

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ ΤΟΥ
ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ



ΣΑΚΟΥΛΑ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (επιβλέπων), ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΕΡΔΙΚΑΤΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΠΑΝΟΥΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, Δρ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ
ΜΑΪΟΣ 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας με τη μέθοδο του γεωραντάρ, η οποία διεξήχθη στα πλαίσια μελέτης για τον εντοπισμό θαμμένων τοιχοδομών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων Κρήτης.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά την περίοδο Μαρτίου-Οκτωβρίου 2007 με χρήση του γεωραντάρ (GPR). Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκαν συνολικά εκατόν τριάντα οχτώ (138) γραμμές, σε έξι καννάβους (K1-K4 και K6-K7), με προσανατολισμό διεύθυνσεως Νότου προς Βορρά και ισοαπόσταση μεταξύ των διαδοχικών γραμμών σε κάθε κάνναβο 50cm.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων ακολούθησε η επεξεργασία τους, με χρήση συγκεκριμένου προγράμματος στη matlab. Επόμενο στάδιο αποτέλεσε η δημιουργία οριζόντιων τομών από τις οποίες και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα. Τέλος συγκρίνονται τα αποτελέσματα του γεωραντάρ και των άλλων γεωφυσικών μεθόδων (ηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση) και υποδεικνύονται πιθανές θέσεις θαμμένων ανθρωπογενών δομών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ομαλή διεξαγωγή και ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Βαφείδη Αντώνιο για την ανάθεση του θέματος και την βοήθεια του για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δρ. κύριο Σπανουδάκη Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθεια του, καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων, καθώς και στο στάδιο της επεξεργασίας τους.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Περδικάτση Βασίλειο για την συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή.

Τις πρυτανικές αρχές για τη συνεργασία τους, τον προϊστάμενο της 28^{ης} Εφορείας Βυζαντινών αρχαιοτήτων, αρχαιολόγο Α', κύριο Ανδριανάκη Μιχαήλ για την χορήγηση άδειας διεξαγωγής της γεωφυσικής έρευνας, και την αρχαιολόγο κυρία Μπούρμπου Χρύσα για τις πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα αρχαιολογικά στοιχεία της περιοχής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Αλευρά Νικόλαο, Hamdan Hamdan και Ανδρονικίδη Νικόλαο, για την βοήθεια τους στη διεξαγωγή των μετρήσεων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των ηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης, καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Χαντζηγεωργίου Μιχάλη για την συνεργασία μας καθ' όλη την περίοδο διεξαγωγής των μετρήσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	IV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ιστορικά στοιχεία.....	1
1.3 Το βυζαντινό τείχος σήμερα	2
1.4 Γεωλογία της περιοχής.....	5
1.5 Αεροφωτογραφία της πόλης των Χανίων.....	5
1.6 Περιγραφή της διπλωματικής	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	9
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	9
2.1 Εισαγωγή.....	9
2.2 Ιστορική αναδρομή του γεωραντάρ	9
2.3 Γενικές εφαρμογές	10
2.4 Εφαρμογές στην αρχαιολογία.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	16
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	16
3.1 Εισαγωγή.....	16
3.2 Διηλεκτρική σταθερά.....	16
3.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.....	17
3.4 Διατάξεις πομπού - δέκτη	18
3.5 Σύστημα TerraSIRch SIR System 3000	19
3.6 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	19
3.7 Παράμετροι διασκόπησης.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	22
ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	22
4.1 Εισαγωγή.....	22
4.2 Εξοπλισμός – παράμετροι διασκόπησης.....	22
4.3 Συλλογή των μετρήσεων.....	24
4.4 Διορθωτικά φίλτρα.....	24
4.5 Τομές γεωραντάρ	29
4.6 Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος.....	31
4.7 Οριζόντιες Τομές	32
4.8 Οριζόντιες Τομές σε διαδοχικά βάθη	35
4.9 Οριζόντιες Τομές τελική παρουσίαση	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	47
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	47
5.1 Εισαγωγή.....	47
5.2 Ηλεκτρική χαρτογράφηση	47
5.3 Ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση.....	48
5.4 Αποτελέσματα της ηλεκτρικής χαρτογράφησης.....	48
5.5 Αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης	50
5.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	56
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	56
6.1 Συμπεράσματα	56
6.2 Προτάσεις	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

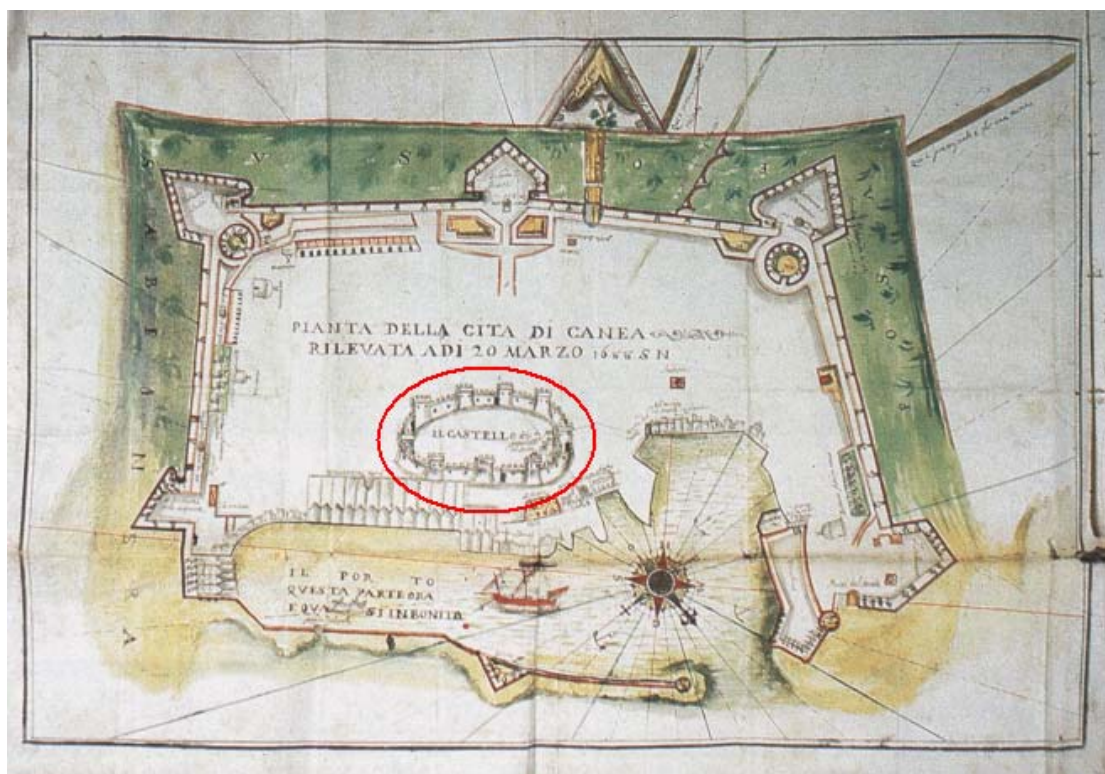
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αρχαιολογικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Γίνεται μια σύντομη ιστορική αναφορά σχετικά με την χρονολόγηση του βυζαντινού τείχους και παρουσιάζεται αντίστοιχος χάρτης. Στη συνέχεια παρατίθενται στοιχεία σχετικά με το πως είναι σήμερα το βυζαντινό τείχος, ποια είναι τα ορατά του σημεία, ποιές οι περιοχές έκτασης του καθώς και στοιχεία σχετικά με το πως ερμηνεύονται οι προεξέχουσες φάσεις του και πως σχετίζονται με την περίοδο χρονολόγησης του. Παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής, στον οποίο εντοπίζεται η περιοχή μελέτης και δίνονται οι αντίστοιχοι γεωλογικοί σχηματισμοί. Τέλος παρατίθεται τμήμα του γεωγραφικού χάρτη της πόλης των Χανίων στον οποίο εντοπίζεται ο χώρος διεξαγωγής των μετρήσεων.

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Το περίγραμμα του αρχικού τείχους που περιέβαλε το λόφο του Καστελίου και προσδιορίζει το χώρο της πόλης στις αρχές της Βενετοκρατίας, διακρίνεται καθαρά στους παλιούς χάρτες των Χανίων (εικόνα 1.1) αλλά και στο σύγχρονο ρυμοτομικό σχέδιο της πόλης. Πρόσφατες διαπιστώσεις δείχνουν ότι το τείχος πατά επάνω σε υπολείμματα παλαιότερου, κτισμένου από κατεργασμένους ειδικά για το σκοπό αυτό ογκολίθους, με αποτέλεσμα την χρονολόγηση του στους Ελληνιστικούς χρόνους. Το βυζαντινό τείχος αντίθετα στο μεγαλύτερο μέρος του έχει κατασκευαστεί με οικοδομικό υλικό από την αρχαία Κυδωνία. Για την ακριβή χρονολόγηση του τείχους υπάρχουν διάφορες απόψεις που συνδέονται με την ύπαρξη ή όχι της πόλης μετά την Αραβοκρατία.



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση του βυζαντινού τείχους στο κέντρο που περιβάλλεται από το ενετικό (Archivio di Stato, Venezia, 1688).

1.3 Το βυζαντινό τείχος σήμερα

Σήμερα το βυζαντινό τείχος είναι ορατό μόνο σε ορισμένα σημεία, ενώ σε άλλα είναι καλυμμένο από μεταγενέστερες κατοικίες. Η πρώτη οικοδομική φάση διακρίνεται από τη χρήση μεγάλων ορθογώνιων δόμων από ψαμμίτη ή πωρόλιθο και υλικό από τα κτίσματα της πόλης. Οι μεταγενέστερες φάσεις ξεχωρίζουν από τη χρήση μικρότερων δομών από πωρόλιθο, ειδικών για το σκοπό αυτό. Ανάμεσα στο υλικό της πρώτης φάσης διακρίνονται επιστύλια με τόρμους πακτώσεως, μικρά μαρμάρινα αρχιτεκτονικά μέλη και πολλά άλλα. Στο μαλακό πωρόλιθο του λόφου υπάρχουν πολλές φυσικές ή τεχνητές σπηλαιώδεις κοιλότητες ή δίοδοι. Το σχήμα του τείχους, όπως είναι σήμερα, παρά τις μεταγενέστερες επεμβάσεις ή καταστροφές, είναι ακανόνιστο, ωσειδές, ακολουθεί και συμπληρώνει το φυσικό ανάγλυφο του λόφου, με κατά μήκος άξονα Α-Δ. Κατά ένα μέρος από τη βόρεια και τη δυτική πλευρά συμπληρώνει τα κενά του φυσικού βράχου, ενώ στις υπόλοιπες πλευρές έχει χτιστεί ως ένα πλήρες οχυρωματικό έργο, με την εναλλαγή μικρών πύργων (τετράπλευρων ή πεντάπλευρων) και ευθύγραμμων τμημάτων. Το νότιο τμήμα

προστατευόταν από τάφρο, όπως συμπεραίνουμε από τη διαφορά επιπέδου της απέναντι πλευράς.

Ο μεγάλος ορθογώνιος πύργος που προστάτευε τη νότια πλευρά της δυτικής πύλης, μετασκευάστηκε σε τριώροφη κατοικία, με νεοκλασικά στοιχεία εξωτερικά, όπως τελικά διαμορφώθηκε στις αρχές του 20^{ου} αι. Προς τα ανατολικά, κατά μήκος της σημερινής οδού Καραολή Δημητρίου και Σήφακα, μεγάλα τμήματα του αρχικού τείχους είναι ορατά, όπως και πύργοι. Το τείχος στρέφεται στην οδό Δασκαλογιάννη βόρεια προς τη θάλασσα. Η βόρεια πλευρά του τείχους σώζεται περίπου στην αρχική μορφή ως το μεγάλο νεώριο της πλατείας Κατεχάκη, καλυμμένο κατά ένα μέρος από σειρά σπιτιών. Από τη δυτική πλευρά (παράλληλα στην οδό Αφεντούλιεφ) υπάρχει πέτρινη σκάλα, η οποία οδηγούσε στη βόρεια μικρή πύλη του Καστελιού και το συγκρότημα των Τούρκικων φυλακών με ενσωματωμένο μέρος του τείχους στην αντηρίδα της βάσης του. Το τείχος κατά ένα μεγάλο μέρος ανακατασκευασμένο ακολουθεί την οδό Σουμερλή και καταλήγει στη δυτική πύλη στην πλατεία του Συντριβανίου. Στο τμήμα αυτό υπάρχουν συνεχείς σπηλαιώδεις κοιλότητες, διαμορφωμένες μεταγενέστερα σε καταστήματα. Η πυρκαγιά του 1936, όπου κατέστρεψε τα κτίσματα της πλατείας, αλλά και οι βομβαρδισμοί του 1941, οδήγησαν στη σημερινή άναρχη οικοδόμηση της περιοχής.

Οι αρχαιολογικές και ιστορικές έρευνες των τελευταίων χρόνων για τον τρόπο κατασκευής του τείχους οδηγούν σε πρώιμη χρονολόγησή του (6^{ος} - 7^{ος} αι.). Η οργάνωση ενός ευρύτερου οχυρωτικού σχεδίου, παρατηρείται από τον 3^ο αι. μ.Χ. Το μεγαλύτερο, όμως, σε έκταση οχυρωτικό σχέδιο, πραγματοποιείται στα χρόνια του Ιουστινιανού. Οι οχυρώσεις των πόλεων στους πρώτους αυτούς αιώνες αποκτούν τους δικούς τους κανόνες. Κατά την περίοδο αυτή το σύστημα των οχυρώσεων γύρω από τον αστικό πυρήνα, περιλαμβάνει διαδοχικά τάφρο, προτειχίσμα με ή χωρίς πύργους, τείχος με πύργους, ακρόπολη και φυσικά πύλες, που διαθέτουν τη δική τους οχύρωση ακριβώς επειδή είναι ευάλωτες ως σημεία πρόσβασης.

Πρόσφατη ανασκαφή (2005) σε τμήμα του βυζαντινού τείχους στην νότια πλευρά, αποκάλυψε και την ύπαρξη προτειχίσματος, τουλάχιστον σε αυτή την πλευρά (εικόνα 1.2). Καθώς η τοιχοποιία είναι από μικρότερους αργούς λίθους που συνδέονται με κονίαμα, οδηγεί σε διαφορετικό τρόπο δόμησης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την κλίση που πιθανόν παρουσιάζει, αποτελούν δύο βασικά στοιχεία που παραπέμπουν σε μεταγενέστερη κατασκευή (της μεσοβυζαντινής περιόδου ή επισκευής κατά την ενετοκρατία), που επιβλήθηκε για την ενίσχυση του ήδη

υπάρχοντος συστήματος οχυρώσεως. Το μέγιστο ύψος που σώζεται είναι περίπου δύο μέτρα και το μέγιστο πάχος περίπου ογδόντα εκατοστά. Από την εσωτερική (βόρεια) πλευρά η επιμελημένη τοιχοποιία αντικαθίσταται από αργολιθοδομή, ιδιαίτερα σαθρή και πρόχειρα φτιαγμένη. Κατά μήκος της νότια πλευράς του προτειχίσματος παρατηρούνται στην ίδια ευθεία οπές (διαστάσεων 10x18cm), προφανώς αποστραγγιστικού χαρακτήρα. Επίσης, κατά την ίδια ανασκαφή, ερευνήθηκε καλύτερα η θεμελίωση τόσο του τείχους, όσο και του πύργου που σώζεται στη συγκεκριμένη πλευρά. Η κρηπίδα θεμελίωσης αποτελείται από μεγάλους ορθογώνιους δόμους, οι οποίοι πατούν κατευθείαν στο έδαφος. Μια διατάραξη των δόμων της κρηπίδας παρατηρείται στη ΒΔ εσωτερική γωνία του πύργου. Για τη θεμελίωση του πύργου, δεν παρατηρείται καμία ιδιαίτερη φροντίδα, καθώς αποτελείται από μικρούς ακατέργαστους λίθους. Διατυπώθηκε η υπόθεση, ότι πιθανόν για την καλύτερη στήριξή του να κατασκευάστηκε περιμετρικά ένα είδος λίθινης σχάρας, η μορφή της οποίας αλλοιώθηκε σήμερα από μεταγενέστερες επεμβάσεις (π.χ. διάνοιξη λάκκου).



Εικόνα 1.2 : Η ανασκαφή στη νότια πλευρά του Βυζαντινού τείχους, συμβολή των οδών Καραολή Δημητρίου & Κατρέ (Ανδριανάκης 2006).

1.4 Γεωλογία της περιοχής

Οι γεωολογικοί σχηματισμοί που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή (εικόνα 1.3) είναι: (Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Χανίων)

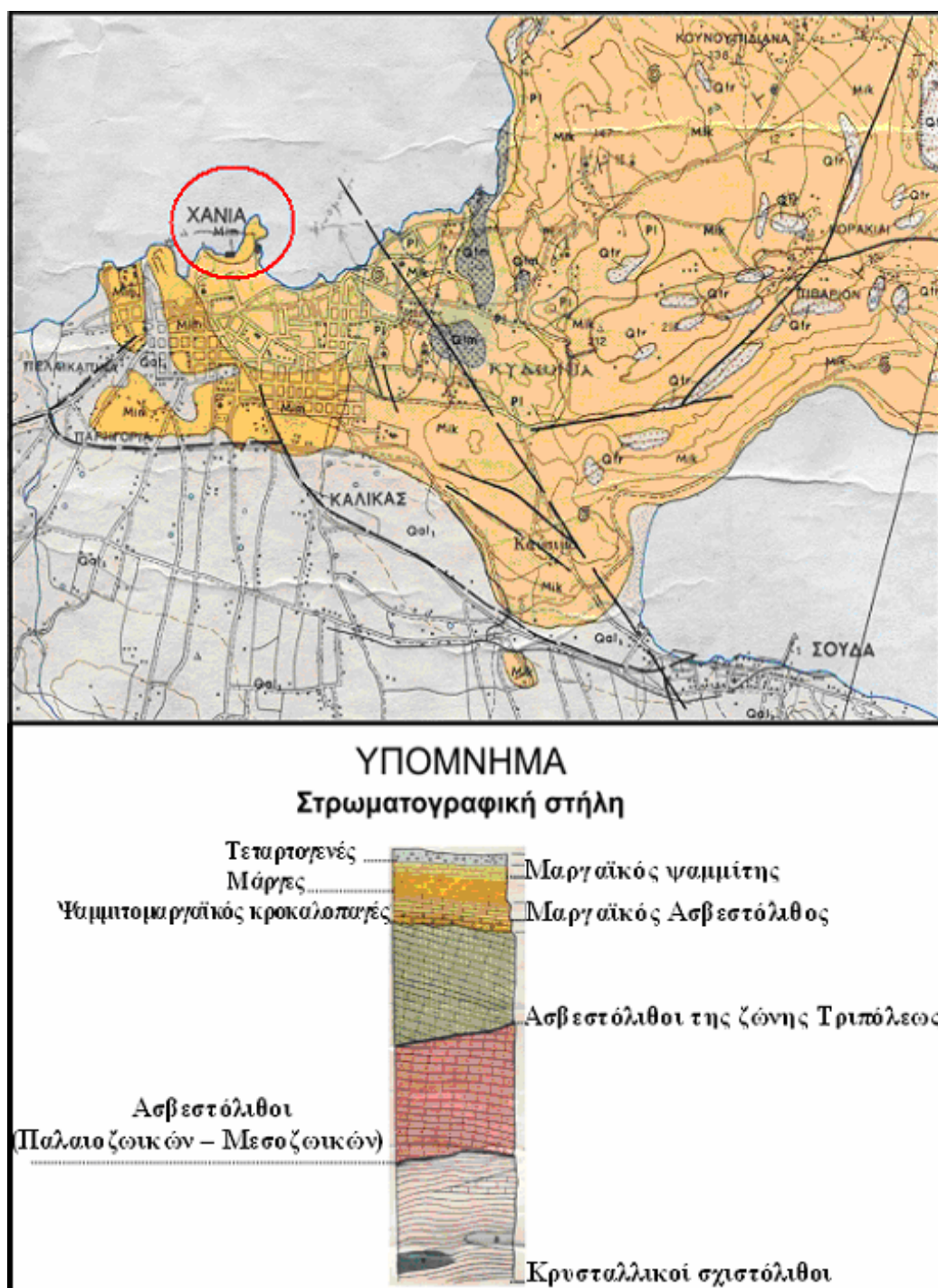
- **Τεταρτογενείς αποθέσεις:** Πρόκειται για νεότερες αποθέσεις της περιοχής οι οποίες αποτελούνται από Αλλουβιακές προσχώσεις, προσχωματικές αποθέσεις ερυθρογής, κώνους κορημάτων και πλευρικά κορήματα.
- **Νεογενείς αποθέσεις:** Αποτελούνται κυρίως από μαργαϊκούς ψαμμίτες, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, μάργες, ψαμμιτομαργαϊκούς κροκαλοπαγές.

Σε μεγαλύτερα βάθη απαντώνται τα τεκτονικά καλύμματα όπως:

- ασβεστόλιθοι της ζώνης Τριπόλεως
- ασβεστόλιθοι των παλαιοζωικών – μεσοζωικών ζωνών
- κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι των παλαιοζωικών – μεσοζωικών ζωνών.

1.5 Αεροφωτογραφία της πόλης των Χανίων

Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων. Στον χάρτη που ακολουθεί (εικόνα 1.4) εντοπίζεται (με κόκκινο πλαίσιο) γεωγραφικά ο τόπος διεξαγωγής των μετρήσεων όπως είναι σήμερα.



Εικόνα 1.3 : Τμήμα του γεωλογικού χάρτη «Φύλλο Χανίων, ΙΓΜΕ 1971» όπου απεικονίζεται (με κόκκινο πλαίσιο) η ευρύτερη περιοχή μελέτης.



Εικόνα 1.4 : Αεροφωτογραφία της πόλης των Χανίων όπου εντοπίζεται (με κόκκινο πλαίσιο) ο χώρος διεξαγωγής των μετρήσεων (Google Earth).

1.6 Περιγραφή της διπλωματικής

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του γεωραντάρ για τον εντοπισμό θαμμένων τοιχοδομών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι εφαρμογές του γεωραντάρ με έμφαση στην Αρχαιολογία. Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται στοιχεία σχετικά με την αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ, και παρουσιάζεται η μέθοδος διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε με το γεωραντάρ στην περιοχή μελέτης. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ με χρήση φίλτρων στις αρχικές μετρήσεις καθώς και δημιουργία οριζόντιων τομών για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του γεωραντάρ με άλλες γεωφυσικές μεθόδους, ώστε να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με την ύπαρξη ή όχι θαμμένων αρχαιοτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

2.1 Εισαγωγή

Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar GPR) αποτελεί όργανο γεωφυσικών διασκοπήσεων που και εδώ και μερικά χρόνια χρησιμοποιείται στην απεικόνιση του υπεδάφους χωρίς να προκαλεί καταστροφή των εδαφών. Οι εφαρμογές του καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα διαφόρων επιστημών (γεωλογικές, περιβαλλοντικές, αρχαιολογικές κ.α). Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή για τις εφαρμογές του γεωραντάρ και δίνεται μια σειρά αρχαιολογικών εφαρμογών του που πραγματοποιήθηκαν στην Ελλάδα και στο εξωτερικό.

2.2 Ιστορική αναδρομή του γεωραντάρ

Από τα μέσα της δεκαετίας του '80 το γεωραντάρ έγινε ιδιαίτερα δημοφιλές στις κοινότητες των γεωφυσικών, των γεωλόγων και των αρχαιολόγων. Σε γεωλογικές εφαρμογές χρησιμοποιείται από το 1960 για ραδιοανίχνευση σε παγετώνες. Η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικά (EM) κύματα για τον προσδιορισμό της θέσης θαμμένων αντικειμένων ήταν στη Γερμανία το 1910. Επιπλέον χρήσεις του γεωραντάρ περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του πάχους στρωμάτων πάγου (Annan and Davis 1976), την ανίχνευση ρωγμών σε κοιτάσματα αλατιού (Thierbach 1974) και τη μελέτη κρυσταλλικών πετρωμάτων (Nilson 1983).

Οι Moffat και Puskar παρουσίασαν ένα από τα πρώτα και πολλά υποσχόμενα συστήματα GPR το 1976. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε πληθώρα περιπτώσεων όπως τον εντοπισμό ρωγμών σε τούνελ και ορυχεία καθώς και της περιεχόμενης υγρασίας των εδαφών. Επιπλέον συνεισφορά των Moffat και Puskar (1976) αποτέλεσε η ανάπτυξη βασικών αρχών για τον προσδιορισμό της ταχύτητας

των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το 1982 ο Ulriksen και άλλοι επιστήμονες ανέπτυξαν ακόμα πιο βελτιωμένες μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων του γεωραντάρ. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω βελτίωση των μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων GPR (Smemoe 2000).

2.3 Γενικές εφαρμογές

Με βάση την κεντρική συχνότητα εκπομπής οι εφαρμογές του γεωραντάρ διακρίνονται σε τρεις κατά κύριο λόγο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά εφαρμογές όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα και χρησιμοποιούνται κεραίες των 50 MHz ή και μικρότερες. Η δεύτερη αναφέρεται στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing, NDT), όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο και οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000 MHz. Και η τρίτη αναφέρεται στην αρχαιολογία και σε άλλες περιβαλλοντικές εφαρμογές όπου το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 50 έως 500 MHz. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποιες επιπλέον εφαρμογές του γεωραντάρ σε διάφορους κλάδους επιστημών.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ
Ανίχνευση εγχοίλων και ασυνεχειών
Χαρτογράφηση βυθισμάτων
Χαρτογράφηση επιφανειακών κοιτασμάτων
Έρευνα κοιτασμάτων και αξιολόγηση ορυκτών πόρων
Πάχος στρωμάτων τύρφης και αξιολόγηση του
Χαρτογράφηση ρωγμών σε ορυκτό αλάτι
Χαρτογράφηση προσχώσεων, επιπέδων ασυνεχειών κλπ
Χαρτογράφηση γεωλογικών δομών
Χαρτογράφηση λιμναίων και ποτάμιων ιζημάτων

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ
Χαρτογράφηση ρυπασμένων περιοχών Χαρτογράφηση ρύπων στο υπόγειο νερό Έρευνες σε χωματερές Εντοπισμός θαμμένων βυτίων και βαρελιών Εντοπισμός διαρροής αερίων Έρευνες για νερό
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΑΓΕΤΩΝΩΝ
Χαρτογράφηση του πάχους των πάγων Προσδιορισμός εσωτερικής δομής των παγετώνων Μελέτη κίνησης των πάγων Ανίχνευση ρωγμών στη βάση των παγετώνων Χαρτογράφηση της στρωματογραφίας του χιονιού Χαρτογράφηση καναλιών ροής νερού στους παγετώνες Μελέτη της ισορροπίας της μάζας κάτω από τον παγετώνα
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ
Ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους Ανίχνευση αστοχιών /κενών Προσδιορισμός οπλισμού στο τσιμέντο Προσδιορισμός σωλήνων και καλωδίων Μελέτη ακεραιότητας κατασκευαστικών υλικών Δοκιμές στο τσιμέντο (concrete testing)
ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ
Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών Εντοπισμός αρχαίων τάφων Χαρτογράφηση πριν την εκσκαφή Εντοπισμός, χαρτογράφηση αρχαίων δρόμων Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών

ΔΙΚΑΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ

εντοπισμός θαμμένων στόχων (πτώματα, μπάρες χρυσού κλπ)

Πίνακας 2.1 : Εύρος χρήσεων γεωραντάρ (Reynolds 1998), (Mellet 1995), (Al-Dajani 1990), (Toshioka 1995), (Tsoflias 1999), (Al-Nuaimy 2000), (Hugenschmidt 1998).

2.4 Εφαρμογές στην αρχαιολογία

Σημαντικό ρόλο δύναται να έχει η μέθοδος GPR στην Αρχαιολογία. Μερικές από τις εφαρμογές στον τομέα της Αρχαιολογίας είναι οι παρακάτω (www.geo-analysis.com):

- Εντοπισμός θαμμένων τοιχοδομών, αρχαίων κτισμάτων και προσδιορισμός της θέσης τους,
- Καταγραφή θεμελίων και πιθανών διαβρώσεων σε αναδειχθέντα κτίσματα,
- Έρευνα κάτω από υπάρχοντα αρχαιολογικά μνημεία ή κτίσματα χωρίς την παραμικρή παρέμβαση σε αυτά,
- Εντοπισμός μικροαντικειμένων.

Στη συνέχεια δίνεται μια σειρά εφαρμογών του GPR σε διάφορες περιοχές με σκοπό τον εντοπισμό αρχαιολογικών ευρημάτων.

Ένας σημαντικός αριθμός από τύμβους της εποχής Χαλκού στην περιοχή του Τριγώνου Έβρου, εξερευνήθηκε με γεωφυσικές τεχνικές, με στόχο να διερευνηθεί το περιεχόμενο και η λειτουργία τους. Οι τύμβοι που ερευνήθηκαν είναι ο Τύμβος Ελαφοχωρίου-Δάφνης, ο Τύμβος Σπηλαίου, ο Τύμβος στην θέση Λάδη και ο Τύμβος της Μικρής Δοξιπάρας. Στην περιοχή Ελαφοχωρίου - Δάφνης διεξήχθησαν μετρήσεις με το γεωραντάρ (GPR) πάνω από ελεγχόμενο στόχο (ανασκαμμένο Ρωμαϊκό τάφο), με σκοπό τη ρύθμιση του οργάνου και την καλύτερη απόκριση του. Οι γεωφυσικές έρευνες διεξήχθησαν κυρίως με τη μέθοδο του γεωραντάρ ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν επίσης γεωηλεκτρικές και μαγνητικές διασκοπήσεις. Η διασκόπηση των τύμβων έγινε κατά μήκος παράλληλων γραμμών με χρήση δύο κεραίων στα 450 MHz και 225 MHz (Αρχαιο-τηλεπισκοπικά νέα 1999, www.ims.forth.gr/newsletters-gr_02.html#14).



Εικόνα 2.1: Γεωφυσική διασκόπηση στην περιοχή Τριγώνου Έβρου.

Γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Τσουκαλιά Αλοννήσου, μέσω της εφαρμογής των μαγνητικών τεχνικών και του γεωραντάρ (GPR). Ο σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν να ερευνηθούν μερικοί άλλοι τομείς ενδιαφέροντος που δεν καλύφθηκαν κατά τη διάρκεια προηγούμενης έρευνας. Οι διασκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Nebraska-Lincoln (καθ. Έφη Αθανασσοπούλου), κατά τη διάρκεια της περιόδου της 19-26ης Ιουνίου, το 2000, και κάλυψαν μια περιοχή περίπου 3.000 τετραγωνικών μέτρων. Η μαγνητική χαρτογράφηση έδειξε ότι διάφορες ανωμαλίες σχετικές με τα αρχιτεκτονικά λείψανα είναι προφανείς στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής. Οι περισσότερες από αυτές τις ανωμαλίες βρίσκονται στις χαμηλότερες κλίσεις του κοντινού λόφου. Διάφορα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην ίδια περιοχή με χρήση του γεωραντάρ ήταν επιτυχή στον προσδιορισμό της προβολής των τοίχων, που επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της μαγνητικής έρευνας. (Αρχαιοτηλεπισκοπικά νέα 2001, [www.archaeometry.gr/oldv/publication/arch-tileskopikanea /index.htm](http://www.archaeometry.gr/oldv/publication/arch-tileskopikanea/index.htm)).



Εικόνα 2.2: Περιοχή Αλοννήσου.

Σε γεωφυσικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην αρχαιολογική θέση Αθηαίνου-Μάλλουρα, στην Κύπρο, κατά το διάστημα 1994–1995, με την συνεργασία του Davidson College, το γεωραντάρ (G.P.R.) χρησιμοποιήθηκε σε συγκεκριμένες

περιοχές με σκοπό τον εντοπισμό τοιχοδομών και τάφων. Ένας αριθμός πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε πάνω από ήδη ανασκαμμένους τάφους και λαγούμια βοήθησε στην ακριβή ρύθμιση του γεωραντάρ. Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων αναμένεται να αποτελέσουν έναυσμα για την συνέχιση των αρχαιολογικών ερευνών υποδεικνύοντας συγκεκριμένους στόχους που σχετίζονται με την παρουσία αρχαιολογικών λειψάνων (www.archaeometry.gr/oldv/publication/sybosio/09.htm).

Το καλοκαίρι του 2002 με τη διεξαγωγή εκσκαφών του πανεπιστημίου του Denver εντοπίστηκε νερό στην περιοχή Lower Market της Ιορδανίας, που συνδέεται με την ύπαρξη κήπου της Ρωμαϊκής εποχής. Επίσης ανακαλύφθηκαν γλυπτά που κατατάσσονται στην Βυζαντινή ή Ρωμαϊκή εποχή, καθώς και τείχη της εποχής εκείνης. Οι ανακαλύψεις αυτές επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των ερευνών με χρήση GPR που είχαν προηγηθεί.

Μελέτες του ίδιου πανεπιστημίου, πραγματοποιήθηκαν επίσης στην Αμερική, χρησιμοποιώντας το γεωραντάρ με σκοπό την ανεύρεση των kivas. Τα kivas είναι ημι-υπόγειες δομές που χρησιμοποιούνται για οικιακή και τελετουργική δραστηριότητα. Χρησιμοποιώντας κεραία 500 MHz το εσωτερικό τοίχωμα του kivas ήταν αρκετά ορατό στα ρηχά στρώματα, ενώ σε βαθύτερα στρώματα παρατηρούνται διαφορές. Με επανάληψη των μετρήσεων το Μάιο του 2003 χρησιμοποιώντας κεραία 400 MHz οι εξωτερικοί τοίχοι είναι ακόμη πολύ ορατοί αλλά το εσωτερικό τοίχωμα διακρίνεται ευκολότερα με αποτέλεσμα τη δημιουργία καλύτερων χαρτών. Επίσης υπάρχουν ενδείξεις για ένα ακόμη kivas κοντά στην περιοχή Comb Wash της Utah, αλλά δεν έχουν γίνει ακόμη ανασκαφές ώστε να επιβεβαιωθεί η υπόθεση.

Το ιστορικό πάρκο του Colorado, το οποίο βρίσκεται τέσσερα μίλια νοτιοανατολικά από το κέντρο του Denver περιέχει το αρχαιότερο σπίτι της πόλης. Εκεί κατόπιν διεξαγωγής εκσκαφών το 2003, βρέθηκε ένας πλαστικός σωλήνας νερού. Το δάπεδο αποτελούνταν από ένα λεπτό στρώμα άμμου πάχους 3 cm και μέσα σε αυτό βρέθηκε ένα μικρό κομμάτι πλακόστρωτο. Η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την μελέτη της αποτελεσματικότητάς του όσον αφορά στη χαρτογράφηση των αρχαιολογικών χώρων σε μια σειρά δοκιμών στις περιοχές Oahu and Hawaii από το πανεπιστήμιο του Denver. Οι διασκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Δεκέμβριο του 2005 κατά τη διάρκεια μιας ξηρής περιόδου που θεωρείται γενικά καλύτερη για γεωφυσική έρευνα με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Χρησιμοποιήθηκε GSSI SIR – 3000 σύστημα με 400 και 270 MHz κεραίες. Τα

αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως παρά τη σύνθετη στρωματογραφία της περιοχής, παρατηρήθηκαν αντανakλάσεις που σχετίζονται με την ύπαρξη διαφόρων θαμμένων αντικειμένων-δομών (mysite.du.edu/~lconyer/).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

3.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται με επιτυχία στην έρευνα μικρού βάθους. Χρησιμοποιεί ραδιοκύματα συχνότητας από 1 έως 2000 MHz και η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Η κεραία πομπός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό παλμό διάρκειας μερικών νανοδευτερολέπτων (10^{-9} sec), το σήμα που φτάνει στην κεραία δέκτη προωθείται στην μονάδα ελέγχου όπου και καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού.

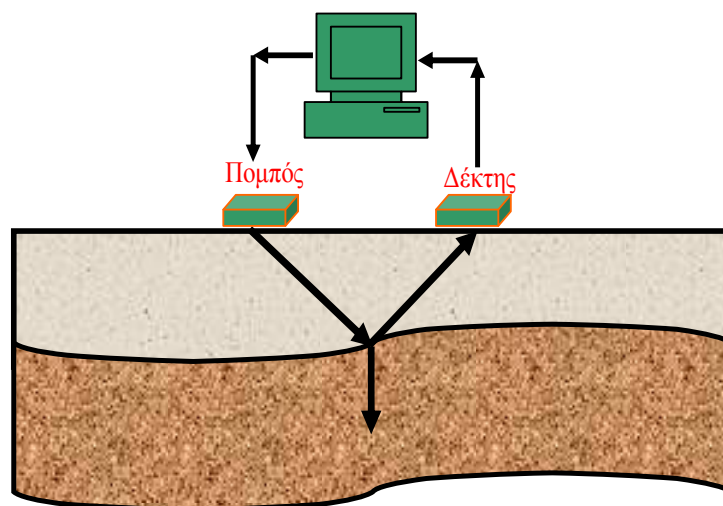
3.2 Διηλεκτρική σταθερά

Η ηλεκτρική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά είναι αδιάστατο μέγεθος και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέγεθος στις ηλεκτρομαγνητικές διασκοπήσεις. Ορίζεται από τη σχέση $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, όπου ϵ_0 είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού ($8,854 \times 10^{-12}$ Farad/meter) και ϵ η ηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου. Η διηλεκτρική σταθερά σχετίζεται με την ικανότητα του μέσου διάδοσης να πολώνει ηλεκτρικά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και να ελέγχει την ταχύτητα διάδοσης του. Είναι χαρακτηριστική για κάθε διηλεκτρικό υλικό και εξαρτάται από την συχνότητα (f) του κύματος (αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται μείωση της ϵ_r).

3.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Το γεωραντάρ όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω εκπέμπει μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό από κεραία - πομπό, ο οποίος ταξιδεύει στο υπέδαφος με ταχύτητα η οποία εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο υπέδαφος, ωστόσο συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Το κύμα ανακλάται και φτάνει στην κεραία δέκτη όπου και καταγράφεται (σχήμα 3.1).

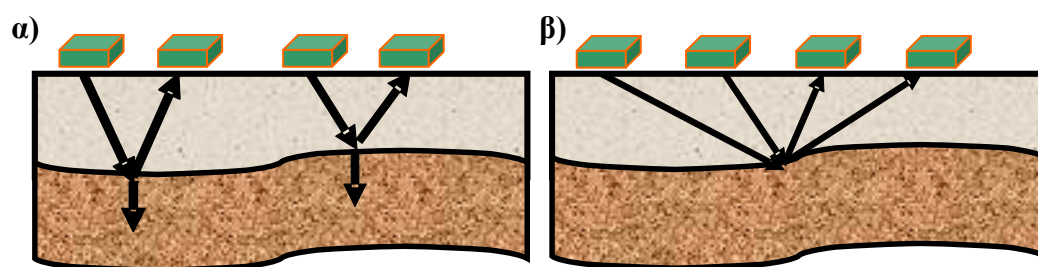
Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη ανεξαρτήτως της διαδρομής του, ονομάζεται χρόνος διαδρομής. Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νανο-δευτερόλεπτο ($1ns = 10^{-9}s$). Δυο κατηγορίες κυμάτων καταγράφονται από το δέκτη. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν κύματα που ταξιδεύουν απ' ευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Αυτά τα κύματα, αφενός μεν φτάνουν πρώτα, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη απ' ότι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου δε έχουν μεγάλο πλάτος, αφού δεν υφίστανται εξασθένιση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κύματα που διαδίδονται στο υπέδαφος. Η καταγραφή του πλάτους των κυμάτων σε σχέση με το χρόνο διαδρομής ονομάζεται ίχνος. Όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα, αλλάζει κατεύθυνση δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει πολύ μικρού μεγέθους εμπόδια, τα οποία το αναγκάζουν να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντήρηση συμβαίνει, όταν το κύμα “παγιδευτεί” σε κάποιο γεωλογικό στρώμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κύμα ανακλάται πολλές φορές με συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών ανακλάσεων (Σπανουδάκης 2007).



Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ (Σπανουδάκης 2007).

3.4 Διατάξεις πομπού - δέκτη

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης πομπού - δέκτη ανάλογα με το σκοπό της έρευνας. Κύρια διάταξη για τη συλλογή δεδομένων γεωραντάρ είναι αυτή της σταθερής απόστασης πομπού δέκτη (common offset) ή ανάκλασης, όπου πομπός και δέκτης κινούνται κατά μήκος γραμμής μελέτης στην επιφάνεια του εδάφους, διατηρώντας την μεταξύ τους απόσταση σταθερή (σχήμα 3.2α). Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σταθμών παρατήρησης ονομάζεται ισο-απόσταση ή βήμα διασκόπησης. Όταν τα ίχνη απεικονίζονται το ένα δίπλα στο άλλο, σχηματίζεται η τομή γεωραντάρ (GPR section). Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει κυρίως στην χαρτογράφηση του υπεδάφους. Αν είναι γνωστή η ηλεκτρική διαπερατότητα του υπεδάφους, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό της ταχύτητας χρησιμοποιείται η διάταξη κοινού σημείου βάθους (common depth point - CDP), όπου επιλέγεται στη επιφάνεια του εδάφους κάποιο σταθερό σημείο, εκατέρωθεν του οποίου τοποθετούνται πομπός και δέκτης (σχήμα 3.2β). Τέλος, αναφέρεται η μέθοδος της τομογραφίας, όπου πομπός και δέκτης τοποθετούνται ξεχωριστά σε κοντινές γεωτρήσεις, εκατέρωθεν τοίχων ή στοών μεταλλείων (Σπανουδάκης 2007).



Σχήμα 3.2: Τρόποι συλλογής δεδομένων. α) Η διάταξη σταθερής απόστασης πομπού δέκτη και β) η διάταξη κοινού σημείου βάθους (Σπανουδάκης 2007).

3.5 Σύστημα TerraSIRch SIR System 3000

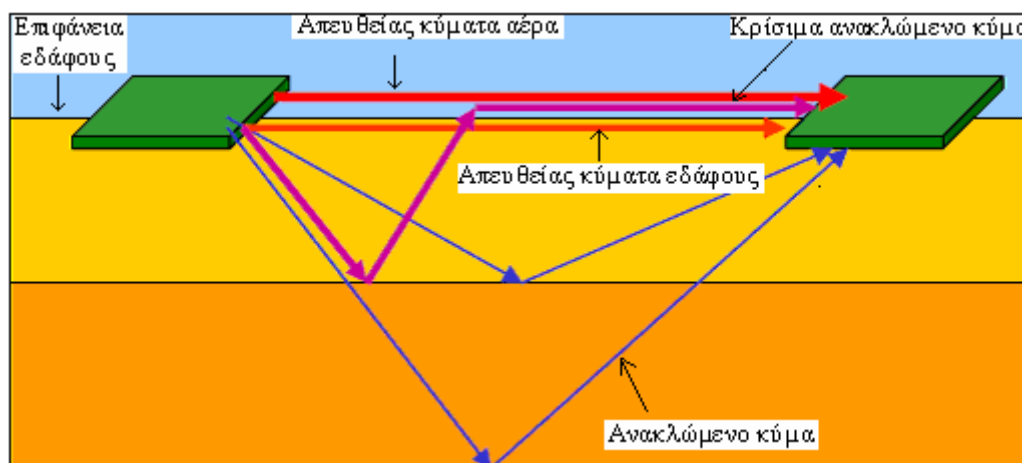
Το γεωραντάρ SIR – 3000 είναι μικρό και ελαφρύ, γεγονός που το καθιστά αρκετά εύχρηστο. Έχει το πλεονέκτημα της δημιουργίας τρισδιάστατων εικόνων και χρησιμοποιεί κεραίες από 100 MHz έως 1.2 MHz, γεγονός που το καθιστά οικονομικά προσιτό. Πρόκειται για ένα αξιόπιστο όργανο που συνεχώς βελτιώνεται (www.geophysical.com).



Εικόνα 3.3: TerraSIRch SIR System 3000 (www.geophysical.com)

3.6 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Όπως φαίνεται στην εικόνα ο δέκτης κατοπτρεύει τρία είδη κυμάτων:



Σχήμα 3.3: Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Βαφείδης 2001, Σπανουδάκης 2001).

Ανακλώμενα κύματα: Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από τον πομπό, διαδίδονται στο μέσο μέχρι να συναντήσουν επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, όπου ανακλώνται και επιστρέφουν στο δέκτη.

Απ' ευθείας κύματα: Ονομάζονται εκείνα που διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια.

Κρίσιμα διαθλώμενα κύματα: Προκύπτουν όταν σε μία διασκόπηση κοινού ενδιάμεσου σημείου, η απόσταση πομπού δέκτη υπερβεί μια κρίσιμη τιμή X_c (Βαφείδης 2001).

3.7 Παράμετροι διασκόπησης

Οι παράμετροι διασκόπησης που καλείται να ρυθμίσει ο χρήστης είναι (Σπανουδάκης 2001).

- **Συχνότητα εκπομπής:** Το βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα. Μεγάλη συχνότητα συνεπάγεται μεγάλη διακριτική ικανότητα ενώ βάθος διασκόπησης μικρό. Το αντίθετο συμβαίνει επιλέγοντας μικρότερη συχνότητα εκπομπής.
- **Ο ολικός χρόνος καταγραφής:** Σχετίζεται άμεσα με το βάθος διασκόπησης και καθορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία σταματούν οι καταγραφές.

- **Το διάστημα δειγματοληψίας :** Συνδέεται με 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.
- **Το βήμα διασκόπησης:** Το βήμα διασκόπησης ορίζει την απόσταση δυο διαδοχικών σημείων πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις.
- **Την απόσταση των κεραιών:** Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης και στο συντελεστή ανάκλασης, συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένησης του κύματος αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση.
- **Την υπέρθεση:** Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους με στόχο την απομάκρυνση του τυχαίου θορύβου.
- **Τον προσανατολισμό των κεραιών :** Τέλος μελετάται ο προσανατολισμός των κεραιών, δηλαδή τη σχετική μεταξύ τους θέση και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

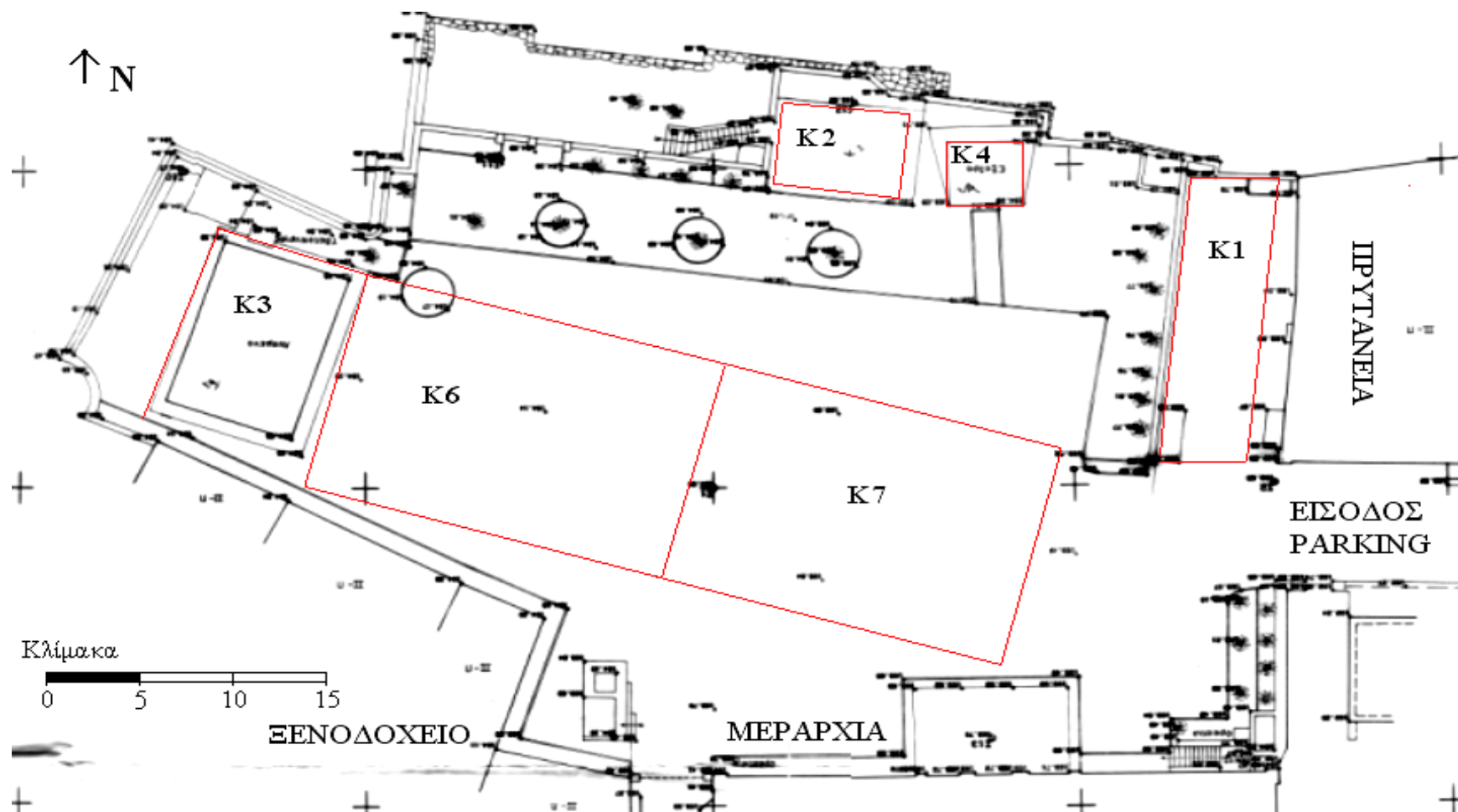
ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθώς επίσης και χάρτης της περιοχής στον οποίο παρουσιάζονται αναλυτικά οι κάνναβοι συλλογής των δεδομένων. Κατόπιν γίνεται παρουσίαση των μεθόδων επεξεργασίας, όπου χρησιμοποιούνται φίλτρα απομάκρυνσης του θορύβου και ενίσχυση, με στόχο την ανάδειξη των ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που με τη σειρά της οδηγεί σε πιο έγκυρα αποτελέσματα. Ακολουθούν οριζόντιες τομές σε διάφορα βάθη και τέλος παρουσιάζεται ο χάρτης στον οποίο δίνονται τα τελικά αποτελέσματα.

4.2 Εξοπλισμός – παράμετροι διασκόπησης

Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το σύστημα SIR – 3000 της εταιρίας GSSI. Η κεντρική συχνότητα εκπομπής των ραδιοκυμάτων ήταν 400MHz, το διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 146.5 picosecond και το βήμα διασκόπησης ίσο με 5 cm.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα κάλυψης της περιοχής μελέτης, διακρίνονται οι κάναβοι όπου πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές μετρήσεις (K1-K4, K6-K7).

4.3 Συλλογή των μετρήσεων

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκαν συνολικά εκατόν τριάντα οχτώ (138) γραμμές μελέτης, σε έξι καννάβους (K1-K4 και K6-K7), με στόχο τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων. Ο προσανατολισμός των γραμμών μελέτης ακολούθησε τη διεύθυνση Νότου προς Βορρά και η σάρωση των καννάβων ακολούθησε τη διεύθυνση Δύση προς Ανατολή.

4.4 Διορθωτικά φίλτρα

Η επεξεργασία των δεδομένων διευκολύνει στον εντοπισμό των ανακλαστήρων, που ενδεχομένως σχετίζονται με θαμμένες ανθρωπογενείς δομές (π.χ. τοιχοδομές). Για το σκοπό αυτό ακολουθήθηκε μια σειρά βημάτων που περιγράφονται αναλυτικά για τη γραμμή μελέτης f009 του καννάβου 6 (σχήμα 4.2). Η επεξεργασία έγινε με χρήση του προγράμματος GPR PRO.

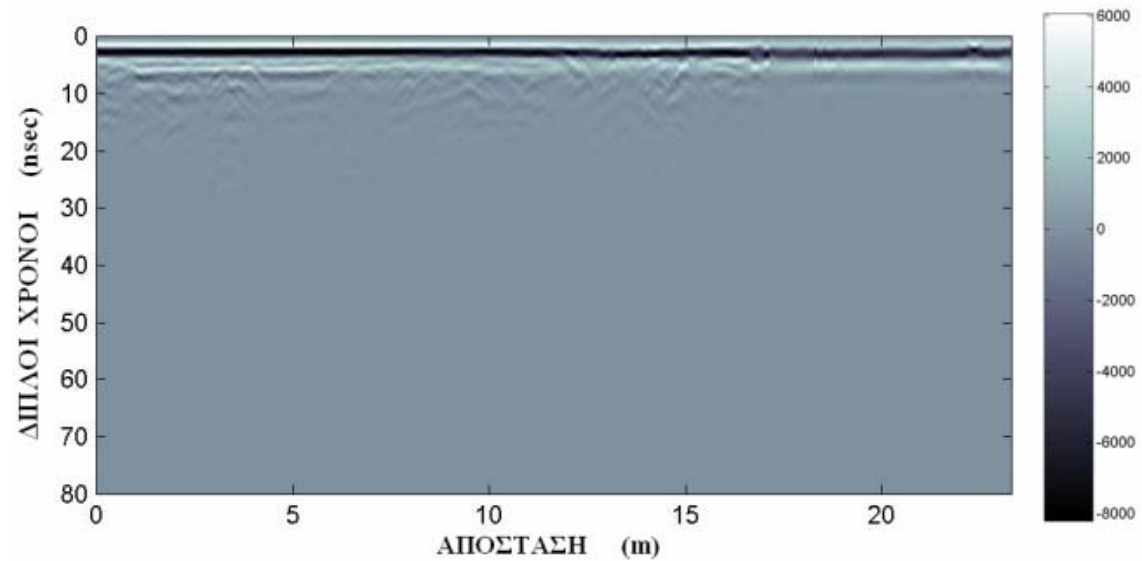
Αρχικά εφαρμόζεται το φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (Dewow) και ακολουθεί εκθετική ενίσχυση (sec) των δεδομένων (Πουλιούδης 1999).

Ύστερα από την εφαρμογή μονοδιάστατων φίλτρων έγινε χρήση των φυσικών χαρακτηριστικών (Physical Attributes) με τη σειρά που δίνονται παρακάτω (Σπανουδάκης 2002):

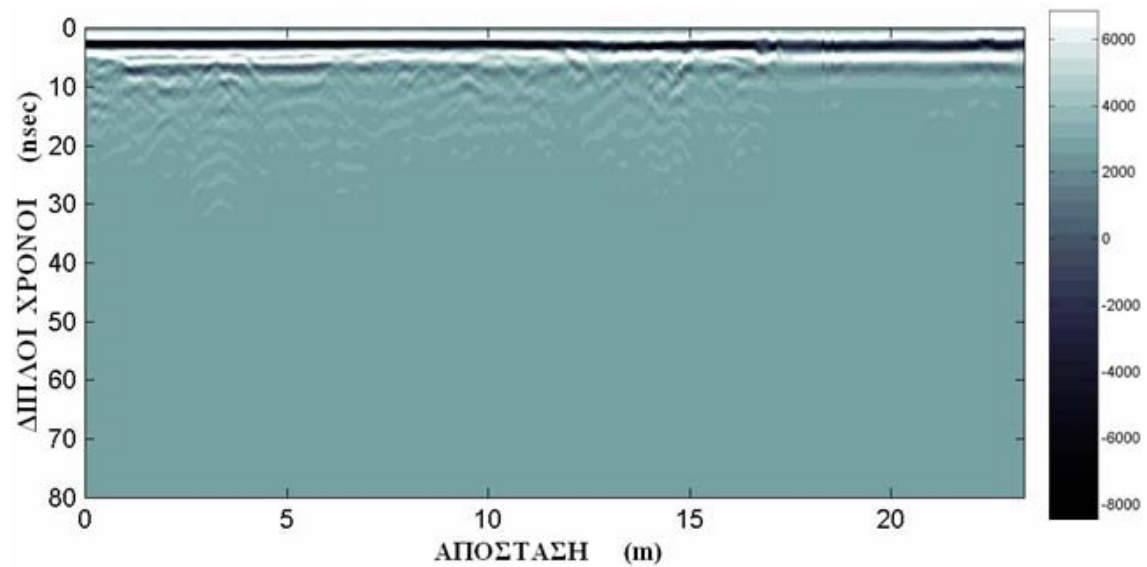
- **Στιγμιαίο πλάτος** (instantaneous envelope): Το στιγμιαίο πλάτος $E(t)$ εκφράζει την ισχύ των ανακλώμενων κυμάτων που καταγράφονται σε χρόνο t .
- **Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB** (dB instantaneous envelope): Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB δίνεται από τη σχέση $20\log E(t)$, όπου $E(t)$ αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πλάτος.
- **Στιγμιαία φάση** (instantaneous phase): Το χαρακτηριστικό αυτό, χρησιμεύει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες (π.χ. απευθείας κύμα), που καταγράφεται σε χρόνο t . Το φυσικό αυτό χαρακτηριστικό είναι ανεξάρτητο από το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Τέλος γίνεται εφαρμογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (Geometrical Attributes) και συγκεκριμένα της συνάφειας (semblance).

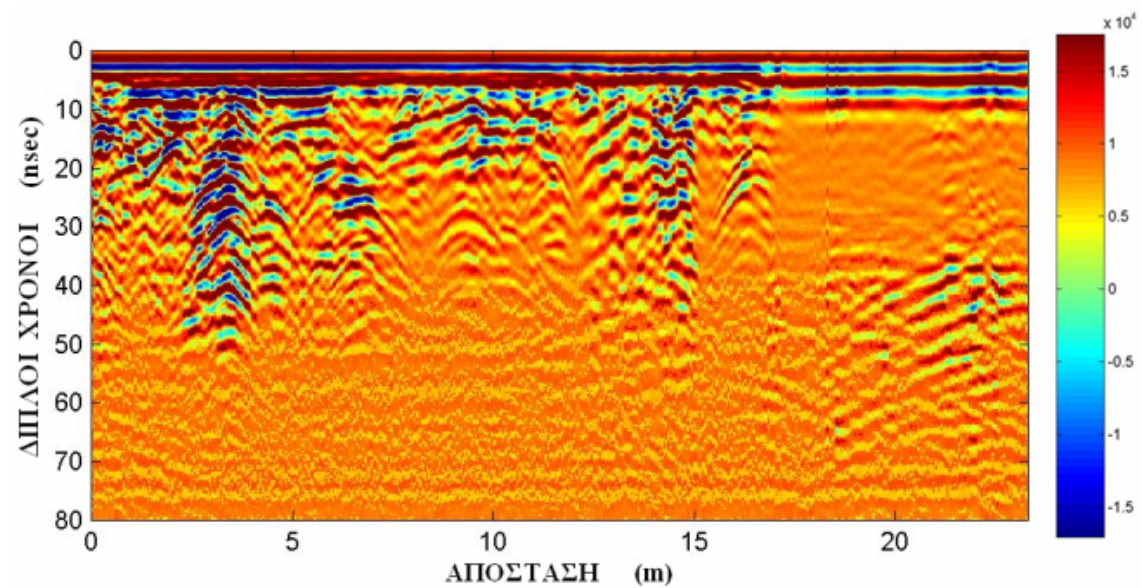
Για κάθε ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά εφαρμόζεται φίλτρο εξομάλυνσης. Τα αποτελέσματα των αντίστοιχων φίλτρων δίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε συνολικά για όλες τις γραμμές κάθε καννάβου (138 γραμμές, 6 καννάβοι).



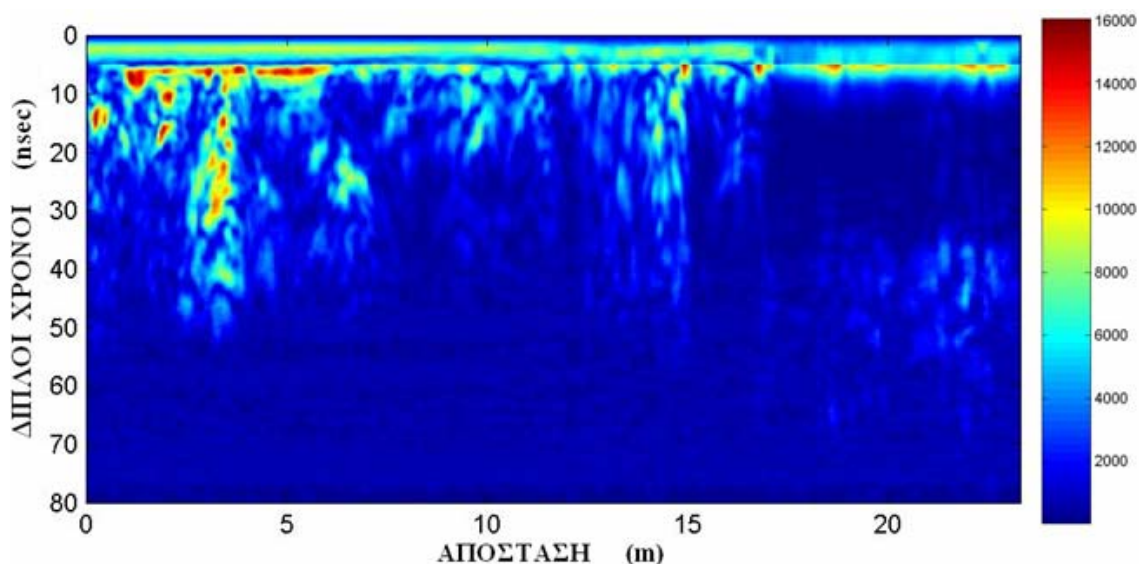
Εικόνα 4.1: Τομή γεωραντάρ πριν την επεξεργασία (γραμμή μελέτης f009, κάνναβος 6).



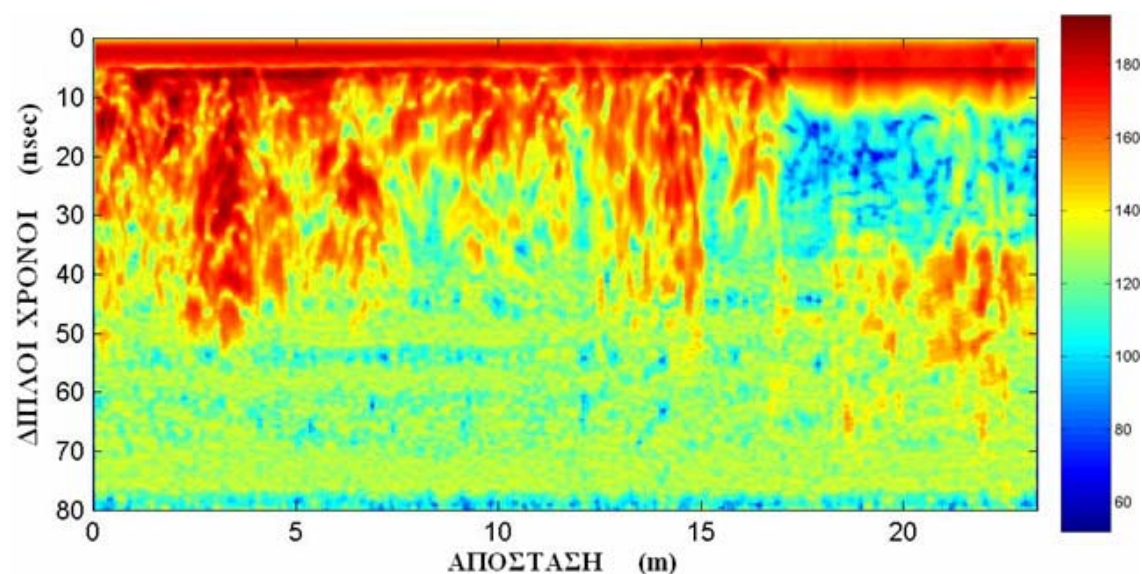
Εικόνα 4.2: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (Dewow), (γραμμή μελέτης f009, κάνναβος 6).



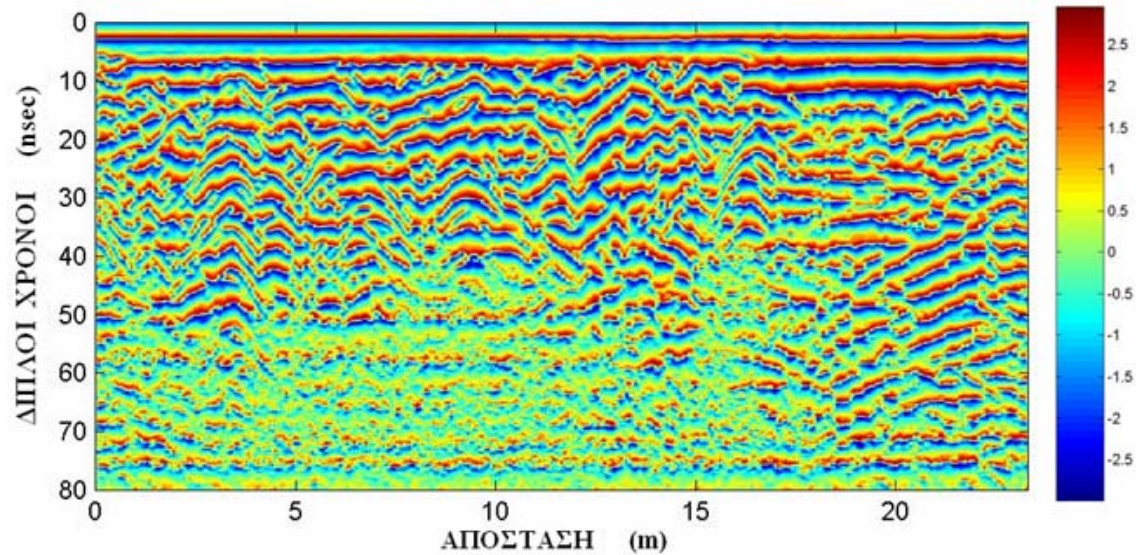
Εικόνα 4.3: Τομή γεωραντάρ με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων (Sec), (γραμμή μελέτης f009, κάνναβος 6), όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 50 ns.



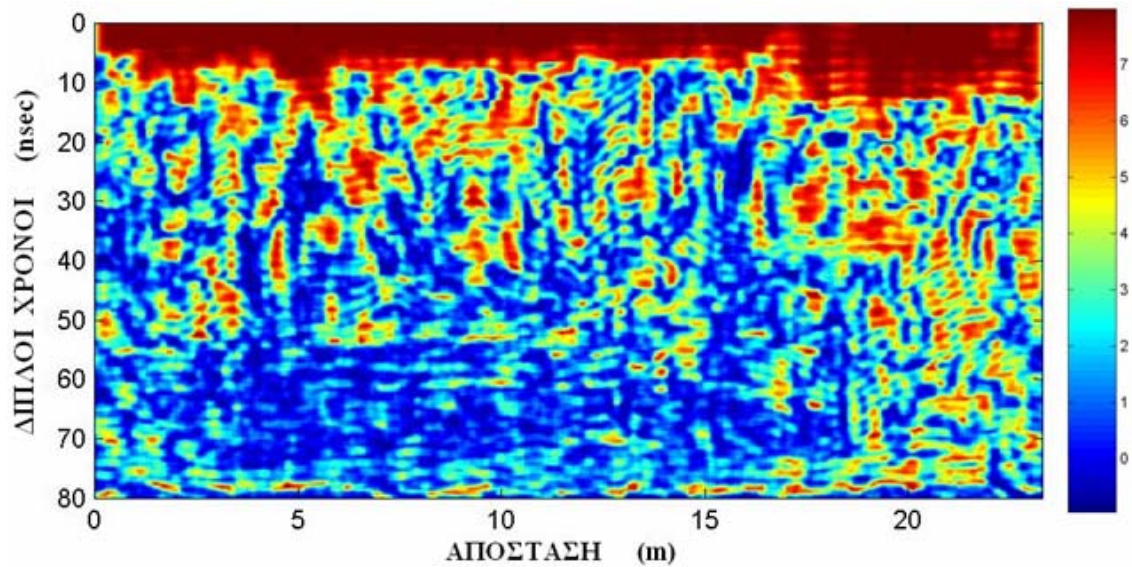
Εικόνα 4.4: Στιγμαίο πλάτος τομής γεωραντάρ (instantaneous envelope, γραμμή μελέτης f009, κάρναβος 6). Τα μεγαλύτερα πλάτη (με κόκκινο χρώμα) αντιστοιχούν στο νοτιότερο τμήμα της γραμμής (οριζόντια απόσταση 0 έως 5m).



Εικόνα 4.5: Στιγμαίο πλάτος σε κλίμακα dB τομής γεωραντάρ (dB instantaneous envelope, γραμμή μελέτης f009, κάρναβος 6). Με κόκκινο χρώμα (μεγάλο πλάτος) απεικονίζονται τα πλάτη των απευθείας κυμάτων (για χρόνο διαδρομής μικρότερο από 10ns) και των ανακλώμενων από ανθρωπογενείς δομές (χρόνος διαδρομής κυμάτων – διπλός χρόνος μικρότερος από 50ns).



Εικόνα 4.6: Στιγμαία φάση τομής γεωραντάρ (instantaneous phase, γραμμή μελέτης f009, κάρναβος 6). Η φάση κυμαίνεται από -3 rad (μπλέ χρώμα) έως 3 rad (κόκκινο χρώμα).

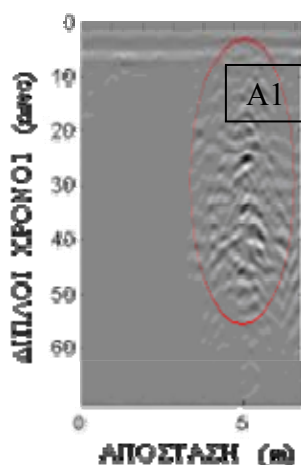


Εικόνα 4.7: Συνάφεια τομής γεωραντάρ (semblance, γραμμή μελέτης f009, κάρναβος 6). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τμήματα της τομής γεωραντάρ όπου τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εμφανίζουν αυξημένη συνάφεια.

4.5 Τομές γεωραντάρ

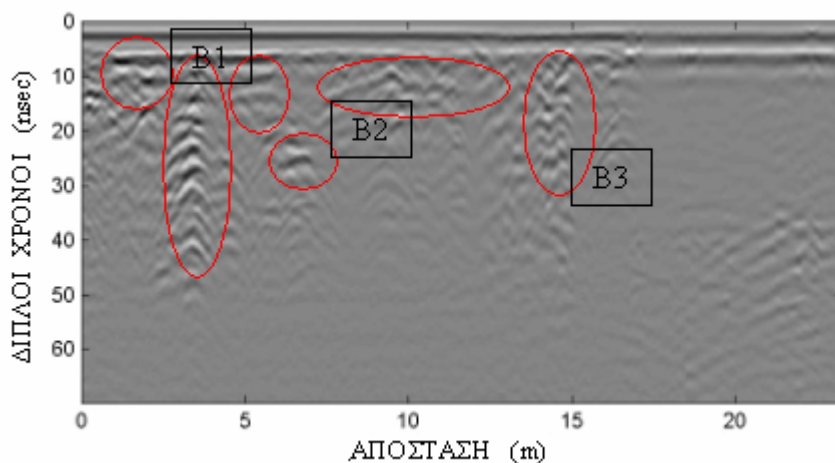
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τομές γεωραντάρ κατά μήκος επιλεγμένων γραμμών μελέτης (σχήμα 4.2). Με κόκκινο σημειώνονται ανακλώμενα – περιθλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προέρχονται κυρίως από θαμμένες τοιχοδομές. Ο κατακόρυφος άξονας των τομών γεωραντάρ αντιστοιχεί στο χρόνο διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ns, και ο οριζόντιος στην απόσταση σε m.

Στην τομή γεωραντάρ L005 (εικόνα 4.8) περιθλώμενα κύματα παρατηρούνται στο βόρειο τμήμα της (ζώνη A1).



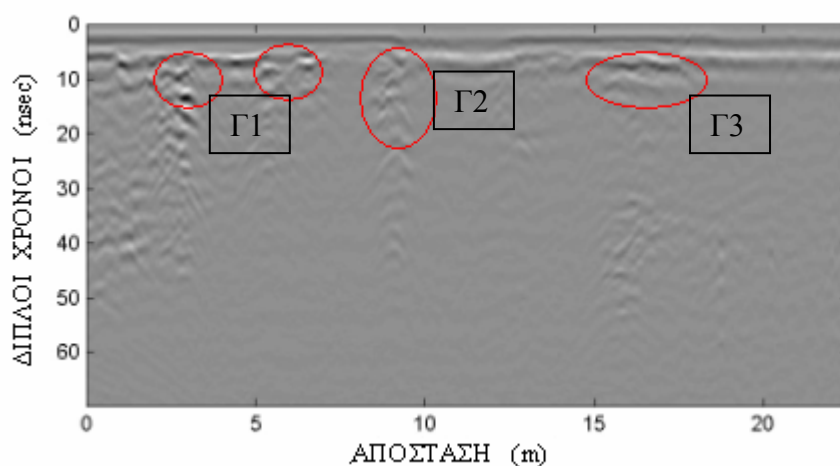
Εικόνα 4.8: Τομή γεωραντάρ L005.

Στη τομή γεωραντάρ f009 (εικόνα 4.9) ανακλώμενα και περιθλώμενα κύματα καταγράφονται σε διάφορα σημεία (ζώνες B1, B2 και B3).



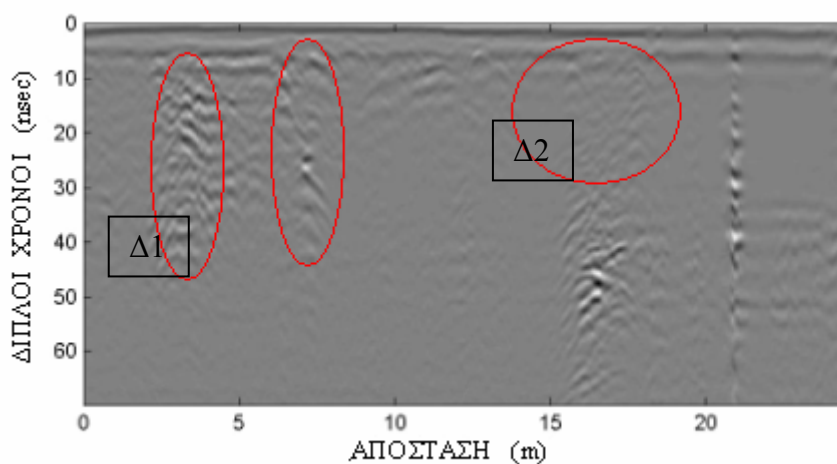
Εικόνα 4.9: Τομή γεωραντάρ f009.

Στην τομή γεωραντάρ f021 (εικόνα 4.10) ανακλώμενα και περιθλώμενα κύματα καταγράφονται σε τρεις ζώνες ενδιαφέροντος (Γ1, Γ2 και Γ3).



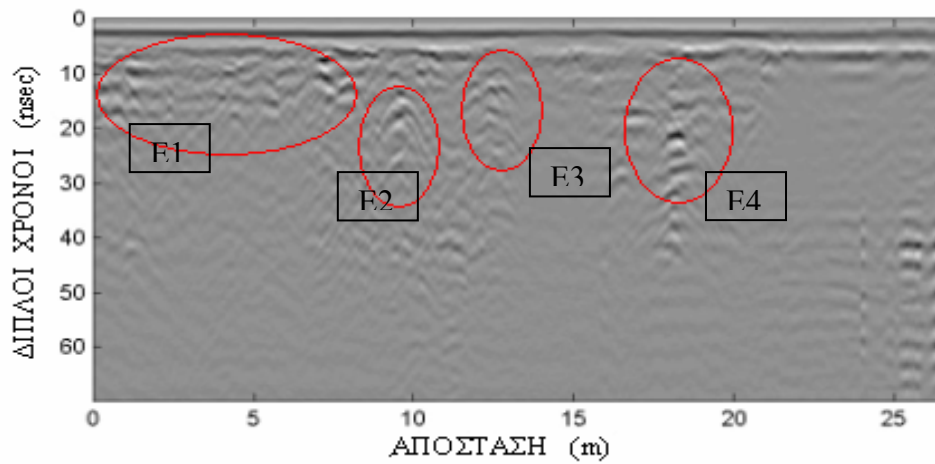
Εικόνα 4.10: Τομή γεωραντάρ f021.

Στην τομή γεωραντάρ f030 (εικόνα 4.11), σημειώνονται δύο κυρίως ζώνες οι Δ1 και Δ2, όπου καταγράφονται ανακλώμενα και περιθλώμενα κύματα. Στην τομή αυτή οι καταγραφές μεγάλου πλάτους σε οριζόντια απόσταση 21m ενδεχόμενα οφείλονται στη ύπαρξη θορύβου κατά τη συλλογή των μετρήσεων.



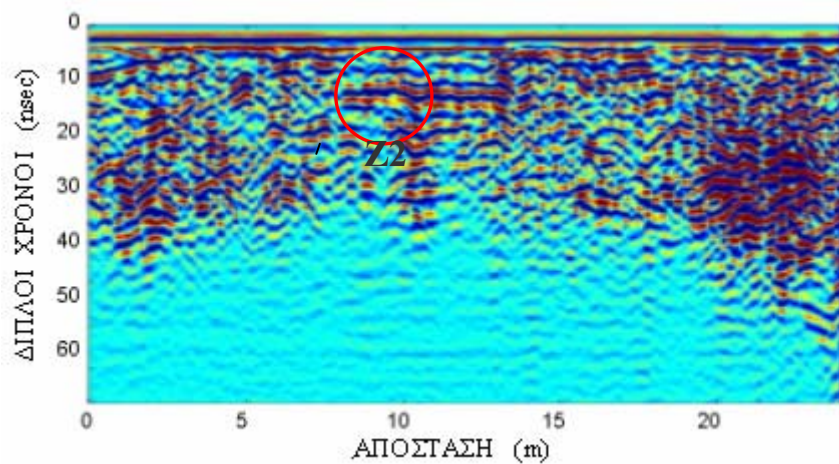
Εικόνα 4.11: Τομή γεωραντάρ f030.

Στην τομή γεωραντάρ f054 (εικόνα 4.12) καταγραφή ανακλώμενων και περιθλώμενων κυμάτων παρατηρείται στις ζώνες E1, E2, E3 και E4.



Εικόνα 4.12: Τομή γεωραντάρ f054.

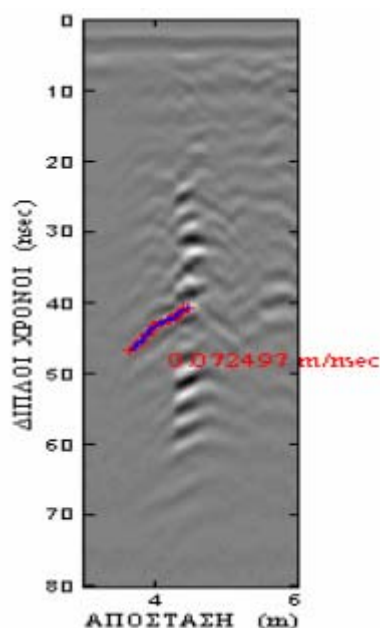
Τέλος στην τομή 5 του καννάβου K1 (εικόνα 4.13) ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ανακλώμενα κύματα (ζώνη Z2).



Εικόνα 4.13: Τομή γεωραντάρ 5, κάνναβος 1.

4.6 Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος

Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος προκύπτει από την μέθοδο $t^2 - x^2$ (εικόνα 4.14). Για περιθλώμενο κύμα από την τομή γεωραντάρ L005, η ταχύτητα αυτή είναι περίπου ίση με 0.07m/ns.



Εικόνα 4.14: Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, από περιθλώμενο κύμα που καταγράφεται στα 40 – 50ns στην τομή γεωραντάρ L005.

Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και για δεδομένο χρόνο καταγραφής τους υπολογίζεται εύκολα το βάθος του ανακλαστήρα s (m):

$$v=s/t$$

όπου,

v : Ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (m/ns),

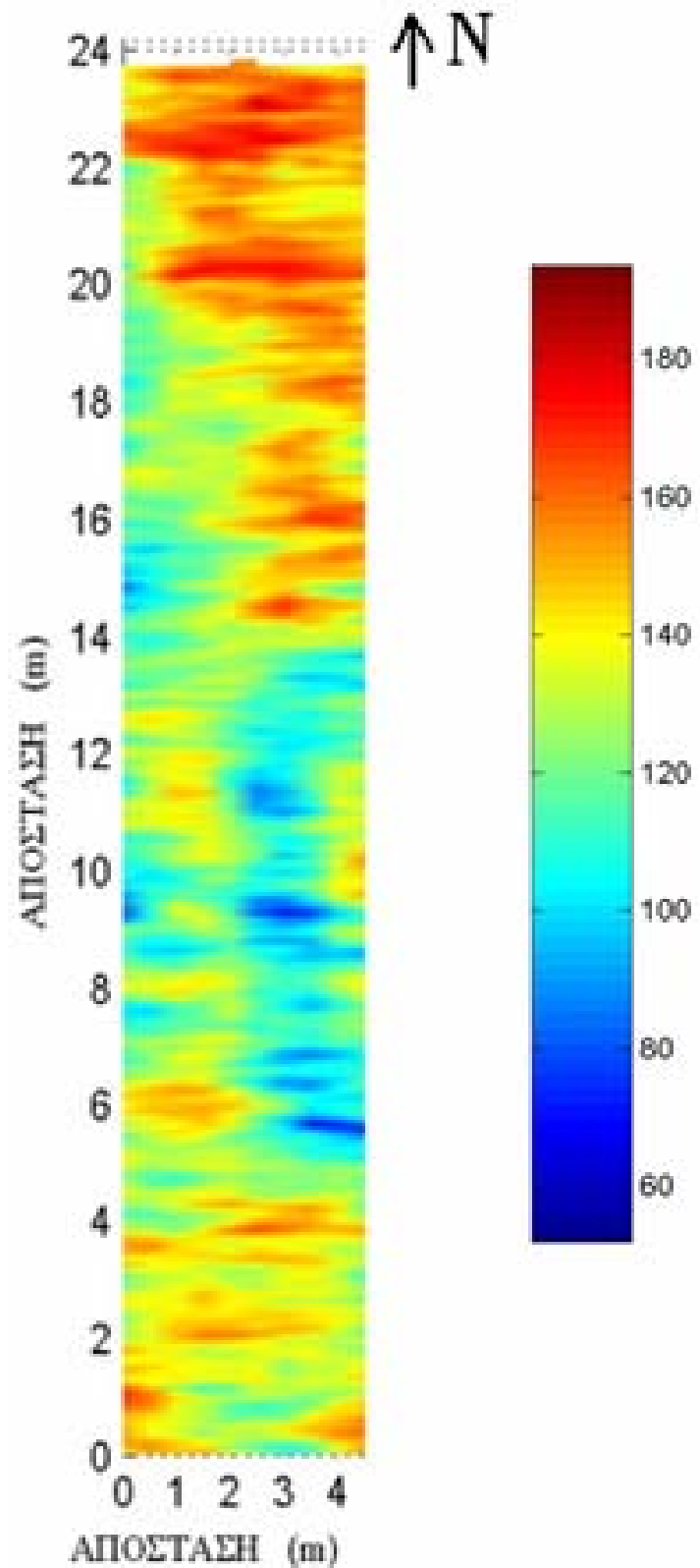
t : Χρόνος καταγραφής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ns).

Αξίζει να σημειωθεί πως το γεωραντάρ καταγράφει διπλούς χρόνους διάδοσης των κυμάτων. Για το λόγο αυτό απαιτείται διαίρεση του με το 2 πριν την χρήση του στην παραπάνω εξίσωση.

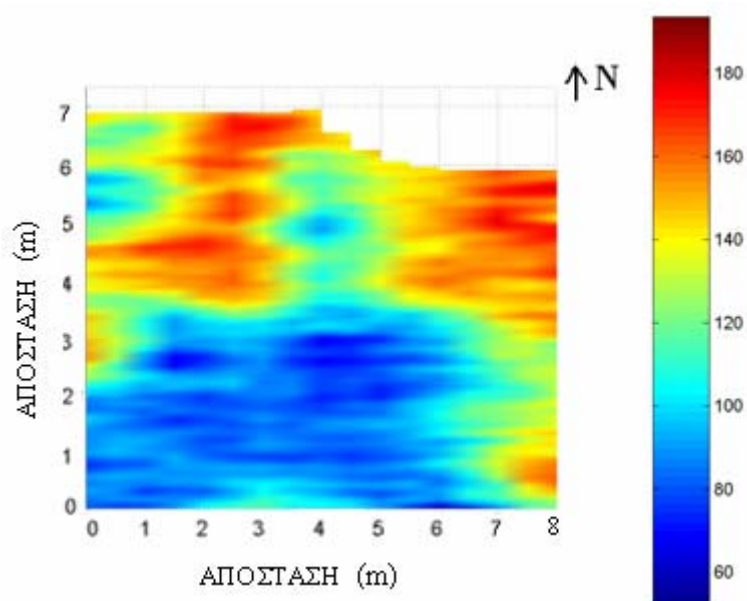
4.7 Οριζόντιες Τομές

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οριζόντιες τομές στα 30ns που αντιστοιχούν σε βάθος περίπου 1m, με ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων περίπου 0.07m/ns. Οι τομές αυτές αναφέρονται στους πρώτους τέσσερις καννάβους (K1-K4), όπως προκύπτουν με χρήση του προγράμματος GPR PRO. Ενδεικτικά στο νότιο τμήμα

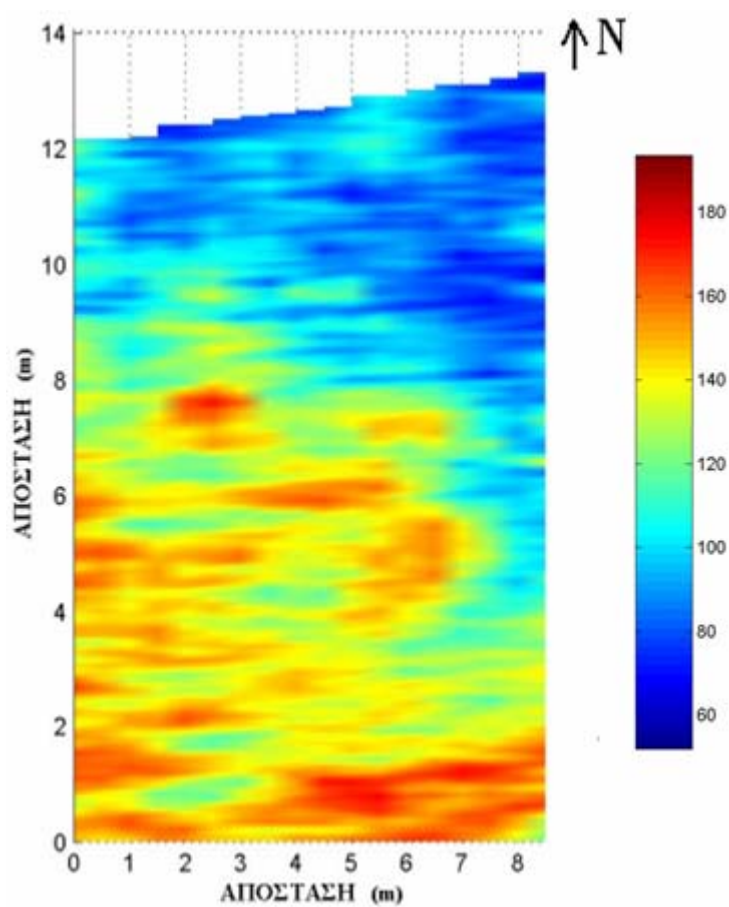
του K3 (εικόνα 4.17) παρουσιάζονται μεγάλου πλάτους καταγραφές οι οποίες σχετίζονται με ανακλώμενα και περιθλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.



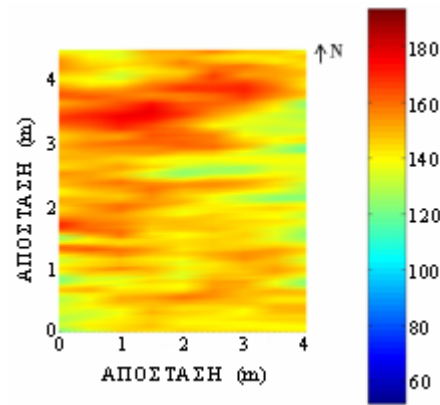
Εικόνα 4.15: Οριζόντια τομή του καννάβου K1 στα 30ns που αντιστοιχεί σε βάθος περίπου 1m.



Εικόνα 4.16: Οριζόντια τομή του καννάβου K2 στα 30ns που αντιστοιχεί σε βάθος περίπου 1m.



Εικόνα 4.17: Οριζόντια τομή του καννάβου K3 στα 30ns που αντιστοιχεί σε βάθος περίπου 1m.

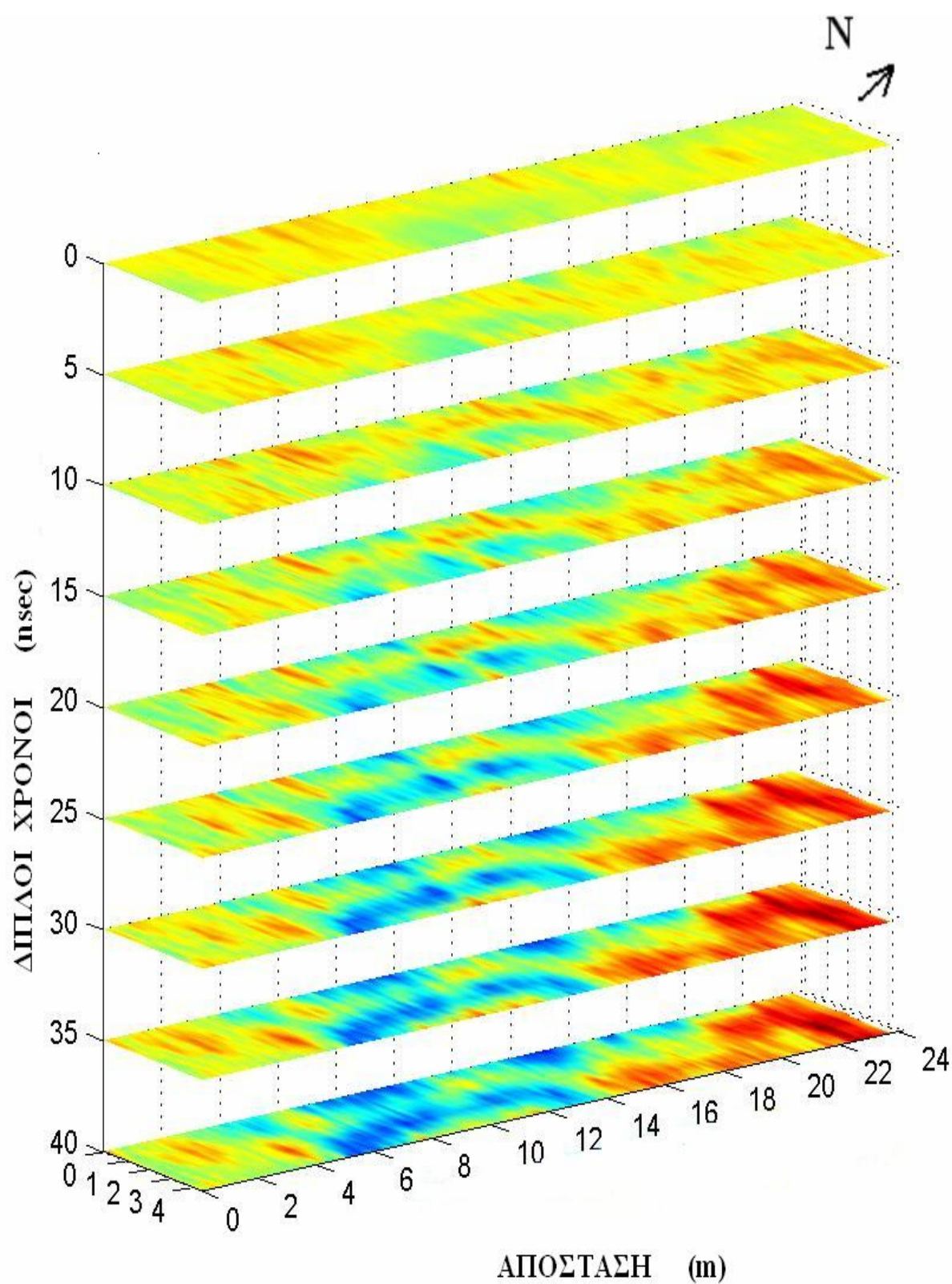


Εικόνα 4.18: Οριζόντια τομή του καννάβου K4 στα 30ns που αντιστοιχεί σε βάθος περίπου 1m.

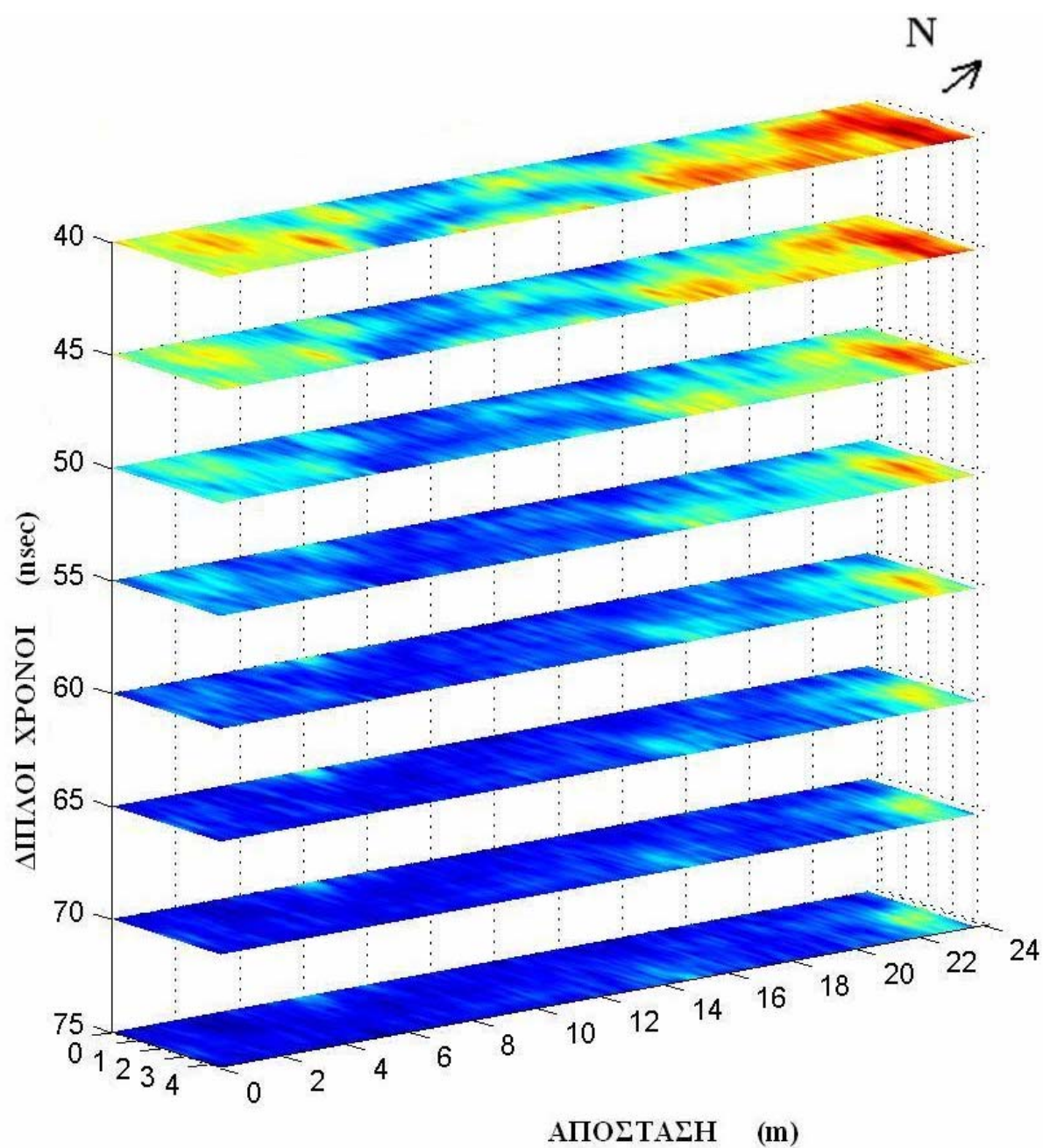
4.8 Οριζόντιες Τομές σε διαδοχικά βάθη

Για τους ίδιους καννάβους (K1-K4), παρουσιάζονται οριζόντιες τομές σε διάφορους χρόνους διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Χρόνος διαδρομής ίσο με 10ns αντιστοιχεί σε βάθος περίπου 0.35m, για ταχύτητα διάδοσης 0.07m/ns.

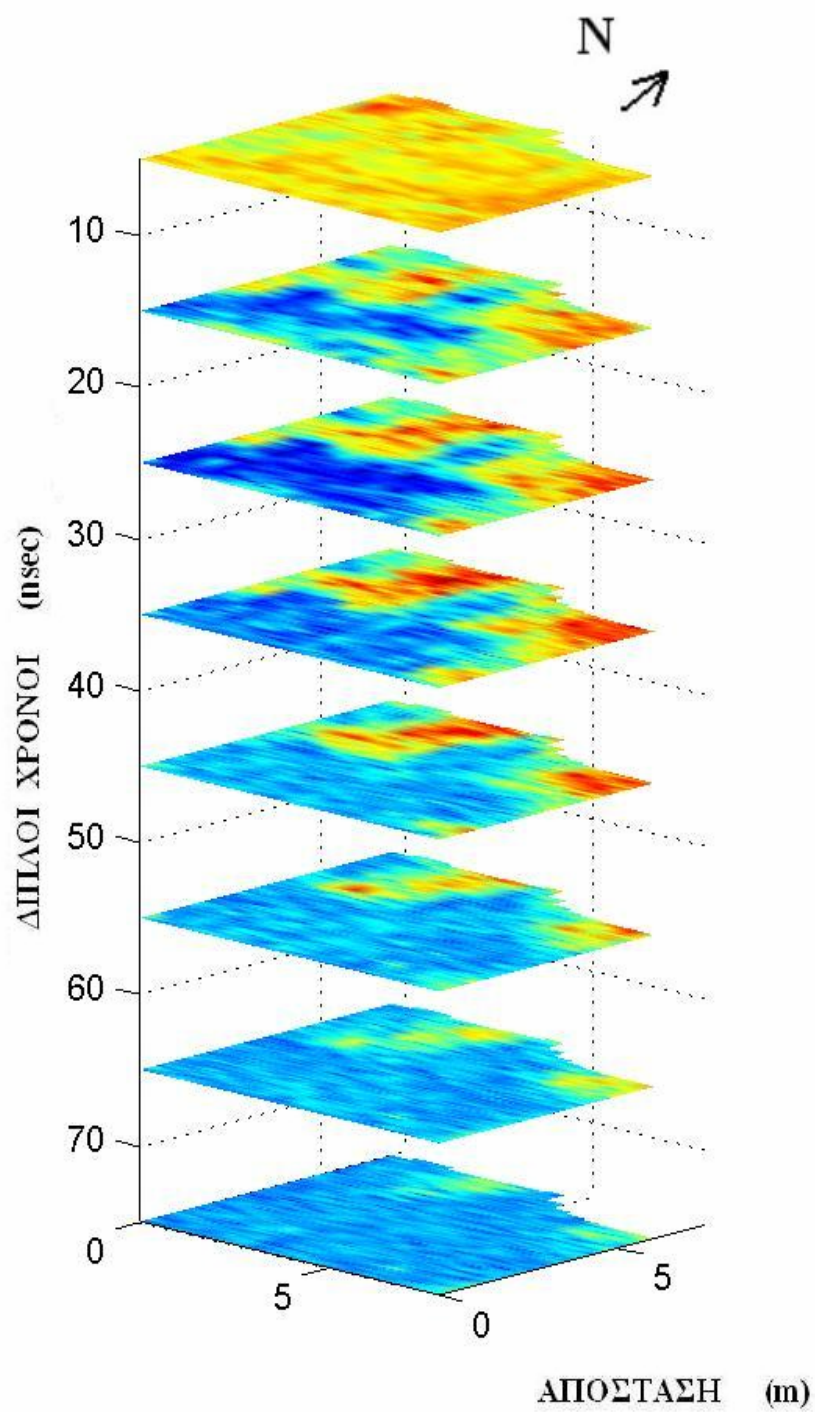
Στον K1 παρατηρούνται παρόμοιες οριζόντιες τομές για χρόνους καταγραφής από 5ns μέχρι 45ns (εικόνες 4.19 και 4.20). Στον K2 ενδιαφέρον παρουσιάζει το βόρειο τμήμα των τομών από τα 15ns έως τα 55ns (εικόνα 4.20).



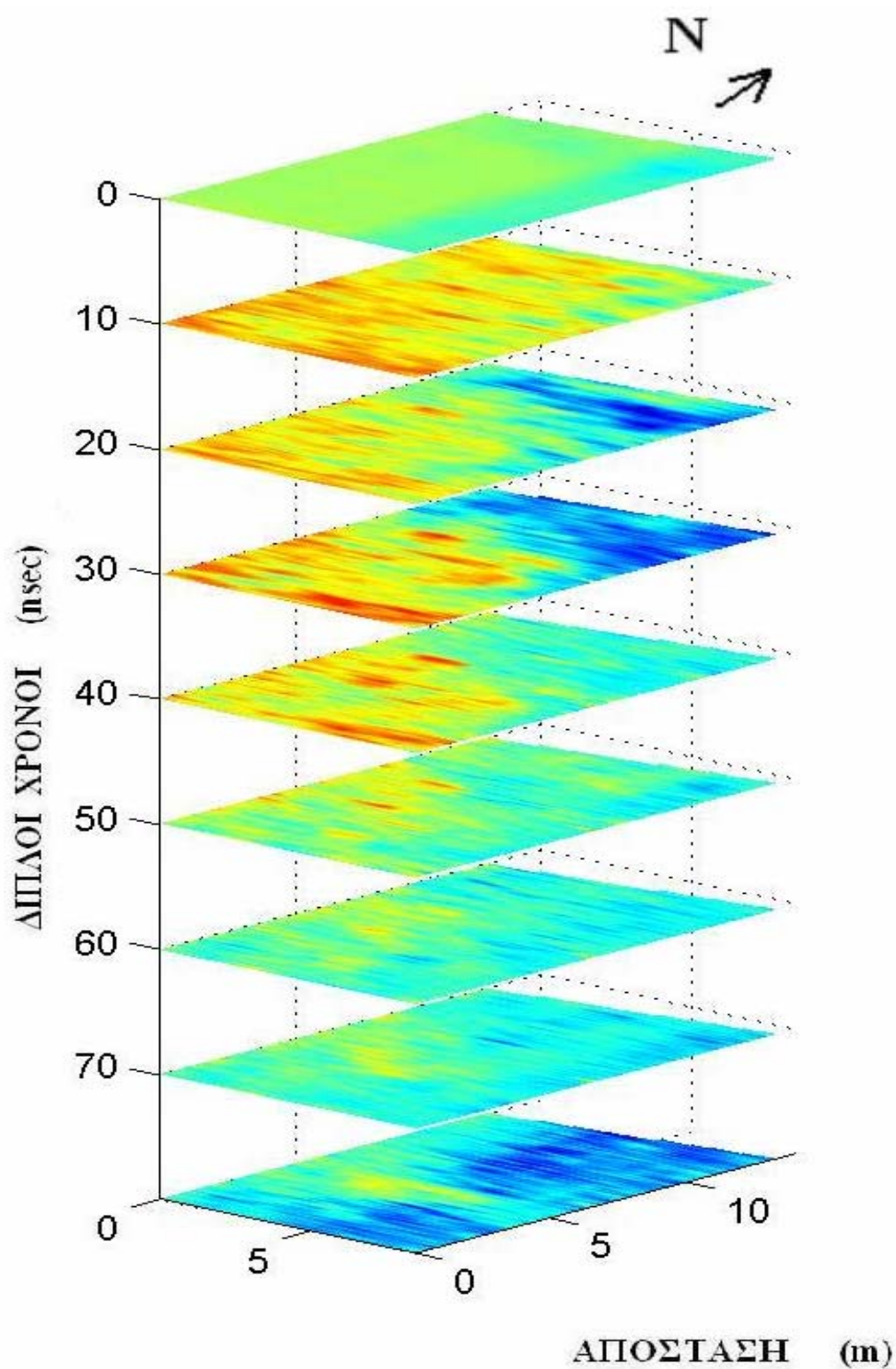
Εικόνα 4.19: Οριζόντιες τομές του καννάβου K1 (0 – 40 ns).



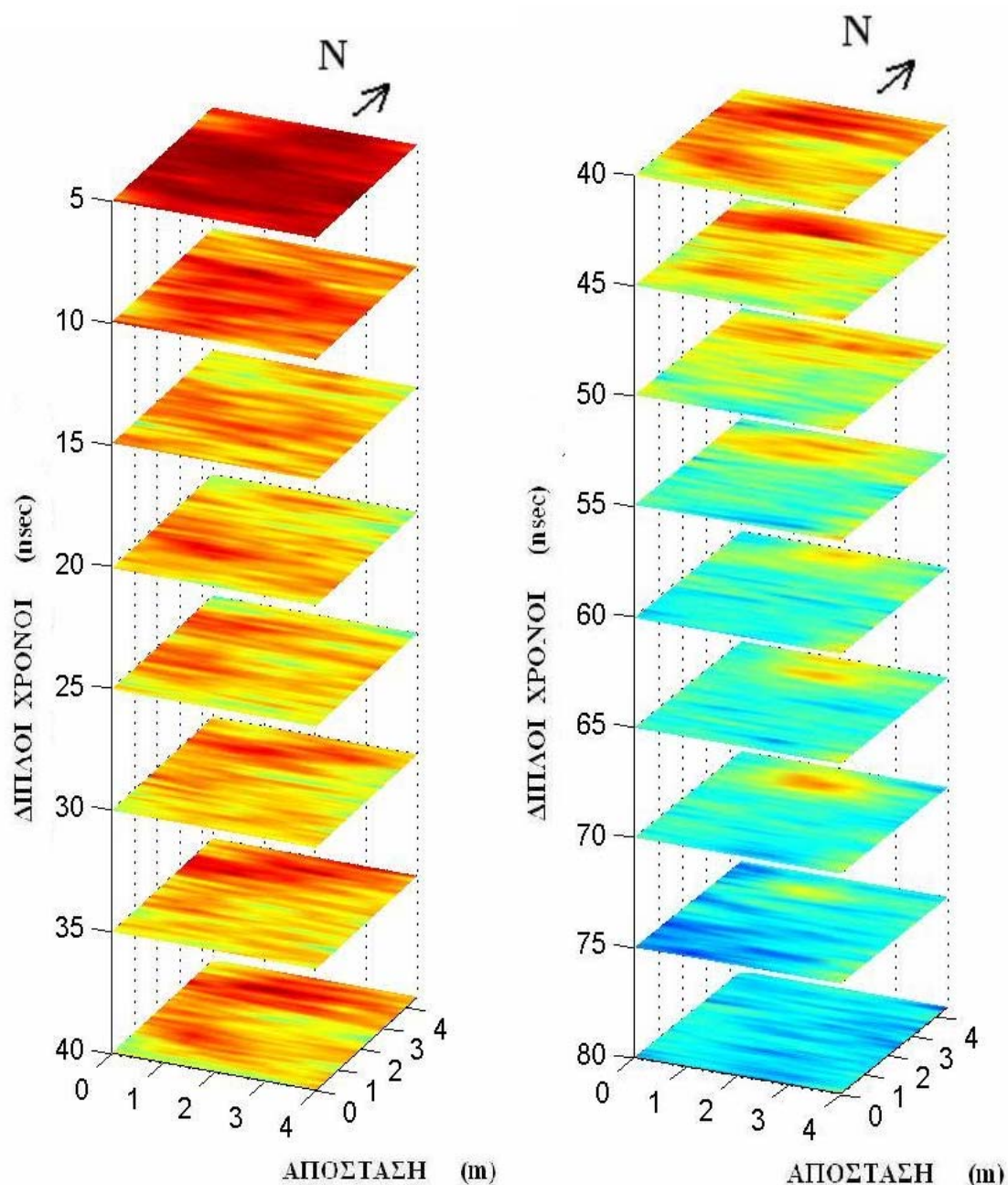
Εικόνα 4.20: Οριζόντιες τομές του καννάβου K1 (40 - 75 ns).



Εικόνα 4.21: Οριζόντιες τομές του καννάβου K2 (5 - 75 ns).

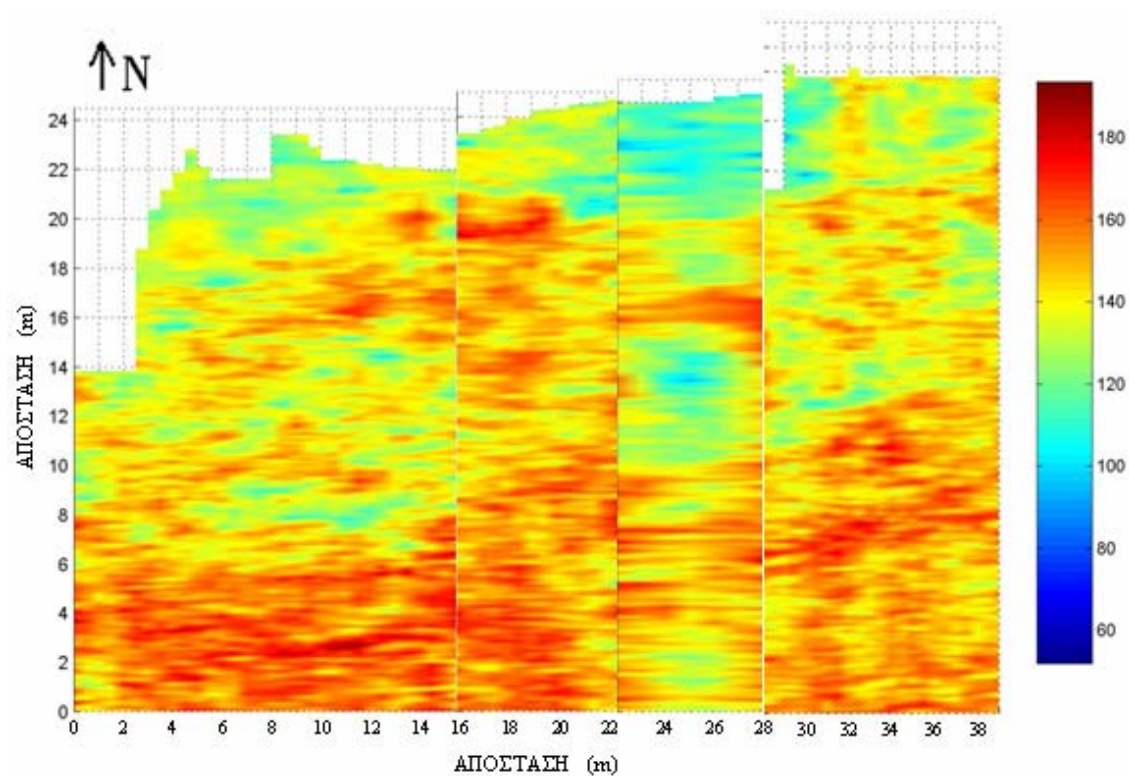


Εικόνα 4.22: Οριζόντιες τομές του καννάβου K3 (0 - 80 ns).

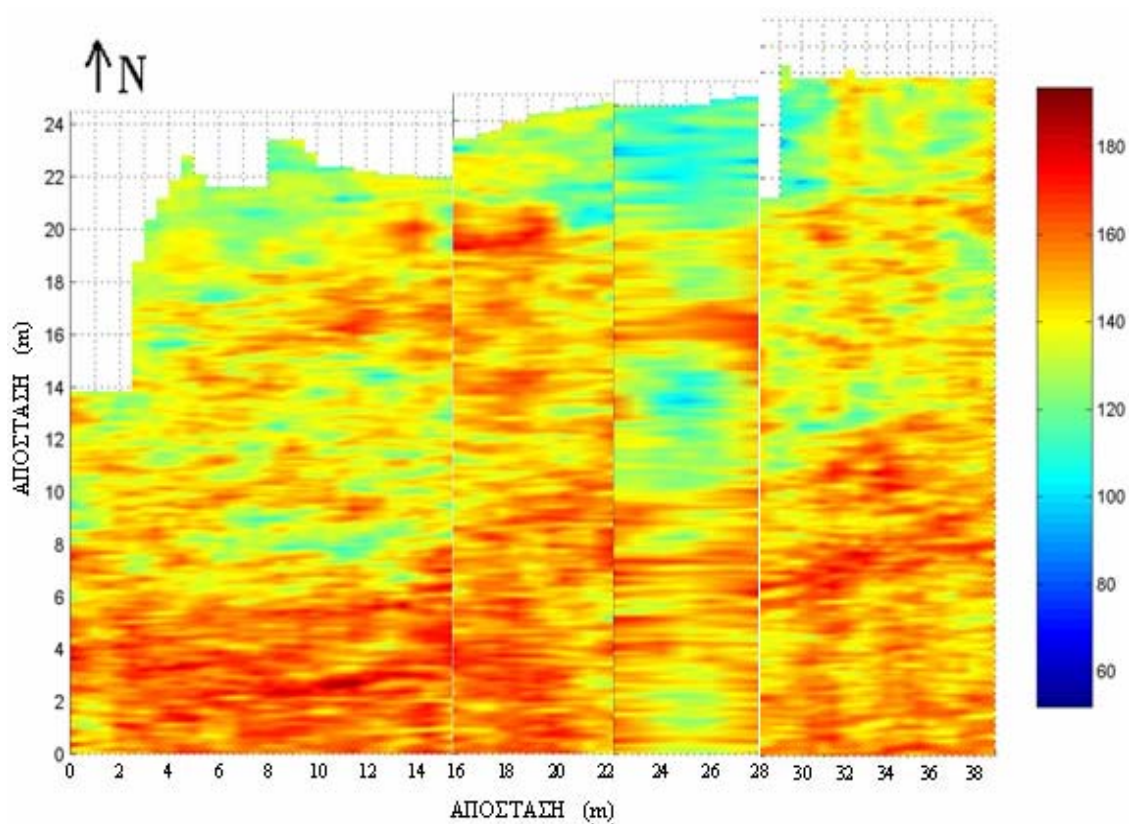


Εικόνα 4.23: Οριζόντιες τομές του καννάβου K4 (0 - 80 ns).

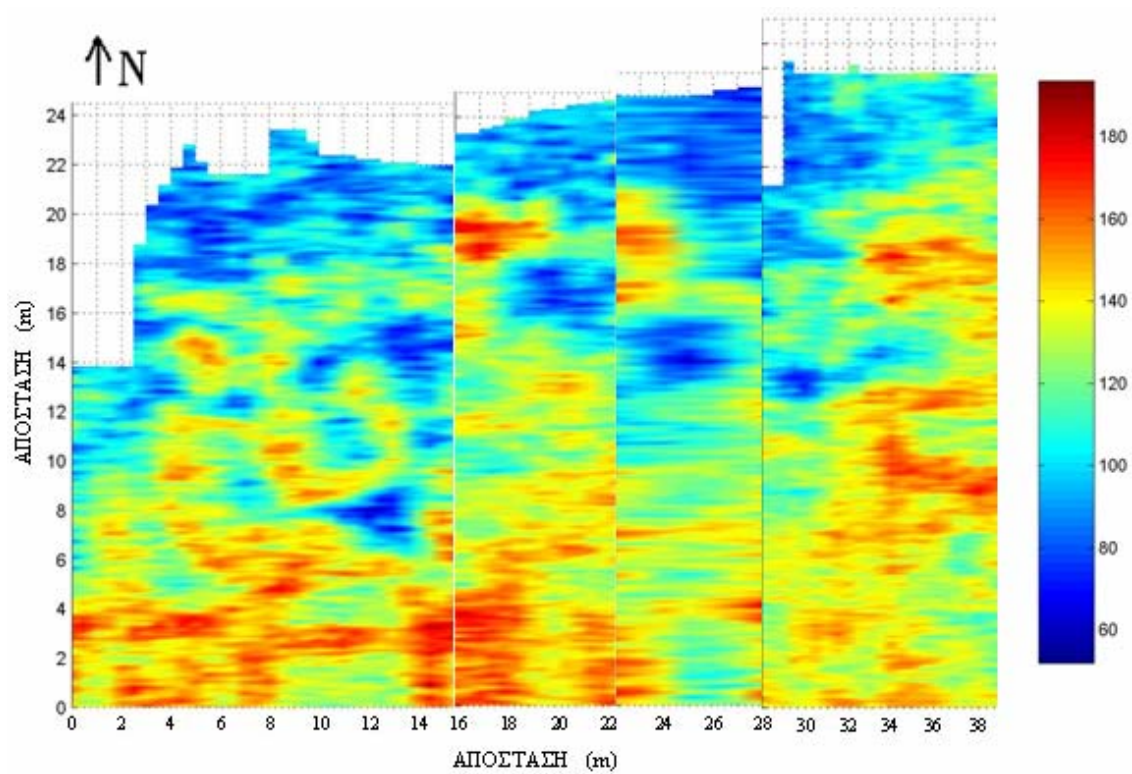
Στην συνέχεια δίνονται οι οριζόντιες τομές των καννάβων K6 και K7 από 10ns έως 40ns, για κάθε 5ns, με αντίστοιχο βάθος 35cm έως 140cm. Ο K6 βρίσκεται στο δυτικό τμήμα οριζόντιας τομής (από 0 – 22m) και ο K7 ανατολικά του (από 22 – 38m). Αξίζει να αναφερθεί η καταγραφή μεγαλύτερων πλατών στο δυτικό τμήμα της οριζόντιας τομής στα 15ns σε σχέση με το βόρειο (εικόνα 4.25). Το ίδιο παρατηρείται σε όλες σχεδόν τις οριζόντιες τομές.



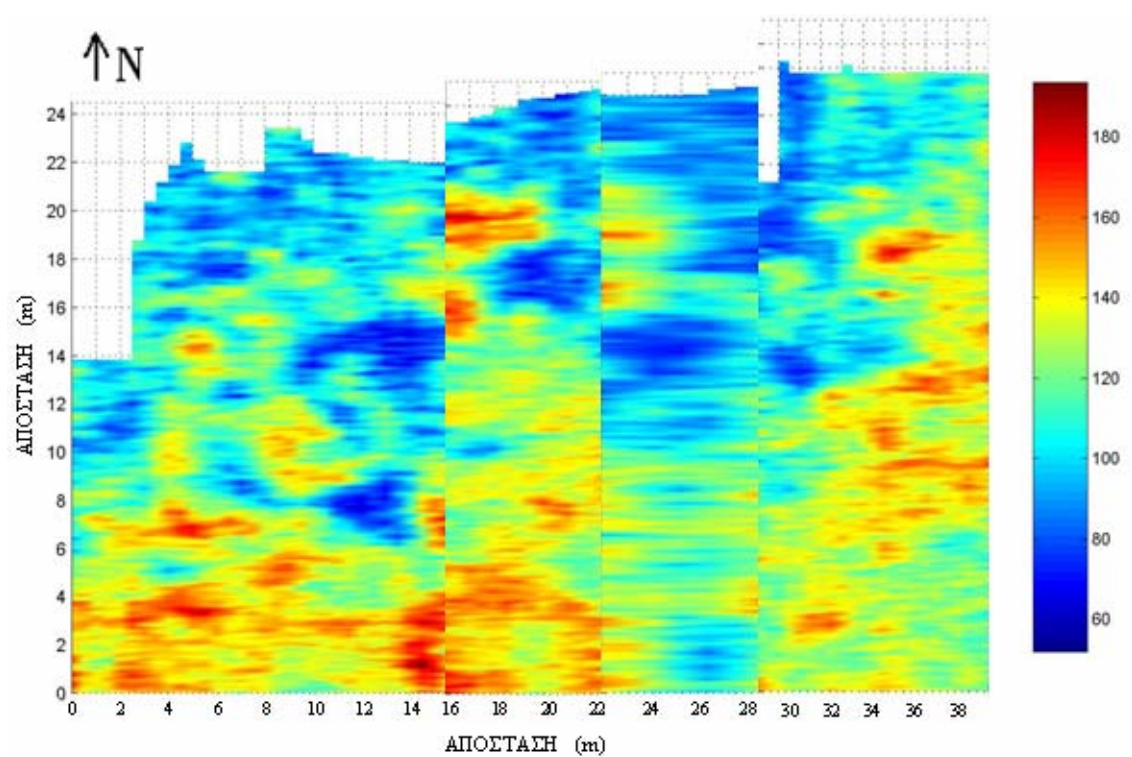
Εικόνα 4.24: Οριζόντια τομή στα 10ns, με αντίστοιχο βάθος 35cm.



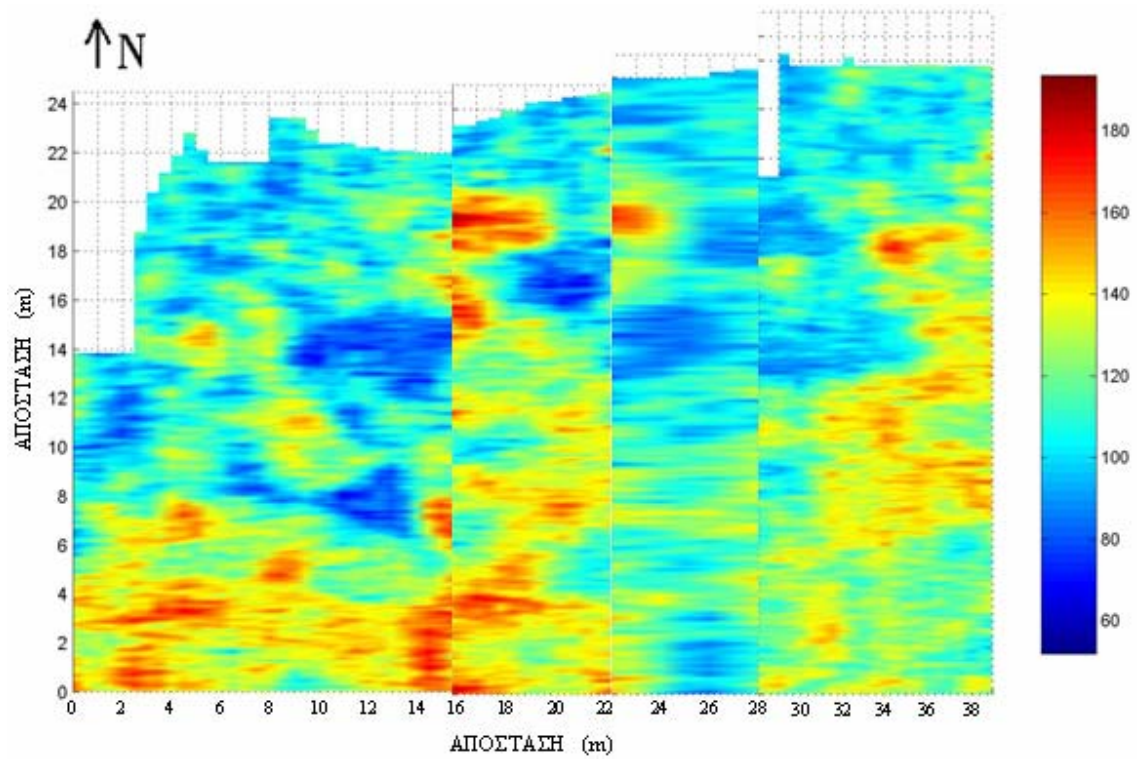
Εικόνα 4.25: Οριζόντια τομή στα 15ns, με αντίστοιχο βάθος 52cm.



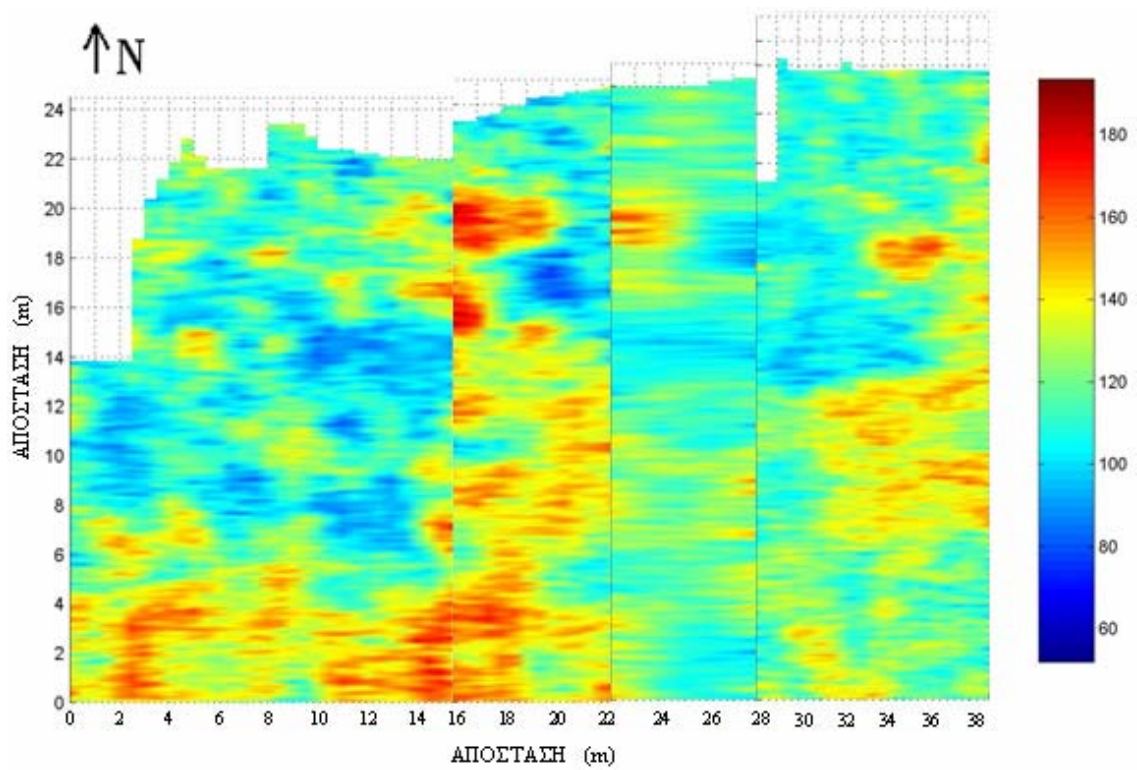
Εικόνα 4.26: Οριζόντια τομή στα 20 ns, με αντίστοιχο βάθος 70cm.



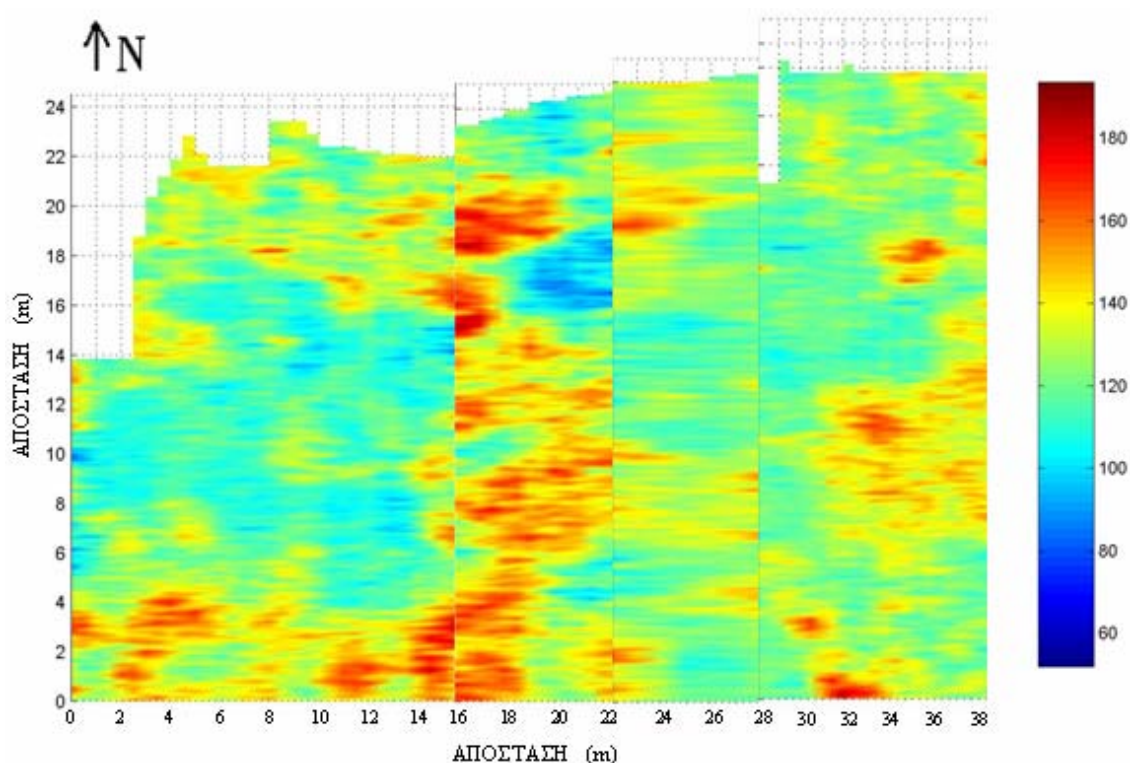
Εικόνα 4.27: Οριζόντια τομή στα 25ns, με αντίστοιχο βάθος 87cm.



Εικόνα 4.28: Οριζόντια τομή στα 30ns, με αντίστοιχο βάθος 100cm.



Εικόνα 4.29: Οριζόντια τομή στα 35ns, με αντίστοιχο βάθος 122cm.



Εικόνα 4.30: Οριζόντια τομή στα 40ns, με αντίστοιχο βάθος 140cm.

4.9 Οριζόντιες Τομές τελική παρουσίαση

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα του γεωραντάρ. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οριζόντιες τομές σε χρόνο 20ns ή βάθος 70cm, για ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων 0.07 m/ns. Με μια πρώτη ματιά παρατηρείται πως οι περιοχές με κόκκινο χρώμα αποτελούν πιθανές θέσεις θαμμένων τοιχοδομών. Διακρίνονται οι έξι κάρναβοι (K1-K4 και K6-K7) και οι γραμμές μελέτης L005, f009, f021, f030, f054, των οποίων οι τομές γεωραντάρ παρουσιάζονται στις εικόνες 4.8 – 4.12. Σε κάθε γραμμή μελέτης σημειώνονται οι ζώνες ενδιαφέροντος.

Από την οριζόντια τομή (σχήμα 4.2) και λαμβάνοντας υπόψη τις τομές γεωραντάρ, οι οποίες επισυνάπτονται στο παράρτημα για κάθε γραμμή μελέτης χωριστά, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Στον κάρναβο K1 στην περιοχή Z1 παρατηρούνται τρεις παράλληλες γραμικές ανωμαλίες διεύθυνσεως Α-Δ. Στις αντίστοιχες τομές γεωραντάρ εμφανίζονται ανακλώμενα κύματα σε χρόνο 5-30ns. Για ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων 0.07m/ns, το βάθος των ανακλαστήρων κυμαίνεται από 17.5cm έως 1.05cm.

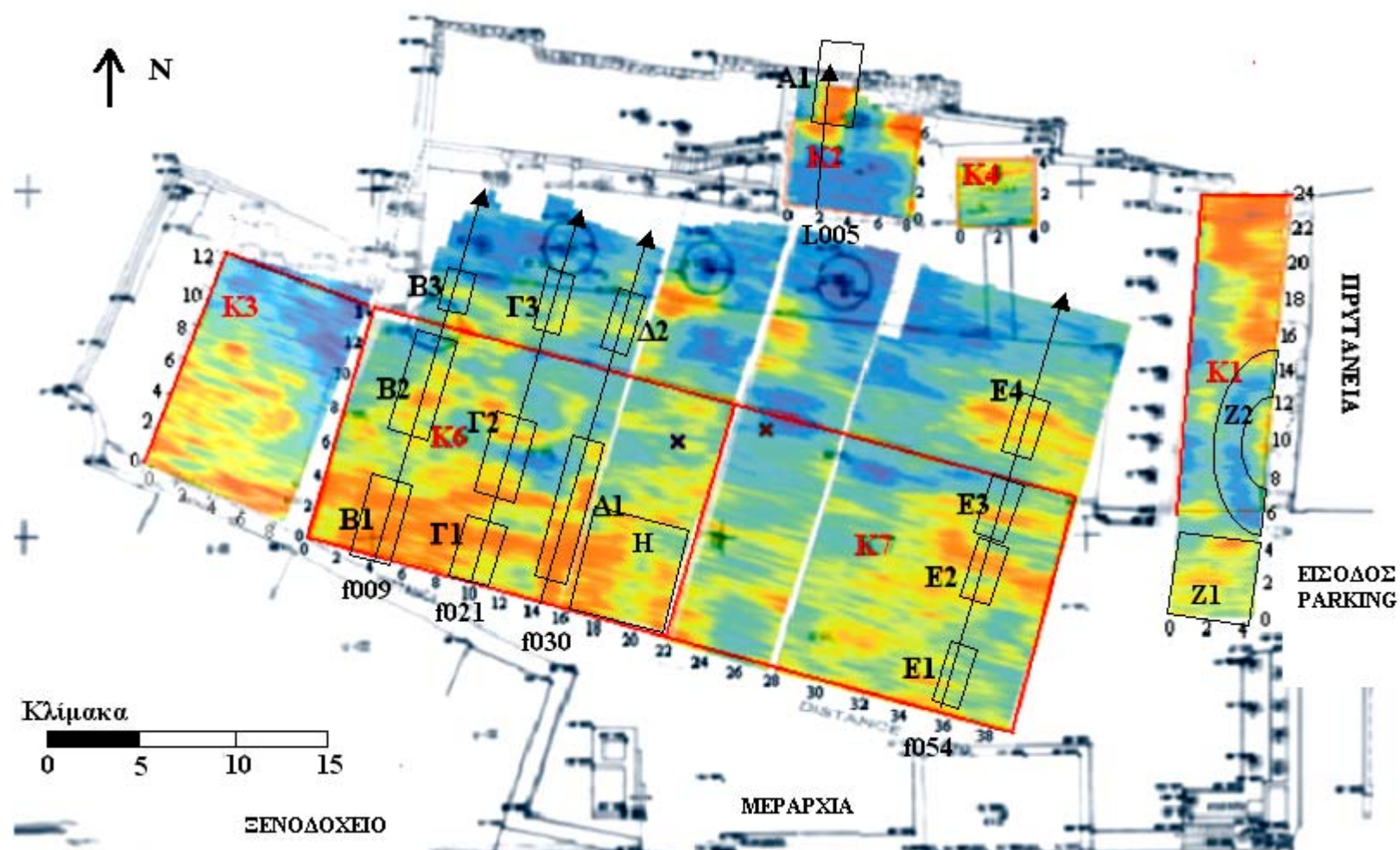
Παρατηρώντας την τομή γεωραντάρ 5 (εικόνα 4.13) του καννάβου K1 και την οριζόντια τομή η ζώνη Z2 σχετίζεται με ανακλαστήρα σε βάθος 52.5cm-1.05m (χρόνος καταγραφής 15ns-30ns).

Στον κάνναβο K7 οι ζώνες E2 – E3 με αντίστοιχα βάθη ανακλαστήρων 35cm έως 140cm καταγράφονται σε χρόνους 10-40ns. Οι ζώνες αυτές όπως εύκολα διακρίνεται, συνεχίζονται προς τα δυτικά του καννάβου. Αυτές καλύπτουν τμήμα του καννάβου K7 από 8-20m διευθύνσεως Νότου προς Βορρά και από 34-39m διευθύνσεως Ανατολή προς Δύση.

Στον κάνναβο K6 ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή H, στην οποία καταγράφονται περιθλώμενα και ανακλώμενα κύματα στα 5-20ns με αντίστοιχα βάθη ανακλαστήρων 17.5cm -70 cm. Όσον αφορά τις ζώνες Γ1, Γ2 και Β1 το ενδιαφέρον εντοπίζεται στους ίδιους χρόνους διάδοσης των κυμάτων (5-20ns ή βάθη 17.5cm - 70cm).

Στον κάνναβο K3 παρατηρείται η προέκταση των ανακλαστήρων του προηγούμενου κάνναβου (στα 5-20 ns για βάθη 17.5cm-70cm), στην περιοχή από 2-6m διευθύνσεως Δ – Α.

Συνοψίζοντας παρατηρείται ότι η ζώνη ενδιαφέροντος εκτείνεται κατά μήκος του νότιου τμήματος της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει τις ζώνες Γ1, Γ2, Β1 και την περιοχή του καννάβου K3 έως τα 6m διευθύνσεως Δ – Α. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό υπάρχουν και άλλες ζώνες υψηλού ενδιαφέροντος. Γενικότερα όμως παρατηρείται πως το βόρειο τμήμα παρουσιάζει μικρότερο ενδιαφέρον συγκριτικά με το νότιο.



Σχήμα 4.2: Οριζόντια τομή γεωραντάρ στα 20ns με αντίστοιχο βάθος 70cm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα των μεθόδων της ηλεκτρικής (κάνναβοι K1, K2) και της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης (κάνναβοι K1, K3) έτσι ώστε να γίνει σύγκριση και επιβεβαίωση ή όχι των αποτελεσμάτων του γεωραντάρ. Τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω μεθόδων παρουσιάζονται αρχικά για κάθε κάνναβο ξεχωριστά και στη συνέχεια τοποθετούνται όλα πάνω στο διάγραμμα κάλυψης της περιοχής μελέτης.

5.2 Ηλεκτρική χαρτογράφηση

Στην ηλεκτρική χαρτογράφηση μελετάται η πλευρική μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Κατά τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης R_a , για σταθερή τιμή του γεωμετρικού συντελεστή K , προσδιορίζεται σε σημεία που ανήκουν σε τομές κατά το δυνατό κάθετες στην παράταξη των σχηματισμών. Πολύ σημαντικός είναι ο καθορισμός της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος πριν να ξεκινήσει η χαρτογράφηση, καθώς από αυτή την απόσταση εξαρτάται το βάθος μέχρι το οποίο οι σχηματισμοί στο υπέδαφος επιδρούν στη διαμόρφωση της τιμής της R_a (Αλευράς 2006, Αρχοντάκη 2006).

Η ηλεκτρική χαρτογράφηση πραγματοποιήθηκε με τη διάταξη δίδυμου ηλεκτροδίου σε δύο καννάβους K1 και K2, όπου η σχετική απόσταση των κινητών ηλεκτροδίων ήταν σταθερή και ίση με 2m. Στη διάταξη δίδυμου ηλεκτροδίου τα δύο ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος των γραμμών μελέτης, οι οποίες συνήθως ισαπέχουν, ενώ τα άλλα δύο (δυναμικού-ρεύματος) παραμένουν στην ίδια θέση. Κάθε

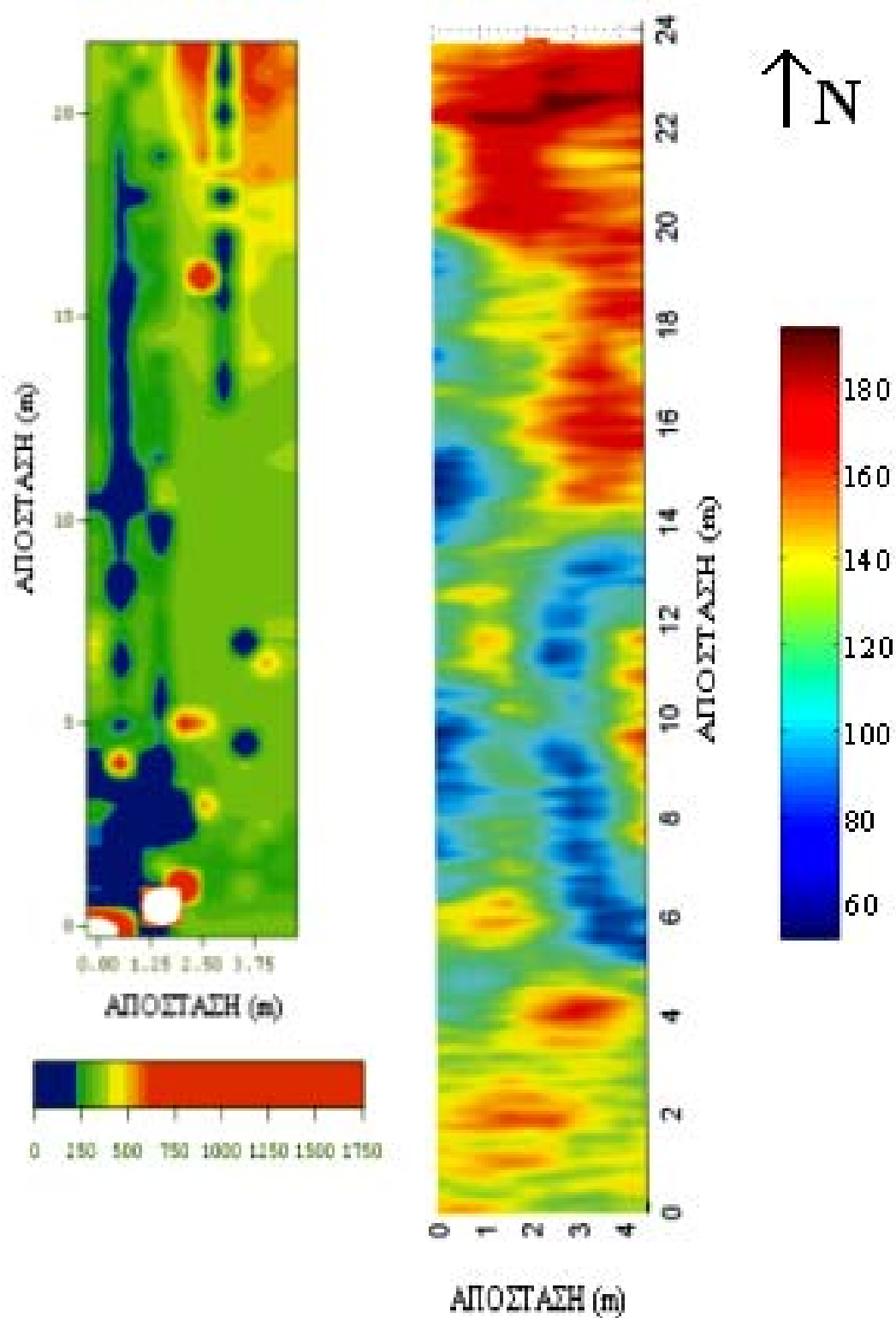
γραμμή μελέτης περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο αριθμό σταθμών και τα ιονικά ηλεκτρόδια τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το κέντρο τους να συμπίπτει με τη θέση του σταθμού μέτρησης. Το βήμα διασκόπησης ήταν 0.5m. Επειδή η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται από το βάθος εισαγωγής των ηλεκτροδίων στο έδαφος προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε τα ηλεκτρόδια να εισάγονται στο έδαφος στο ίδιο βάθος.

5.3 Ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση

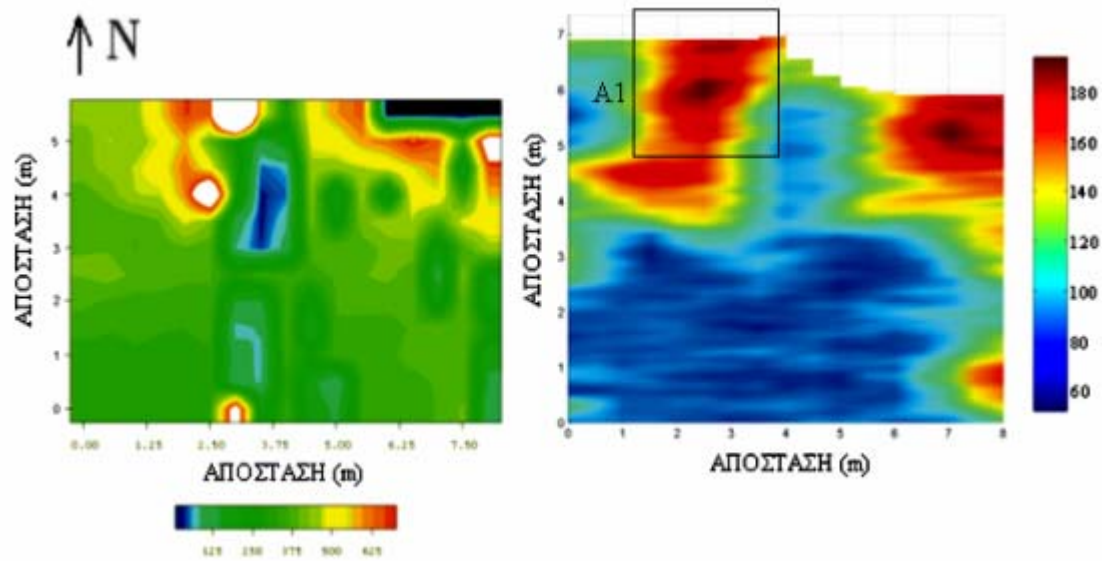
Ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο κινούμενου πομπού-δέκτη όπου μελετάται η χρονική μεταβολή του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος γραμμών μελέτης σε δύο καννάβους K1 και K3. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετακινείται όλη η μονάδα, η οποία περιλαμβάνει το πομπό και το δέκτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με το όργανο CM – 031. Η συχνότητα του οργάνου είναι 9.766 kHz, η απόσταση πομπού – δέκτη είναι 3.74m και το βήμα διασκόπησης 0.5m. Το βάθος διασκόπησης φτάνει με το συγκεκριμένο όργανο τα 6m. Η φανταστική συνιστώσα που μετράται με το όργανο δίνει πληροφορίες για την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους και χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση αυτού, ενώ η πραγματική συνιστώσα παρέχει περισσότερα στοιχεία για την ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων (καλώδια, σωλήνες, βαρέλια) στο υπέδαφος.

5.4 Αποτελέσματα της ηλεκτρικής χαρτογράφησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής χαρτογράφησης, σε συνδυασμό με εκείνα που προέκυψαν από τη διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ στους καννάβους K1 (εικόνα 5.1) και K2 (εικόνα 5.2). Στις δύο αυτές εικόνες παρατηρούνται αξιοσημείωτες συμφωνίες των δύο μεθόδων για συγκεκριμένα τμήματα της περιοχής μελέτης.



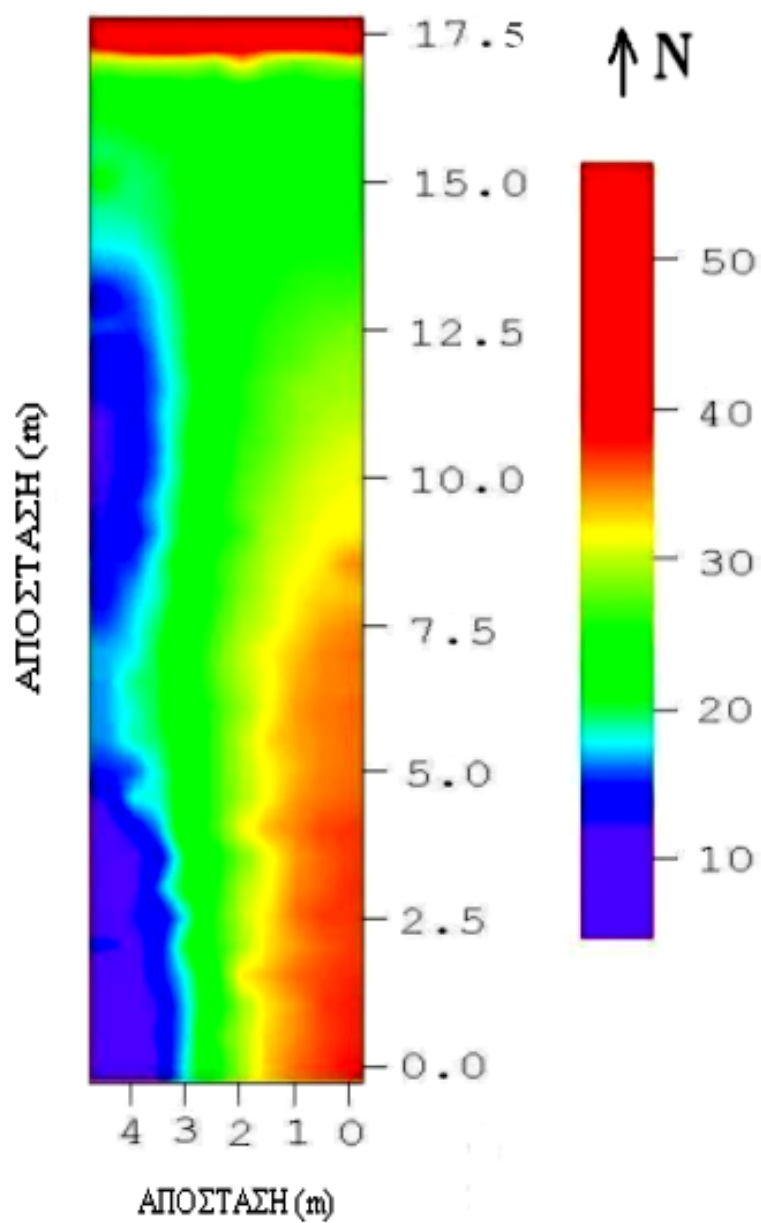
Εικόνα 5.1: Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Ωm , αριστερά) και οριζόντια τομή του γεωραντάρ στα 30ns (δεξιά) στον κάνναβο K1.



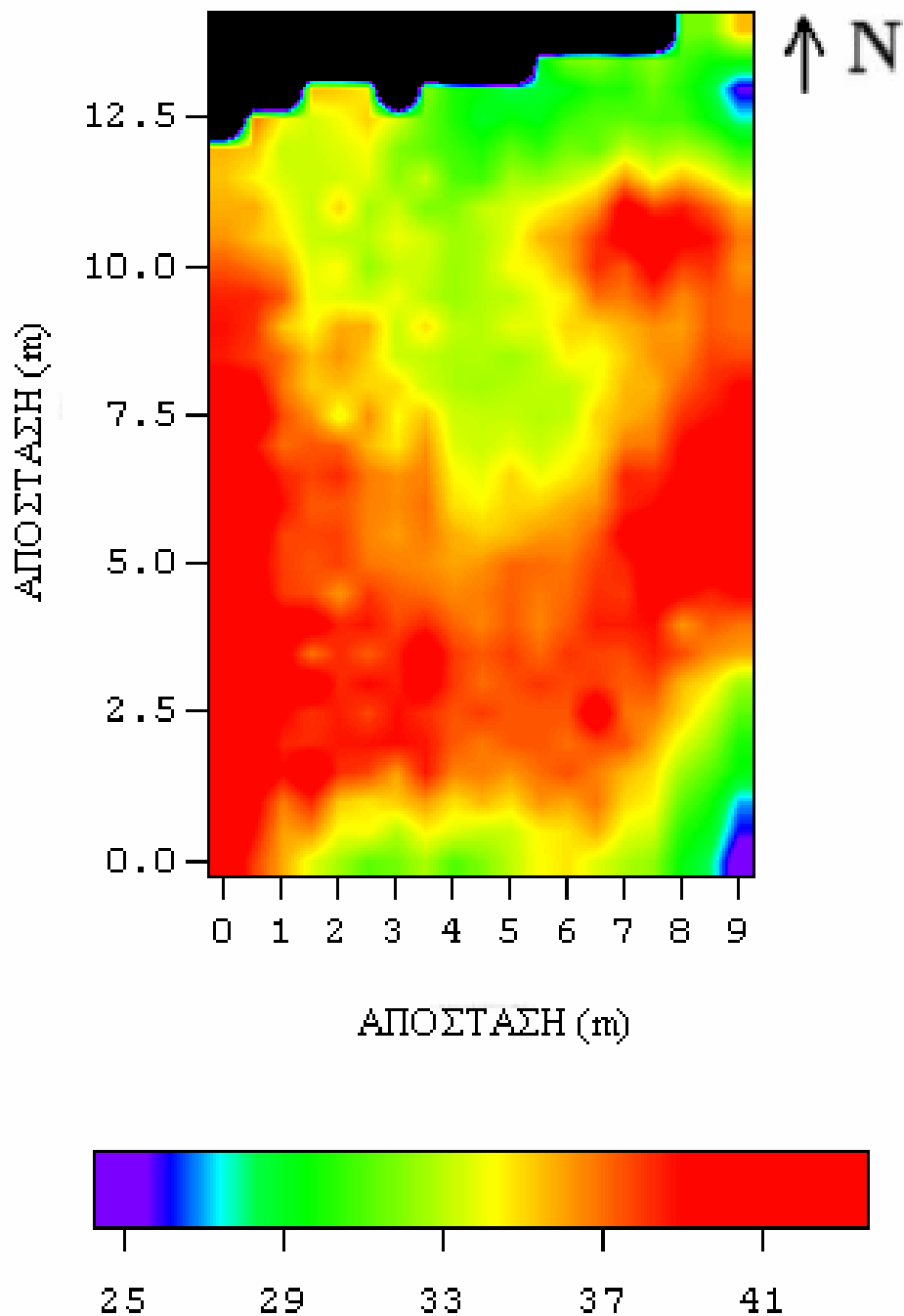
Εικόνα 5.2: Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Ωm , αριστερά) και οριζόντια τομή του γεωραντάρ στα 30ns (δεξιά) στον κάρναβο K2.

5.5 Αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης (εικόνες 5.3 – 5.4), για την πλευρική μεταβολή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε στους καννάβους K1 και K3.



Εικόνα 5.3: Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Ωm), Κάνναβος K1.



Εικόνα 5.4: Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Ωm), Κάνναβος K3.

5.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Στα σχήματα 5.1 και 5.2 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1: Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διάγραμμα κάλυψης της περιοχής (ηλεκτρική χαρτογράφηση).



Σχήμα 5.2: Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διάγραμμα κάλυψης της περιοχής (ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση).

Συγκρίνοντας την οριζόντια τομή του γεωραντάρ (σχήμα 4.2) με τους χάρτες της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (σχήματα 5.1 και 5.2) παρατηρούνται τα ακόλουθα. Στον κάρναβο K2 αυξημένες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εμφανίζονται στο βόρειο τμήμα του ηλεκτρικού χάρτη. Στην ίδια περιοχή παρατηρούνται μεγαλύτερα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων στην οριζόντια τομή του γεωραντάρ (περιοχή A1) τα οποία πιθανόν να σχετίζονται με τοιχίο το οποίο εμφανίζεται προς δυτικά. Στον κάρναβο K3 όπως ήταν αναμενόμενο στην οριζόντια τομή του γεωραντάρ απεικονίζεται με μεγαλύτερη ανάλυση το υπέδαφος απ' ότι στο χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εφαρμογή της μεθόδου του γεωραντάρ για την ανάδειξη περιοχών που ενδεχομένως σχετίζονται με πιθανές θέσεις θαμμένων τοιχοδομών. Επαλήθευση των αποτελεσμάτων του γεωραντάρ καλούνται να δώσουν δύο ακόμη μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων, η μέθοδος της ηλεκτρικής και η μέθοδος της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης.

Συμπερασματικά η μέθοδος του γεωραντάρ (σχήμα 4.2) εντοπίζει μια ζώνη ενδιαφέροντος, η οποία εκτείνεται κατά μήκος του νότιου τμήματος της περιοχής μελέτης. Η ζώνη αυτή περικλείεται από τις επιμέρους ζώνες Γ1, Γ2, Β1 και τη ζώνη του καννάβου Κ3 έως τα 6m διευθύνσεως Δ – Α. Αυξημένο ενδιαφέρον παρατηρείται και στην ζώνη Ζ2 του καννάβου Κ1 η οποία απομακρύνεται από τη νότια πλευρά του χάρτη. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό υπάρχουν και άλλες ζώνες υψηλού ενδιαφέροντος σε διάσπαρτα σημεία του χάρτη μακριά από τη νότια πλευρά. Γενικότερα παρατηρείται πληθώρα ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προς το Νότο, ενώ το βόρειο τμήμα παρουσιάζει λιγότερους ανακλαστήρες και κατ' επέκταση μικρότερο ενδιαφέρον για την ύπαρξη θαμμένων τοιχοδομών.

Συγκριτικά με τις δύο άλλες μεθόδους διασκόπησης προκύπτουν τα εξής. Η ζώνη Α1 σύμφωνα με την οριζόντια τομή του γεωραντάρ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς εμφανίζει αυξημένες τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

6.2 Προτάσεις

Εφόσον το ενδιαφέρον για την ύπαρξη θαμμένων τοιχοδομών όπως προκύπτει από τις τομές του γεωραντάρ εστιάζεται στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης

προτείνεται περαιτέρω έρευνα στην περιοχή για διασταύρωση των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας καθώς επίσης και διασκοπήσεις ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων στους καννάβους K6 και K7, καλούνται να επαληθεύσουν τα παραπάνω συμπεράσματα για την ύπαρξη θαμμένων τοιχοδομών.

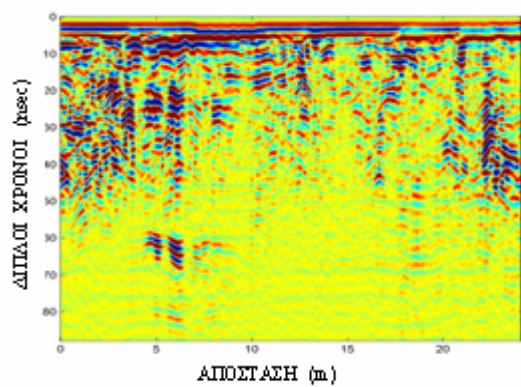
Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων προτίνεται δοκιμαστική ανασκαφή είτε κατά μήκος της γραμμής f021 από την αρχή της μέχρι τα 10m, είτε κατά μήκος της γραμμής f054 από τα 6m έως τα 20m.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

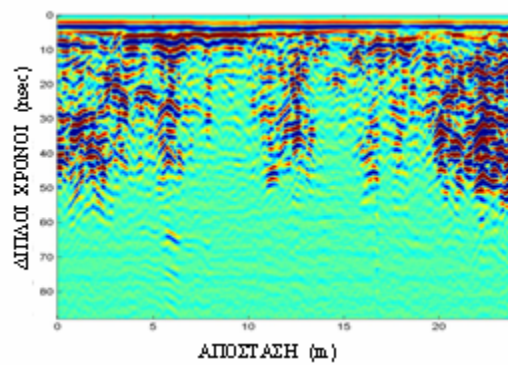
1. Αλευράς Νικόλαος, “Γεωηλεκτρική διασκόπηση για τον προσδιορισμό καρστικών δομών στο οροπέδιο του Ομαλού”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2006.
2. Ανδριανάκης Μιχάλης, “Η παλιά πόλη των Χανίων”, εκδόσεις Αδαή 1997.
3. Ανδριανάκης Μιχάλης, “Το έργο των επιστημονικών επιτροπών αναστήλωσης, συντήρησης και ανάδειξης μνημείων”, Υπουργείο πολιτισμού, Αθήνα 2006.
4. Αρχοντάκη Δέσποινα “Γεωηλεκτρική διασκόπηση στο φράγμα τριών ποταμών Ρεθύμνου”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2006.
5. Βαφείδης Αντώνιος, “Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II”, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά 2001.
6. Παπαβασιλείου Αγγελική, “Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ με τη χρήση νευρωνικών δικτύων – εφαρμογές σε περιβαλλοντικά προβλήματα”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2004.
7. Πουλιούδης Γεώργιος, “Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 1999.
8. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2001.
9. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα”, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2002.
10. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Συμβολή των μεθόδων ταξινόμησης δεδομένων γεωραντάρ στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2007.
11. Φύλλο Χανίων, ΙΓΜΕ 1971.

12. Archivio di stato (foto), Venezia 1688.
 13. Daniels J.J, Brower J., Baumgartner F. (1998). High resolution GPR at Brookhaven National Laboratory to delineate complex subsurface targets. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 3, pp. 1-5.
 14. Daniels, J.J, Grumman D, Vendl M. (1997). Vertical Incident Three Dimensional GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 2, pp. 1-9.
 15. Davis, J. L., Annan, A. P. (1989), Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospecting*, 37, pp. 531-551.
 16. Gerola, G. Monumenti Veneti nell' isola di Creta, A, 1. Venezia 1905.
 17. Hugenschmidt J., Partl M.N., DeWitte H. (1998). GPR inspection of a mountainmotorway in Switzerland. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 40, pp. 95-104.
 18. Moffatt D.L., Puskar R.J. (1976). A Subsurface Electromagnetic Pulse Radar. *Journal of Applied Geophysics*.
 19. Smemoe C.M. (2000). Processing and Visualization of GPR Data for Assessing Natural Hydrogeologic Conditions. Term Paper Civil and Environmental Engineering 540.
 20. Toshioka T., Tsuchida T., Sasahara K. (1995). Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33, pp. 119-124.
-
1. mysite.du.edu/~lonyer/
 2. www.archaeometry.gr/oldv/publication/arch-tileoskopikanea/index.htm
 3. www.archeometry.gr/oldv/publication/sybosion/09.htm
 4. www.ims.forth.gr/newsletters-gr_02.html#1
 5. www.geo_analysis.com/index.html
 6. www.geophysical.com
 7. www.historycooperative.org/journals/sia/31.1/young.html
 8. google earth

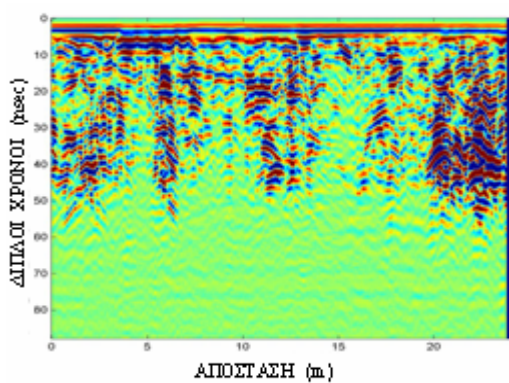
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



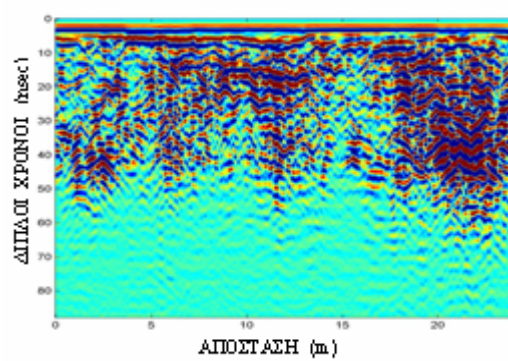
Κάνναβος 1 – Γραμμή 1



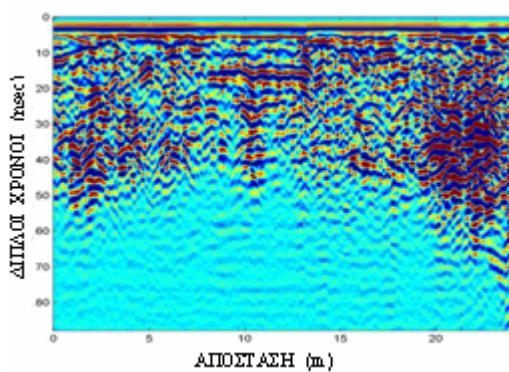
Κάνναβος 1 – Γραμμή 2



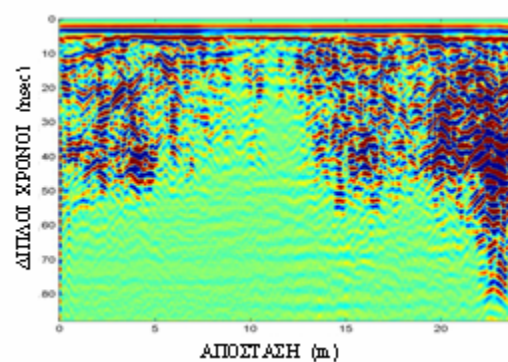
Κάνναβος 1 – Γραμμή 3



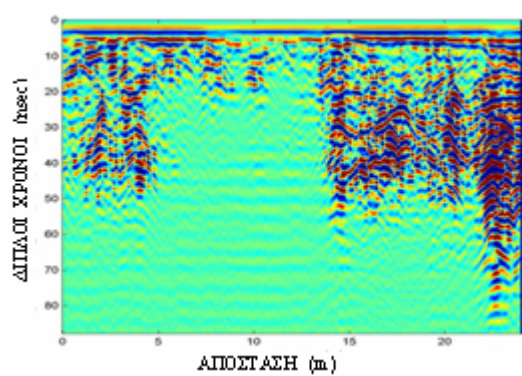
Κάνναβος 1 – Γραμμή 4



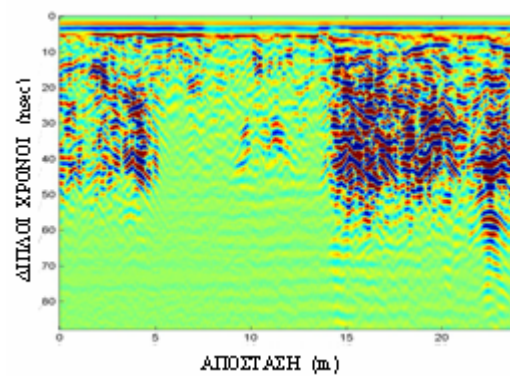
Κάνναβος 1 – Γραμμή 5



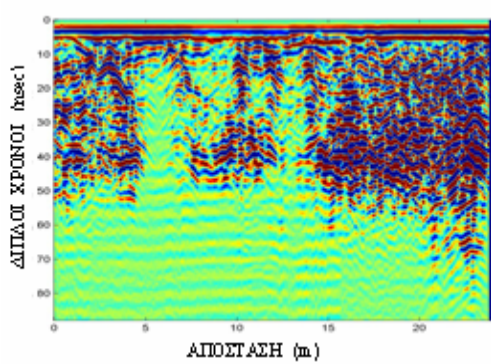
Κάνναβος 1 – Γραμμή 6



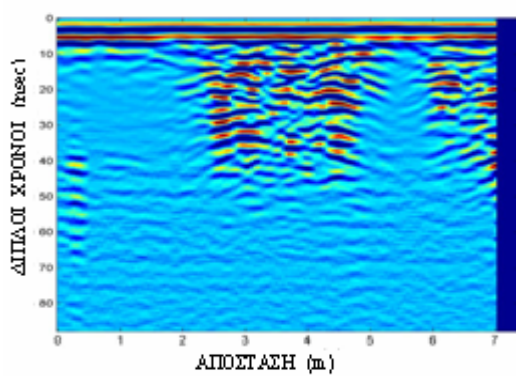
Κάνναβος 1 – Γραμμή 7



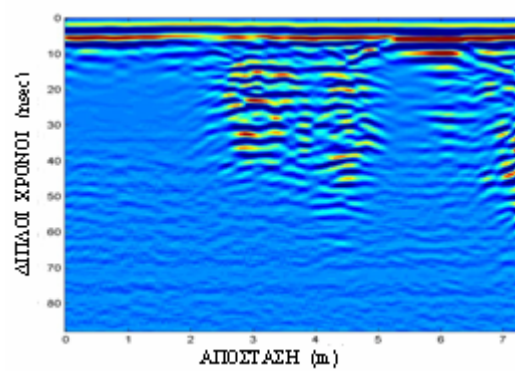
Κάνναβος 1 – Γραμμή 8



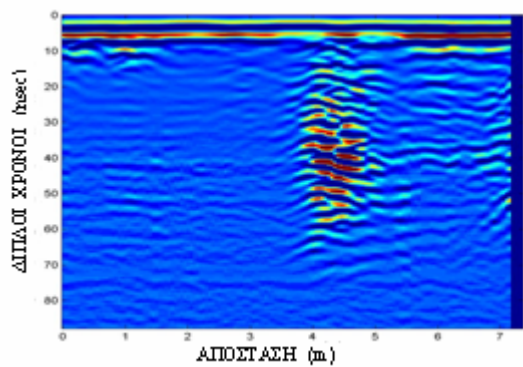
Κάνναβος 1 – Γραμμή 9



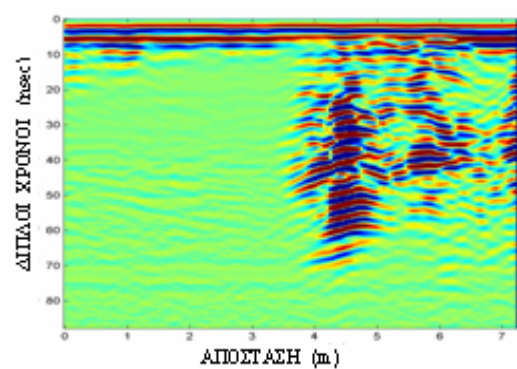
Κάνναβος 2 – γραμμή 1



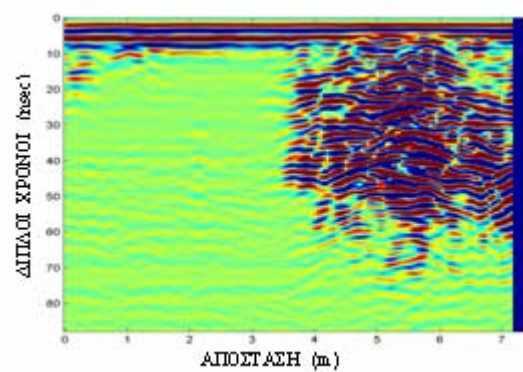
Κάνναβος 2 – γραμμή 2



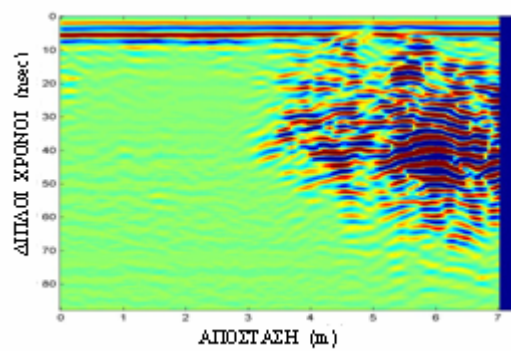
Κάνναβος 2 – γραμμή 3



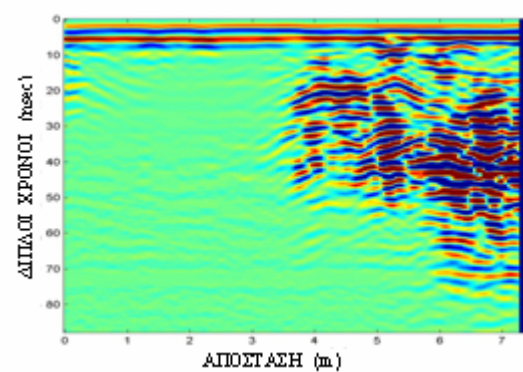
Κάνναβος 2 – γραμμή 4



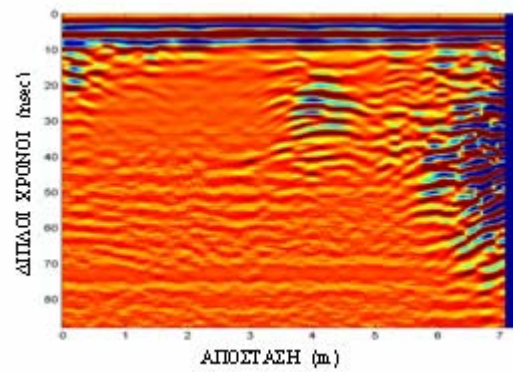
Κάνναβος 2 – γραμμή 5



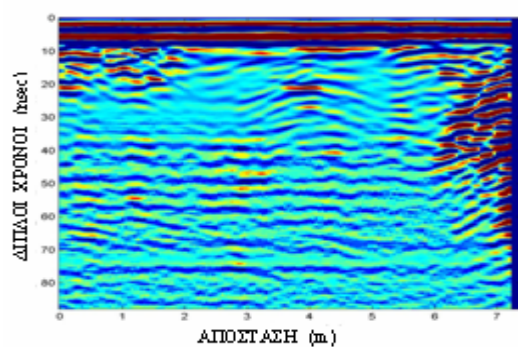
Κάνναβος 2 – γραμμή 6



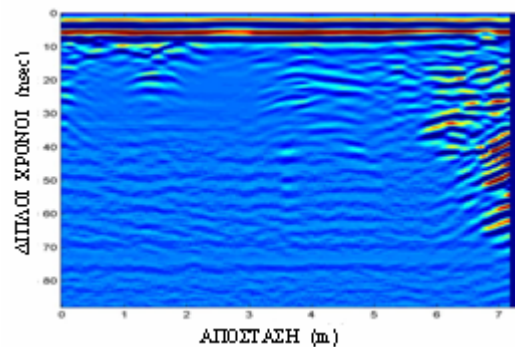
Κάνναβος 2 – γραμμή 7



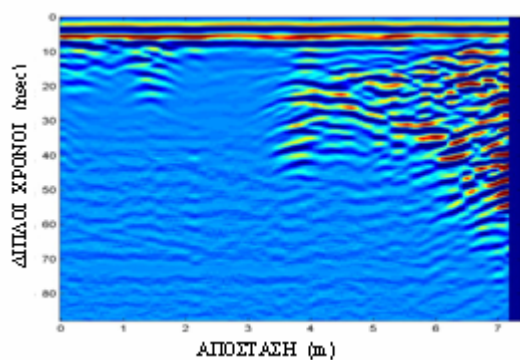
Κάνναβος 2 – γραμμή 8



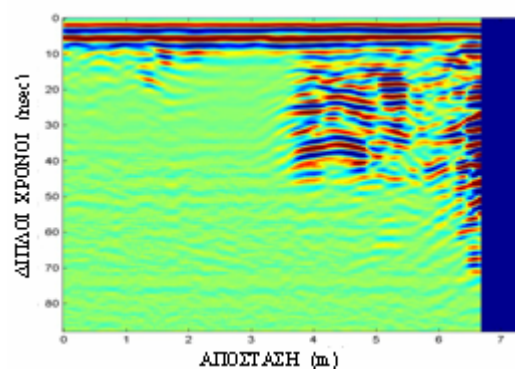
Κάνναβος 2 – γραμμή 9



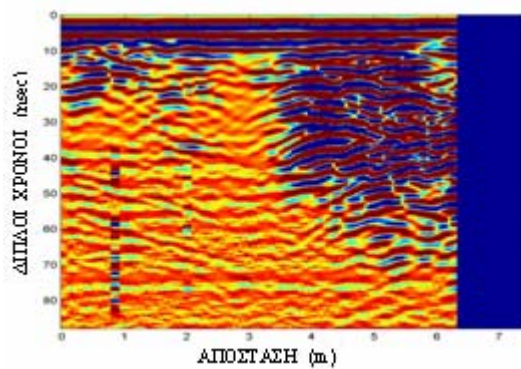
Κάνναβος 2 – γραμμή 10



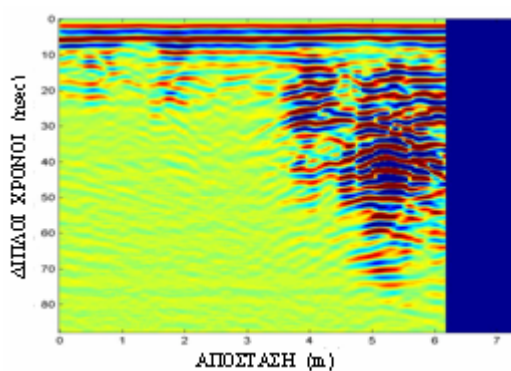
Κάνναβος 2 – γραμμή 11



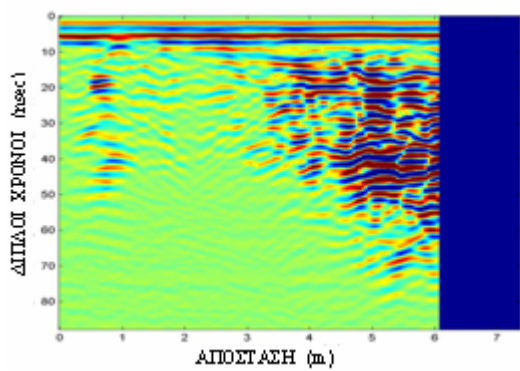
Κάνναβος 2 – γραμμή 12



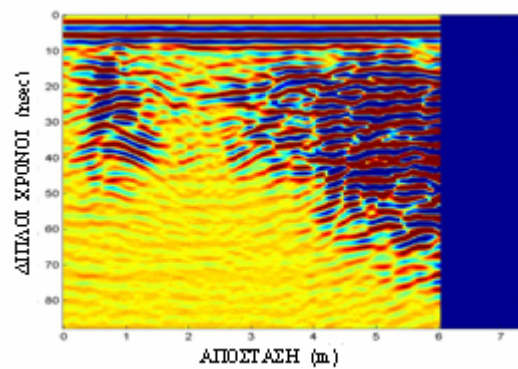
Κάνναβος 2 – γραμμή 13



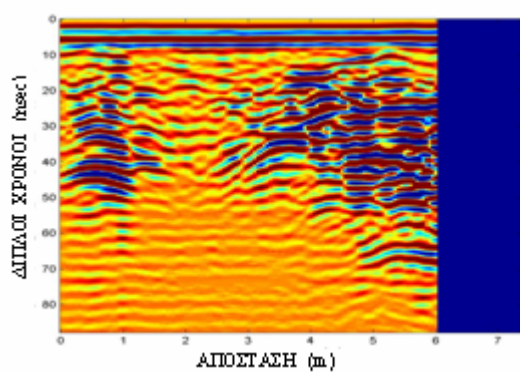
Κάνναβος 2 – γραμμή 14



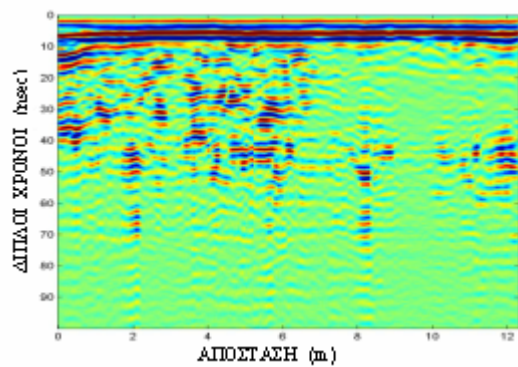
Κάνναβος 2 – γραμμή 15



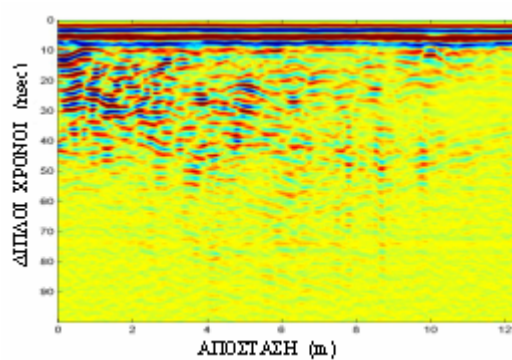
Κάνναβος 2 – γραμμή 16



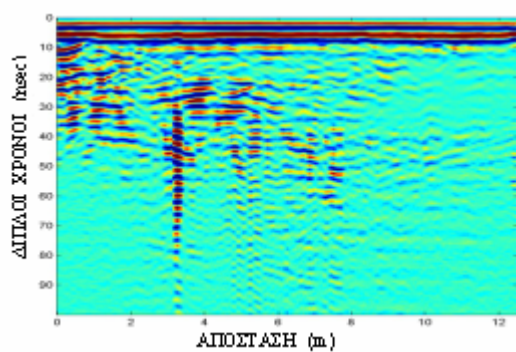
Κάνναβος 2 – γραμμή 16



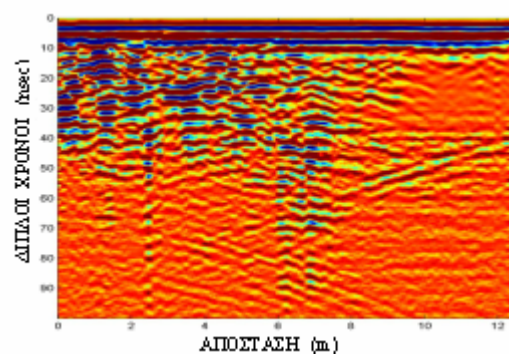
Κάνναβος 3 – γραμμή 1



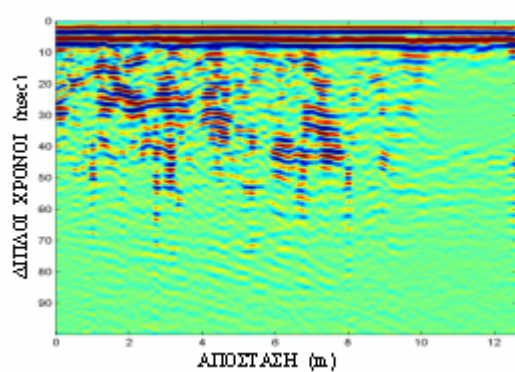
Κάνναβος 3 – γραμμή 2



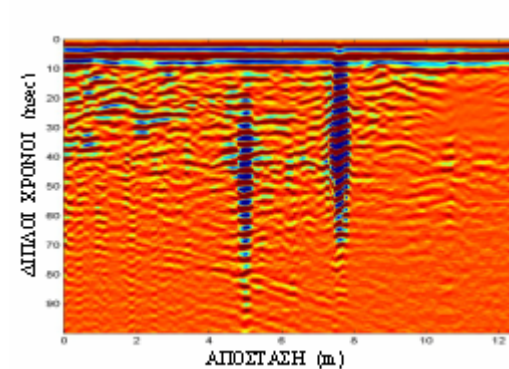
Κάνναβος 3 – γραμμή 3



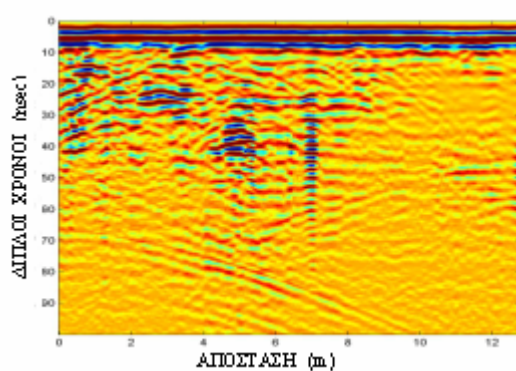
Κάνναβος 3 – γραμμή 4



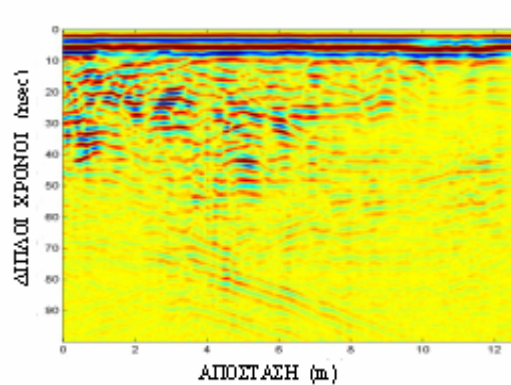
Κάνναβος 3 – γραμμή 5



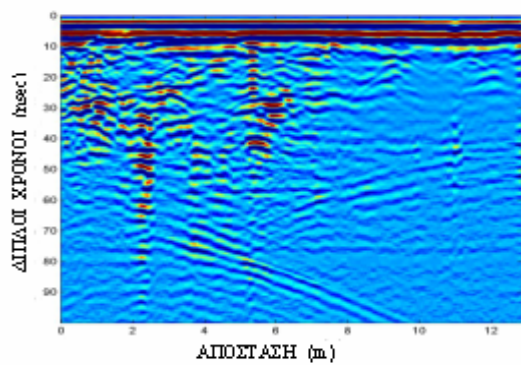
Κάνναβος 3 – γραμμή 6



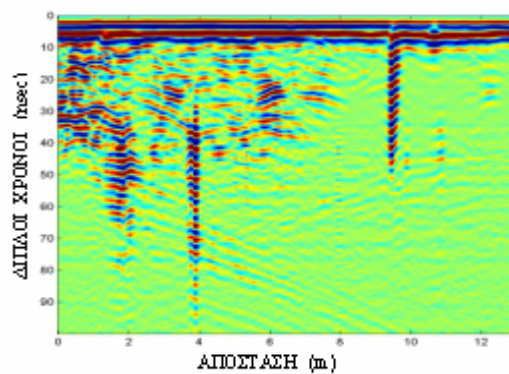
Κάνναβος 3 – γραμμή 7



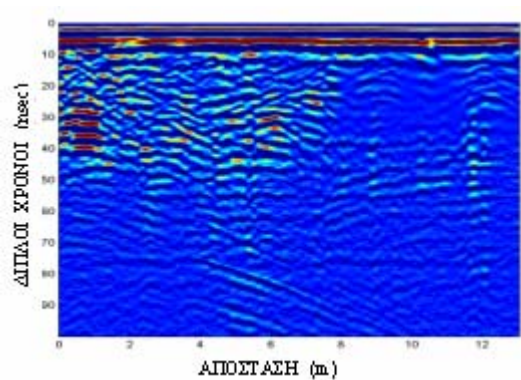
Κάνναβος 3 – γραμμή 8



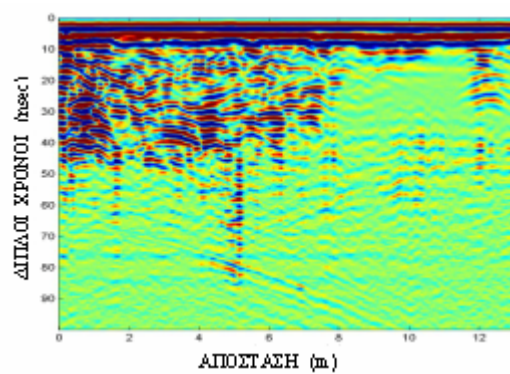
Κάνναβος 3 – γραμμή 9



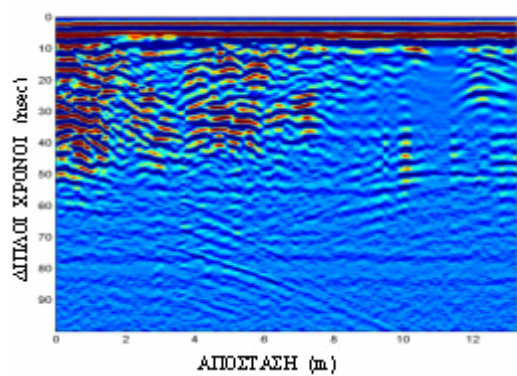
Κάνναβος 3 – γραμμή 10



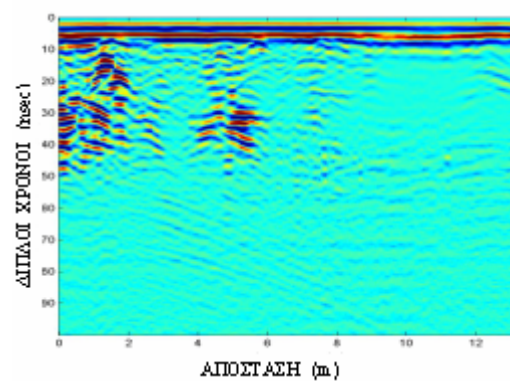
Κάνναβος 3 – γραμμή 11



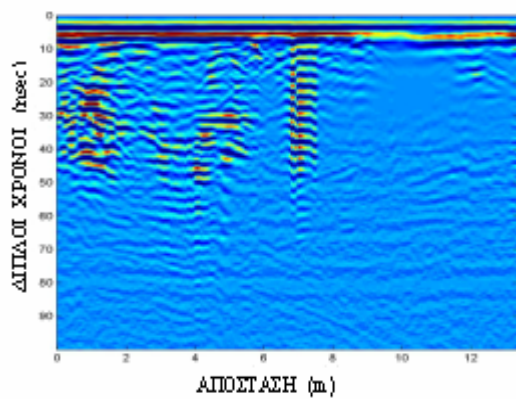
Κάνναβος 3 – γραμμή 12



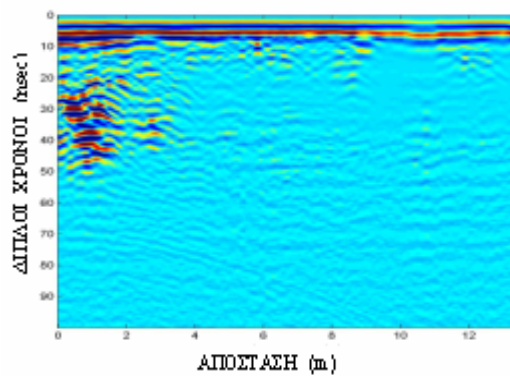
Κάνναβος 3 – γραμμή 13



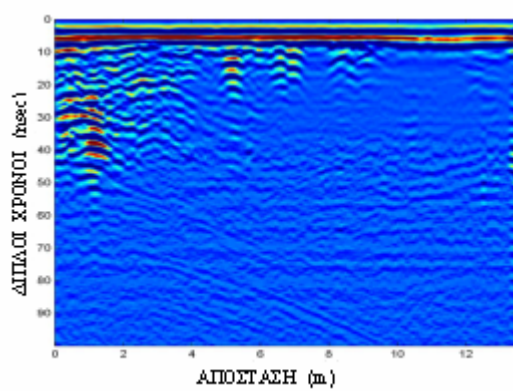
Κάνναβος 3 – γραμμή 16



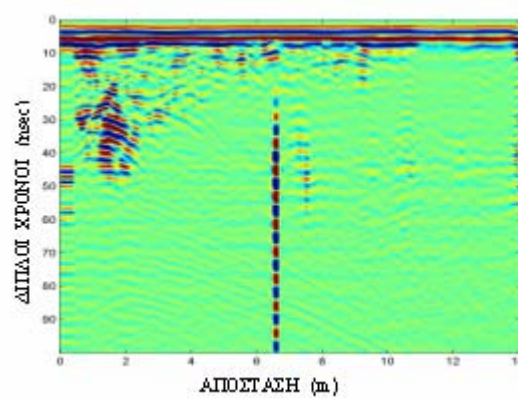
Κάνναβος 3 – γραμμή 17



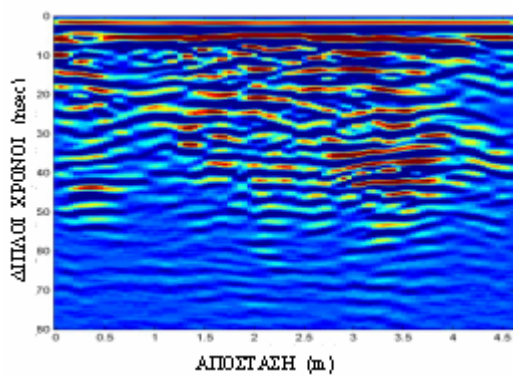
Κάνναβος 3 – γραμμή 18



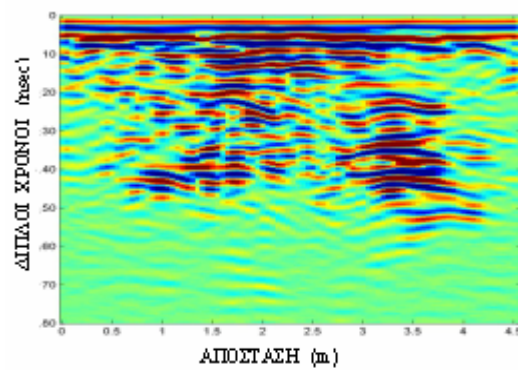
Κάνναβος 3 – γραμμή 19



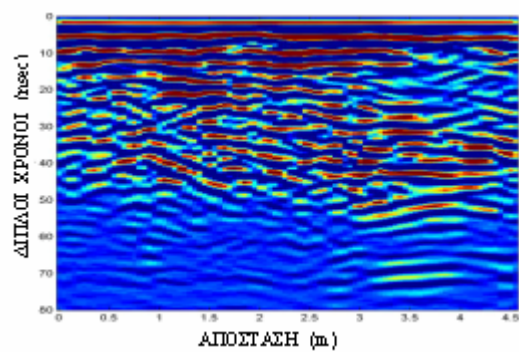
Κάνναβος 3 – γραμμή 20



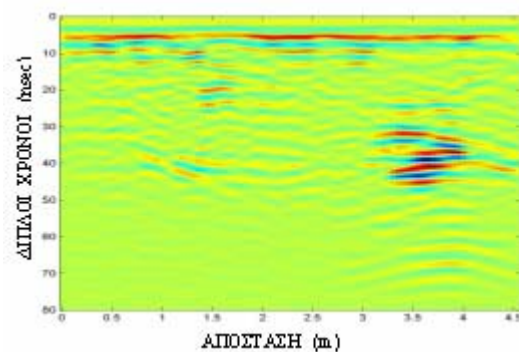
Κάνναβος 4 – γραμμή 21



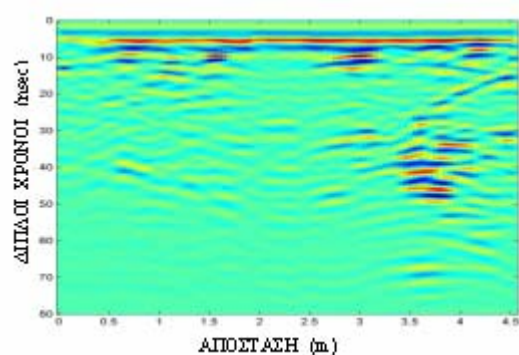
Κάνναβος 4 – γραμμή 22



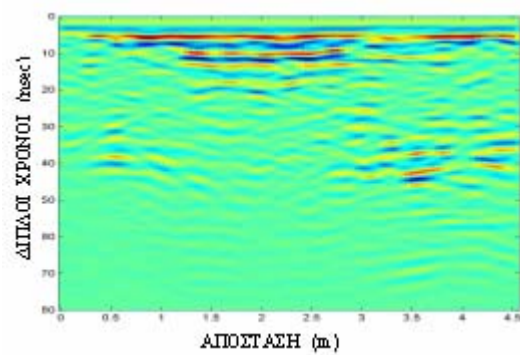
Κάνναβος 4 – γραμμή 23



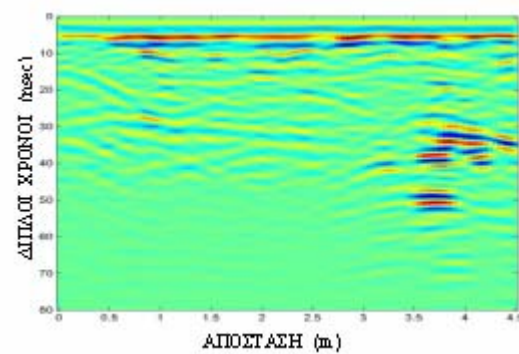
Κάνναβος 4 – γραμμή 24



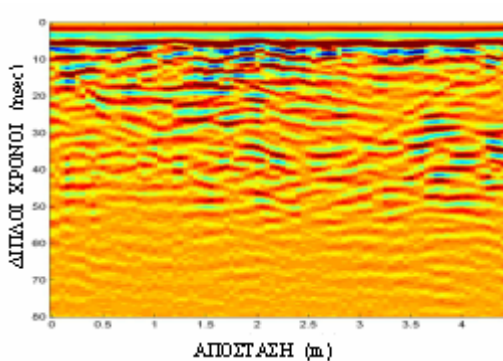
Κάνναβος 4 – γραμμή 25



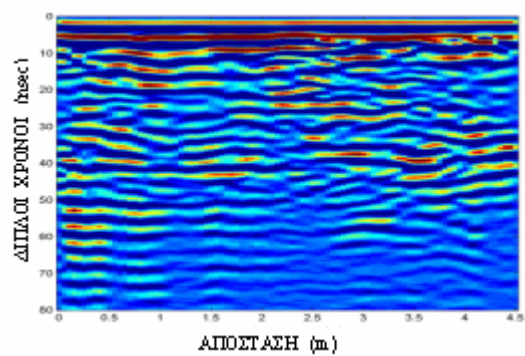
Κάνναβος 4 – γραμμή 26



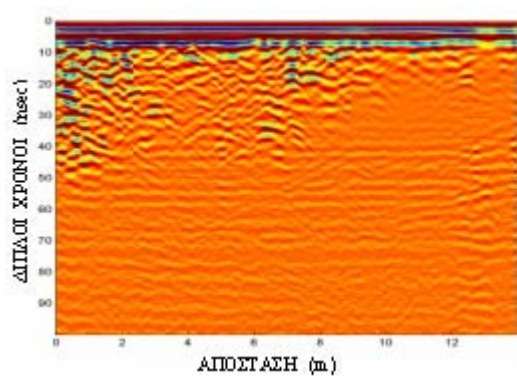
Κάνναβος 4 – γραμμή 27



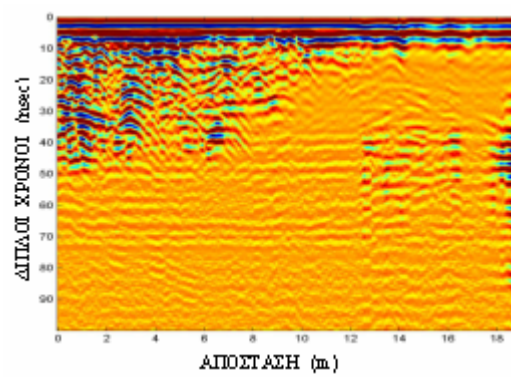
Κάνναβος 4 – γραμμή 28



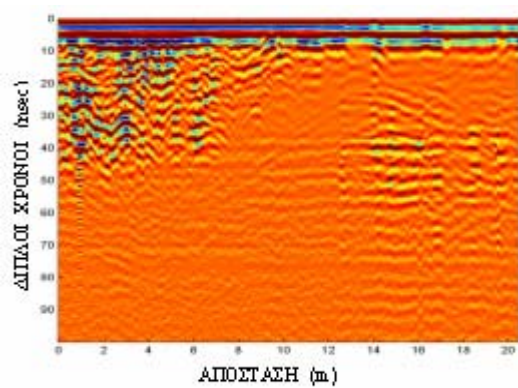
Κάνναβος 4 – γραμμή 29



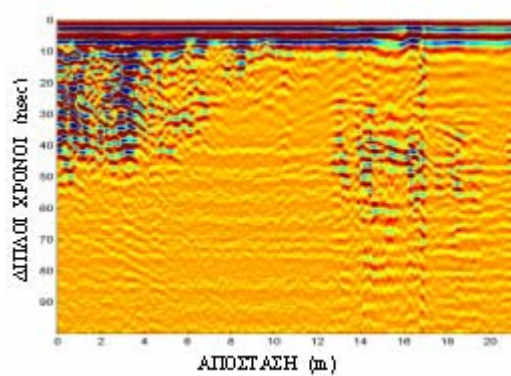
Κάνναβος 6 – γραμμή 1



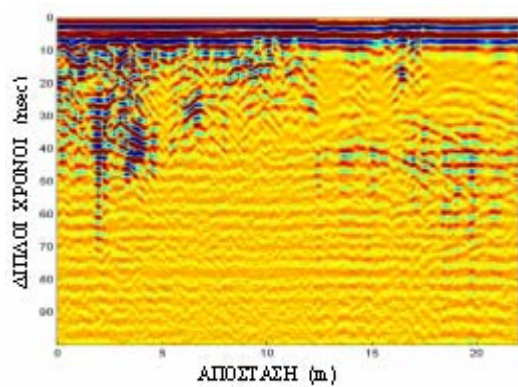
Κάνναβος 6 – γραμμή 2



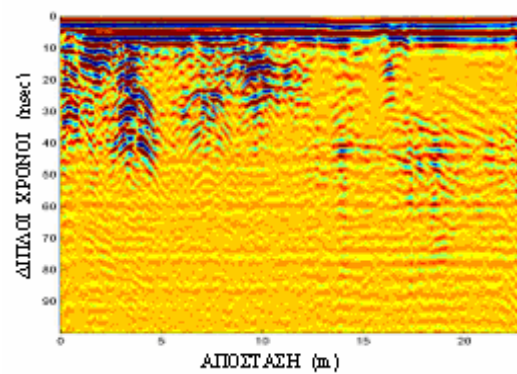
Κάνναβος 6 – γραμμή 3



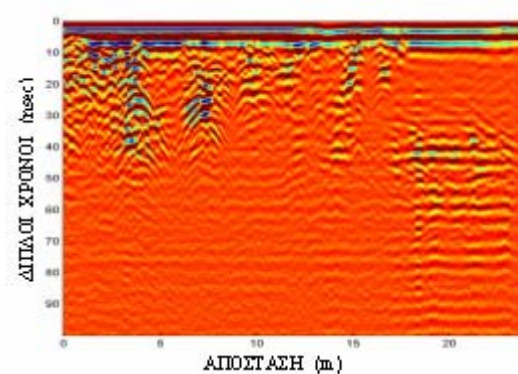
Κάνναβος 6 – γραμμή 4



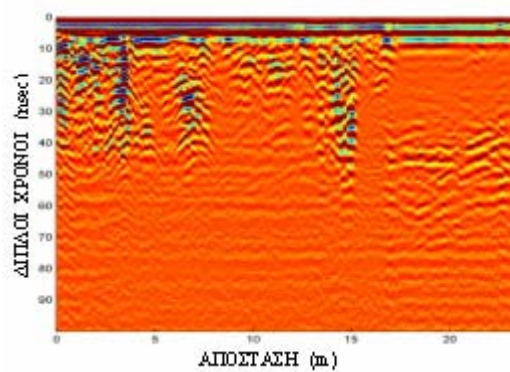
Κάνναβος 6 – γραμμή 5



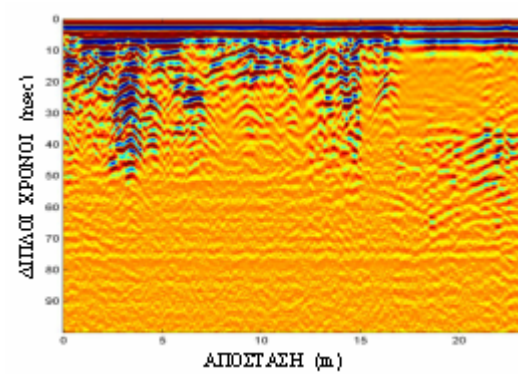
Κάνναβος 6 – γραμμή 6



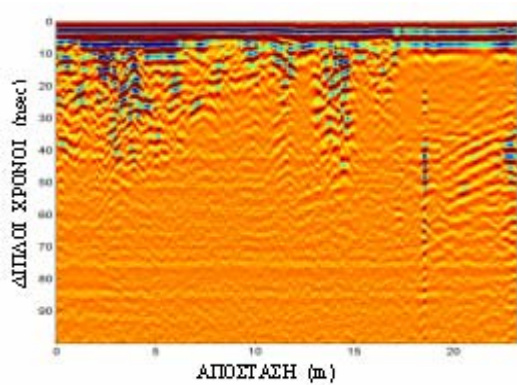
Κάνναβος 6 – γραμμή 7



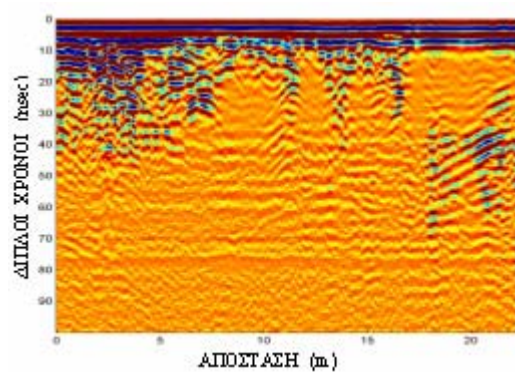
Κάνναβος 6 – γραμμή 8



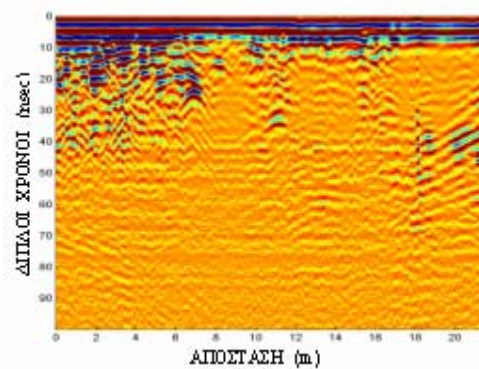
Κάνναβος 6 – γραμμή 9



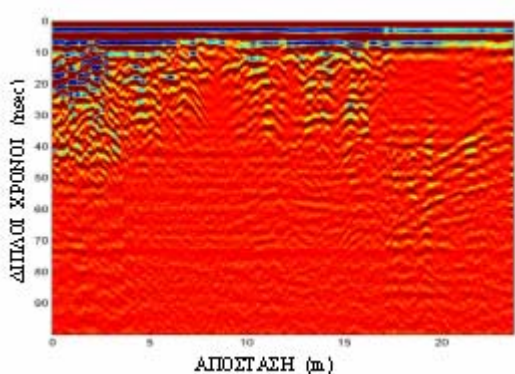
Κάνναβος 6 – γραμμή 10



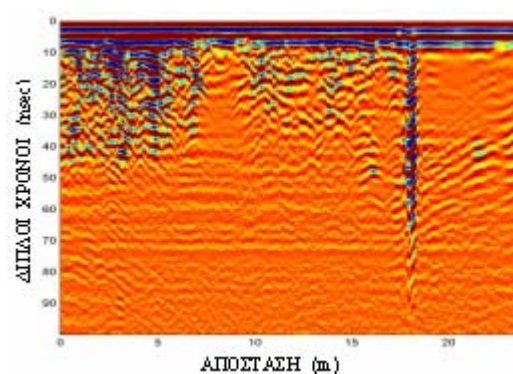
Κάνναβος 6 – γραμμή 11



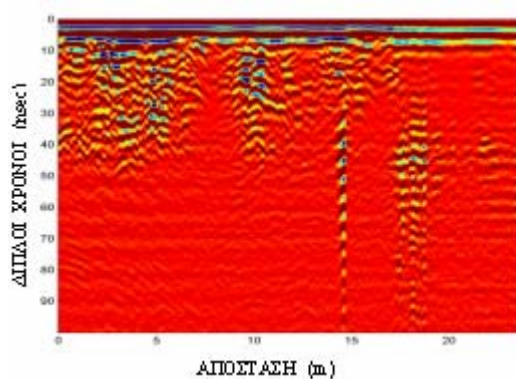
Κάνναβος 6 – γραμμή 12



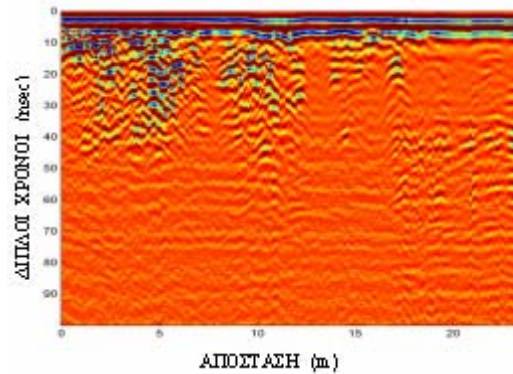
Κάνναβος 6 – γραμμή 13



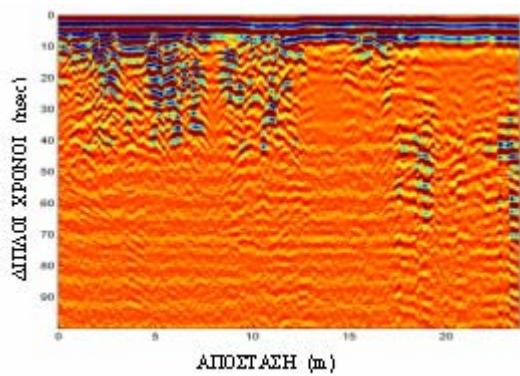
Κάνναβος 6 – γραμμή 14



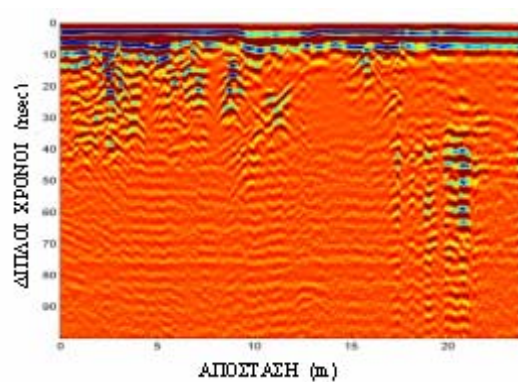
Κάνναβος 6 – γραμμή 15



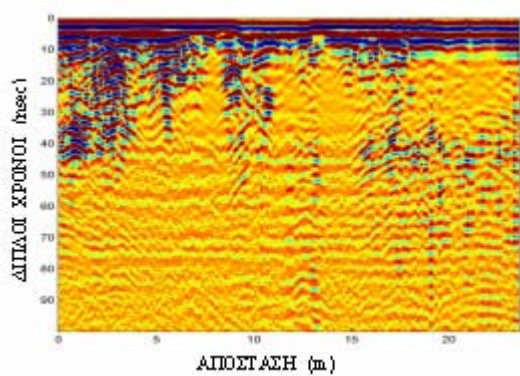
Κάνναβος 6 – γραμμή 16



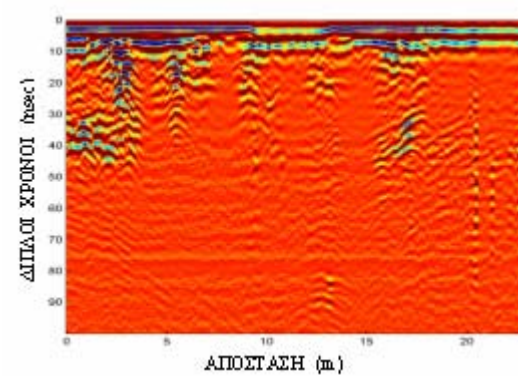
Κάνναβος 6 – γραμμή 17



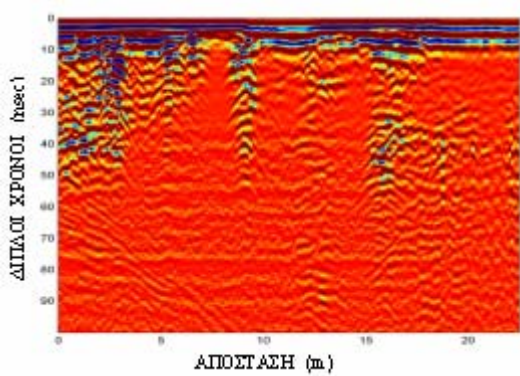
Κάνναβος 6 – γραμμή 18



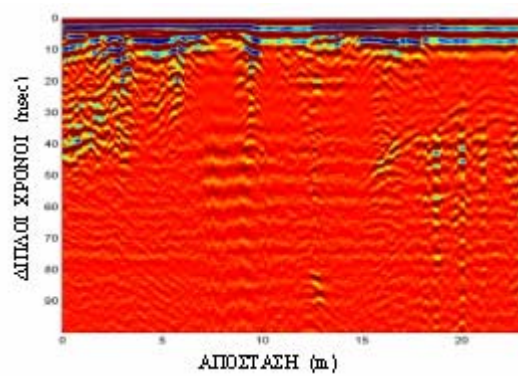
Κάνναβος 6 – γραμμή 19



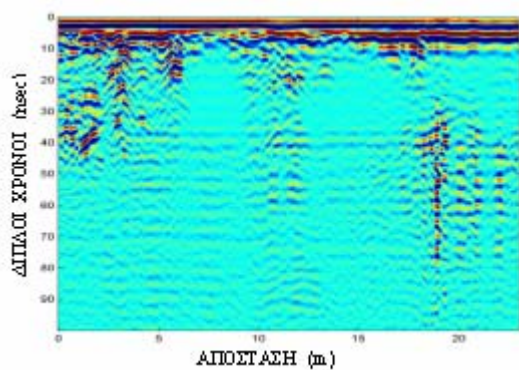
Κάνναβος 6 – γραμμή 20



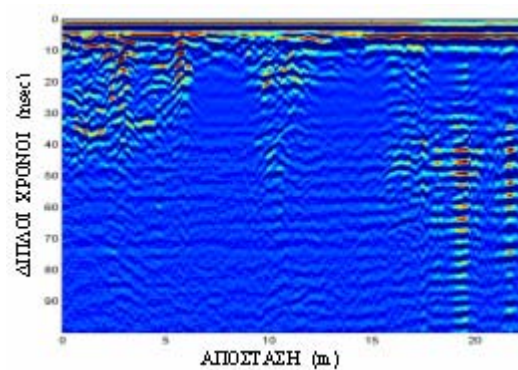
Κάνναβος 6 – γραμμή 21



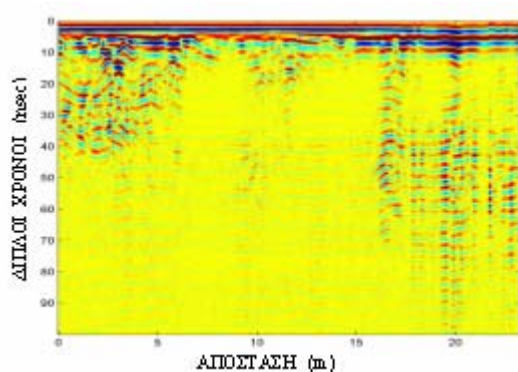
Κάνναβος 6 – γραμμή 22



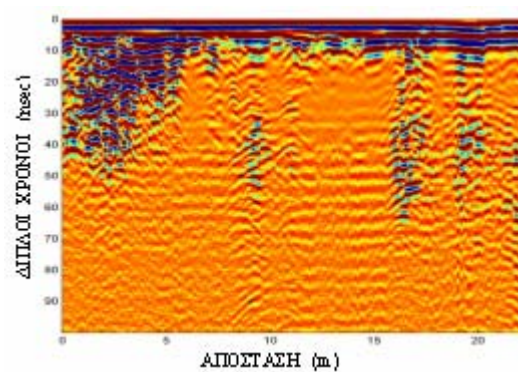
Κάνναβος 6 – γραμμή 23



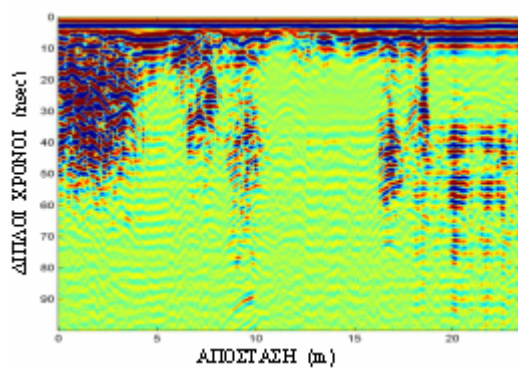
Κάνναβος 6 – γραμμή 24



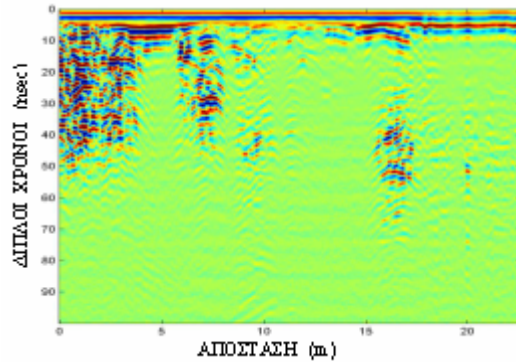
Κάνναβος 6 – γραμμή 25



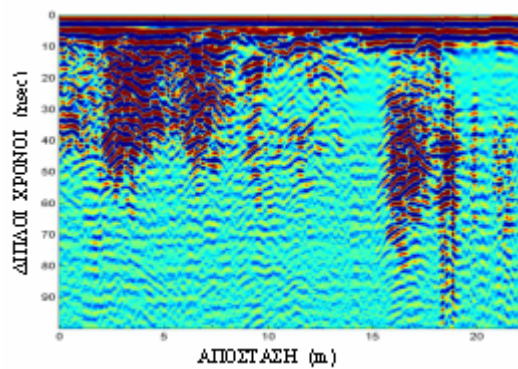
Κάνναβος 6 – γραμμή 26



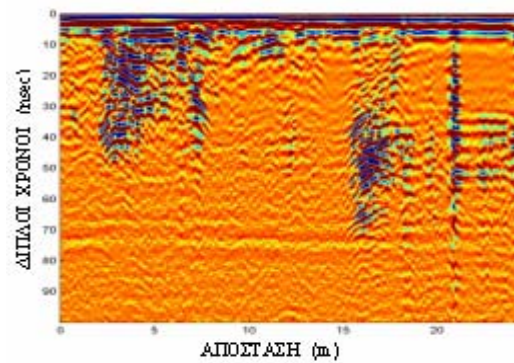
Κάνναβος 6 – γραμμή 27



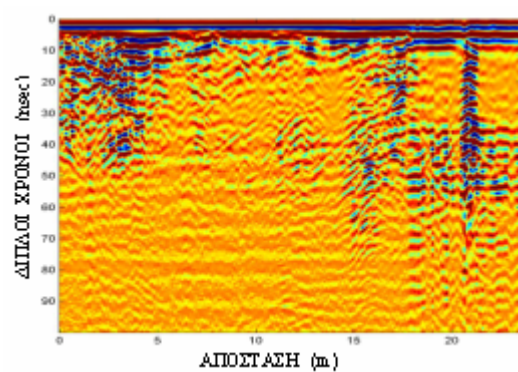
Κάνναβος 6 – γραμμή 28



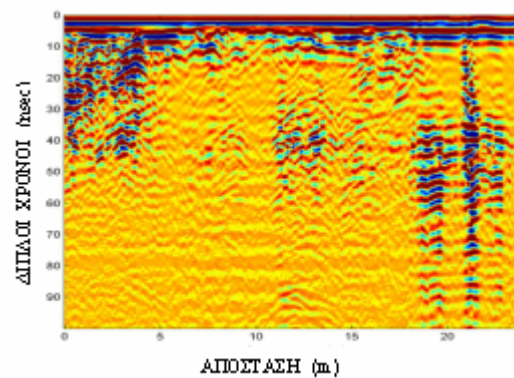
Κάνναβος 6 – γραμμή 29



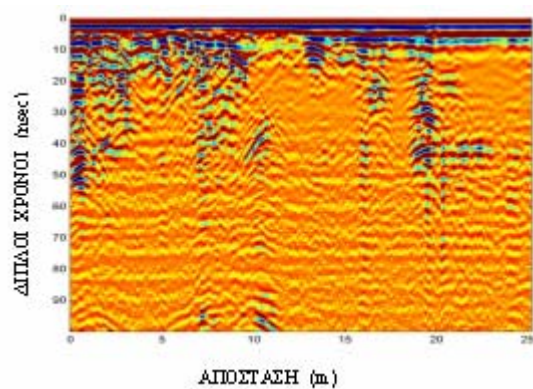
Κάνναβος 6 – γραμμή 30



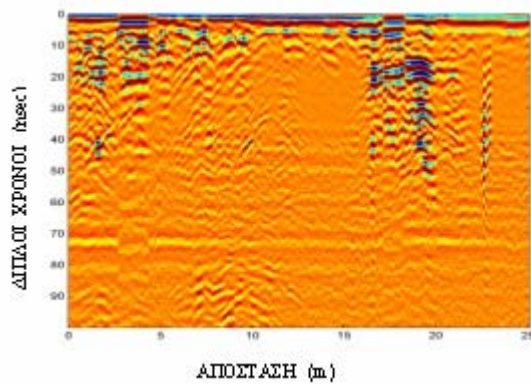
Κάνναβος 6 – γραμμή 31



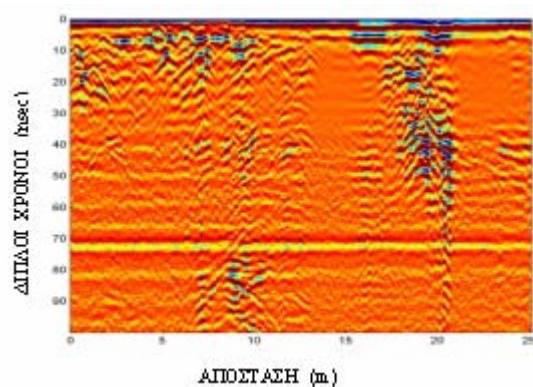
Κάνναβος 6 – γραμμή 32



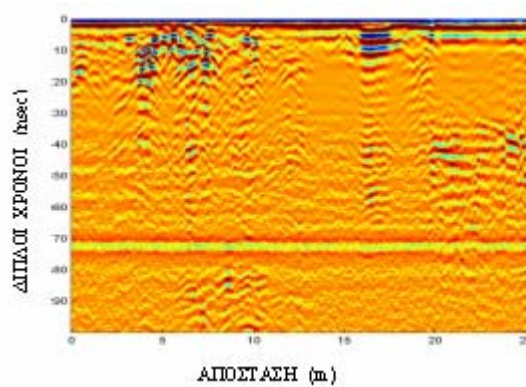
Κάνναβος 7 – γραμμή 26



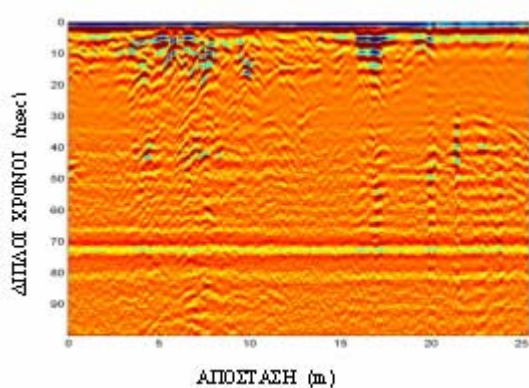
Κάνναβος 7 – γραμμή 28



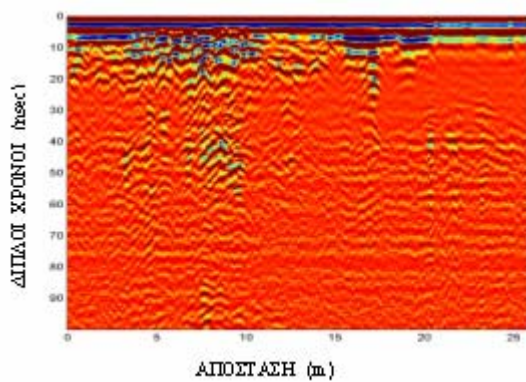
Κάινναβος 7 – γραμμή 30



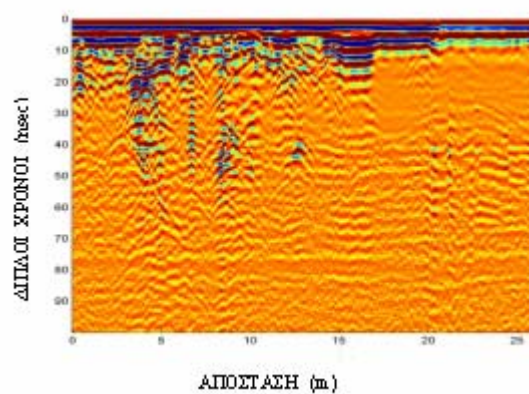
Κάινναβος 7 – γραμμή 32



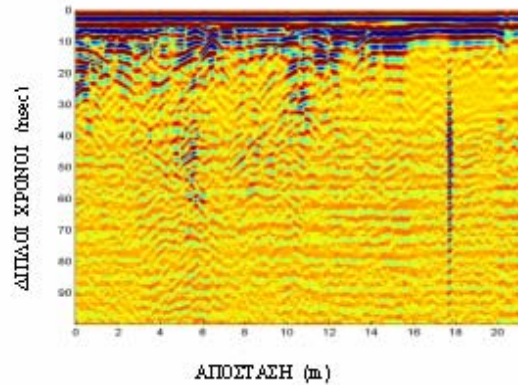
Κάινναβος 7 – γραμμή 34



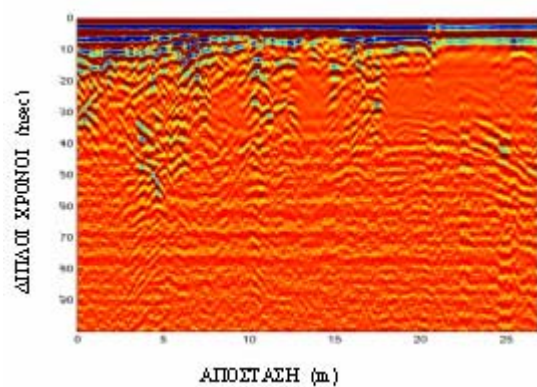
Κάινναβος 7 – γραμμή 36



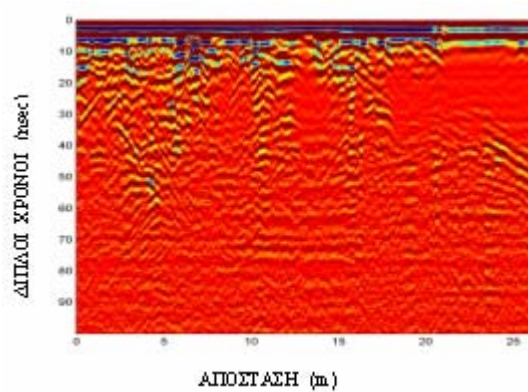
Κάινναβος 7 – γραμμή 40



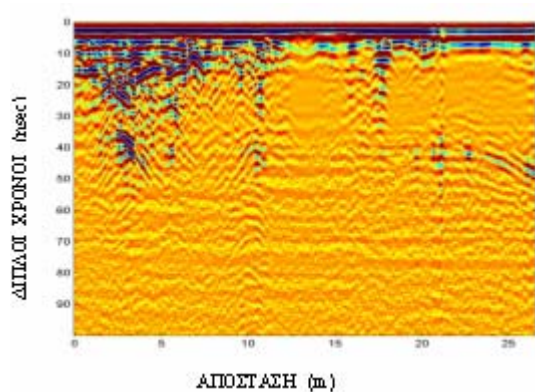
Κάινναβος 7 – γραμμή 38



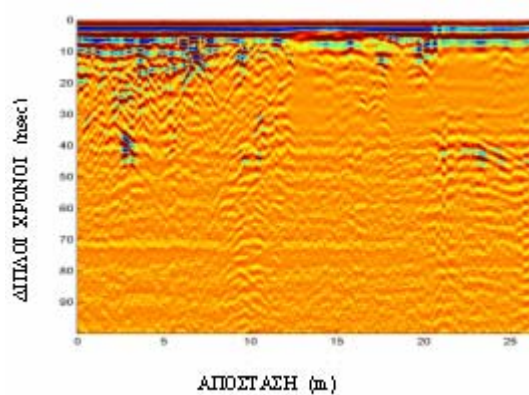
Κάνναβος 7 – γραμμή 42



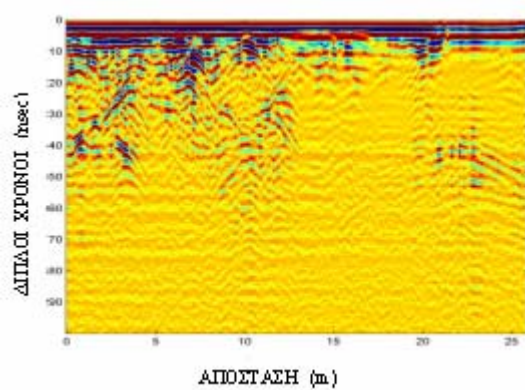
Κάνναβος 7 – γραμμή 43



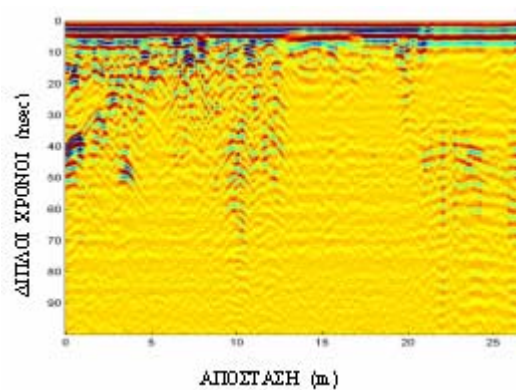
Κάνναβος 7 – γραμμή 44



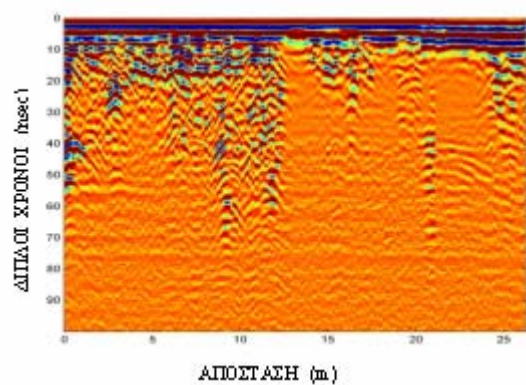
Κάνναβος 7 – γραμμή 45



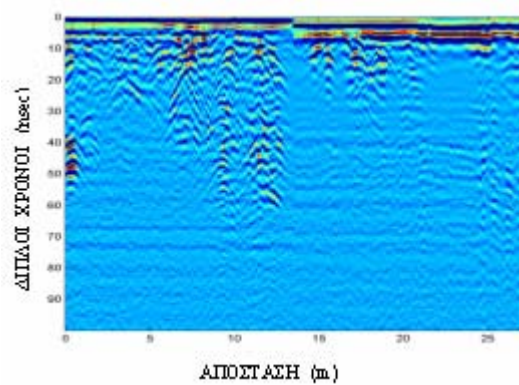
Κάνναβος 7 – γραμμή 46



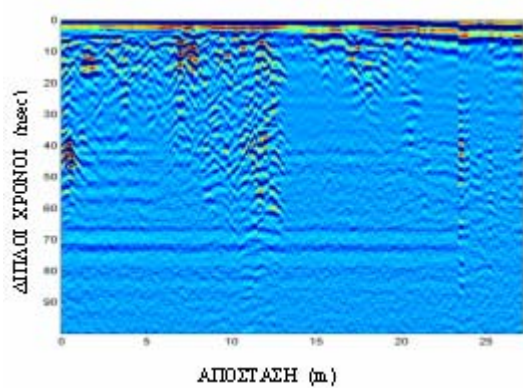
Κάνναβος 7 – γραμμή 47



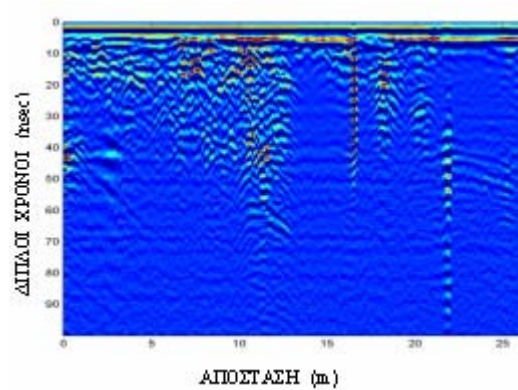
Κάνναβος 7 – γραμμή 48



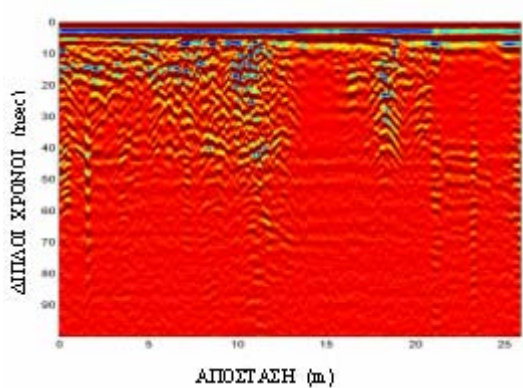
Κάνναβος 7 – γραμμή 49



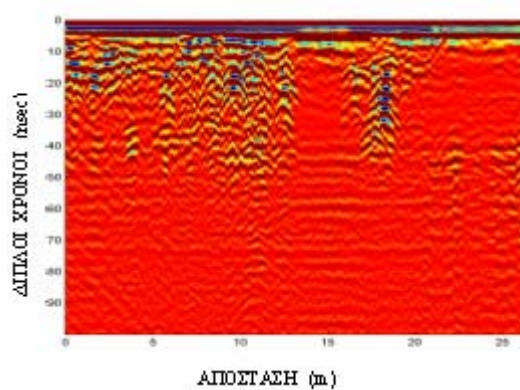
Κάνναβος 7 – γραμμή 50



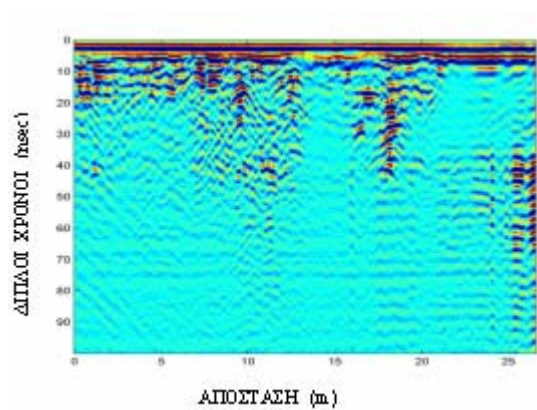
Κάνναβος 7 – γραμμή 51



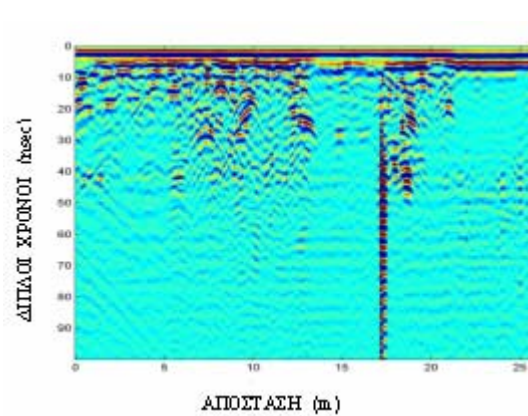
Κάνναβος 7 – γραμμή 52



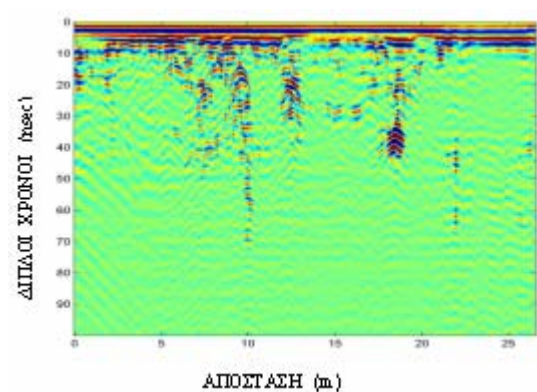
Κάνναβος 7 – γραμμή 53



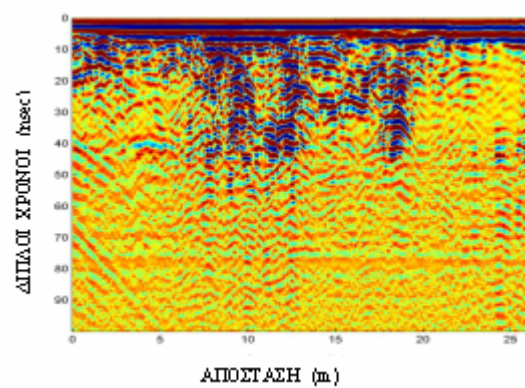
Κάναβος 7 – γραμμή 54



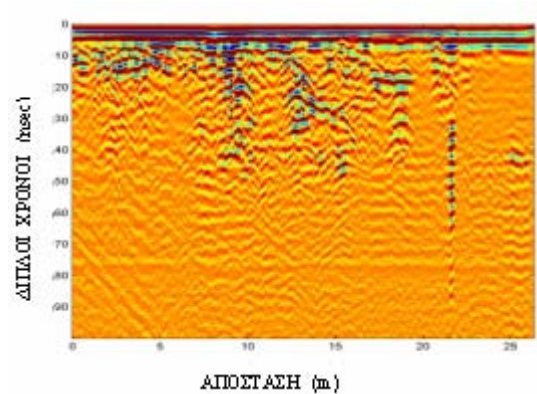
Κάναβος 7 – γραμμή 55



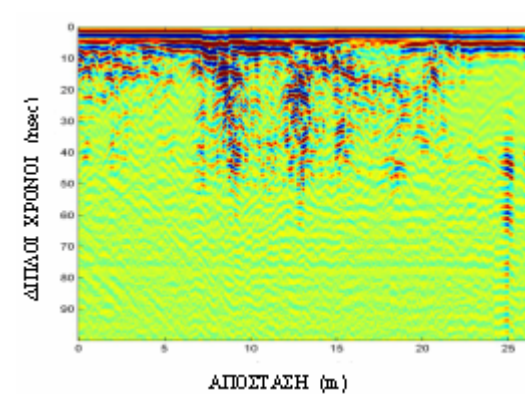
Κάναβος 7 – γραμμή 56



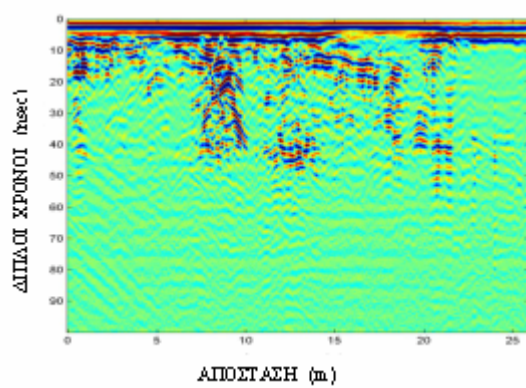
Κάναβος 7 – γραμμή 57



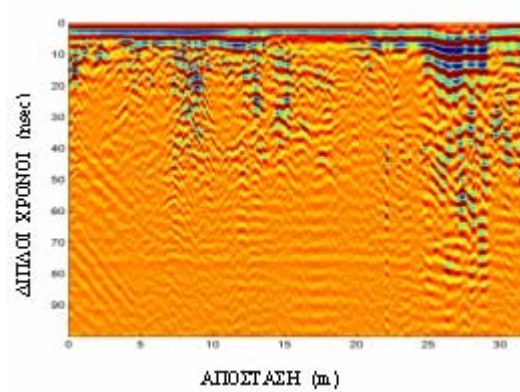
Κάναβος 7 – γραμμή 58



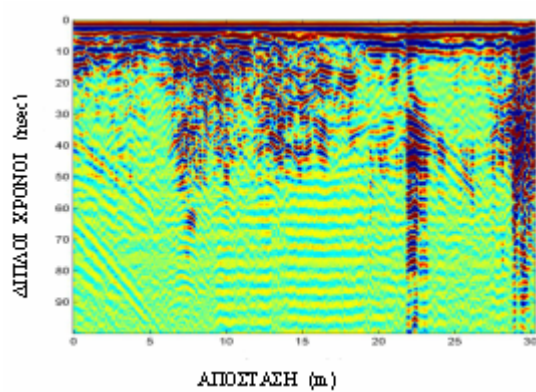
Κάναβος 7 – γραμμή 59



Κάνναβος 7 – γραμμή 60



Κάνναβος 7 – γραμμή 61



Κάνναβος 7 – γραμμή 62