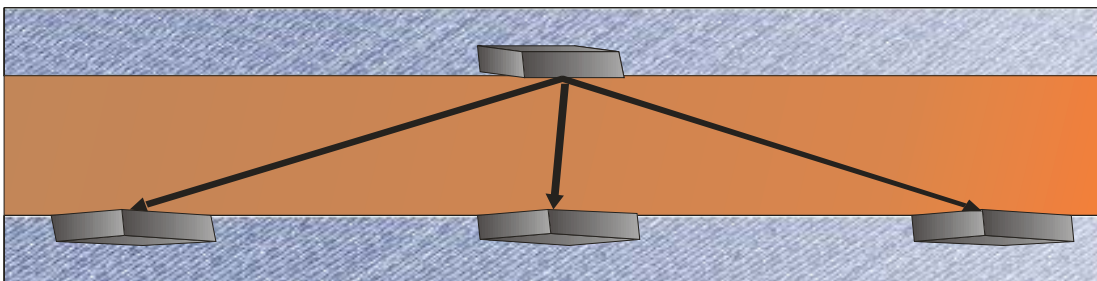
Σχήμα 1.3 Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου

Μέθοδος σταθερού πομπού, κινούμενου δέκτη (Wide angle reflection and refraction). Και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης στο μέσο. Η διαφορά της από την προηγούμενη έγκειται στο ότι ο πομπός παραμένει σταθερός σε κάποιο σημείο ενώ ο δέκτης κινείται πάνω στη γραμμή μελέτης με σταθερό βήμα.



Σχήμα 1.4 Η μέθοδος σταθερού πομπού κινούμενου δέκτη.

Μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination). Σε αυτή τη μέθοδο τα κύματα δεν ανακλώνται αλλά διέρχονται από το μέσο. Οι κεραίες τοποθετούνται εκατέρωθεν του υπό μελέτη υλικού αντικρίζοντας η μία την άλλη.



Σχήμα 1.5 Η μέθοδος της τομογραφίας.

1.6.3 Παράμετροι της διασκόπησης

Πριν ξεκινήσει η διασκόπηση ο χρήστης καλείται να επιλέξει, μέσω του λογισμικού του γεωραντάρ τις παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι είναι καθοριστικές για την επιτυχή έκβαση του πειράματος και αφορούν: τη συχνότητα εκπομπής, τον ολικό χρόνο καταγραφής, το διάστημα δειγματοληψίας, το βήμα διασκόπησης, την απόσταση των κεραιών, την υπέρθεση, τον προσανατολισμό των κεραιών.

α) Συχνότητα εκπομπής

Όπως προαναφέρθηκε το βάθος διείσδυσης συνδέεται άμεσα με τη διακριτική ικανότητα και τη συχνότητα. Έτσι αν ο χρήστης επιλέξει μεγάλη συχνότητα η διακριτική ικανότητα θα είναι μεγάλη ενώ το βάθος διείσδυσης μικρό. Το αντίθετο θα συμβεί επιλέγοντας μικρή συχνότητα εκπομπής.

Ένας εύκολος τρόπος προσέγγισης του προβλήματος αποτελεί η σχέση που συνδέει τη συχνότητα f (MHz) και τη διακριτική ικανότητα x (m):

$$f = 150/x(\epsilon_r)^{1/2} \quad (1.10)$$

β) Ολικός χρόνος καταγραφής

Ο ολικός χρόνος καταγραφής σχετίζεται άμεσα με το βάθος διείσδυσης και δίνει σε ποια χρονική στιγμή σταματούν οι καταγραφές. Ο υπολογισμός του στηρίζεται στην εξίσωση:

$$W = 2.6d_{\max}/v \quad (1.11)$$

όπου W είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής και d_{\max} το μέγιστο βάθος. Η παραπάνω εξίσωση αυξάνει το χρόνο καταγραφής κατά 30% ώστε να προβλέψει τα σφάλματα από τους υπολογισμούς.

Αν ο ολικός χρόνος καταγραφής είναι πολύ μικρός ο στόχος ίσως να μην εντοπισθεί. Αντίθετα αν είναι πολύ μεγάλος ο συνολικός όγκος των δεδομένων αυξάνει με δυσμενείς συνέπειες στην παραγωγικότητα.

γ) Διάστημα δειγματοληψίας

Η καταγραφή των δεδομένων δεν είναι συνεχής διαδικασία. Έτσι ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο καταγραφών. Αν το χρονικό διάστημα είναι μεγάλο τότε πολλές πληροφορίες χάνονται. Αν είναι πολύ μικρό τότε οι πληροφορίες είναι μεν πολλές αλλά ο συνολικός όγκος των δεδομένων υπερβολικά μεγάλος.

Ο υπολογισμός του διαστήματος δειγματοληψίας γίνεται βάση της συχνότητας Nyquist f_N , η οποία ορίζεται ως η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας για να είναι το δείγμα αντιπροσωπευτικό, και η οποία είναι το πολύ ίση με το μισό της περιόδου της υψηλότερης συχνότητας που εκπέμπεται. Το φάσμα εκπομπής του γεωραντάρ κυμαίνεται από $0.5f$ έως $1.5f$ όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής. Αν ληφθεί υπ' όψη ένας συντελεστής ασφάλειας ίσος με 2, τότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$f_N = 1/2\Delta t \rightarrow 1.5f = 1/2\Delta t \rightarrow \text{συντ. Ασφάλειας} = 2 \rightarrow f = 1/6\Delta t \quad (1.12)$$

όπου Δt το διάστημα δειγματοληψίας και f η κεντρική συχνότητα σε Hz.

Πολλές φορές αν το ζητούμενο είναι η ταχύτητα λήψης των δεδομένων και όχι η μεγάλη πιστότητα των δεδομένων, το Δt αυξάνεται ελαφρώς.

δ) Βήμα διασκόπησης

Το βήμα δειγματοληψίας ορίζει την απόσταση δυο διαδοχικών σταθμών πάνω στη γραμμή μελέτης. Αν σκοπός της μελέτης είναι ο εντοπισμός μικρών στόχων, με μεγάλο βήμα δειγματοληψίας αυτοί δεν εντοπίζονται. Αντίθετα αν το βήμα είναι υπερβολικά μικρό, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων επιβαρύνει την παραγωγικότητα. Έτσι προτείνεται το βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x το οποίο ισούται με:

$$n_x = \lambda/4 = 75/(\epsilon_r)^{1/2} f \quad (1.13)$$

ε) Απόσταση των κεραιών

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα εδάφια τα συστήματα γεωραντάρ δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να μεταβάλει την απόσταση των κεραιών ώστε να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης και του συντελεστή ανάκλασης. Συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένησης του κύματος αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Έτσι φαίνεται ότι πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των κεραιών. Αυτή δίδεται από τη σχέση:

$$S = 2d_{\text{στόχου}} / (\epsilon_r - 1)^{1/2} \quad (1.14)$$

στ) Κατακόρυφη υπέρθεση

Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιούνται αυτόματα πολλαπλές μετρήσεις σε κάθε σταθμό της γραμμής μελέτης. Τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η βελτίωση των μετρήσεων αφού τα πλάτη ενισχύονται ενώ ο θόρυβος εξαλείφεται.

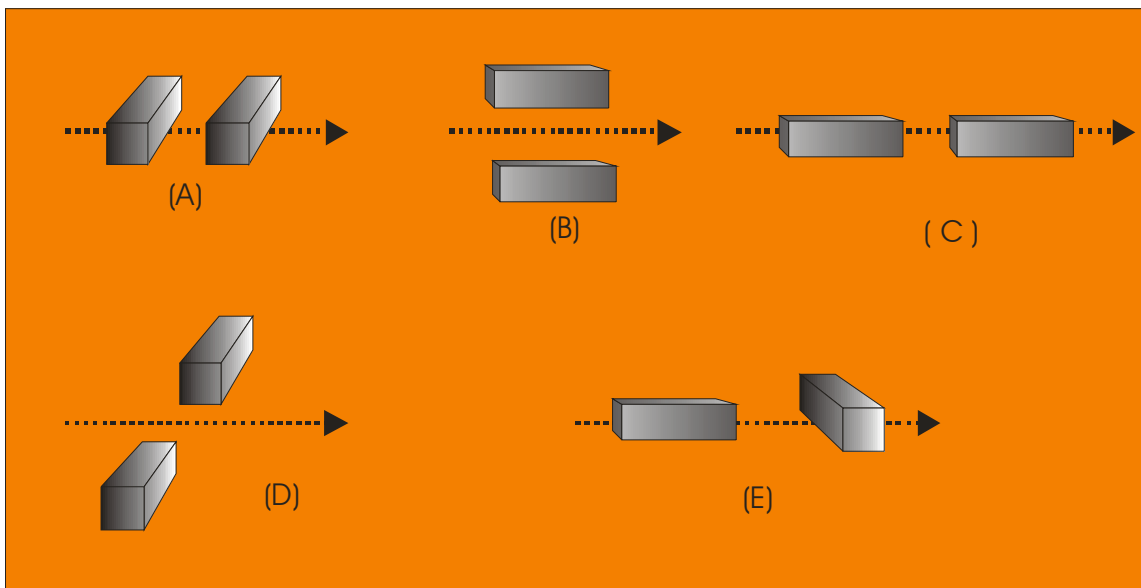
Η διαδικασία αυτή αυξάνει το λόγο του σήματος προς το θόρυβο για τον εξής λόγο: η φάση των κυμάτων είναι ίδια σε κάθε επανάληψη οπότε τα πλάτη συμβάλλουν. Αντίθετα επειδή ο θόρυβος είναι τυχαίος τα σήματα που προέρχονται από αυτόν αλληλοαναιρούνται.

Η διαδικασία της υπέρθεσης βελτιώνει την ποιότητα των δεδομένων, ταυτόχρονα όμως αυξάνει σημαντικά το χρόνο της διασκόπησης. Ο αριθμός των επαναλήψεων κυμαίνεται από 1 έως 2048, αλλά οι τιμές 16, 32, 64 δίνουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα χωρίς να επιβαρύνεται σημαντικά η διάρκεια των εργασιών πεδίου.

ζ) Προσανατολισμός κεραιών

Η παράμετρος που μελετάται τελευταία είναι ο προσανατολισμός των κεραιών, δηλαδή η σχετική μεταξύ τους θέση και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης (σχήμα 1.6). Οι

κεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γεωραντάρ είναι ωμικές, διπολικές και ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός για την επιτυχή έκβαση των πειραμάτων. Οι πιο συνηθισμένοι προσανατολισμοί είναι όταν το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται κάθετα στο επίπεδο του κύματος (σχήμα 1.6Α και 1.6Β) και βρίσκουν εφαρμογή στη γεωλογική χαρτογράφηση. Συνήθως πραγματοποιούνται μετρήσεις και με τους δυο προσανατολισμούς ώστε να συλλεχθούν το δυνατό περισσότερες πληροφορίες. Ο προσανατολισμός του σχήματος 1.6Ε χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό σκεδαστών όπως σωλήνες (ανεξάρτητα από τη σχετική θέση κεραιών και σκεδαστή) ενώ θεωρείται ακατάλληλος για τη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων.



Σχήμα 1.6 Δυνατοί προσανατολισμοί κεραιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Για την κατανόηση των εικόνων του γεωραντάρ από την καταγραφή του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υπέδαφος απαιτείται η ψηφιακή ανάλυση αυτών. Σκοπός της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι να τονίσει κάποια χαρακτηριστικά που δε γίνονται άμεσα αντιληπτά.

Η ψηφιακή ανάλυση εικόνας περιλαμβάνει:

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

Οι δύο κυριότεροι μετασχηματισμοί είναι:

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

2.2 Παράθυρα – Μάσκες

Τα παράθυρα ή μάσκες είναι πίνακες με στοιχεία συντελεστές βαρών και διαστάσεις $m \times n$ οι οποίοι μετακινούνται πάνω στην εικόνα. Η εικόνα αποτελεί ένα πίνακα διαστάσεων $M \times N$ με στοιχεία τις καταγραφές κάποιου οργάνου (σειсмоγράφου, γεωραντάρ, ψηφιακής κάμερας, κτλ).

Η βασική διαδικασία που ακολουθείται κατά την εφαρμογή του παραθύρου ή της μάσκας είναι η εξής: καθώς το παράθυρο μετακινείται πάνω στην εικόνα υπολογίζεται το άθροισμα των μερικών γινομένων των συντελεστών βαρών και των τιμών του πίνακα που συνιστά την εικόνα.

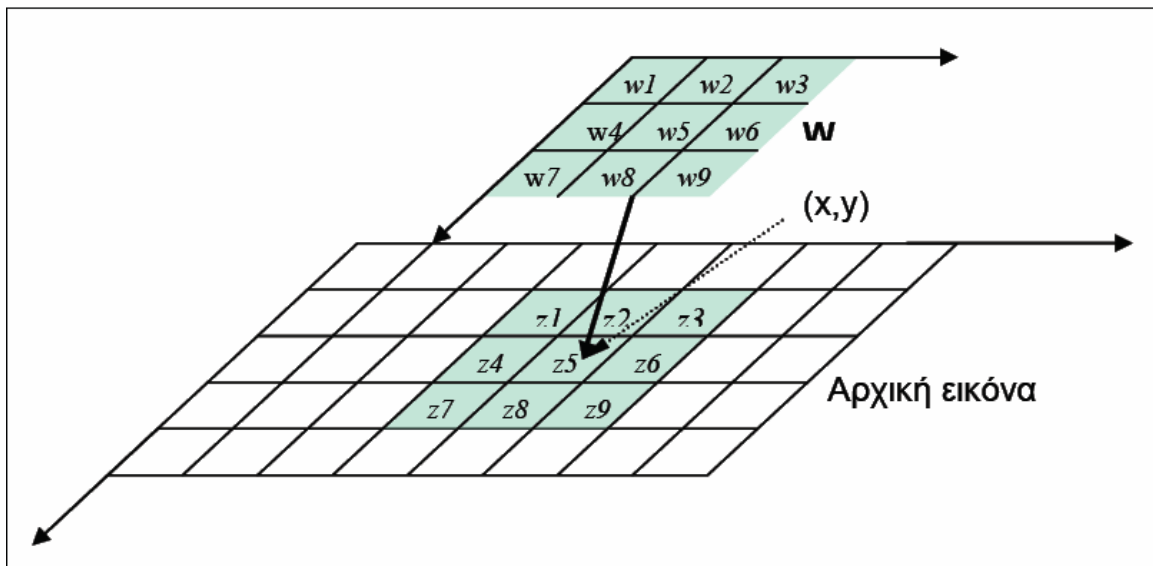
Για να γίνει η διαδικασία αυτή αντιληπτή ας θεωρηθεί ένα παράθυρο W (ή μάσκα) διαστάσεων (3×3) :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{bmatrix}$$

Αν ο τελεστής βρίσκεται πάνω από το σημείο $Z(x,y)$ της εικόνας (σχήμα 2.1) τότε το νέο σημείο $N(x,y)$ που θα αντικαταστήσει το $Z(x,y)$ θα είναι:

$$N(x,y) = z_1 w_1 + z_2 w_2 + \dots + z_9 w_9 \quad (2.1)$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε σημείο της εικόνας $Z(x,y)$.



Σχήμα 2.1 Διαδικασία εφαρμογής φίλτρου (παραθύρου) στην εικόνα.
(Σπανουδάκης, 2002)

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα γεωραντάρ περιγράφονται από πίνακα του οποίου κάθε στήλη είναι ένα ίχνος, ενώ κάθε γραμμή του αντιστοιχεί σε καταγραφές με

ίδιο χρόνο άφιξης. Οπότε οι εικόνες του γεωραντάρ αντιστοιχούν σε άξονες x (m) και t (nsec).

Τα φίλτρα (μάσκες) ανάλογα με την εφαρμογή τους διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων: Διαχωρίζουν τη συνιστώσα που αντιστοιχεί σε αργά μεταβαλλόμενο σήμα από τις υπόλοιπες. Τα φίλτρα αυτά της εξομάλυνσης της εικόνας χρησιμοποιούνται για ελάττωση του θορύβου.
- Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων: Η ταχέως μεταβαλλόμενη λεπτομέρεια της εικόνας αντιστοιχεί σε υψηλή συχνότητα. Τα φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων διαχωρίζουν τη συνιστώσα αυτή από τις υπόλοιπες. Η πληροφορία υψηλής συχνότητας επιτρέπει την απομόνωση και την ενίσχυση της τοπικής λεπτομέρειας.

2.3 Μονοδιάστατα Φίλτρα

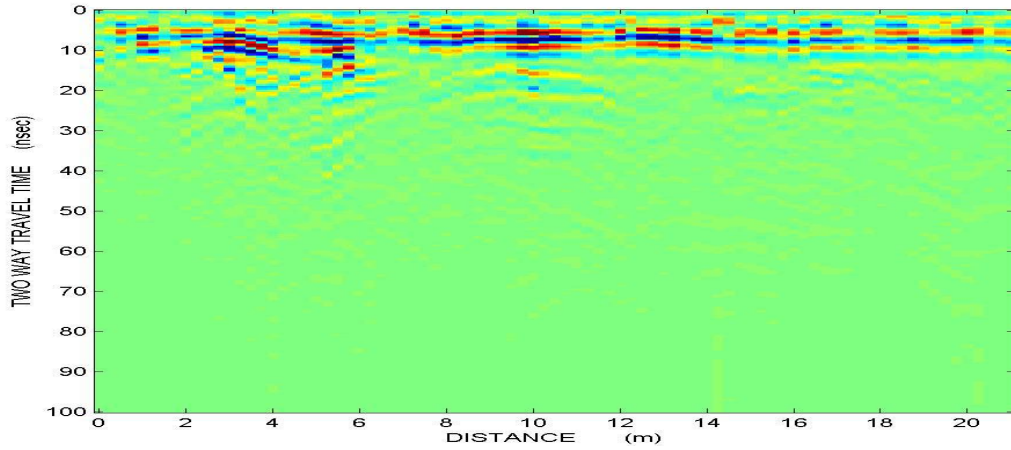
Τα μονοδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε να ενεργούν είτε σε χρονοσειρές, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, είτε σε στιγμιότυπα κύματος λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά ίχνη, αλλά αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο. Δηλαδή ενεργούν στον x -άξονα (απόσταση, m) ή στον y -άξονα (χρόνος, nsec). (Σπανουδάκης, 2002)

2.3.1 Φίλτρο διόρθωσης Dewow

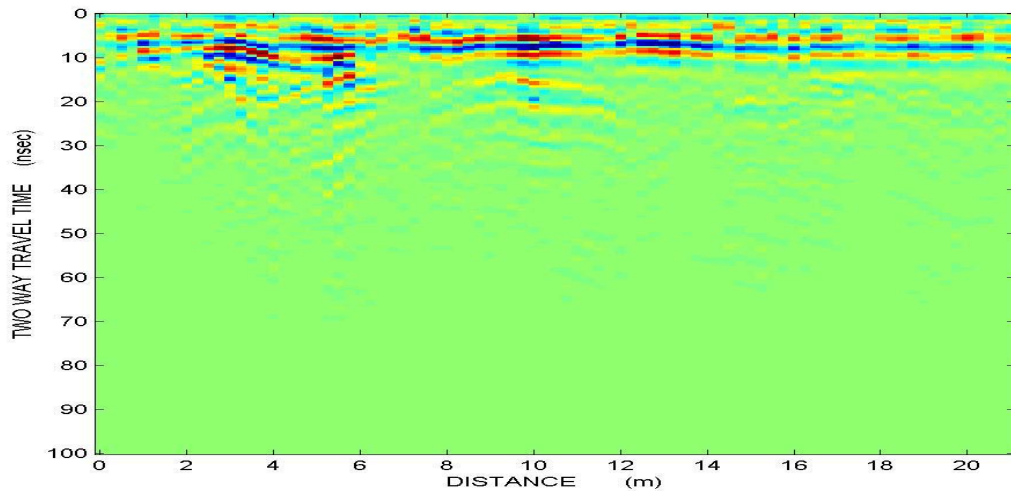
Πρόκειται για φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων κάθε ίχνους ξεχωριστά. Αρχικά υπολογίζεται το μήκος του τελεστή (M) από τη σχέση $2/(f \cdot \Delta t)$, όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής και Δt το διάστημα δειγματοληψίας. Ο τελεστής αυτός υπολογίζει τη μέση τιμή η οποία στην συνέχεια αφαιρείται από τα αρχικά δεδομένα. Η γενική μορφή του τελεστή που υπολογίζει τη μέση τιμή είναι:

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

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow στα ακατέργαστα δεδομένα από την γεωφυσική διασκόπηση στην περιοχή Ομαλός Χανίων (σχήμα 2.2, βλέπε κεφάλαιο 4). Δεν φαίνονται ανακλώμενα κύματα από βαθύτερα στρώματα λόγω μεγάλης εξασθένισης.



Σχήμα 2.2 Ακατέργαστη τομή γεωραντάρ που προέκυψε από μετρήσεις στην περιοχή Ομαλός Χανίων.

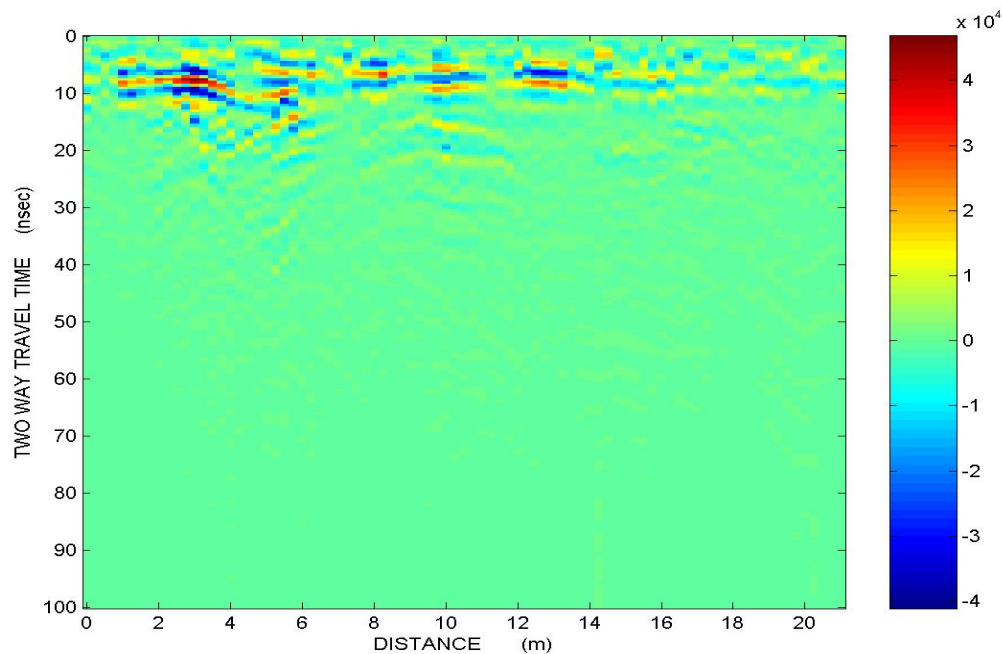


Σχήμα 2.3 Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου διόρθωσης Dewow στα ακατέργαστα δεδομένα του σχήματος 2.2

2.3.2 Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου

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

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal).



Σχήμα 2.4 Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal) στα αρχικά δεδομένα του σχήματος 2.2.

2.4 Δισδιάστατα Φίλτρα

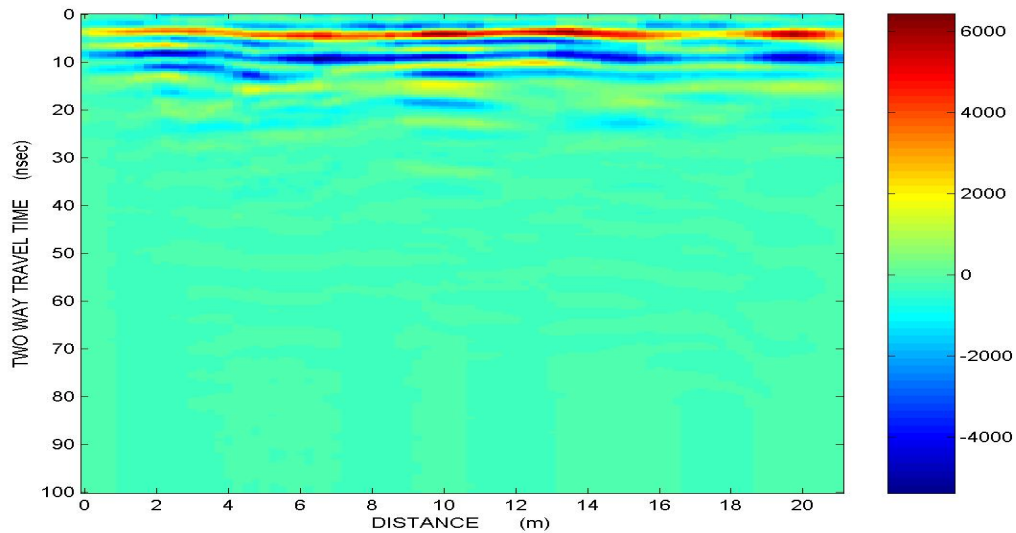
Τα δισδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε κατά την εφαρμογή τους να λαμβάνουν υπόψη δεδομένα που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο σε τομές γεωραντάρ όσο και σε οριζόντιες τομές. (Σπανουδάκης, 2002)

2.4.1 Φίλτρο μέσης τιμής

Το φίλτρο αυτό υπολογίζει τη μέση τιμή και χρησιμοποιείται σαν φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Εξομαλύνει την εικόνα, τονίζει οριζόντιους και κεκλιμένους ανακλαστήρες. Ο τελεστής που το περιγράφει είναι:

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{N^2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}_{(N \times N)}$$

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου μέσης τιμής.



Σχήμα 2.5 Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου μέσης τιμής στα αρχικά δεδομένα του σχήματος 2.2.

2.5 Μιγαδικά χαρακτηριστικά

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

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

$$f(t) = x(t) + jx^*(t) \quad (2.2)$$

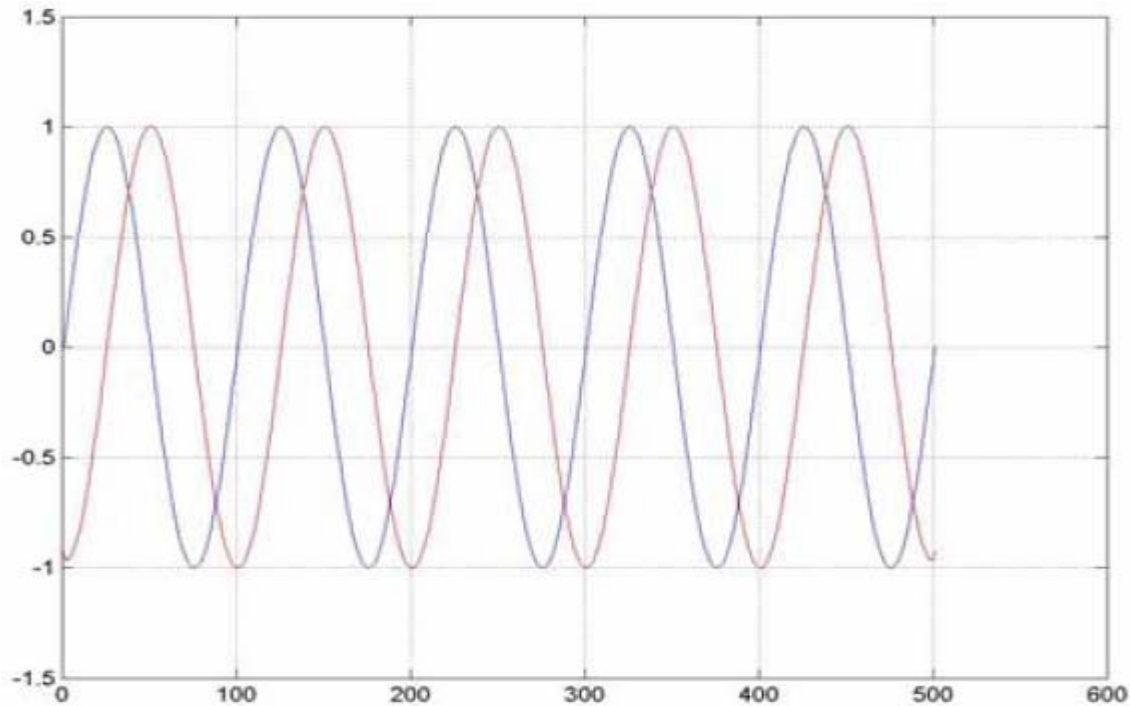
Το φανταστικό μέρος $x^*(t)$ είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά 90° από το πραγματικό μέρος (σχήμα 2.6) και μπορεί να προσδιοριστεί από το πραγματικό αν το $x^*(t)$:

- Μπορεί να προσδιοριστεί από το $x(t)$ με τη διαδικασία της γραμμικής συνέλιξης.
- Να ανάγεται σε phasor αν το $x(t)$ είναι ημιτονοειδής συνάρτηση. Δηλαδή για $x(t) = E \cos(\omega t + \theta)$, τότε $x^*(t) = E \sin(\omega t + \theta)$, $E, \theta \in \mathbb{R}$ και $\omega > 0$.

Αυτοί οι δυο κανόνες προσδιορίζουν το φανταστικό μέρος για κάθε συνάρτηση $x(t)$ που μπορεί να αναπαρασταθεί από σειρά ή ολοκλήρωμα Fourier.

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

$$f(t) = x(t) + jx^*(t) = E(t)[\cos \theta(t) + j \sin \theta(t)] = E(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.6 Μια ημιτονοειδής συνάρτηση (μπλε γραμμή) και η φασικά μετατοπισμένη κατά 90° συνάρτηση (κόκκινη γραμμή). (Σπανουδάκης, 2002)

Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά διακρίνονται σε δύο ομάδες :

- Τα φυσικά μιγαδικά χαρακτηριστικά (attributes). Αναφέρονται στις διακυμάνσεις των φυσικών ιδιοτήτων και περιλαμβάνουν τον μετασχηματισμό Hilbert. Αυτά τα μιγαδικά χαρακτηριστικά μπορούν να υπολογιστούν είτε βήμα προς βήμα (instantaneous physical attributes) είτε στα τοπικά μέγιστα του πλάτους (wavelet or response attributes).
- Τα γεωμετρικά μιγαδικά χαρακτηριστικά (attributes). Αφορούν τις διακυμάνσεις στην μορφολογία ενός γεωλογικού σχηματισμού όπως δομή και στρωματογραφία. Φανερώνουν την χωρική και χρονική διακύμανση των φυσικών μιγαδικών χαρακτηριστικών. Μιγαδικά χαρακτηριστικά όπως η συνάφεια, η ομοιότητα κ.ά. ανήκουν σε αυτήν την τάξη αφού από αυτά μπορούμε να ανακτήσουμε πληροφορίες για την μορφολογία (Carr, 2001).

2.5.1 Βασικά μιγαδικά χαρακτηριστικά

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

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + x^{*2}(t)} \quad (2.4)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} [x^*(t) / x(t)] \quad (2.5)$$

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

Η στιγμιαία συχνότητα μπορεί να προκύψει και κατά τη συνέλιξη της στιγμιαίας φάσης με διαφορικό φίλτρο $d(t)$:

$$\omega(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d(\tau) \theta(t - \tau) dt \quad (2.6)$$

Ακόμα παραγωγίζοντας τη συνάρτηση του τόξου εφαπτομένης σύμφωνα με τον ορισμό της στιγμιαίας φάσης προκύπτει :

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \{ \tan^{-1} [x^*(t) / x(t)] \} = [x(t) \frac{dx^*(t)}{dt} - x^*(t) \frac{dx(t)}{dt}] / [x^2(t) + x^{*2}(t)] \quad (2.7)$$

Το στιγμιαίο πλάτος σε κάθε χρονική στιγμή ισούται με τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η καταγραφή μετατοπίζοντας σταθερά τη φάση της από $0^\circ - 360^\circ$ (Barnes 1998). Η τιμή της φάσης που προσδίδει τη μέγιστη τιμή της καταγραφής είναι η στιγμιαία φάση αλλά με αντίθετο πρόσημο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις χρονικές στιγμές και έτσι παράγεται στο στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία φάση της καταγραφής.

Συνεπώς το στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία φάση μπορεί να προκύψουν από την καταγραφή χωρίς τον μετασχηματισμό Hilbert, κάνοντας συνεχείς μετατοπίσεις στη φάση. Φυσικά αυτή η μέθοδος είναι πρακτικά αδύνατη. Ευτυχώς όμως μια μετατόπιση της φάσης κατά 90° είναι αρκετή. Τότε το στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία φάση προκύπτουν από την αρχική και τη φασικά μετατοπισμένη κατά 90° (Σπανουδάκης, 2002).

2.5.2 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά

Στιγμιαία φανταστική συνιστώσα

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

Στιγμιαίο πλάτος

Το βασικό αυτό μιγαδικό χαρακτηριστικό, αποτελεί το μέτρο του σύνθετου ίχνους και χρησιμεύει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες. Η σχέση που το περιγράφει είναι:

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + x^{*2}(t)} \quad (2.8)$$

Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB

Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB δίδεται από τη σχέση: $20\log E(t)$. Η κλίμακα dB χρησιμοποιείται συνήθως στο πεδίο των συχνοτήτων για τη απεικόνιση του φάσματος ισχύος. Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB. Η κλασματική ανάλυσή του (fractal analysis) δίδει πληροφορίες σχετικά με στρωματογραφικές σειρές και ανωμαλίες λόγω της ύπαρξης υδρογονανθράκων.

Στιγμιαία φάση

Η στιγμιαία φάση τείνει να ενισχύσει τους αδύναμους ανακλαστήρες αφού είναι ανεξάρτητη από το πλάτος. Όμως είναι πολύ ευαίσθητη στο θόρυβο.

Στιγμιαία συχνότητα

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

Συνάφεια

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

$$\text{Semblance}(t) = \frac{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \left[\sum_{m=1}^M f_m(t+\tau) \right]^2 - \sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \left[\sum_{m=1}^M f_m^2(t+\tau) \right]}{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \left[\sum_{m=1}^M f_m^2(t+\tau) \right]} \quad (2.9)$$

Όπου f_m είναι το m ίχνος του συνόλου και N το μήκος του παραθύρου υπολογισμού.

2.6 Μετασχηματισμός κύριων συνιστωσών

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

Ο πίνακας Σ μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας δίνεται από την σχέση:

$$\Sigma = \text{Cov}(X) = E[(X-\mu)(X-\mu)^T] \quad (2.10)$$

Και X τυχαίος πίνακας της μορφής :

$$X_{(p \times N)} = [x_1 | x_2 | \dots | x_p]^T \quad (2.11)$$

Όπου \mathbf{p} ο αριθμός των μιγαδικών χαρακτηριστικών (attributes), \mathbf{N} ο αριθμός των ιχνών και \mathbf{x} τυχαίες μεταβλητές

$$\text{και } E(\mathbf{x}) \text{ η μέση τιμή των παραπάνω δεδομένων : } E(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} E(x_1) \\ E(x_2) \\ \vdots \\ E(x_p) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Οι κύριες συνιστώσες είναι στατιστικώς ασυσχέτιστες και έχουν μεταβλητότητες ίσες με τις ιδιοτιμές του πίνακα Σ , ενώ ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των κύριων συνιστωσών είναι διαγώνιος.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_p \quad \Sigma_{\psi} = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

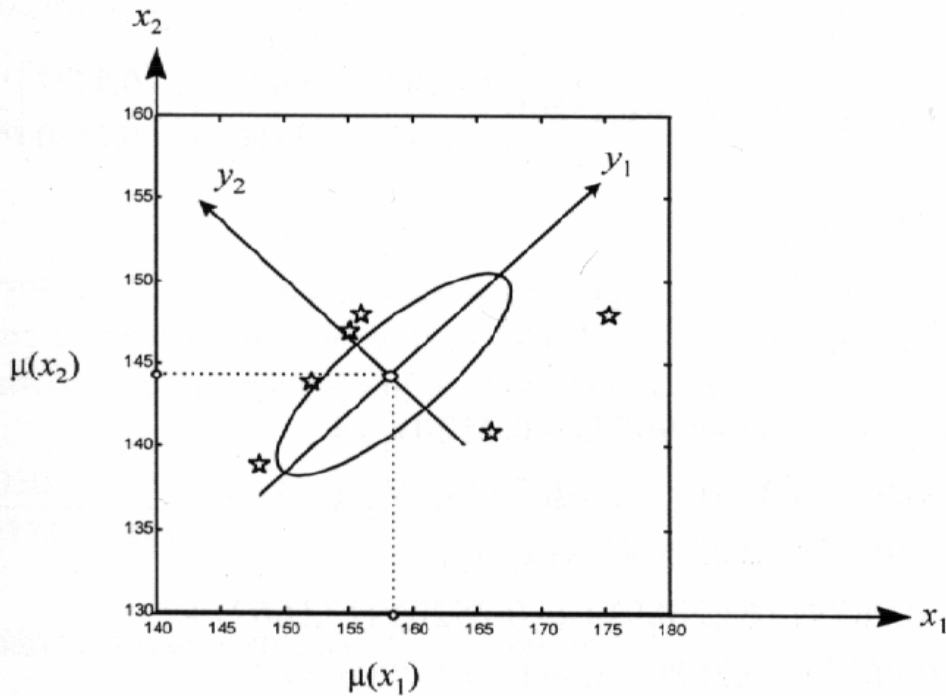
Για κάθε μη – μηδενική ιδιοτιμή λ_i προσδιορίζεται το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα:

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} e_{1,i} \\ e_{2,i} \\ \vdots \\ e_{p,i} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Επομένως οι κύριες συνιστώσες περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{e}_1^T \mathbf{x} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{e}_2^T \mathbf{x} \quad (2.16)$$



Σχήμα 2.7 Ο μετασχηματισμός των κυρίων συνιστωσών (Μερτίκας, 1999)

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

2.7 Μέθοδοι Ταξινόμησης

Κατά το στάδιο της ταξινόμησης πραγματοποιείται διαχωρισμός των δεδομένων και καταχώρισή τους στη συνέχεια σε ομάδες (τάξεις). Δηλαδή αρχικά καθορίζονται τα κριτήρια, βάση των οποίων θα γίνει η διαφοροποίηση και στη συνέχεια επιλέγεται ο κατάλληλος αλγόριθμος ώστε να διαχωριστούν τα δεδομένα σε δύο ή περισσότερες ομοειδείς τάξεις.

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

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

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

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

2.7.1 Μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης K- μέσω των τιμών.

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

$$E_K = \sum_{j=1}^K \|m_j(k) - \mathbf{x}\|^2 \quad (2.17)$$

Όπου m_j τα κέντρα συγκέντρωσης, k ο αριθμός των κέντρων συγκέντρωσης και \mathbf{x} τα δείγματα.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα (4) βήματα:

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

$$\|m_j(k) - \mathbf{x}\| < \|m_i(k) - \mathbf{x}\| \quad (2.18)$$

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

3. Υπολογίζονται τα νέα κέντρα ομάδων από τη σχέση:

$$m_j(k+1) = \frac{1}{n} \sum_{\mathbf{x} \in \omega_j} \mathbf{x} \quad (2.19)$$

όπου n , ο αριθμός των δειγμάτων στην ομάδα j .

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

Η επιλογή του πλήθους K των κέντρων συγκέντρωσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, γιατί αλλάζοντας τον αριθμό K των κέντρων προκύπτουν τελείως διαφορετικές ομάδες. Κρίσιμη είναι επίσης και η επιλογή των αρχικών κέντρων συγκέντρωσης $m_1(1), m_2(2), \dots, m_K(1)$, επειδή κάποιες ομάδες μπορεί να μείνουν άδειες αν τα κέντρα απέχουν μακριά από την κατανομή των δεδομένων. Ο αλγόριθμος των K μέσων τιμών είναι υπολογιστικά απλός, γρήγορος και χρησιμοποιείται συνήθως για την ταξινόμηση μεγάλου πλήθους δεδομένων. Δίνει ακριβή αποτελέσματα όταν οι τάξεις απέχουν σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (Kulkarni, 1998).

2.7.2 Χάρτες αυτοδιοργάνωσης.

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

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

Ο αλγόριθμος της αυτοδιοργάνωσης ξεκινάει ορίζοντας τα διανύσματα συναπτικών βαρών. Αυτό γίνεται προσδίδοντας μικρές τιμές στο δίκτυο, οι οποίες γενικεύονται από γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Με αυτό τον τρόπο δεν υπάρχει

οργανωμένη διάταξη από την αρχή. Οι θεμελιώδεις λειτουργίες ενός χάρτη αυτοδιοργάνωσης είναι οι ακόλουθες :

- **Ανταγωνισμός:** Τα νευρώνια ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το πιο ανταποκρίνεται καλύτερα στο διάνυσμα εισόδου. Κάθε φορά που εισάγεται νέο διάνυσμα μόνο ένα νευρώνιο ανακηρύσσεται νικητής.
- **Συνεργασία:** Το νευρώνιο νικητής καθορίζει μια τοπολογική γειτονία μέσα στην οποία τα νευρώνια συνεργάζονται.
- **Προσαρμογή συναπτικών βαρών:** Σε αυτό το στάδιο διορθώνεται όχι μόνο το διάνυσμα συναπτικών βαρών του νευρωνίου νικητή, ώστε να έρθει πιο κοντά στο διάνυσμα εισόδου, αλλά και τα διανύσματα συναπτικών βαρών γειτονικών του νευρώνων αλλά σε μικρότερο βαθμό. Αυτός είναι και ο λόγος όπου υπάρχει τοπολογική συνέχεια.

Τρία είναι τα βασικά βήματα του αλγόριθμου μετά τον καθορισμό των αρχικών τιμών στα συναπτικά βάρη: η δειγματοληψία, η επιλογή του νευρωνίου-νικητή και ο επαναπροσδιορισμός των συναπτικών βαρών. Ο αλγόριθμος συνοψίζεται ως εξής:

1. **Καθορισμός αρχικών τιμών στα συναπτικά βάρη.** Αρχικά οι τιμές για τα διανύσματα συναπτικών βαρών $\mathbf{w}_j(0)$ είναι τυχαίες. Ο μόνος περιορισμός είναι αυτές οι τιμές πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους για κάθε νευρώνιο $j = 1, 2, \dots, l$ όπου l , ο αριθμός των νευρώνων στο πλέγμα. Καλό είναι οι τιμές να είναι μικρές.
2. **Δειγματοληψία.** Επιλέγεται ένα δείγμα \mathbf{x} από τα δεδομένα των οποίων το πλήθος είναι m .
3. **Επιλογή του νευρωνίου-νικητή.** Υπολογίζεται το νευρώνιο νικητής $i(\mathbf{x})$ με κριτήριο την ελάχιστη Ευκλείδεια απόσταση:

$$i(\mathbf{x}) = \arg \min_j \|\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j\|, j = 1, 2, \dots, l \quad (2.20)$$

4. Επαναπροσδιορισμός των συναπτικών βαρών. Τα συναπτικά βάρη όλων των νευρώνιων προκύπτουν χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + \eta(n)h_{j,i(\mathbf{x})}(n)(\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j(n)), \quad (2.21)$$

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

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή

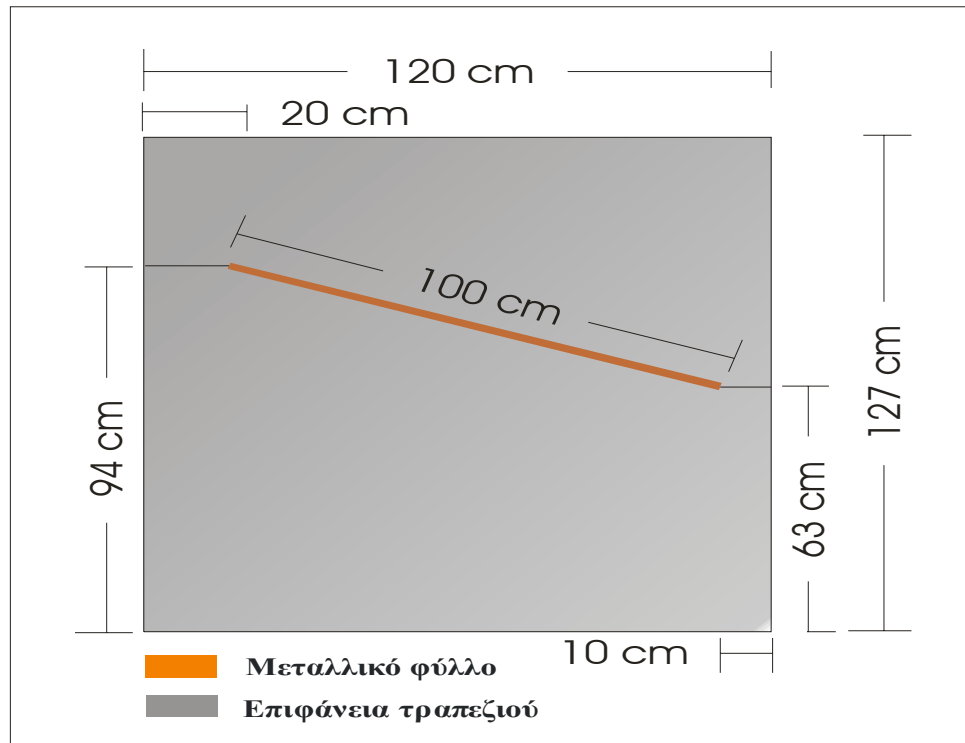
Σκοπός του κεφαλαίου είναι η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε, έτσι ώστε να γίνει η καλύτερη δυνατή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με εργαστηριακές μετρήσεις, οι οποίες πάρθηκαν σε αντικείμενο με γνωστές διαστάσεις, όπου γνωρίζουμε την ακριβή θέση του στόχου που σκοπεύουμε να ανιχνεύσουμε. Στην προκειμένη περίπτωση ο στόχος είναι ένα μεταλλικό φύλλο, το οποίο βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια τραπεζιού, σε συγκεκριμένη απόσταση.

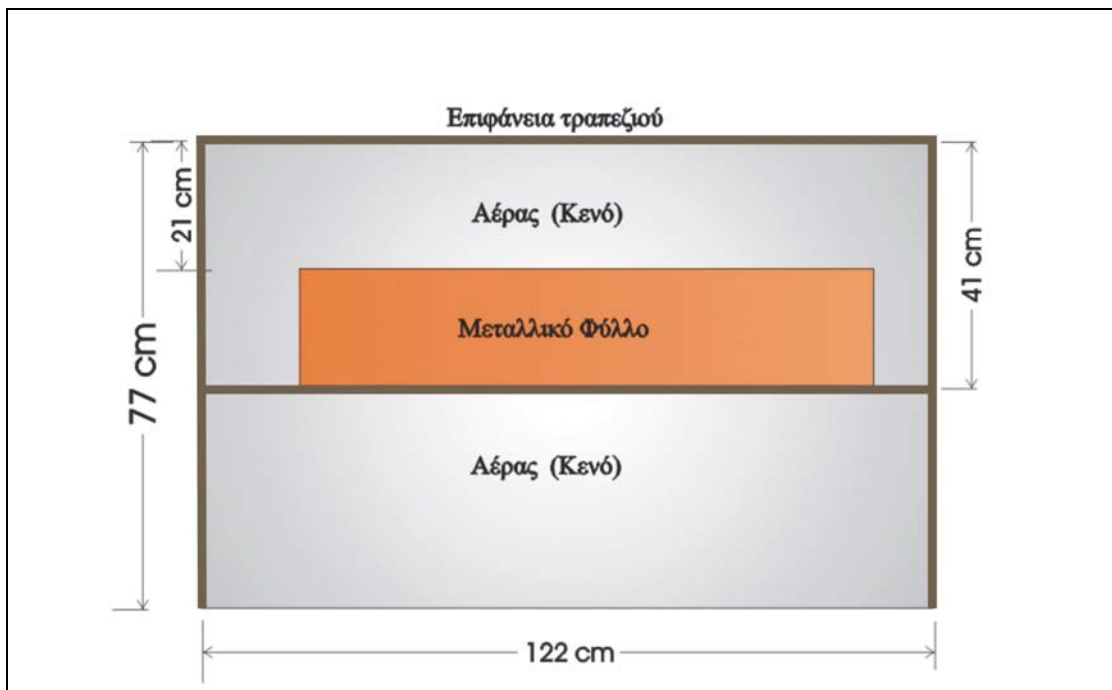
Αφού ληφθούν οι μετρήσεις με το γεωραντάρ (GPR) στην επιφάνεια του τραπεζιού, γίνεται επεξεργασία των δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις πραγματικές διαστάσεις και την ακριβή θέση του στόχου. Μ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η εξασφάλιση χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την προτεινόμενη μέθοδο επεξεργασίας.

3.2 Περιγραφή εργαστηριακών μετρήσεων

Όπως προαναφέρθηκε οι εργαστηριακές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην οριζόντια επιφάνεια τραπεζιού με διαστάσεις: 120cm • 127cm, η οποία απέχει από το έδαφος απόσταση 76cm. Κάτω από την επιφάνεια του τραπεζιού, παράλληλα προς αυτή και σε απόσταση 21cm βρίσκεται μεταλλικό φύλλο (στόχος) μήκους 100cm και πλάτους 20cm. Η ακριβής θέση του παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (σχ.3.1 και σχ.3.2).

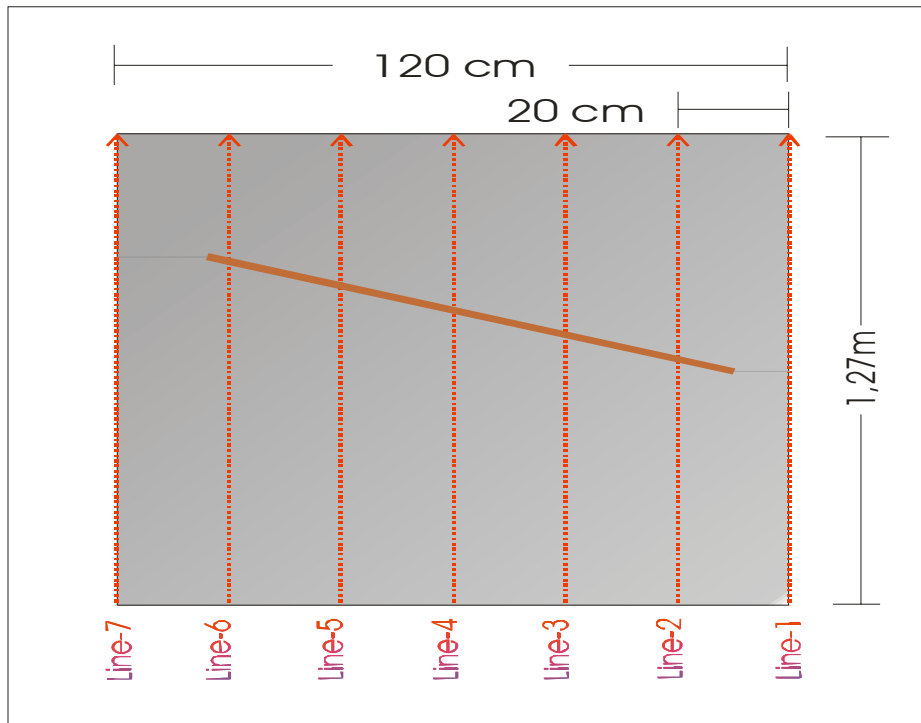


Σχήμα 3.1. Κάτοψη αντικειμένου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.



Σχήμα 3.2. Πρόσωση αντικειμένου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα GPR Pulse Ekko 1000, με κεραίες συχνότητας 1200MHz. Χρησιμοποιήθηκαν κεραίες μεγάλης συχνότητας έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγάλη διακριτική ικανότητα, επειδή ο στόχος βρίσκεται σε μικρό βάθος. Για τη συλλογή των δεδομένων επιλέχθηκε η μέθοδος της ανάκλασης, και ορθογώνιο πλέγμα όπου διασκοπήθηκαν 7 γραμμές μελέτης με απόσταση μεταξύ τους 20 cm (σχήμα 3.3). Κάθε γραμμή GPR περιέχει 128 ίχνη με βήμα διασκόπησης 1 cm. Οι κεραίες ήταν προσανατολισμένες παράλληλα η μία ως προς την άλλη, κάθετα στην διεύθυνση της γραμμής μελέτης και είχαν σταθερή απόσταση μεταξύ τους ίση με 7,5 cm.



Σχήμα 3.3. Γραμμές μελέτης διασκόπησης

Το γεωραντάρ ήταν συνδεδεμένο με Η/Υ και έδινε απευθείας διάγραμμα αναπαράστασης του υποβάθρου, με οριζόντιο άξονα(x) την οριζόντια απόσταση, μετρούμενη σε μέτρα (m) και κατακόρυφο άξονα(y) τον χρόνο καταγραφής (nsec).

Στον παρακάτω πίνακα (3.1) παρουσιάζονται οι παράμετροι που ορίστηκαν πριν την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Πίνακας 3.1
Παράμετροι διασκόπησης

Μέθοδος	Συχνότητα Κεραίας	Βήμα Διασκόπησης	Απόσταση Γραμμών Μελέτης	Διάστημα Δειγματοληψίας	Συνολικός Χρόνος Καταγραφής
Ανάκλασης	1200 MHz	0.01 m	0.2 m	0.1 nsec	7 nsec

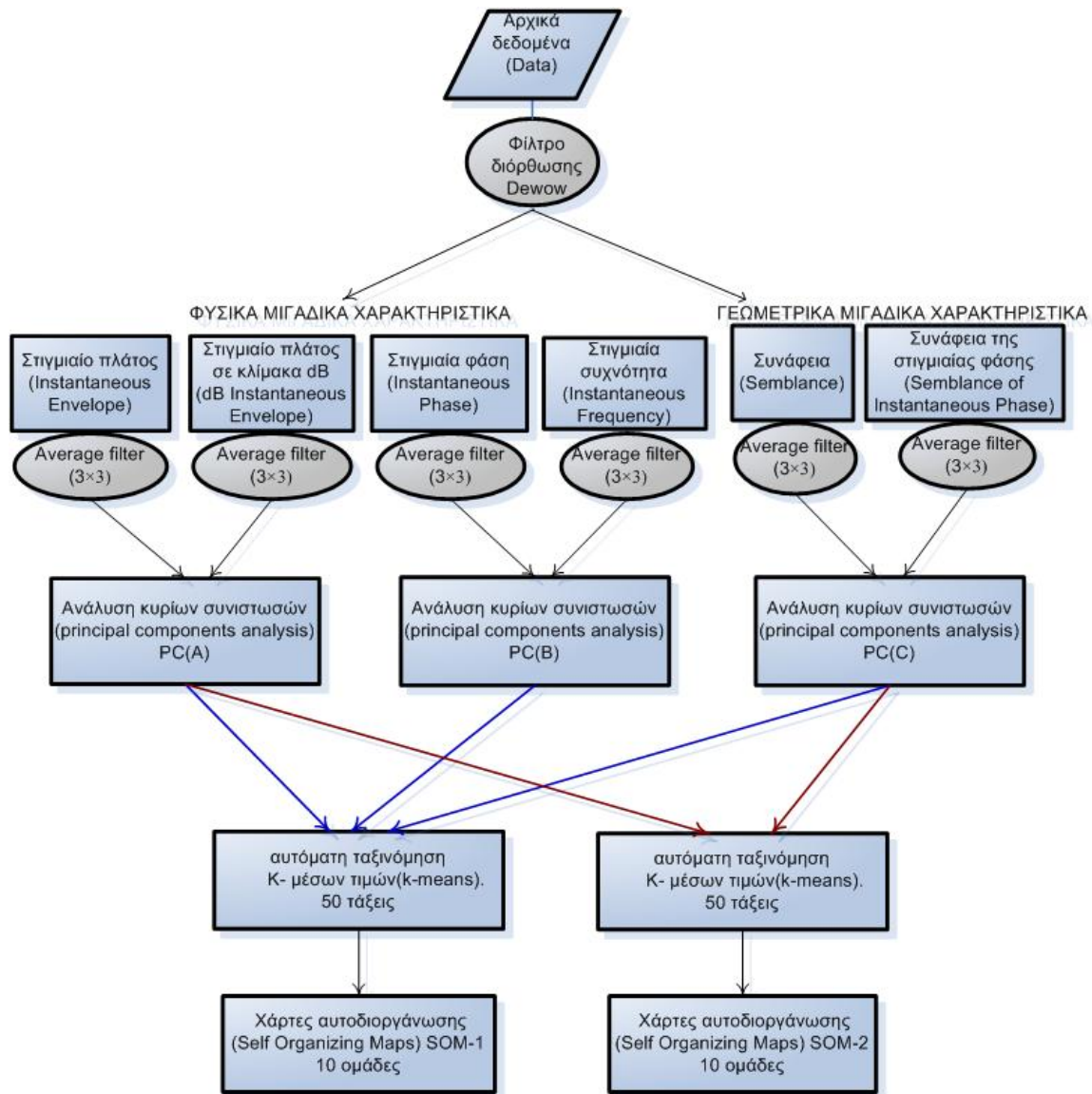
3.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Από τη συλλογή των δεδομένων δημιουργήθηκαν επτά δισδιάστατες εικόνες [X-άξονας (m), Y-άξονας (nsec)], οι οποίες αποτελούνται από 128 ίχνη η καθεμία. Στη συνέχεια στις αρχικές αυτές εικόνες εφαρμόζεται φίλτρο διόρθωσης **Dewow** σε κάθε ίχνος ξεχωριστά, έτσι ώστε να απομακρυνθεί ο θόρυβος από τις καταγραφές.

Μετά την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow, υπολογίζονται τα **φυσικά μιγαδικά χαρακτηριστικά** (Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα) και τα **γεωμετρικά μιγαδικά χαρακτηριστικά** (Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης). Στη συνέχεια τα δεδομένα από κάθε μιγαδικό χαρακτηριστικό υφίστανται εξομάλυνση (φίλτρο μέσης τιμής).

Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά χωρίζονται σε τρία ζευγάρια (Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB), (Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα), (Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης) και πραγματοποιείται **μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών** σε κάθε ζευγάρι ξεχωριστά, έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων και να επιτευχθεί συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής πληροφορίας ($\approx 80\%$) περιλαμβάνεται στις τρεις πρώτες κύριες συνιστώσες, οι οποίες στη συνέχεια θα ταξινομηθούν με τη μέθοδο των **K-μέσων τιμών**. Με την αυτόματη μέθοδο ταξινόμησης των K-μέσων τιμών τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 50 τάξεις και στη συνέχεια, με τον αλγόριθμο του **Kohonen** (Self Organizing Maps) ταξινομούνται σε 10 ομάδες.

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



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας

3.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων εργαστηριακών μετρήσεων

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την επεξεργασία της 2^{ης} γραμμής μελέτης, σύμφωνα με τη διάγραμμα ροής (σχ.3.4). Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα, τα οποία δεν έχουν υποστεί επεξεργασία, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η εικόνα που προέκυψε μετά την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow, καθώς και αυτές των φυσικών μιγαδικών

χαρακτηριστικών, των γεωμετρικών φυσικών χαρακτηριστικών, της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (πρώτη κύρια συνιστώσα) και τέλος της ταξινόμησης.

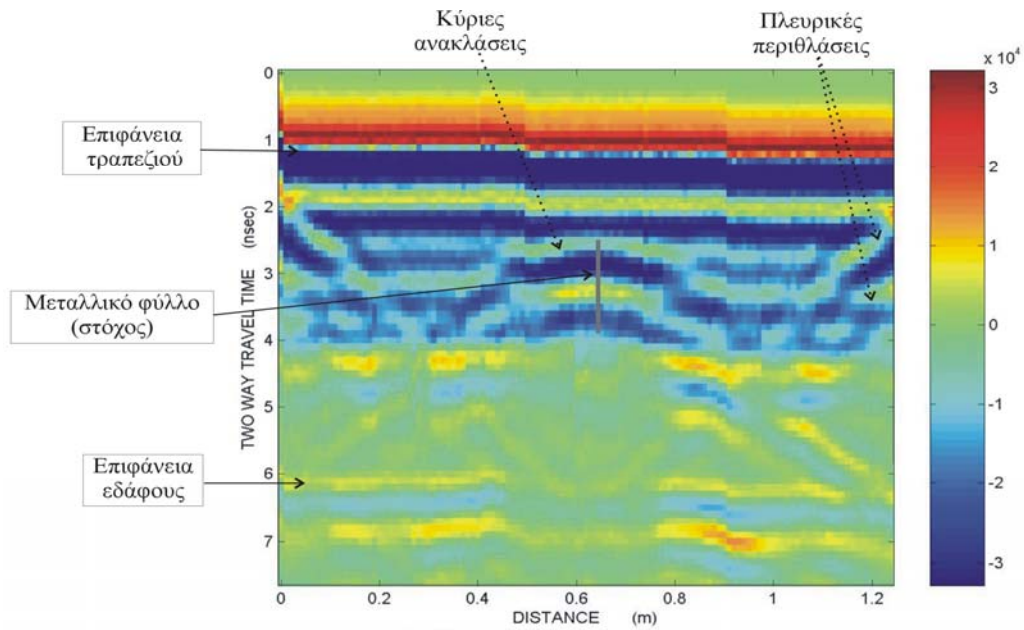
Σε καθεμιά από τις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται με γκρι χρώμα ο προς ανίχνευση στόχος (μεταλλικό φύλλο). Η θέση και οι διαστάσεις του είναι γνωστές, παρέχοντας τη δυνατότητα να προβληθεί το μεταλλικό φύλλο στις παρακάτω εικόνες και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος θεωρείται σταθερή και ίση με $3 \times 10^8 \text{ m/s} = 0.3 \text{ m/ns}$ άρα ο χρόνος διαδρομής του ανακλώμενου κύματος στο μεταλλικό φύλλο είναι: $s = u \times \frac{t}{2} \Leftrightarrow$

$$t = \frac{2s}{u} \approx 6.7 \text{ ns (nsec)}.$$

Οι καταγραφές του οργάνου καθυστερούν κατά 1 nsec. Συνεπώς, η επιφάνεια του τραπεζιού από όπου αρχίζουν οι καταγραφές απεικονίζεται σε χρόνο 1 nsec. Επομένως ο χρόνος(nsec) συναρτήσει του βάθους(m) είναι $t = 6.7s + 1$

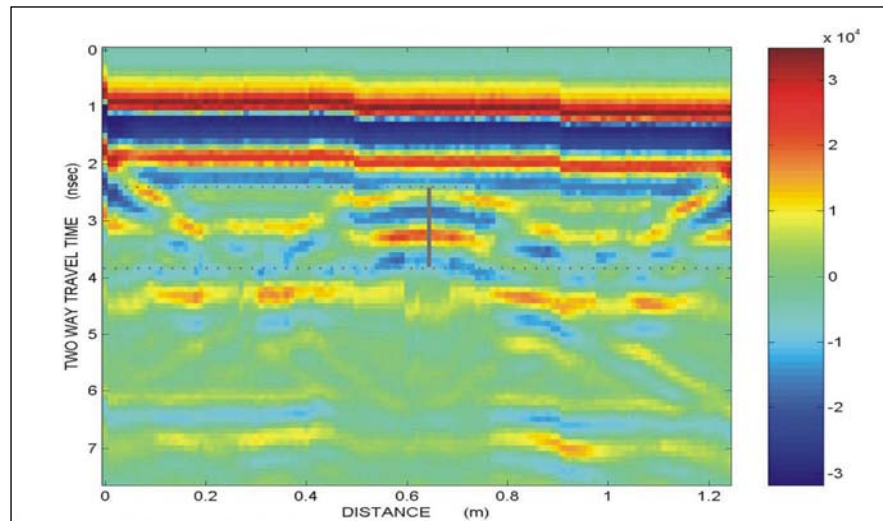
Στο σχήμα 3.5 απεικονίζονται τα αρχικά δεδομένα της 2^{ης} γραμμής μελέτης, όπου παρατηρούνται έντονες ανακλάσεις στη θέση όπου βρίσκεται ο στόχος.

Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει σαν αποτέλεσμα οι καταγραφές κάτω από το αγωγίμο υλικό να εμφανίζουν μειωμένο πλάτος. Οι ενεργειακές απώλειες της ακτινοβολίας οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην υψηλή συχνότητά της (1200MHz). Τα κύματα που καταγράφονται στα άκρα του σχήματος 3.5 με την μορφή ευθειών είναι πλευρικές ανακλάσεις στα όρια του τραπεζιού.



Σχήμα 3.5. Αρχικά δεδομένα της 2^{ης} γραμμής μελέτης

Το σχήμα 3.6 προκύπτει από την εικόνα των αρχικών δεδομένων (σχ.3.5) στην οποία εφαρμόστηκε μονοδιάστατο φίλτρο διόρθωσης Dewow έτσι ώστε να απομακρυνθεί από τις καταγραφές ο θορύβος. Το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται σε κάθε ίχνος ξεχωριστά.



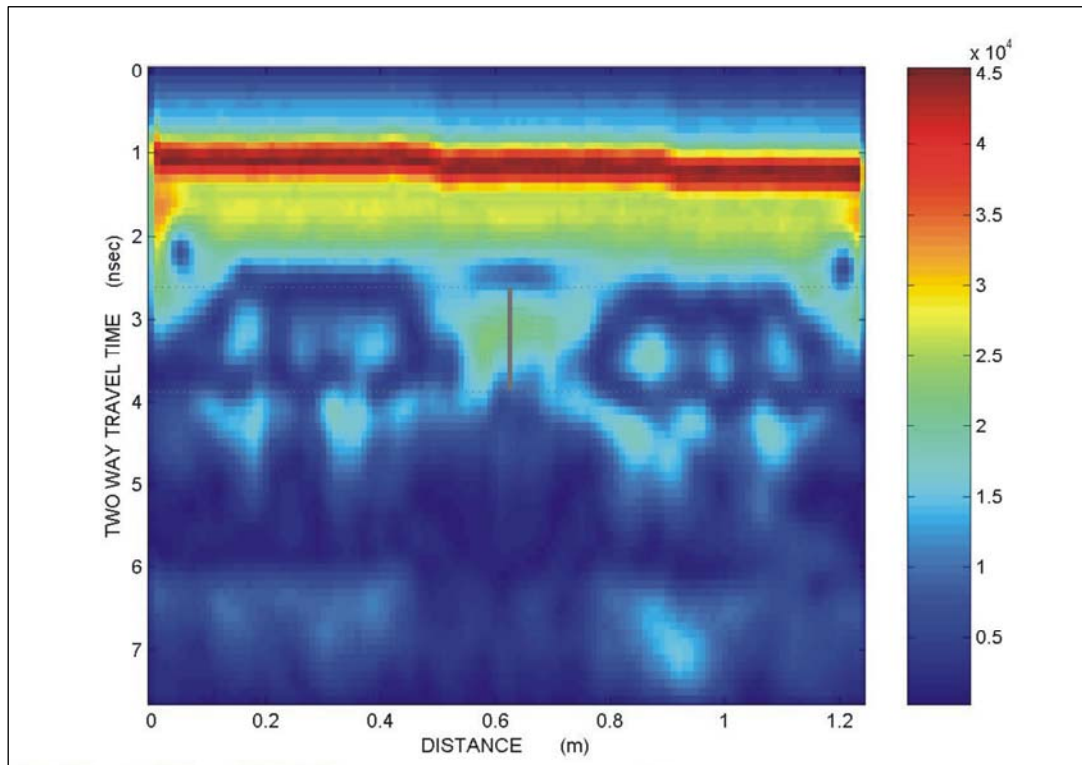
Σχήμα 3.6. Φίλτρο διόρθωσης Dewow της 2^{ης} γραμμής μελέτης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εικόνες των φυσικών μιγαδικών χαρακτηριστικών (σχ.3.7-3.10) και των γεωμετρικών μιγαδικών χαρακτηριστικών (σχ.3.11-3.12), οι οποίες

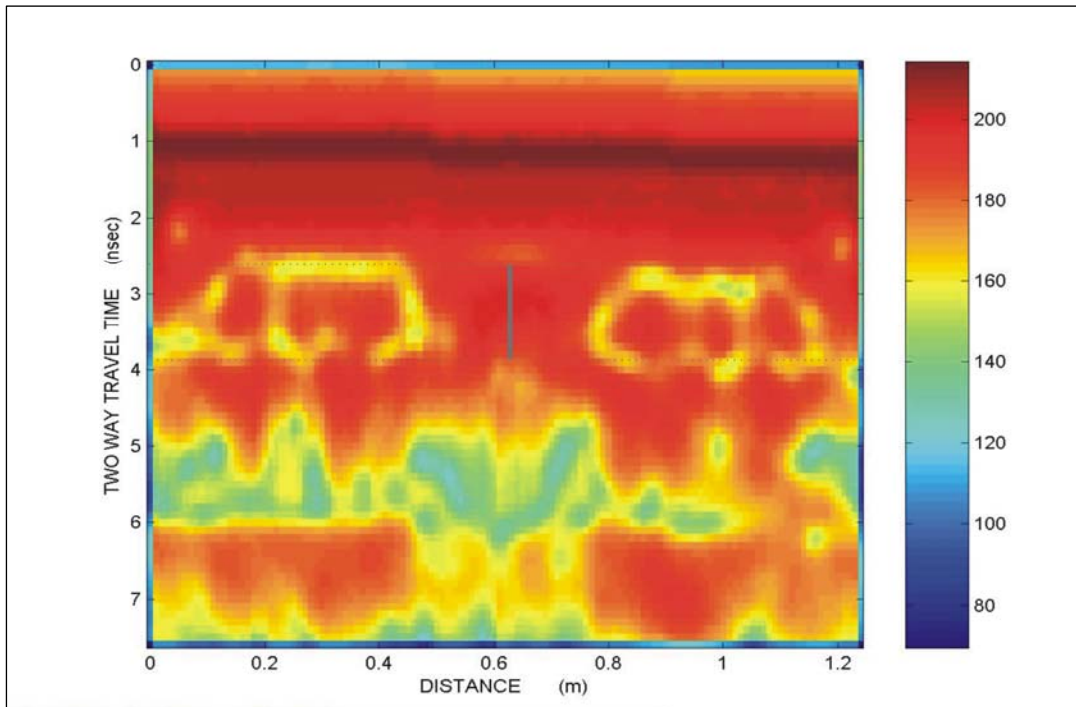
μας δίνουν πληροφορίες για τις διακυμάνσεις των φυσικών ιδιοτήτων (πλάτους, συχνότητας).

Από το στιγμιαίο πλάτος (instantaneous envelope) παρατηρούνται πλευρικές μεταβολές που οριοθετούν το στόχο. Στο σημείο όπου βρίσκεται το μεταλλικό αντικείμενο οι τιμές του στιγμιαίου πλάτους είναι υψηλές, λόγω ισχυρών ανακλάσεων.

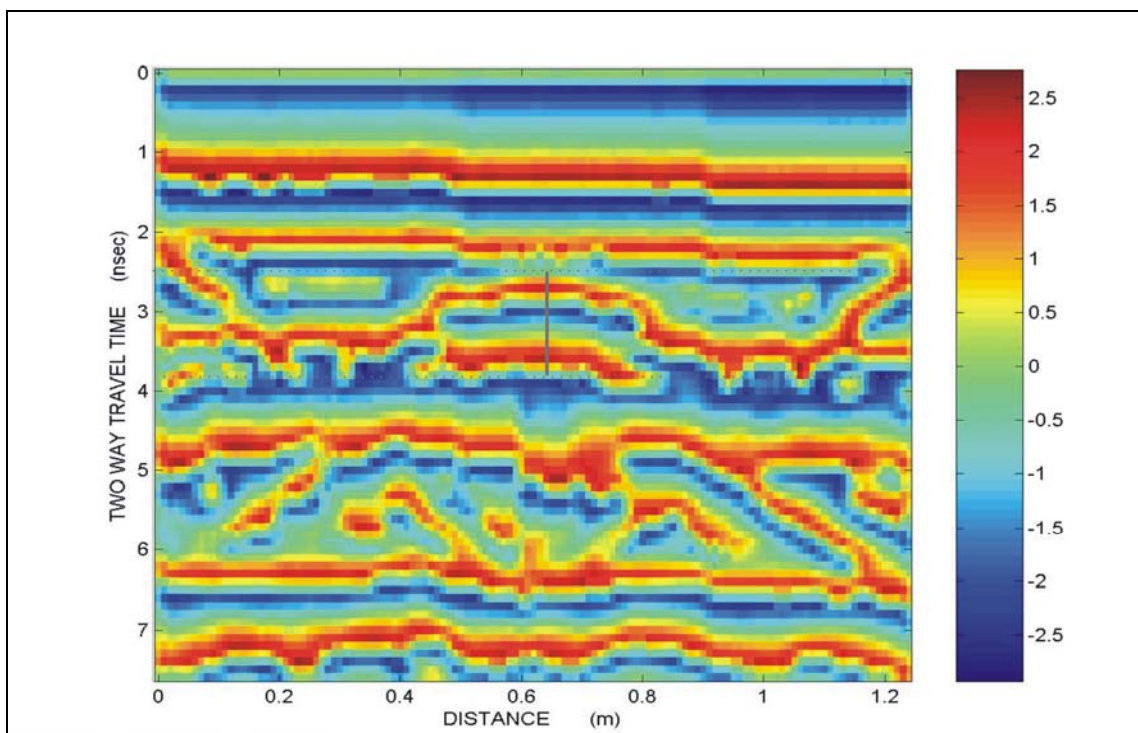
Η στιγμιαία φάση (instantaneous phase) και η στιγμιαία συχνότητα (instantaneous frequency) είναι ανεξάρτητες από το πλάτος και συμβάλουν στην ενίσχυση των αδύναμων ανακλαστήρων. Φανερώνουν τις ανακλάσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια του τραπεζιού και του πατώματος αλλά και τις πλευρικές ανακλάσεις στα όρια του τραπεζιού.



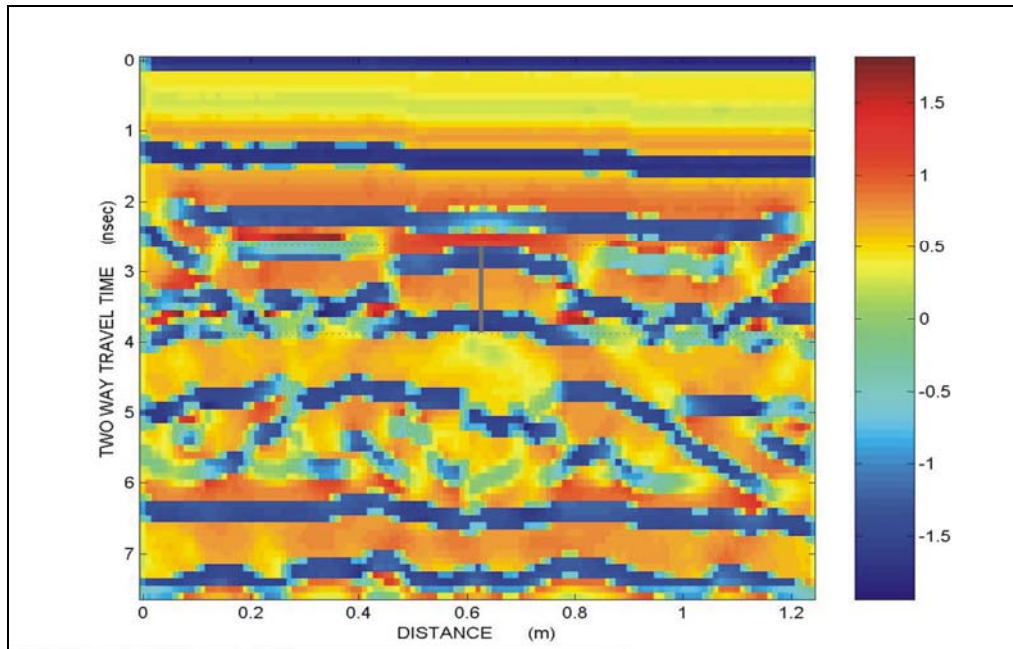
Σχήμα 3.7. Στιγμιαίο πλάτους (Instantaneous Envelope) της 2^{ης} γραμμής μελέτης



Σχήμα 3.8. Στιγμιαίο πλάτους σε κλίμακα dB (*dB Instantaneous Envelope*) της 2^{ης} γραμμής μελέτης

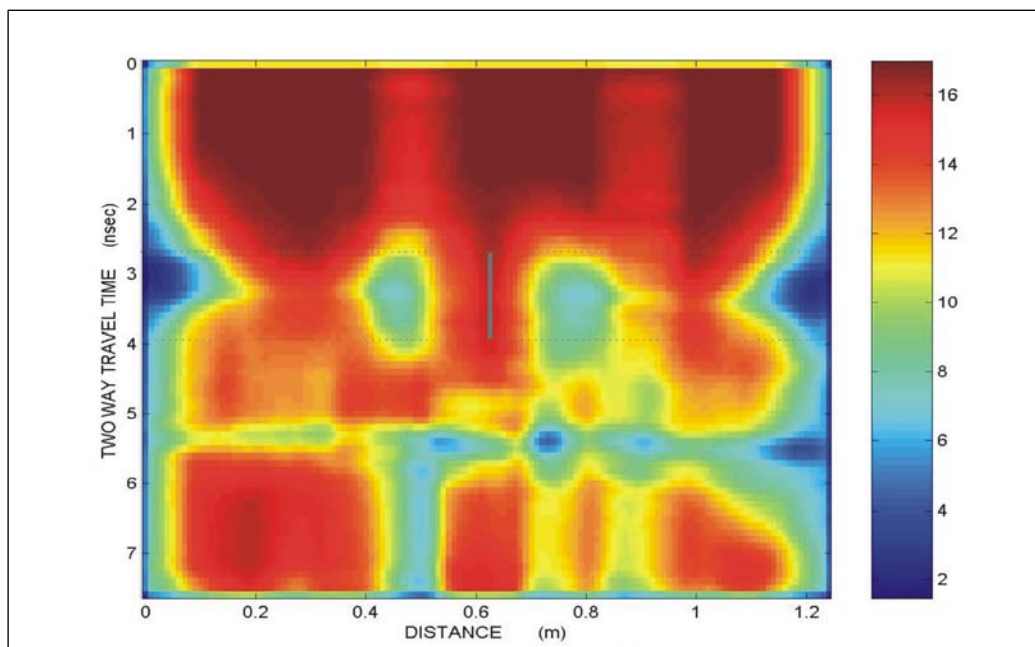


Σχήμα 3.9. Στιγμιαία φάση (*instantaneous phase*) της 2^{ης} γραμμής μελέτης

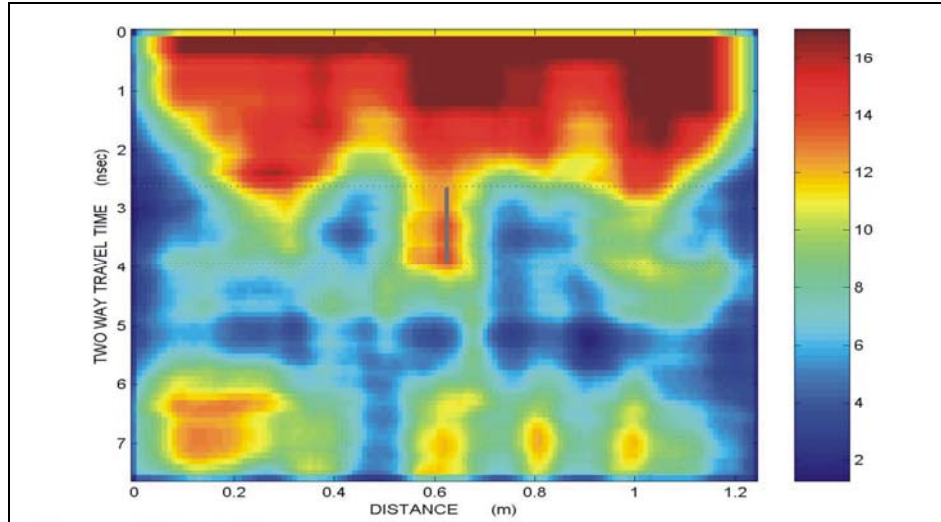


Σχήμα 3.10. Στιγμαία συχνότητα (*instantaneous frequency*) της 2^{ης} γραμμής μελέτης

Στα σχήματα 3.11 και 3.12 παρουσιάζεται η συνάφεια (*semblance, semblance of instantaneous phase*), που είναι το μέτρο της ομοιότητας μεταξύ διάφορων ιχνών.



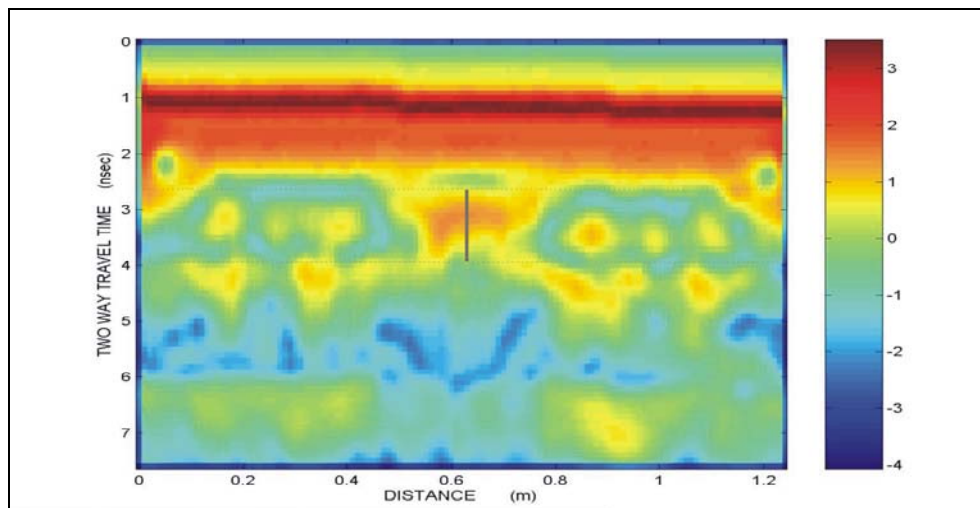
Σχήμα 3.11. Συνάφεια (*semblance*) της 2^{ης} γραμμής μελέτης



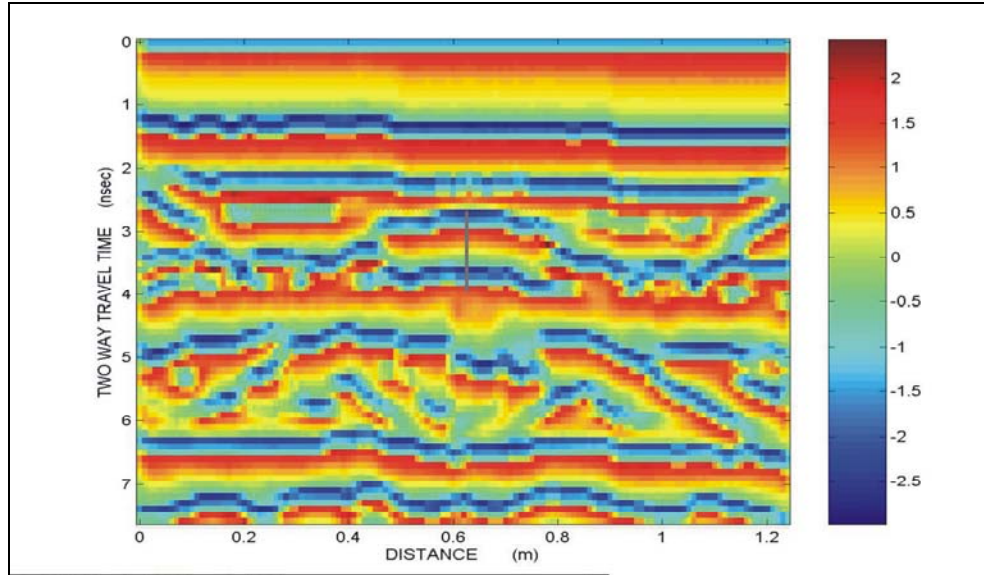
Σχήμα 3.12. Συνάφεια της στιγμιαίας φάσης (*semblance of instantaneous phase*) της 2^{ης} γραμμής μελέτης

Ο μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών εφαρμόζεται σε ζεύγη μιγαδικών χαρακτηριστικών (Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB), (Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα), (Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης) και προκύπτουν οι πρώτες κύριες συνιστώσες από κάθε ζευγάρι οι οποίες παρουσιάζονται στα σχήματα 3.13 έως 3.15.

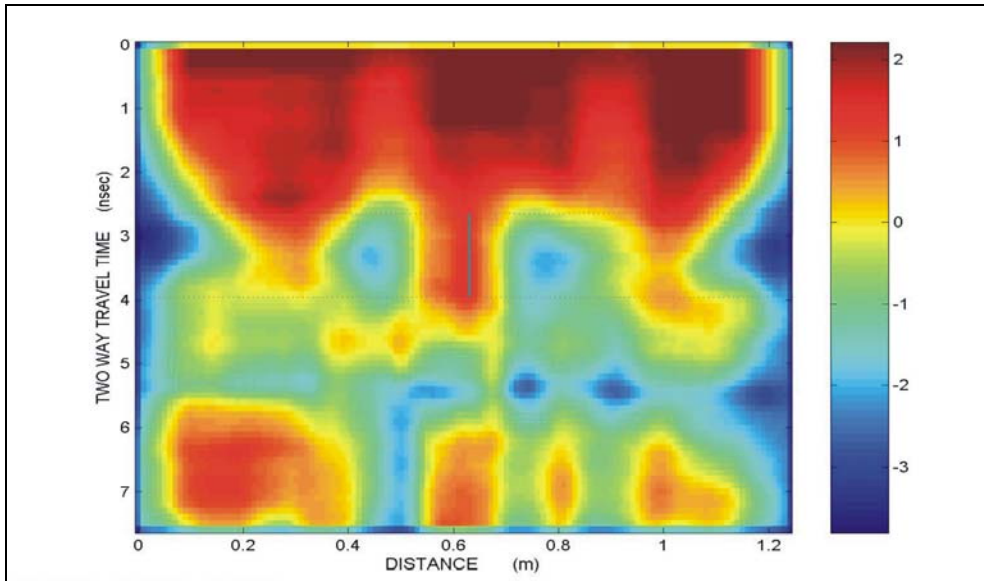
Από την κύρια συνιστώσα του πρώτου ζευγαριού οριοθετείται η θέση του στόχου. Από την κύρια συνιστώσα του δεύτερου ζευγαριού, φανερώνονται οι ανακλάσεις ενώ από του τρίτου ζευγαριού, η συνάφεια.



Σχήμα 3.13. Η πρώτη κύρια συνιστώσα $PC(A)$ που προέκυψε από την ανάλυση κυρίων συνιστωσών της πρώτης ομάδας των φυσικών μιγαδικών χαρακτηριστικών (*Instantaneous Envelope, dB Instantaneous Envelope*).



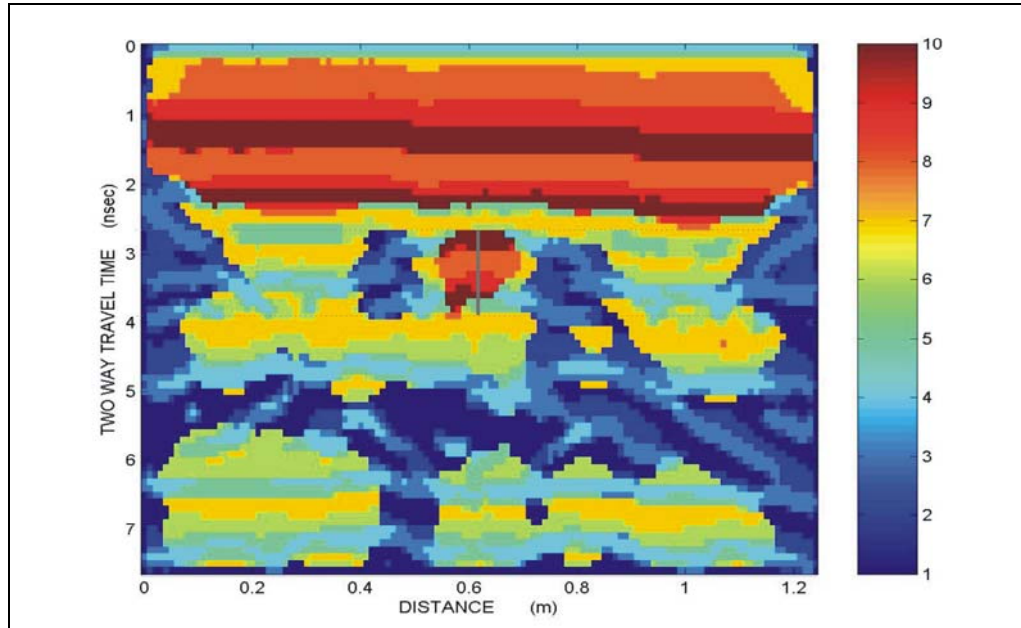
Σχήμα 3.14. Η πρώτη κύρια συνιστώσα $PC(B)$ που προέκυψε από την ανάλυση κυρίων συνιστωσών της δεύτερης ομάδας των φυσικών μιγαδικών χαρακτηριστικών (*instantaneous phase, instantaneous frequency*).



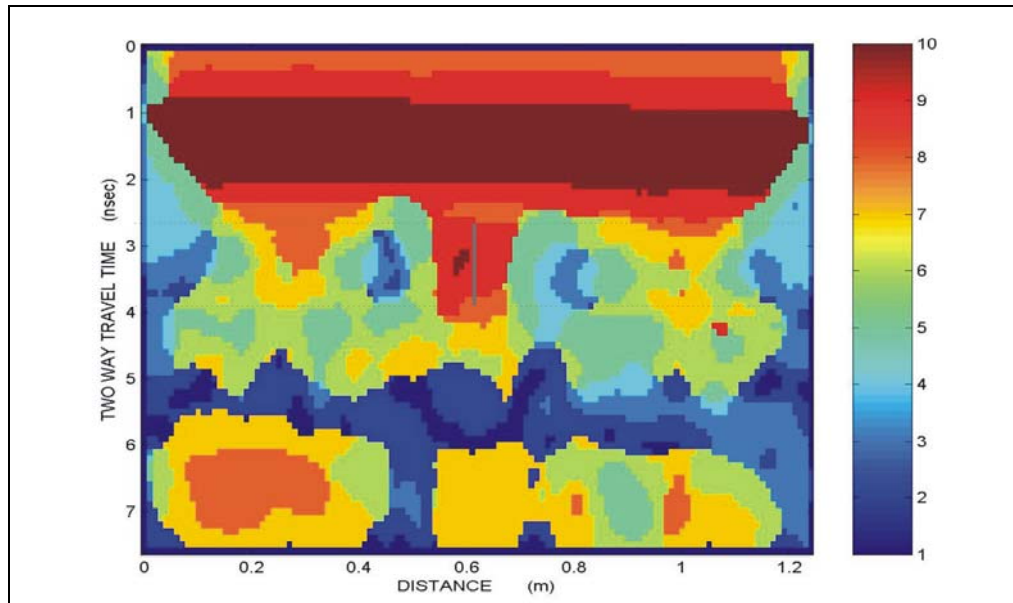
Σχήμα 3.15. Η πρώτη κύρια συνιστώσα $PC(C)$ που προέκυψε από την ανάλυση κυρίων συνιστωσών των γεωμετρικών μιγαδικών χαρακτηριστικών (*semblance, semblance of instantaneous phase*).

Στο τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας πραγματοποιείται η ταξινόμηση. Οι κύριες συνιστώσες που παρουσιάστηκαν παραπάνω ταξινομούνται σε δύο ομάδες [$PC(A), PC(B), PC(C)$] και [$PC(A), PC(C)$]. Αρχικά με την αυτόματη μέθοδο ταξινόμησης των K-μέσων τιμών, τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 50 τάξεις και στη συνέχεια, με τον αλγόριθμο του **Kohonen** (Self Organizing Maps), σε 10 τάξεις.

Στη πρώτη ομάδα περιέχονται πληροφορίες για το στιγμιαίο πλάτος, τη στιγμιαία φάση και τη συνάφεια, με αποτέλεσμα από την ταξινόμηση να διακρίνεται η θέση του στόχου. Στη δεύτερη ομάδα όμως, που περιέχονται πληροφορίες για το στιγμιαίο πλάτος και τη συνάφεια, είναι εμφανείς κυρίως η γεωμετρία του σχηματισμού.



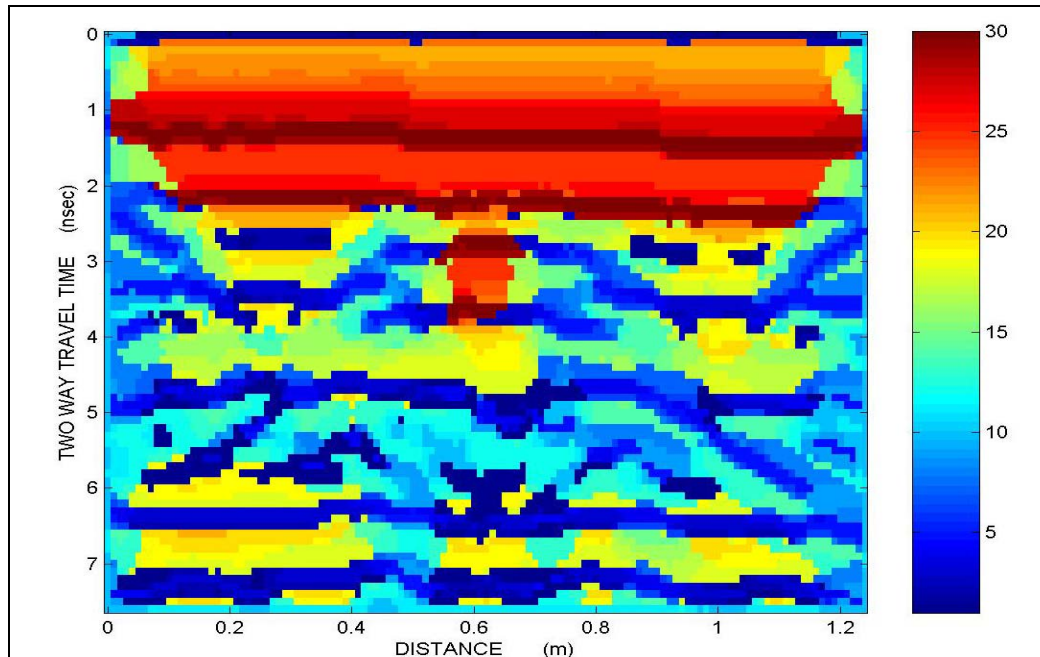
Σχήμα 3.16. Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.



Σχήμα 3.17. Ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας $[PC(A), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.

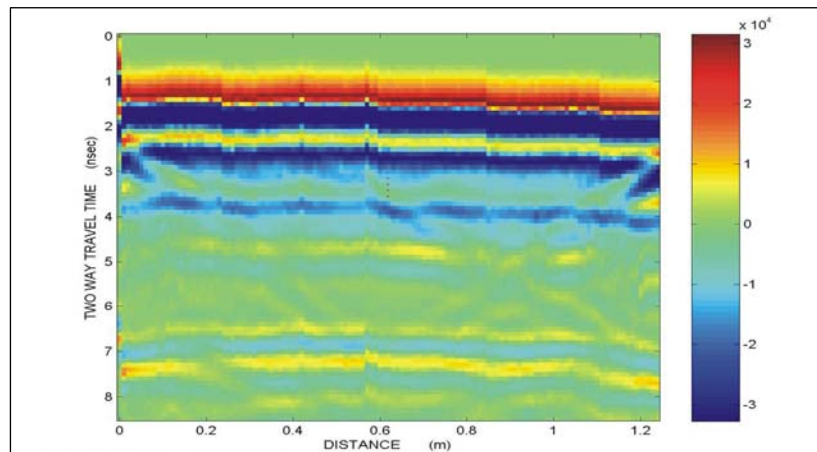
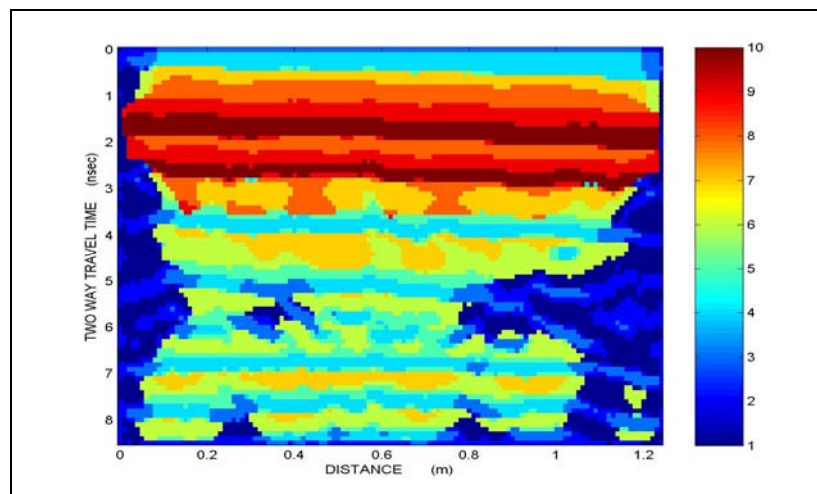
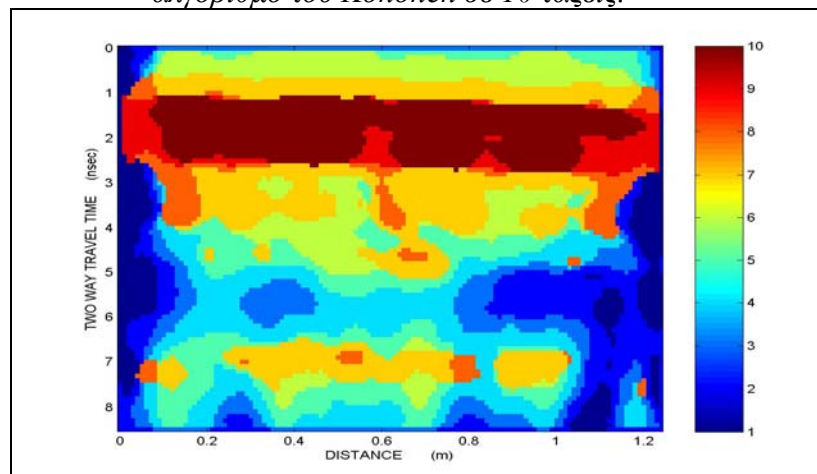
Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών και η αυτόματη ταξινόμηση με τη μέθοδο των Κ-μέσων τιμών χρησιμοποιήθηκαν για να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων και να επιτευχθεί συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας, έτσι ώστε να επιτευχθεί γρηγορότερα η ταξινόμηση με τον αλγόριθμο του Kohonen.

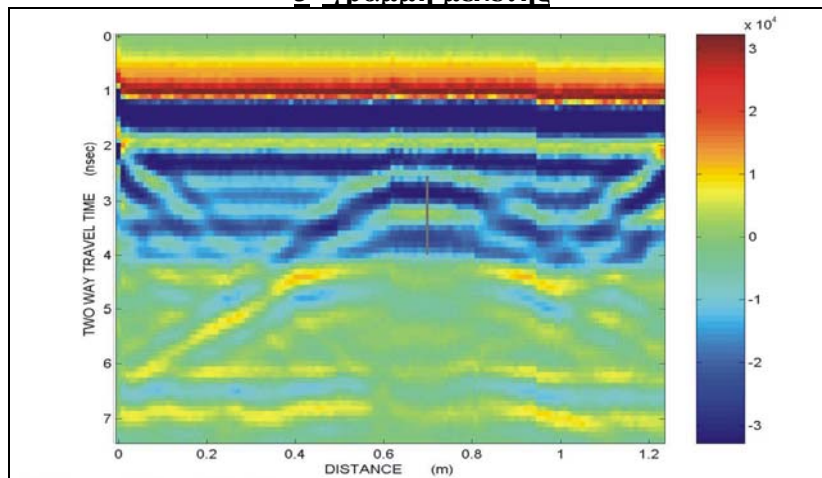
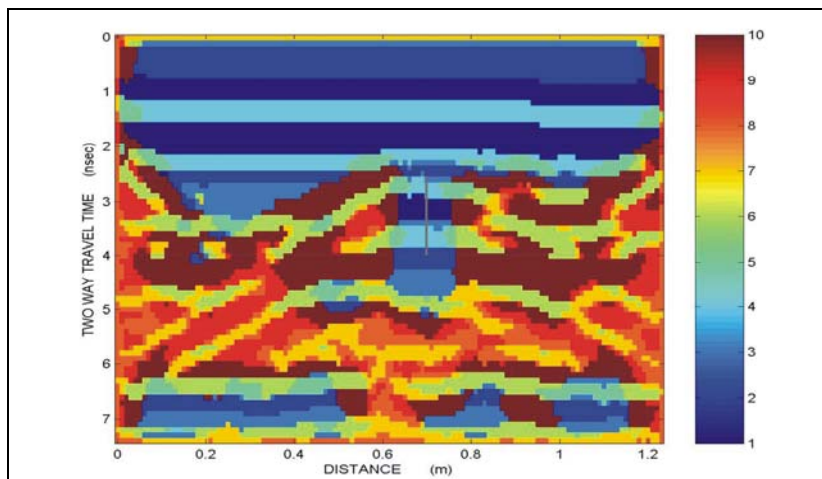
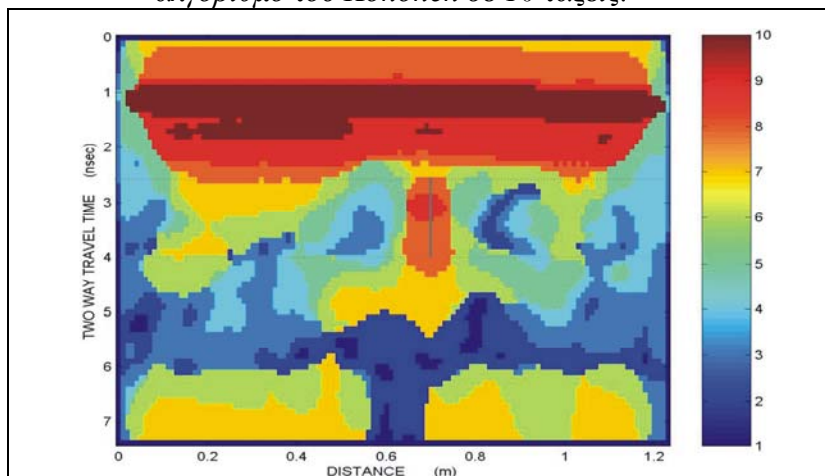
Στην εικόνα που ακολουθεί πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 30 τάξεις. Τα αποτελέσματα συγκριτικά με την ταξινόμηση των 10 τάξεων (σχ.3.16) δεν εμφανίζουν ουσιαστική διαφορά ενώ αντιθέτως ο χρόνος που απαιτήθηκε για να επιτευχθεί η ομαδοποίηση σε 30 τάξεις αυξήθηκε πολύ.

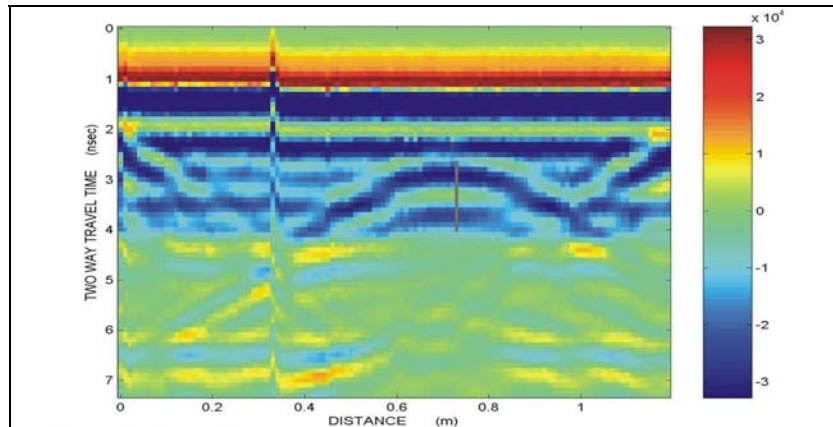


Σχήμα 3.18. Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 30 τάξεις.

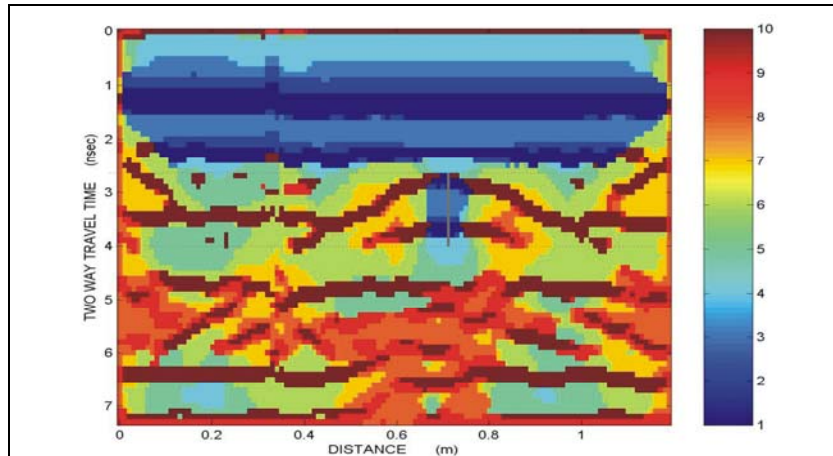
Με όμοιο τρόπο πραγματοποιήθηκε και η επεξεργασία των υπολοίπων γραμμών μελέτης. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των υπολοίπων γραμμών. Στις 1^η και 7^η τομές του γεωραντάρ δεν ανιχνεύτηκε ο μεταλλικός στόχος εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν βρίσκεται κάτω από αυτές τις γραμμές μελέτης.

1^η γραμμή μελέτης**Σχήμα 3.19.** Αρχικά δεδομένα της 1^{ης} γραμμής μελέτης**Σχήμα 3.20.** Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.**Σχήμα 3.21.** Ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας $[PC(A), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις

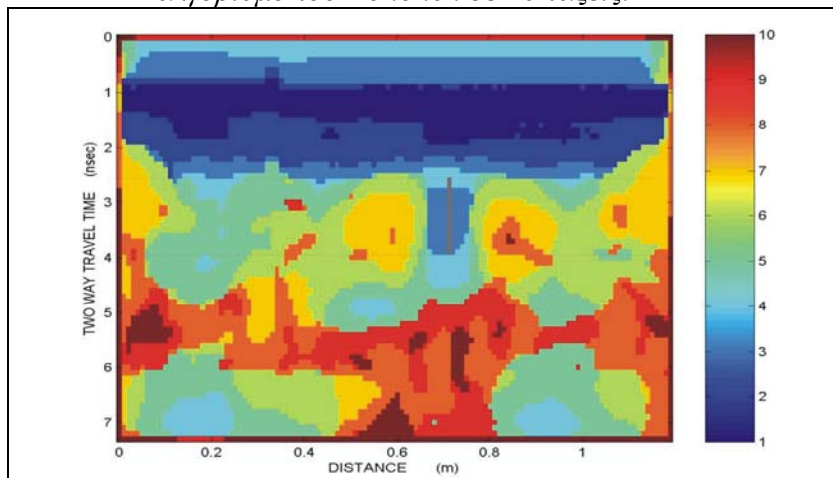
3^η γραμμή μελέτης**Σχήμα 3.22.** Αρχικά δεδομένα της 3^{ης} γραμμής μελέτης**Σχήμα 3.23.** Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.**Σχήμα 3.24.** Ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας $[PC(A), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.

4^η γραμμή μελέτης

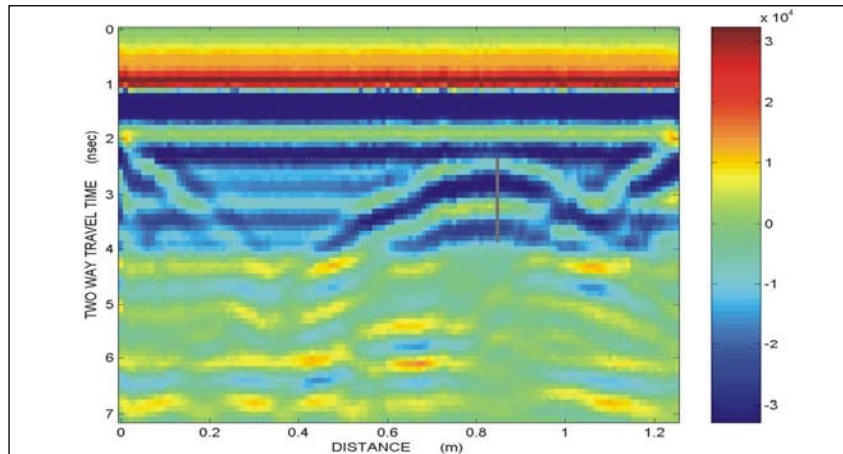
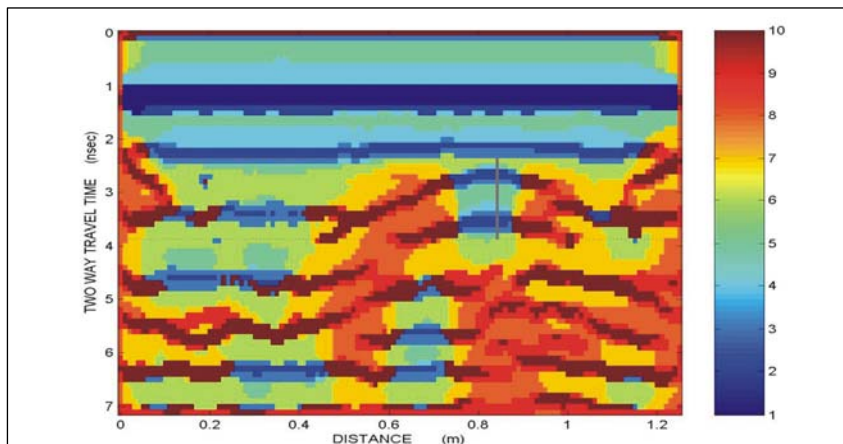
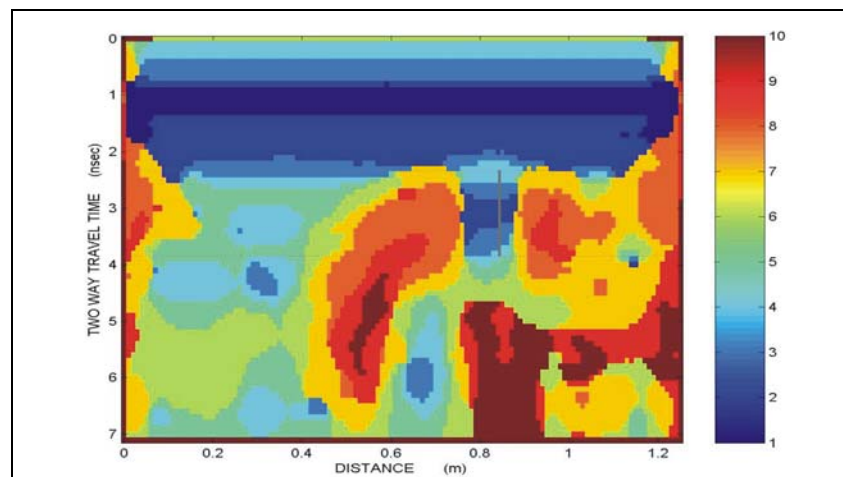
Σχήμα 3.25. Αρχικά δεδομένα της 4^{ης} γραμμής μελέτης



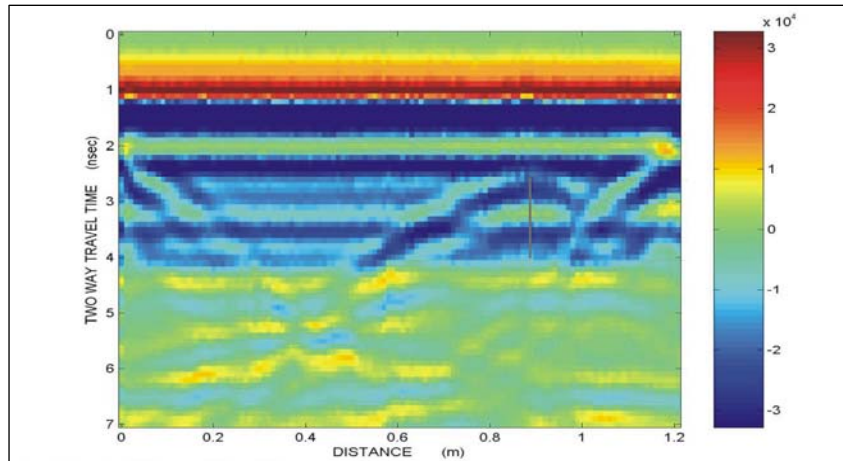
Σχήμα 3.26. Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.



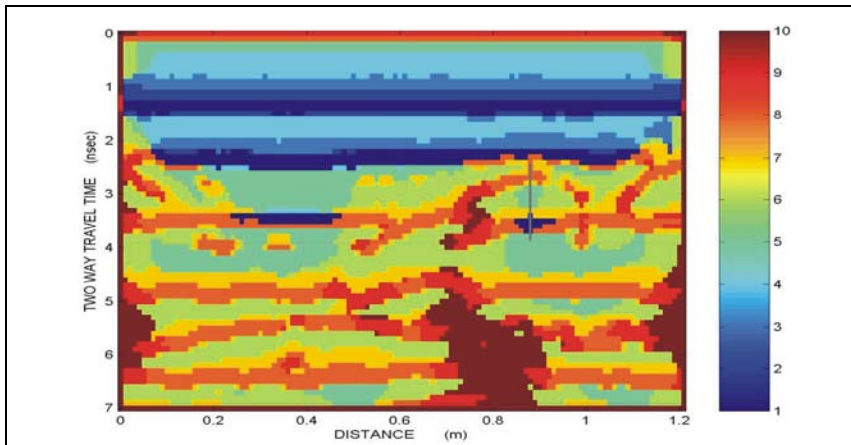
Σχήμα 3.27. Ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας $[PC(A), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.

5^η γραμμή μελέτης**Σχήμα 3.28.** Αρχικά δεδομένα της 5^{ης} γραμμής μελέτης**Σχήμα 3.29.** Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.**Σχήμα 3.30.** Ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας $[PC(A), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.

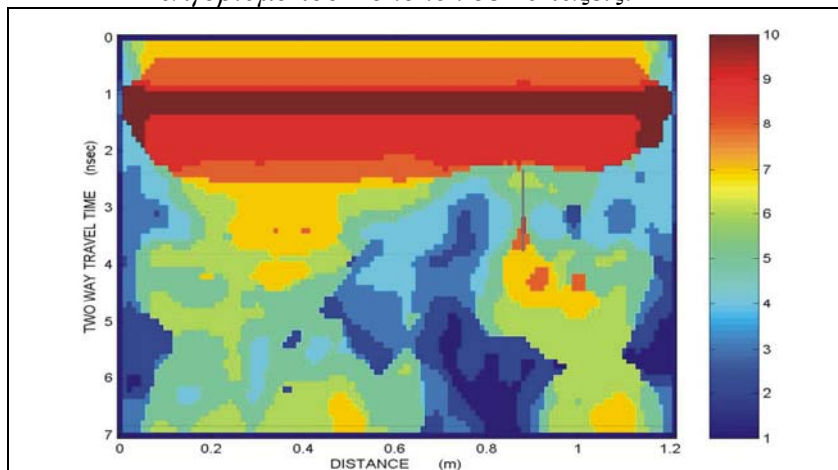
6^η γραμμή μελέτης



Σχήμα 3.31. Αρχικά δεδομένα της 6^{ης} γραμμής μελέτης

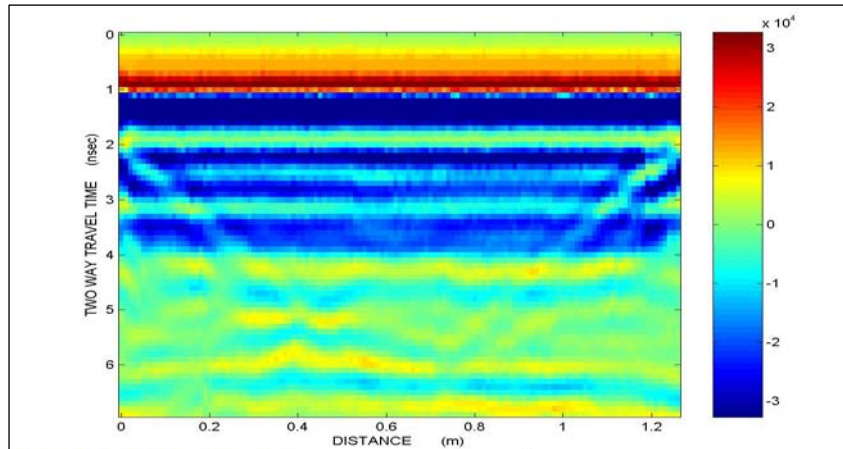


Σχήμα 3.32. Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.

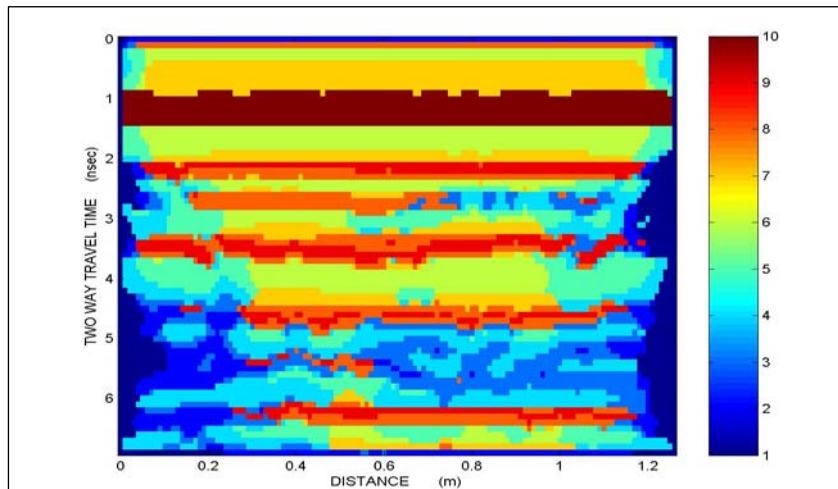


Σχήμα 3.33. Ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας $[PC(A), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.

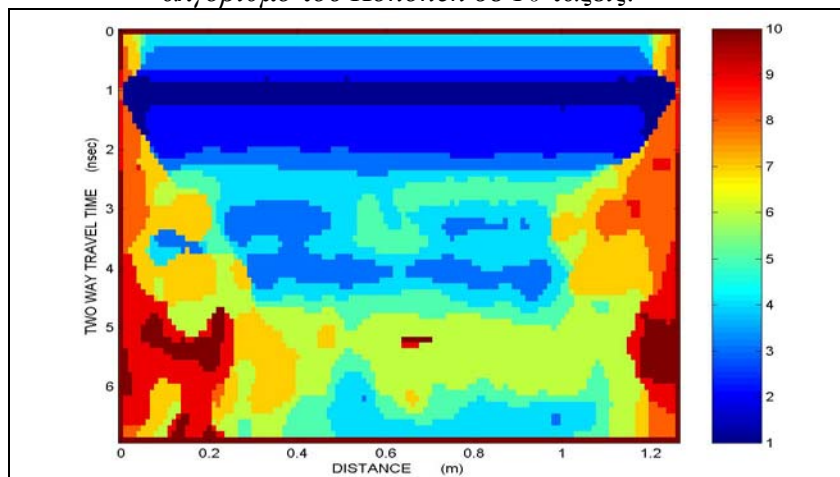
7^η γραμμή μελέτης



Σχήμα 3.34. Αρχικά δεδομένα της 7^{ης} γραμμής μελέτης



Σχήμα 3.35. Ταξινόμηση της πρώτης ομάδας $[PC(A), PC(B), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.



Σχήμα 3.36. Ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας $[PC(A), PC(C)]$ με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.

3.5 Συμπεράσματα

Από τις εργαστηριακές μετρήσεις με τη μέθοδο του γεωραντάρ ανιχνεύθηκε το μεταλλικό φύλλο και οριοθετήθηκε η θέση του με ακρίβεια, ενώ παράλληλα απεικονίστηκε και η γεωμετρία του σχηματισμού.

Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά συνέβαλαν στην εξασφάλιση της τοπικής λεπτομέρειας. Από τα φυσικά μιγαδικά χαρακτηριστικά παρατηρούνται διακυμάνσεις των φυσικών ιδιοτήτων (στιγμιαίο πλάτος, στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, στιγμιαία φάση, στιγμιαία συχνότητα), οι οποίες βοηθούν να εντοπισθεί η θέση του στόχου και των ανακλαστήρων γενικότερα.

Με την ταξινόμηση συγκεντρώθηκε το σύνολο των πληροφοριών σε μια κοινή καταγραφή. Από την ταξινόμηση της πρώτης ομάδας δεδομένων διακρίνεται η θέση του στόχου, ενώ από τη δεύτερη ομάδα δεδομένων οριοθετήθηκε το μεταλλικό φύλλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

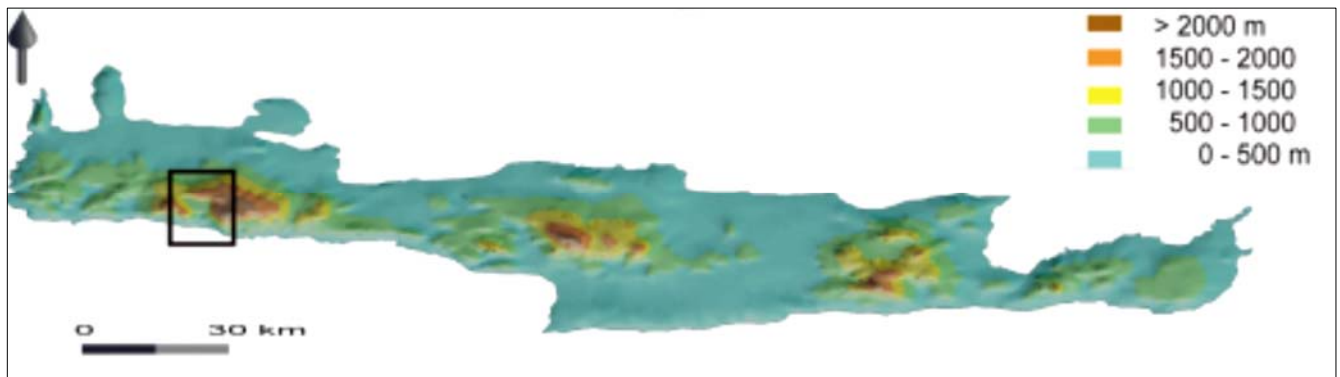
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΟΜΑΛΟΥ ΧΑΝΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι η ερμηνεία των μετρήσεων γεωραντάρ, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο οροπέδιο του Ομαλού. Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία, έτσι ώστε να τονιστούν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά και να επιτευχθεί καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη του υπεδάφους και ο εντοπισμός καρστικών δομών, κυρίως δολίνων και υπόγειων εγκοίλων.

4.2 Η γεωλογία στην περιοχή του Ομαλού

Ο Ομαλός βρίσκεται στο νομό Χανίων. Ο δρόμος για τον Ομαλό διέρχεται μέσα από πετρώματα του καλύμματος των φυλλιτών-χαλαζιτών και μετά το χωριό Λάκκοι από τα πετρώματα του Τρυπαλίου. Μεγάλες εμφανίσεις των φυλλιτικών πετρωμάτων υπάρχουν κατά μήκος όλης της διαδρομής. Γενικά πάντως, η γεωλογική δομή των Λευκών Ορέων στην περιοχή του Ομαλού περιλαμβάνει: πετρώματα φυλλιτών-χαλαζιτών, καλ. Τρυπαλίου, πλακώδεις ασβεστόλιθους του ομώνυμου καλύμματος, στρώματα γκιγκίλου και δολομίτες.



Σχήμα 4.1 Χάρτης της Κρήτης όπου παρουσιάζεται η περιοχή Ομαλού Χανίων.

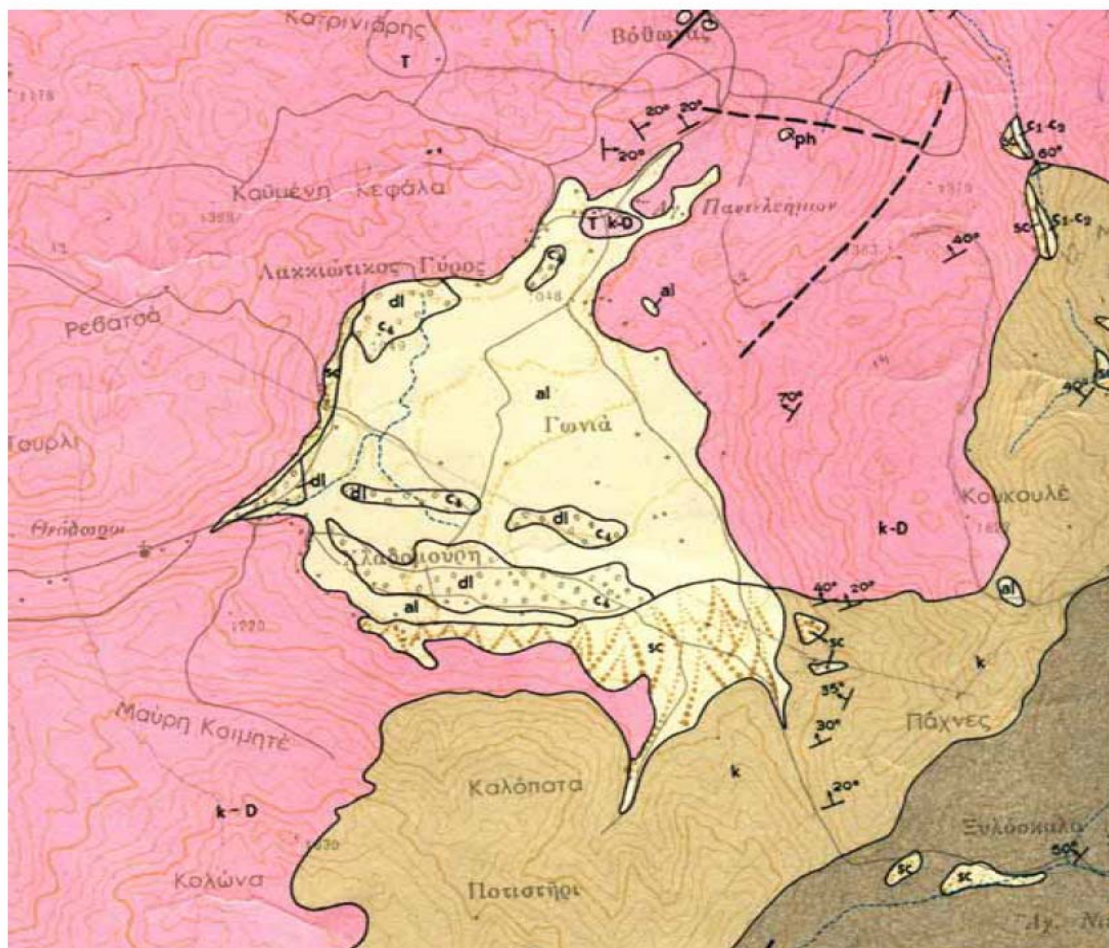
Η διαδοχή των πετρολογικών τύπων στην περιοχή αυτή από τα ανώτερα προς τα βαθύτερα τμήματα είναι η εξής:

- Επιφανειακά παρατηρούνται σύγχρονες αποθέσεις (al, dl), παράκτιοι άμμοι (al), προσχώσεις (al), κροκαλοπαγή (pl), ασβεστιτικοί ψαμμίτες (pl), κίτρινες ψαμμιτικές μάργες (pl), μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (pl), σαπροπηλίοι (M3, M3·M2, M2), πλευρικά κορρήματα (sc).
- Ακολουθεί η σειρά των φυλλιτών – χαλαζιτών (ph) η οποία χαρακτηρίζεται από λεπτοστρωματώδεις χαλαζίτες με πιο λεπτές στρώσεις φυλλιτών και αργιλικών σχιστολίθων.
- Την σειρά των φυλλιτών – χαλαζιτών διαδέχεται η Ενότητα Τρυπαλίου (Ks-k). Πρόκειται για μία σειρά από ραουβάκες, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, των οποίων κύρια χαρακτηριστικά αποτελούν το μελανό ή τεφρομέλανο χρώμα και η βιτουμενιώδη οσμή.
- Σε τεκτονική επαφή με την Ενότητα του Τρυπαλίου είναι ο Μεταφλύσξης των πλακωδών ασβεστόλιθων (T, k-D). Με τον όρο αυτό εννοούνται οι φυλλίτες και οι αργιλικοί σχιστόλιθοι στους οποίους μεταβαίνουν σταδιακά οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι και οι οποίοι αποτελούν τον μεταμορφωμένο φλύσχη. Στο κατώτερο τμήμα υπάρχουν τα μεταβατικά στρώματα που αποτελούνται κυρίως από τεφροπράσινους ή και ερυθρωπούς ασβεστοφυλλίτες.
- Ακολουθεί η σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων (PC-k). Πρόκειται για την γνωστή σειρά κρυσταλλικών ασβεστόλιθων με ενδιάμεσες στρώσεις ή βολβούς από κερατόλιθους. Η λιθολογική ομοιογένεια, η αδιατάραχτη ιζηματογένεση, το

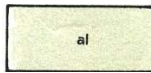
πάχος των στρώσεων και άλλα χαρακτηριστικά που παρατηρούνται σε όλες τις εμφανίσεις των πλακωδών ασβεστόλιθων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για πελαγικά ιζήματα.

- Τέλος τα υποκείμενα στρώματα των πλακωδών ασβεστόλιθων (ph-D-k) τα οποία αποτελούνται από φυλλίτες, δολομίτες, μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθους, πυριτόλιθους και άργιλους. Δεν διαπιστώνεται μετάβαση των στρωμάτων αυτών και των πλακωδών ασβεστόλιθων αλλά γωνιώδη τεκτονική επαφή. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της σειράς αυτής αποτελούν οι συχνές εναλλαγές κλαστικών ιζημάτων (άργιλοι, ασβεστοφυλλίτες, ψαμμίτες, μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι).

Οι τρεις τελευταίες ενότητες αποτελούν και την Ζώνη Κρήτης – Μάνης η αλλιώς Ενότητα Κρήτης – Μάνης (Φυτρολάκης, 1972).



Σχήμα 4.2 Γεωλογικός χάρτης Ομαλού Χανίων.

Τεταρτογενές

Σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις



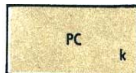
Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων.



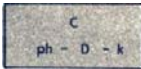
Μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή. Εμφανίζονται στις παρυφές της πόλγης του Ομαλού, πάνω στους καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους.

Ενότητα Τρυπαλίου

Ασβεστόλιθοι, Δολομίτες.

Ομάδα Πλακωδών**Ασβεστολίθων**

Πλακώδεις, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι.



Ασβεστόλιθοι, δολομίτες με παρεμβολές χαλαζιακών ψαμμιτών και αργιλικών σχιστολίθων.

Στόχος όπως προαναφέρθηκε της γεωφυσικής μελέτης και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι ο εντοπισμός υπόγειων καρστικών μορφών όπως τα σπήλαια και έγκοιλα που μπορούν να οδηγήσουν στον σχηματισμό δολίνων και πόλγων.

Η **δολίνη** είναι κλειστή λεκάνη, σχήματος κυκλικού ή ελλειπτικού και της οποίας το εύρος είναι μεγαλύτερο από το βάθος. Το εύρος κυμαίνεται από είκοσι έως εκατοντάδες μέτρα και το βάθος τους από δύο μέχρι εκατό μέτρα. Ο πυθμένας των δολίνων γενικά είναι επίπεδος και καλύπτεται τόσο αυτός όσο και πολλές φορές τα εσωτερικά πρανή από χημικά ιζήματα προερχόμενα από την χημική διάλυση των ασβεστόλιθων και πολλές φορές αναπτύσσεται και μικρή βλάστηση. Ανάλογα με τον σχηματισμό τους διακρίνονται σε εγκατακρημνισιγενείς, όταν προέρχονται από κατάρρευση της οροφής υπόγειου σπηλαίου και σε χοανοειδείς όταν προέρχονται από χημική διάλυση των πετρωμάτων. Αρχική αιτία σχηματισμού τους αποτελεί η ύπαρξη των διακλάσεων, η οποία σε συνδυασμό με την πυκνότητα αυτών συντελεί και στην

εξέλιξη μίας δολίνης. Οι δολίνες εμφανίζονται άλλοτε μεμονωμένες και άλλοτε κατά αποικίες. Πλήθος δολινών εμφανίζεται και στην περιοχή του Ομαλού.

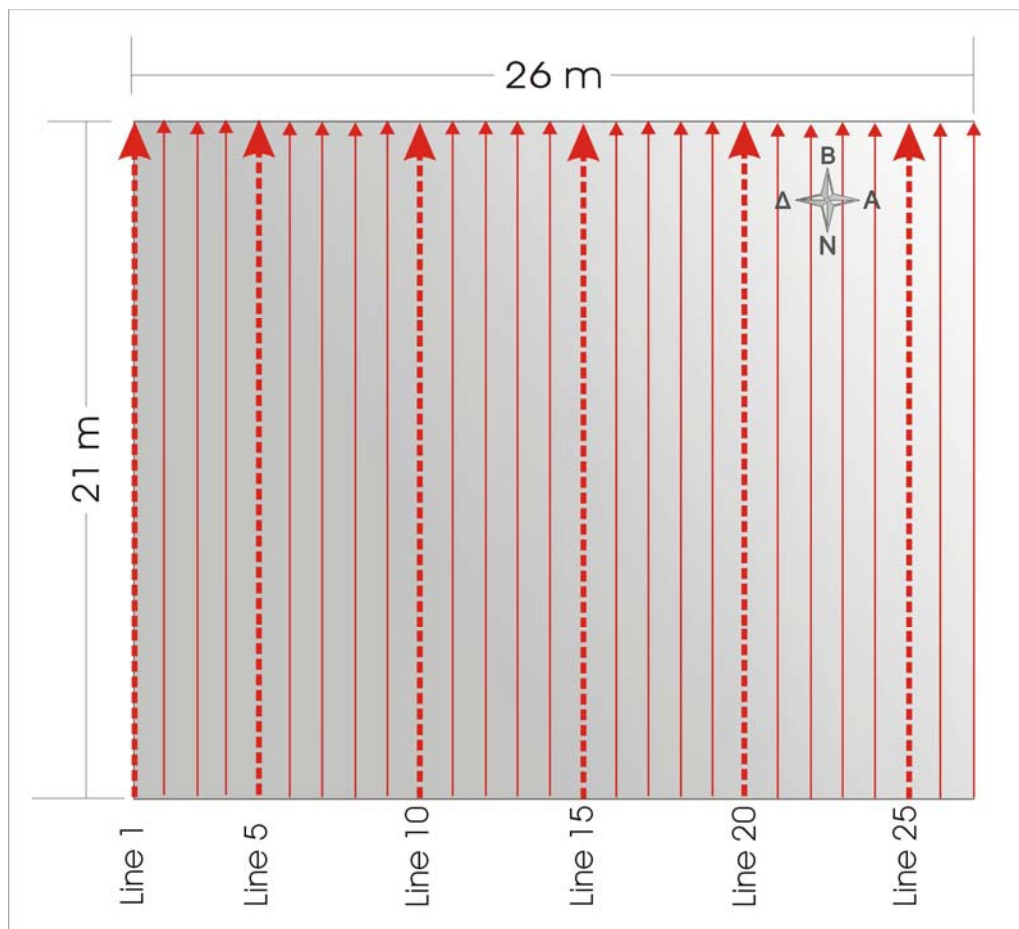
Ο όρος πόλγη αποδίδεται σε μεγάλα καρστικά επίπεδα. Οι πόλγες αποτελούν ευδιάκριτες κλειστές κοιλότητες με σχήμα κυρίως ελλειπτικό και η μεγάλη επιφάνειά τους έχει διαστάσεις που κυμαίνονται από μερικά έως εκατοντάδες τετρ. χιλιόμετρα. Η πόλγη είναι μικτός σχηματισμός τεκτονικής δράσεως και καρστικής διαβρώσεως. Ο αρχικός σχηματισμός οφείλεται σε τεκτονική ρήξη με αποτέλεσμα την επιφανειακή ταπείνωση. Η ταπείνωση αυτή σε ορισμένες περιπτώσεις προέρχεται από κατάρρευση υπόγειων θόλων. Η τελική όμως διαμόρφωση οφείλεται στην καρστική διάβρωση. Επίσης ο σχηματισμός μίας πόλγης μπορεί να οφείλεται και στην προοδευτική αύξηση και συνένωση δολινών. Χαρακτηριστική πόλγη ανάλογης προέλευσης είναι αυτή που παρατηρείται στο οροπέδιο του Ομαλού.

Η κατακόρυφη κάθοδος στο εσωτερικό των ασβεστολιθικών μαζών των φυσικών υδάτων γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω των επιφανειών διακλάσεως και των επιφανειών διαστρώσεως των ασβεστόλιθων. Με τον τρόπο αυτό το κατεισδύον νερό συνέχεια διευρύνει τις αποστάσεις των παραπάνω επιφανειών σχηματίζοντας τα έγκοιλα.

Τα σπήλαια είναι υπόγεια έγκοιλα μεγάλων σχετικά διαστάσεων, επικοινωνούν με στόμια και αναπτύσσονται κυρίως σε ασβεστολιθικές μάζες. Σχηματίζονται στο εσωτερικό της ασβεστολιθικής μάζας κατά τον ίδιο τρόπο όπως και τα υπόγεια έγκοιλα. Πολύ συνηθισμένη μορφή είναι αυτή του θόλου, η οποία πολλές φορές φτάνει να έχει πολύ μεγάλες διαστάσεις. Η θολωτή μορφή προκύπτει κατά κύριο λόγο από την διασταύρωση ομάδας κυρίων επιφανειών διακλάσεως με τις επιφάνειες διαστρώσεως (Σωτηριάδης, 1995).

4.3 Σχεδιασμός διασκόπησης

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα GPR Pulse Ekko 1000 και τις κεραίες συχνότητας 225MHz. Χρησιμοποιήθηκαν κεραίες μικρής σχετικά συχνότητας (συγκριτικά με την εργαστηριακή διασκόπηση βλ. 3.3) έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική διεισδυτική ικανότητα ($\approx 7\text{m}$) σε βάρος της διακριτικής. Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ανάκλασης, σε ορθογώνιο κάναβο ($26 \times 21\text{m}$) όπου διασκοπήθηκαν 27 γραμμές μελέτης, με απόσταση μεταξύ τους 1m και κατεύθυνση από το νότο προς το βορρά (σχήμα 4.2). Κάθε γραμμή GPR περιέχει 85 ίχνη, με απόσταση μεταξύ τους 0.25 m. Οι κεραίες ήταν προσανατολισμένες παράλληλα η μία ως προς την άλλη, κάθετα στην διεύθυνση της γραμμής μελέτης και είχαν σταθερή απόσταση μεταξύ τους ίση με 0,5m.



Σχήμα 4.3 Γραμμές μελέτης διασκόπησης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι παράμετροι που ορίστηκαν πριν από την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Πίνακας 4.1

Παράμετροι διασκόπησης

Μέθοδος	Συχνότητα Κεραίας	Βήμα Διασκόπησης	Απόσταση Γραμμών Μελέτης	Διάστημα Δειγματοληψίας	Συνολικός Χρόνος Καταγραφής
Ανάκλασης	225 MHz	0.25 m	1 m	0.5 nsec	135 nsec

4.4 Επεξεργασία δεδομένων

Στα ακατέργαστα δεδομένα, αρχικά εφαρμόστηκε φίλτρο διόρθωσης **Dewow** έτσι ώστε να απαλειφθεί ο τυχαίος θόρυβος από τις καταγραφές. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός τελεστή (οριζόντια κινούμενου παραθύρου), ο οποίος υπολογίζει το μέσο όρο των σημείων γύρω από το κεντρικό και στη συνέχεια η μέση τιμή αφαιρείται από τα αρχικά δεδομένα.

Στο επόμενο στάδιο υπολογίζονται τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά (**Instantaneous Attributes**), που μας δίνουν πληροφορίες για τις διακυμάνσεις των φυσικών ιδιοτήτων (φυσικά μιγαδικά χαρακτηριστικά) αλλά και για τις διακυμάνσεις στην μορφολογία ενός γεωλογικού σχηματισμού (γεωμετρικά μιγαδικά χαρακτηριστικά).

<u>Φυσικά Μιγαδικά Χαρακτηριστικά</u>	<u>Γεωμετρικά Μιγαδικά Χαρακτηριστικά</u>
Στιγμιαίο πλάτος (Instantaneous Envelope)	Συνάφεια (Semblance)
Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB (dB based Reflection Strength)	Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης (Semblance of Instantaneous Phase)
Στιγμιαία φάση (Instantaneous Phase)	
Στιγμιαία συχνότητα (Instantaneous Frequency)	

Στη συνέχεια, αφού υπολογίστηκαν τα μιγαδικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιείται το φίλτρο μέσης τιμής (**average filter**). Με αυτό τον τρόπο εξομαλύνονται τα δεδομένα με τη βοήθεια τρισδιάστατου κινούμενου παραθύρου(3×3×3).

Από τον κάθε όγκο των μιγαδικών χαρακτηριστικών εξήχθησαν 15 οριζόντιες τομές (**slices**) σε παράθυρο 9 nsec (ίσο με το εύρος ενός παλμού).

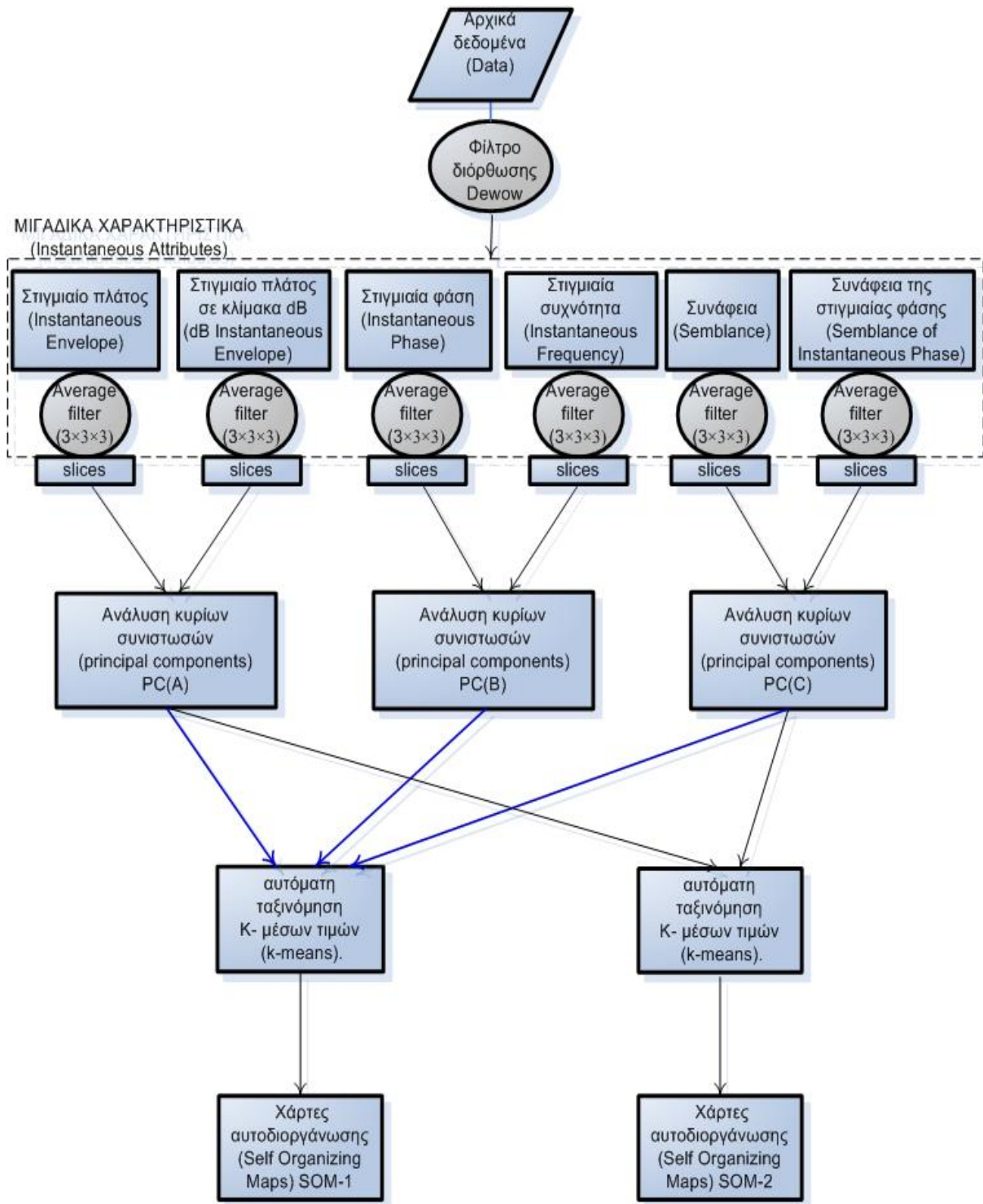
Στο επόμενο βήμα εφαρμόστηκε **μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών** έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων και να επιτευχθεί συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας. Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά χωρίστηκαν σε τρία ζευγάρια (Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB),(Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα),(Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης) και πραγματοποιήθηκε μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών σε κάθε ζευγάρι ξεχωριστά. Το μεγαλύτερο ποσοστό (περίπου 80%) της συνολικής πληροφορίας, περιλήφθηκε στις τρεις πρώτες κύριες συνιστώσες των μιγαδικών ζευγαριών.

Μετά το στάδιο της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών και αφού υπολογίστηκαν οι τρεις πρώτες κύριες συνιστώσες, ακολουθεί η αυτόματη ταξινόμησή τους, με τη μέθοδο των **K-μέσων τιμών**. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε σε κάθε οριζόντια τομή (slices) έτσι ώστε να προσδιορισθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα από ολόκληρο το τρισδιάστατο σύνολο δεδομένων. Τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 200 τάξεις και υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα 200 κέντρα. Από το σύνολο των οριζόντιων τομών (15) τελικά προέκυψαν 3000 δείγματα σε ολόκληρο τον τρισδιάστατο όγκο δεδομένων.

Στη συνέχεια ακολουθεί το τελικό στάδιο, όπου τα 3000 δείγματα που προέκυψαν ταξινομούνται με την βοήθεια νευρωνικού δικτύου με τον αλγόριθμο του **Kohonen** σε 10 και 20 ομάδες.

Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών και η αυτόματη ταξινόμηση με τη μέθοδο των K-μέσων τιμών χρησιμοποιήθηκαν για να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων και να επιτευχθεί συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας, έτσι ώστε να επιτευχθεί γρηγορότερα η ταξινόμηση με τον αλγόριθμο του Kohonen.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροής.

4.5 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

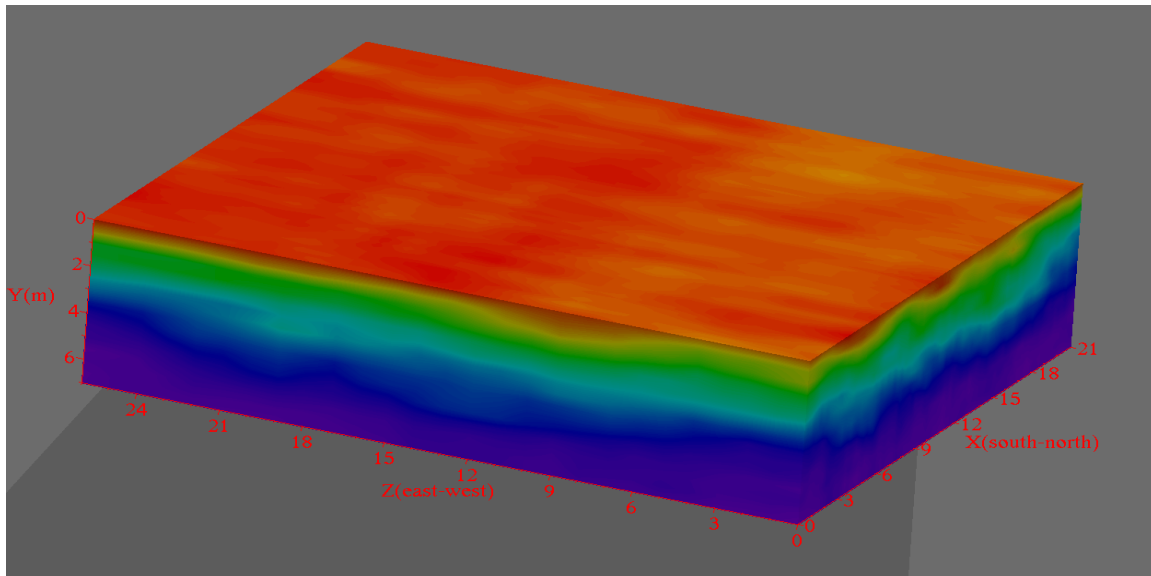
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, με σειρά ανάλογη με τη ροή της επεξεργασίας. Αρχικά παρουσιάζονται τα μιγαδικά χαρακτηριστικά και στη συνέχεια οι κύριες συνιστώσες (πρώτη κύρια συνιστώσα). Στο τελικό στάδιο παρουσιάζονται τα ταξινομημένα.

Η κλίμακα των οριζόντιων αξόνων X και Z είναι σε μέτρα, με προσανατολισμό από το Βορρά προς το Νότο και από τη Δύση προς την Ανατολή αντίστοιχα, ενώ το βάθος αντιστοιχεί στον κατακόρυφο άξονα. Ο Z-άξονας έχει μετατραπεί από χρόνο (nsec), που ήταν οι αρχικές καταγραφές, σε απόσταση (m) θεωρώντας ότι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο σχηματισμό ισούται με 10 cm/nsec.

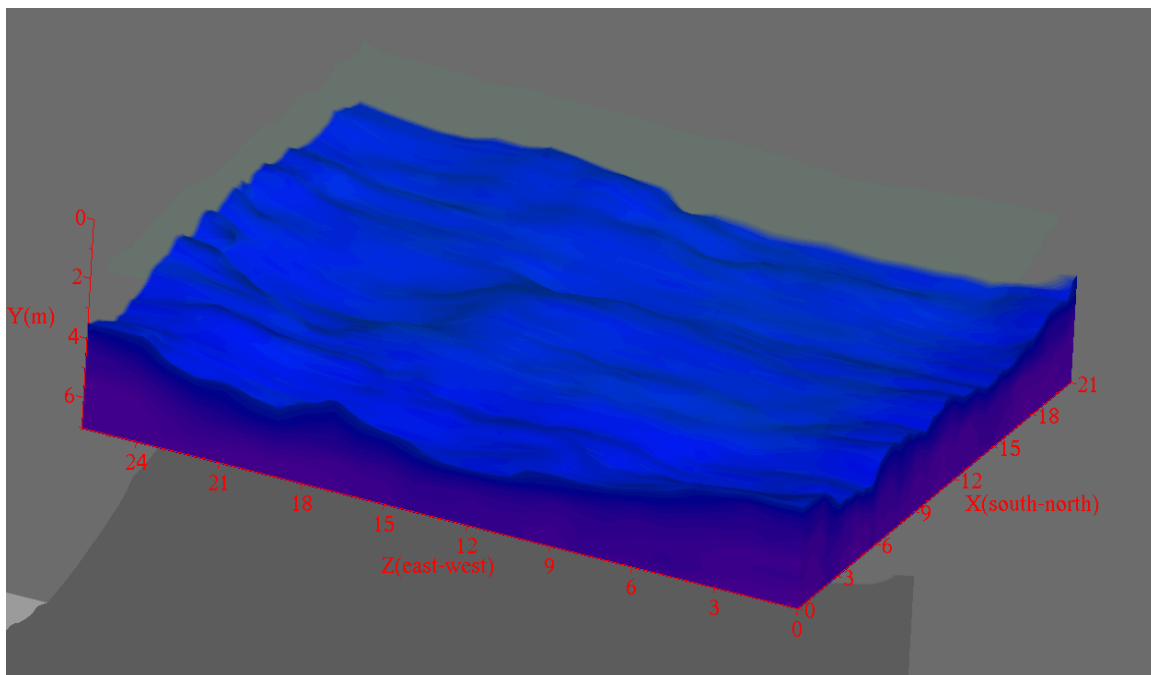
Επομένως το βάθος σε μέτρα είναι: $2s = v \times t \Leftrightarrow s = 0,1 \times \left(\frac{t}{2}\right)$. Οι καταγραφές διαρκούν σε χρόνο 135 nsec δηλαδή το μέγιστο βάθος της διασκόπησης είναι 7m.

Για να τονιστούν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιούνται διαφανείς εικόνες και για να εντοπιστούν οι ακριβείς θέσεις γεωλογικών δομών μέσα στο τρισδιάστατο σύνολο των δεδομένων χρησιμοποιούνται οριζόντιες και κάθετες τομές. Σε ορισμένες από τις παρακάτω εικόνες έχουν αποκοπεί τα επιφανειακά στρώματα, έτσι ώστε να γίνει ευκολότερη η ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στα τρία σχήματα που ακολουθούν (4.5 έως και 4.7) παρουσιάζεται το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB. Στο σχήμα 4.6 απεικονίζεται ο τρισδιάστατος όγκος του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB χωρίς τα επιφανειακά στρώματα. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν μεταβολές στο πλάτος του σήματος και πιθανών στις περιοχές όπου το πλάτος έχει μεγάλη τιμή λόγω ισχυρών ανακλάσεων, να εμφανίζονται γεωφυσικές ανωμαλίες.

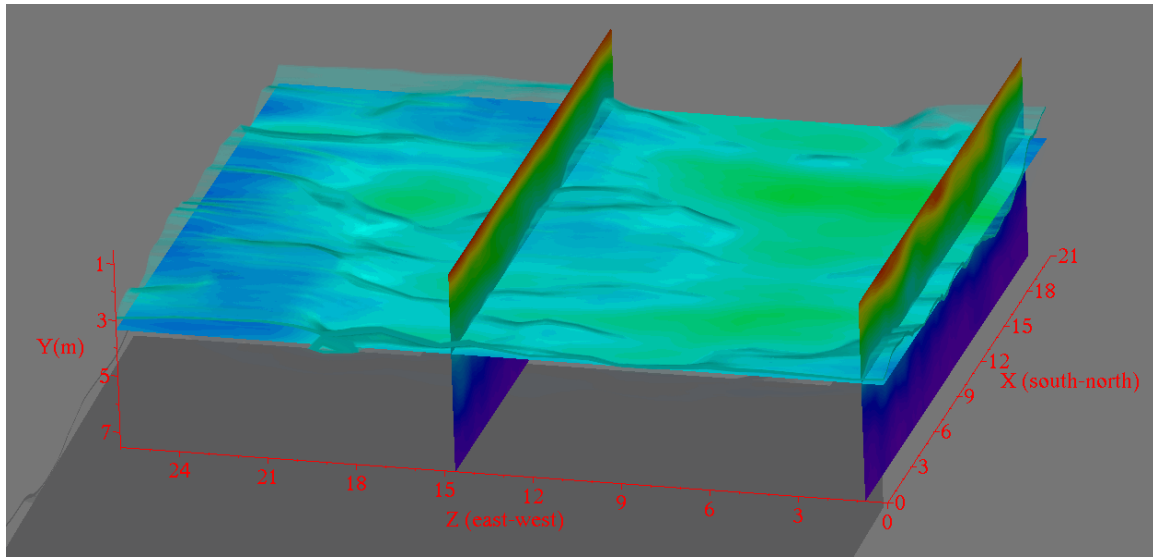


Σχήμα 4.5 Τρισδιάστατος όγκος του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB.



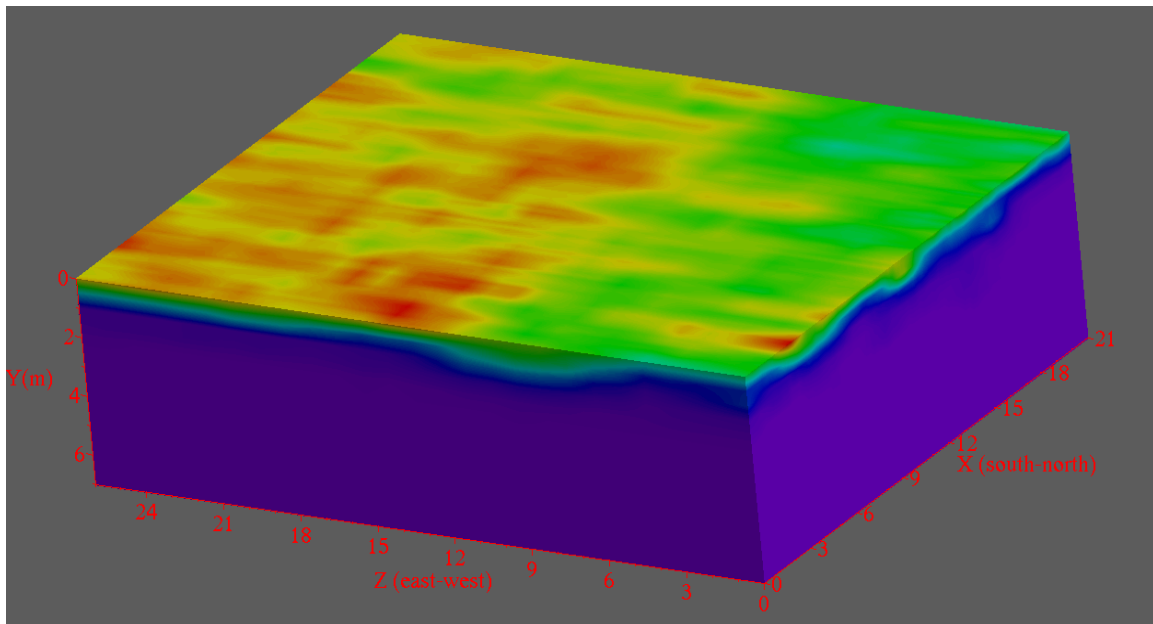
Σχήμα 4.6 Εικόνα του τρισδιάστατου όγκου του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB χωρίς τα επιφανειακά στρώματα.

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η διαφανής εικόνα του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB με μία οριζόντια τομή (Y-άξονας) στα 3m βάθος και δύο κάθετες τομές (Z-άξονας) στο 1m και 15m.

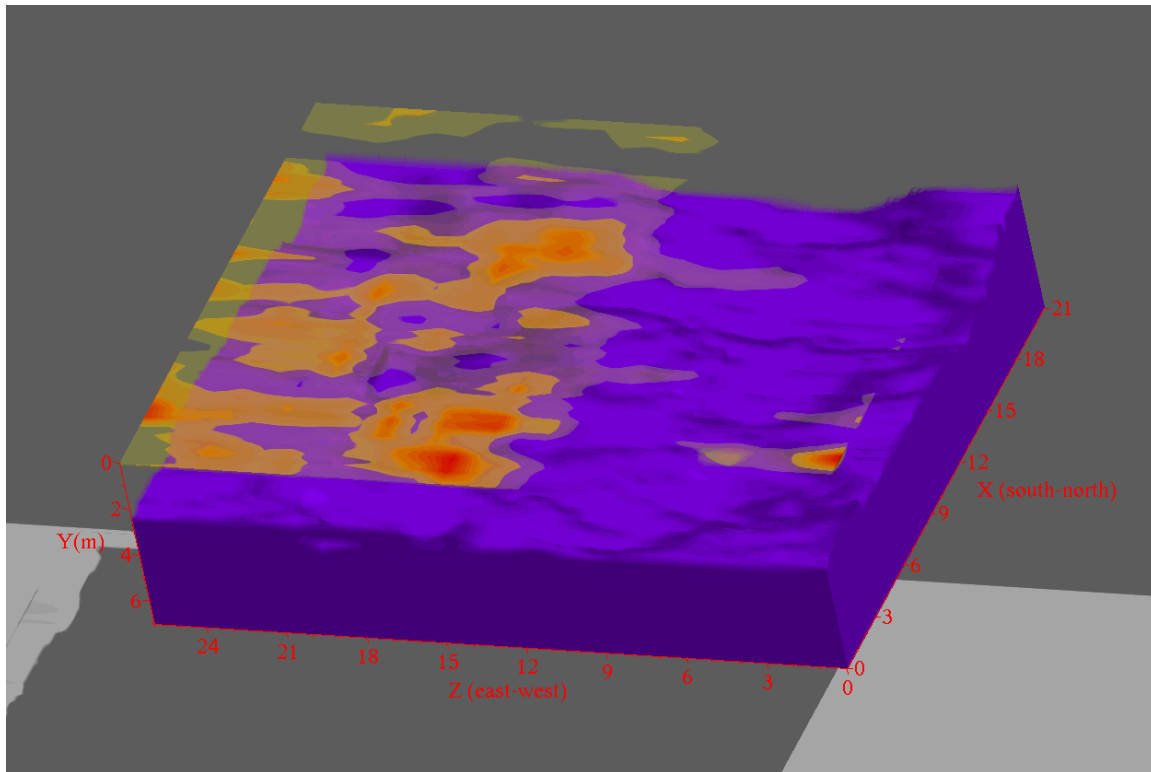


Σχήμα 4.7 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB με μία οριζόντια τομή στα 3m και δύο κάθετες στα 15m και 1m.

Στη συνέχεια στα σχήματα 4.8 και 4.9 παρουσιάζεται το στιγμιαίο πλάτος (instantaneous envelope). Το σχήμα 4.9 είναι διαφανής εικόνα, όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα πλάτη που έχουν υψηλές τιμές, δηλαδή οι ισχυρές ανακλάσεις.

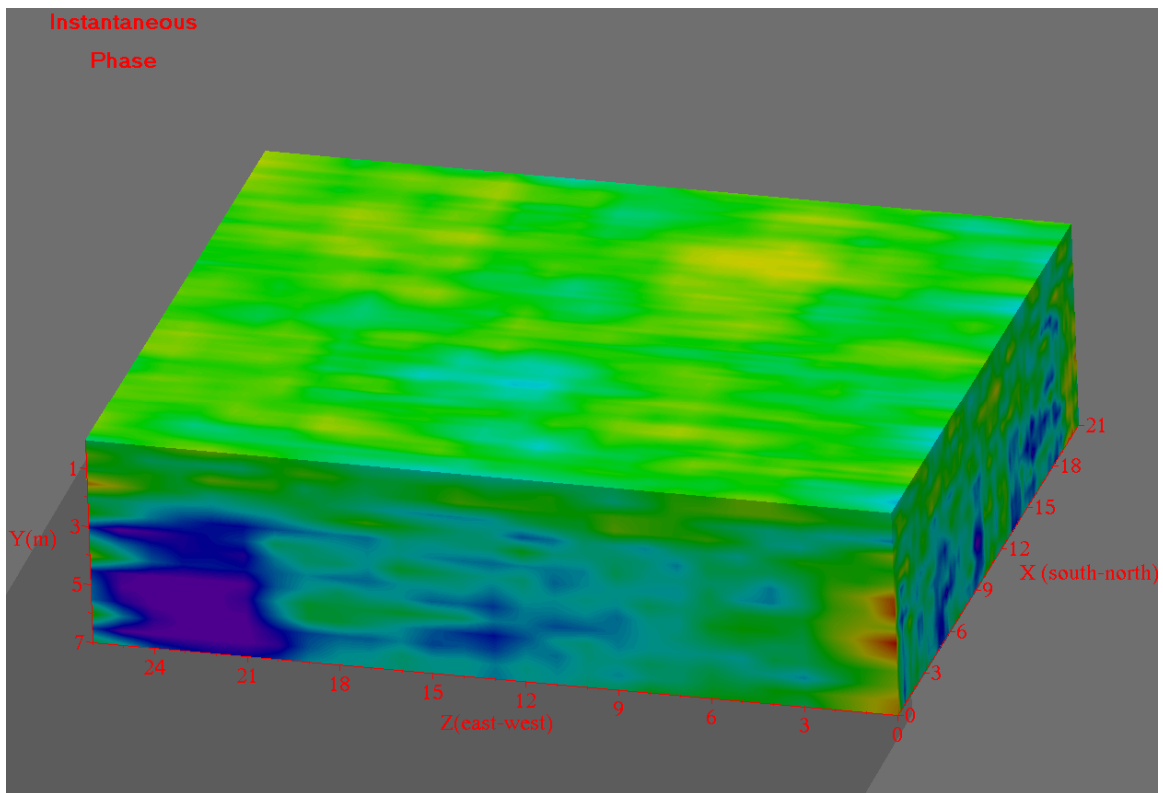


Σχήμα 4.8 Τρισδιάστατος όγκος του στιγμιαίου πλάτους (Instantaneous Envelope).

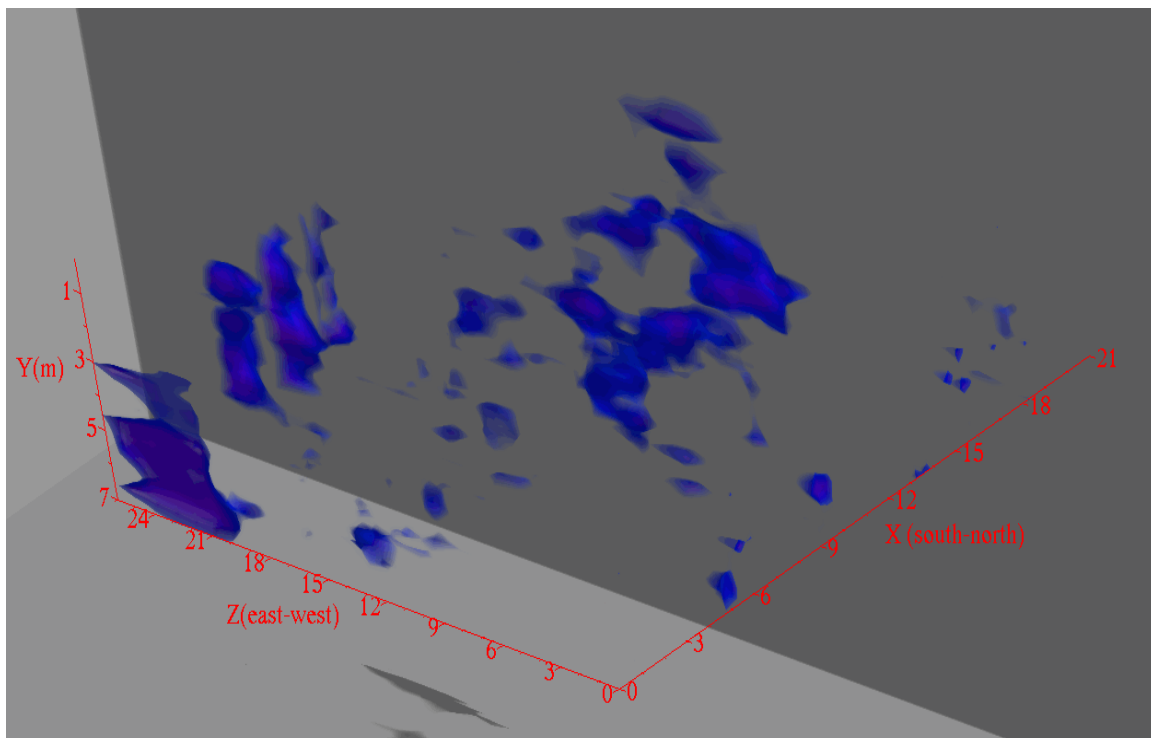


Σχήμα 4.9 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου του στιγμιαίου πλάτους (*Instantaneous Envelope*).

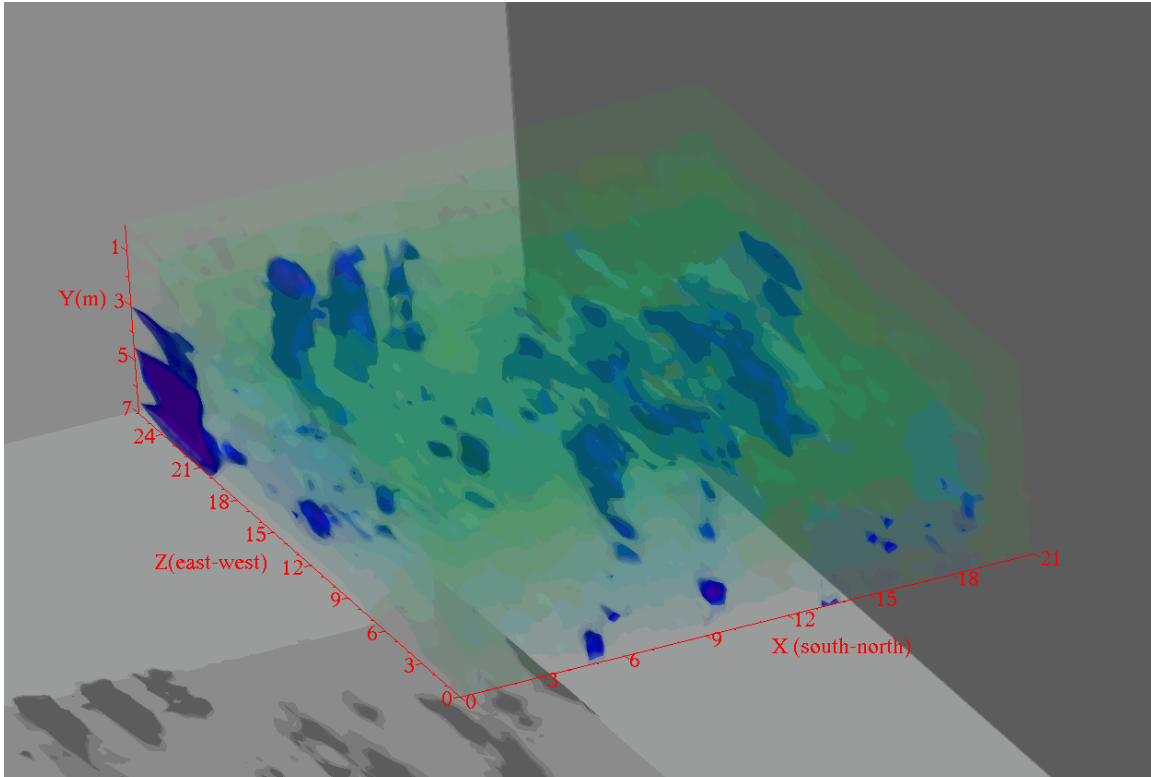
Στα σχήματα από 4.10 έως 4.13 παρουσιάζεται η στιγμιαία φάση (*instantaneous phase*). Οι καταγραφές είναι ανεξάρτητες από το πλάτος και έχουν τη δυνατότητα να τονίζουν τους αδύναμους ανακλαστήρες. Στα σχήματα 4.11 και 4.12 με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι γεωφυσικές ανωμαλίες, οι οποίες πιθανών να οφείλονται στην ύπαρξη πετρωμάτων χαμηλότερης συνεκτικότητας σε σχέση με το περιβάλλον πέτρωμα ή στην εμφάνιση υπόγειων έγκοιлов. Στο σχήμα 4.13 εμφανίζονται δύο τομές, μία οριζόντια στα 6m βάθος και μία κατακόρυφη στα 13m, έτσι ώστε να φανεί η οριζόντια και κάθετη εξάπλωση των ανωμαλιών.



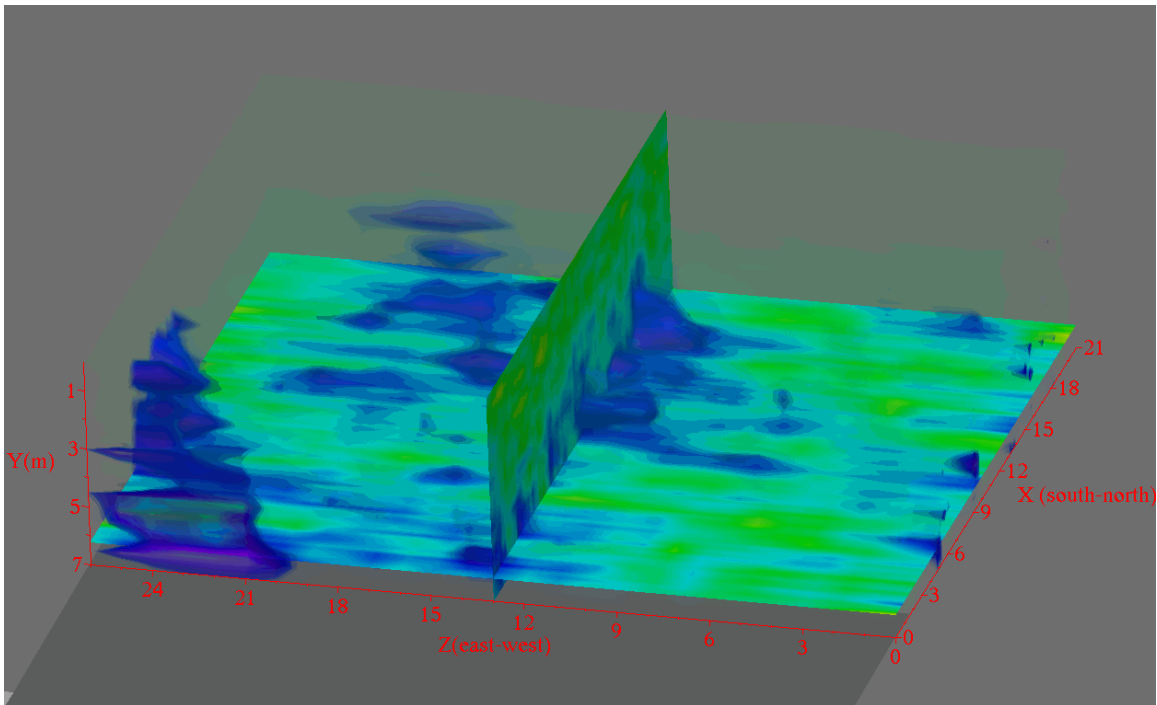
Σχήμα 4.10 Τρισδιάστατος όγκος της στιγμιαίας φάσης (instantaneous phase).



Σχήμα 4.11 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της στιγμιαίας φάσης (instantaneous phase).

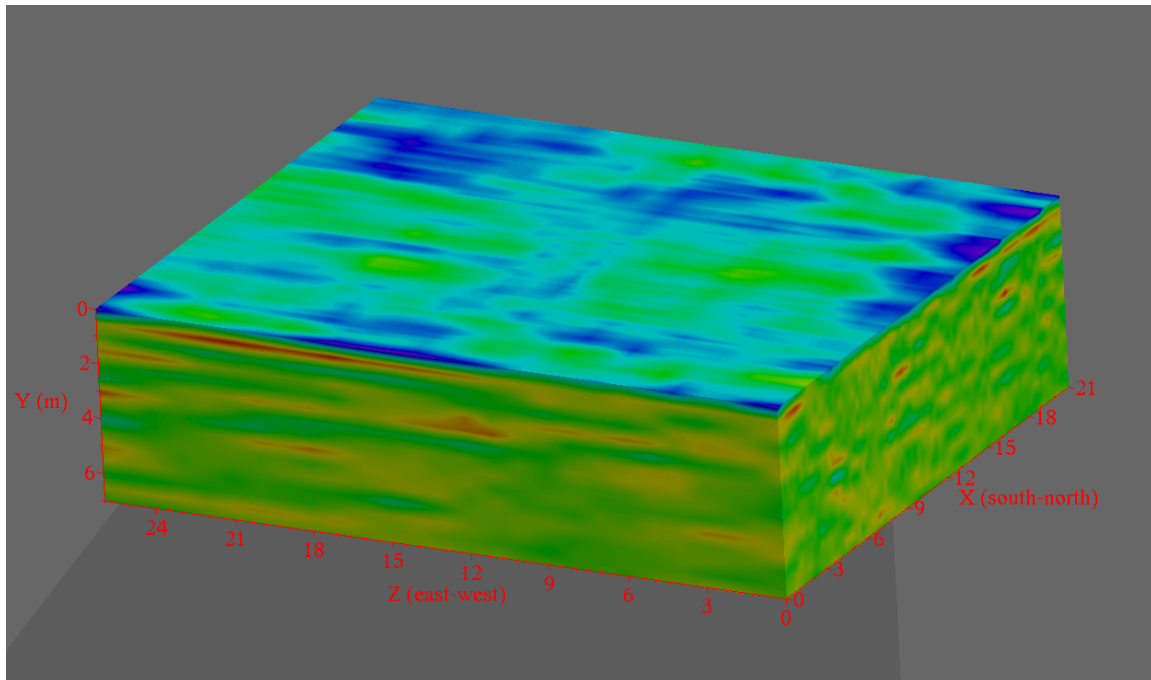


Σχήμα 4.12 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της στιγμιαίας φάσης (instantaneous phase).

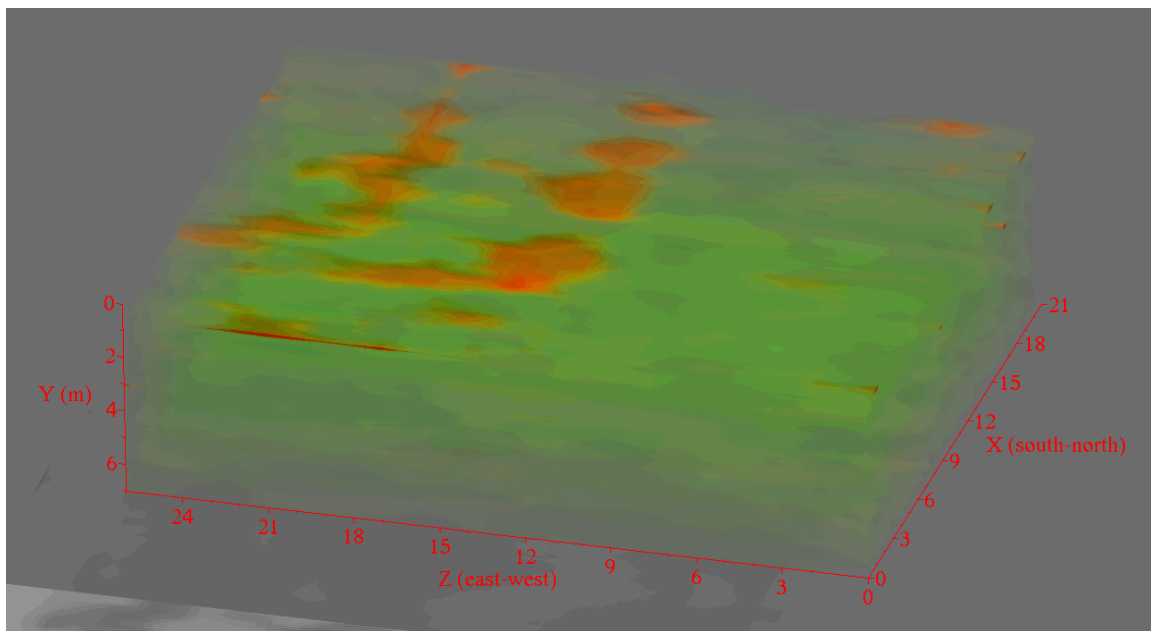


Σχήμα 4.13 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της στιγμιαίας φάση με μία οριζόντια τομή στα 6m και μία κάθετη στα 13m.

Στα σχήματα 4.14 και 4.15 παρουσιάζεται η στιγμιαία συχνότητα (instantaneous frequency).

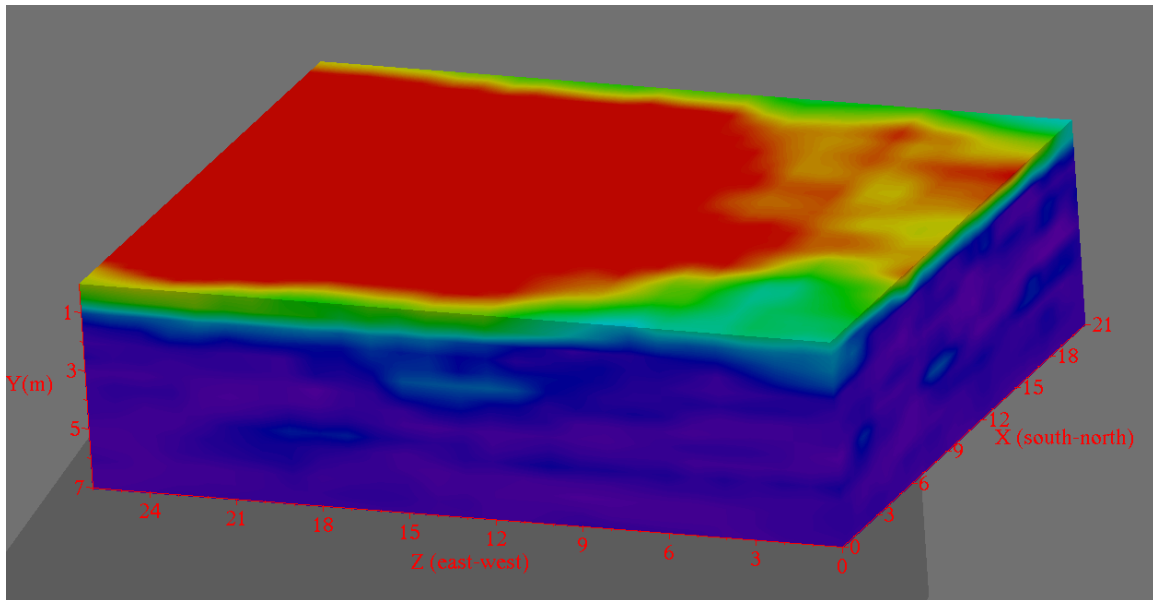


Σχήμα 4.14 Τρισδιάστατος όγκος της στιγμιαίας συχνότητας (instantaneous frequency).

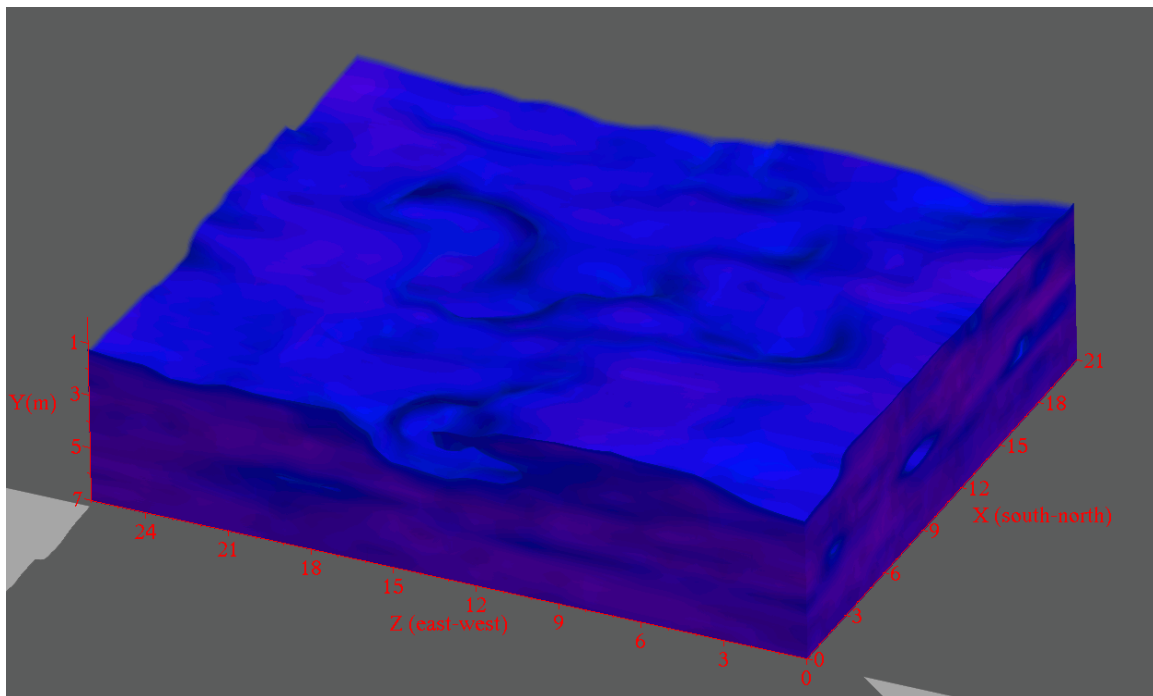


Σχήμα 4.15 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της στιγμιαίας συχνότητας (instantaneous frequency).

Στα δύο παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η συνάφεια (semblance). Στο σχήμα 4.17 έχει αποκοπεί το επιφανειακό στρώμα.

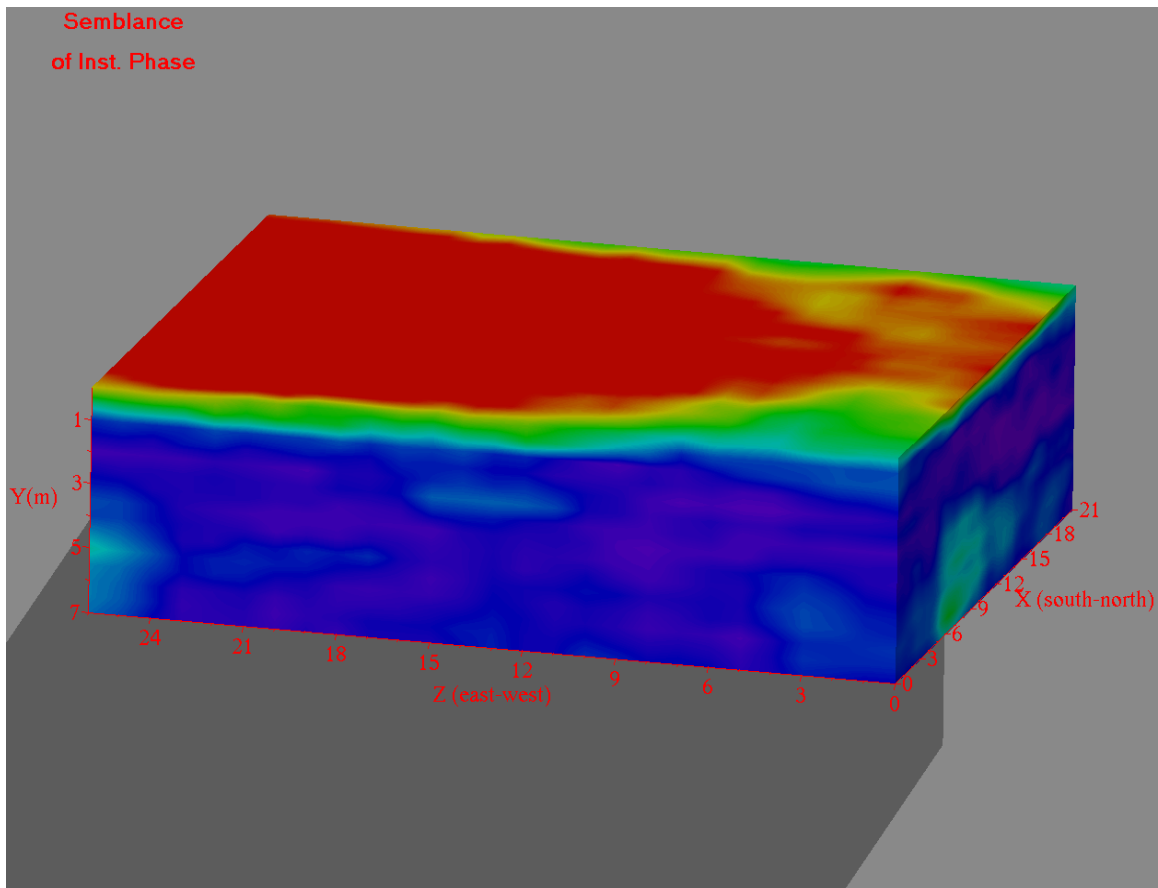


Σχήμα 4.16 Τρισδιάστατος όγκος της συνάφειας (semblance).

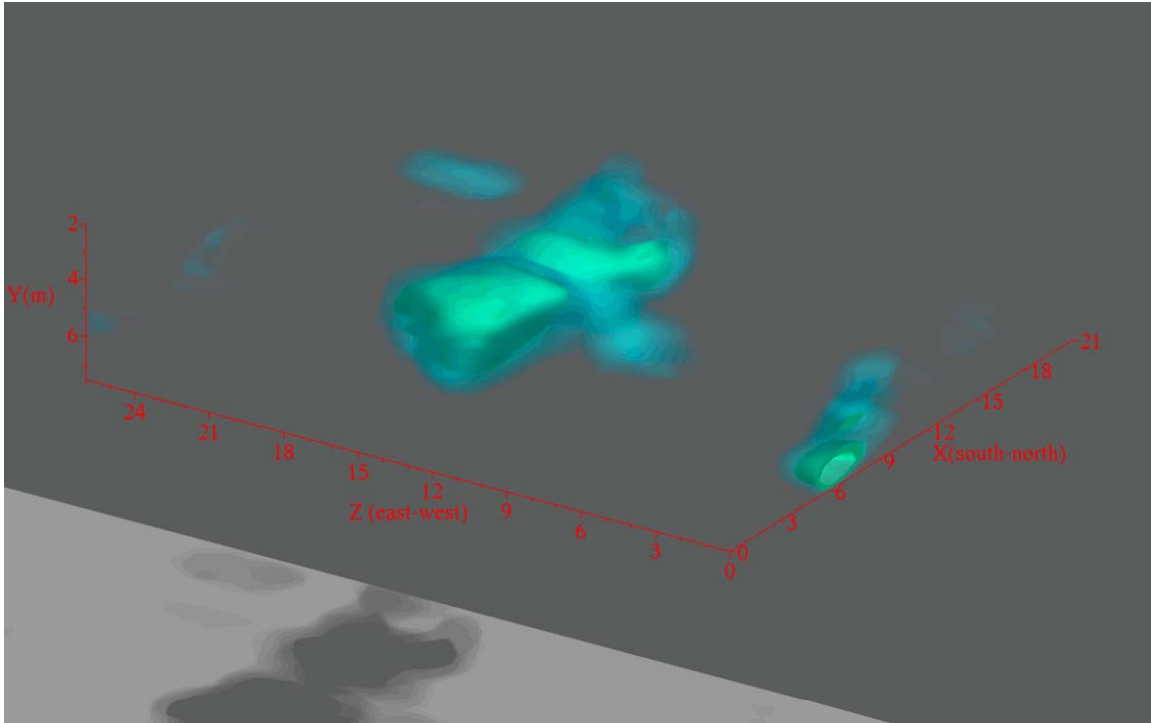


Σχήμα 4.17 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της συνάφειας (semblance) όπου έχει αποκοπεί το επιφανειακό στρώμα.

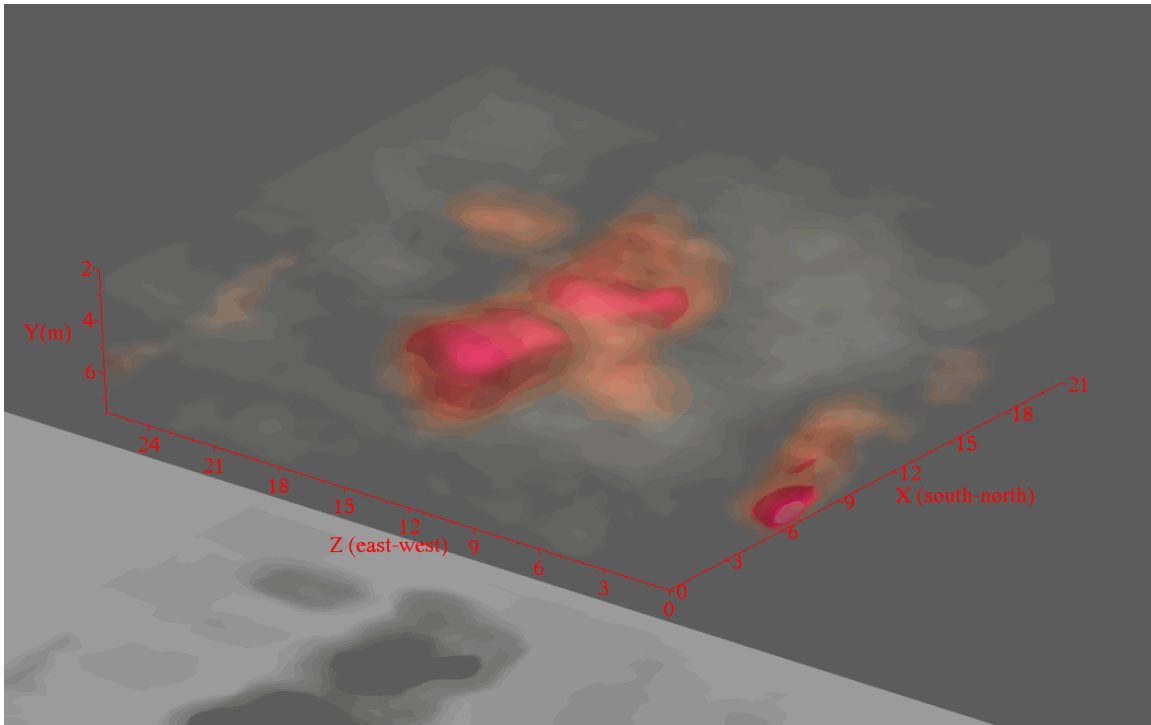
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συνάφεια της στιγμιαίας φάσης (semblance of instantaneous phase). Στις διαφανείς εικόνες 4.19 και 4.20 με έντονο χρώμα εμφανίζονται οι γεωφυσικές ανωμαλίες που παρουσιάζονται στο υπέδαφος. Στις εικόνες 4.21 και 4.22, με τη βοήθεια των τομών, υπάρχει η δυνατότητα να εντοπισθεί η ακριβής θέση των πιθανών υπόγειων εγκοίλων και να οριοθετηθεί η εξάπλωσή τους στο χώρο.



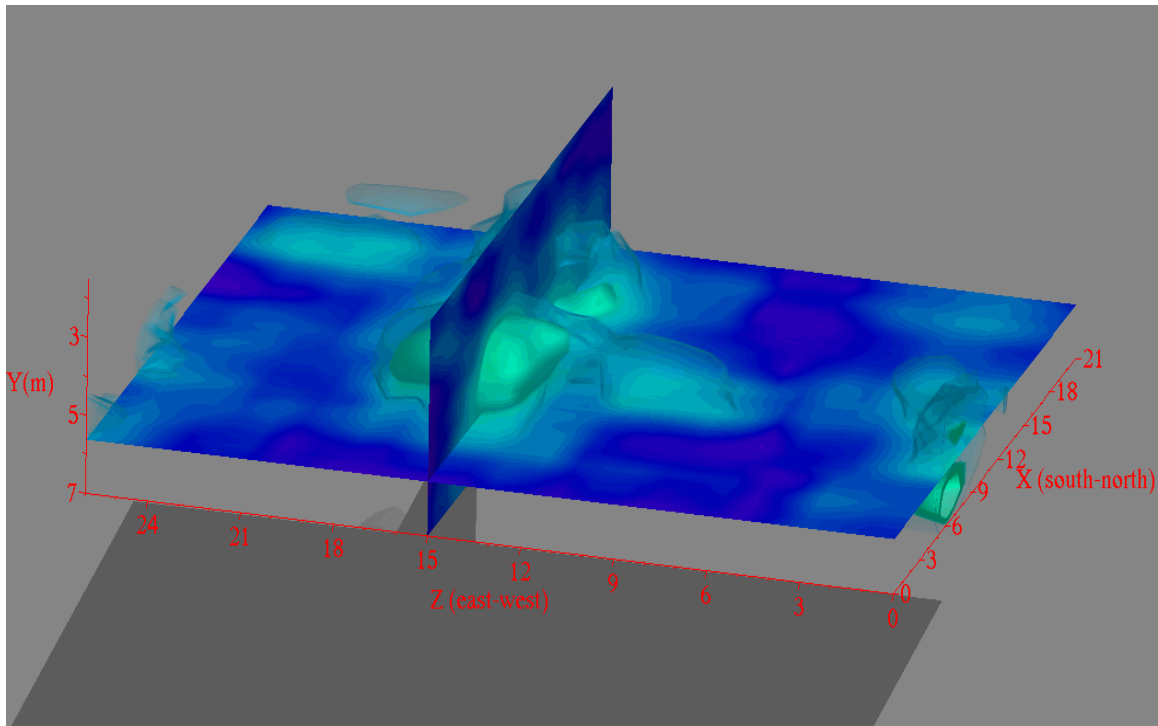
Σχήμα 4.18 Τρισδιάστατος όγκος της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης (semblance of instantaneous phase).



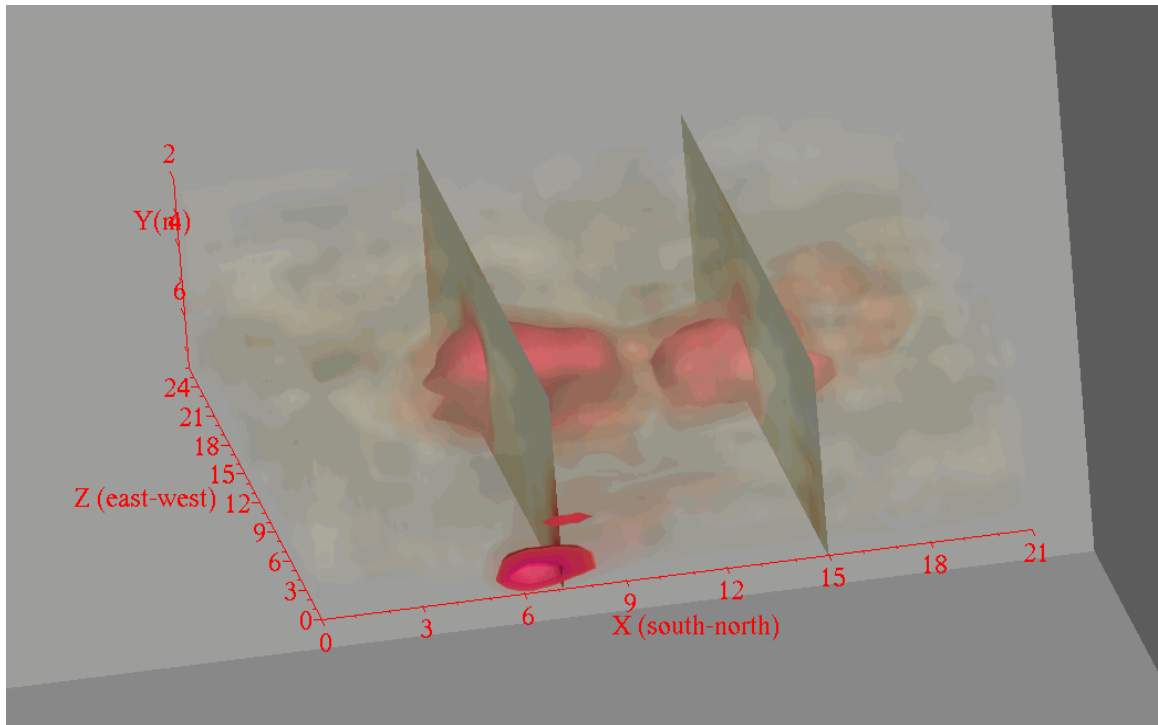
Σχήμα 4.19 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης (*semblance of instantaneous phase*) όπου έχουν αποκοπεί τα επιφανειακά στρώματα.



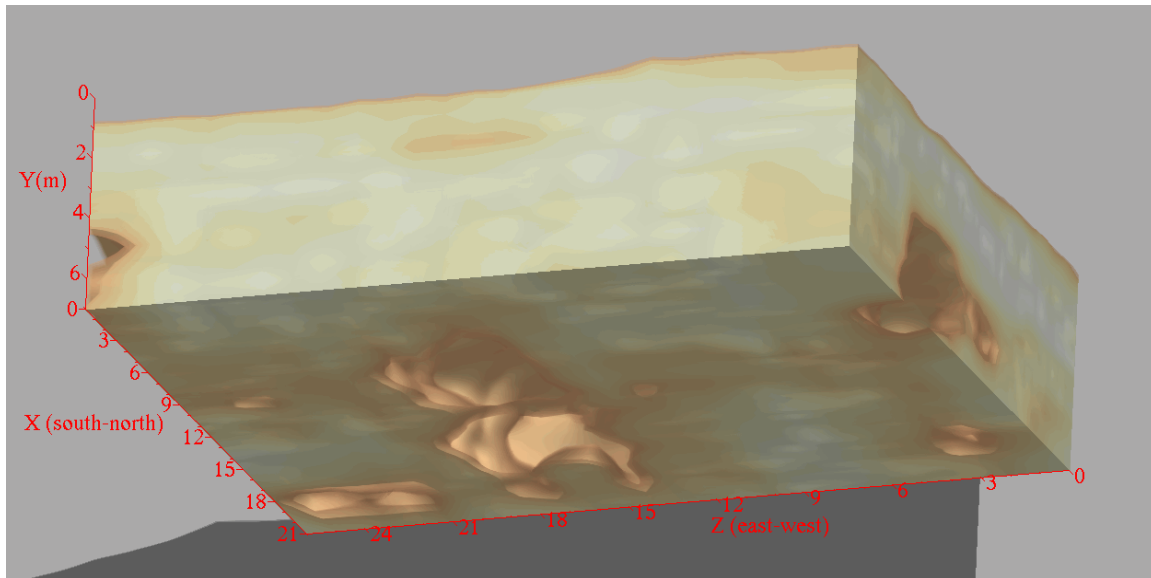
Σχήμα 4.20 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης (*semblance of instantaneous phase*) όπου έχουν αποκοπεί τα επιφανειακά στρώματα.



Σχήμα 4.21 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης (semblance of instantaneous phase) με μια οριζόντια τομή στα 5,5m και μια κάθετη στα 15m.

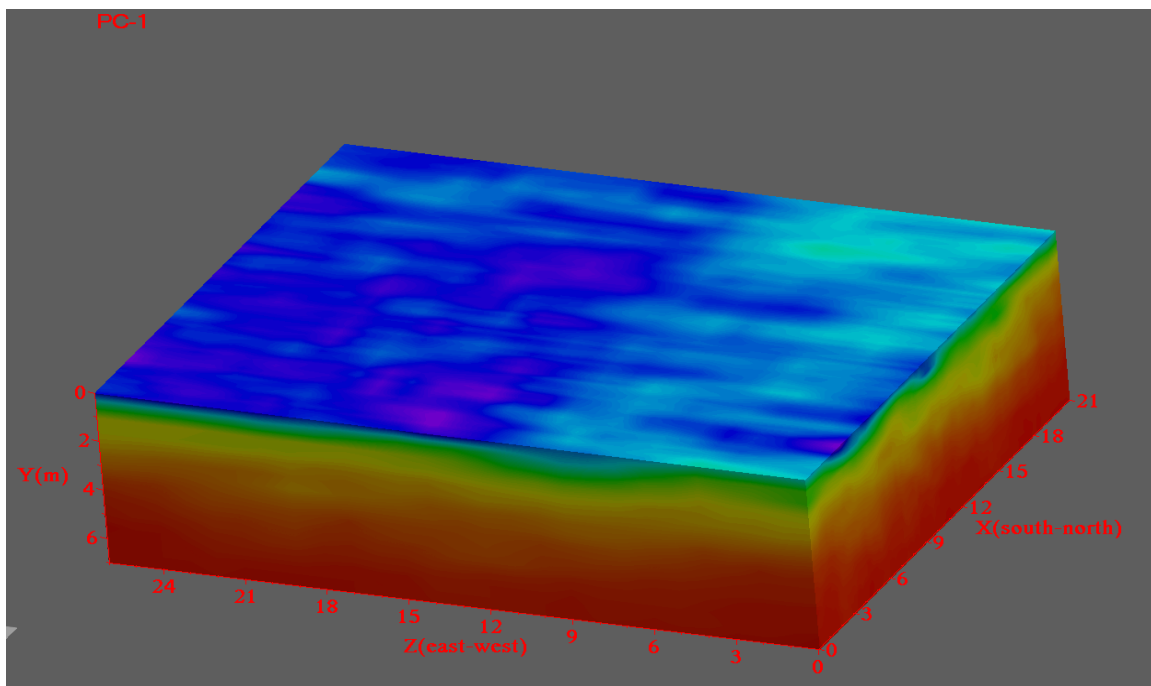


Σχήμα 4.22 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης (semblance of instantaneous phase) με δύο τομές στον X-άξονα στα 7m και 15m.

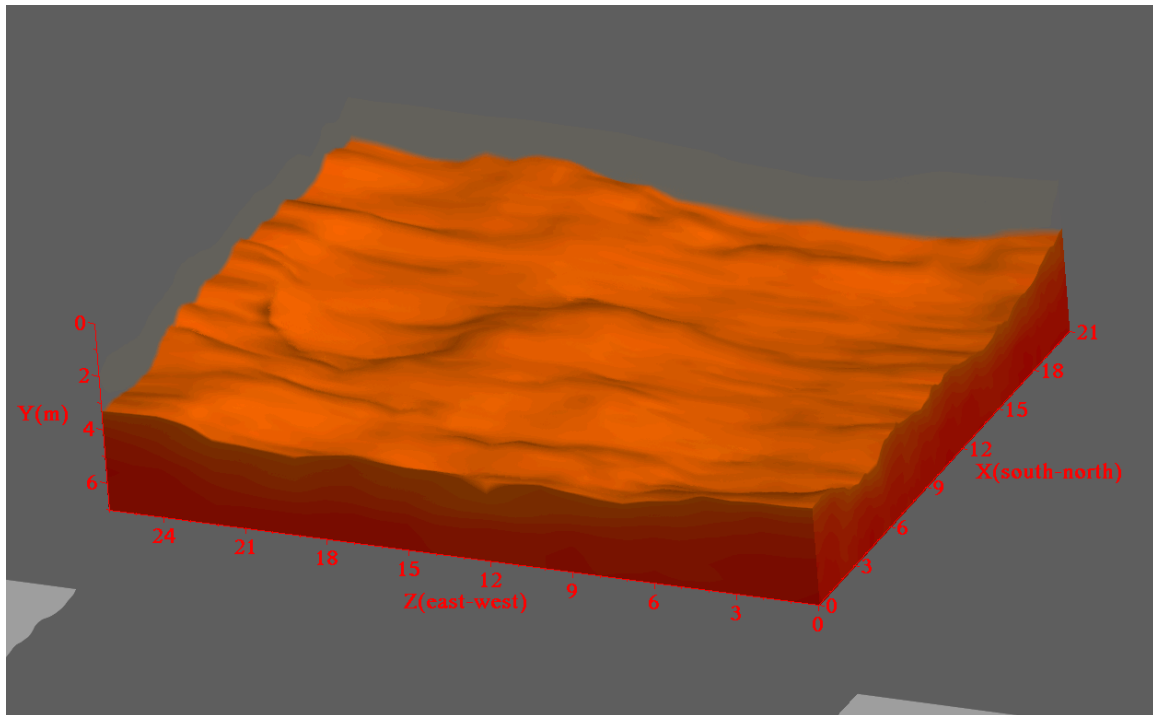


Σχήμα 4.23 Τρισδιάστατος όγκος (semblance of instantaneous phase).

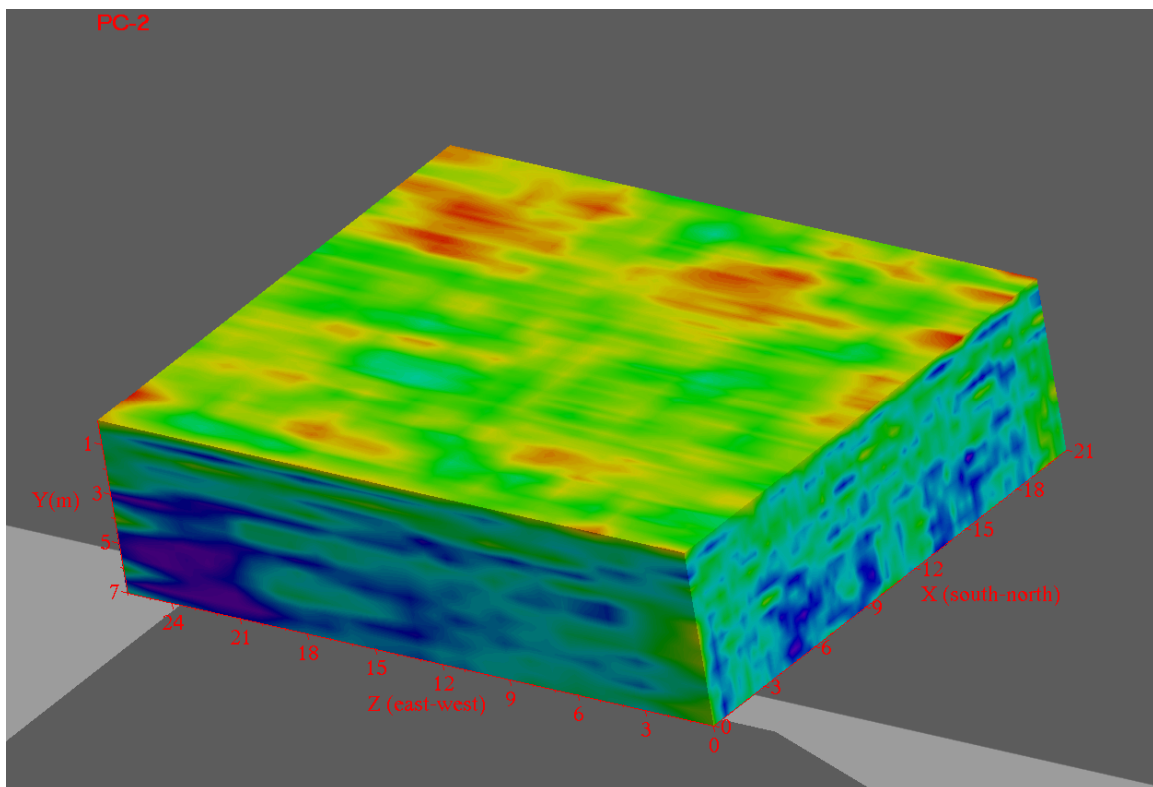
Μετά την παρουσίαση των μιγαδικών χαρακτηριστικών ακολουθεί η παρουσίαση των κυρίων συνιστωσών. Στα σχήματα 4.24 έως 4.30 απεικονίζονται οι πρώτες κύριες συνιστώσες PC-1 (inst.envelope-dB inst.envelope), PC-2 (inst.phase-inst.frequency) και PC-3 (semblance-semblance of inst.phase).



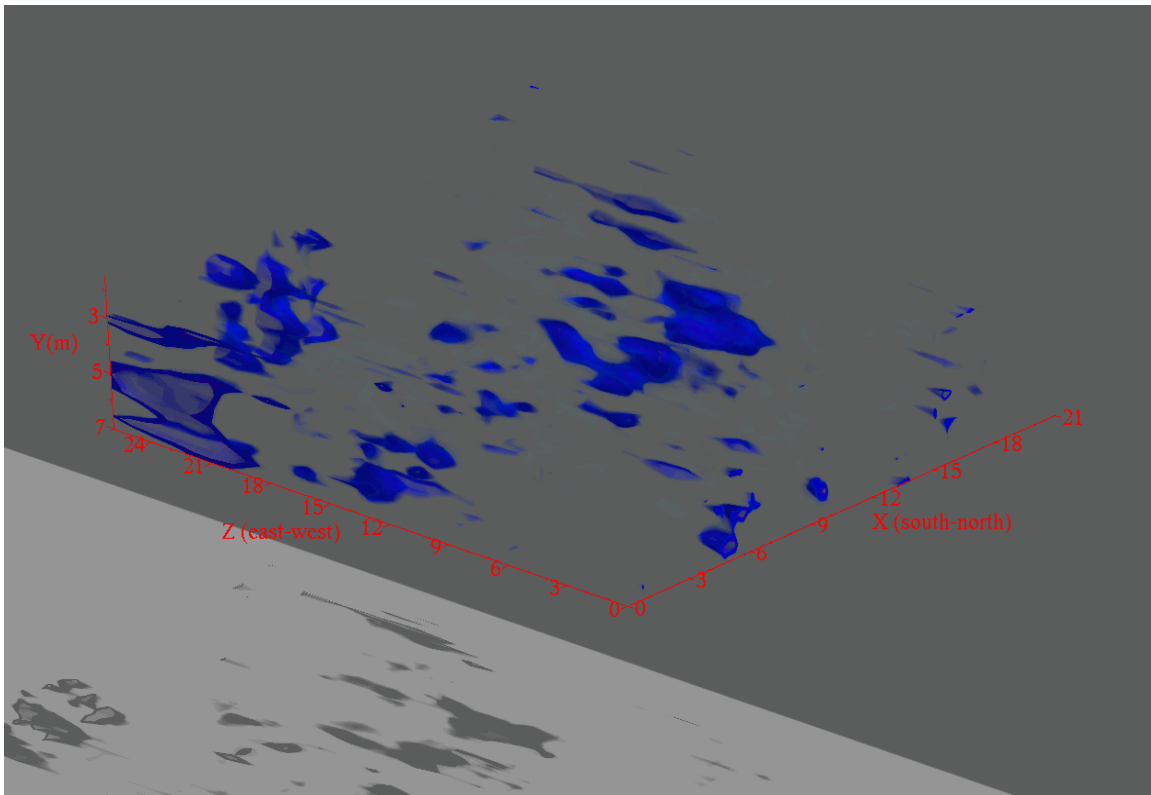
Σχήμα 4.24 Τρισδιάστατος όγκος πρώτης κύριας συνιστώσας PC-1.



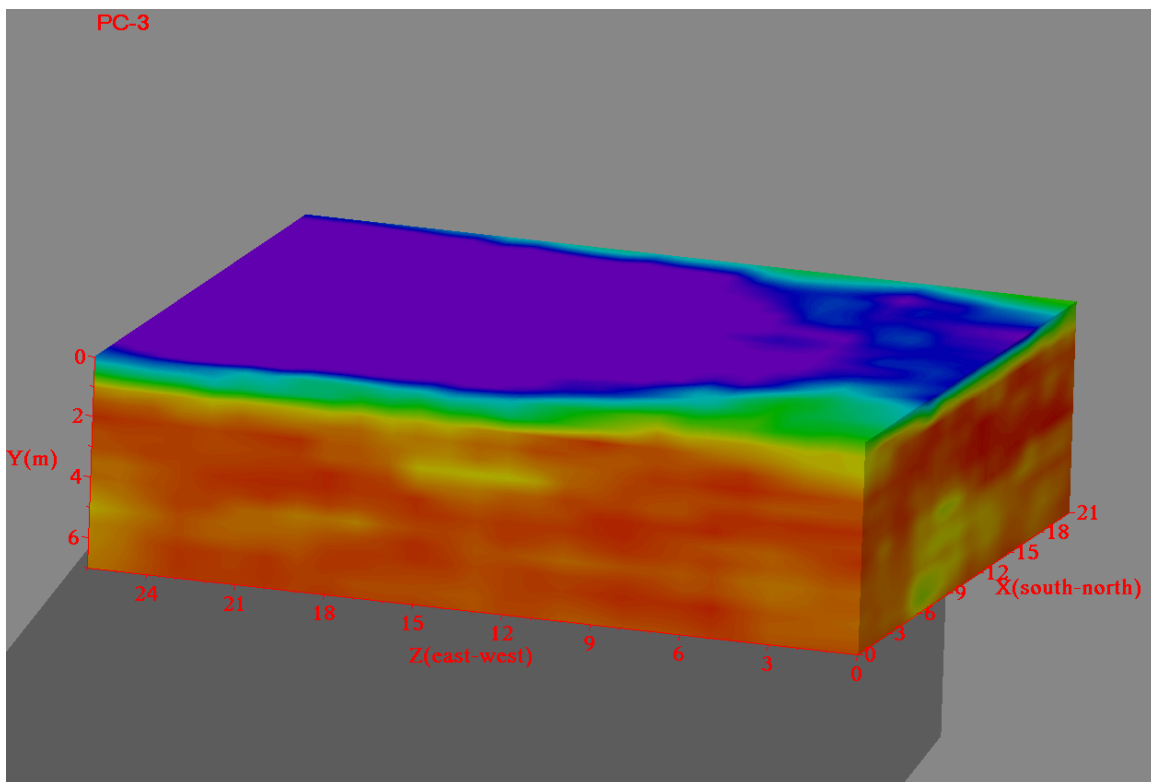
Σχήμα 4.25 Τρισδιάστατος όγκος της πρώτης κύριας συνιστώσας PC-1 όπου έχουν αποκοπεί τα επιφανειακά στρώματα.



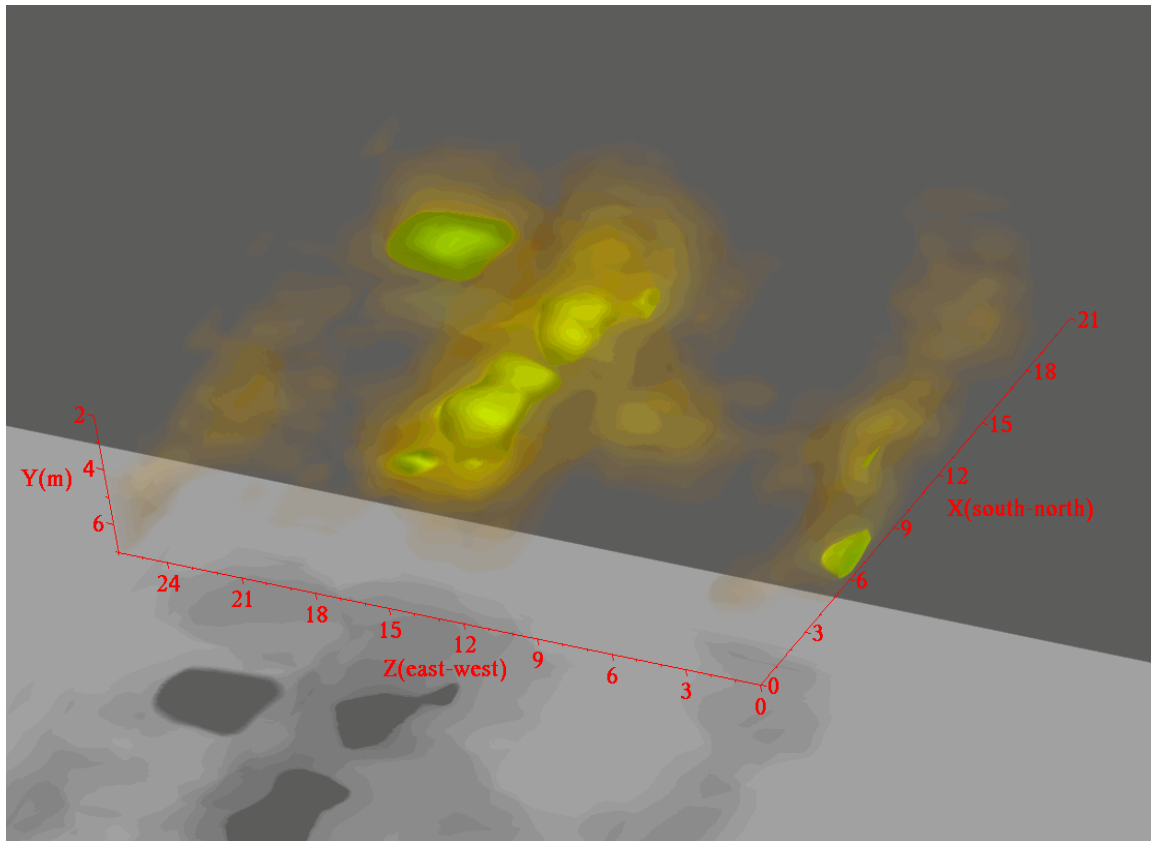
Σχήμα 4.26 Τρισδιάστατος όγκος δεύτερης κύριας συνιστώσας PC-2.



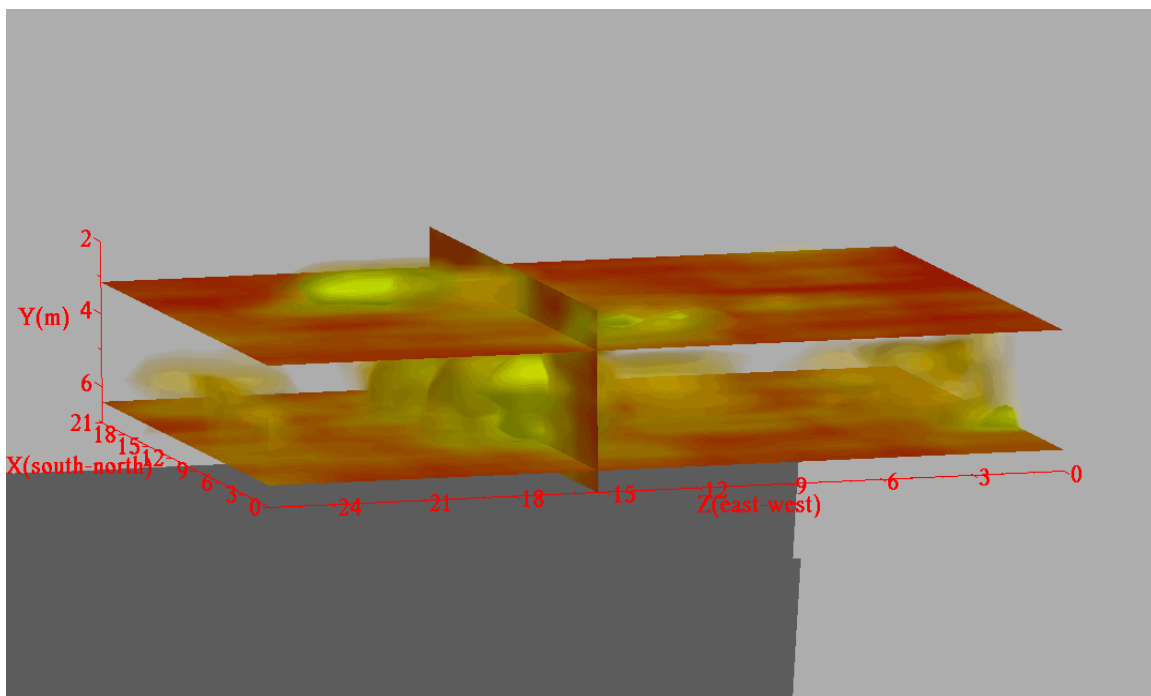
Σχήμα 4.27 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου δεύτερης κύριας συνιστώσας PC2.



Σχήμα 4.28 Τρισδιάστατος όγκος τρίτης κύριας συνιστώσας PC-3.



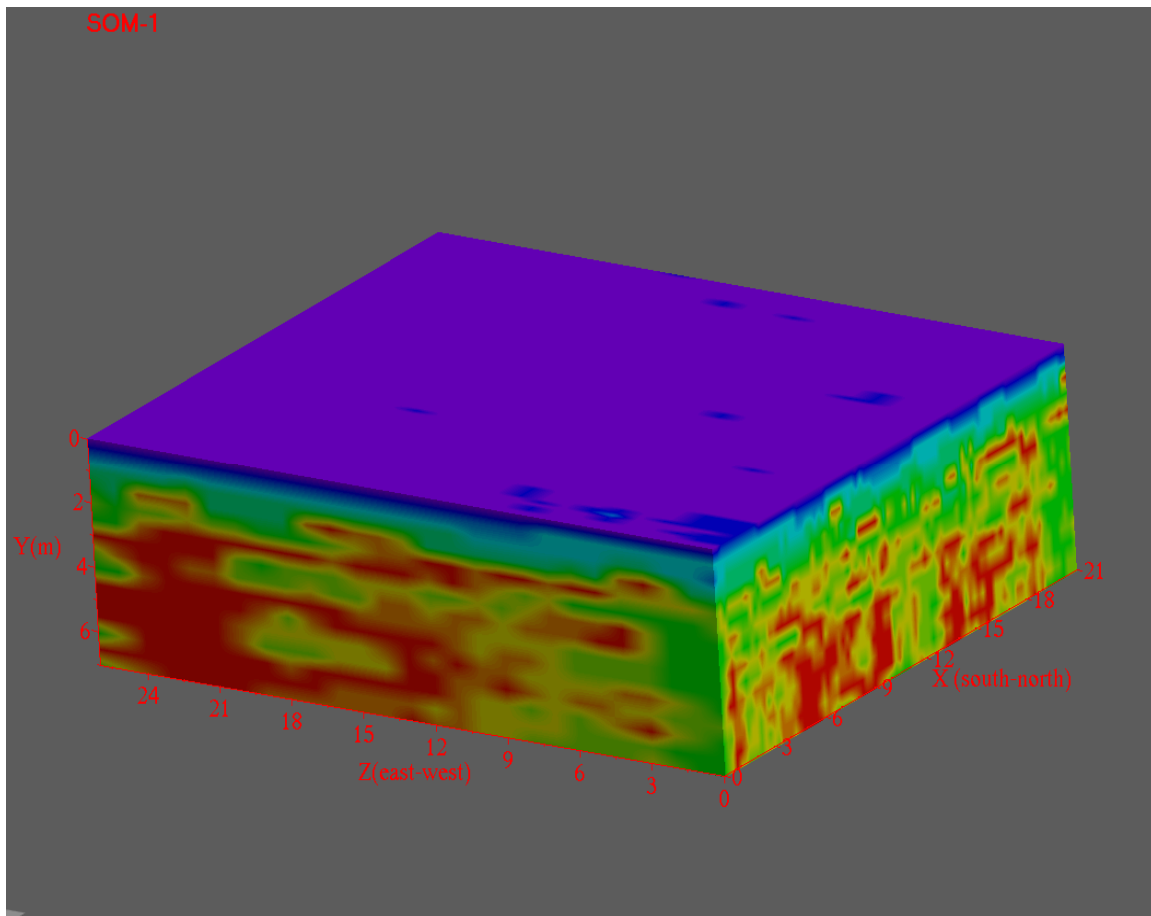
Σχήμα 4.29 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου τρίτης κύριας συνιστώσας PC-3.



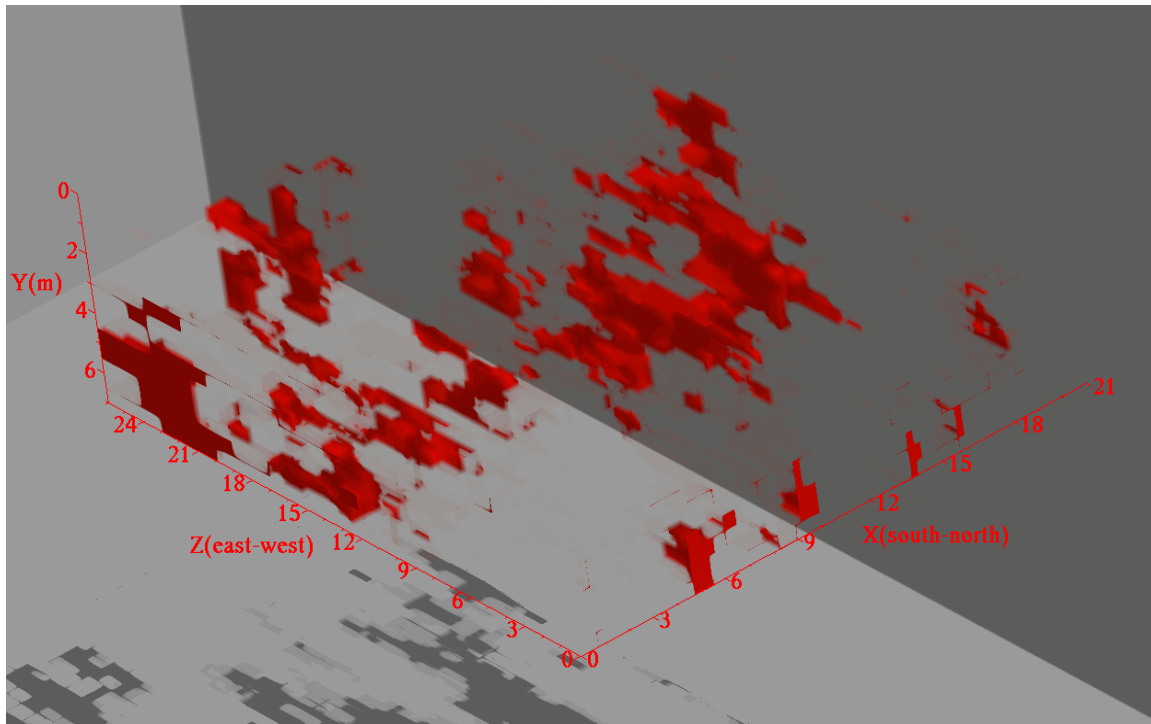
Σχήμα 4.30 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου τρίτης κύριας συνιστώσας PC-3 με δύο οριζόντιες τομές στα 3m, 6.5m και μία κάθετη στα 15m.

Στα σχήματα 4.31 έως 4.34 απεικονίζονται τα ταξινομημένα δεδομένα της πρώτης ομάδας PC1, PC2 και PC3 σε 10 τάξεις. Στις διαφανείς εικόνες 4.32-4.34 με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι γεωφυσικές ανωμαλίες που εμφανίζονται στο υπέδαφος.

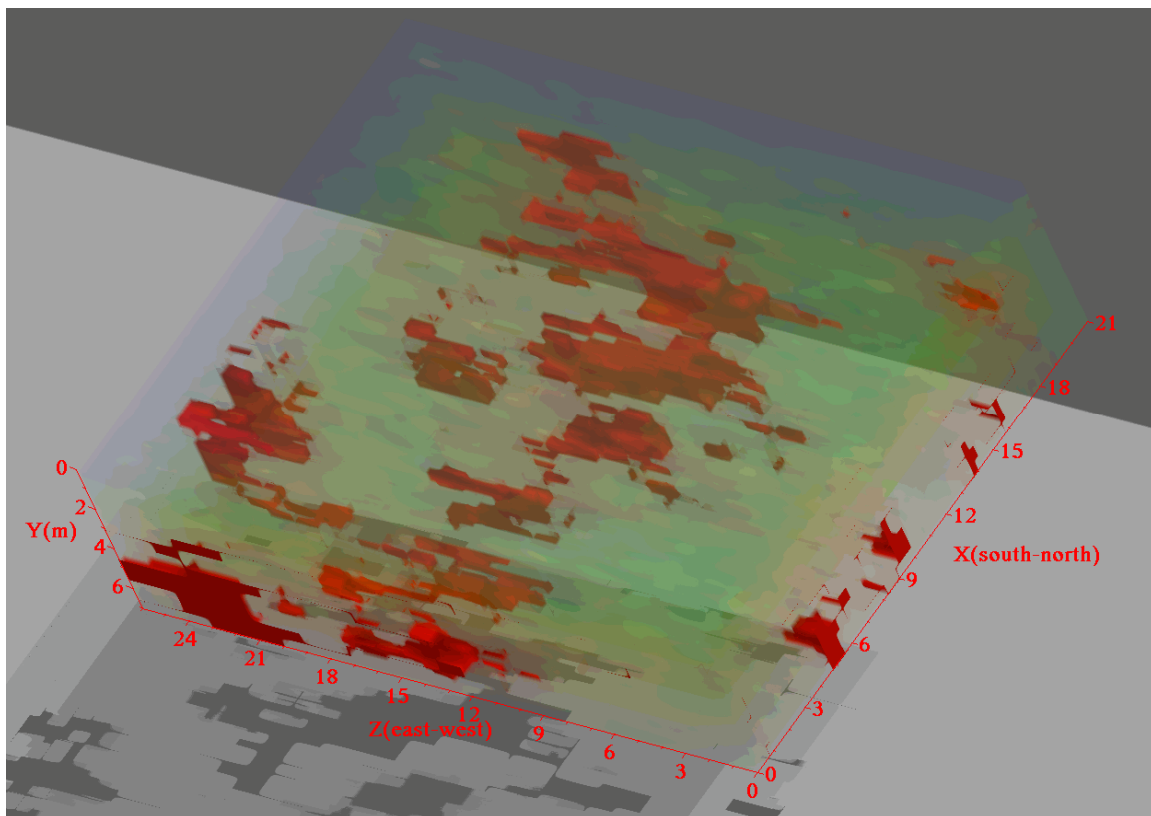
Στα σχήματα 4.35 έως 4.39 απεικονίζονται τα ταξινομημένα δεδομένα της δεύτερης ομάδας PC1 και PC3 σε 10 τάξεις, από τα οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε την οριζόντια και κατακόρυφη εξάπλωσή των γεωλογικών ανωμαλιών στο χώρο, με τη βοήθεια των τομών.



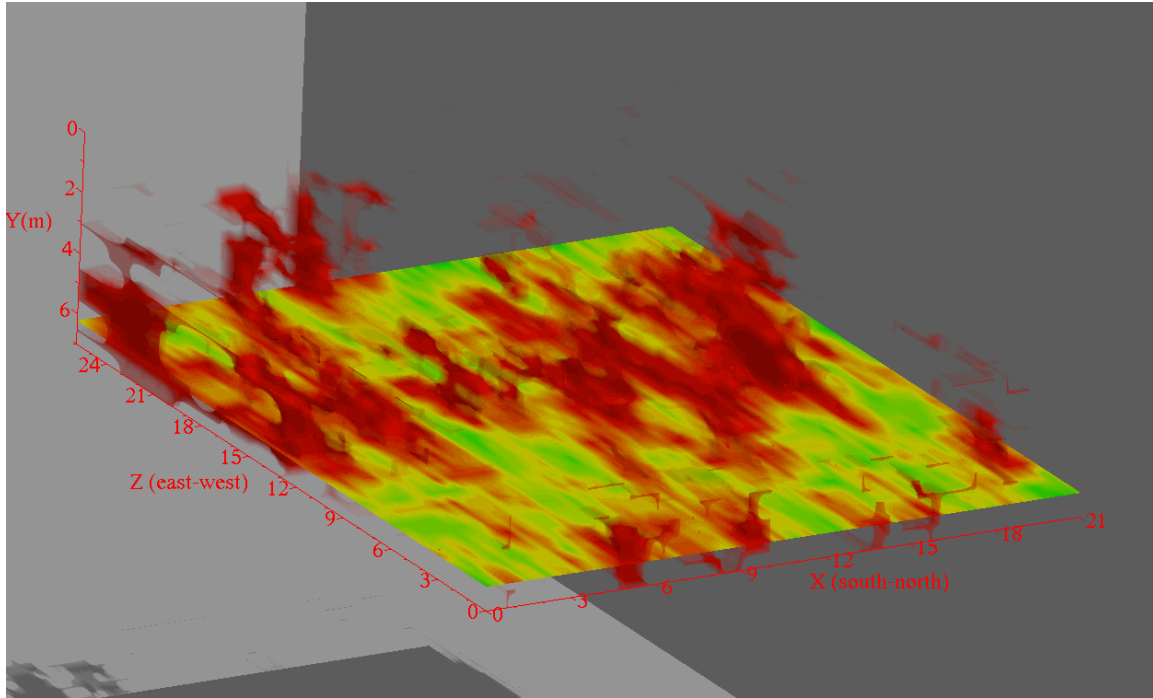
Σχήμα 4.31 Τρισδιάστατος όγκος της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις .



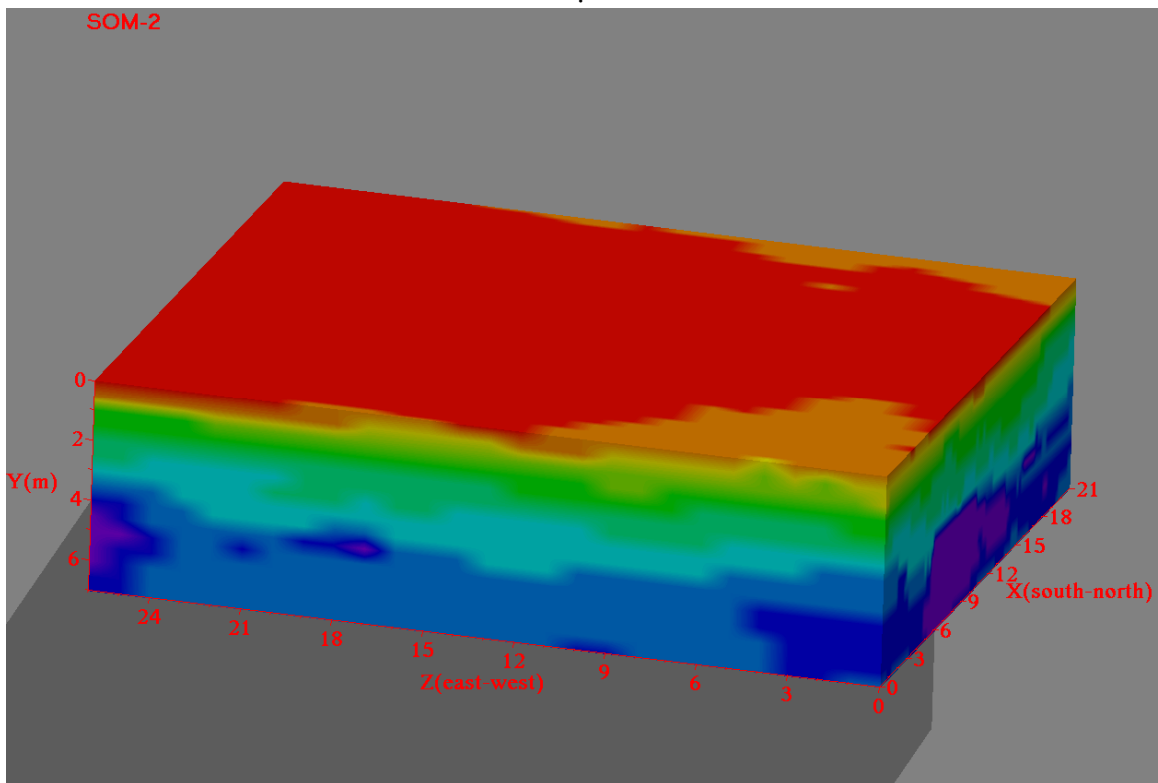
Σχήμα 4.32 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.



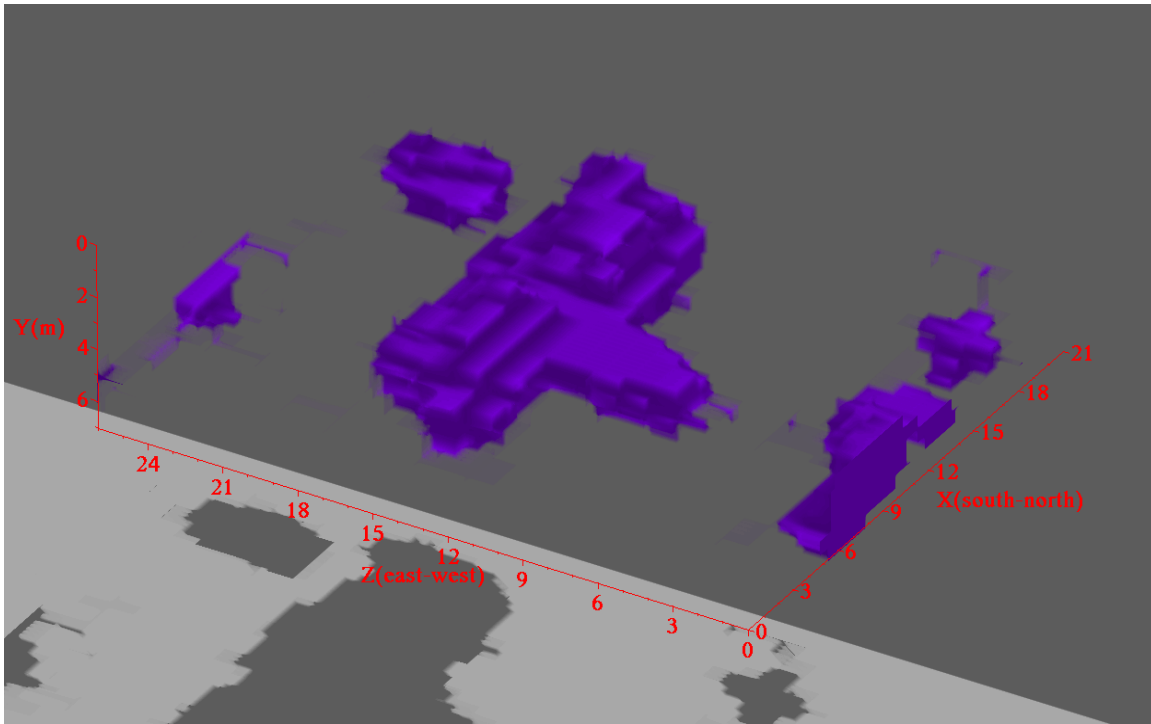
Σχήμα 4.33 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις .



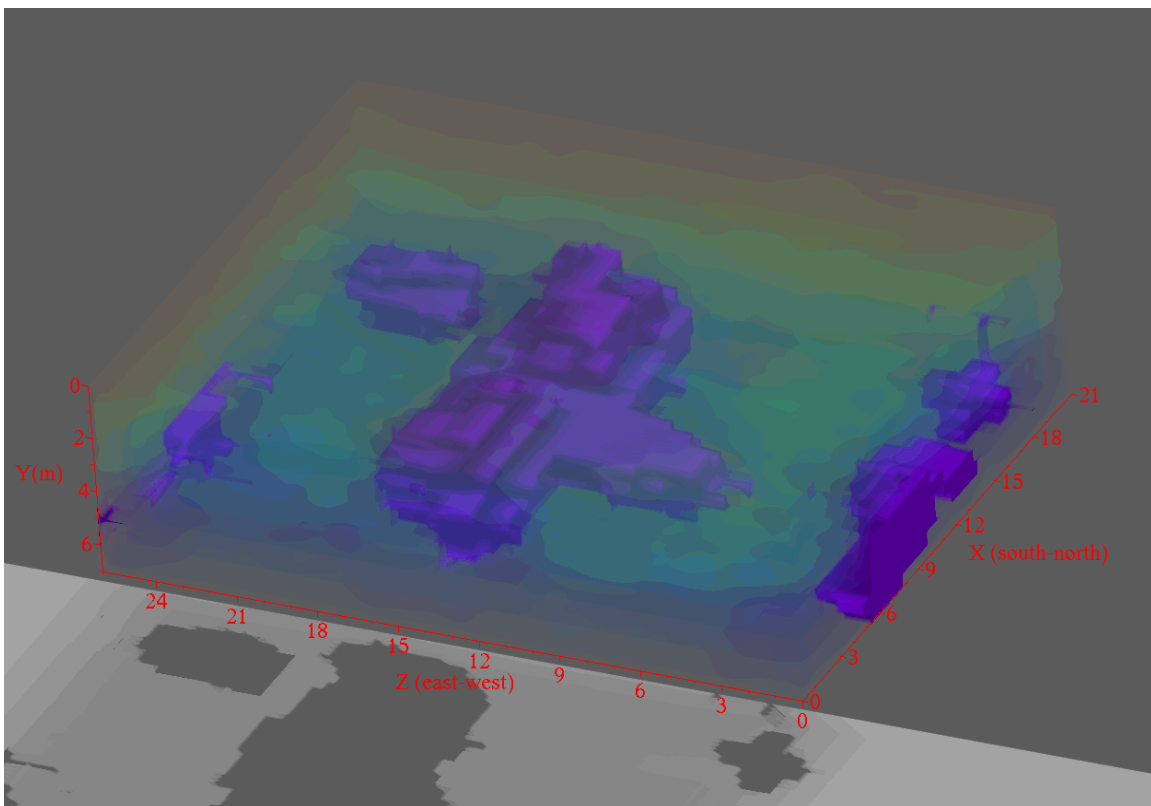
Σχήμα 4.34 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις με οριζόντια τομή στα 6m.



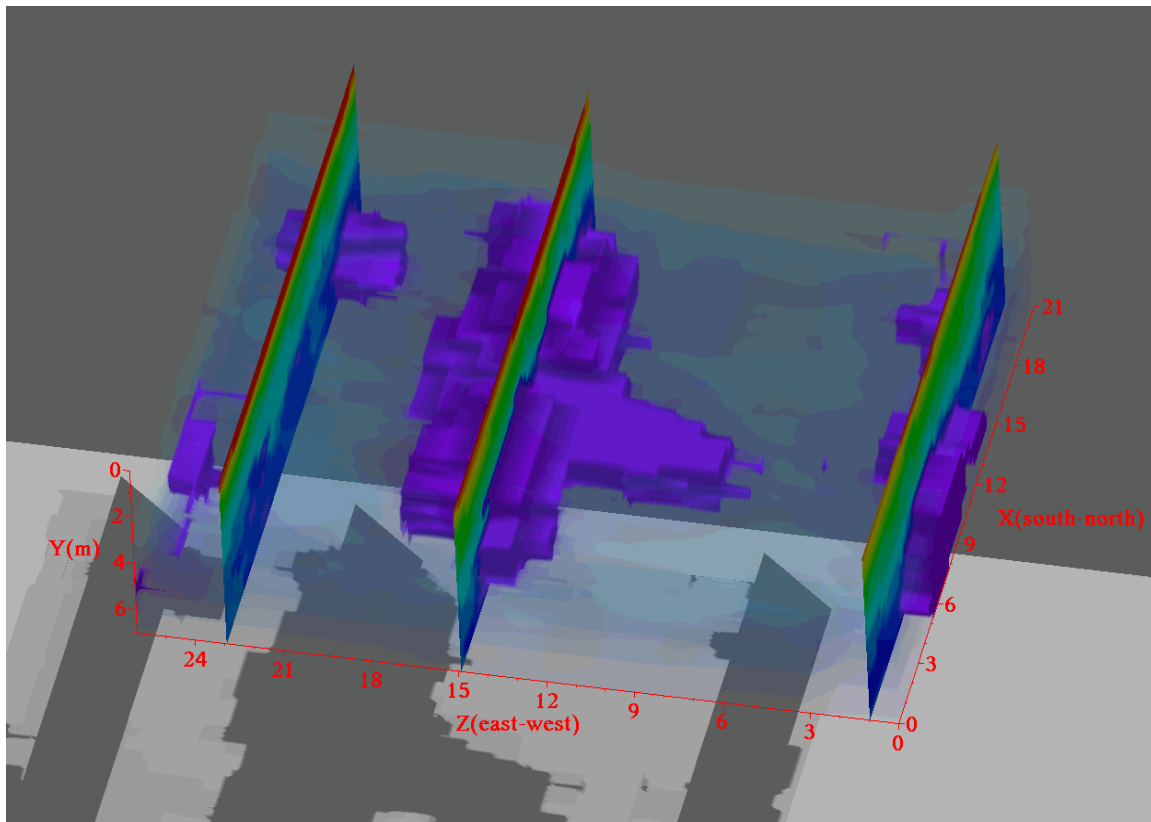
Σχήμα 4.35 Τρισδιάστατος όγκος της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.



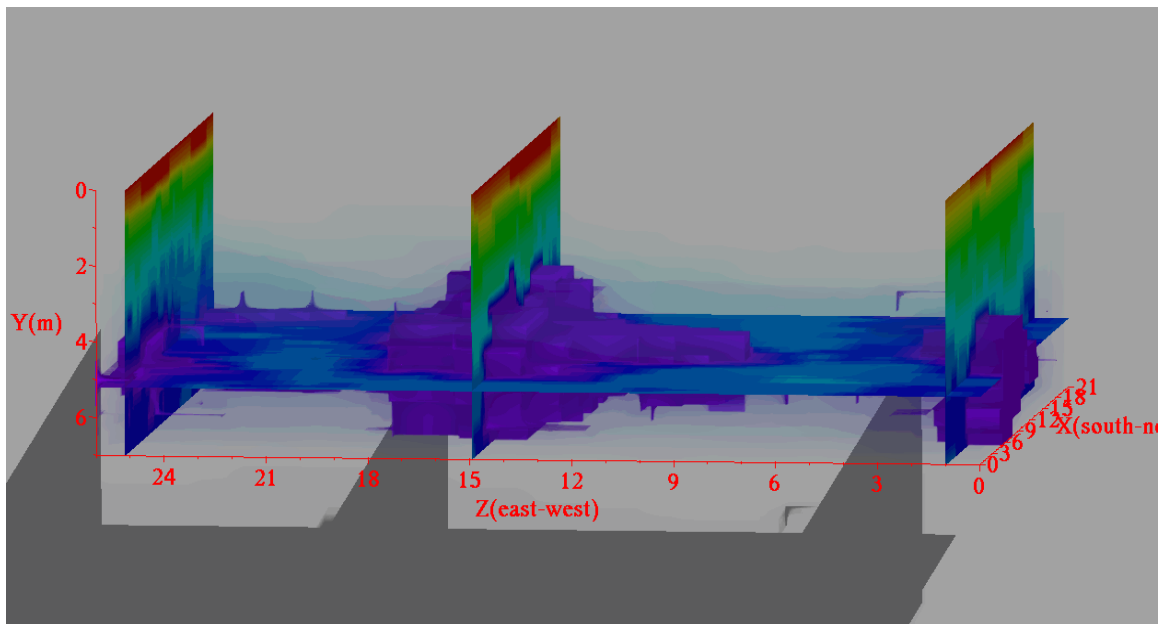
Σχήμα 4.36 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.



Σχήμα 4.37 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις.



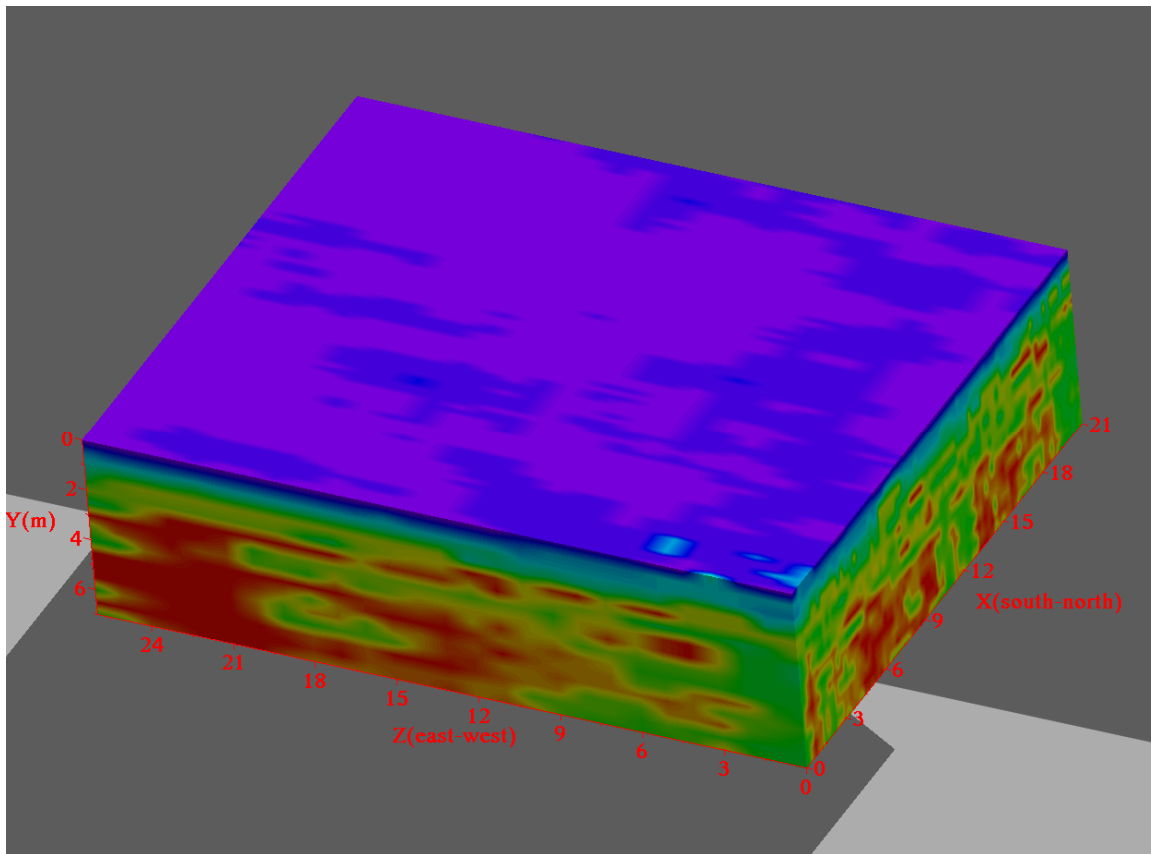
Σχήμα 4.38 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις με τρεις κάθετες τομές στα 23m, 15m και 1m



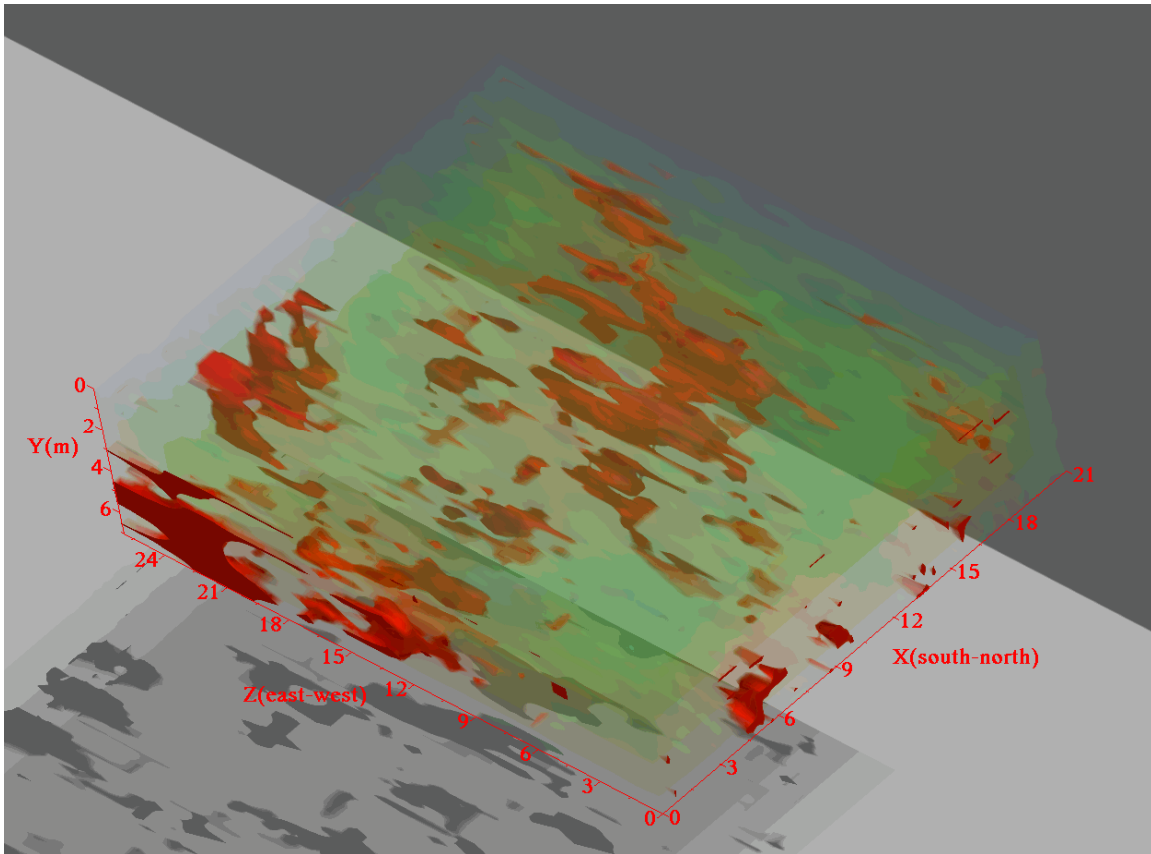
Σχήμα 4.39 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 10 τάξεις με τρεις κάθετες τομές στα 23m, 15m και 1m και μία οριζόντια στα 5m

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρισδιάστατοι όγκοι που προέκυψαν από την ταξινόμηση (K-means, self organizing map) σε 20 τάξεις. Στα σχήματα 4.40 έως 4.43 απεικονίζονται οι όγκοι που προέκυψαν από την ταξινόμηση της πρώτης ομάδας δεδομένων (PC1, PC2 και PC3) ενώ στα σχήματα 4.44 έως και 4.46 παρουσιάζονται αυτοί που προέκυψαν από την ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας δεδομένων (PC1 και PC3). Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ταξινόμηση σε 20 τάξεις είναι παρόμοια, και δεν εμφανίζουν καλύτερη διακριτική ικανότητα, από αυτά που προέκυψαν από την ταξινόμηση σε 10 τάξεις.

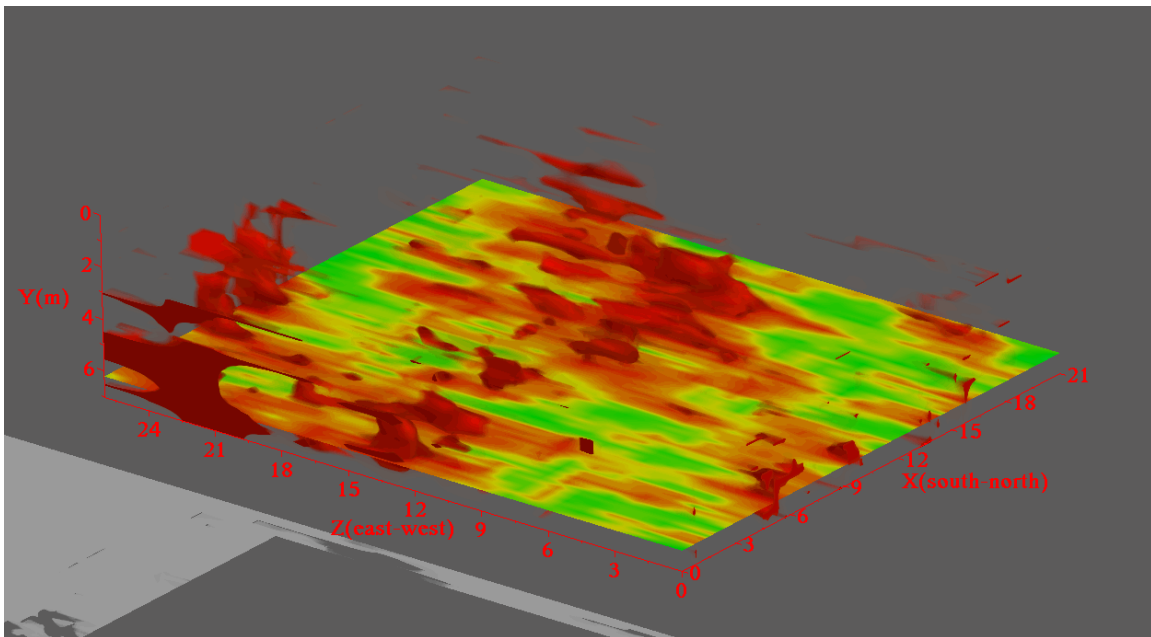
Από τα σχήματα 4.45 και 4.46 μπορούμε να οριοθετήσουμε τις γεωφυσικές ανωμαλίες που εμφανίζονται στο υπέδαφος με τη βοήθεια των τομών. Όπως παρατηρούμε η κύρια γεωλογική ανωμαλία παρουσιάζεται σχεδόν στο κέντρο του υπεδάφιου όγκου μεταξύ 13 και 17 m (Z-άξονας), 5 και 18 m (X-άξονας) σε βάθος από 5 έως και 7m (Y-άξονας).



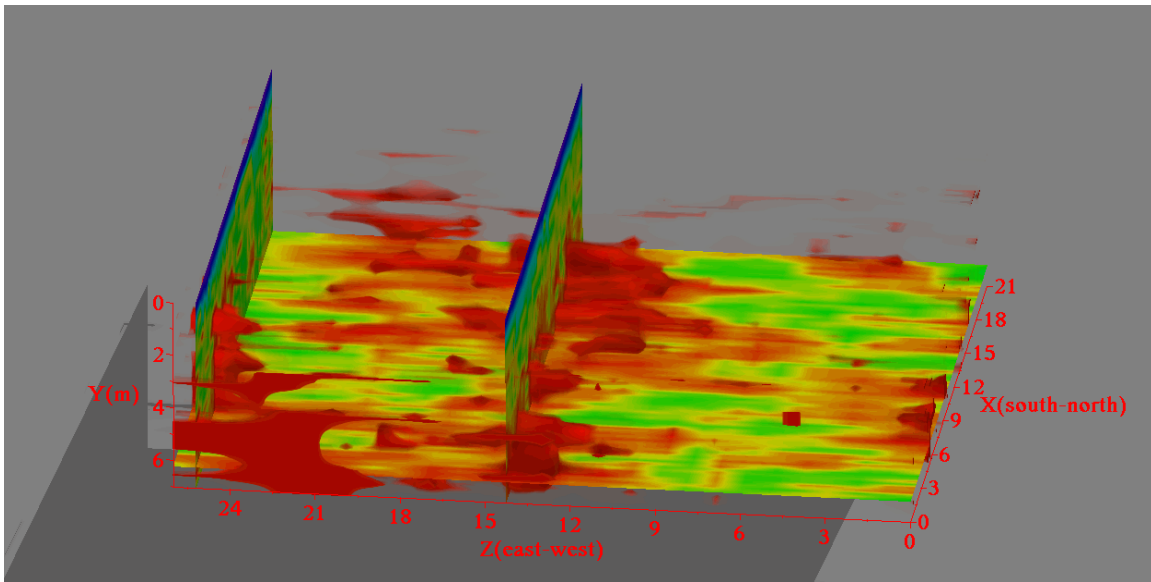
Σχήμα 4.40 Τρισδιάστατος όγκος της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 20 τάξεις.



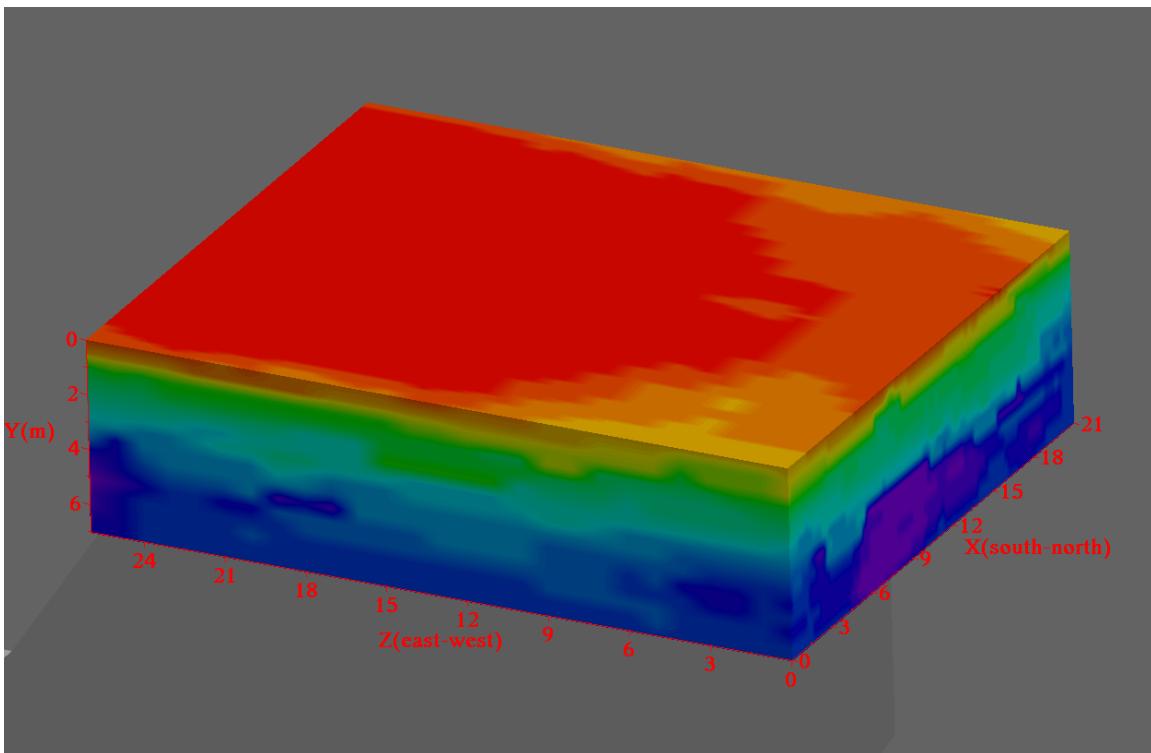
Σχήμα 4.41 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 20 τάξεις .



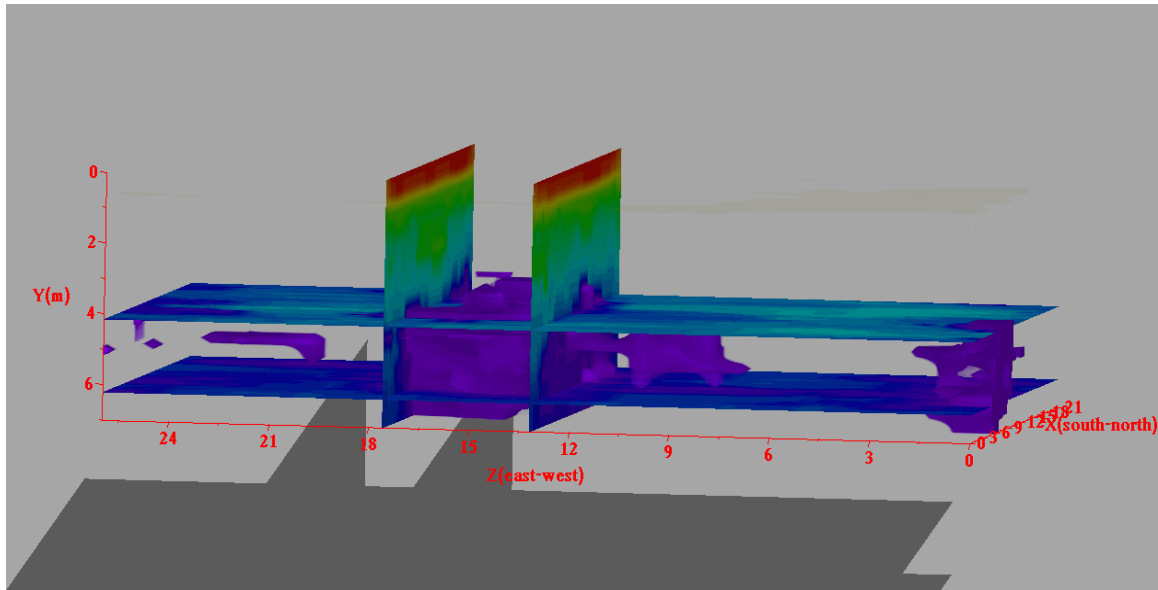
Σχήμα 4.42 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 20 τάξεις με οριζόντια τομή στα 6m.



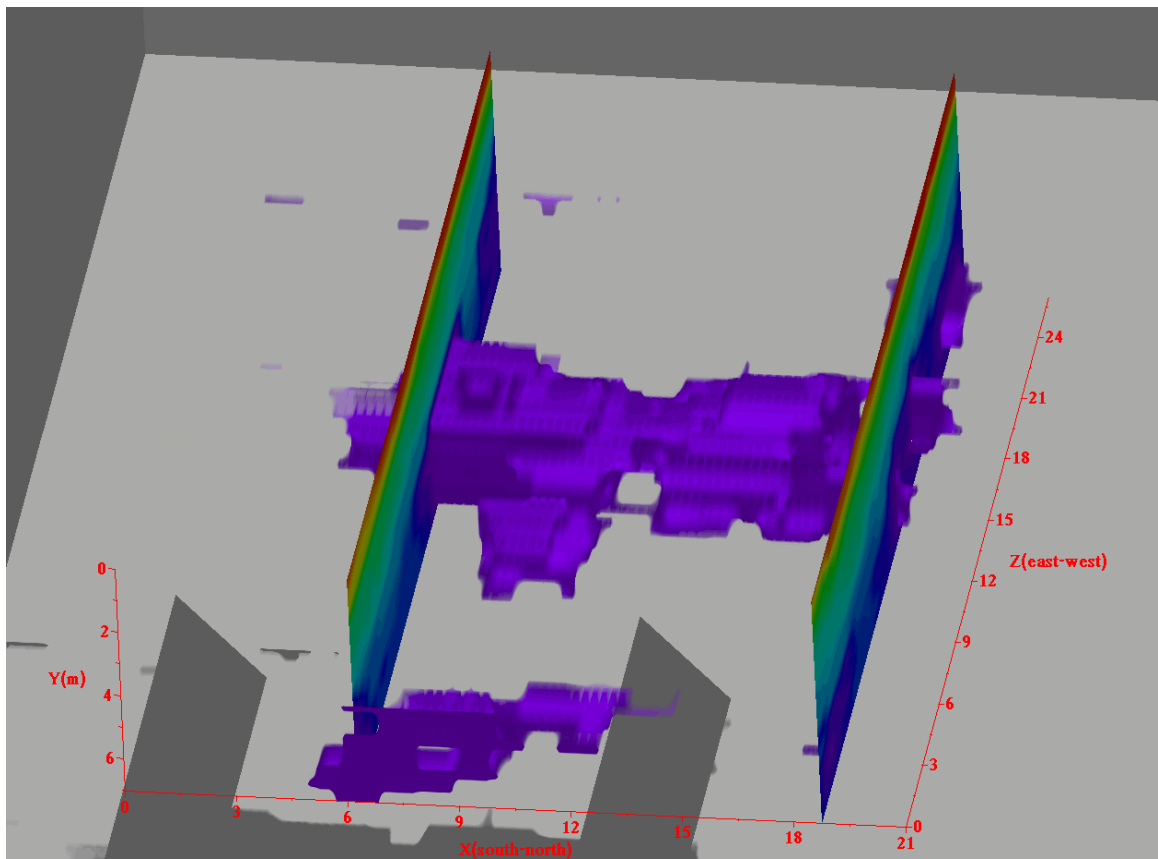
Σχήμα 4.43 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της πρώτης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 20 τάξεις, με μία οριζόντια τομή στα 6m και δύο κάθετες στα 15 και 25m.



Σχήμα 4.44 Τρισδιάστατος όγκος της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 20 τάξεις.



Σχήμα 4.45 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 20 τάξεις με δύο κάθετες τομές στα 13m, 18m και δύο οριζόντιες στα 4m και 6m.

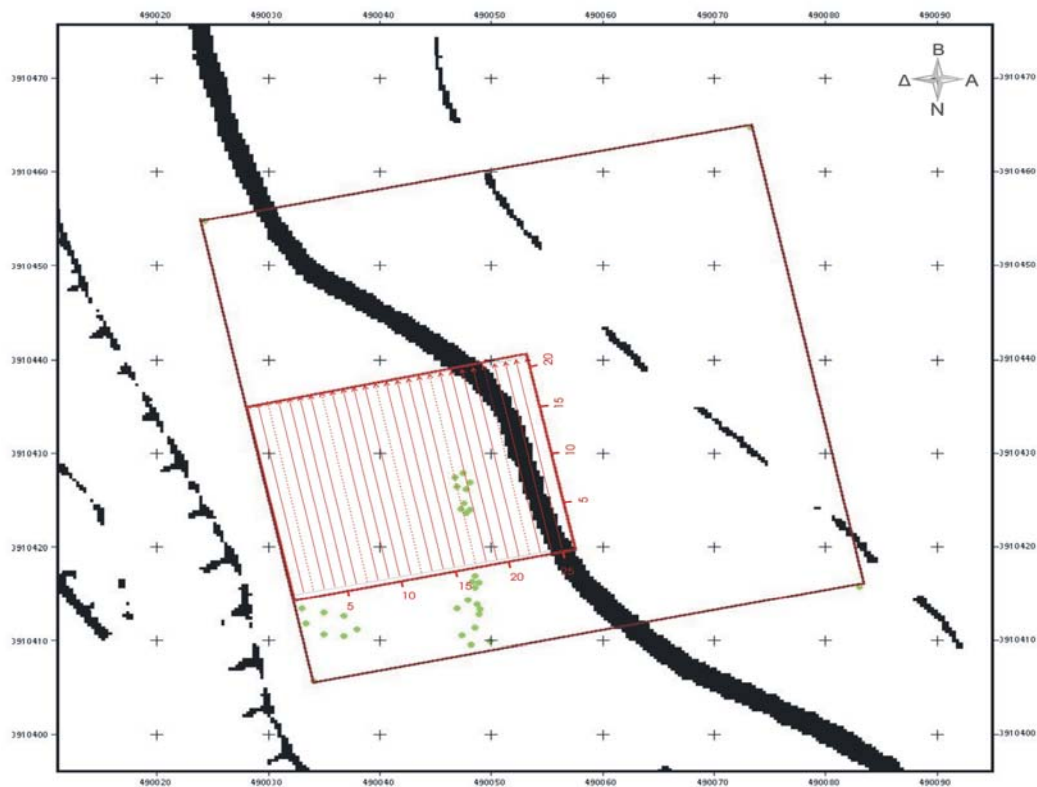


Σχήμα 4.46 Διαφανής εικόνα του τρισδιάστατου όγκου της ταξινόμησης της δεύτερης ομάδας με τον αλγόριθμο του Kohonen σε 20 τάξεις με δύο κάθετες τομές στον X άξονα στα 6m και 19m.

4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων με επιφανειακές καταγραφές και ηλεκτρικές τομογραφίες

Στον παρακάτω τοπογραφικό χάρτη απεικονίζεται ο κάνναβος όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με το γεωραντάρ καθώς και οι γραμμές μελέτης. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται οι επιφανειακές κοιλότητες μικρής διαμέτρου, που εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν στο χάρτη πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Η επιφανειακή ταπείνωση, που παρατηρείται σε ορισμένα σημεία του εδάφους, πιθανόν να οφείλεται σε διαβρώσεις που προκάλεσε η διέλευση των φυσικών υδάτων.

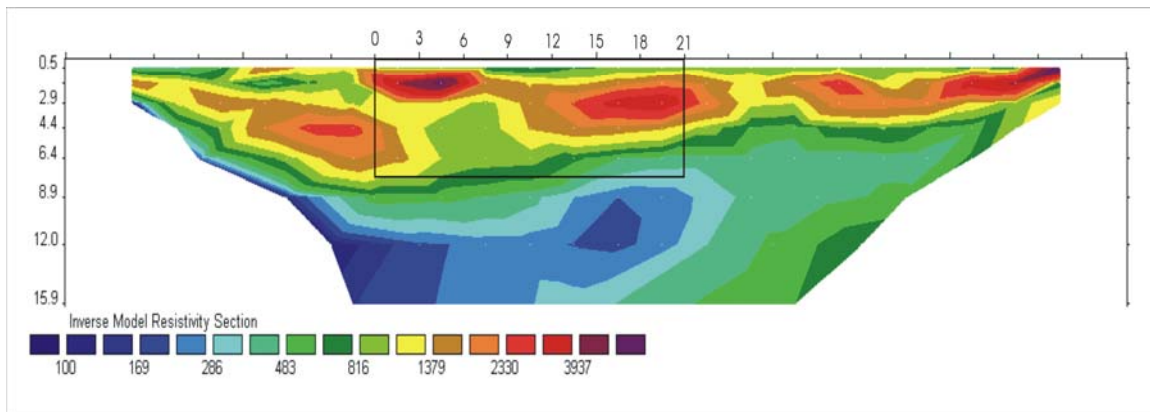
Οι γεωφυσικές ανωμαλίες που ανιχνεύθηκαν από την επεξεργασία των μετρήσεων με το γεωραντάρ [13-18m Z-άξονα(Δύση-Ανατολή) και 5-18m X-άξονα(Νότος-Βοράς)] παρουσιάζονται κάτω από τις επιφανειακές οπές μέσω των οποίων διεισδύει το νερό προς τα βαθύτερα στρώματα με αποτέλεσμα πολλές φορές να είναι πιθανή η δημιουργία καρστικών μορφών, όπως υπόγειων εγκοίλων και δολίνων.



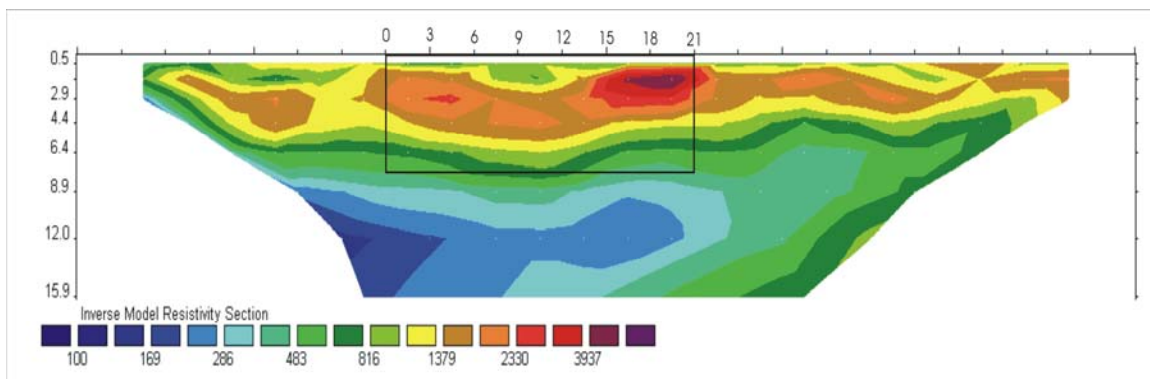
Σχήμα 4.47 Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις.

Στα παρακάτω σχήματα (σχ.4.48-4.49) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ηλεκτρική τομογραφία της 14^{ης} και 17^{ης} γραμμής μελέτης, στις οποίες εντοπίστηκαν οι γεωλογικές ανωμαλίες από τις μετρήσεις με το γεωραντάρ. Στον οριζόντιο άξονα καταγράφεται η απόσταση (m) ενώ στον κάθετο το βάθος (m). Η κλίμακα των χρωμάτων στις καταγραφές αντιστοιχεί σε τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί σε υψηλές αντιστάσεις ενώ το μπλε σε χαμηλές.

Από τις τομογραφίες εντοπίζονται στο υπέδαφος, μέσα στα πλαίσια όπου πραγματοποιήθηκε η διασκόπηση με το γεωραντάρ, περιοχές όπου η αντίσταση λαμβάνει υψηλές τιμές. Σ' αυτά τα σημεία ενδεχομένως να εμφανίζονται πετρώματα μη συνεκτικά, με μεγάλο πορώδες ή ακόμη και υπόγεια έγκοιλα που έχουν δημιουργηθεί στους ασβεστόλιθους από τη διέλευση φυσικών υδάτων μέσω των επιφανειών διακλάσεων και διαστρώσεων τους. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις τομογραφίες συμβαδίζουν και επαληθεύουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων με το γεωραντάρ.



Σχήμα 4.48 Τομογραφία της 14^{ης} γραμμής μελέτης.



Σχήμα 4.49 Τομογραφία της 17^{ης} γραμμής μελέτης.

4.7 Συμπεράσματα

Τα βήματα επεξεργασίας που ακολουθήθηκαν έδωσαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, αφού προσδιορίστηκαν με μεγάλη επιτυχία η θέση, το σχήμα και το μέγεθος των υπόγειων εγκοίλων στο υπέδαφος της περιοχής. Οι υπόγειες καρστικές μορφές που εμφανίζονται στο υπέδαφος, εντοπίστηκαν και οριοθετήθηκαν με ακρίβεια. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμβαδίζουν και επαληθεύονται από τις επιφανειακές καταγραφές και τις τομογραφίες της περιοχής μελέτης.

Με τη βοήθεια των τομών, εντοπίζεται η ακριβής θέση των καρστικών δομών, καθώς και η εξάπλωσή τους στο χώρο. Από την ταξινόμηση της πρώτης ομάδας δεδομένων σε 10 τάξεις και σε 20 τάξεις φανερώνονται τα πετρώματα που έχουν μικρότερη συνεκτικότητα συγκριτικά με το περιβάλλον πέτρωμα και εμφανίζουν μεγάλο πορώδες, ενώ από την ταξινόμηση της δεύτερης ομάδας δεδομένων σε 10 και 20 τάξεις εντοπίζονται υπόγεια έγκοιλα σε βάθος 5m από την επιφάνεια [13-18m Z-άξονα(Δύση-Ανατολή) και 5-18m X-άξονα(Νότος-Βοράς)].

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Barnes A.E. (1998). The Complex Seismic Trace Made Simple. The Leading Edge 17 pp 473-476.
2. Brown A. R. (1996). Seismic Attributes and their classification. The Leading Edge. Vol 15, No 10, pp 1090.
3. Carr M., Cooper R., Smith M., Taner M., Taylor G. (2001). The generation of a Rock and Fluid Properties Volume Via the Integration of Multiple Seismic Attributes and Log Data. www.rocksolidimages.com
4. Daniels D. J. (1996). Surface penetrating radar. IEE.
5. Kulkarni A. (1998). Artificial Neural Networks for Image Understanding.
6. Moffatt D.L., Puskar R.J. (1976). A Subsurface Electromagnetic Pulse Radar. Journal of Applied Geophysics 41(3) pp 506-518.
7. Taner M. T., Koehler F., Sheriff R. E. (1979). Complex seismic trace analysis. Geophysics. Vol. 44. No 6. pp 1041-1063.
8. Taner M. (1997). Kohonen's Self Organizing with Conscience. www.rocksolidimages.com
9. Taner M.T. (1992-2000). Attributes Revisited.
10. Βαφειδής Α. (2001). Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II.
11. Μερτίκας Σ. (1999). Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Ιων.
12. Σωτηριάδης Λ. (1995). Μαθήματα Φυσικής Γεωγραφίας. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
13. Σπανουδάκης Ν. (2002). Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Μεταπτυχιακή Εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.
14. Φυτρολάκης Ν. (1978). Συμβολή στη Γεωλογική Έρευνα της Κρήτης. Διεθνής Ελληνική Γεωλογική Εταιρία XIII/2 pp 101-115.