ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Διπλωματική Εργασία

"Συμβολή του γεωραντάρ στη χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων - Εφαρμογή στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας, Ν.Χ "

Μερόπη Κ. Μανατάκη

Εξεταστική Επιτροπή:

Βαφείδης Αντώνιος	Καθηγητής (Επιβλέπων)
Σουπιός Παντελής	Αναπληρωτής Καθηγητής
Σπανουδάκης Νικόλαος	Δρ. Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά

Νοέμβριος 2011

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τη ΚΕ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων των Χανίων, στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη του υπεδάφους με τη γεωφυσική μέθοδο γεωραντάρ. Η έρευνα είχε ως στόχο τον εντοπισμό πιθανών θέσεων θαμμένων αρχαιοτήτων στην ευρύτερη περιοχή της αρχαίας πόλης Απτέρας. Δόθηκε βαρύτητα τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία των δεδομένων. Συνολικά διασκοπήθηκαν 230 γραμμές συνολικού μήκους 4384 m σε επιλεγμένες περιοχές από τους αρχαιολόγους, που δεν έχουν γίνει μέχρι στιγμής ανασκαφές ή αρχαιολογικές τομές.

Η μέθοδος του γεωραντάρ αποτελεί μια υψηλής ευκρίνειας ηλεκτρομαγνητική τεχνική όπου χρησιμοποιούνται ραδιοκύματα, συχνότητας 1-1000MHz, με σκοπό την χαρτογράφηση του υπεδάφους. Για την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκαν το λογισμικό πρόγραμμα MATLAB και το GPR-Pro, μία αυτοτελής λογισμική μονάδα που αναπτύχθηκε στο MATLAB για την επεξεργασία κυρίως των δεδομένων GPR.

Συγκεκριμένα οι περιοχές μελέτης περιλαμβάνουν: την περιοχή εντός της αυλής του μοναστηριού, τις περιοχές νότια και ανατολικά του μοναστηριού, την περιοχή δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής, την περιοχή των ρωμαϊκών λουτρών, την περιοχή βόρεια των λουτρών, τις περιοχές νοτιοανατολικά και βορειοδυτικά του χώρου στάθμευσης και τέλος ένα οικόπεδο στο καλάμι το οποίο προορίζεται για αλλαγή χρήσης και εντοπίστηκαν υπολείμματα ενός θαμμένου τοιχίου. Στις παραπάνω περιοχές διασκόπησης, έγινε ερμηνεία των δεδομένων από όπου προέκυψαν συμπεράσματα για τη θέση θαμμένων αρχαιοτήτων όπως θεμέλια, τοιχία, και δεξαμενές. Πιο συγκεκριμένα, για τις περιοχές νότια και ανατολικά του μοναστηριού, αλλά και δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής, επιλέχθηκαν θέσεις όπου προτείνεται η πραγματοποίηση αρχαιολογικών τομών. Στις περιοχές νοτιανατολικά του χώρου στάθμευσης και εντός της αυλής του μοναστηριού, βάσει των ανωμαλιών που παρουσιάζονται, προτείνεται η εφαρμογή και άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Οι υπόλοιπες περιοχές δεν παρουσίασαν κάποιο ενδιαφέρον.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν θα χρησιμοποιηθούν για την χαρτογράφηση όλων των επιλεγμένων θέσεων του αρχαιολογικού χώρου. Η διαδικασία αυτή συντελεί στην προσανατολισμένη ανασκαφή αρχαιοτήτων και στην μείωση του χρόνου και κόστους αναγνωριστικών αρχαιολογικών ανασκαφών.

Πρόλογος

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα κύριο Αντώνη Βαφείδη για την συνεχή του καθοδήγηση, την στήριξη του και τις γνώσεις που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Νικόλαο Σπανουδάκη που μου στάθηκε πρώτα σαν άνθρωπος και με καθοδήγησε με τις ιδέες του, τις γνώσεις και τις συμβουλές του. Η συμμετοχή του στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής, ήταν καθοριστικής σημασίας και αισθάνομαι ότι μια απλή ευχαριστία και μόνο δεν αρκεί για να εκφράσω την βαθύτατη εκτίμηση μου.

Ευχαριστίες επίσης θα ήθελα να εκφράσω στα μέλη της ΚΕ' Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων των Χανίων, και ιδιαίτερα στην αρχαιολόγο κυρία Βάννα Νινιού Κινδέλη για τις πολύτιμες γνώσεις που μας παρείχε και την καθοδήγηση της.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Παντελή Σουπιό που δέχθηκε να συμμετάσχει ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα:

Τους Ναυσικά Ανδριοπούλου, Γιώργο Μαυραντωνάκη και Παντελή Βαφείδη, για την πολύ σημαντική βοήθεια που μας παρείχαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Τον Κώστα Μακαντάση για την ηθική υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Τις φίλες μου Όλγα Γκίκα και Θεοδώρα Μαντζάνα για την βοήθεια, την συμπαράσταση και τις συμβουλές τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τον φίλο Αλέξανδρο Κρητικό για τις συμβουλές του και την τεχνική βοήθεια που μου προσέφερε.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και κυρίως τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Αναστασία, για την στήριξη, την κατανόηση και κυρίως την υπομονή που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια. Με υποστήριξαν σε όλες μου τις αποφάσεις, με κάθε τρόπο και χωρίς αυτούς τίποτα απ' όλα αυτά δεν θα είχε επιτευχθεί.

Στην μνήμη του πολυαγαπημένου μου παππού

Μιχάλη Μανατάκη

Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων και εικόνων

Κατάλογος πινάκων

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη χρήση της γεωφυσικής μεθόδου γεωραντάρ για την ανίχνευση και την χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων. Κατή τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας έγινε αρχαιομετρική μελέτη στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας του Νομού Χανίων. Δόθηκε έμφαση τόσο στη συλλογή δεδομένων όσο και στην επεξεργασία αυτών, καθώς και στην ερμηνεία τους. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 230 γραμμές διασκόπησης συνολικού μήκους 4384 m, σε περιοχές εντός του αρχαιολογικού χώρου. Στην παρούσα έκθεση, παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της διασκόπησης.

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανίχνευση και ο εντοπισμός πιθανών θέσεων θαμμένων αρχαιοτήτων και κυρίως θεμελίων, τοίχων και μονοπατιών στην ευρύτερη περιοχή της αρχαίας πόλης Απτέρας. Η χαρτογράφηση όλων των επιλεγμένων θέσεων του αρχαιολογικού χώρου συντελεί στην προσανατολισμένη ανασκαφή αρχαιοτήτων και στην μείωση του χρόνου και κόστους αναγνωριστικών αρχαιολογικών ανασκαφών.

1.3 Ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ

Από τα μέσα της δεκαετίας του ’80 το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar GPR) έγινε ιδιαίτερα δημοφιλές στις κοινότητες των γεωφυσικών, των γεωλόγων και των αρχαιολόγων. Εν τούτοις χρησιμοποιείται σε γεωλογικές εφαρμογές από το 1960 σχετικά με την ανάπτυξη της ραδιοανίχνευσης σε παγετώνες. Η μελέτη παγετώνων με τη χρήση του ραντάρ έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό σήμερα.

Το 1910 στη Γερμανία ήταν πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικά (ΕΜ) σήματα για τον προσδιορισμό της θέσης θαμμένων αντικειμένων. Η πρώτη φορά που εκδόθηκε η περιγραφή μιας τέτοιας έρευνας ήταν το 1904. Στις έρευνες τότε χρησιμοποιούσαν συνεχή κύματα (CW). Η διάδοση παροδικών κυμάτων εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1926 από τον Hulsenbeck με σκοπό να μελετήσει την φύση των θαμμένων αντικειμένων.

Η τεχνική της διάδοσης κυμάτων σε παλμούς εξελίχθηκε σημαντικά τις επόμενες πέντε δεκαετίες. Έτσι τις δεκαετίες 1960-1970 έγιναν εκτεταμένες μελέτες σε παγετώνες από πολλούς επιστήμονες, ενώ αργότερα το ενδιαφέρον στράφηκε στη μελέτη κατασκευών όπως σήραγγες, δρόμοι κτλ. Οι γεωλογικές εφαρμογές άρχισαν τις δύο τελευταίες δεκαετίες με σκοπό τον καθορισμό της στρωματογραφίας, την έρευνα κοιτασμάτων και τη χαρτογράφηση σπηλαίων. Το γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα σε αρχαιολογικές ανασκαφές για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των θαμμένων ερειπίων.

Πολλές χρήσεις του γεωραντάρ έχουν περιγραφεί στην βιβλιογραφία. Αυτές περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του πάχους στρωμάτων πάγου, την ανίχνευση ρωγμών σε κοιτάσματα αλατιού και τη μελέτη κρυσταλλικών πετρωμάτων. Επίσης χρησιμοποιήθηκε από την αστυνομία για τον εντοπισμό θαμμένων πτωμάτων και αργότερα για τον εντοπισμό πτωμάτων κρυμμένων μέσα σε τσιμεντένιες κατασκευές.

Περαιτέρω εξελίχθηκε από τον Αμερικανικό στρατό κατά τη διάρκεια του πολέμου στο Βιετνάμ με σκοπό τον εντοπισμό του λαβύρινθου από σήραγγες που χρησιμοποιούσαν οι Βιετκόγκ. Μετά το τέλος του πολέμου αναπτύχθηκαν μέθοδοι για αστικούς σκοπούς από την GSSI (Geophysical Survey Systems Inc) η οποία είναι ακόμα η μεγαλύτερη κατασκευάστρια συστημάτων γεωραντάρ διεθνώς. Τη δεκαετία του 1970 άρχισαν να εμφανίζονται και νέες εταιρίες συστημάτων γεωραντάρ όπως η Sensors and Software Ltd. Άλλες εταιρίες ασχολούνται με την εξέλιξη νέων συστημάτων (ERA Technologies Ltd) και κεραιών για την εφαρμογή τους στα ήδη υπάρχοντα συστήματα (Annan, 2002, Σπανουδάκης, 2002).

1.4 Περίγραμμα διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα έκθεση αποτελείται από έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται εισαγωγικά και περιληπτικά στοιχεία για το αντικείμενο και το σκοπό της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η βασική θεωρία πάνω στην οποία στηρίζεται η μέθοδος του γεωραντάρ και αναλύονται τα βασικά στοιχεία του συστήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα βασικά ιστορικά στοιχεία του αρχαιολογικού χώρου, παρουσιάζει τις περιοχές μελέτης και περιγράφεται η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της μεθόδου για κάθε περιοχή μελέτης και στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις.

.

Κεφάλαιο 2: Αρχή λειτουργίας γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ αποτελεί μια υψηλής ευκρίνειας ηλεκτρομαγνητική τεχνική όπου χρησιμοποιούνται ραδιοκύματα, συχνότητας 1-1000MHz, με σκοπό την χαρτογράφηση του υπεδάφους. Στο τρέχων κεφάλαιο θα αναφερθούν βασικές έννοιες και ορισμοί που σχετίζονται με την λειτουργία του γεωραντάρ.

2.1 Γεωραντάρ και ηλεκτρομαγνητική θεωρία

Η λειτουργία του γεωραντάρ στηρίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Το ηλεκτρομαγνητικό (ΗΜ) πεδίο περιγράφεται μαθηματικά από τις εξισώσεις του Maxwell. Πρόκειται για μία τετράδα εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη (Annan, 2001):

$$\overline{\nabla}\times\overline{E} = -\frac{\partial\overline{B}}{\partial t} \tag{2.1}$$

$$\overline{\nabla}\times\overline{H} = \overline{J} + \frac{\partial\overline{D}}{\partial t} \tag{2.2}$$

$$\overline{\nabla}\cdot\overline{D} = q \tag{2.3}$$

$$\overline{\nabla}\cdot\overline{B} = 0 \tag{2.4}$$

Όπου $\overline{E}$ είναι το διάνυσμα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (Volt/m), q είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου (Coulomb/m^3) , $\overline{B}$ είναι το διάνυσμα πυκνότητας της μαγνητικής ροής

(Tesla), $\overline{J}$ είναι το διάνυσμα πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος (Amperes/m^2), $\overline{D}$ είναι το διάνυσμα πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής (Coulomb/m^2), t είναι ο χρόνος (s) και $\overline{H}$ είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου (Amperes/m).

Η εξίσωση 2.1 που είναι γνωστή ως *ο νόμος του Faraday* δείχνει ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο. Η εξίσωση 2.2 είναι γνωστή ως *εξίσωση Ampere-Maxwell* και περιγράφει τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικά φορτία και μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία. Η εξίσωση 2.3 περιγράφει πως τα ηλεκτρικά φορτία παράγουν ηλεκτρικό πεδίο και τέλος, η εξίσωση 2.4 είναι ανάλογη *του νόμου του Gauss* για το μαγνητικό πεδίο δηλαδή συνέπεια του ότι δεν έχουν βρεθεί ποτέ μαγνητικά μονόπολα στη φύση.

Ο τρόπος με τον οποίο τα υλικά αντιδρούν στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο περιγράφεται μέσω καταστατικών εξισώσεων. Για την μέθοδο του γεωραντάρ οι ηλεκτρικές και οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού είναι υψίστης σημασίας. Οι εξισώσεις που παρατίθενται παρακάτω παρέχουν μία μακροσκοπική περιγραφή της συμπεριφοράς των ηλεκτρονίων, των ατόμων και των μορίων *κατά μάζες* όταν εφαρμοστεί Η/Μ πεδίο (Annan, 2001).

$$\overline{J} = \tilde{\sigma}\overline{E} \tag{2.5}$$

$$\overline{D} = \tilde{\varepsilon}\overline{E} \tag{2.6}$$

$$\overline{B} = \tilde{\mu}\overline{H} \tag{2.7}$$

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα $\tilde{\sigma}$ χαρακτηρίζει τις κινήσεις που πραγματοποιεί το ελεύθερο ηλεκτρικό φορτίο (δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα) όταν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Η αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού φορτίου οδηγεί στην έκλυση ενέργειας. Η διηλεκτρική διαπερατότητα $\tilde{\varepsilon}$ χαρακτηρίζει την μετατόπιση του ηλεκτρικού φορτίου που περιορίζεται από τη δομή του υλικού υπό την παρουσία ενός ηλεκτρικού πεδίου. Η μετατόπιση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την αποθήκευση ενέργειας στο υλικό. Η μαγνητική διαπερατότητα $\tilde{\mu}$ περιγράφει πως οι εσωτερικές ατομικές και μοριακές ροπές συμπεριφέρονται σε ένα μαγνητικό πεδίο. Για τις περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου γεωραντάρ τα μεγέθη ε και σ παίζουν σημαντικότερο ρόλο με την διηλεκτρική διαπερατότητα ε να είναι η πιο σημαντική παράμετρος. Περισσότερο χρησιμοποιείται ο όρος σχετική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά και ορίζεται ως εξής:

$$\kappa = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{\boldsymbol{\varepsilon_0}} \tag{2.8}$$

όπου ε_0 είναι ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού, 8.89×10^{-12} Farads/m.

2.2 Ιδιότητες των υλικών

Στις περισσότερες εφαρμογές του γεωραντάρ δίνεται βαρύτητα στις διακυμάνσεις των παραμέτρων σ και ε. Η μέθοδος γεωραντάρ είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε υλικά που χαρακτηρίζονται από μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού είναι σ = 0, τα κύματα που εκπέμπει το ραντάρ θα διεισδύσουν σε μεγάλο βάθος, όμως τέτοιες συνθήκες στο υπέδαφος δεν συνηθίζονται. Για παράδειγμα, εδάφη που είναι πλούσια σε αργιλικά ορυκτά περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό το βάθος διασκόπησης λόγω της απορρόφησης των κυμάτων.

Τα υλικά του υπεδάφους είναι σταθερά μίγματα άλλων υλικών ή συστατικών. Το νερό και ο πάγος αντιπροσωπεύουν μία από τις λίγες περιπτώσεις όπου ένα μοναδικό συστατικό είναι κατά κύριο λόγο παρόν. Η άμμος είναι μίγμα κόκκων εδάφους, αέρα, νερού και ιόντων διαλυμένων στο νερό. Η κατανόηση των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού είναι κατά συνέπεια το κλειδί για την ερμηνεία της απόκρισης του γεωραντάρ.

Τα μίγματα των υλικών σπανίως φανερώνουν απευθείας τις ιδιότητες σε αναλογία με τον κλασματικό όγκο των συστατικών στοιχείων. Από κάθε άποψη, αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να καταστήσει την ποσοτική ανάλυση των δεδομένων του γεωραντάρ αδύνατη, χωρίς δευτερεύουσες βοηθητικές πληροφορίες (Jol, 2009).

Παρ' όλη την πολυπλοκότητα της σύστασης των εδαφών, ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά του γεωραντάρ είναι το ποσοστό ύπαρξης του νερού στο υλικό. Μια γενική και συνοπτική εικόνα των ιδιοτήτων των υλικών που απαντώνται συνηθέστερα στο υπέδαφος παρουσιάζεται παρακάτω (Jol, 2009, Annan, 2001) :

- Μίγματα αδρανών υλικών παρουσιάζουν διαπερατότητα εύρους 3-8, μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαρακτηρίζονται ως καλοί διηλεκτρικοί μονωτές.
- Εδάφη, βράχοι και δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, η άσφαλτος κλπ χαρακτηρίζονται από το πορώδες όπου γεμίζει με αέρα, νερό ή άλλα υλικά με κόκκους μικρότερης διαμέτρου.
- Το νερό χαρακτηρίζεται από υψηλή διαπερατότητα με κ=80.

- Το νερό των πόρων συνήθως περιέχει ιόντα και καθώς η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού σχετίζεται με την κινητικότητα των ιόντων είναι συχνά καθοριστικός παράγοντας στον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των αδρανών υλικών. Οι αγωγιμότητες των εδαφών και των βράχων κυμαίνονται από 1 – 1000 mS/m .
- Από τη στιγμή που το νερό αποθηκεύεται στους πόρους των φυσικών γεωλογικών υλικών, με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις, επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού.

Στον πίνακα 2.1 συνοψίζονται η ηλεκτρική διαπερατότητα και αγωγιμότητα για συνηθισμένα υλικά που απαντώνται στο υπέδαφος σε εύρος συχνοτήτων 10-1000 MHz.

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ταχύτητας και εξασθένισης που παρατηρούνται σε γεωλογικά υλικά (Annan, 2001).

Υλικό	κ	σ (mS/M)	V (m/ns)	a (dB/m)
Αέρας	1	0	0.30	0
Αποσταγμένο νερό	80	0.01	0.033	2×10^{-3}
Φρέσκο νερό	80	0.5	0.033	0.1
Θαλασσινό νερό	80	3×10^{3}	0.01	103
Ξηρή άμμος	3-5	0.01	0.15	0.01
Κορεσμένη άμμος	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Ασβεστόλιθος	4-8	0.5 - 2	0.12	0.4-1
Αργιλικός σχιστόλιθος	5-15	1-100	0.09	1-100
Ιλύς	5-30	1-100	0.07	1-100
Άργιλοι	5-40	2-1000	0.06	1-300
Γρανίτης	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Ξηρό αλάτι	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Αλάτι	3-4	0.01	0.16	0.01

2.3 Κυματική φύση του Η/Μ πεδίου

Οι εξισώσεις του Maxwell (2.1 - 2.4) περιγράφουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούν μαγνητικά πεδία που με την σειρά τους προκαλούν ηλεκτρικά πεδία. Αυτή η συνεχόμενη διαδοχή του ενός πεδίου να δημιουργεί το άλλο έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του Η/Μ πεδίου στο μέσο. Ανάλογα με το μέγεθος των απωλειών ενέργειας το Η/Μ πεδίο διαδίδεται με την μορφή κυμάτων. Η λειτουργία του γεωραντάρ στηρίζεται στην διάδοση των Η/Μ κυμάτων (Annan, 2001).

Μαθηματικά αποδεικνύεται αν ξαναγραφτούν οι εξισώσεις του Maxwell και απαλειφθεί είτε το ηλεκτρικό είτε το μαγνητικό πεδίο. Αν χρησιμοποιηθεί το ηλεκτρικό πεδίο και η σχέση 2.7, η εξίσωση 2.1 γράφεται:

$$\overline{\nabla} \times \overline{\nabla} \times \overline{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\nabla} \times \mu \overline{H}) \tag{2.9}$$

Από τις σχέσεις 2.5 και 2.6 η εξίσωση 2.2 γίνεται:

$$\overline{\nabla} \times \overline{\nabla} \times \overline{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{J} + \frac{\partial \overline{D}}{\partial t}\right) = -\mu\sigma \frac{\partial \overline{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \overline{E}}{\partial t} \tag{2.10}$$

Και προκύπτει η διανυσματική κυματική εξίσωση:

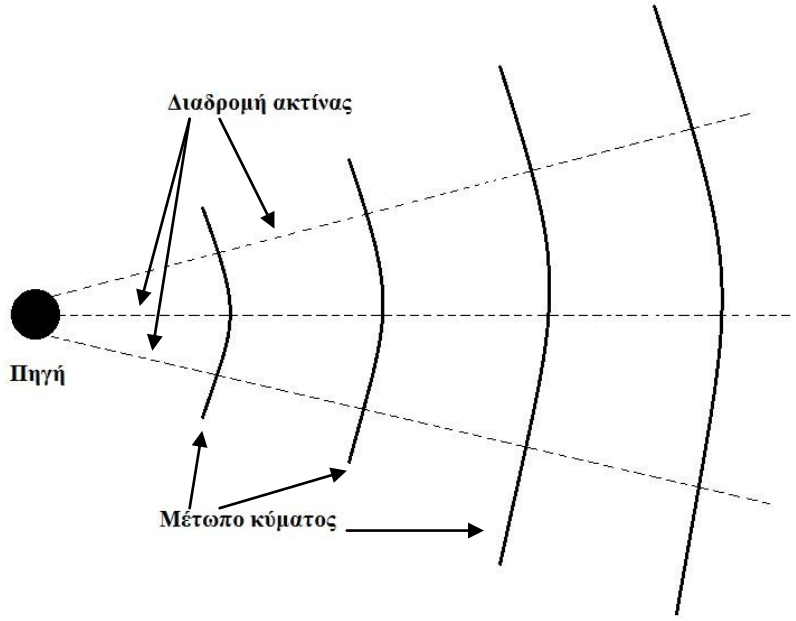
$$\overline{\nabla} \times \overline{\nabla} \times \overline{E} + \mu\sigma \frac{\partial \overline{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \overline{E}}{\partial t} = 0 \tag{2.11}$$

$$\begin{array}{ccc} \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ \text{A} & \text{B} & \Gamma \end{array}$$

Οι όροι Β και Γ εκφράζουν το γεγονός ότι τα ηλεκτρικά φορτία παράγουν μαγνητικά πεδία, χρονικά μεταβαλλόμενα που με την σειρά τους δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο το οποίο εκφράζεται από τον όρο Α της εξίσωσης.

2.4 Μέτωπο κύματος και διαδρομή ακτίνας

Όταν το Η/Μ πεδίο διαδίδεται με τη μορφή κύματος χαρακτηρίζεται από το *μέτωπο κύματος* ή την *διαδρομή ακτίνας* (σχήμα 2.1). Το μέτωπο κύματος είναι η επιφάνεια στην οποία η ένταση του Η/Μ πεδίου είναι ίδια. Η ακτίνα διαδρομής είναι κάθετη στο μέτωπο κύματος, ενώ το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα στην ακτίνα διαδρομής.



Σχήμα 2.1 Μέτωπο κύματος και ακτίνα διαδρομής του Η/Μ πεδίου (Annan, 2001).

Το μέτωπο κύματος και η ακτίνα διαδρομής είναι πολύ χρήσιμα στην περιγραφή της διάδοσης του Η/Μ κύματος στο μέσο (Annan, 2001).

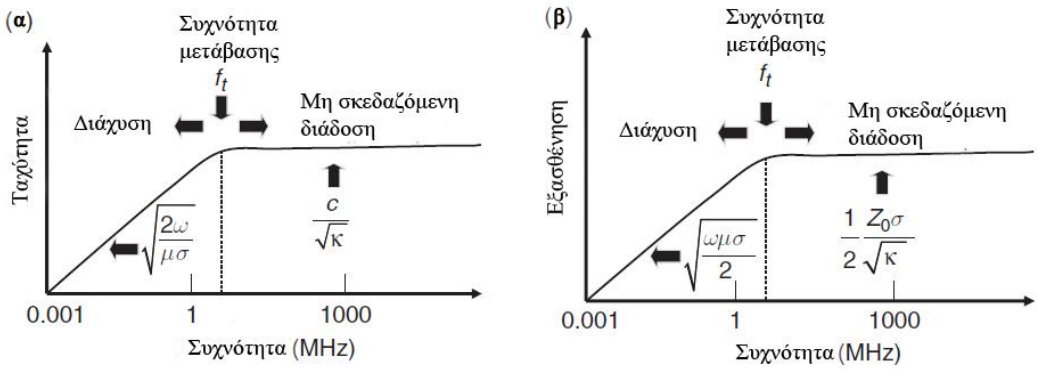
2.5 Κυματικές ιδιότητες

Οι βασικές Η/Μ κυματικές ιδιότητες είναι *η ταχύτητα*, ν, *η εξασθένηση*, α, και *η Η/Μ σύνθετη αντίσταση*, Z. Στο σχήμα 2.2 απεικονίζονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας και της εξασθένισης συναρτήσει ημιτονοειδούς συχνότητας, f (σημείωση ω=2πf) (Jol, 2009).

Όλες οι κυματικές ιδιότητες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Σε χαμηλές συχνότητες εξαρτώνται από τον όρο $\sqrt{\omega}$, που είναι ενδεικτικό της διαχυτικής συμπεριφοράς. Σε υψηλές συχνότητες, οι ιδιότητες καθίστανται ανεξάρτητες της συχνότητας, εφόσον τα μεγέθη ε, μ και

σ δεν εξαρτώνται από την συχνότητα. Όσο αφορά το γεωραντάρ, μεγαλύτερης σημασίας είναι η συμπεριφορά που παρουσιάζεται στις υψηλές συχνότητες.

Σε χαμηλές συχνότητες το Η/Μ πεδίο διαχέεται στο υλικό. Η ενέργεια διανέμεται με τον ίδιο τρόπο όπως η θερμότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή τα εκπεμπόμενα σήματα εξασθενούν με διαφορετικού ρυθμούς και κινούνται με ταχύτητες διαφορετικών φάσεων (Annan, 2001).



Σχήμα 2.2: Διακυμάνσεις ταχύτητας και εξασθένισης συναρτήσει της συχνότητας. Τα μεγέθη c και Z_0 είναι η ταχύτητα και η σύνθετη αντίσταση, αντίστοιχα, για το κενό (Jol, 2009).

Οι μαθηματικοί τύποι για την ταχύτητα, την εξασθένιση και την σύνθετη αντίσταση είναι (Annan, 2001):

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \tag{2.12}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \tag{2.13}$$

$$Z = (1+i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \tag{2.14}$$

Σε υψηλές συχνότητες το Η/Μ πεδίο διαδίδεται με τη μορφή κυμάτων στο μέσο. Τα εκπεμπόμενα σήματα κινούνται με την ίδια ταχύτητα και υφίστανται τη ίδια εξασθένηση. Η ταχύτητα, η εξασθένηση και η σύνθετη αντίσταση εκφράζονται ως εξής (Annan, 2001):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{K}} \tag{2.15}$$

$$a = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{K}} \tag{2.16}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \tag{2.17}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, η δεξιά έκφραση είναι πιο έγκυρη όταν οι μαγνητικές ιδιότητες δεν είναι σημαντικές. Το μέγεθος Z_0 συμβολίζει τη σύνθετη αντίσταση στο κενό (Annan, 2001):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\ ohms \tag{2.18}$$

Η συχνότητα μετάβασης ορίζεται ως εξής (Jol, 2009):

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon} \tag{2.19}$$

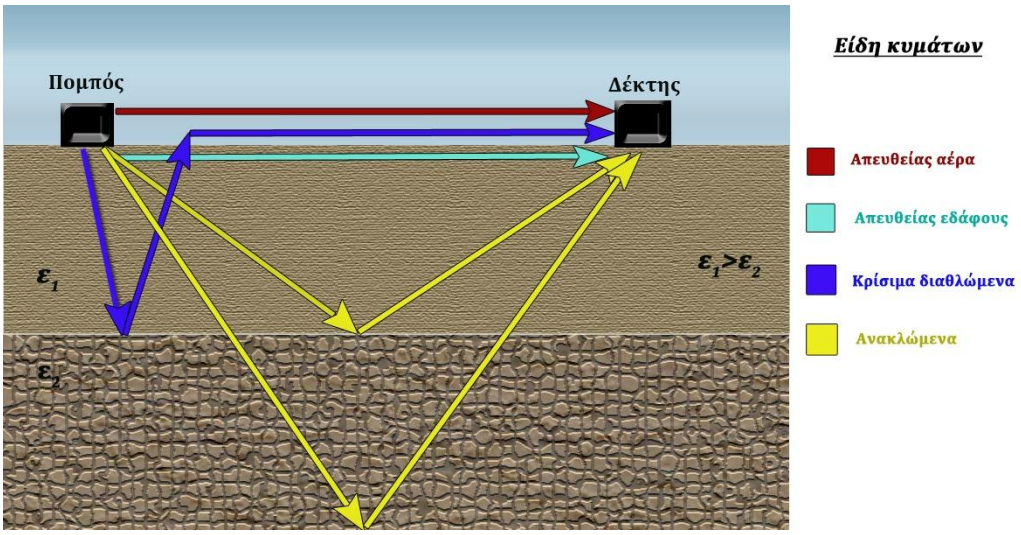
2.6 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα Η/Μ κύματα σε υψηλές συχνότητες ταξιδεύουν με συγκεκριμένη ταχύτητα που καθορίζεται κυρίως από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού. Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας του κύματος και των ιδιοτήτων του υλικού είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή χρήση της μεθόδου γεωραντάρ στην έρευνα του υπεδάφους.

Το γεωραντάρ περιλαμβάνει ένα πομπό και ένα δέκτη Η/Μ κυμάτων (σχήμα 2.3). Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από τον πομπό, «ταξιδεύουν» διαμέσου του υλικού και εξαπλώνονται κατά την κατακόρυφο συνιστώσα μέχρι να συναντήσουν ένα αντικείμενο που έχει διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες από το μέσο που το περιβάλλει. Στη συνέχεια σκεδάζονται από το αντικείμενο και ανιχνεύονται από τον δέκτη (Daniels, 2000).

Η ταχύτητα διάδοσης των Η/Μ κυμάτων διαφέρει μεταξύ υλικών που παρουσιάζουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Συνεπώς ένα κύμα που κινείται διαμέσου δύο υλικών διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων, για την ίδια απόσταση, θα φτάσει στον δέκτη σε διαφορετικό χρόνο. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να πραγματοποιήσει τη διαδρομή από τον πομπό στον δέκτη ονομάζεται *χρόνος διαδρομής*. Μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νανοδευτερόλεπτο (ns), όπου 1 ns=10^{-9}s. Η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον αέρα είναι 3×10^8 m/s (0,3 m/ns) και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της διαπερατότητας του υλικού. Από την

στιγμή που η διαπερατότητα των γήινων υλικών είναι πάντα μεγαλύτερη από την διαπερατότητα του αέρα, η ταχύτητα του κύματος σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από 0.3 m / ns (Daniels, 2000).



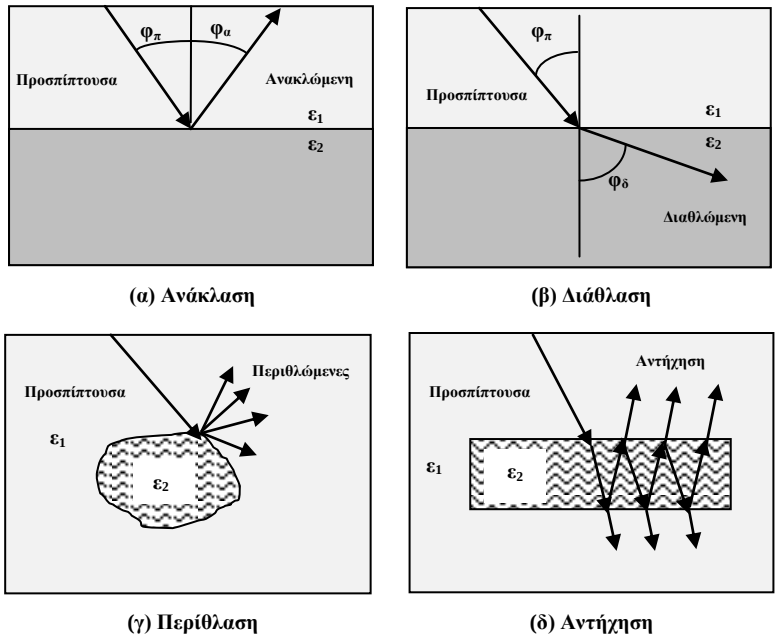
Σχήμα 2.3:Γεωμετρία Η/Μ κυμάτων στο υπέδαφος που αποτελείται από δύο στρώματα διαφορετικής διηλεκτρικής διαπερατότητας, ε_1 και ε_2. Τα κύρια κύματα που ανιχνεύονται από τον δέκτη του γεωραντάρ, είναι τα απευθείας κύματα αέρα και εδάφους, τα ανακλώμενα κύματα τα διαθλώμενα κύματα και τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα.

2.6.1 Διάδοση Η/Μ κυμάτων

Τα Η/Μ κύματα είναι ταλαντώσεις που συνίστανται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, που είναι κάθετα μεταξύ τους. Όταν ένα Η/Μ κύμα προσκρούσει σε μία διεπιφάνεια, η ενέργεια σκεδάζεται ανάλογα με το σχήμα και την τραχύτητα της διεπιφάνειας και ανάλογα με τις διαφορές στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του αντικειμένου και του υλικού που το περιβάλλει. Ένα μέρος της ενέργειας σκεδάζεται πίσω στο περιβάλλον υλικό, ενώ το υπόλοιπο διαθλάται και διαδίδεται στο επόμενο υλικό. Η σκέδαση στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός αντικειμένου και του περιβάλλοντος υλικού μπορεί να είναι:

1. Ανάκλαση
2. Διάθλαση
3. Περίθλαση
4. Αντήχηση

Τα παραπάνω φαινόμενα απεικονίζονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Μηχανισμοί σκέδασης Η/Μ κυμάτων στο υπέδαφος. (α) Ανάκλαση, (β)διάθλαση, (γ) περίθλαση, (δ) αντήχηση (Daniels, 2000)

<u>Ανάκλαση Η/Μ κυμάτων:</u> Ο μηχανισμός της ανάκλασης παρουσιάζει ομοιότητες με την ανάκλαση του φωτός σε μία λεία επιφάνεια. Η γωνία ανάκλασης είναι ίδια με την γωνία πρόσπτωσης (σχήμα 2.4α).

<u>Διάθλαση Η/Μ κυμάτων:</u> Η διάθλαση ενός Η/Μ κύματος λαμβάνει χώρα όταν το κύμα περάσει από ένα μέσο διάδοσης σε ένα άλλο με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά. Το κύμα αλλάζει πορεία διεύθυνσης και η ταχύτητα του μεταβάλλεται. Στο σχήμα 2.4β απεικονίζεται η πιο απλή περίπτωση διάθλασης όπου στο επίπεδο υπάρχουν δύο μέσα διάδοσης. Η γωνία διάθλασης καθορίζεται από τον *νόμο του Snell* 0 (Daniels, 2000):

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} \qquad (2.20)$$

Όπου v_1 και v_2 είναι οι ταχύτητες διάδοσης του κύματος στα δύο υλικά αντίστοιχα και φ_1 , φ_2 είναι οι γωνίες του προσπίπτοντος και του διαθλώμενου κύματος αντίστοιχα.

Αν η διεπιφάνεια είναι ομαλή και συνεχής (π.χ το όριο ενός γεωλογικού στρώματος), και η ταχύτητα του κύματος στο κάτω όριο (π.χ το αντικείμενο ή το κατώτερο γεωλογικό στρώμα)

είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του περιβάλλοντος υλικού ($\varepsilon_1<\varepsilon_2$), το κύμα θα κινηθεί με ταχύτητα ίση της ταχύτητας εντός του αντικειμένου. Η γωνία κατά την οποία συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται *κρίσιμη γωνία* και ορίζεται (Daniels, 2000):

$$\frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}} = \frac{v_1}{v_2} = \sin\varphi_1 \qquad (2.21)$$

Η απόσταση μεταξύ δέκτη και πομπού ονομάζεται *κρίσιμη απόσταση*.

Περίθλαση Η/Μ κυμάτων; Το φαινόμενο της περίθλασης (σχήμα 2.4γ) προκαλείται από την ύπαρξη αιχμηρών εμποδίων και εξηγείται από την *αρχή του Huygen* κατά την οποία *«κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερεύουσα πηγή σφαιρικού κύματος. Τα δευτερογενή σφαιρικά αυτά κύματα συμβάλλουν μεταξύ τους και η νέα θέση του μετώπου κύματος θα είναι η κοινή περιβάλλουσα όλων αυτών των σφαιρικών κυμάτων»*. Η φύση της περιθλώμενης ενέργειας εξαρτάται από το πόσο απότομα είναι τα όρια και το σχήμα του αντικειμένου σε σχέση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος. Το φαινόμενο της περίθλασης απαντάται συχνά στα δεδομένα του γεωραντάρ σαν μορφή ενέργειας η οποία εξαπλώνεται σε διαφορετικές κατευθύνσεις από ένα σημείο, ή κατά μήκος μιας γραμμής. Από γεωλογικής άποψης, περιθλάσεις απαντώνται σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε περιοχές κοντά σε κατακόρυφα ρήγματα ή σε ασυνέχειες γεωλογικών στρωμάτων (Daniels, 2000).

Αντήχηση Η/Μ κυμάτων: Η αντήχηση (σχήμα 2.4δ) συμβαίνει όταν ένα κύμα προσπίπτει σε ένα κλειστό αντικείμενο (π.χ ένα κύλινδρο), και το κύμα ανακλάται και κινείται μπρος- πίσω μεταξύ διαφορετικών σημείων εντός των ορίων του αντικειμένου. Κάθε φορά που το κύμα προσκρούει στο όριο, μέρος της ενέργειας διαδίδεται στο περιβάλλον υλικό, και το υπόλοιπο ανακλάται πίσω στο αντικείμενο. Το παραπάνω φαινόμενο κάνει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια να «αντηχεί» εντός του αντικειμένου. Η ενέργεια αυτή που παγιδεύεται στο αντικείμενο γρήγορα εξασθενεί σαν επανεκπομπή έξω από τα όρια του αντικειμένου. Αντικείμενα με σαφή όρια από το περιβάλλον έχουν συχνότητα αντήχησης που εξαρτάται από το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του περιβάλλοντος υλικού. Παρ' όλα αυτά, η ικανότητα ενός υλικού να αντηχεί εξαρτάται από το μήκος κύματος (ταχύτητα διάδοσης στο μέσο διά την συχνότητα του κύματος) αναφορικά με τις διαστάσεις του αντικειμένου, και από την διαφορά της ηλεκτρικής διαπερατότητας μεταξύ του αντικειμένου και του περιβάλλοντος υλικού (Daniels, 2000).

2.6.2 Γεωμετρία Η/Μ κυμάτων

Όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους, η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το πλάτος του παλμού και τον χρόνο που κάνει για να φτάσει από τον πομπό στον δέκτη. Ο δέκτης καταγράφει τρία είδη κυμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.

Τα *απευθείας κύματα αέρα και εδάφους* διαδίδονται άμεσα από τον πομπό στον δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια. Η ταχύτητα διάδοσης v του απευθείας κύματος εδάφους και αέρα υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις αντίστοιχα (Σπανουδάκης, 2002, Πουλιούδης, 2001):

$$v_{\varepsilon\delta\acute{\alpha}\varphi o\upsilon\varsigma} = \frac{\mathrm{S}}{t} \tag{2.22}$$

$$\mathrm{v}_{\alpha\acute{\varepsilon}\rho\alpha} = \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{t}} \tag{2.23}$$

όπου S είναι η απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη και t είναι ο χρόνος διάδοσης του απευθείας κύματος εδάφους και αέρα. Η ταχύτητα διάδοσης v σχετίζεται με την διηλεκτρική διαπερατότητα του εδάφους χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του Η/Μ κύματος στο κενό (Annan, 2001):

$$\mathrm{K} = (\frac{\mathrm{c}}{\mathrm{v}})^2 \tag{2.24}$$

Τα κύματα αυτά διανύουν μικρές αποστάσεις οπότε οι απώλειες είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα. Τα απευθείας κύματα αέρα φτάνουν πρώτα στον δέκτη επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι η μέγιστη δυνατή. Αμέσως μετά φτάνουν τα απευθείας κύματα εδάφους (Σπανουδάκης, 2002, Πουλιούδης, 2001).

Τα *ανακλώμενα κύματα* εκπέμπονται από τον πομπό και διαδίδονται στο μέσο μέχρι να συναντήσουν κάποιο εμπόδιο, οπότε ανακλώνται και επιστρέφουν στον δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής ισούται με (Σπανουδάκης, 2002, Πουλιούδης, 2001):

$$t_r = \frac{4D^2+S^2}{v} \tag{2.25}$$

Όπου D το βάθος του εμποδίου και S η απόσταση πομπού-δέκτη.

Τέλος, όταν σε μία διασκόπηση κοινού ενδιάμεσου σημείου ή σταθερού πομπού κινούμενου δέκτη, η απόσταση πομπού δέκτη υπερβεί μία κρίσιμη τιμή S_c τότε το κύμα ανακλάται στην

πρώτη επιφάνεια που θα συναντήσει, διαθλάται στην επιφάνεια αυτή και διαδίδεται προς τον πομπό. Τα παραπάνω κύματα ονομάζονται *κρίσιμα διαθλώμενα*.

2.7 Σχεδιασμός διασκόπησης και διεξαγωγή μετρήσεων

Πριν το στάδιο της διεξαγωγής των μετρήσεων γίνεται ο σχεδιασμός της διασκόπησης, μία σημαντική διαδικασία που πρέπει να γίνει με προσοχή από τον ερευνητή ώστε να έχει επιτυχία η έκβαση της. Ο σχεδιασμός αποτελείται από τρία βασικά στάδια:

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

2.7.1 Αξιολόγηση του πεδίου έρευνας

Σε αυτό το στάδιο απαντάται το βασικό ερώτημα, αν είναι η μέθοδος του γεωραντάρ η πλέον κατάλληλη ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η διασκόπηση. Τα σημεία που μελετώνται είναι τα ακόλουθα:

- Το βάθος και η γεωμετρία του στόχου
- Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης
- Το περιβάλλον της διασκόπησης

Βάθος και γεωμετρία του στόχου: Είναι καθοριστικά μεγέθη και πάντα μελετώνται σε συνδυασμό με το *βάθος διείσδυσης* των Η/Μ κυμάτων και την *διακριτική ικανότητα* (Σπανουδάκης, 2002). Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα εδάφια, το Η/Μ κύμα υφίσταται εξασθένιση καθώς κινείται στο υπέδαφος. Το βάθος διείσδυσης επιδρά σε βάρος της διακριτικής ικανότητας. Οπότε ανάλογα με την περίπτωση, το βάθος δηλαδή και τη γεωμετρία του στόχου προς ανίχνευση, θα πρέπει να επιλέγει ένα από τα δύο.

.

Οι Annan και Cosway (1975) προτείνουν τρεις εμπειρικές σχέσεις εκ των οποίων οι δύο πρώτες προσδιορίζουν το μέγιστο βάθος διείσδυσης ενώ η τρίτη την διακριτική ικανότητα (Σπανουδάκης, 2002):

$$z_{max} = \frac{35}{\sigma} \tag{2.26}$$

$$z_{max} = \frac{30}{\sigma} \tag{2.27}$$

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4} \tag{2.28}$$

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

Ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης: Οι ιδιότητες που ενδιαφέρουν περισσότερο στη μέθοδο του γεωραντάρ είναι διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα για τον στόχο και με το μέσο διάδοσης. Η γνώση τους οδηγεί στην διαπίστωση αν η αντίθεση τους είναι τέτοια ώστε να υπάρξει ικανή ανάκλαση. Το μέτρο της ενέργειας που ανακλάται από τον στόχο εκφράζεται με τον συντελεστή ανακλώμενης ενέργειας P_r ο οποίος δίνεται από την σχέση (Σπανουδάκης, 2002):

$$P_r = \left[\frac{\varepsilon_{r1}^{1/2} - \varepsilon_{r2}^{1/2}}{\varepsilon_{r1}^{1/2} + \varepsilon_{r2}^{1/2}}\right]^2 \tag{2.29}$$

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

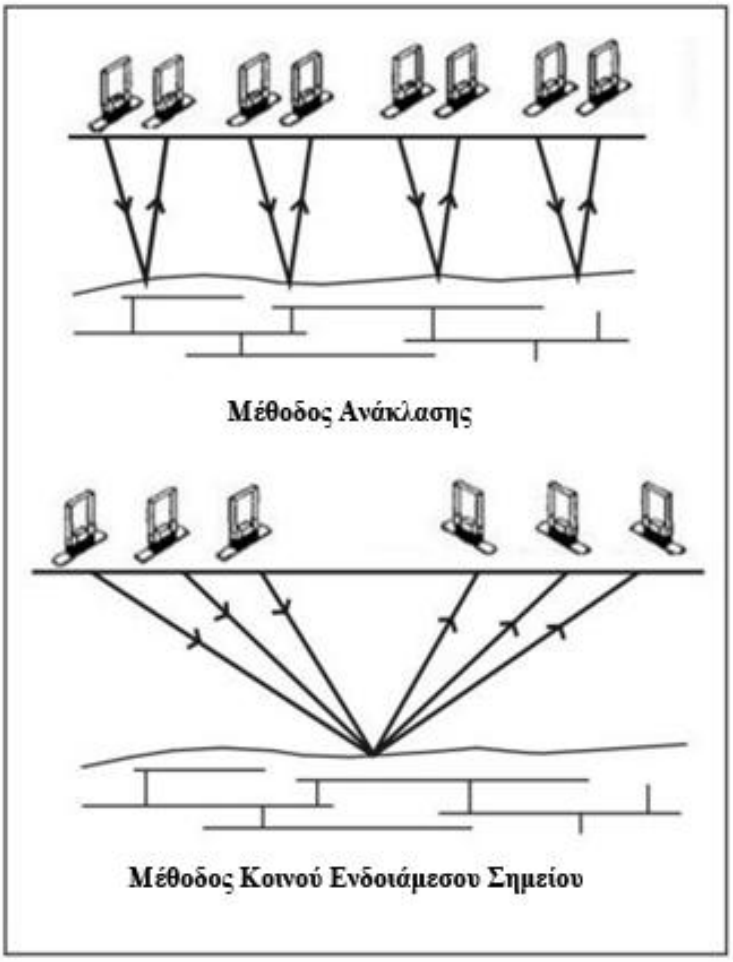
Περιβάλλον διασκόπησης: Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία της διασκόπησης. Περιοχές που βρίσκονται κοντά σε πηγές ραδιοκυμάτων (αναμεταδότες τηλεόρασης, ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ κλπ) είναι ακατάλληλες διότι ο ευαίσθητος δέκτης του γεωραντάρ κατοπτεύει τόσο 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 αλλοιώνουν την ποιότητα των μετρήσεων. Τέλος οι κλιματικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη επιτυχή έκβαση της διασκόπησης. Περιβάλλον υπό βρόχινες συνθήκες και υψηλή υγρασία θεωρούνται ακατάλληλες αφού οι ηλεκτρικές ιδιότητες 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.

2.7.2 Μέθοδοι διασκόπησης

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί το γεωραντάρ. Καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή της μεθόδου, είναι ο σκοπός της διασκόπησης. Οι τέσσερις πιο συνηθισμένοι μέθοδοι είναι (Σπανουδάκης, 2002):

- Η μέθοδος της ανάκλασης (σχήμα 2.6α)
- Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου (σχήμα 2.6β)
- Η μέθοδος σταθερού πομπού, κινούμενου δέκτη
- Η μέθοδος της τομογραφίας



Σχήμα 2.6: Μέθοδοι διασκόπησης. α) Ανάκλασης, β) κοινού ενδιάμεσου σημείου.

Μέθοδος της ανάκλασης: 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 (σχήμα 2.6α). Πολλές φορές πραγματοποιούνται μετρήσεις πάνω στην ίδια γραμμή μελέτης αλλά με διαφορετικό προσανατολισμό των κεραιών ώστε να εξαχθούν το δυνατό περισσότερες πληροφορίες.

Μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου: Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο μέσο. Αρχικά προσδιορίζεται κάποιο σημείο του ανακλαστήρα που θα αποτελέσει το ενδιάμεσο σημείο (σχήμα 2.6β) και οι κεραίες τοποθετούνται στην ελάχιστα 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.

Μέθοδος σταθερού πομπού, κινούμενου δέκτη: 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.

Μέθοδος της τομογραφίας: 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. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως μέσα σε γεωτρήσεις.

2.7.3 Παράμετροι διασκόπησης

Πριν την έναρξη της διασκόπησης είναι σημαντικό να ρυθμιστούν οι παρακάτω παράμετροι στο σύστημα του γεωραντάρ, καθώς είναι καθοριστικές για την ομαλή διεξαγωγή των μετρήσεων και για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι είναι:

- Η συχνότητα εκπομπής
- Ο ολικός χρόνος καταγραφής
- Το διάστημα δειγματοληψίας
- Το βήμα διασκόπησης
- Η απόσταση της κεραίας
- Ο προσανατολισμός της κεραίας
- Ο κάναβος διασκόπησης και το σύστημα συντεταγμένων.

Συχνότητα εκπομπής: Η επιλογή της συχνότητας εκπομπής είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει την διακριτική ικανότητα και το βάθος διασκόπησης (πίνακας 2.2). Το πλάτος του παλμού, W_d, σχετίζεται άμεσα με το φάσμα συχνοτήτων, B, το οποίο σχετίζεται με την συχνότητα εκπομπής f_c:

$$W_d = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \tag{2.30}$$

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \tag{2.31}$$

Όπου λ_c είναι το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης συχνότητας. Επειδή στη μέθοδο γεωραντάρ η αναλογία της συχνότητας εκπομπής με το φάσμα είναι συνήθως 1, η πρώτη μπορεί να πάρει την μορφή:

$$f_c^R > \frac{75}{\Delta Z\sqrt{K}}\ MHz \tag{2.32}$$

Όπου ΔZ είναι η διακριτική ικανότητα σε μέτρα και K είναι διηλεκτρική σταθερά. Από την σχέση 2.32 προκύπτει ότι η διακριτική ικανότητα ουσιαστικά ορίζει ένα κατώτερο όριο στην συχνότητα εκπομπής.

Αντίστοιχα για το βάθος ισχύει η παρακάτω ανισότητα:

$$f_c^D < \frac{1200\sqrt{K-1}}{D}\ MHz \tag{2.33}$$

Όπου D το βάθος διασκόπησης σε μέτρα.

Σαν γενικός κανόνας, τα παραπάνω όρια της συχνότητας πρέπει να υπολογίζονται και η επιλογή της συχνότητας εκπομπής που θα χρησιμοποιηθεί να είναι:

$$f_c^R < f_c < \min(f_c^D) \tag{2.34}$$

Στην παραπάνω σχέση, αν η συχνότητα συναρτήσει της διακριτικής ικανότητας είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα συναρτήσει του βάθους, η επιθυμητή ανάλυση θα είναι ασύμφωνη με το βάθος της διασκόπησης.

Ένας πιο γρήγορος τρόπος για την επιλογή της συχνότητας δίνεται στον πίνακα 2.3, από τον κατασκευαστή του συστήματος γεωραντάρ PulseEKKO.

Πίνακας 2.2:Επιπτώσεις συχνότητας (Annan, 2001).

Χαμηλές Συχνότητες	Υψηλές Συχνότητες
Μεγάλου μήκους παλμός	Μικρού μήκους παλμός
Επηρεάζεται από μεγαλύτερα αντικείμενα	Επηρεάζεται από μικρότερα αντικείμενα
Διεισδύει σε μεγάλο βάθος	Διεισδύει σε μικρότερα βάθη
Αραιή δειγματοληψία	Πυκνή δειγματοληψία
Μεγάλης χρονικής διάρκειας μετρήσεις	Μικρής χρονικής διάρκειας μετρήσεις

Ολικός χρόνος καταγραφής: Ένας τρόπος καθορισμού του ολικού χρόνου καταγραφής είναι η ακόλουθη σχέση:

$$W = 1.3\frac{2\times Dmax}{v} \qquad (2.35)$$

Όπου W είναι ο χρόνος καταγραφής, D είναι το βάθος διασκόπησης και v είναι η ταχύτητα του παλμού στο μέσο διάδοσης. Το μέγιστο βάθος και η ελάχιστη ταχύτητα λαμβάνουν τιμές που καθορίζονται από την περιοχή μελέτης. Η σχέση 2.35 καθορίζει τον ολικό χρόνο καταγραφής κατά 30% αυξημένο ώστε να προβλέπει σφάλματα στους υπολογισμούς των τιμών του βάθους και τις ταχύτητας. Αν ο ολικός χρόνος καταγραφής είναι πολύ μικρός ο στόχος ίσως να μην καταγραφεί. Αντίθετα αν είναι πολύ μεγάλος ο συνολικός όγκος των δεδομένων αυξάνει με δυσμενείς συνέπειες στην παραγωγικότητα.

Αν δεν υπάρχουν πληροφορίες για τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους, ο πίνακας 2.4 παρέχει διάφορες τιμές του χρόνου καταγραφής ανάλογα με την φύση του εδάφους.

Πίνακας 2.3: Επιλογή συχνότητας κατά τον κατασκευαστή για το μοντέλο pulseEKKO 1000.

Pulse Ekko 1000	225 MHz	450 MHz	900 MHz
Έδαφος (v = 0.075 m/ns)			
Μήκος κύματος (cm)	33.3	16.7	8.3
Διακριτική ικανότητα (cm)	8.3	4.2	2.1
Ασβεστόλιθος (v=0.110 m/ns)			
Μήκος κύματος (cm)	48.9	24.4	12.2
Διακριτική ικανότητα (cm)	12.2	6.1	3.0
Πάγος (v=0.150 m/ns)			
Μήκος κύματος (cm)	66.7	33.3	16.7
Διακριτική ικανότητα (cm)	16.7	8.3	4.2

Πίνακας 2.4:Ολικός χρόνος καταγραφής (ns) συναρτήσει του βάθους, για διάφορους τύπους εδαφών (Annan, 2001).

Βάθος D (m)	Βράχος	Υγρό έδαφος	Ξηρό έδαφος
0.5	12	24	10
1	25	50	20
2	50	100	40
5	120	250	100
10	250	500	200
20	500	1000	400
50	1250	2500	1000
100	2500	5000	2000

Διάστημα δειγματοληψίας**:** Η καταγραφή των δεδομένων δεν είναι συνεχής διαδικασία και συνεπώς πρέπει πριν την έναρξη της καταγραφής να οριστεί το διάστημα δειγματοληψίας. Πρόκειται για το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο σημείων καταγραφής της ίδιας κυματομορφής.

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. Στα περισσότερα συστήματα GPR η αναλογία του φάσματος συχνοτήτων και συχνότητας εκπομπής, είναι συνήθως ίση με 1. Αυτό σημαίνει ότι ο παλμός που εκπέμπεται περιέχει ενέργεια από 0,5 έως 1,5 φορές την συχνότητα εκπομπής. Δηλαδή η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να καταγραφεί είναι 1,5 φορές την συχνότητα εκπομπής της κεραίας.

Βασιζόμενοι σε αυτή την παρατήρηση για την μέγιστη συχνότητα, τα δεδομένα πρέπει να συλλέγονται με ρυθμό διπλάσιο της συχνότητας αυτής. Για ένα καλύτερο σχεδιασμό της διασκόπησης χρησιμοποιείται συντελεστής ασφαλείας ίσος με 2. Σαν αποτέλεσμα προκύπτει ότι ο ρυθμός της δειγματοληψίας είναι κατά προσέγγιση έξι φορές η συχνότητα εκπομπής της κεραίας. Η σχέση που προκύπτει είναι η παρακάτω:

$$\Delta t = \frac{1000}{6f_c} \qquad (2.36)$$

Όπου f_c η συχνότητα εκπομπής σε MHz και Δt ο χρόνος σε ns.

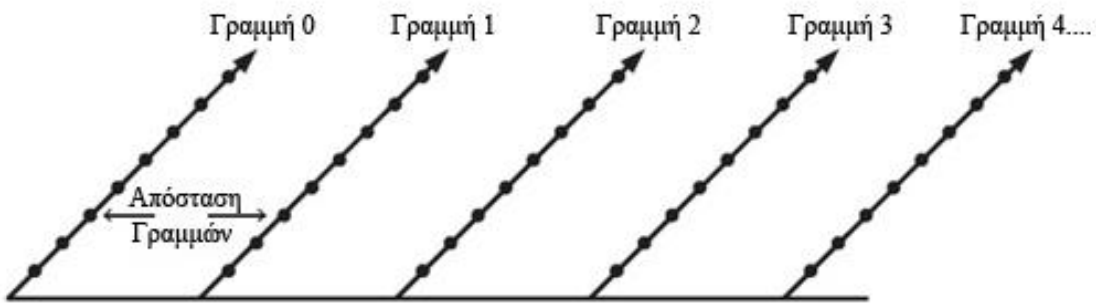
Το διάστημα δειγματοληψίας είναι πολύ σημαντικός παράγοντας καθώς αν είναι μεγάλο τότε πολλές πληροφορίες χάνονται. Αν είναι πολύ μικρό τότε οι πληροφορίες είναι μεν πολλές

αλλά ο συνολικός όγκος των δεδομένων υπερβολικά μεγάλος. Για τον λόγο αυτό, τηρείται η αναλογία που περιγράφηκε παραπάνω. Πολλές φορές αν το ζητούμενο είναι η ταχύτητα λήψης των δεδομένων και όχι η μεγάλη πιστότητα των δεδομένων, το Δt αυξάνεται ελαφρώς.

Βήμα διασκόπησης: Η επιλογή της απόστασης μεταξύ δύο σημείων μέτρησης πάνω στη γραμμή μελέτης είναι στενά συνδεδεμένη με την συχνότητα εκπομπής της κεραίας και τις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών του υπεδάφους. Αν επιλεχθεί ένα μεγάλο βήμα δειγματοληψίας δε θα δώσει επαρκή αποτελέσματα και ειδικότερα αν σκοπός της μελέτης είναι ο εντοπισμός μικρών στόχων. Με μεγάλο βήμα δειγματοληψίας οι στόχοι δεν εντοπίζονται. Αντίθετα αν το βήμα είναι υπερβολικά μικρό, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων επιβαρύνει την παραγωγικότητα. Έτσι προτείνεται το βήμα δειγματοληψίας Nyquist που είναι το ένα τέταρτο του μήκους κύματος του υλικού μέσου διάδοσης και εκφράζεται ως εξής:

$$\Delta x = \frac{c}{4f\sqrt{K}} = \frac{75}{f\sqrt{K}} \quad (in\ m) \qquad (2.37)$$

Όπου f η συχνότητα εκπομπής της κεραίας (MHz) και K η σχετική περατότητα του μέσου. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η γενική ιδέα της διάταξης των γραμμών διασκόπησης.



Σχήμα 2.7:Γραμμές διασκόπησης ή γραμμές μελέτης. Η κάθε μέτρηση (ίχνος) συμβολίζεται με κουκίδα. (Annan, 2001).

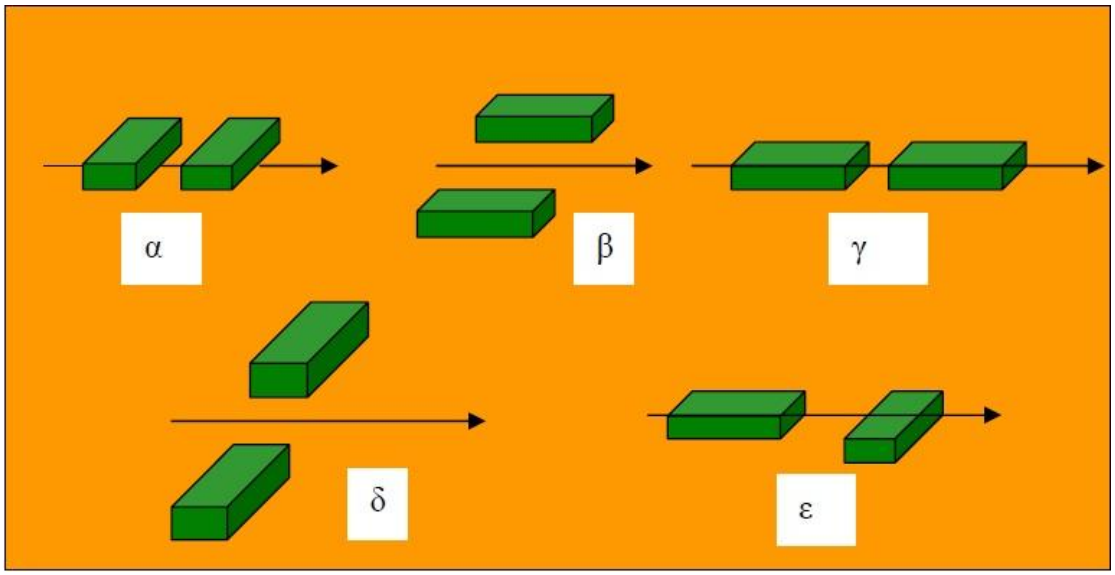
Απόσταση κεραίας: Στη μέθοδο γεωραντάρ δίνεται η δυνατότητα αλλαγής της απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος. Με την αύξηση της απόστασης, αυξάνεται η γωνία ανάκλασης και ο συντελεστής ανάκλασης. Όμως αυξάνεται και η εξασθένιση του κύματος αφού διανύει μεγαλύτερη απόσταση. Και σε αυτή

την περίπτωση πρέπει να υπολογιστεί μία βέλτιστη απόσταση που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S = \frac{2D}{\sqrt{K-1}} \tag{2.38}$$

Όπου S η βέλτιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, D το βάθος της διασκόπησης και K η σχετική περατότητα του υλικού.

Προσανατολισμός κεραίας: Ο προσανατολισμός της κεραίας (πομπός-δέκτης) αφορά την σχετική μεταξύ τους θέση σε σχέση με την γραμμή μελέτης (σχήμα 2.8). 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 διάδοσης του κύματος (σχήμα 2.8α και 2.8β) 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 2.8ε χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό σκεδαστών όπως σωλήνες (ανεξάρτητα από τη σχετική θέση κεραιών και σκεδαστή) ενώ θεωρείται ακατάλληλος για τη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων.



Σχήμα 2.8: Προσανατολισμοί κεραιών.

Κάναβος και σύστημα συντεταγμένων: Η χρήση ενός πρότυπου συστήματος συντεταγμένων για τις θέσεις καταγραφής είναι πολύ σημαντικό διότι όσο καλά και αν είναι τα δεδομένα δεν

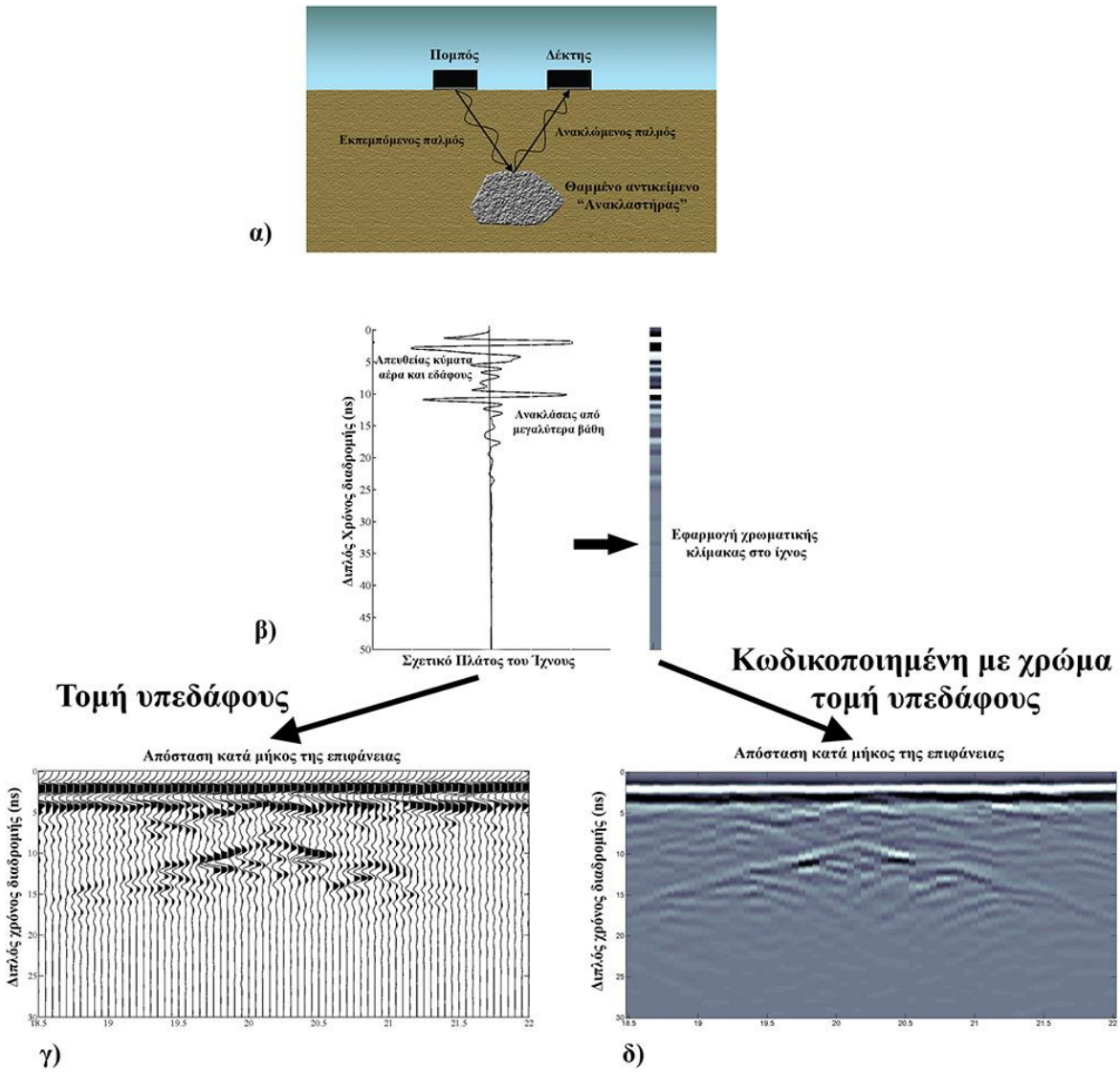
μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν δεν είναι γνωστό από πού προήλθαν. Αυτό επιτυγχάνεται κατά τον σχεδιασμό των γραμμών διασκόπησης. Ο αριθμός των γραμμών διασκόπησης καθορίζεται από την μεταξύ τους απόσταση. Αν ο χρήστης επιθυμεί να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερο, την επιφάνεια της περιοχής μελέτης, θα χρειαστεί να ορίσει μικρό διάστημα, χωρίς όμως να υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των δεδομένων.

Ο προσανατολισμός των γραμμών σε σχέση με το αζιμούθιο είναι Ν-Β και Δ-Α. Κατά αυτόν τρόπο, όταν έρθει η στιγμή της ταυτοποίησης με κάποιο τοπογραφικό χάρτη, η αρχή του καννάβου της περιοχής μελέτης θα συμπίπτει με το σημείο (0,0).

2.8 Καταγραφή δεδομένων

Ανακεφαλαιώνοντας, τα Η/Μ κύματα ταξιδεύουν στο υπέδαφος με συγκεκριμένη ταχύτητα που καθορίζεται κυρίως από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού. Η ταχύτητα διαφέρει μεταξύ υλικών που παρουσιάζουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, και συνεπώς ένα κύμα που περνά διαμέσου δύο υλικών διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων θα έχει διαφορετικό χρόνο διαδρομής.

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του Η/Μ παλμού (σχήμα 2.3), αν ο δέκτης τεθεί σε λειτουργία την χρονική στιγμή που εκπέμπεται παλμός, τότε δύο παλμοί θα καταγραφούν από τον δέκτη. Ο πρώτος παλμός αντιπροσωπεύει το απευθείας κύμα από αέρα(αφού η ταχύτητα στον αέρα είναι μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο υλικό) ενώ ο δεύτερος που καταγράφεται αντιπροσωπεύει τον παλμό που διαπέρασε το υλικό και σκεδάστηκε πίσω στον δέκτη. Η καταγραφή πλάτους των παλμών σε σχέση με το χρόνου ονομάζεται *ίχνος*. Το ίχνος είναι η βασική μέτρηση της μεθόδου γεωραντάρ. Μία *τομή γεωραντάρ* αποτελείται από ένα σύνολο ισαπέχοντων ιχνών όπου έχει εφαρμοστεί χρωματική κλίμακα στις τιμές του εύρους. Στο σχήμα 2.9 περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας μία τομής γεωραντάρ.



Σχήμα 2.9:Διαδικασία κατά την οποία δημιουργείται μία τομή γεωραντάρ από μία σειρά ιχνών. Η σειρά έχει ως εξής: α) Εκπομπή και λήψη Η/Μ κυμάτων β) καταγραφή των κυμάτων ως ίχνος ενός σημείου της επιφάνειας, γ) τα ίχνη τοποθετούνται δίπλα-δίπλα ώστε να δημιουργηθεί μία τομή του υπεδάφους καθώς κινείται η κεραία κατά μήκος της επιφάνειας, δ) Τα πλάτη των Η/Μ κυμάτων κωδικοποιούνται με χρώμα ανάλογα με το πλάτος τους (Daniels 2000).

2.9 Εφαρμογές της μεθόδου Γεωραντάρ

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν να διακριθούν ουσιαστικά σε δύο κατηγορίες. Για γεωλογικούς σκοπούς, που το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα και όπου χρησιμοποιούνται κεραίες των 50MHz ή και μεγαλύτερες. Για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing, NDT) όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο (κεραίες των 500-2000MHz). Η ικανότητα του γεωραντάρ να προσφέρει λεπτομερείς πληροφορίες για το ρηχό υπέδαφος έχει αναφερθεί σε πλήθος εφαρμογών που και αναπτύσσονται παρακάτω (Annan , 2001, Σπανουδάκης, 2002).

Μεταλλεία και Λατομεία:

- Στην ανίχνευση και στον εντοπισμό εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων και ορυκτών όπως χρυσός, βαρέα μέταλλα, κιμπερλίτες, νικελιούχα κοιτάσματα κ.α.
- Σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις για τον έλεγχο της ασφάλειας (ευστάθεια των τοιχωμάτων, του δαπέδου και της οροφής του έργου).

Γεωτεχνικά Έργα και Περιβάλλον:

- Ποιότητα εδάφους
- Εντοπισμός αποχετευτικών σωλήνων
- Εντοπισμός ρωγμών σε φράγματα και γέφυρες
- Προσδιορισμός υδροφόρου ορίζοντα
- Αλατότητα νερού

Αρχαιολογία:

- Εντοπισμός τάφων και νεκροταφείων
- Εντοπισμός θεμελίων και τοιχίων
- Εντοπισμός λιθόστρωτων μονοπατιών
- Εντοπισμός πολύτιμων ευρημάτων (αγάλματα, νομίσματα κλπ)

Κεφάλαιο 3: Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων διεξήχθη στην πόλη της αρχαίας Απτέρας. Η θεωρία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, εφαρμόστηκε σε περιοχές υψηλού αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, με σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων θεμελίων, τοίχων, μονοπατιών ή άλλων αρχαιολογικών ευρημάτων. Η επεξεργασία των δεδομένων ακολουθεί τις τεχνικές της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, που είναι πολύ συνηθισμένες στην επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων. Συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές της στατιστικής όπου συνήθως υπολογίζεται ο μέσος όρος μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων και έπειτα είτε αυτός αντικαθιστά το κεντρικό εικονοστοιχείο είτε αφαιρείται από αυτό.

3.1 Η πόλη της Αρχαίας Απτέρας

Η αρχαία Απτέρα ιδρύθηκε στο χαμηλό ύψωμα Παλιόκαστρο (υψομ.200m), νεότερη ονομασία που οφείλεται στην ύπαρξη του τούρκικου κάστρου στα ΒΑ του χώρου. Το τείχος της, μήκους 3.480 m, περιτρέχει το ισόπεδο του λόφου, το οποίο όμως δεν κατοικήθηκε ολόκληρο σε καμία περίοδο.

Οι δοξασίες για την προέλευση του ονόματος της πόλης είναι πολλές. Επικρατέστερη φαίνεται εκείνη που το αποδίδει σε αντίστοιχο επίθετο της Αρτέμιδος: Άρτεμις Απτέρα. Ο πιο γοητευτικός μύθος όμως είναι εκείνος που παραδίδεται από το Στέφανο Βυζάντιο ($6^{ος}$ αι. μ.Χ), σύμφωνα με τον οποίο το όνομα προέρχεται από το μυθικό αγώνα που έγινε στο λόφο μεταξύ των Μουσών και των Σειρήνων. Οι Σειρήνες ηττήθηκαν, πέταξαν τα φτερά τους – έμειναν «άπτερες»- έγιναν λευκές και έπεσαν στη θάλασσα. Έτσι σχηματίστηκαν τα νησάκια του κόλπου της Σούδας που ονομάζονται Λευκές.

Η στρατηγική θέση της πόλης ευνόησε την ανάπτυξη της, ιδιαίτερα σε συγκεκριμένες περιόδους, όπως ο 4ος και 3ος αι. π.Χ. Τα δύο λιμάνια της, η Μινώα (σημερινό Μαράθι) και η Κίσαμος (μεταξύ Καλαμιού και Καλυβών) στην είσοδο του φυσικού κόλπου, εξασφάλιζαν τη δυνατότητα του ελέγχου στη διακίνηση του εμπορίου. Για τον λόγο αυτό χαρακτηρίστηκε από τον ιστορικό Γ. Σβορώνο ως η πιο εμπορική πόλη της Κρήτης και στις περιόδους ακμής της, μία από τις πιο ισχυρές.

Ως πόλη – κράτος εξουσίαζε μεγάλη έκταση γης, που περιελάμβανε πολλούς αγροτικούς οικισμούς. Πιθανά όρια της επικράτειας εξουσίας της, όπως προκύπτουν από πηγές, ήταν στα δυτικά τα εδάφη της Κυδωνίας (σημερινά Χανιά), νότια πιθανώς τα εδάφη της Λάππας (σημερινή Αργυρούπολη) και –κατά τον ιστορικό Πτολεμαίο- ανατολικά το Δρέπανον άκρον (σημερινό ακρωτήριο Δράπανο).

Σύμφωνα με τα ευρήματα των ανασκαφών, η ίδρυση της Απτέρας στο συγκεκριμένο λόφο τοποθετείται στη γεωμετρική περίοδο (8ος αι. π.Χ.). Τον 4ο αι. π.Χ. άρχισε η περίοδος της μεγαλύτερης ακμής της που διήρκησε μέχρι την ρωμαϊκή κατάκτηση σε όλο το νησί που ολοκληρώθηκε το 67 π.Χ. Η ρωμαϊκή ειρήνη, παρότι επιβεβλημένη, οδήγησε όσες πόλεις δεν είχαν εγκαταλειφτεί με το τέλος της ελληνιστικής περιόδου, σε καινούργια άνθηση. Έτσι και η Απτέρα, όπως ανακαλύπτουν σταδιακά τα ανασκαφικά ευρήματα, διήνυσε μια νέα περίοδο ακμής τον 1ο – 2ο αι. μ.Χ. Η χρήση των νομισμάτων της Κυδωνίας, αντί των δικών της κοπών, δηλώνει ότι ήταν διοικητικά υποταγμένη σε αυτήν. Παρόλα αυτά η δραστηριότητα στην οργάνωση της πόλης σε μεγάλα δημόσια έργα είναι φανερή. Οι μεγάλες δεξαμενές που τροφοδοτούσαν τα αντίστοιχα λουτρά, χρονολογημένα σε αυτήν την περίοδο, δείχνουν μία πόλη με αρκετό πληθυσμό. Όμως, τον 3ο αιώνα κατά τον οποίο άλλες πόλεις όπως η Κυδωνία ή η Κίσαμος, βρίσκονται σε ακμή, η Άπτερα παρουσιάζει σταδιακή παρακμή, η οποία έρχεται οριστικά με τον καταστροφικό σεισμό του 365 μ.Χ., από τον οποίο είχε πληγεί ολόκληρο το νησί. Ο επόμενος, εξίσου ισχυρός σεισμός, του 7ου αι. μ.Χ. σήμανε την οριστική εγκατάλειψη της ως πόλη.

Η μονή του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου ανήκε στην ιδιοκτησία της αντίστοιχης Μονής της Πάτμου μέχρι την δεκαετία του 1960. Όπως φαίνεται από τα δεδομένα του χώρου, η μονή για την κατασκευή της οποίας είχε χρησιμοποιηθεί αρκετό οικοδομικό υλικό από τα αρχαία κτίρια, χτίστηκε στον κεντρικό χώρο της αρχαίας πόλης, ίσως την αρχαία αγορά. Κατά τον 16ο αι. το Α. τμήμα του περιτειχισμένου χώρου ήταν εγκαταλελειμμένο, ενώ στο υπόλοιπο οι μοναχοί καλλιεργούν όσπρια και δημητριακά, αποδίδοντας έσοδα στη μονή Πάτμου. Οι καλλιέργειες προκάλεσαν αρκετές ζημιές στα αρχαία κτίρια, ενώ πολλά αρχαία ευρήματα βρέθηκαν από τότε στο εξωτερικό (Νινιού, 2006).

Από το 1999 και εξής ο χώρος της Απτέρας ξέφυγε από τα περιορισμένης έκτασης έργα καθαρισμού, ανασκαφικών τομών και στερεώσεων και αργά αλλά σταθερά αναδεικνύεται σε πρωτεύοντα αρχαιολογικό χώρο στην Κρήτη. Ο επισκέπτης μπορεί να δει την μερικά ανασκαμμένη ρωμαϊκή οικία (Εικόνα 3.2) που η αρχιτεκτονική της βασίζεται στα πρότυπα της ελληνιστικής περιόδου, το θέατρο που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μνημεία της πόλης, τις δεξαμενές και τα λουτρά (Εικόνα 3.1), τα ταφικά μνημεία και τα νεκροταφεία.

Εικόνα 3.1: Πανόραμα του αρχαιολογικού χώρου της Απτέρας. Αριστερά φαίνεται το ρωμαϊκό λουτρό και δεξιά η τρίκλιτη δεξαμενή. (Google Earth).

Εικόνα 3.2: Ρωμαϊκή οικία

3.2 Συστήματα Γεωραντάρ

Η αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ περιγράφηκε σε προηγούμενα εδάφια. Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά συστήματα γεωραντάρ, το PulseEKKO 1000 την περίοδο Ιουλίου 2010 - 2011 με κεραίες συχνότητας 450 MHz και το SIR-3000 την περίοδο Ιουλίου 2009 με κεραίες συχνότητας 400 MHz.. Και για τα δύο συστήματα επιλέχθηκε μεσαίο εύρος συχνοτήτων λόγω του βάθους διασκόπησης και της επιθυμητής διακριτικής ικανότητας.

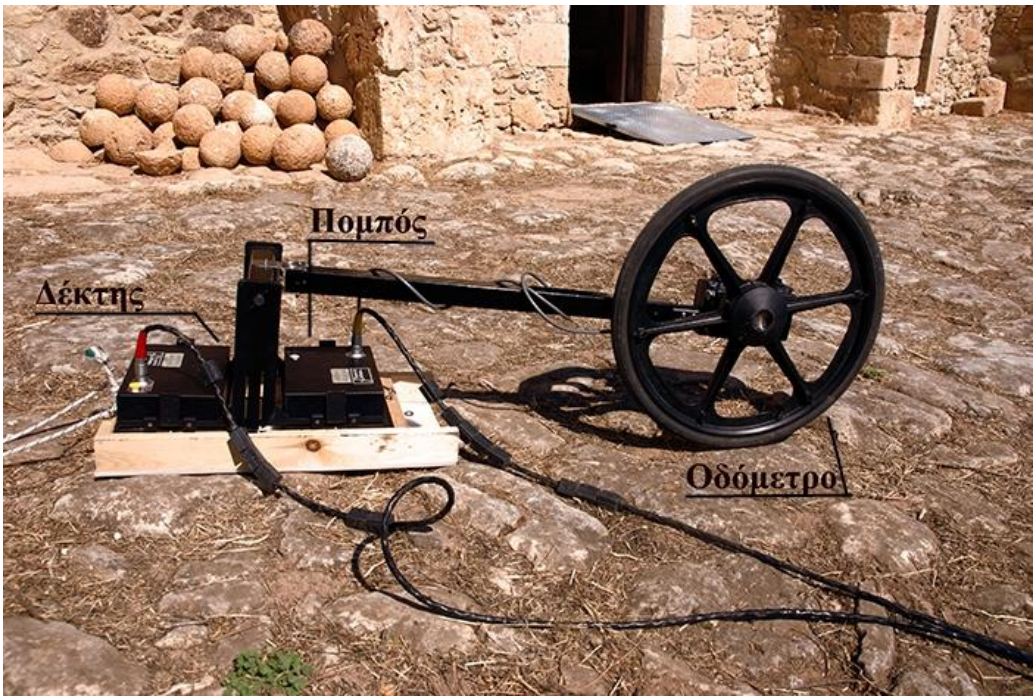
3.2.1 PulseEKKO 1000

Το σύστημα γεωραντάρ PulseEKKO 1000 απαρτίζεται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Κεντρική μονάδα ελέγχου (κονσόλα)
- Κεραίες (Πομπός και δέκτης)
- Οδόμετρο
- Φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής (Η/Υ)
- Μπαταρία
- Καλώδια οπτικών ινών

και απεικονίζεται στις εικόνες 3.3 και 3.4. Οι κεραίες είναι ωμικές και διπολικές , οι οποίες συνδέονται με το οδόμετρο. Το οδόμετρο περιλαμβάνει έναν ενσωματωμένο μετρητή απόστασης και καθορίζει το βήμα της δειγματοληψίας. Το παραπάνω σύστημα συνδέεται με την κονσόλα και τον φορητό Η/Υ διαμέσου οπτικών ινών. Τα δεδομένα που λαμβάνονται, αποθηκεύονται και παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο στον φορητό Η/Υ ο οποίος συνδέεται με την κονσόλα διαμέσου σειριακής θύρας (RS-232).

Τα δεδομένα που καταγράφονται αποτελούνται από δυο αρχεία. Το ένα έχει κατάληξη .HD και περιλαμβάνει τις πληροφορίες επικεφαλίδας (header file) και τις παραμέτρους της διασκόπησης. Το δεύτερο αρχείο με κατάληξη .DT περιέχει τα δεδομένα.



Εικόνα 3.3: Σύστημα γεωραντάρ PulseEKKO 1000: Πομπός, δέκτης και οδοόμετρο. Το σύστημα σέρνεται χειροκίνητα κατά μήκος μιας γραμμής μελέτης.

Εικόνα 3.4: Σύστημα γεωραντάρ PulseEKKO 1000: Κονσόλα, μπαταρία και φορητός Η/Υ.

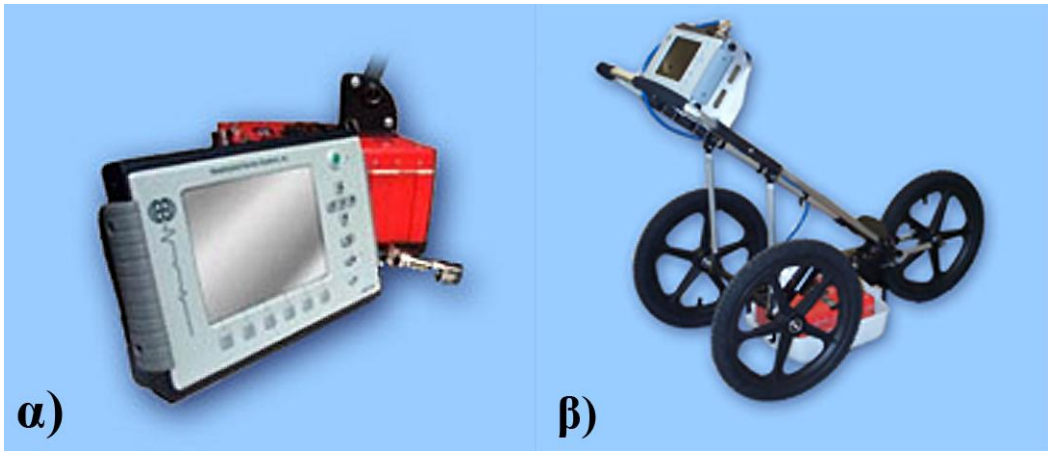
3.3.2 Sir-3000

Η συσκευή Sir-3000 (εικόνα3.5) αποτελείται από:

- Τη μονάδα ελέγχου καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων
- Τις κεραίες (πομπός και δέκτης)
- Τα καλώδια σύνδεσης
- Το φορείο μεταφοράς

Τα πλεονεκτήματα του έναντι του PulseEKKO 1000 είναι:

- Φορητότητα
- Μπορεί να το χειριστεί ένα άτομο (στο PulseEKKO 1000 χρειάζονται δύο άτομα)
- Ταχύτερη καταγραφή δεδομένων.

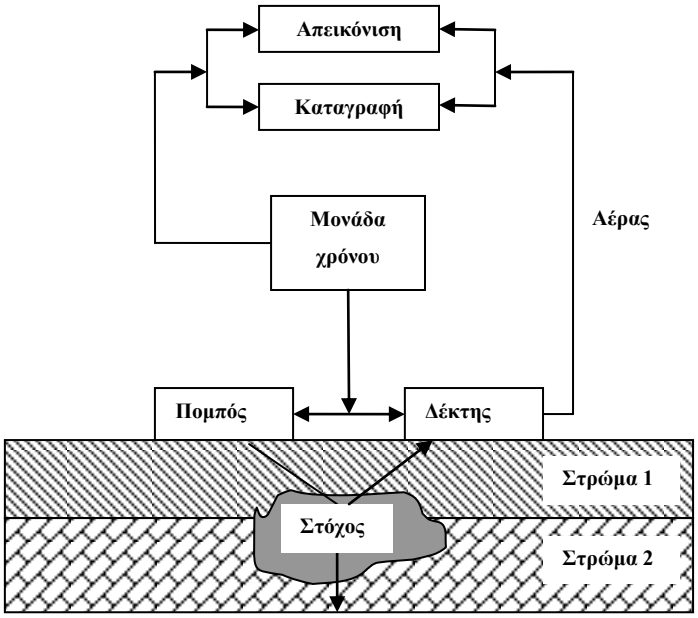


Εικόνα 3.5: Σύστημα γεωραντάρ SIR-3000: α)Μονάδα ελέγχου καταγραφής και κεραίες β) Φορείο μεταφοράς.

Όλες οι πληροφορίες που καταγράφονται συμπεριλαμβάνονται σε ένα αρχείο με κατάληξη .DZT . Όσο αφορά την ποιότητα των δεδομένων για τις συνθήκες τις οποίες χρησιμοποιήθηκε, δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα κύρια εξαρτήματα ενός συστήματος γεωραντάρ και πως αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η "καρδιά" θα μπορούσε να πει κανείς, του συστήματος

είναι η μονάδα του χρόνου (timing unit) η οποία ελέγχει την παραγωγή του σήματος του γεωραντάρ, και έπειτα ανιχνεύει τα λαμβανόμενα σήματα σαν συνάρτηση του χρόνου.

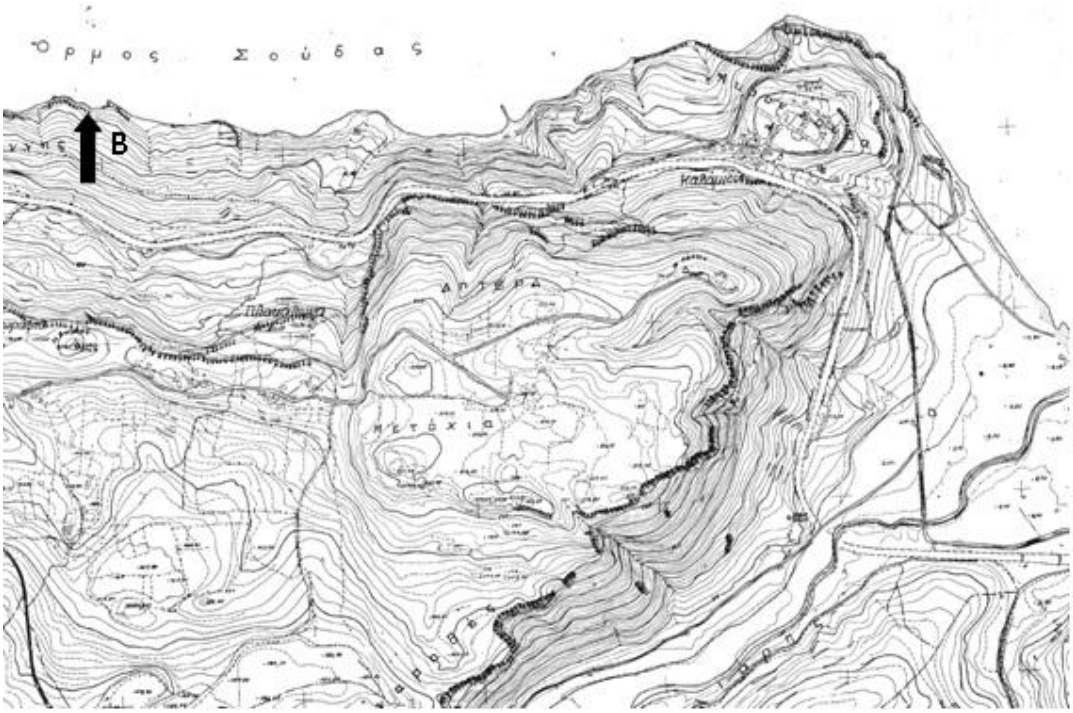


Σχήμα 3.1: Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ (Jol, 2009)

3.3 Περιοχές διασκόπησης

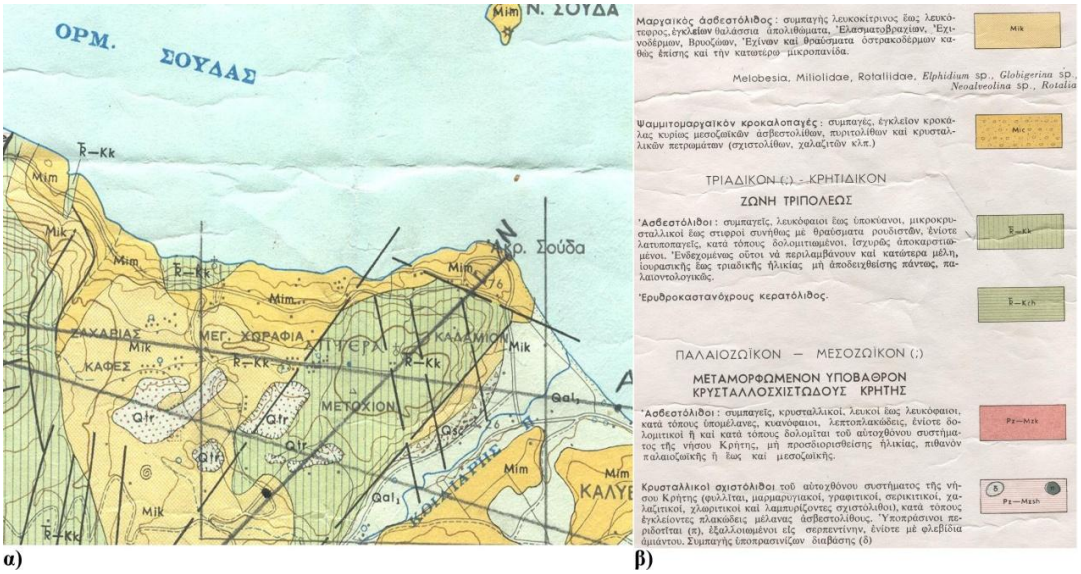
Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται οι περιοχές διασκόπησης. Στις περιοχές αυτές υπάρχουν υποψίες ύπαρξης αρχαίων ευρημάτων αλλά δεν είναι δυνατή η ανασκαφή τους, στο άμεσο μέλλον, λόγω οικονομικών κυρίως προβλημάτων.

Ο αρχαιολογικός χώρος βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νομού Χανίων, περίπου 20 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης των Χανίων (εικόνα 3.6). Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη της ευρύτερης περιοχής (εικόνα 3.7α και 3.7β) οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στον αρχαιολογικό χώρο είναι ασβεστόλιθοι και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι.Ο λίθος δόμησης της αρχαίας πόλης είναι βιοκλαστικός ασβεστόλιθος και αποτελείται από ασβεστίτη (95% $CaCO_3$), χαλαζία (5% SiO_2) και διάφορα απολιθώματα (Αγιουτάντης et Al., 2006).



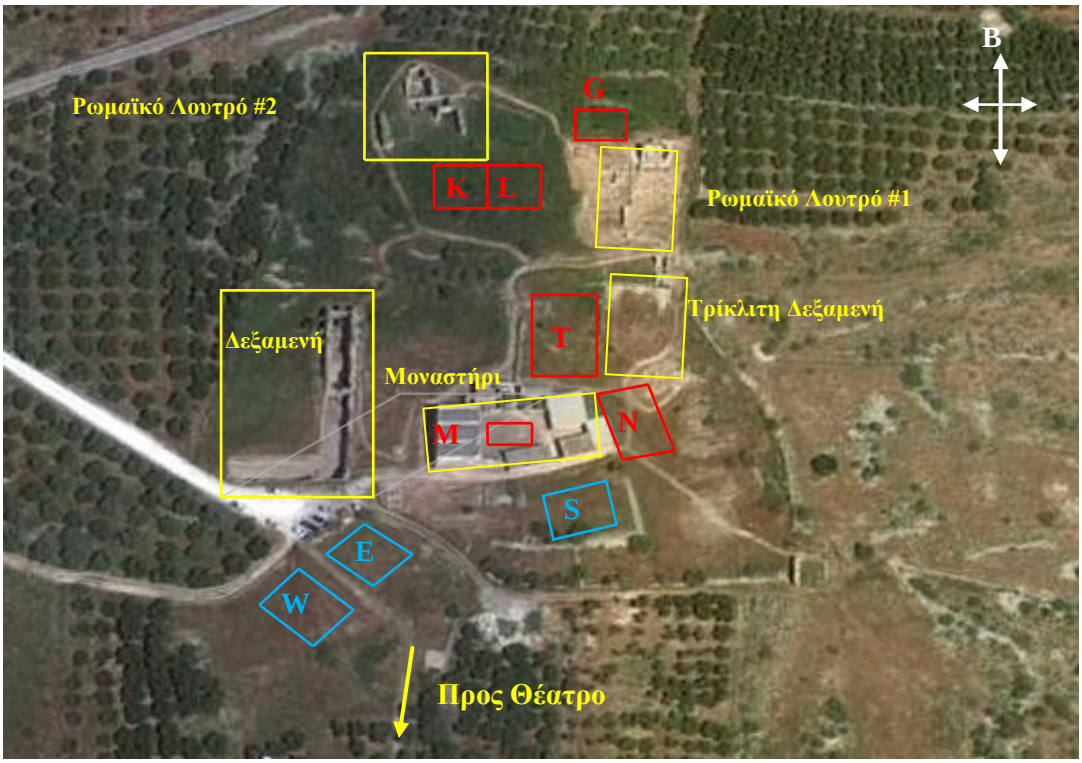
Εικόνα 3.6: Τοπογραφικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής

Οι περιοχές μελέτης συνοψίζονται στην δορυφορική εικόνα 3.7. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζονται τα σημαντικότερα ευρήματα του χώρου, με μπλε χρώμα οι περιοχές που χρησιμοποιήθηκε το γεωραντάρ SIR-3000 και με κόκκινο χρώμα οι περιοχές που χρησιμοποιήθηκε το γεωραντάρ PulseEKKO 1000.



Εικόνα 3.7: α) Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της Αρχαίας Απτέρας β) Μέρος του υπομνήματος του γεωλογικού χάρτη.

Στον συγκεκριμένο αρχαιολογικό χώρο, όλα τα ευρήματα είναι κοντά στην επιφάνεια σε βάθος μέχρι 2 μέτρα περίπου. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν κεραίες μεσαίων συχνοτήτων, 450 MHz και 400 MHz, που προσφέρουν καλύτερη διακριτική ικανότητα.



Εικόνα 3.8: Περιοχές μελέτης (Εικόνα απο Google Earth).

Το πρώτο βήμα πριν την έναρξη των μετρήσεων, είναι ο καθορισμός των κανάβων λαμβάνοντας υπόψη το προσανατολισμός τους σε σχέση με τον Βορά. Σε γενικές γραμμές, οι κάναβοι διασκόπησης που πραγματοποιήθηκαν δεν είναι μεγάλων διαστάσεων λόγω του περιορισμένου μήκους των καλωδίων, και σε κάποιες περιπτώσεις λόγω του ανάγλυφου της περιοχής. Έπειτα καθορίζεται η απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, το βήμα της διασκόπησης, ο ολικός χρόνος καταγραφής και το διάστημα της δειγματοληψίας. Να σημειωθεί εδώ ότι η διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε με τη μέθοδο της ανάκλασης, η απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη ήταν σταθερή και ο προσανατολισμός τους είναι αυτός του σχήματος 2.8α. Οι παράμετροι διασκόπησης για την κάθε περιοχή μελέτης συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

Συνολικά μετρήθηκαν δέκα κάναβοι εκ των οποίων οι εννέα είναι εντός του αρχαιολογικού χώρου και ο ένας βρίσκεται στο Καλάμι Σούδας. Ο συνολικός αριθμός των γραμμών μελέτης είναι 230 συνολικού μήκους 4384 m .

Πίνακας 3.1: Παράμετροι διασκόπησης των περιοχών μελέτης

	Περιοχές Διασκόπησης										
Παράμετροι Διασκόπησης		**Αυλή Μοναστηριού (M)**	**Νότια Μοναστηριού (S)**	**Ανατολικά Μοναστηριού (N)**	**ΝΑ χώρου στάθμευσης (E)**	**ΝΔ χώρου στάθμευσης (W)**	**Δυτικά Τρικλίτης δεξαμενής (T)**	**Λουτρά (K)**	**Λουτρά (L)**	**Περιοχή (G)**	**Οικόπεδο στο Καλάμι**
	Γεωραντάρ	PulsleEKKO 1000	Sir - 3000	PulsleEKKO 1000	Sir - 3000	Sir - 3000	PulsleEKKO 1000	PulsleEKKO 1000		PulsleEKKO 1000	PulsleEKKO 1000
	Αριθμός γραμμών	26	29	32	44	30	42	6	6	8	7
	Μήκος γραμμών	276 m	601 m	713 m	1015 m	810 m	429.5 m	152.60 m	128.8 m	89.80 m	152 m
	Προσανατολισμός γραμμών	Δ-Α	Δ-Α	Ν-Β	ΒΔ-ΝΔ	ΒΔ-ΝΔ	Δ-Α	Δ-Α		Δ-Α	Δ-Α και Ν-Β
	Απόσταση γραμμών	0,50 m	0,50 m	0,50 m	0,50 m	0,50 m	0,33 m	0,50 m		0,50 m	-------
	Συχνότητα	450 MHz	400 MHz	450 MHz	400 MHz	400 MHz	450 MHz	450 MHz		450 MHz	450 MHz
	Βήμα δειγματοληψίας	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.05 m		0.05 m	0.05 m
	Ολικός χρόνος καταγραφής	80 ns	150 ns	80 ns	150 ns	150 ns	80 ns	80 ns		80 ns	80 ns
	Απόσταση πομπού - δέκτη	0.25 m		0.25 m			0.25 m	0.25 m		0.25 m	0.25 m

Στην περιοχή διασκόπησης Μ (βλ. εικόνα 3.8), που βρίσκεται εντός της αυλής του Μοναστηριού ορίστηκε κάναβος διαστάσεων 12x12 m. Στον χώρο αυτό πιστεύεται ότι παλαιότερα βρισκόταν η αγορά της αρχαίας πόλης. Σήμερα, στα κτίρια αυτά, στεγάζονται γραφεία και οι χώροι συντήρησης (εικόνα 3.9). Βασιζόμενοι στο γεγονός ότι η αρχαία αγορά πιθανόν βρισκόταν στο χώρο όπου χτίστηκε η μονή του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου, ορίστηκαν κάναβοι νότια και ανατολικά της σημερινής θέσης του μοναστηριού (περιοχές S και N αντίστοιχα της εικόνας 3.8). Η περιοχή ανατολικά του μοναστηριού παρουσιάζεται στην εικόνα 3.10α, ενώ η περιοχή νότια του μοναστηριού παρουσιάζεται στην εικόνα 3.10β.

Εικόνα 3.9: Μονή Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου. Η διασκόπηση πραγματοποιήθηκε στο προαύλιο.

Εικόνα 3.10: α) Περιοχή μελέτης ανατολικά του μοναστηριού (N) κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων. Στα δεξιά φαίνεται η τμήμα του μοναστηριού. β) Περιοχή μελέτης νότια του μοναστηριού (S). Το μοναστήρι βρίσκεται στα αριστερά.

Η τρίκλιτη δεξαμενή (βλ. εικόνα 3.1) αποτελεί ίσως το πιο χαρακτηριστικό μνημείο του αρχαιολογικού χώρου. Επειδή δεν υπάρχουν στοιχεία για τον τρόπο με τον οποίο η δεξαμενή τροφοδοτούνταν με νερό, ορίστηκε κάναβος στην περιοχή Τ, δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής (εικόνα 3.11α). Ακολουθώντας την ίδια λογική, ορίστηκαν οι κάναβοι Κ και L που βρίσκονται μεταξύ των ρωμαϊκών λουτρών και ο κάναβος στην περιοχή G, βόρεια του ρωμαϊκού λουτρού (βλ. εικόνα 3.11β).

α) β)

Εικόνα 3.11: α) Περιοχή μελέτης (Τ) που βρίσκεται δυτικά της τρικλιτης δεξαμενής (δεξια η δεξαμενή) β) Περιοχή μελέτης G. Δέξια φαίνεται το ρωμαϊκό λουτρό.

Οι κάναβοι στις περιοχές W και Ε που βρίσκονται κοντά στο χώρο στάθμευσης ορίστηκαν λόγω της ύπαρξης της δεξαμενής που φαίνεται στην εικόνα 3.12.

Εικόνα 3.12: Σφραγισμένη δεξαμενή που βρίσκεται νότια του χώρου στάθμευσης

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο Καλάμι Σούδας (περιοχή F δορυφορικής εικόνας 3.13). Στην συγκεκριμένη περιοχή, που προορίζεται για αλλαγή χρήσης (από λιόφυτο σε οικόπεδο) εντοπίστηκαν τα θεμέλια ενός τοιχίου και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον εντοπισμό άλλων θεμελίων (εικόνα 3.14α και εικόνα 3.14β).

Εικόνα 3.13: Περιοχή μελέτης στο Καλάμι Σούδας (Εικόνα από Google Earth).

α)

β)

Εικόνα 3.14: α) Τομές που πραγματοποιήθηκαν σε οικόπεδο στο καλάμι και βρέθηκαν υπολείμματα ενός τοίχου. β) Τμήμα του τοίχου εντός της τομής.

3.4 Τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τεχνικές ανάλυσης εικόνας χρησιμοποιούνται ευρέως στην επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων. Σκοπός της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι να τονίσει κάποια χαρακτηριστικά της εικόνας που δε γίνονται άμεσα αντιληπτά και να βελτιώσει την ποιότητα της εικόνας

Μία ψηφιακή εικόνα είναι ένας πίνακας διαστάσεων M x N όπου σε κάθε στοιχείο του, αντιστοιχεί η τιμή που κατέγραψε κάποιο όργανο, είτε πρόκειται για σεισμογράφο, είτε για γεωραντάρ, είτε για μια οποιαδήποτε ψηφιακή κάμερα. Επομένως μία εικόνα γεωραντάρ είναι στην ουσία ένας πίνακας του οποίου κάθε στήλη είναι ένα ίχνος ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε καταγραφές με ίδιο χρόνο άφιξης. Οπότε οι εικόνες του γεωραντάρ αντιστοιχούν σε άξονες x (m) και t (ns).

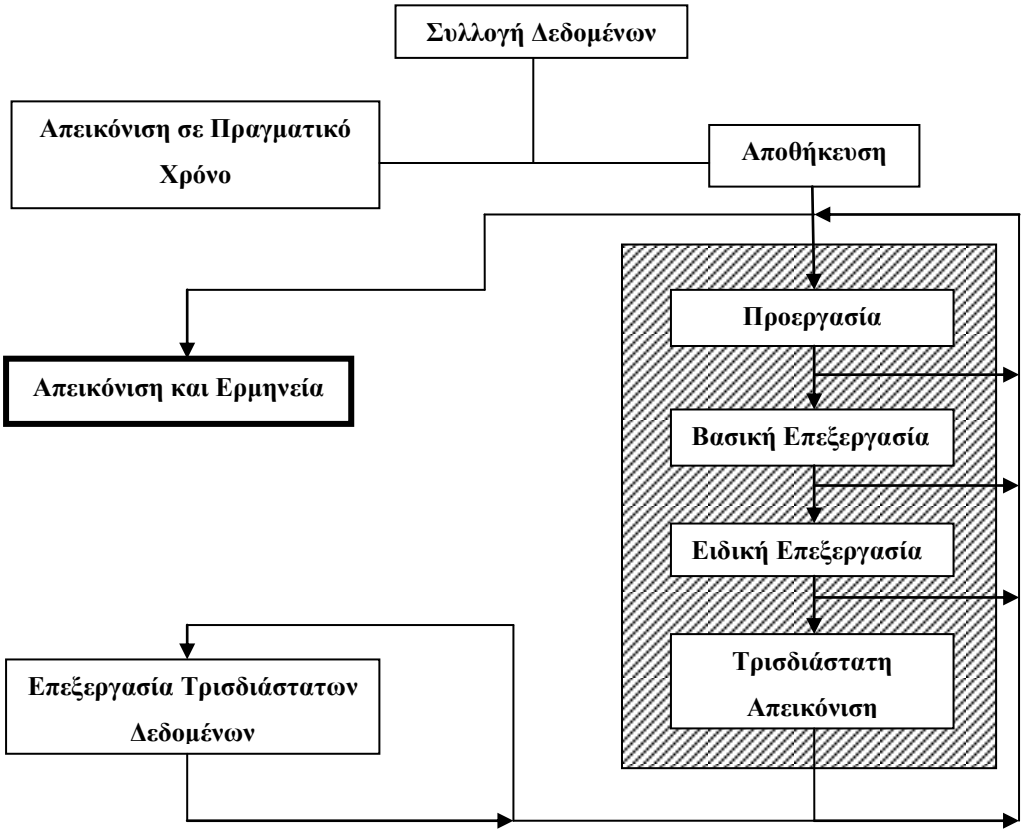
Τα δεδομένα της μεθόδου γεωραντάρ αντιμετωπίζονται συνήθως σαν βαθμωτή ποσότητα μολονότι τα Η/Μ πεδία, που είναι και η βάση της μεθόδου, είναι διανυσματικά μεγέθη. Η διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. Το πρωταρχικό στάδιο της διαδικασίας είναι η συλλογή των δεδομένων που συνήθως συνοδεύεται με την απεικόνιση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να διαιρεθεί στα ακόλουθα στάδια: προεργασία των δεδομένων, βασική επεξεργασία, ειδική επεξεργασία και την τρισδιάστατη απεικόνιση. Η παραπάνω διαδικασία είναι συνήθως επαναληπτική

3.4.1 Τελεστές ή μάσκες (Kernels)

Οι *τελεστές* ή *μάσκες* είναι πίνακες διαστάσεων m x n οι οποίοι περιέχουν συντελεστές βαρών και μετακινούνται πάνω σε κάθε γραμμή και στήλη της εικόνας (Μερτίκας, 1999). Καθώς η μάσκα μετακινείται πάνω στην εικόνα, διαστάσεων M x N, υπολογίζεται το άθροισμα των μερικών γινομένων των συντελεστών βαρών και των τιμών του πίνακα που συνιστά την εικόνα. Αν θεωρηθεί τελεστής διαστάσεων 3x3 (σχέση 3.1) και τοποθετηθεί πάνω από το σημείο Z(x,y) της εικόνας (σχήμα 3.3) τότε το νέο σημείο N(x,y) που θα αντικαταστήσει το Z(x,y) θα είναι αυτό της σχέσης 3.2 (Σπανουδάκης , 2002).

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

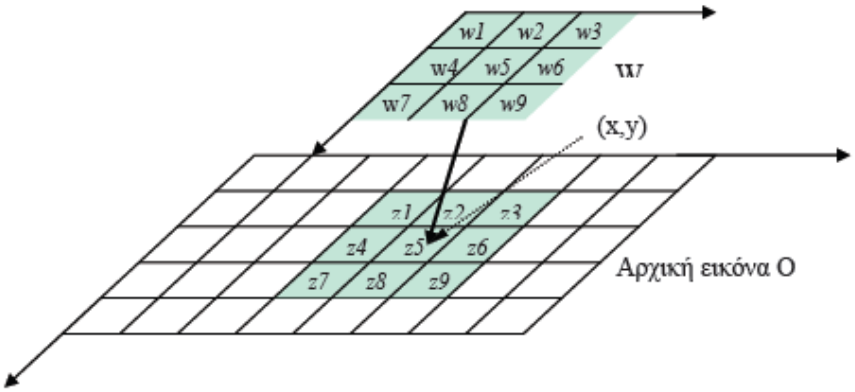
$$N(x, y) = z_1 w_1 + z_2 w_2 + \cdots + z_9 w_9 \tag{3.2}$$



Σχήμα 3.2: Διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων (Annan 2001, Jol 2009).

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε σημείο της εικόνας Z(x,y). Η εφαρμογή των τελεστών σε μία εικόνα μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους μέσω προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας. Ορισμένες εφαρμογές των τελεστών που θα αναλυθούν στα επόμενα εδάφια είναι (Μερτίκας 1999):

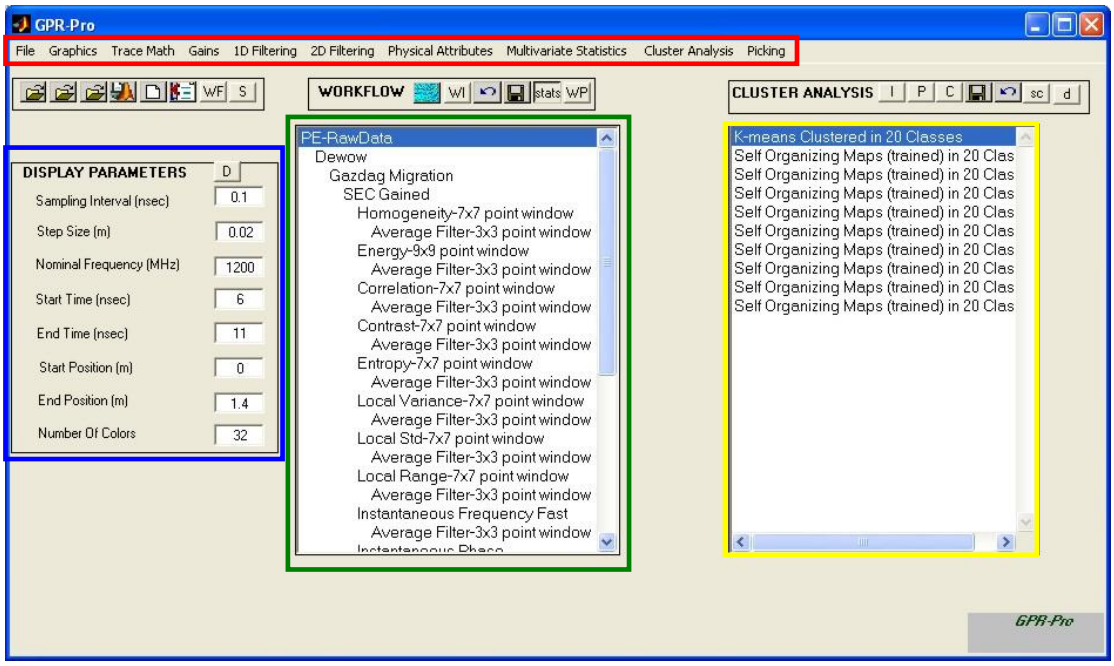
- Αποκοπή χαμηλών συχνοτήτων (ενίσχυση γραμμών, ενίσχυση ακμών της εικόνας).
- Αποκοπή υψηλών συχνοτήτων (εξομάλυνση εικόνας).
- Πράξεις μεταξύ εικόνων.



Εικόνα 3.3:Ο τελεστής και ο τρόπος που κινείται στην εικόνα (Μερτίκας 1999).

3.4.1 GPR-Pro

Το πρόγραμμα GPR-Pro είναι μία αυτοτελής λογισμική μονάδα που αναπτύχθηκε στο MATLAB για την επεξεργασία κυρίως των δεδομένων GPR. Τα κύρια στοιχεία του προγράμματος όπως το γραφικό περιβάλλον του χρήστη και τα εργαλεία επεξεργασίας παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω.



Εικόνα 3.15: Τα κύρια στοιχεία του γραφικού περιβάλλοντος περιλαμβάνουν το κύριο μενού (με κόκκινο πλαίσιο), την ετικέτα πληροφοριών και παρουσίασης των παραμέτρων (με μπλε πλαίσιο), την περιοχή ροής εργασίας (με πράσινο πλαίσιο) και την περιοχή ταξινόμησης των εργασιών (με κίτρινο πλαίσιο)(Spanoudakis, Vafidis 2010,)

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.15, το γραφικό περιβάλλον αποτελείται από τέσσερα στοιχεία: Το κυρίως μενού, την ετικέτα πληροφοριών, την περιοχή ροής εργασίας και την περιοχή ταξινόμησης.

Τα εργαλεία επεξεργασίας που βρίσκονται στο μενού (εικόνα 3.15 κόκκινο πλαίσιο) δίνουν τη δυνατότητα εισαγωγής και εξαγωγής αρχείων, εφαρμογή φίλτρων, ανάλυσης ιδιοτήτων, στατιστικής, ανάλυση ομαδοποίησης και προσέγγιση συναρτήσεων. Η ετικέτα πληροφοριών (εικόνα 3.15 μπλε πλαίσιο) παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων όπως την συχνότητα και το βήμα δειγματοληψίας. Οι τιμές αυτές μπορούν να τροποποιηθούν. Στην περιοχή τροποποίησης των δεδομένων (εικόνα 3.15 πράσινο πλαίσιο) ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αλλάξει τη ροή εργασίας προσθέτοντας ή αφαιρώντας ενέργειες που σχετίζονται με την επεξεργασία. Στην περιοχή ομαδοποίησης (εικόνα 3.15 κίτρινο πλαίσιο) περιλαμβάνονται εργαλεία για την ομαδοποίηση των ιδιοτήτων (Spanoudakis, Vafidis, 2010).

Η βασική επεξεργασία των δεδομένων αφορά τροποποιήσεις που γίνονται στα δεδομένα ώστε να είναι περισσότερο ευανάγνωστα και κατά συνεπεία να οδηγούν σε σωστή ερμηνεία και συμπεράσματα.

3.4.2 Προεργασία δεδομένων

Στο στάδιο της προεργασίας γίνεται μία πρώτη αξιολόγηση των ακατέργαστων δεδομένων και στη συνέχεια κρίνεται ποιο είναι το καταλληλότερο επόμενο βήμα της επεξεργασίας. Συνήθως εντοπίζονται οι σημαντικότερες ανακλάσεις ώστε η επεξεργασία που θα ακολουθηθεί να τις αναδείξει με το καλύτερο δυνατό τρόπο. Εξυπηρετώντας αυτό τον σκοπό μπορεί να πραγματοποιηθεί αλλαγή στην κλίμακα των δεδομένων, συγχώνευση δεδομένων, συνδυασμός των δεδομένων με συντεταγμένες GPS κ.α (Annan, 2001).

3.4.3 Βασική επεξεργασία δεδομένων

Κατά το στάδιο τη βασικής επεξεργασίας χρησιμοποιούνται φίλτρα και τεχνικές ώστε να τονιστούν οι οριζόντιοι και οι κεκλιμένοι ανακλαστήρες, το αποτέλεσμα των κυμάτων περίθλασης, να απομακρυνθεί ο θόρυβος και να βελτιωθεί η ποιότητα της εικόνας γενικότερα. Στα παραδείγματα που ακολουθούν έχει χρησιμοποιηθεί εικόνα τομής γεωραντάρ από την περιοχή ανατολικά του μοναστηριού.

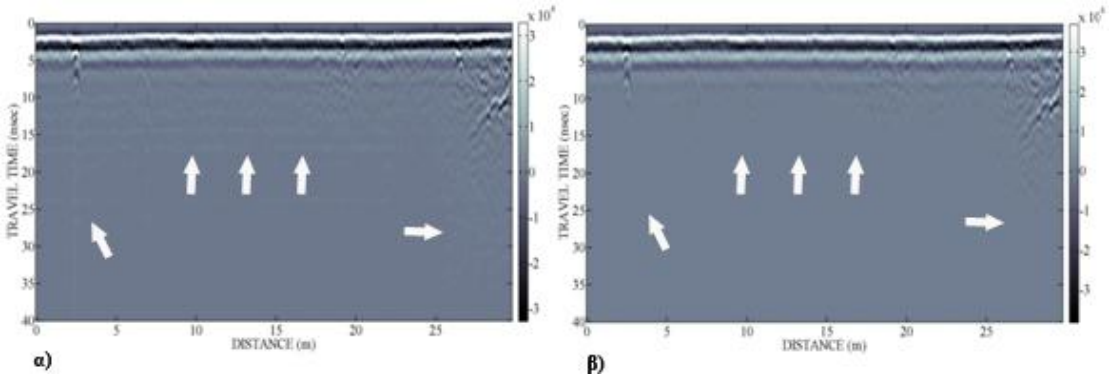
α) Φίλτρο διόρθωσης Dewow

Η διόρθωση Dewow αποτελεί μονοδιάστατο φίλτρο αποκοπής των χαμηλών συχνοτήτων από τα δεδομένα. Να σημειωθεί εδώ ότι τα φίλτρα μίας διάστασης μπορούν να σχεδιαστούν και να εφαρμοσθούν σε δεδομένα που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, ή σε δεδομένα διαφορετικών ιχνών αλλά που καταγράφηκαν την ίδια χρονική στιγμή. Το πεδίο που βρίσκεται κοντά στον πομπό περιέχει χαμηλής συχνότητας ενέργεια, η οποία σχετίζεται με ηλεκτροστατικά και επαγωγικά πεδία, που εξασθενεί ραγδαία με την απόσταση. Η ενέργεια αυτή αναγκάζει την βάση του σήματος που καταγράφεται να κυρτωθεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω.

Αρχικά υπολογίζει το μήκος του τελεστή από τη σχέση $2/(f\cdot\Delta t)$, όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής (MHz) και Δt το διάστημα δειγματοληψίας (ns). Ο τελεστής αυτός υπολογίζει το μέσο όρο των σημείων γύρω από το κεντρικό. Κατόπιν η μέση τιμή αφαιρείται από τα αρχικά δεδομένα. Η γενική μορφή του τελεστή που υπολογίζει τη μέση τιμή είναι (Σπανουδάκης, 2002):

$$\frac{1}{M}\begin{bmatrix}1\\1\\\vdots\\1\\1\end{bmatrix}_{(M\times N)} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{M}\begin{bmatrix}0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0\\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots\\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}_{(M\times N)} \tag{3.3}$$

όπου M το μήκος του. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Dewow στην αρχική εικόνα φαίνεται στην εικόνα 3.16.



Εικόνα 3.16: Εφαρμογή διόρθωσης Dewow στην αρχική εικόνα. α)Η εικόνα πριν την διόρθωση και β) η εικόνα μετά τη διόρθωση. Με άσπρα βέλη έχουν επισημανθεί οι διαφορές μεταξύ των δύο εικόνων.

β) Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal)

Πολλές φορές λόγω του φαινομένου της αντήχησης των κεραιών (antenna ringing), εμφανίζονται στα δεδομένα σήματα που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες. Τέτοιοι οριζόντιοι ανακλαστήρες εμφανίζονται και λόγω της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το περιβάλλον. Για παράδειγμα οι χρήστες του γεωραντάρ, τα ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες και δέκτες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούν σημαντικές επιδράσεις στο σήμα που καταγράφεται. Το μονοδιάστατο φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου, εφαρμόζεται για να εξαλειφθούν τα παραπάνω φαινόμενα (Σπανουδάκης, 2002).

Για να υλοποιηθεί αυτό υπολογίζεται ένα νέο ίχνος το οποίο αποτελεί το μέσο όρο όλων των ιχνών μιας τομής. Κατόπιν το μέσο ίχνος αφαιρείται από κάθε ίχνος και προκύπτει μια νέα εικόνα απαλλαγμένη από τα παραπάνω φαινόμενα. Στην εικόνα 3.17 φαίνεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου στην ακατέργαστη εικόνα.

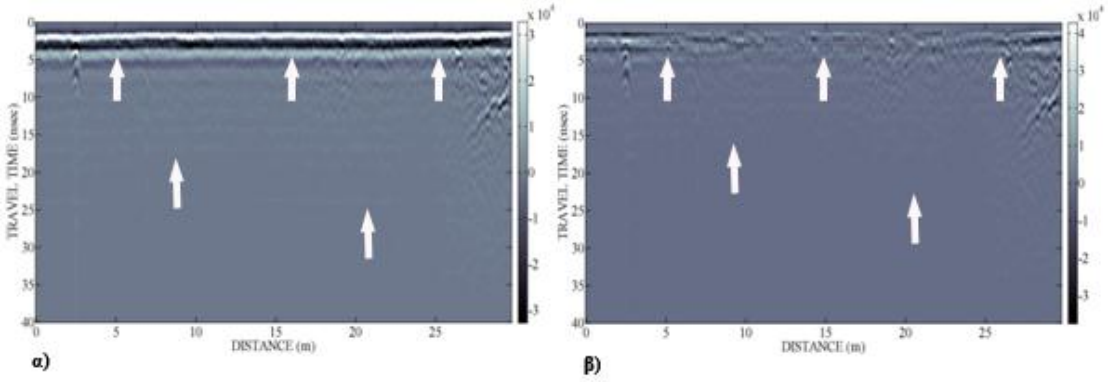
γ) Φίλτρο μέσης τιμής

Το φίλτρο μέσης τιμής αποτελεί ένα τυπικό φίλτρο δύο διαστάσεων. Τα δισδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε κατά την εφαρμογή τους να λαμβάνουν υπόψη μια ομάδα εικονοστοιχείων που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη και γειτονικούς χρόνους. Κάνουν πράξεις μεταξύ των εικονοστοιχείων και το αποτέλεσμα αντικαθιστά το κεντρικό εικονοστοιχείο όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο σε τομές γεωραντάρ όσο και σε οριζόντιες τομές (χάρτες).

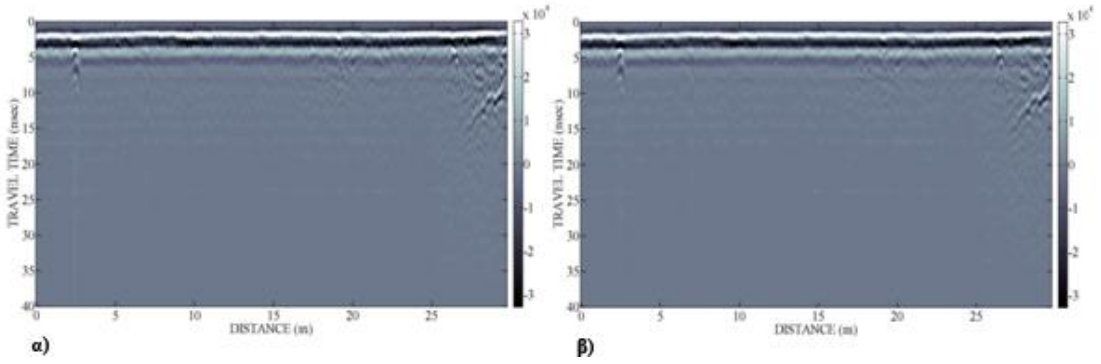
Το φίλτρο αυτό υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων και αντικαθιστά το κεντρικό εικονοστοιχείο με τη μέση τιμή. Χρησιμοποιείται σα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Ο τελεστής που το περιγράφει είναι (Σπανουδάκης 2002):

$$\frac{1}{9}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{N^2}\begin{bmatrix}1 & 1 & \cdots & 1 & 1\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1\end{bmatrix}_{(N\times N)} \tag{3.4}$$

Στην εικόνα 3.18 φαίνεται το αποτέλεσμα του φίλτρου αυτού στα δεδομένα. Η νέα εικόνα είναι εξομαλυσμένη σε σχέση με την αρχική, χωρίς όμως να παρουσιάζει έντονες διαφορές. Το αποτέλεσμα του φίλτρου φαίνεται καλύτερα σε επόμενη παράγραφο όπου περιγράφεται η επεξεργασία που ακολουθήθηκε βήμα βήμα για κάθε εικόνα.



Εικόνα 3.17: Εφαρμογή αφαίρεσης υποβάθρου στην αρχική εικόνα. α)Πριν την αφαίρεση και β) μετά την αφαίρεση. Με βέλη επισημαίνονται οι αλλαγές στην αρχική εικόνα.



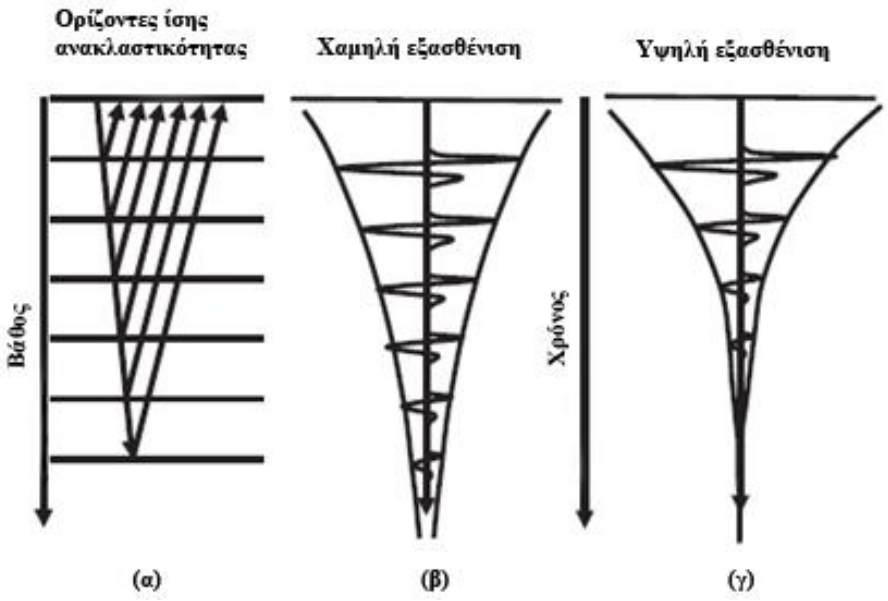
Εικόνα 3.18: Εφαρμογή φίλτρου μέσης τιμής στην αρχική εικόνα, όπου α) πριν και β) μετά την εφαρμογή του φίλτρου.

δ) Ενίσχυση των δεδομένων

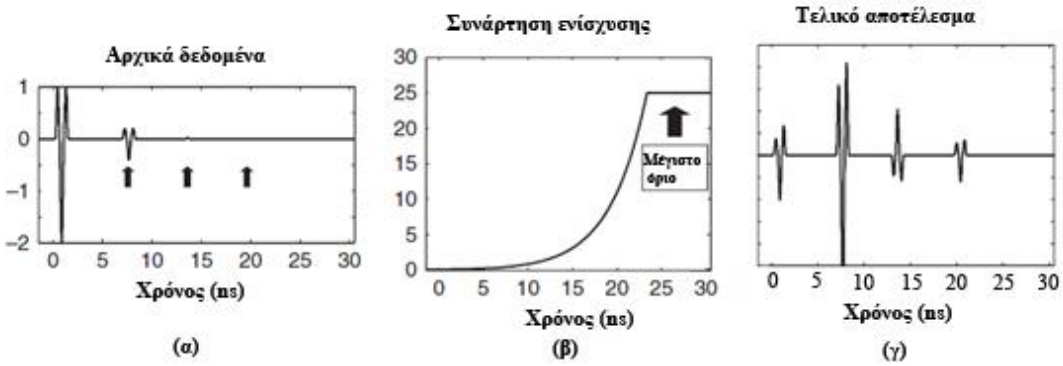
Τα σήματα που εκπέμπει το γεωραντάρ εξασθενούν ραγδαία καθώς διαδίδονται στο υπέδαφος. Σήματα που καταγράφονται από μεγαλύτερα βάθη παρουσιάζονται πιο αδύναμα απ ’ότι αυτά που καταγράφονται κοντά στην επιφάνεια. Οπότε, για να είναι ορθή η απεικόνιση των σημάτων απαιτείται κατάλληλη διόρθωση όπου εξισώνονται τα πλάτη των κυμάτων με την εφαρμογή μιας συνάρτησης που είναι χρονικά εξαρτημένη. Στο σχήμα 3.4β και 3.4γ παρουσιάζεται το πλάτος των εκπεμπόμενων σημάτων συναρτήσει του χρόνου. Η παραπάνω διόρθωση που αφορά την επέκταση των ορίων του χρόνου, αναφέρεται ως ενίσχυση. Η ένταση της εξασθένισης που παρατηρείται στο υπέδαφος, μεταβάλλεται. Ένα περιβάλλον χαμηλής εξασθένισης σήματος (σχήμα 3.4β), επιτρέπει διασκοπήσεις σε βάθη της τάξης των δεκάδων μέτρων. Αντίθετα, σε περιβάλλοντα υψηλής εξασθένισης σήματος (σχήμα 3.4γ), το βάθος της διασκόπησης μπορεί να είναι λιγότερο από 1 μέτρο. Στα δεδομένα

του γεωραντάρ πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο τα υψηλά όσο και τα χαμηλά άκρα της εξασθένισης. Η ιδέα της ενίσχυσης απεικονίζεται στο σχήμα 3.5, όπου εφαρμόζεται μία σφαιρική και εκθετική αντισταθμιστική αύξηση.

Η ενίσχυση εφαρμόζεται στα δεδομένα για την καλύτερη παρουσίαση ισχυρών και ασθενικών ανακλάσεων, που λόγω της απορρόφησης των κυμάτων δεν διακρίνονται καθαρά στα αρχικά δεδομένα (Jol, 2009).

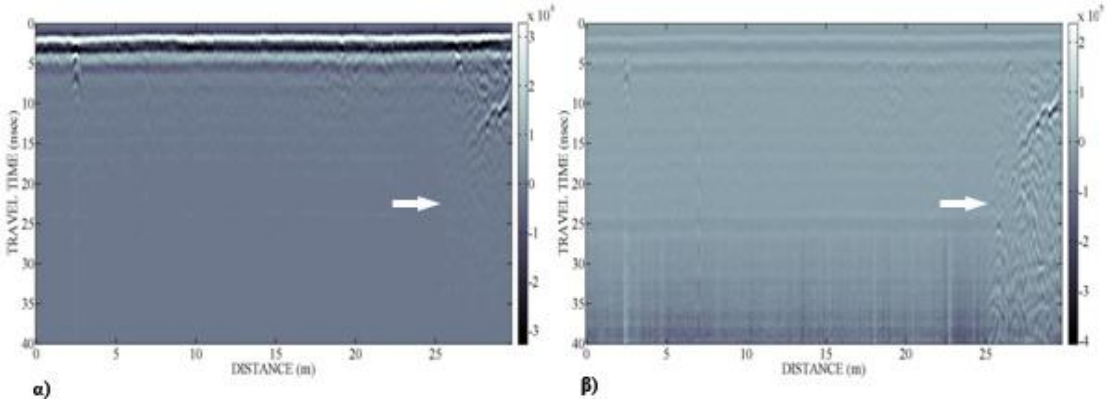


Σχήμα 3.4: Εξασθένιση σήματος στο υπέδαφος. α) Γήινο μοντέλο στρωμάτων με ορίζοντες ίσης ανακλαστικότητας των εκπεμπόμενων παλμών. β) Χαμηλή εξασθένιση σημάτων. γ) Υψηλή εξασθένιση σημάτων. Στα δεδομένα του γεωραντάρ η εξασθένιση είναι συνήθως υψηλή, δημιουργώντας μικρά πλάτη παλμών σε μικρό χρονικό διάστημα (Jol, 2009).

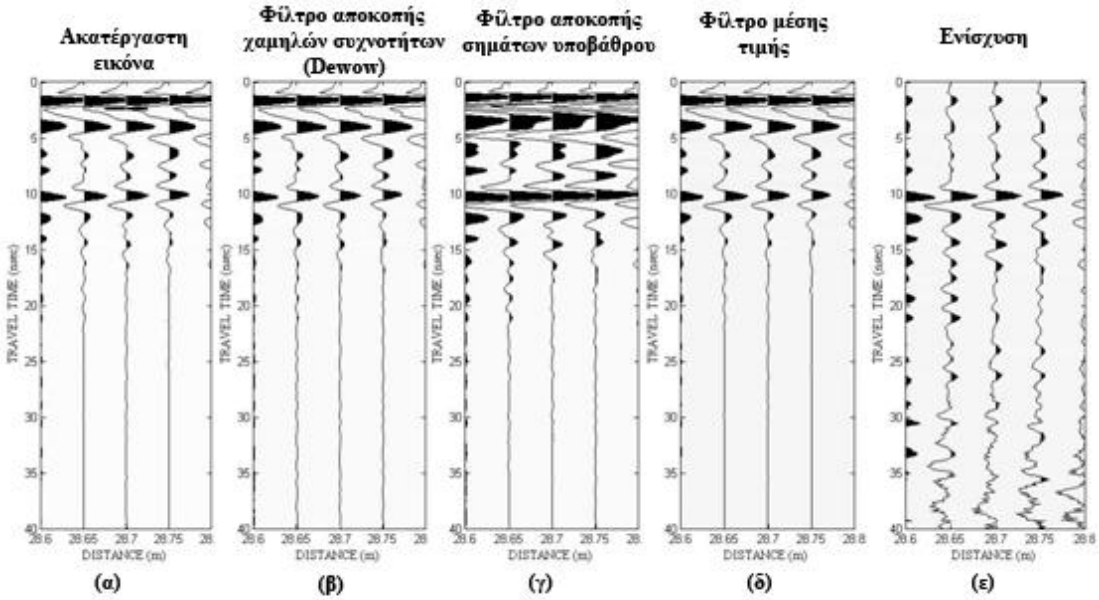


Σχήμα 3.5: Εφαρμογή της ενίσχυσης του σήματος για την αντιστάθμιση της εξασθένισης. (α) Ίχνος γεωραντάρ με πλάτη που εξασθενούν με τον χρόνο. (β) Συνάρτηση ενίσχυσης. (γ) Αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού του (α) με το (β). Παρατηρείται ότι και τα τέσσερα γεγονότα φαίνονται στο (c) (Jol, 2009).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εφαρμογής της παραπάνω διόρθωσης ανάλογα με την περίπτωση και τις συνθήκες που επικρατούν. Η διόρθωση αυτή είναι μη γραμμική και η εφαρμογή φίλτρων πριν και μετά, δεν θα δώσουν το ίδιο αποτέλεσμα. Στην εικόνα 3.19 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής της ενίσχυσης σε εικόνα γεωραντάρ. Επίσης στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται όλες οι διορθώσεις που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους σε πέντε απομονωμένα ίχνη της εικόνας γεωραντάρ που έχει χρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 3.19: Εφαρμογή της ενίσχυσης σε εικόνα γεωραντάρ. α)πριν και β) μετά την ενίσχυση. Ο ανακλαστήρας στα 25.0 m αναδεικνύεται και φαίνεται να εκτείνεται βαθύτερα, όμως τονίζεται και ο θόρυβος της εικόνας.



Σχήμα 3.6: Ίχνη της εικόνας που έχει χρησιμοποιηθεί στα προηγούμενα παραδείγματα. Η κάθε διόρθωση έχει εφαρμοσθεί απευθείας στην ακατέργαστη εικόνα.

3.4.4 Ειδική επεξεργασία δεδομένων: Μιγαδικά χαρακτηριστικά

Οι μετασχηματισμοί δεδομένων από μια μορφή σε μια άλλη είναι συνηθισμένοι στην ανάλυση σημάτων και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές για την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών από χρονοσειρές (σεισμικά δεδομένα, δεδομένα γεωραντάρ κτλ.). Αυτός ο τρόπος παρουσίασης δεδομένων έχει σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή σχέσεων και συμπερασμάτων που διαφορετικά δεν θα ήταν αντιληπτά. Ο μετασχηματισμός δεδομένων από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων είναι το πιο συνηθισμένο παράδειγμα επανατοποθέτησης δεδομένων που χρησιμοποιείται στην ανάλυση δεδομένων.

Ο μετασχηματισμός Fourier επιτρέπει τη μελέτη ιδιοτήτων ενός ίχνους (ή χρονοσειράς) αλλά δεν επιτρέπει τη μελέτη των τοπικών διακυμάνσεων. Η ανάλυση δεδομένων σαν αναλυτικά σήματα ή διαφορετικά σύνθετη ή μιγαδική ανάλυση ιχνών, είναι τεχνική μετασχηματισμού που εξασφαλίζει την τοπική πληροφορία (Taner et al., 1979). Όπως και ο μετασχηματισμός Fourier χρησιμεύει στην ερμηνεία δεδομένων.

Η μιγαδική ανάλυση ιχνών έχει σαν αποτέλεσμα τον φυσικό διαχωρισμό του πλάτους και της φάσης μιας κυματομορφής (χαρακτηριστικά). Το χαρακτηριστικό πλάτος αναφέρεται σαν ισχύς ανάκλασης ή φάκελος ή στιγμιαίο πλάτος του σήματος, ενώ η φάση αναφέρεται ως στιγμιαία φάση. Η στιγμιαία φάση αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της στιγμιαίας συχνότητας. Το στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία συχνότητα συνδυάζονται για τον υπολογισμό άλλων χαρακτηριστικών όπως τη σταθμισμένη μέση συχνότητα και τη φαινόμενη πολικότητα.

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

$$f(t) = x(t) + jx^{*}(\mathrm{t}) \qquad (3.5)$$

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

1. Να μπορεί να προσδιοριστεί από το x(t) με τη διαδικασία της γραμμικής συνέλιξης.
2. Να ανάγεται σε τανυστή φάσης αν το x(t) είναι ημιτονοειδής συνάρτηση. Δηλαδή αν:

   $x(t) = E\cos(\omega t + \theta)$ τότε $x^{*}(t) = E\sin(\omega t + \theta)$ για όλες τις πραγματικές τιμές του E και θ και για ω>0.

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

Αν θεωρηθεί ότι η x(t) μπορεί να εκφραστεί από χρονικά μεταβαλλόμενο πλάτος E(t) και μια χρονικά μεταβαλλόμενη φάση θ(t) δηλαδή x(t)=E(t)cosθ(t) τότε η φασικά μετατοπισμένη κατά 90° κυματομορφή είναι x*(t)=E(t)sinθ(t) και η σύνθετη κυματομορφή είναι:

$$f(t) = x(t) + jx^*(t) = E(t)[cos\theta(t) + jsin\theta(t)] = E(t)e^{j\theta(t)} \quad (3.6)$$

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

$$E(t) = x(t) + x^*(t) \quad (3.7)$$

$$\theta(t) = tan^{-1}\left[\frac{x^*(t)}{x(t)}\right] \quad (3.8)$$

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

α) Μετασχηματισμός Hilbert

Ο μετασχηματισμός Hilbert ορίζεται ως (Bracewell 1986):

$$x_B(t) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{X(\tau)}{\tau - t}d\tau = -\frac{1}{\pi t} * X(t) = -X^*(t) \quad (3.9)$$

Η σύνθετη συνάρτηση που προκύπτει είναι:

$$f(t) = x(t) - jx_B(t) = x(t) + jx^*(t) \quad (3.10)$$

Τέλος ο διακριτός μετασχηματισμός Hilbert δίδεται από τη σχέση:

$$X^*(t) = \frac{1}{\pi}\sum_{n=-\infty}^{\infty} X(t - n\Delta t)\frac{1-e^{j\pi n}}{n} = \frac{2}{\pi}\sum_{n=-\infty}^{\infty} X(t - n\Delta t)\frac{sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{n}, n \neq 0 \quad (3.11)$$

Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Hilbert περιλαμβάνει τα 4 παρακάτω στάδια (Rene 1986):

1. Η σειρά x(t) συμπληρώνεται με μηδενικά ώστε ο αριθμός των στοιχείων να είναι δύναμη του δυο (2^n) και επιπλέον το μήκος της νέας σειράς να είναι μεγαλύτερο από της αρχικής.

2. Εφαρμόζεται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT).

3. Οι αρνητικές τιμές στις συχνότητες μηδενίζονται ενώ οι θετικές τιμές διπλασιάζονται.

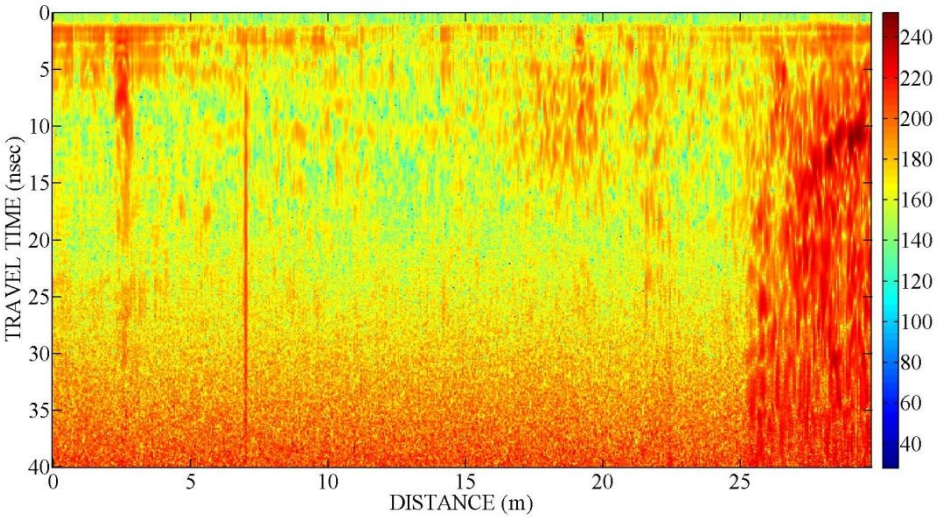
4. Εφαρμόζεται ο αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (IFFT).

β) Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB.

Το στιγμιαίο πλάτος αποτελεί μιγαδικό χαρακτηριστικό που χρησιμεύει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες. Επειδή αποτελεί το μέτρο του σύνθετου ίχνους χάνει στην ανάλυση κατά τη διεύθυνση του χρόνου. Η σχέση που το περιγράφει είναι η 3.12 δηλαδή:

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + x^{*2}(t)} \tag{3.12}$$

Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB δίδεται από τη σχέση: 20logE(t). Η κλίμακα dB χρησιμοποιείται συνήθως στο πεδίο των συχνοτήτων για τη απεικόνιση του φάσματος ισχύος (power spectrum). Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB. Το αποτέλεσμα σε σχέση με την αρχική εικόνα παρουσιάζεται στην εικόνα 3.20.

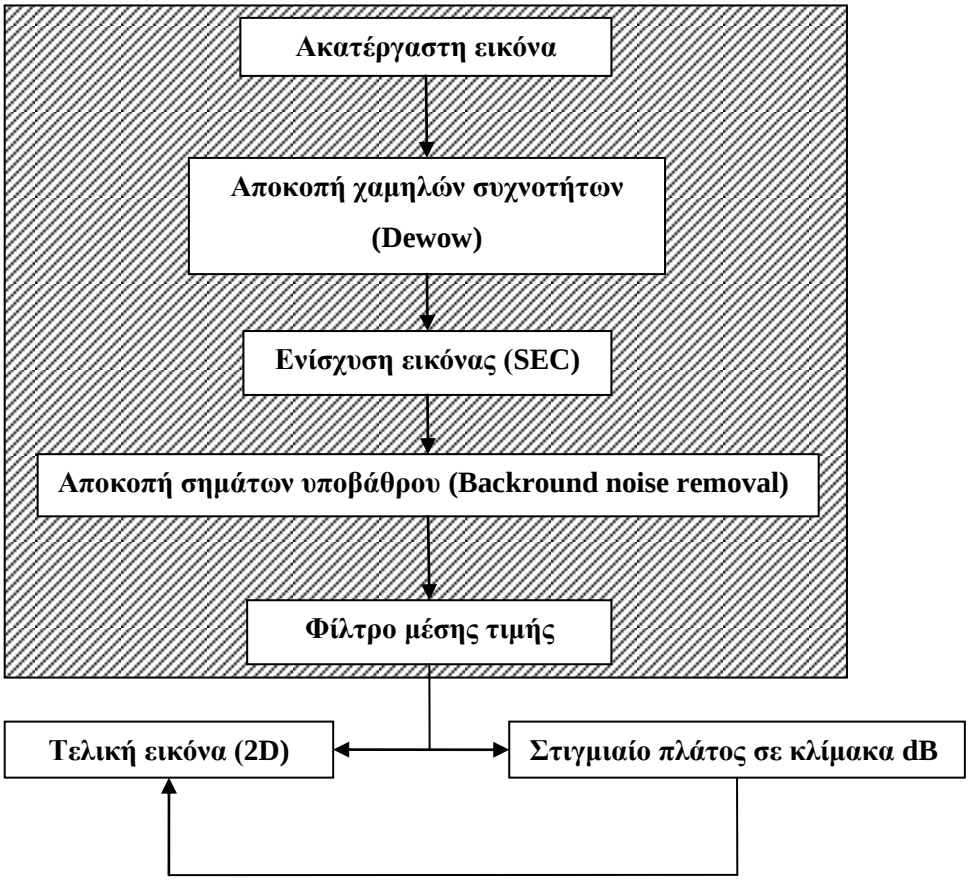


Εικόνα 3.20: Μεταβολή του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB.

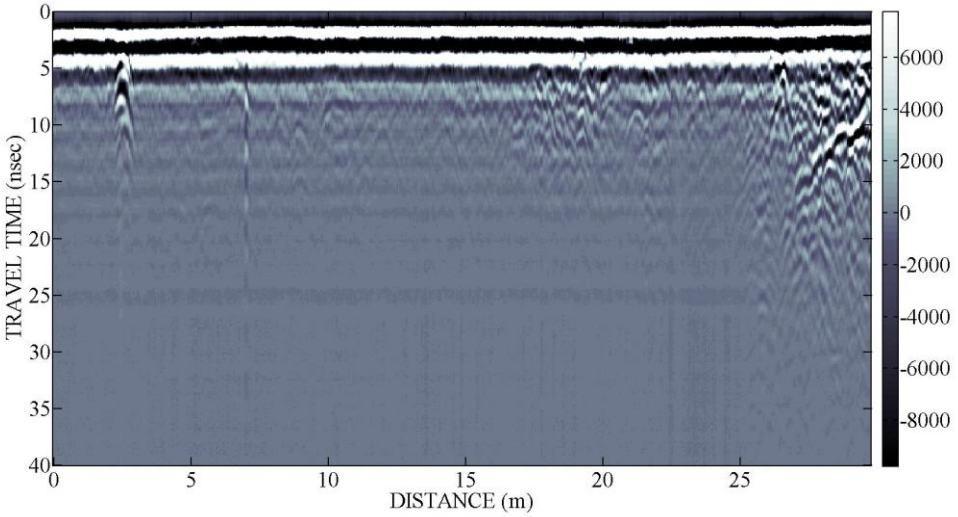
3.4.5 Εφαρμογή σε τομή γεωραντάρ

Στο παράδειγμα που ακολουθεί, χρησιμοποιήθηκε η εικόνα γεωραντάρ των προηγούμενων παραδειγμάτων. Η σειρά με την οποία εφαρμόστηκαν οι παραπάνω διορθώσεις παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7. Σε όλα τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ακολουθήθηκε η συγκεκριμένη σειρά διορθώσεων. Η σκιαγραφημένη περιοχή περιέχει τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν κατά το βασικό στάδιο της επεξεργασίας. Στην εικόνα 3.21 φαίνεται η αρχική εικόνα με βελτιωμένη την αντίθεση των χρωμάτων, ώστε να αναδείχνουνε καλύτερα οι ανακλαστήρες. Στην συγκεκριμένη τομή παρουσιάζονται αρκετές περιθλάσεις με πιο έντονες αυτές στα 5 ns , που εκτείνονται περίπου από τα 17.0 m έως τα 20.0 m και από τα 25.0 m έως τα 30.0 m.

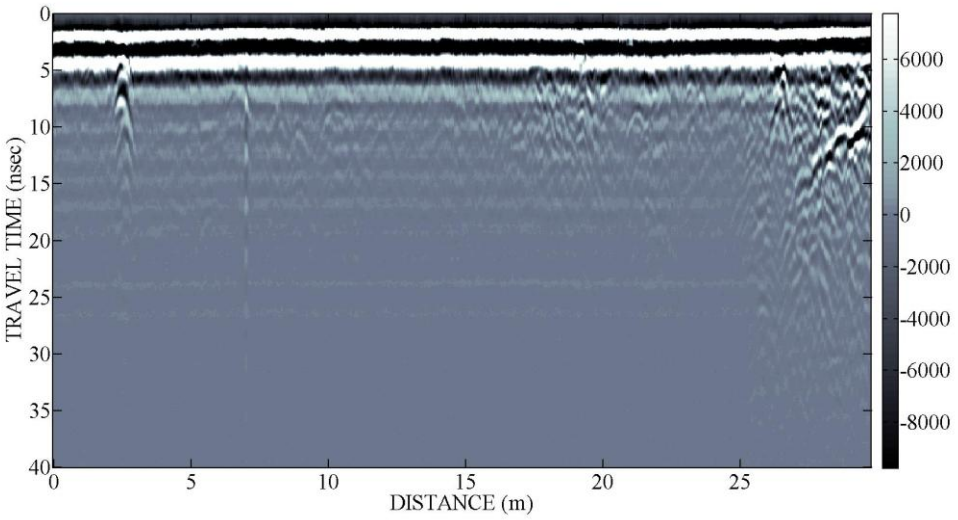
Η πρώτη διόρθωση που εφαρμόστηκε είναι η αποκοπή των χαμηλών συχνοτήτων ή φίλτρο διόρθωσης Dewow. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εικόνα 3. 22 όπου η διαφορά με την αρχική εικόνα (3.21) είναι εμφανής.



Σχήμα 3.7: Σειρά εφαρμογής των διορθώσεων στις εικόνες γεωραντάρ.

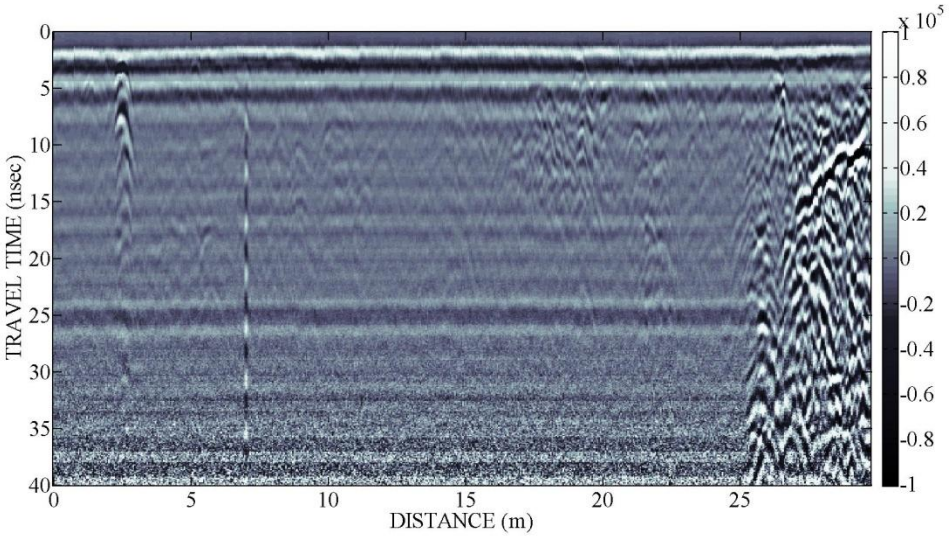


Εικόνα 3.21: Αρχική εικόνα τομής γεωραντάρ με βελτιωμένη την αντίθεση εικόνας.



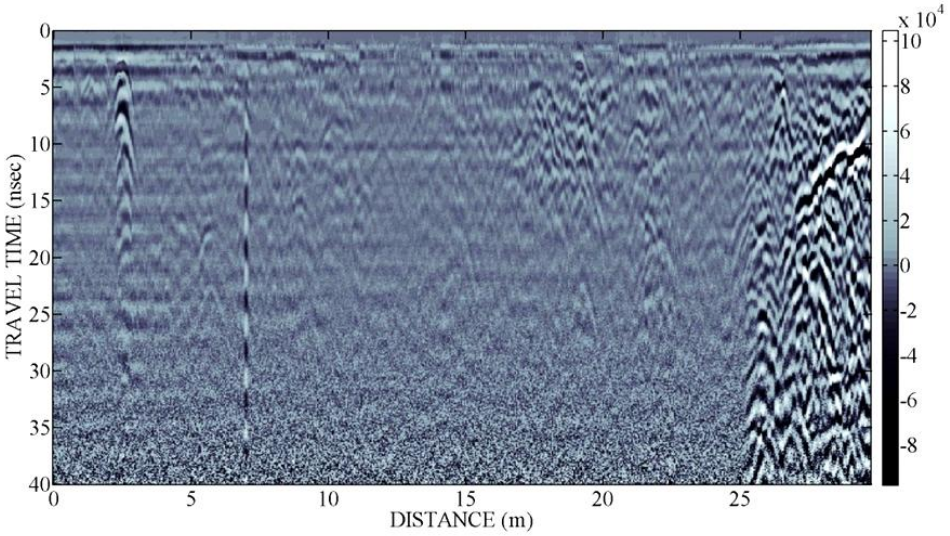
Εικόνα 3.22: Εφαρμογή φίλτρου διόρθωσης αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (Dewow)

Αφού έχει αφαιρεθεί μέρος του θορύβου, στη συνέχεια εφαρμόζεται ενίσχυση, της τάξης των 10dB/m. Το αποτέλεσμα εμφανίζεται στην εικόνα 3.23. Οι πολλαπλές ανακλάσεις που ξεκινάνε στα 25 m αναδεικνύονται και φαίνεται να συνεχίζουν σε μεγαλύτερο βάθος. Επίσης τονίζονται και άλλες μικρότερης έντασης ανακλάσεις που ξεκινάνε στα 5- 17 ns.



Εικόνα 3.23: Εφαρμογή της ενίσχυσης στην εικόνα

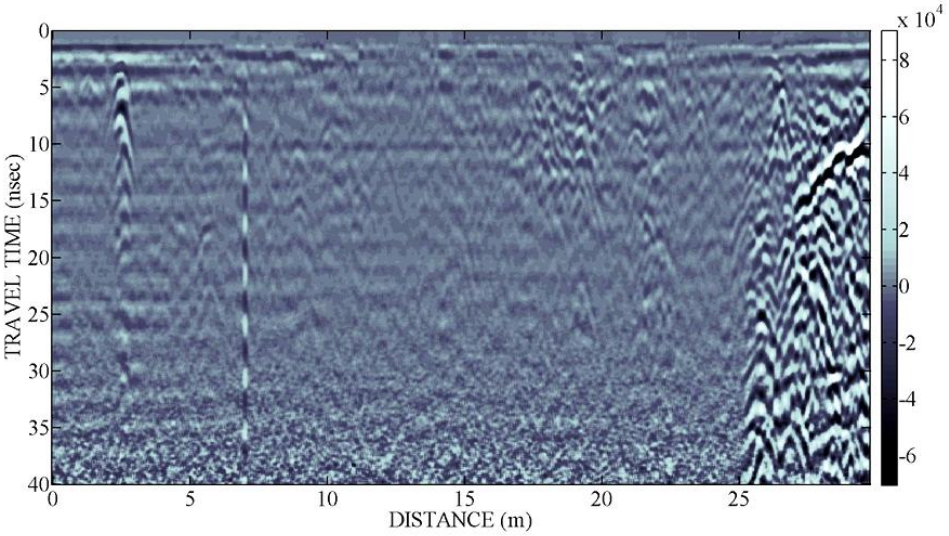
Η ενίσχυση που εφαρμόσθηκε στο προηγούμενο βήμα, τόνισε και τον θόρυβο της εικόνας. Επόμενο βήμα λοιπόν είναι η απομάκρυνση του. Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται το φίλτρο αποκοπής των σημάτων του υποβάθρου (Backround noise removal). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.23.



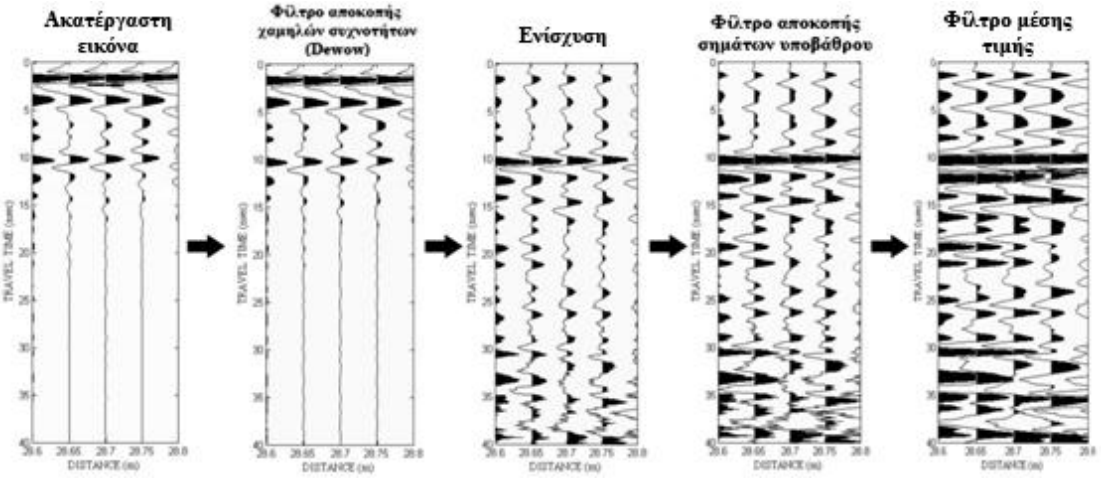
Εικόνα 3.23: Εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου για την εξομάλυνση της εικόνας

Λόγω του θορύβου που υπάρχει ακόμα στην εικόνα, εφαρμόζεται το φίλτρο μέσης τιμής το οποίο όπως φαίνεται στην εικόνα 3.24, την εξομαλύνει. Η επεξεργασία που περιγράφθηκε

παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8 όπου έχουν απομονωθεί πέντε ίχνη της τομής γεωραντάρ, και φαίνονται οι μεταβολές που υφίσταται κατά την εφαρμογή της κάθε διόρθωσης.

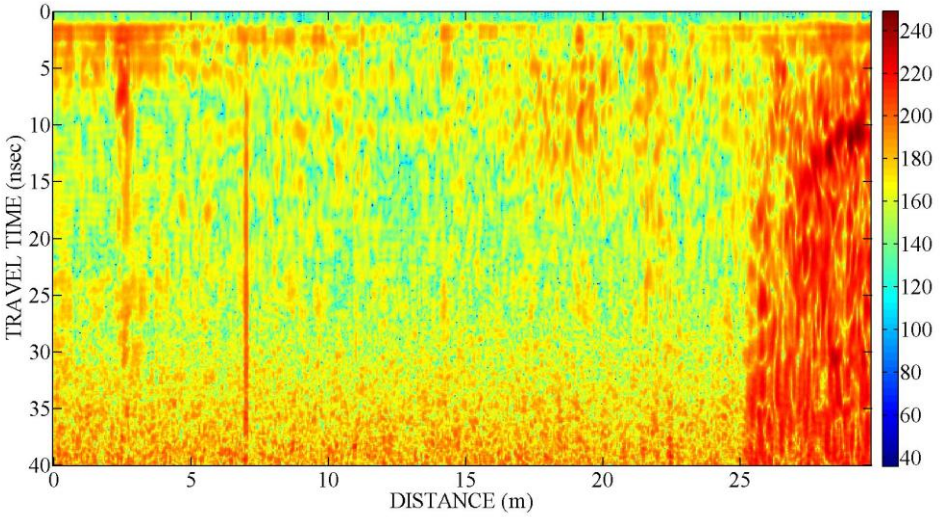


Εικόνα 3.24: Αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου μέσης τιμής.



Σχήμα 3.8: Επίδραση των διορθώσεων στα ίχνη της τομής

Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB υπολογίστηκε για την εικόνα 3.24. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.25.

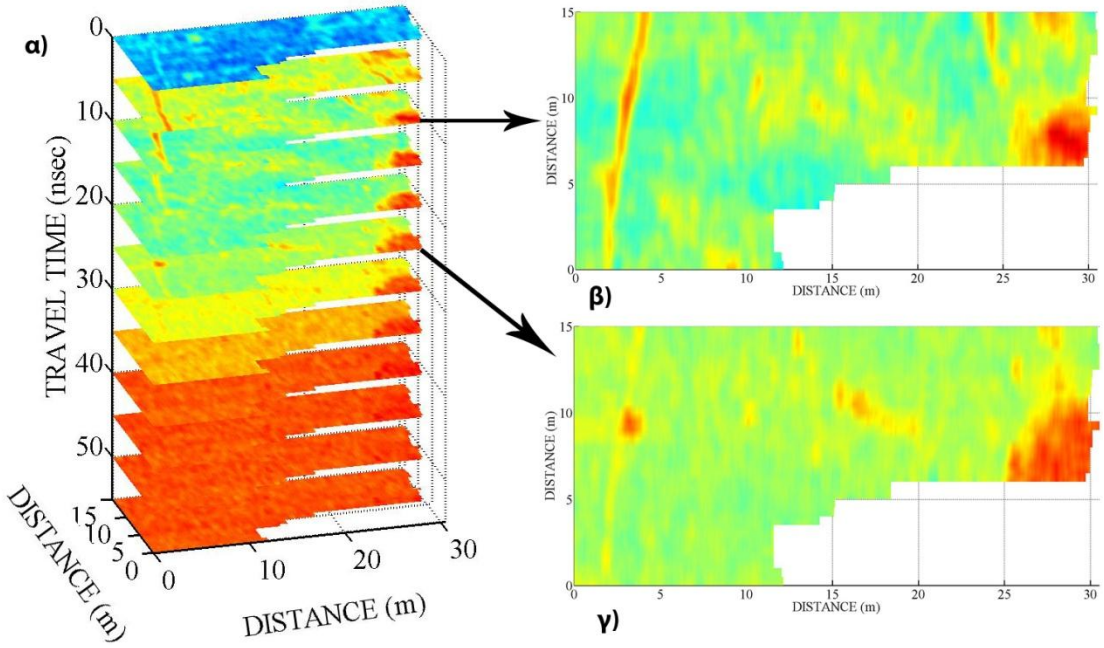


Εικόνα 3.25: Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB

3.4.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση δεδομένων

Μετά το πέρας της επεξεργασίας των τομών γεωραντάρ, δίνεται η δυνατότητα συγχώνευσης των τομών ενός κανάβου και δημιουργείται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους. Η τρισδιάστατη απεικόνιση αποτελείται από οριζόντιες τομές (slices) (εικόνα 3.25β και 3.25γ), οι οποίες δημιουργούνται από την σύνθεση των τομών γεωραντάρ και προβάλλονται σε άξονες X(m),Y(m),Z(ns). Μία τρισδιάστατη εικόνα γεωραντάρ, είναι αυτή της εικόνας 3.26α. Πρόκειται για την τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους της περιοχής που βρίσκεται ανατολικά του μοναστηριού. Περισσότερες λεπτομέρειες, όσο αφορά τα αποτελέσματα και την ερμηνεία τους θα δοθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Για την κατασκευή της χρησιμοποιήθηκε η εντολή sliceAvolume στο λογισμικό πρόγραμμα Matlab (Σπανουδάκης, 2002).

Στη συνέχεια η εικόνα εξομαλύνθηκε με τη συνάρτηση smooth3 του Matlab. Η συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμοποιεί το φίλτρο συνέλιξης Box σε τρισδιάστατα δεδομένα. Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας που προκύπτει έχει μία τιμή ίση με τη μέση τιμή των γειτονικών εικονοστοιχείων. Να σημειωθεί ότι στην εικόνα 3.25 έχει εφαρμοσθεί η συγκεκριμένη συνάρτηση.

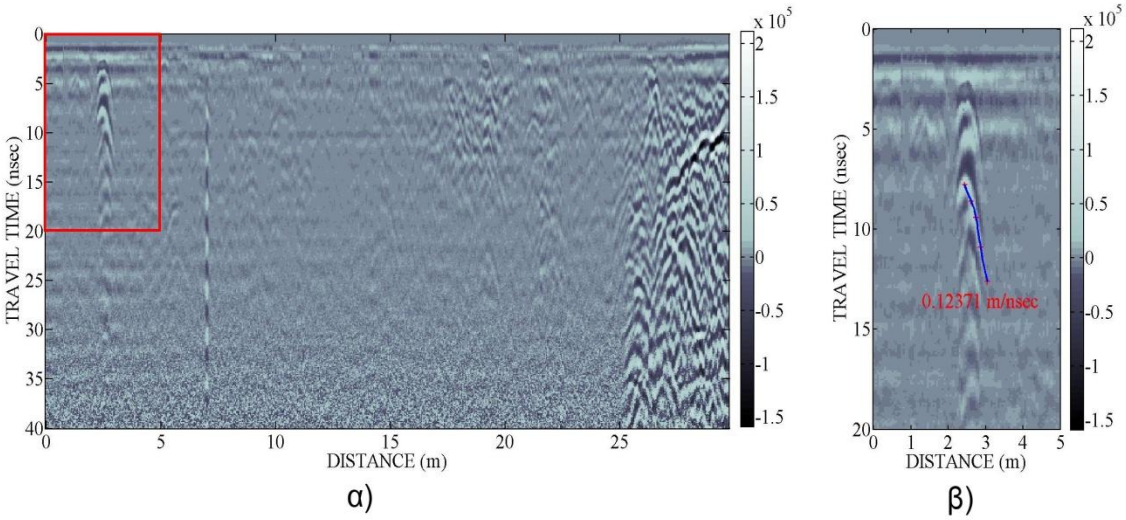


Εικόνα 3.25: Τρισδιάστατη απεικόνιση δεδομένων. α) Αναλυση του υπεδάφους σε οριζόντιες τομές συναρτήσει του χρόνου διαδρομής. β) Οριζόντια τομή υπεδάφους που αντιστοιχεί στα 10 ns. γ) Οριζόντια τομή υπεδάφους που αντιστοιχεί στα 25 ns.

3.5 Υπολογισμός ταχύτητας

Σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση ταχυτήτων των περιθλάσεων, οι οποίες παρουσιάζονται με τη μορφή υπερβολών. Ο υπολογισμός της ταχύτητας έγινε με το GPR-Pro, χρησιμοποιώντας το εργαλείο Velocity Picking.

Στην εικόνα 3.26 υπολογίζεται η ταχύτητα για την περίθλαση που βρίσκεται εντός του κόκκινου πλαισίου. Το συγκεκριμένο εργαλείο υπολογίζει την ταχύτητα διάδοσης του Η/Μ στο μέσο, επιλέγοντας σημεία στην υπερβολή της περίθλασης όπως φαίνεται στην εικόνα 3.26β. Η επιλογή των σημείων γίνεται από το χρήστη.



Εικόνα 3.26: Παράδειγμα υπολογισμού ταχύτητας. α) Τομή γεωραντάρ και β) μεγέθυνση της περίθλασης για την οποία υπολογίσθηκε η ταχύτητα.

Οι τιμές των ταχυτήτων μπορεί διαφέρουν μεταξύ τους για ποικίλου λόγους. Γι'αυτό επιλέγεται μία μέση τιμή, με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί το βάθος του στόχου από την σχέση:

$$D = u * \frac{t}{2} \tag{3.13}$$

όπου D: το βάθος του στόχου σε m

u: η μέση ταχύτητα διάδοσης στο μέσο σε m/ns

t: ο διπλός χρόνος διαδρομής σε ns

Να σημειωθεί εδώ, ότι αν δεν υπάρχουν καθαρά σχηματισμένες υπερβολές στις τομές του γεωραντάρ, η παραπάνω διαδικασία δεν μπορεί να εφαρμοσθεί. Οι μέσες ταχύτητες για κάθε περιοχή διασκόπησης είναι οι ακόλουθες:

- **Αυλή μοναστηριού (M)** : u = 0.09 m/ns
- **Νότια μοναστηριού (S)** : u = 0.09 m/ns
- **Ανατολικά μοναστηριού (N)** : u = 0.12 m/ns
- **Ανατολικά χώρου στάθμευσης (E)** : u = 0.10 m/ns
- **Δυτικά χώρου στάθμευσης (W)** : u = 0.10 m/ns
- **Λουτρά (K και L)** : u = 0.10 m/ns
- **Γούβα (G)** : u = 0.10 m/ns
- **Οικόπεδο στο Καλάμι**: u = 0.10 m/ns

Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο χώρο της Αρχαίας Απτέρας. Για την κάθε περιοχή διασκόπησης επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται τομές γεωραντάρ και οριζόντιες τομές του υπεδάφους, στις οποίες εμφανίζονται ισχυρές ανακλάσεις που πιθανότατα αντιστοιχούν σε θαμμένα αρχαία. Για την ερμηνεία των ανακλάσεων λαμβάνεται υπόψη η μορφολογία του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανακλάσεων, (διαστάσεις, μορφή, προσανατολισμός κ.α.) σε σχέση με τα υπόλοιπα αρχαιολογικά ευρήματα του χώρου. Οι περιοχές διασκόπησης παρουσιάστηκαν στις δορυφορικές εικόνες 3.8 και 3.13.

4.1 Αυλή μοναστηριού (Περιοχή Μ)

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα από πλευράς ανακλάσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 4.1 έως 4.3. Στις εικόνες αυτές συνδυάζεται η οριζόντια τομή του υπεδάφους για ένα συγκεκριμένο χρόνο με τις τομές γεωραντάρ. Η μέση ταχύτητα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι 0.09 m/ns.

Από τις εικόνες 4.1α στα 5.5 m και την 4.1β στα 10 ns ή 0.45 m βάθος, ξεχωρίζουν οι παρακάτω ανακλάσεις:

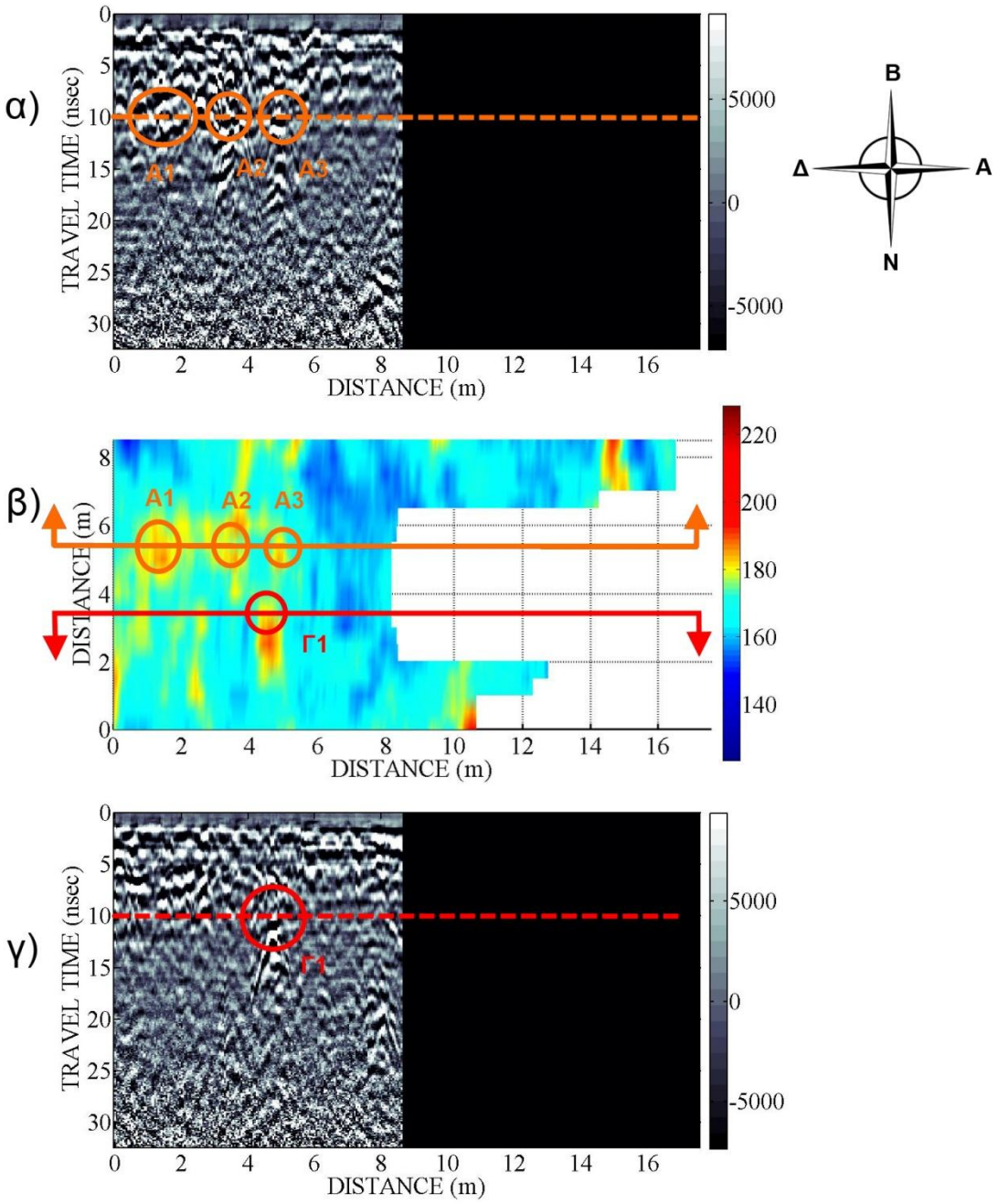
- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~13ns (Εικόνα 4.1α). Βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 20cm και σταματάει στα 60cm. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στο 1.0 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Ν-Β εμφανίζεται και στα 5.0 m (Εικόνα 4.1β).
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~20ns, δηλαδή από 0.2 έως τα 0.9 m βάθος (Εικόνα 4.1α). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 3.5 m περίπου, ενώ κατά τη διεύθυνση Ν-Β εμφανίζεται και στα 6.0 m (Εικόνα 4.1β). Παρ' όλο που στην οριζόντια τομή δεν φαίνεται σαν μία ενιαία ανωμαλία, δεν παρουσιάζεται το ίδιο και στην τομή γεωραντάρ.
- Η ανάκλαση Α3 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~20ns δηλαδή από 0.2 έως τα 0.9 m βάθος (Εικόνα 4.1α). Βρίσκεται στο ίδιο βάθος με την ανωμαλία Α2. (Εικόνα 4.1β). Η διαφορά είναι ότι εμφανίζεται μόνο στη γραμμή των 5.5 m (Ν-Β) ενώ στη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 5.5 m περίπου.

Οι τρεις αυτές ανωμαλίες, όπως φαίνεται στην οριζόντια τομή (εικόνα 4.1β), παρουσιάζουν μία γραμμικότητα μεταξύ τους, κατά τη διεύθυνση Δ-Α, που θα μπορούσε να αποδοθεί σε θεμέλια ανθρωπογενούς κατασκευής, η οποία ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 20cm περίπου και εκτείνεται μέχρι τα 90 cm.

Για την ίδια οριζόντια τομή (εικόνα 4.1β) στα 10ns και για την τομή γεωραντάρ που αντιστοιχεί στα 3.5 m του κανάβου διασκόπησης (εικόνα 4.1γ) διακρίνεται μία έντονη ανάκλαση:

- Η ανάκλαση Γ1 ξεκινάει από τα 10ns (0.45 m) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~17ns (~80 cm) (Εικόνα 4.1γ). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 4.5 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Ν-Β ξεκινάει από τα 2.5m (Εικόνα 4.1β)

Για την παραπάνω ανάκλαση δεν είναι δυνατόν να ληφθεί κάποιο συμπέρασμα. Μπορεί να σχετίζεται με τις ανακλάσεις Α1, Α2, Α3 αλλά μπορεί να αποδίδεται και σε διαφορετικό ανακλαστήρα.



Εικόνα 4.1: Αυλή μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 5.5m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 10ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 3.5m.

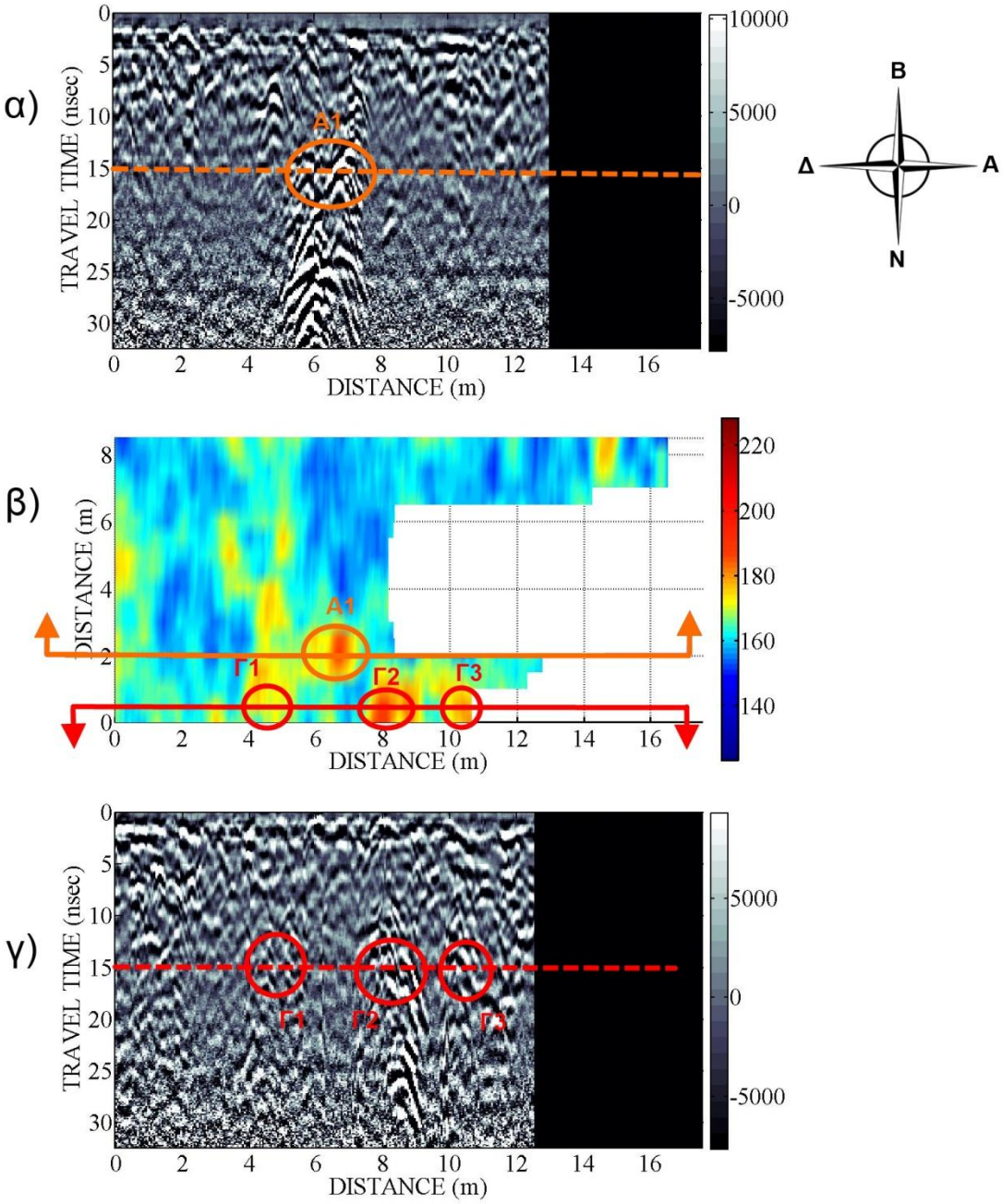
Η εικόνα 4.2 παρουσιάζει τις ανακλάσεις του υπεδάφους σε χρόνο των 15 ns (~70cm) για τις γραμμές διασκόπησης στα 0.5 και 2.0 m. Στις εικόνες 4.2α και 4.2β ξεχωρίζει μία ανάκλαση με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~14ns (0.6 m) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται παραπάνω από τα ~33ns (1.5 m) (Εικόνα 4.2α). Το πλάτος του ανακλαστήρα φθάνει το ~1.0 m κατά τη διεύθυνση Ν-Β και 1.5 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α (Εικόνα 4.2β).

Στις εικόνες 4.2β και 4.2γ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες ανακλάσεις της γραμμής διασκόπησης στο 0.5m :

- Η ανάκλαση Γ1 είναι μικρότερης εντάσεως συγκριτικά με τις δύο ακόλουθες αλλά στην οριζόντια τομή φαίνεται να ενώνεται με την ανωμαλία Α1 της εικόνας 4.2β. Ξεκινάει από τα ~13ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns περίπου (0.6 - 1.3 m βάθος). Κατά την διεύθυνση Δ-Α ξεκινάει στα 4.0 m και σταματάει στα 5.0 m περίπου (εικόνα 4.2β). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β εκτείνεται από 0.5 - 2.0 m.
- Η ανάκλαση Γ2 είναι η πιο ισχυρή της συγκεκριμένης γραμμής. Στην τομή γεωραντάρ (εικόνα 4.2γ) φαίνεται να ξεκινάει από τα 10 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται έως τα 30 ns (0.4 - 1.4 m βάθος), αλλά δεν παρουσιάζεται στην οριζόντια τομή των 10 ns (βλ. εικόνα 4.1β). Εμφανίζεται στην πρώτη γραμμή διασκόπησης του κανάβου και σταματάει στο 1.0m κατά τη διεύθυνση Ν-Β, ενώ κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 8.0 m.
- Η ανάκλαση Γ3 εμφανίζεται και στην οριζόντια τομή των 10 ns (Εικόνα 4.1β). Ξεκινάει από τα ~8ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 25ns (0.4 - 1.1 m βάθος). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β εμφανίζεται μαζί με την ανάκλαση Γ2 και τοποθετείται στα 10.5 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α.

Και σε αυτή τη περίπτωση δεν υπάρχει κάποια ξεκάθαρη σύνδεση μεταξύ των ανωμαλιών που παρουσιάζονται. Μπορεί να οφείλονται σε στρώμα καταστροφής, ή σε νεότερες κατασκευές που σχετίζονται με τα σύγχρονα κτίρια του αρχαιολογικού χώρου . Τα σενάρια και οι υποθέσεις που μπορεί να γίνουν για το πως συνδέονται οι ανακλάσεις μεταξύ τους, είναι πολλά. Παρ 'όλο που η συγκεκριμένη περιοχή παρουσίασε αρκετές έντονες ανακλάσεις, δεν παρέχει αρκετά στοιχεία ώστε να αποδοθούν σε συγκεκριμένους στόχους.



Εικόνα 4.2: Αυλή μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 2.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 0.5m.

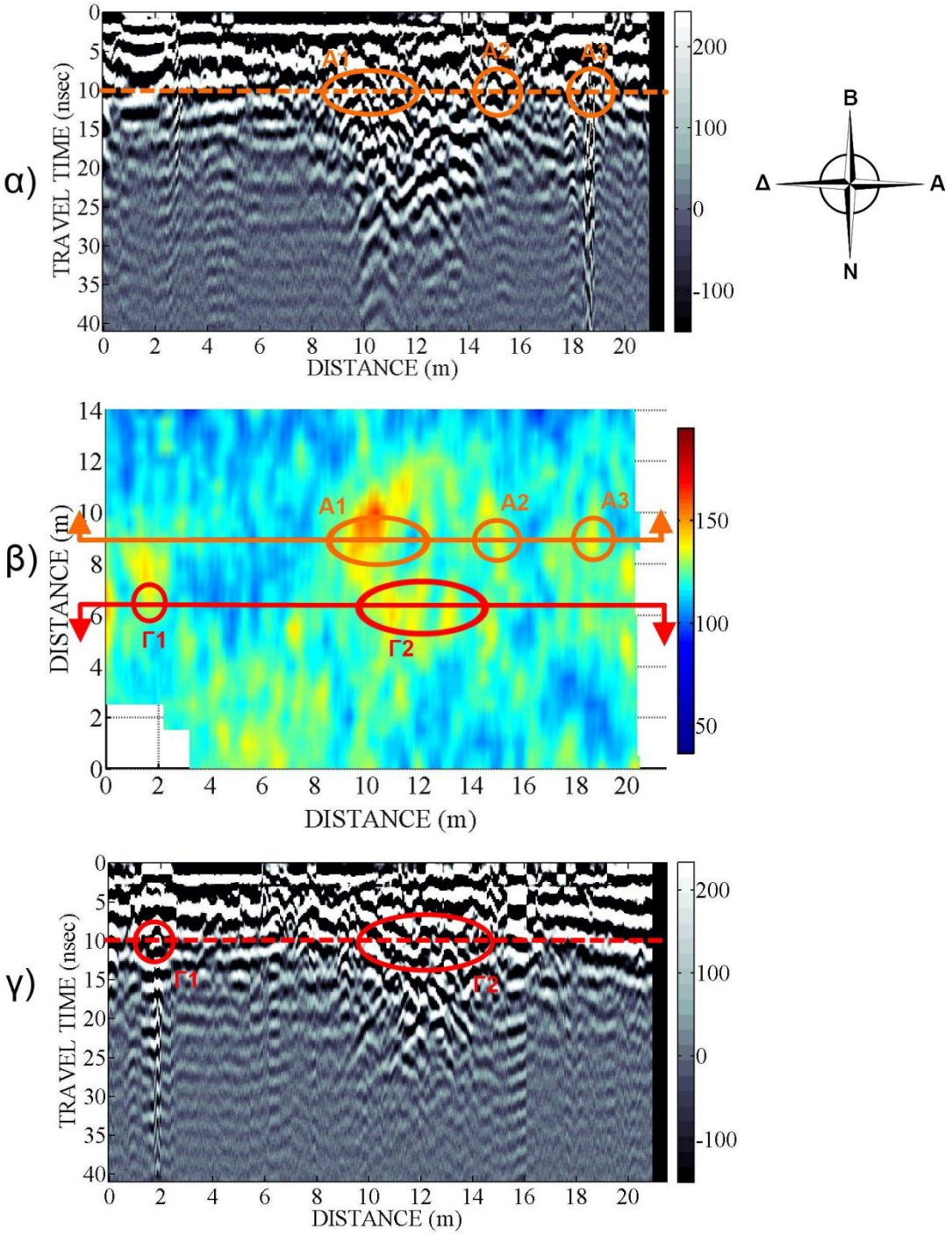
4.2 Νότια του μοναστηριού (Περιοχή S)

Στις εικόνες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διασκόπησης για την περιοχή που βρίσκεται νότια του μοναστηριού.. Η μέση ταχύτητα είναι 0.09 m/ns. Εστιάζοντας στις εικόνες 4.3α στα 9.0 m και την 4.3β στα 10 ns ή 0.45 m βάθος, διακρίνονται οι παρακάτω ανακλάσεις:

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~40ns (Εικόνα 4.3α). Βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 20cm περίπου και εκτείνεται έως τα 1.8 m. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 9.5 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Ν-Β εμφανίζεται μέχρι και τα 11.0 m του κανάβου διασκόπησης (Εικόνα 4.3β).
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα ~5ns και και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~35ns, δηλαδή από 0.2 έως τα 1.5 m βάθος (Εικόνα 4.3α). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 15.0 m περίπου, ενώ κατά τη διεύθυνση Ν-Β ξεκινάει στα 8.0 m και σταματάει στα 10.5 m (Εικόνα 4.3β). Δεν είναι ίδιας εντάσεως με την ανάκλαση Α1, αλλά φαίνεται να αποτελεί το δεξί άκρο μιας κατασκευής κυκλικής διατομής. Δηλαδή οι ανακλάσεις Α1 και Α2 μοιάζει να οριοθετούν τα άκρα της κυκλικής αυτής κατασκευής, κατά τη διεύθυνση Δ-Α.
- Η ανάκλαση Α3 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 40ns, δηλαδή από 0.2 έως τα 1.8 m βάθος (Εικόνα 4.3α). Μπορεί να συνδέεται με την κυκλική κατασκευή επειδή εκτείνεται μέχρι το ίδιο βάθος.

Για την ίδια οριζόντια τομή της εικόνας 4.3β παρουσιάζονται ακόμα δύο ανακλάσεις :

- Η ανάκλαση Γ1: ξεκινάει από τα 5 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 40 ns. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται περίπου στα 2.0 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Β-Ν ξεκινάει στα 6.5 m και εκτείνεται μέχρι τα 8.5 m.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 5 ns (0.20 m) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns (1.4 m). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α ξεκινάει στα 9.5 m και εκτείνεται μέχρι τα 14.0 m (Εικόνα 4.3γ). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β δεν είναι ξεκάθαρα τα όρια της (Εικόνα 4.3β). Παρατηρείται μία απόκλιση μεταξύ της τομής γεωραντάρ και της οριζόντιας τομής, όσο αφορά την έκταση της ανάκλασης κατά τη διεύθυνση Δ-Α. Επίσης στην τομή γεωραντάρ δεν φαίνεται να υπάρχει κενό εντός της κυκλικής κατασκευής, όπως παρουσιάζεται στην οριζόντια τομή του υπεδάφους.



Εικόνα 4.3: Νότια του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 9.0 m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 10ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 6.50 m.

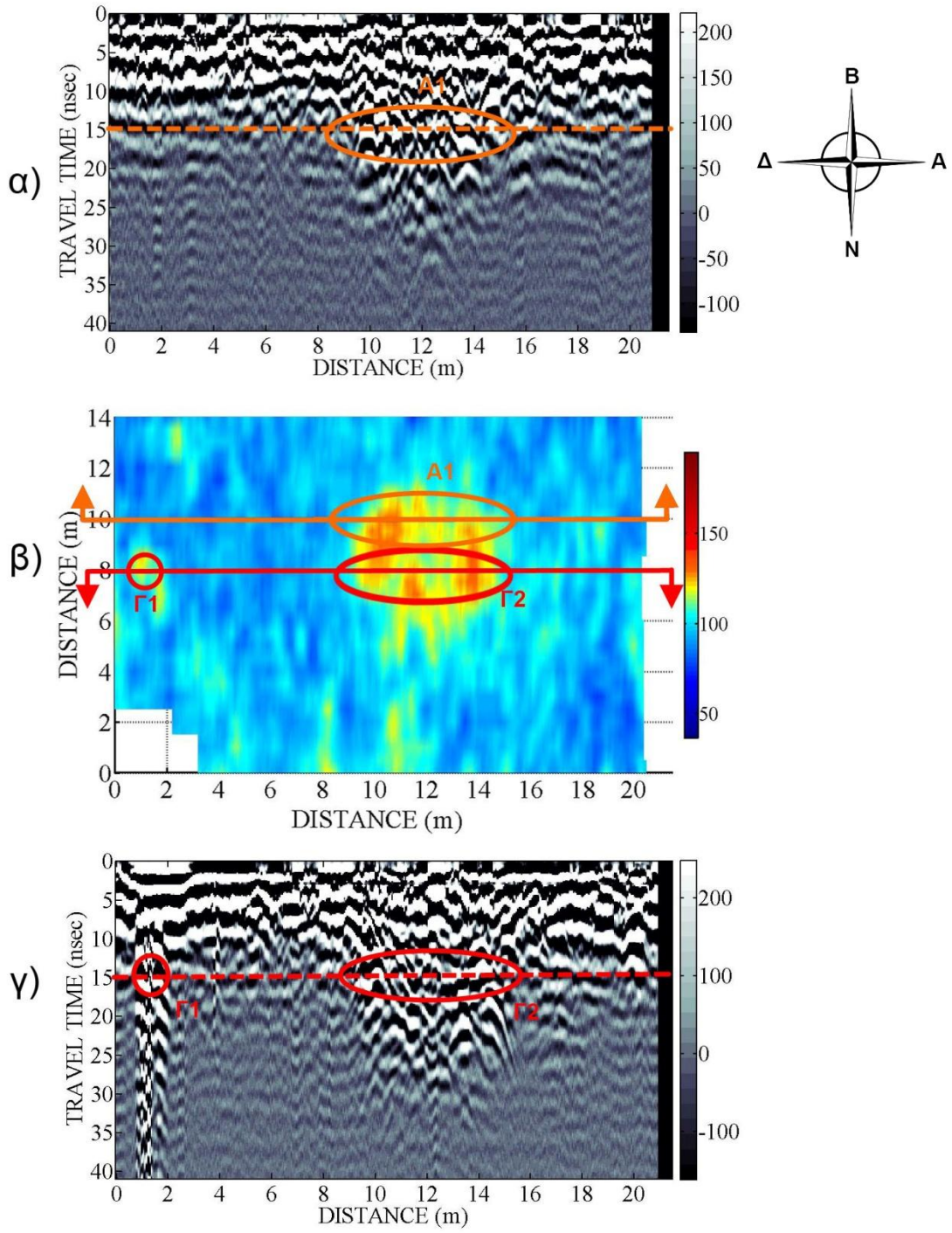
Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζονται οι ανακλάσεις του εδάφους για τις γραμμές μελέτης στα 8.0 και 10.0 m (4.4γ και 4.4α αντίστοιχα) σε βάθος που αντιστοιχεί στα ~0.7 m ή σε διπλό χρόνο καταγραφής 15 ns. Η κατασκευή κυκλικής διατομής φαίνεται πιο καθαρά και σε σχέση με την εικόνα 4.4β.

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~35ns, δηλαδή από 0.2 έως τα 1.5 m βάθος (Εικόνα 4.4α). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α ξεκινάει στα 9.5 m και φθάνει και τα 15.0 m. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β ξεκινάει στα 7.0 m και σταματάει στα 11.0 m (Εικόνα 4.4β).

Αντίστοιχα συνδυάζοντας τις εικόνες 4.4β και 4.4γ οι σημαντικότερες ανακλάσεις είναι:

- Η ανάκλαση Γ1: ξεκινάει από τα 5 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 40 ns. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται περίπου στο 1.0 m. Είναι η ίδια ανωμαλία που παρουσιάστηκε στην εικόνα 4.4β και παρουσιάζει μικρές διαφορές όσο αφορά τη θέση της στο χώρο.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 5 ns (0.20 m) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns (1.4 m). Παρουσιάζει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την ανωμαλία Γ2 της εικόνας 4.4β και 4.4γ. Παρ' όλο που φαίνεται να μην είναι ενιαία στην εικόνα 4.4β δεν ισχύει το ίδιο στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.4γ.

Η συγκεκριμένη κατασκευή παρουσιάζεται ημιτελής στα 0.45 m αλλά το σχήμα της είναι ξεκάθαρο στο βάθος των 0.7 m. Η διάμετρος της είναι περίπου 4.0 m και έχει μήκος ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση περίπου 1.0 m. Δεν παρουσιάζεται ομοιόμορφη σε όλη την έκταση της καθώς, όπως φαίνεται και στις τομές γεωραντάρ, σε κάποια σημεία οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται σε μεγαλύτερο βάθος.



Εικόνα 4.4: Νότια του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 10.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 8.0m.

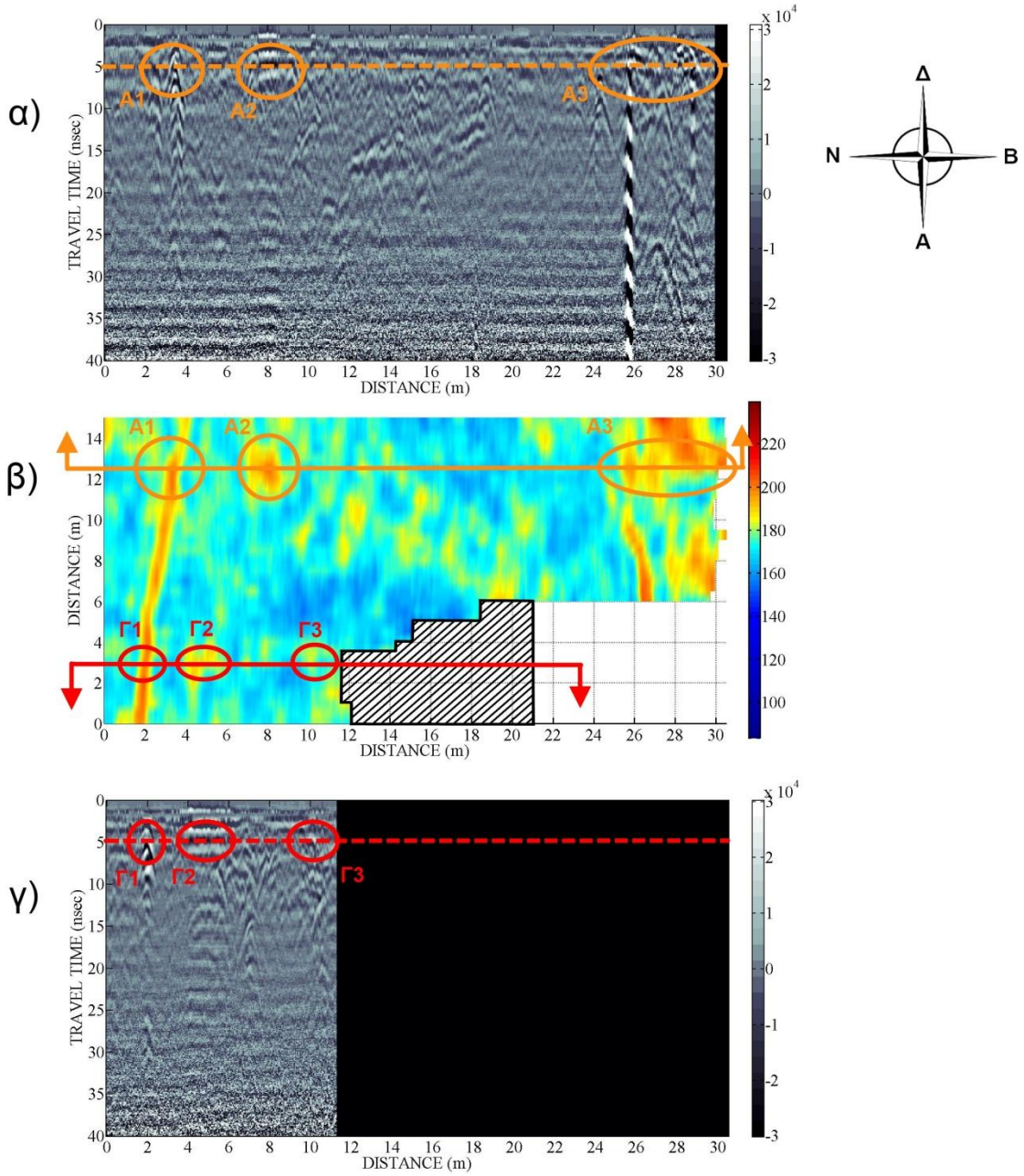
4.3 Ανατολικά του μοναστηριού (Περιοχή Ν)

Τα αποτελέσματα της διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στη περιοχή ανατολικά του μοναστηριού, παρουσιάζονται στις εικόνες 4.5 μέχρι 4.10. Η σκιαγραφημένη περιοχή των οριζόντιων τομών αντιστοιχεί στο σκάμμα που υπάρχει στην περιοχή. Η μέση ταχύτητα υπολογίσθηκε στα 0.12 m/ns.

Στην εικόνα 4.5 διακρίνονται οι παρακάτω ανακλάσεις για την οριζόντια τομή των 5 ns, και κατά μήκος των γραμμών διασκόπησης στα 3.0 και 12.5 m:

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~3ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~20ns (Εικόνα 4.5α). Βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 0.3 m περίπου και εκτείνεται έως τα 1.2 m. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α παρατηρείται μία συνεχής γραμμικότητα σχεδόν σε όλο το κάναβο μελέτης. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 3.5 m (Εικόνα 4.5β).
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα ~3ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~7ns όπου και εξασθενούν, και έπειτα ξεκινάνε από τα 20 ns συνεχίζοντας μέχρι τα 40 ns, αλλά με μικρότερη ένταση (Εικόνα 4.5α). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α εκτείνεται από τα 11.5 m έως τα 13.5 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 8.0 m (Εικόνα 4.5β).
- Η ανάκλαση Α3 ξεκινάει από τα ~3ns. Ένα μέρος των πολλαπλών ανακλάσεων φθάνει μέχρι τα 15 ns και ένα άλλο συνεχίζει μέχρι τα 40 ns. Παρ' όλο που κοντά στην επιφάνεια φαίνεται να προέρχεται από έναν ανακλαστήρα, στη πορεία μοιάζει να χωρίζεται (Εικόνα 4.5α). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β εκτείνεται από τα 26.0 έως τα 30.0 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Δ-Α εκτείνεται από τα 12.0 μέχρι τα 14.5 m.
- Η ανάκλαση Γ1 ξεκινάει από τα ~3ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~17ns ή 0.3 m - 1.0 m από την επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 4.5γ). Αποτελεί μέρος τού ίδιου ανακλαστήρα που προκάλεσε την ανάκλαση Α1. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται περίπου στα 2.0 m (Εικόνα 4.5β).
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει από τα ~3ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~10ns όπου και εξασθενούν (Εικόνα 4.5γ). Παρόλο που φαίνεται να συνεχίζουν βαθύτερα, δεν παρουσιάζονται στις τομές που ακολουθούν. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β ξεκινάει στα 4.0 m και σταματάει στα 5.5 m (Εικόνα 4.5β).
- Η ανάκλαση Γ3 ξεκινάει από τα ~5ns, και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 15ns και έπειτα εξασθενούν. (Εικόνα 4.5γ). Βρίσκεται πολύ κοντά στο

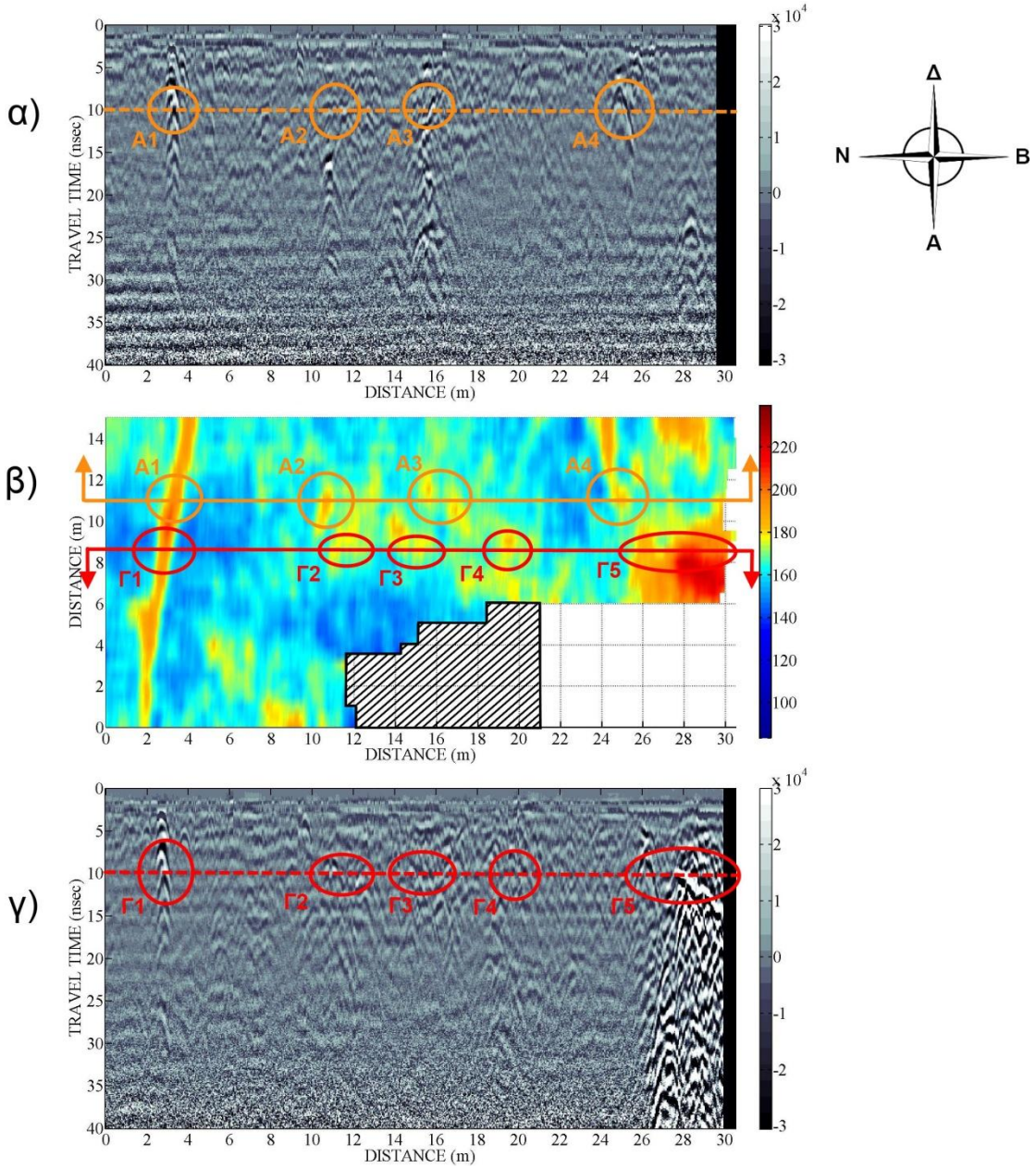
σκάμμα και πιθανόν να αποτελεί συνέχεια του. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 10.0m.



Εικόνα 4.5: Ανατολικά του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Ν-Β. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 12.5m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 5ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 8.0m.

Στην εικόνα 4.6 διακρίνονται οι παρακάτω ανακλάσεις για την οριζόντια τομή των 10 ns, και κατά μήκος των γραμμών διασκόπησης στα 3.0 και 12.5 m:

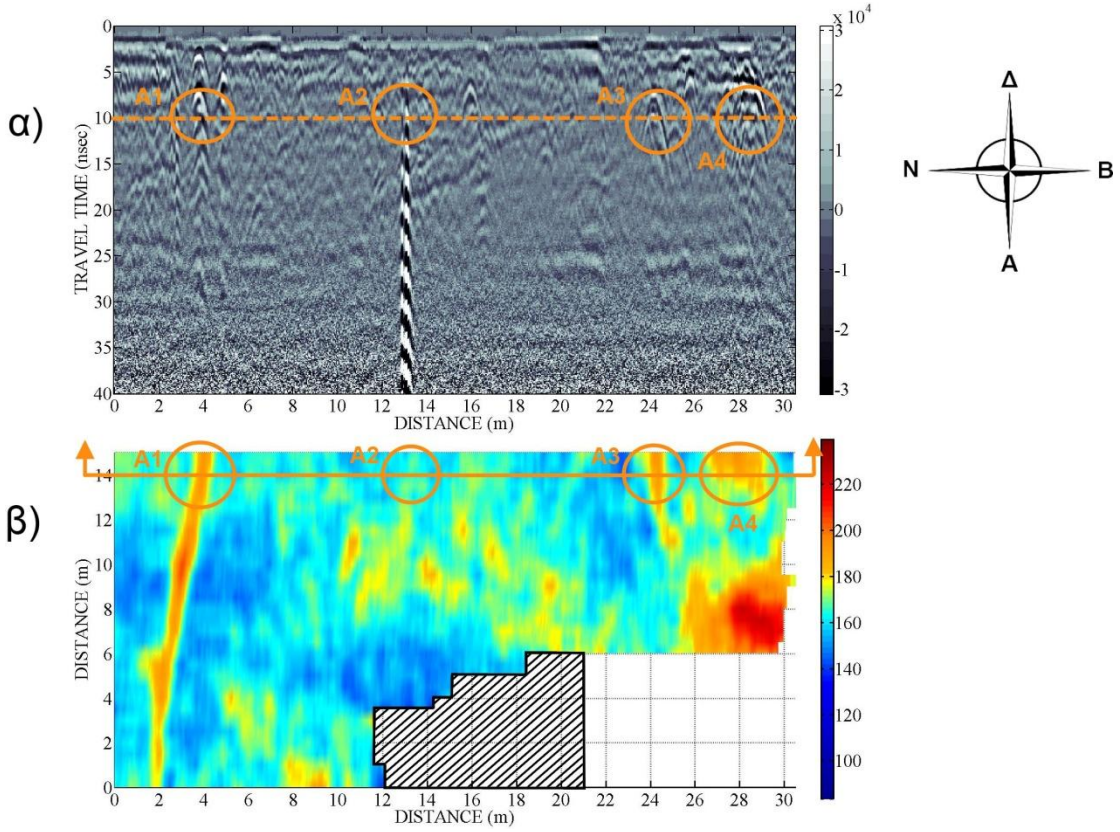
- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~3ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~20ns (Εικόνα 4.6α). Βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 0.2 m περίπου και εκτείνεται έως τα 1.2 m. Και αυτή η ανάκλαση αποτελεί μέρος του ανακλαστήρα που εκτείνεται σχεδόν κατά μήκος της οριζόντιας τομής (εικόνα 4.6β). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 3.0 m (Εικόνα 4.6β).
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα ~10ns ή 0.6 m και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns ή 1.8 m, όπου και εξασθενούν, (Εικόνα 4.6α). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α εκτείνεται από τα 10.0 m έως τα 11.5 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 11.0 m (Εικόνα 4.6β).
- Η ανάκλαση Α3 ξεκινάει από τα ~8ns ή 0.5 m και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~35ns ή ~2.1 m. (Εικόνα 4.6α). Στην εικόνα 4.6β παρουσιάζεται σαν δύο ξεχωριστές ανακλάσεις.
- Η ανάκλαση Α4 φαίνεται να συνδέεται με την ανάκλαση Α3 της εικόνας 4.5β. Στην τομή γεωραντάρ (εικόνα 4.6α) ξεκινάει από τα 5ns ή 0.3 m και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι και τα 15ns, όπου εξασθενούν.
- Η ανάκλαση Γ1 παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την ανάκλαση Α1 της εικόνας 4.5α και τις ανακλάσεις Α1 και Γ1 της εικόνας 4.5. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται περίπου στα 2.5 m (Εικόνα 4.6).
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει από τα ~8ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~20ns όπου και εξασθενούν (Εικόνα 4.6γ). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β ξεκινάει στα 11.0 m και σταματάει στα 12.5 m (Εικόνα 4.6β).
- Η ανάκλαση Γ3 παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την Γ2. Ξεκινάει από το ίδιο βάθος, στο 0.5 m και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 1.2 m (Εικόνα 4.5γ). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β φαίνεται να ξεκινάει στα 14.5 m και σταματάει στα 16.0m.
- Η ανάκλαση Γ4: ξεκινάει από τα ~5ns αλλά οι πολλαπλές ανακλάσεις της δεν είναι ξεκάθαρο μέχρι που εκτείνονται. (Εικόνα 4.6γ). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 19.5 m (Εικόνα 4.6β).
- Η ανάκλαση Γ5: οφείλεται στην τρίκλιτη δεξαμενή. Ξεκινάει από τα 5ns ή 0.3 m και οι πολλαπλές ανακλάσεις που διακρίνονται ξεπερνάνε τα 40 ns, καθώς η δεξαμενή εκτείνεται σε μεγαλύτερο βάθος από αυτό τον 2.4 m που παρουσιάζει η τομή γεωραντάρ.



Εικόνα 4.6: Ανατολικά του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Ν-Β. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 11.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 10ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 8.5m

Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζονται τέσσερις ακόμα ανακλάσεις για την οριζόντια τομή των 10 ns ή 0.6 m.

- Η ανάκλαση Α1 οφείλεται στον ίδιο ανακλαστήρα με τις ανωμαλίες Α1 και Γ1 της εικόνας 4.6 και έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά (Εικόνα 4.7α).
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα 10ns (εικόνα 4.7α) αλλά δεν παρουσιάζεται στην οριζόντια τομή. Πιθανότατα να οφείλεται σε σφάλμα κατά τη μέτρηση.
- Η ανάκλαση Α3 ξεκινάει από τα ~8ns ή 0.5 m και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~15ns ή ~1.0 m. (Εικόνα 4.7α). Στην οριζόντια τομή εμφανίζεται εντονότερα (Εικόνα 4.7β).
- Η ανάκλαση Α4 ξεκινάει από τα 5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 20 ns όπου και εξασθενούν (εικόνα 4.7α). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β ξεκινάει από τα 26.0 m και εκτείνεται μέχρι τα 29.0 m, ενώ κατά τη διεύθυνση Α-Δ φαίνεται να ξεκινάει από τα 12.5 m και ξεπερνάει τα όρια του κανάβου διασκόπησης.



Εικόνα 4.7 Ανατολικά του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμής διασκόπησης Ν-Β. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 14.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 10ns.

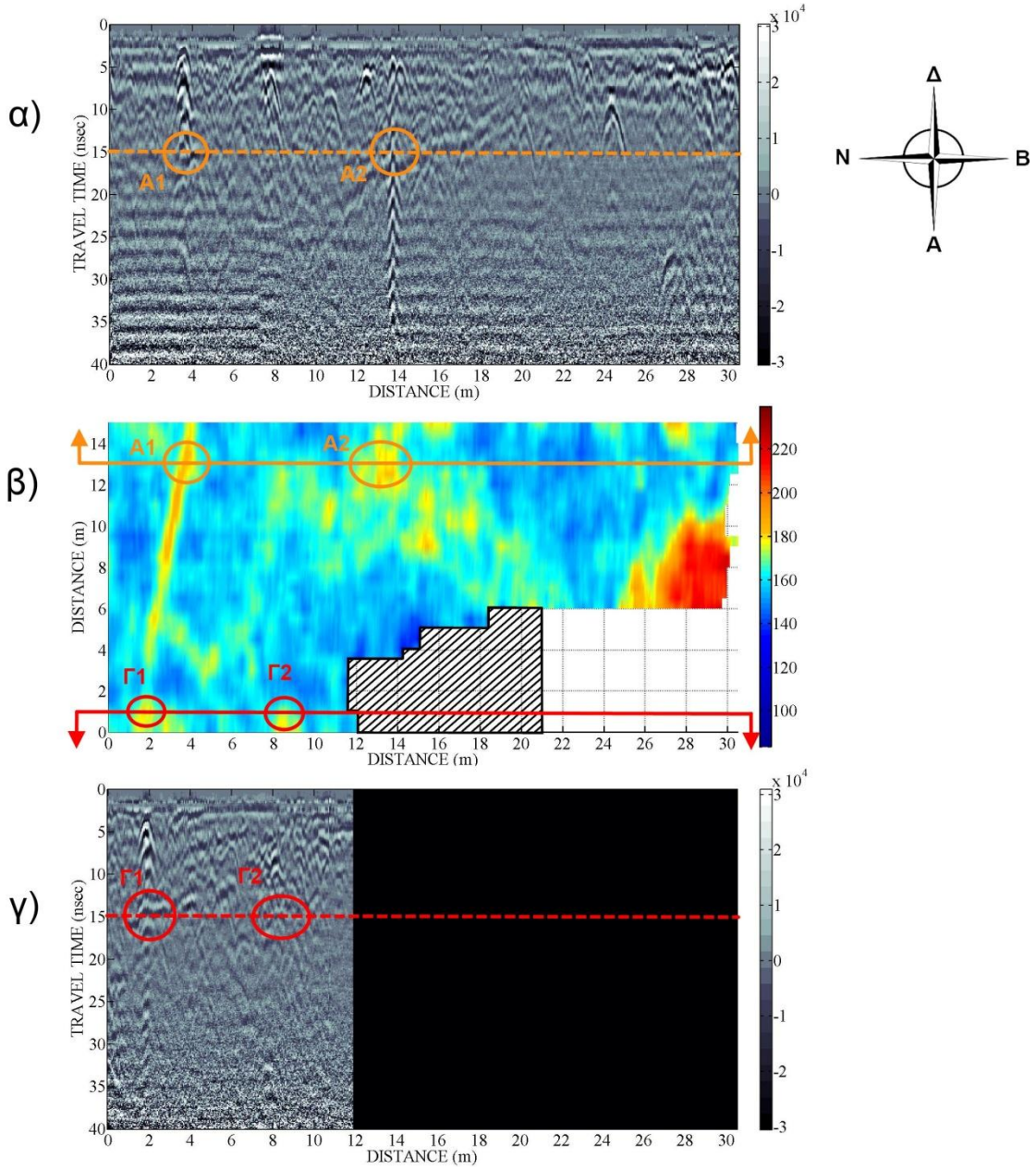
Στην εικόνα 4.8 παρουσιάζονται οι ανακλάσεις του εδάφους για τις γραμμές διασκόπησης στα 1.0 και 13.0 m (4.8γ και 4.8α αντίστοιχα) σε βάθος που αντιστοιχεί στα 0.9 m ή σε διπλό χρόνο καταγραφής 15 ns. Από τις εικόνες 4.8α και 4.8β παρατηρούνται οι παρακάτω ανακλάσεις:

- Η ανάκλαση Α1 αποτελεί μέρος του ίδιου γραμμικού ανακλαστήρα που παρατηρήθηκε στις προηγούμενες εικόνες και εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά. Δηλαδή ξεκινάει από τα ~3ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~20ns, ή από τα 0.2 m μέχρι τα 1.2 m. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 4.0 m.
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~35ns, δηλαδή από 0.2 έως τα 2.1 m βάθος (Εικόνα 4.8α). Επειδή δεν παρατηρείται σε καμία άλλη τομή της περιοχής, πιθανότατα οφείλεται σε σφάλμα κατά τη μέτρηση.

Αντίστοιχα συνδυάζοντας τις εικόνες 4.8β και 4.8γ οι σημαντικότερες ανακλάσεις είναι:

- Η ανάκλαση Γ1: ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 5 ns (0.30 m) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns (1.8 m) αλλά αρκετά εξασθενισμένες. Και αυτή η ανάκλαση οφείλεται στον γραμμικό ανακλαστήρα που παρουσιάζεται στην περιοχή.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει από τα 5 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 15 ns. Η συγκεκριμένη ανωμαλία παρουσιάζεται και στις προηγούμενες οριζόντιες τομές. Αλλά επειδή βρίσκεται στα όρια του κανάβου διασκόπησης δεν είναι γνωστά τα όρια της.

Παρατηρείται ότι σε αυτό το βάθος διασκόπησης, δηλαδή στο 1.0 m από την επιφάνεια του εδάφους, ο αριθμός των ανακλάσεων μειώνεται σημαντικά. Διακρίνονται τρεις ομάδες ανακλάσεων οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε αρχαία. Η πρώτη είναι η γραμμική αυτή συνέχεια που εκτείνεται σε όλο το μήκος του κανάβου κατά τη διεύθυνση Α-Δ. Η δεύτερη ομάδα τοποθετείται στη μέση του κανάβου, από τα 10.0 m μέχρι τα 22.0 m κατά τη διεύθυνση Ν-Β. Δεν υπάρχει κάποια ξεκάθαρη σχέση μεταξύ τους, όμως στην εικόνες 4.5β - 4.8β φαίνεται να συνεχίζουν από το σκάμμα όπου έχουν εντοπιστεί αρχαία θεμέλια. Πιθανόν να οφείλονται σε στρώμα καταστροφής. Τέλος η τρίτη ομάδα που παρατηρείται σε όλες τις οριζόντιες τομές (και σε αυτές που θα ακολουθήσουν) οφείλεται στην τρίκλιτη δεξαμενή.

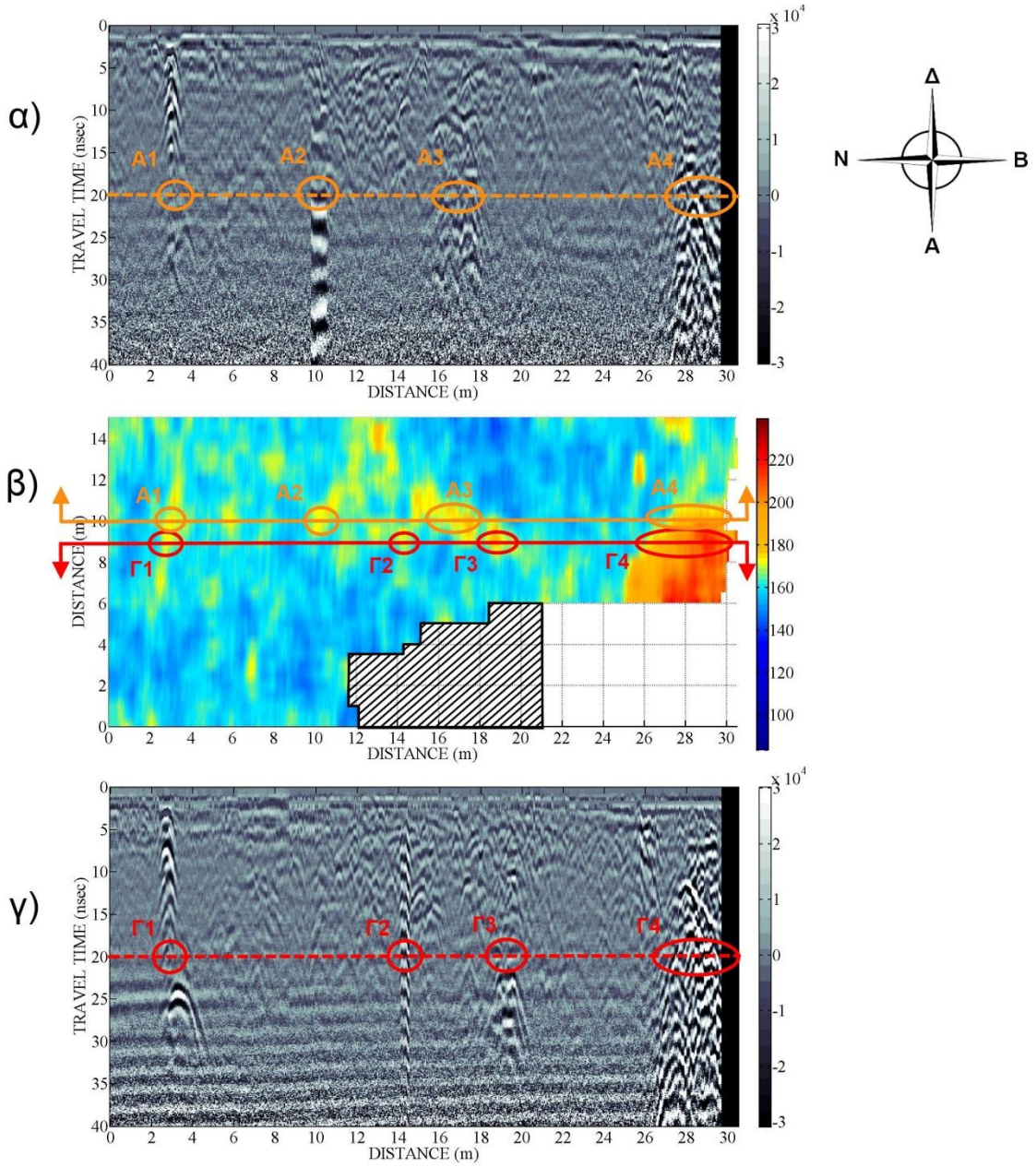


Εικόνα 4.8: Ανατολικά του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Ν-Β. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 13.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 1.0m.

Η εικόνα 4.9 εστιάζει στις ανακλάσεις των τριών ομάδων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Συνδυάζονται οι γραμμές διασκόπησης στα 9.0 m και 10.0 m με την οριζόντια τομή των 20ns που αντιστοιχεί στο βάθος των 1.2m :

- Η ανάκλαση Α1 ορίζει το τέλος του γραμμικού ανακλαστήρα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.9β.
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα ~5ns ή 0.3 m. Φαίνεται να συνεχίζει βαθύτερα, αλλά λόγω του σφάλματος που εμφανίζεται, δεν είναι ξεκάθαρο που εξασθενούν οι πολλαπλές ανακλάσεις (Εικόνα 4.9α). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 10.0 m (Εικόνα 4.9β).
- Η ανάκλαση Α3 φαίνεται να ξεκινάει στο 1.0 m από την επιφάνεια του εδάφους (20ns) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 1.8 m (30ns). Ίσως πρόκειται για υπόλειμμα τοίχου που βρίσκεται στο στρώμα καταστροφής.
- Η ανάκλαση Α4 οφείλεται στην τρίκλιτη δεξαμενή.
- Η ανάκλαση Γ1 έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την ανάκλαση Α1 της εικόνας 4.9α με μόνη διαφορά ότι είναι πιο έντονη. Μετά το τέλος των πολλαπλών της στα 20 ns ξεκινάει μία νέα ανάκλαση (Εικόνα 4.9γ).
- Η ανάκλαση Γ2 δεν παρουσιάζεται στις προηγούμενες οριζόντιες τομές, παρ 'όλο που φαίνεται ισχυρή, και πιθανόν οφείλεται σε σφάλμα κατά τη μέτρηση (Εικόνα 4.9γ).
- Η ανάκλαση Γ3 ξεκινάει στο βάθος των 1.2 m (20ns) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 2.1 m (35ns) όπου και εξασθενούν (Εικόνα 4.9γ). Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 19.0m.
- Η ανάκλαση Γ4: οφείλεται στην τρίκλιτη δεξαμενή.

Σε αυτό το βάθος (1.2 m) παρουσιάζονται υπολείμματα του γραμμικού ανακλαστήρα που οριοθετούν και το τέλος του. Λόγω των ομοιοτήτων που παρουσίασαν οι πολλαπλές ανακλάσεις κατά το μήκος του, μπορεί να εκτιμηθεί το πάχος του. Τοποθετείται στα 0.3 m από την επιφάνεια του εδάφους και εκτείνεται μέχρι τα 1.2 m. Επομένως το μέσο πάχος του είναι 0.9m. Οι ανακλάσεις που βρίσκονται μεταξύ των 10.0 m και των 20.0 m αρχίζουν να εμφανίζουν μία γραμμικότητα μεταξύ τους, η οποία όμως δεν είναι ξεκάθαρη.



Εικόνα 4.9: Ανατολικά του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Ν-Β. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 10.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 20ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 9.0m

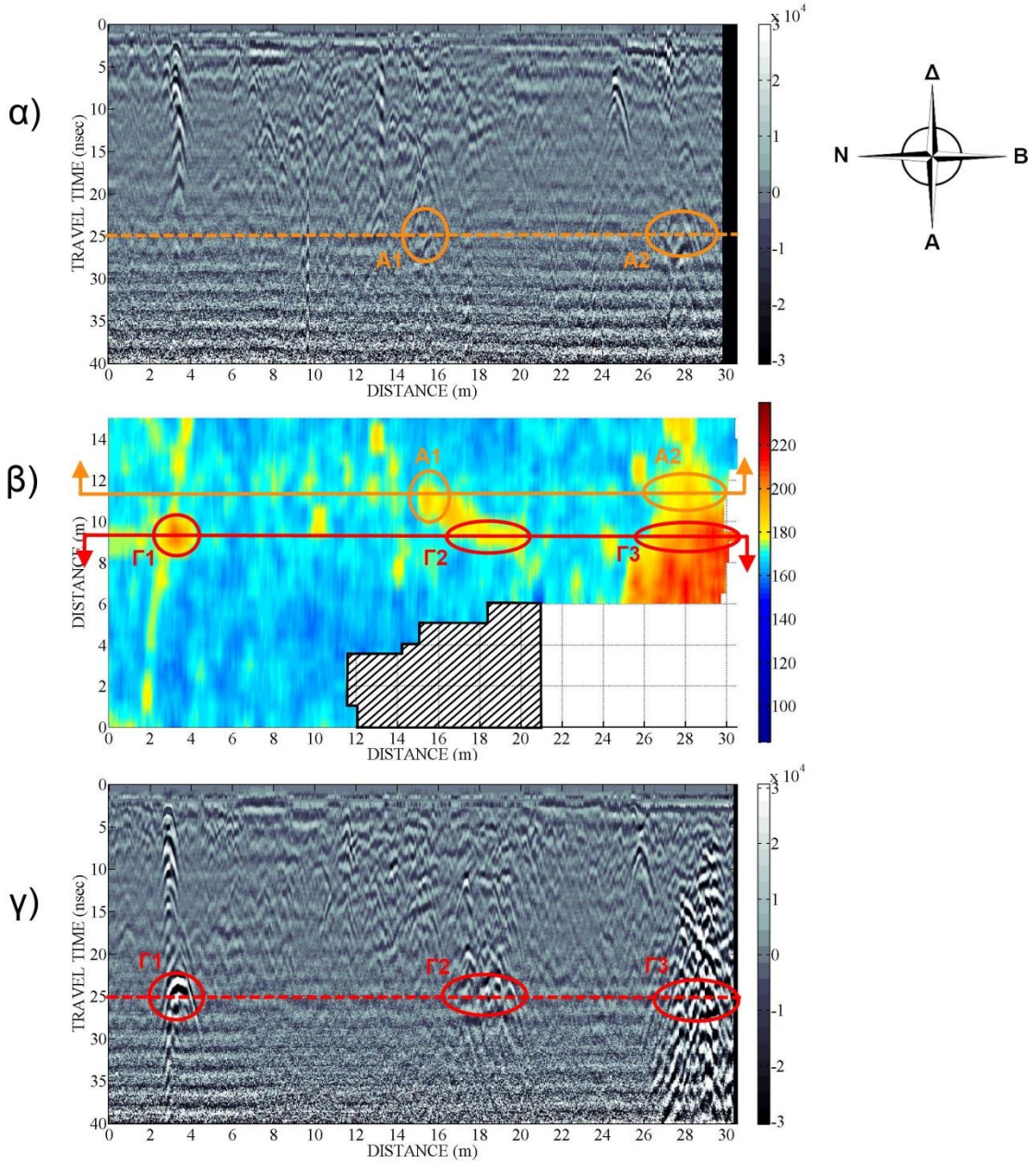
Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζονται οι ανακλάσεις του εδάφους για τις γραμμές δημοσκόπησης στα 9.5 και 11.5 m (4.10γ και 4.10α αντίστοιχα) σε βάθος που αντιστοιχεί στο 1.5 m ή σε διπλό χρόνο καταγραφής 25 ns.

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns, δηλαδή από 0.3 έως τα 1.8 m βάθος (Εικόνα 4.4α). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α ξεκινάει στα 10.5 m και τελειώνει στα 11.5 m. Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται στα 15.5 m (Εικόνα 4.10β).
- Η ανάκλαση Α2 οφείλεται στην τρίκλιτη δεξαμενή. Βρίσκεται στο όριο της και για αυτό παρουσιάζεται εξασθενημένη.

Αντίστοιχα συνδυάζοντας τις εικόνες 4.10β και 4.10γ οι σημαντικότερες ανακλάσεις είναι:

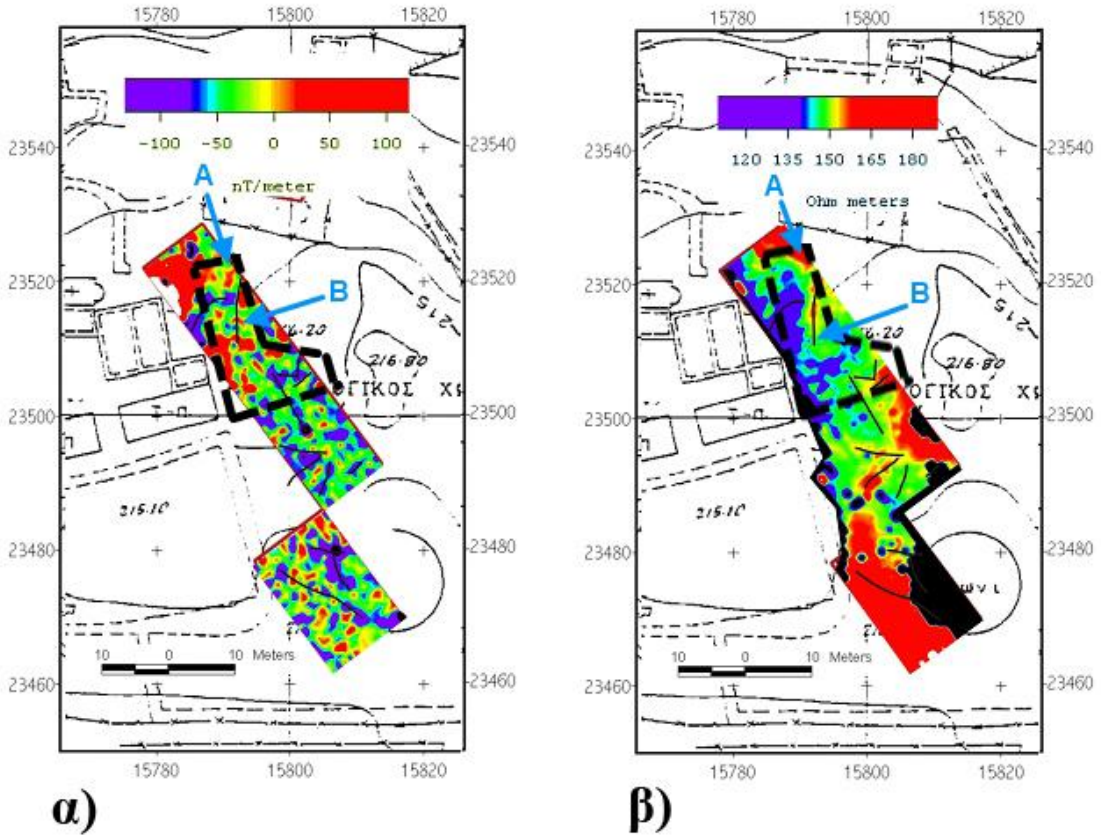
- Η ανάκλαση Γ1 ταυτίζεται με τον γραμμικό ανακλαστήρα που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες τομές, αλλά φαίνεται να δημιουργήθηκε από διαφορετικό ανακλαστήρα. Ξεκινάει από τα 23 ns ή ~1.4 m με τις πολλαπλές ανακλάσεις να εκτείνονται μέχρι βαθύτερα Κατά τη διεύθυνση Ν-Β τοποθετείται περίπου στα 3.0 m.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει στα 20 ns (1.2 m) και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns (1.4 m). Φαίνεται να συνδέεται με τις ανακλάσεις Α1 της εικόνας 4.10α αλλά και με τις ανακλάσεις Α3 και Γ3 της εικόνας 4.9
- Η ανάκλαση Γ3 αποδίδεται στην τρίκλιτη δεξαμενή.

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε αυτό το βάθος, εμφανίζεται στις ανακλάσεις που βρίσκονται μεταξύ των 15.0 m και των 20.0m. Παρουσιάζεται μία γραμμικότητα μεταξύ τους, η οποία κατευθύνεται ΝΔ της τρίκλιτης δεξαμενής, και είναι ίδιας διεύθυνσης με τα ευρήματα που βρίσκονται στο παρακείμενο σκάμμα. Θα μπορούσε να αποδοθεί σε θεμέλια κάποιου αρχαίου κτίσματος, και οι ανακλάσεις που εμφανίζονται ρηχότερα να είναι τα υπολείμματα του. Στην ίδια εικόνα, οριοθετείται το νοτιοδυτικό άκρο της τρίκλιτης δεξαμενής.



Εικόνα 4.10: Ανατολικά του μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Ν-Β. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 11.5m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 25ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 9.5m.

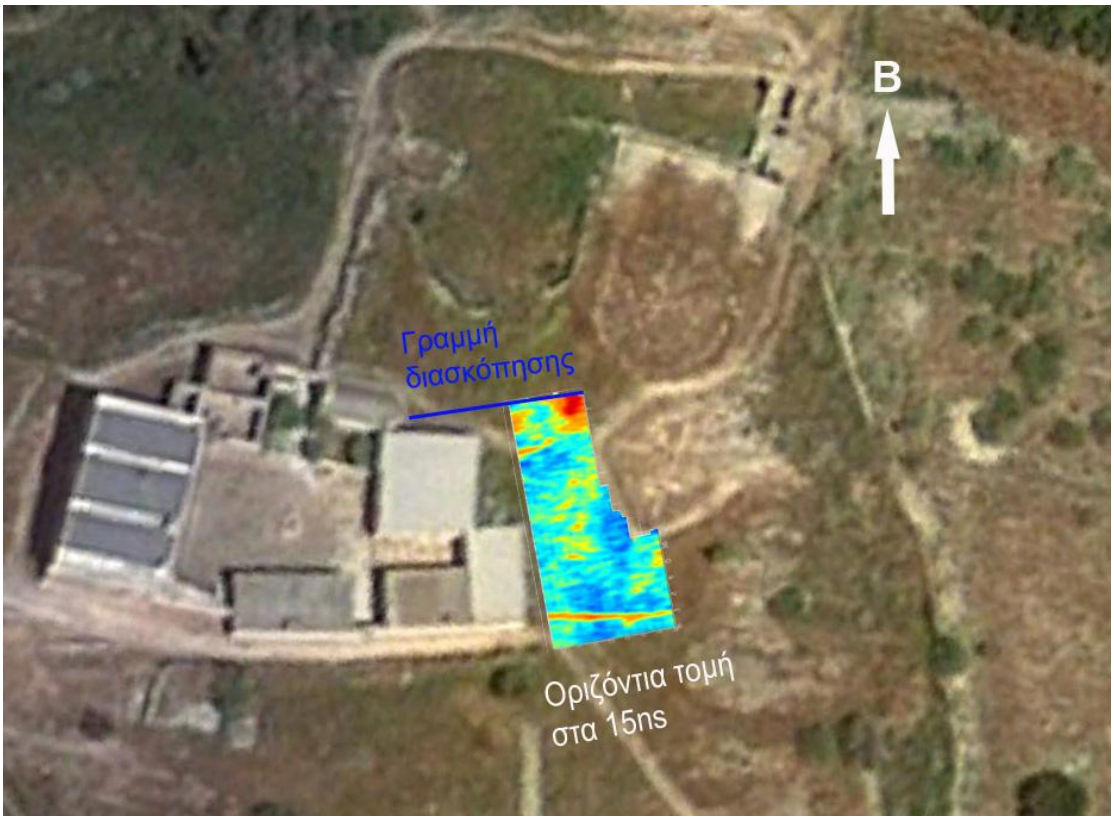
Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε το 2007, στην ίδια περιοχή από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (Βαφείδης, 2007). Χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι μαγνητικής και ηλεκτρικής χαρτογράφησης (Σχήμα 4.1α και 4.1β αντίστοιχα).



Σχήμα 4.1: Μαγνητική και ηλεκτρική χαρτογράφηση για την περιοχή ανατολικά του μοναστηρίου. α) Χάρτης κατακόρυφης βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου της γης, β) χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Βαφείδης, 2007).

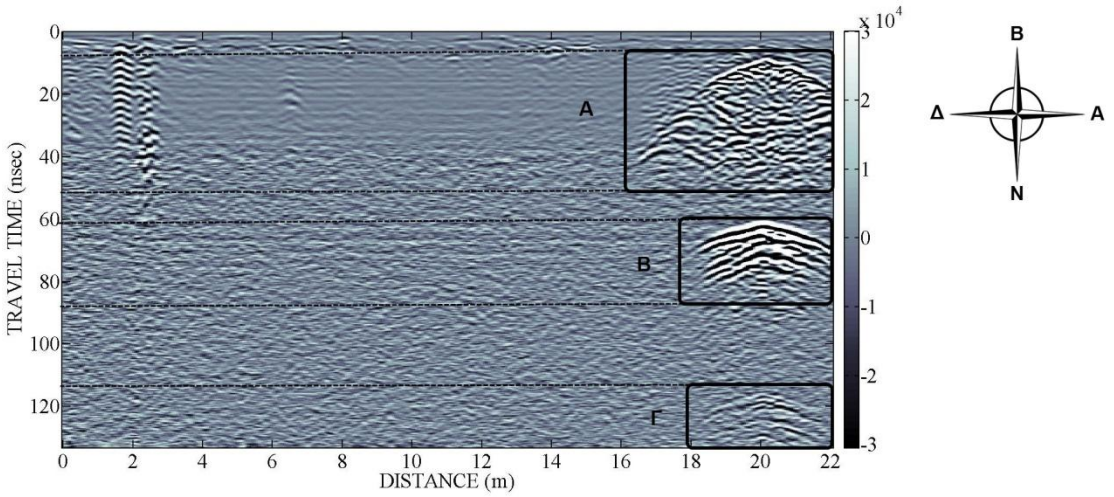
Με την μαύρη διακεκομμένη γραμμή ορίζεται προσεγγιστικά ο κάναβος μελέτης που διασκοπήθηκε με την μέθοδο γεωραντάρ για την ίδια περιοχή και παρουσιάστηκε προηγουμένως. Με την ένδειξη "Α" σημειώνεται η ανωμαλία που παρουσιάζεται και στα δεδομένα γεωραντάρ και πιθανόν οφείλεται στην τρίκλιτη δεξαμενή. Με την ένδειξη "Β" σημειώνεται η ανωμαλία που παρουσιάζεται και στα δεδομένα του γεωραντάρ και πιθανόν οφείλεται σε αρχαία θεμέλια τα οποία συνεχίζουν από το σκάμμα. Ο γραμμικός ανακλαστήρας που παρουσιάστηκε στα δεδομένα του γεωραντάρ, δεν εμφανίζεται σε καμία από τις δύο μεθόδους του σχήματος 4.1.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε μια γραμμή διασκόπησης, μήκους ~22.0 m και διεύθυνσης ~Δ-Α, όπως φαίνεται με μπλέ χρώμα στη δορυφορική εικόνα 4.11. Η τομή παρουσιάζεται στην εικόνα 4.12



Εικόνα 4.11 Δορυφορική εικόνα της περιοχής μελέτης ανατολικά του μοναστηριού. Στην εικόνα έχει προβληθεί η οριζόντια τομή στα 15ns. Με μπλε χρώμα ορίζεται η γραμμή διασκόπησης μήκους 22.0 m και διεύθυνση ~Δ-Α (Google Earth).

Στην τομή της εικόνας 4.12 εμφανίζεται το νοτιοδυτικό όριο της τρίκλιτης δεξαμενής, το οποίο παρουσιάζεται και σε όλες τις οριζόντιες τομές. Οι κενές περιοχές μεταξύ των πολλαπλών ανακλάσεων Α, Β, και Γ υποδηλώνουν την ύπαρξη αέρα. Οι πολλαπλές ανακλάσεις Γ αποτελούν το δάπεδο της δεξαμενής, ενώ οι πολλαπλές ανακλάσεις Α και Β την οροφή της, όπου στο ενδιάμεσο τους υπάρχει κενό. Κατά αυτό τον τρόπο επιβεβαιώνεται ότι η υπόθεση που πραγματοποιήθηκε για την τρίκλιτη δεξαμενή όσο αφορά τις οριζόντιες τομές και τις τομές γεωραντάρ της περιοχής διασκόπησης, είναι σωστή.



Εικόνα 4.12 Γραμμή μελέτης στην περιοχή ανατολικά του μοναστηριού. Η γραμμή έχει μήκος 22.0 m με διεύθυνση ~Δ-Α, Οι ανακλάσεις οφείλονται στην τρίκλιτη δεξαμενή.

4.4 Νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης (Περιοχή Ε)

Στις εικόνες 4.13 μέχρι 4.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διασκόπησης για την περιοχή που βρίσκεται νοτιανατολικά του χώρου στάθμευσης. Η μέση ταχύτητα είναι 0.10 m/ns. Στον χώρο αυτό υπάρχει μία δεξαμενή, γι' αυτό ο κάναβος μελέτης αναπτύχθηκε γύρω από αυτή. Στα αποτελέσματα που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκαν οι οριζόντιες τομές στα 15ns και 35ns ή σε βάθος 0.75 m και 1.75 m αντίστοιχα. Στις οριζόντιες τομές που ακολουθούν, έχει σημειωθεί προσεγγιστικά η θέση της καταπακτής της δεξαμενής.

Εστιάζοντας στις εικόνες 4.13α στα 9.0 m και την 4.13β στα 15ns, διακρίνονται οι παρακάτω ανακλάσεις:

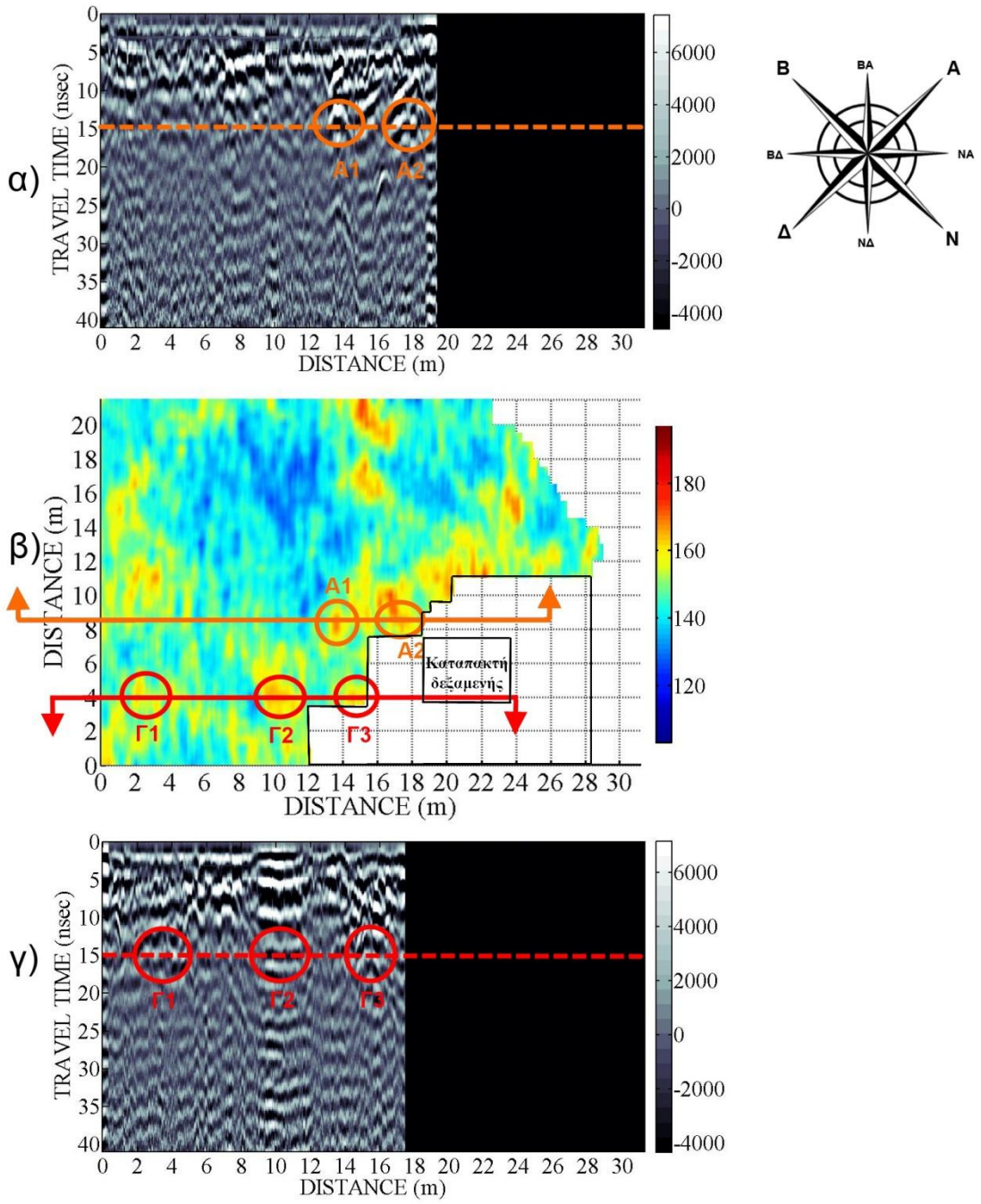
- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~15ns (Εικόνα 4.13α). Βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 25 και εκτείνεται έως τα 0.75 m. ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 14.0 m του κανάβου διασκόπησης (Εικόνα 4.3β).
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα 5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 15ns, δηλαδή από 0.25 έως τα 0.75 m βάθος (Εικόνα 4.13α). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 17.5 m περίπου, ενώ κατά τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ ξεκινάει στα 8.0 m και σταματάει στα 11.0 m (Εικόνα 4.13β).

Αντίστοιχα συνδυάζοντας τις εικόνες 4.13β και 4.13γ οι σημαντικότερες ανακλάσεις είναι:

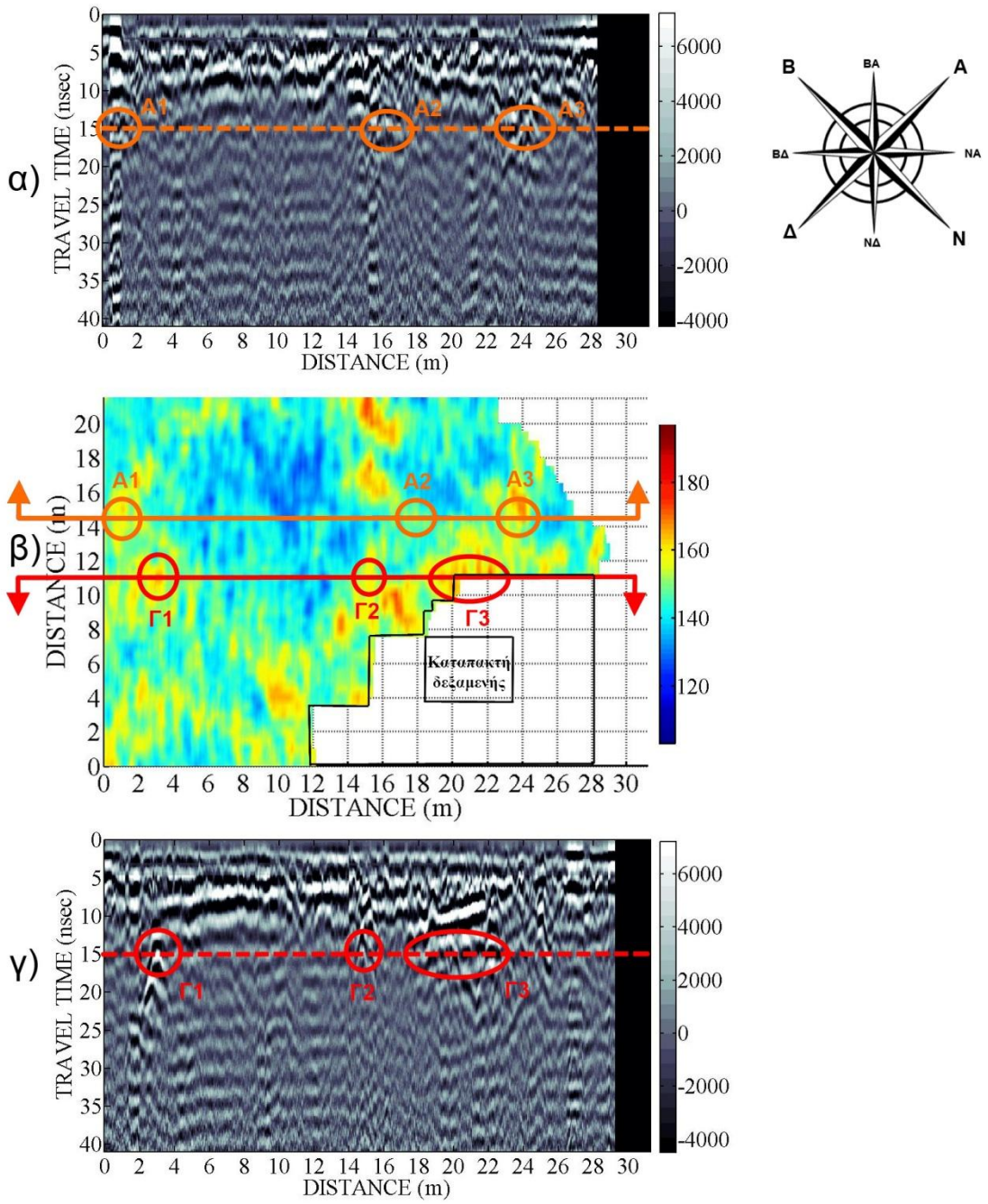
- Η ανάκλαση Γ1 παρόλο που εμφανίζεται εντονότερη συγκριτικά με τις υπόλοιπες στην οριζόντια τομή, δεν παρουσιάζεται στην τομή γεωραντάρ.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει σχεδόν στην επιφάνεια και οι πολλαπλές ανακλάσεις της υπερβαίνουν τα 40 ns που αντιστοιχούν σε 2.0 m βάθος. Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 10.0 m περίπου, ενώ κατά τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ ξεκινάει στα 3.0 m και σταματάει στα 5.0 m (Εικόνα 4.13β).
- Η ανάκλαση Γ3 επίσης ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, αλλά οι πολλαπλές της φαίνεται να εξασθενούν μετά τα 20 ns (Εικόνα 4.13γ). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 15.0 m

Οι ανακλάσεις Α2 και Γ3 βρίσκονται πολύ κοντά στη δεξαμενή. Επειδή η τελευταία είναι σφραγισμένη, δεν είναι γνωστά τα όρια της. Στην ίδια οριζόντια τομή (15 ns) παρατηρούνται η ακόλουθες ανακλάσεις, για τις γραμμές διασκόπησης στα 11.0 και 15.5 m (Εικόνα 4.14):

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει σχεδόν από την επιφάνεια και οι πολλαπλές ανακλάσεις ξεπερνούν τα 40ns (Εικόνα 4.14α). Είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται σε σφάλμα κατά τη μέτρηση και όχι σε κάποιο θαμμένο στόχο.
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα 5ns και και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 15ns, δηλαδή από 0.25 έως τα 0.75 m βάθος (Εικόνα 4.14α). Είναι μικρής εντάσεως και δεν παρουσιάζεται στην οριζόντια τομή.
- Η ανάκλαση Α3 ξεκινάει από τα 13 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 20ns (Εικόνα 4.13α). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 24.0 m .
- Η ανάκλαση Γ1 ξεκινάει από τα 13 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 23ns. τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 3.0 m περίπου.
- Η ανάκλαση Γ2 είναι μικρής εντάσεως, και παρόλο που φαίνεται να ενώνεται με άλλες ισχυρότερες ανωμαλίες, στην τομή γεωραντάρ δεν παρουσιάζεται κάτι τέτοιο (Εικόνα 4.14γ).
- Η ανάκλαση Γ3 ξεκινάει στα ~7ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 20ns όπου και εξασθενούν (Εικόνα 4.14γ). Επειδή βρίσκεται πολύ κοντά στη δεξαμενή, είναι πολύ πιθανό να οφείλεται σε αυτή.



Εικόνα 4.13: Νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 8.5m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 4.0m.



Εικόνα 4.14: Νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 15.5m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 11.0m.

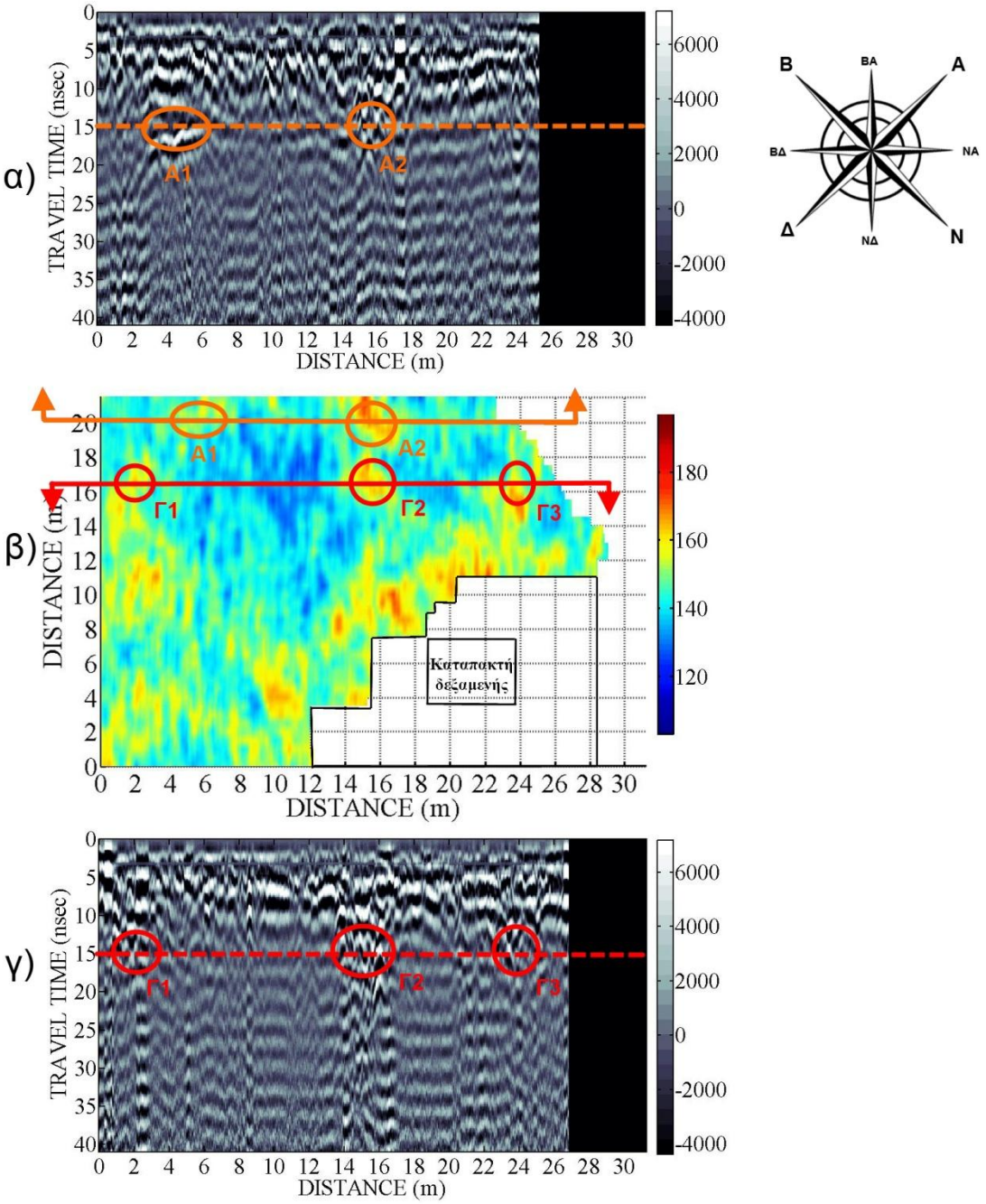
Για την ίδια οριζόντια τομή στα 15 ns και την γραμμή διασκόπησης στα 20.0 m, διακρίνονται οι παρακάτω ανακλάσεις:

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα 15ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~20ns. Επειδή είναι χαμηλής εντάσεως, δεν φαίνεται στην οριζόντια τομή. Κατά τη ΒΔ-ΝΑ παρουσιάζεται από τα 4.0 έως τα 6.0 m του κανάβου διασκόπησης (Εικόνα 4.15α).
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 20ns, δηλαδή από 0.25 έως το 1.0 m βάθος (Εικόνα 4.15α). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 16.0 m, ενώ κατά τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ ξεκινάει στα 18.5 m και σταματάει στο όριο το κανάβου (Εικόνα 4.15β).

Αντίστοιχα από τις εικόνες 4.15β και 4.15γ οι ανακλάσεις που παρατηρούνται είναι:

- Η ανάκλαση Γ1 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~15ns (Εικόνα 4.15α). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 2.0 m. Το βάθος που απαντάται είναι στα 0.25 m, πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~40 ns που αντιστοιχούν σε 2.0 m βάθος. Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 16.0 m, ενώ κατά τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ ξεκινάει στα 16.0 m και σταματάει στα 17.5 m (Εικόνα 4.15β).
- Η ανάκλαση Γ3 επίσης ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 5ns, αλλά μετά τα 15ns οι πολλαπλές ανακλάσεις εξασθενούν (Εικόνα 4.15γ). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 24.0 m

Στην συγκεκριμένη οριζόντια τομή παρουσιάζονται πολλές ανακλάσεις, αλλά στη πλειοψηφία τους είναι μικρής εντάσεως και δεν μπορούν να συνδεθούν με την δεξαμενή που υπάρχει. Όσο αφορά τη διάταξη τους στο χώρο, μπορούν να γίνουν πολλά σενάρια αλλά με αβεβαιότητα. Στις εικόνες που ακλουθούν (Εικόνα 4.16 και Εικόνα 4.17) παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του υπεδάφους για τον διπλό χρόνο διαδρομής 35ns που αντιστοιχεί σε βάθος 1.75 m.



Εικόνα 4.15: Νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 20.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 16.5m

Στην εικόνα 4.16α παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του υπεδάφους στα 35 ns, η οποία αντιστοιχεί στα 2.1 m. Πάνω της προβάλλονται οι γραμμές διασκόπησης στο 1.0 m και στα 3.0 m . Οι ανακλάσεις που παρατηρούνται είναι οι ακόλουθες:

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα 22ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 40ns (Εικόνα 4.16α). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα ~3.5 m.
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει επίσης από τα ~22ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 40ns όπως συμβαίνει και με την ανάκλαση Α1 της ίδιας τομής (Εικόνα 4.16α). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 6.0 m (Εικόνα 4.15β).

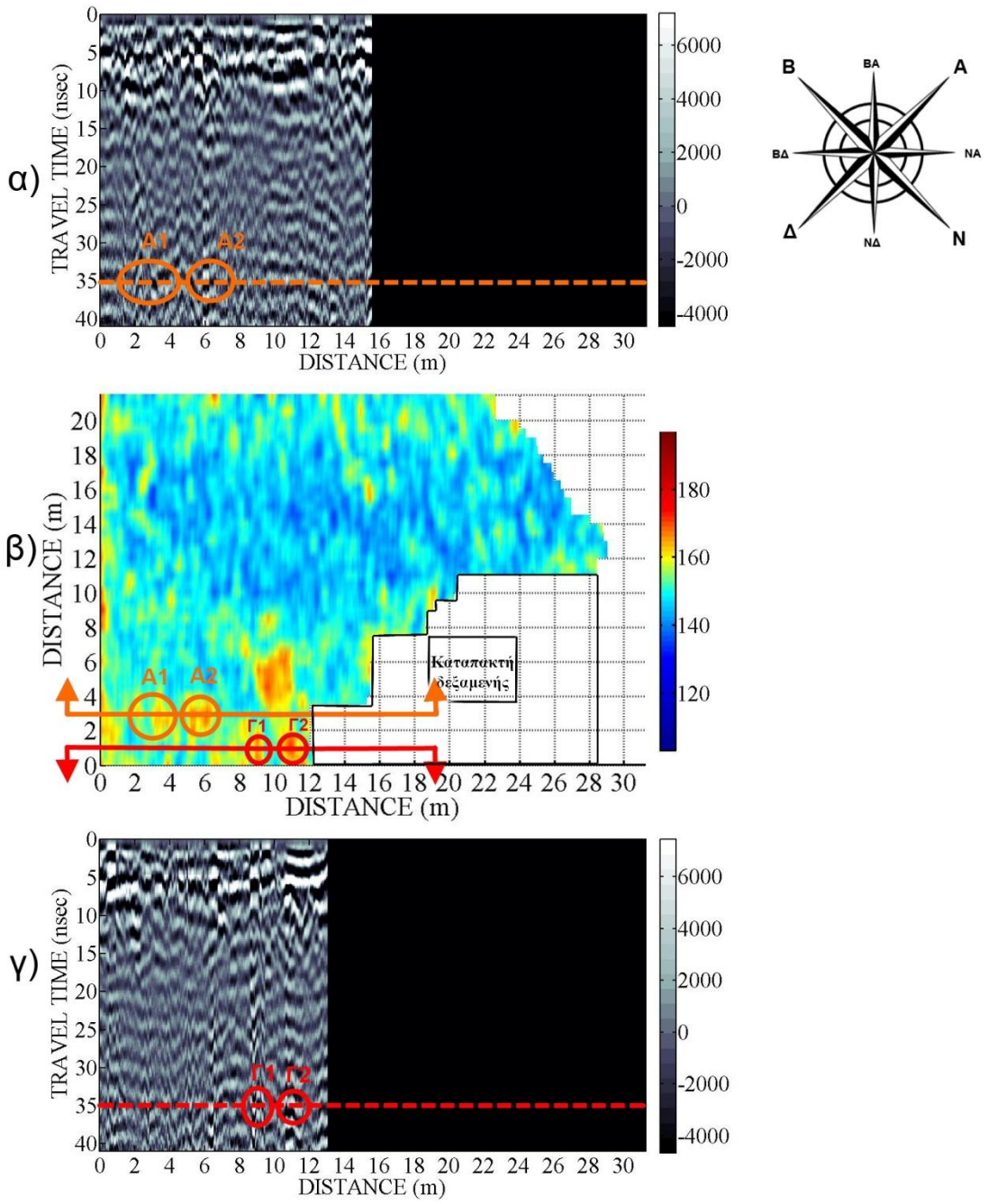
Αντίστοιχα από τις εικόνες 4.16β και 4.16γ οι ανακλάσεις που παρατηρούνται είναι:

- Η ανάκλαση Γ1 ξεκινάει από τα και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~35ns (Εικόνα 4.16γ). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 9.5 m.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει από τα ~15ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~40 ns που αντιστοιχούν στα 2.0 m βάθος. Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 11.0 m.

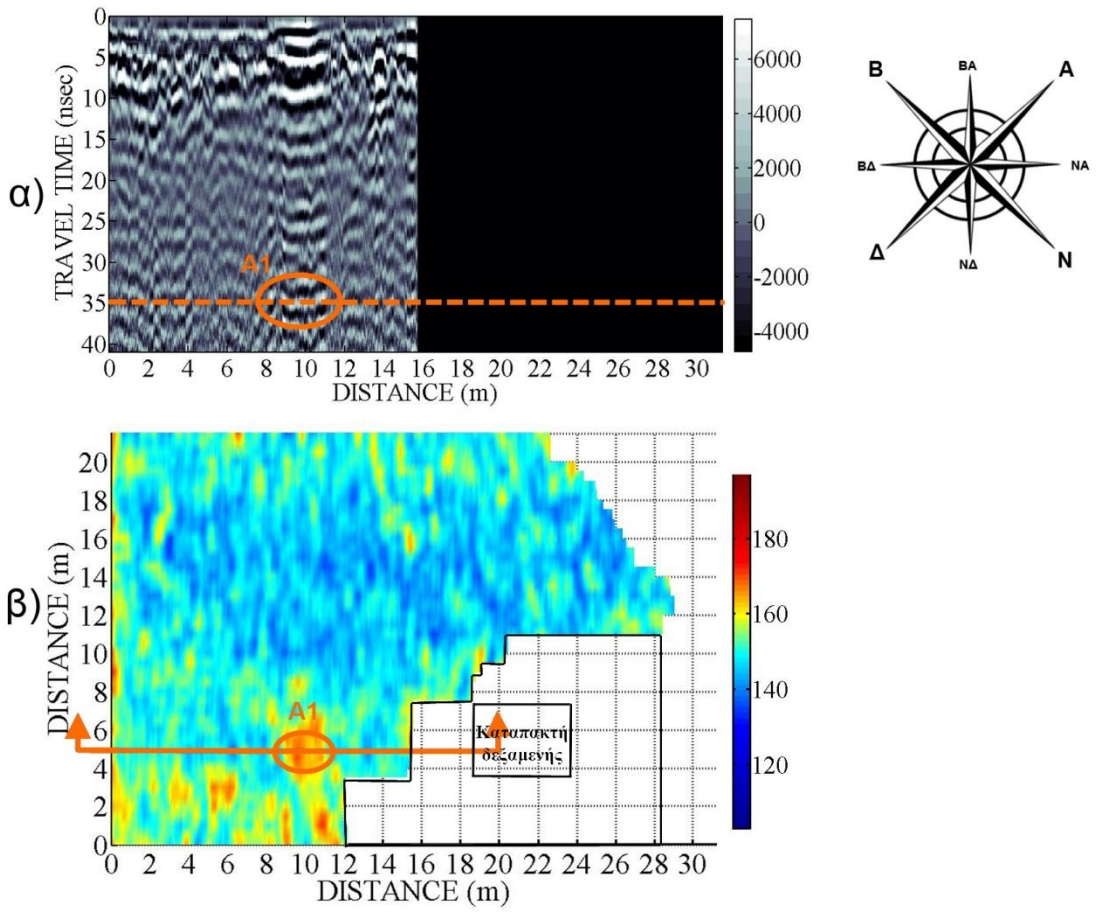
Τέλος, για την ίδια οριζόντια τομή (35ns), παρατηρείται ακόμα μία ανάκλαση, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.17.

- Η ανάκλαση Γ1 φαίνεται να ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 2.0 m (40ns) (Εικόνα 4.17γ). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ εμφανίζεται από τα 9.0 m έως τα 11.0 m. Κατά τη διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ ξεκινάει από τα 4.0m και εκτείνεται μέχρι τα ~7.0 m.

Και σε αυτό το βάθος η διάταξη των ανωμαλιών στο χώρο, δεν οδηγούν σε κάποιο συμπέρασμα όσον αφορά το τι μπορεί να τις προκάλεσε. Ίσως να οφείλονται σε στρώμα καταστροφής .



Εικόνα 4.16: Νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 3.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 35ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 1.0m



Εικόνα 4.17: Νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης. Προσανατολισμός γραμμής Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 5.0 m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 35ns.

4.5 Νοτιοδυτικά του χώρου στάθμευσης (Περιοχή W)

Στην εικόνα 4.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διασκόπηση στην περιοχή που βρίσκεται νοτιοδυτικά του χώρου στάθμευσης. Η μέση ταχύτητα είναι 0.10 m/ns. Η εικόνα 4.18β αποτελεί την οριζόντια τομή του υπεδάφους για διπλό χρόνο διαδρομής στα 15ns, ή στο βάθος των 0.75m. Πάνω στην οριζόντια τομή προβάλλονται οι γραμμές διασκόπησης στα 12.5 m και στο 1.5 m του κανάβου μελέτης (Εικόνα 4.18α και 4.18γ αντίστοιχα).

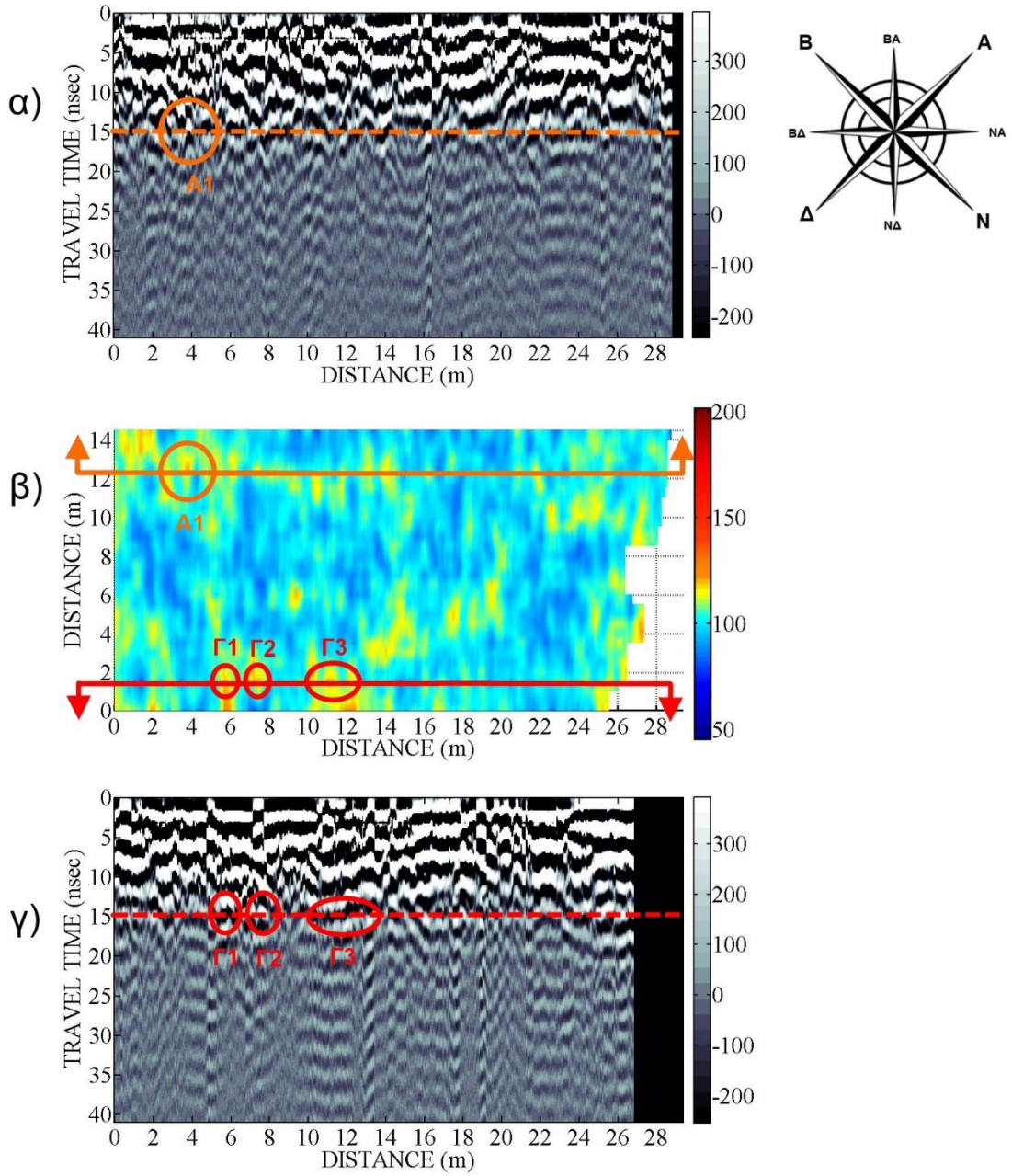
Συνδυάζοντας την οριζόντια τομή και την τομή γεωραντάρ στα 12.5m παρατηρούνται οι παρακάτω ανακλάσεις:

- Η ανάκλαση Α1 παρουσιάζεται ενδεικτικά, καθώς φαίνεται να είναι μέρος μιας γραμμικής συνέχειας ανωμαλιών όπως φαίνεται στην οριζόντια τομή. Οι ανωμαλίες αυτές παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.18α. Όσο αφορά την ανάκλαση Α1, οι πολλαπλές ανακλάσεις φαίνεται να ξεκινούν πολύ κοντά στην επιφάνεια και διακρίνονται μέχρι τα ~17ns, απ' όπου και συνεχίζουν εξασθενημένες. Κατά τη ΒΔ-ΝΑ τοποθετούνται στα 4.0 m του κανάβου διασκόπησης.

Αντίστοιχα από την οριζόντια τομή στον ίδιο χρόνο και τη γραμμή διασκόπησης στο 1.5 m, εμφανίζονται οι παρακάτω ανακλάσεις:

- Η ανάκλαση Γ1 ξεκινάει από τα ~7 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 17ns. Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 6.0 m περίπου.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει από τα ~7 ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 40ns αλλά εξασθενημένες. Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται στα 7.5 m περίπου. Στον χρόνο των ~7ns φαίνεται να είναι ενιαία με την ανάκλαση Γ1 της ίδιας εικόνας, αλλά στην πορεία χωρίζονται και συνεχίζει σε μεγαλύτερο βάθος.
- Η ανάκλαση Γ3 ξεκινάει στα 5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 15ns όπου εξασθενούν και έπειτα συνεχίζουν μέχρι τα 40ns (Εικόνα 4.18γ). Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται από τα 10.0 m έως τα 12.0 m.

Οι ανακλάσεις που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη περιοχή, δεν οδηγούν σε κάποιο συμπέρασμα για το που μπορεί να οφείλονται. Επίσης, δεν υπάρχει κάποια σύνδεση των ανακλάσεων που εμφανίζονται μεταξύ των οριζόντιων τομών. Σε κάθε βάθος παρουσιάζονται διαφορετικές ανακλάσεις που δεν μπορούν να συσχετισθούν με αυτές που βρίσκονται ρηχότερα ή βαθύτερα. Οι υπόλοιπες οριζόντιες και εγκάρσιες τομές επισυνάπτονται στα παραρτήματα Α και Β.



Εικόνα 4.18: Νοτιοδυτικά του χώρου στάθμευσης. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 12.5m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 1.5m.

4.5 Δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής (Περιοχή Τ)

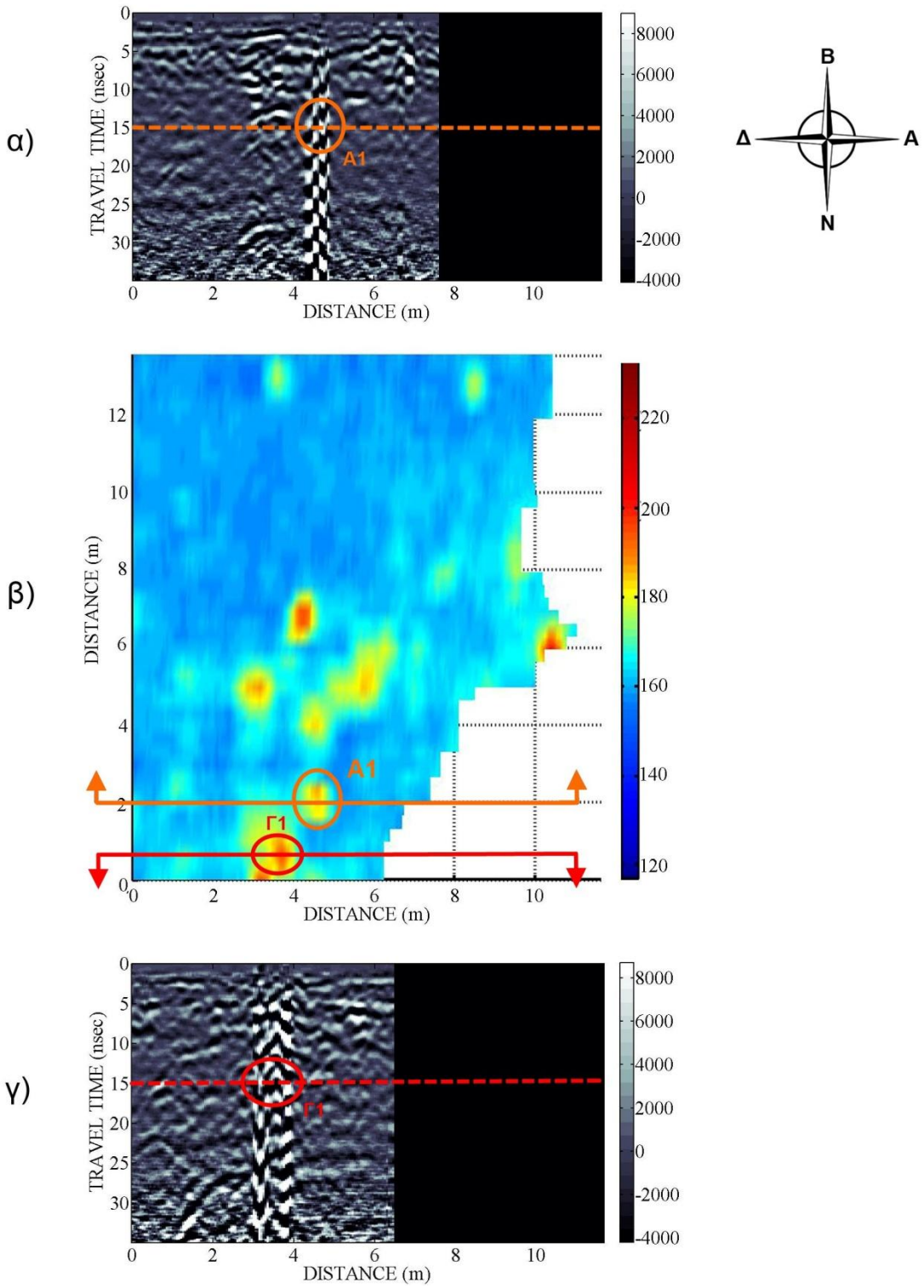
Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 4.19 έως Εικόνα 4.22) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης του υπεδάφους για την περιοχή που βρίσκεται δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η οριζόντια τομή των 15ns. Έχοντας υπολογίσει τη μέση ταχύτητα στα 0.09 m/ns, προκύπτει ότι τα 15ns αντιστοιχούν στο βάθος των 0.7 m περίπου.

Ξεκινώντας με την εικόνα 4.19, παρατηρούνται οι ακόλουθες ανακλάσεις:

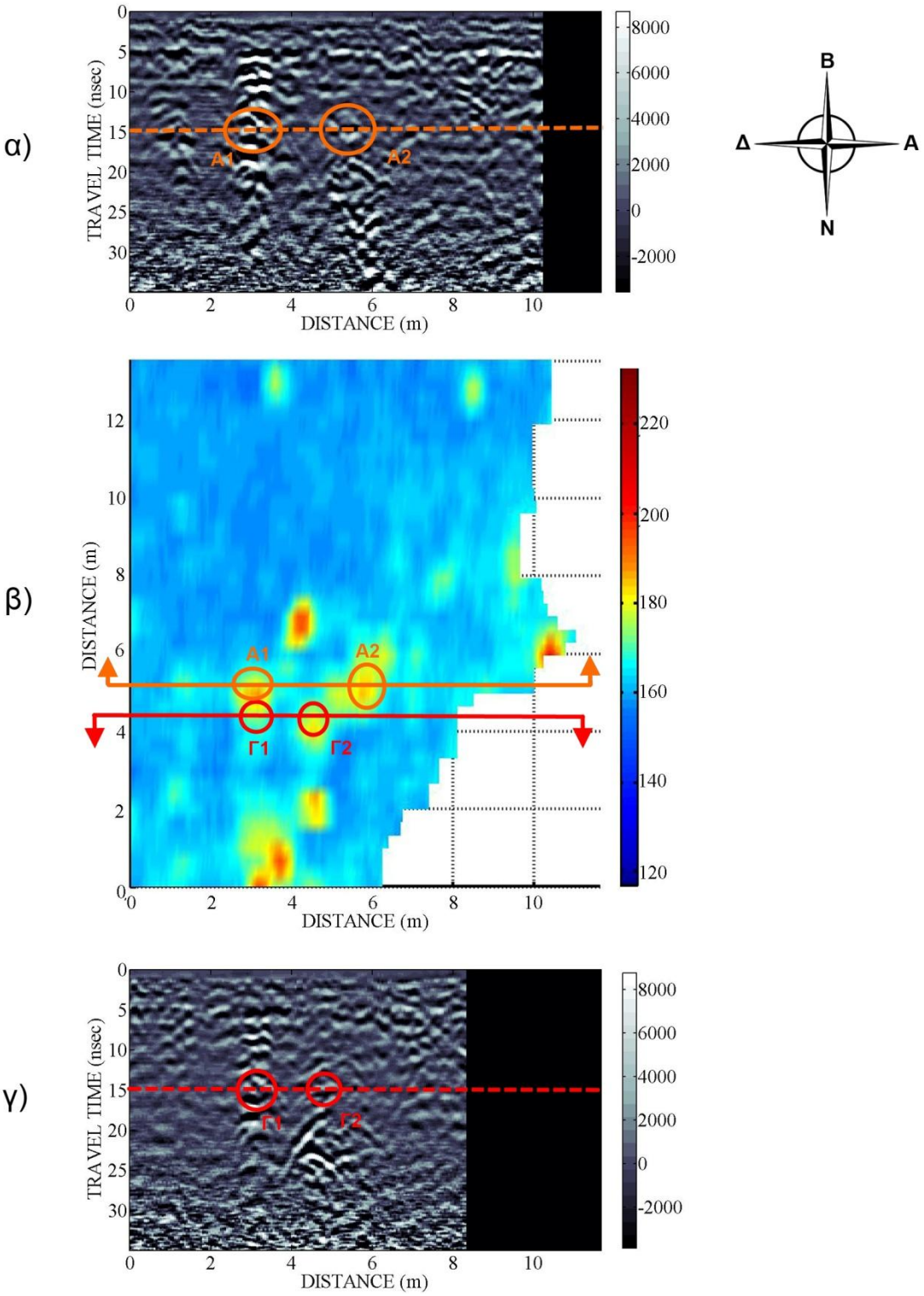
- Η ανάκλαση Α1 της γραμμής διασκόπησης των 1.98 m, ξεκινάει από τα 5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~40ns. Δηλαδή ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 20 cm περίπου και συνεχίζει μέχρι τα 1.8 m. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 4.7 m περίπου. Στην εγκάρσια τομή (Εικόνα 4.19α) μεταξύ των 2.5 και 4.0 m περίπου, παρουσιάζεται μία ανωμαλία η οποία ξεκινά από τα 5ns, οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~17ns, στην συνέχεια εξασθενούν και έπειτα συνεχίζουν από 27 μέχρι τα 40ns. Η παραπάνω ανάκλαση δεν παρουσιάζεται στην οριζόντια τομή των 15ns.
- Η ανάκλαση Γ1 της γραμμής διασκόπησης των 0.66 m, ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~40ns, δηλαδή από 0.2 έως τα 1.8 m βάθος. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 4.7 m περίπου.

Συνεχίζοντας στην εικόνα 4.20 για την ίδια οριζόντια τομή παρατηρούνται η ακόλουθες ανακλάσεις:

- Η ανάκλαση Α1 της γραμμής διασκόπησης των 5.28 m, ξεκινάει από τα 5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~30ns. Δηλαδή από τα 0.2 m έως τα 1.35 m από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 3.0 m του κανάβου διασκόπησης.
- Η ανάκλαση Α2 ξεκινάει από τα 15ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 40ns, δηλαδή από 0.20 έως τα 1.8 m βάθος (Εικόνα 4.18α). Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 5.7 m περίπου.
- Η ανάκλαση Γ1 της γραμμής διασκόπησης των 4.29 m, ταυτίζεται με την ανάκλαση Α1 της γραμμής διασκόπησης των 5.28m.
- Η ανάκλαση Γ2 ξεκινάει από τα ~15ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~27 ns, δηλαδή από ~0.7 έως 1.2 m βάθος. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 4.5 m περίπου.



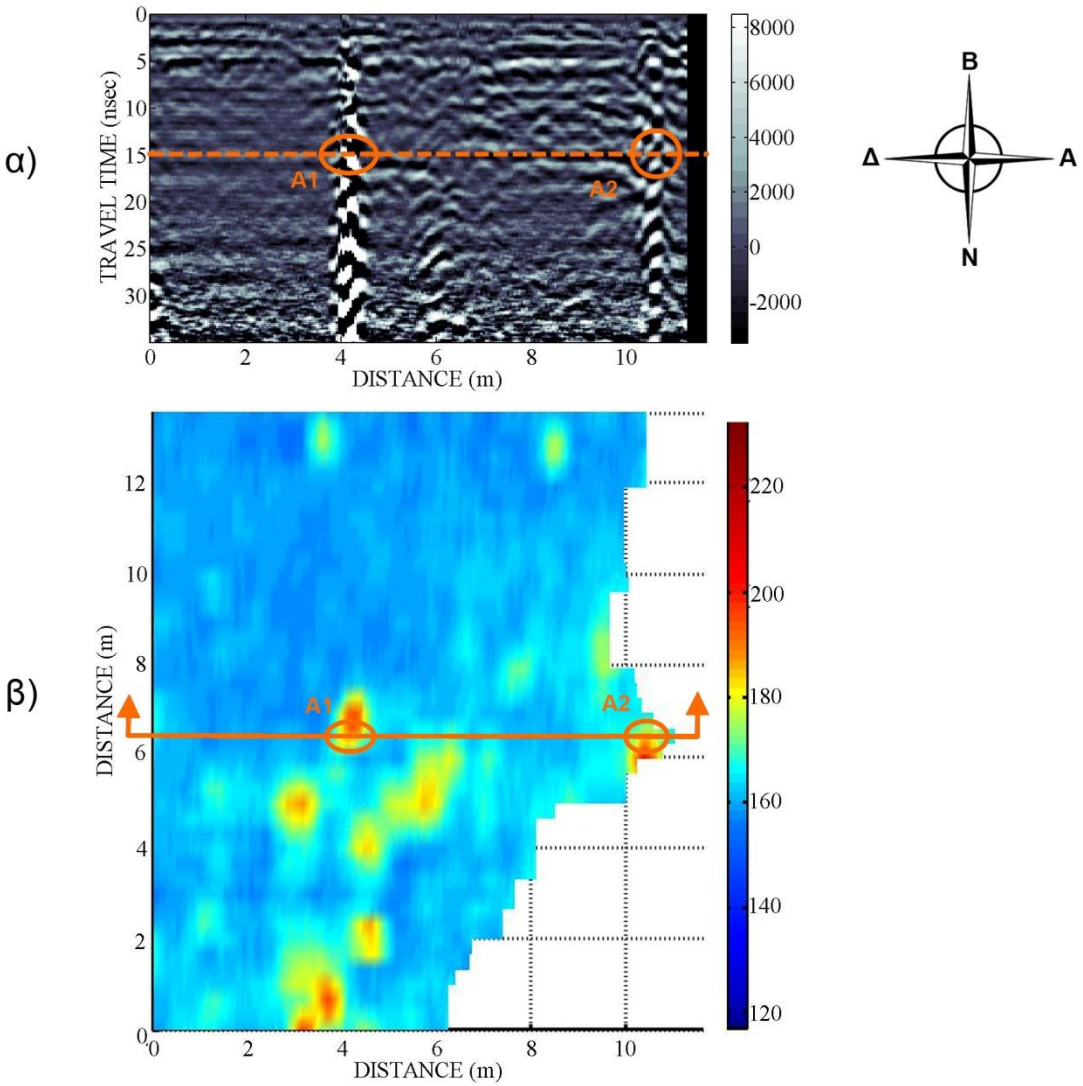
Εικόνα 4.19: Δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 1.98m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 0.66m.



Εικόνα 4.20: Δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 5.28m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 4.29m.

Τέλος, στην εικόνα 4.21 για την ίδια οριζόντια τομή (15ns) οι ανακλάσεις που παρατηρούνται είναι:

- Η ανάκλαση Α1 ξεκινάει από τα ~3ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~40ns. Δηλαδή από τα ~0.13 m έως τα 1.8 m από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 3.0 m του κανάβου διασκόπησης.
- Η ανάκλαση Α2 παρουσιάζει ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με την ανάκλαση Α1 της ίδιας τομής. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 10.5 m περίπου.



Εικόνα 4.21: Δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής. Προσανατολισμός γραμμής Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 6.6 m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns.

4.6 Λουτρά

Σε αυτή την περιοχή, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκαν δύο κάναβοι διασκόπησης, ο L και ο K (βλ. Εικόνα 3.8). Η μέση ταχύτητα υπολογίσθηκε στα 0.10 m/ns Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

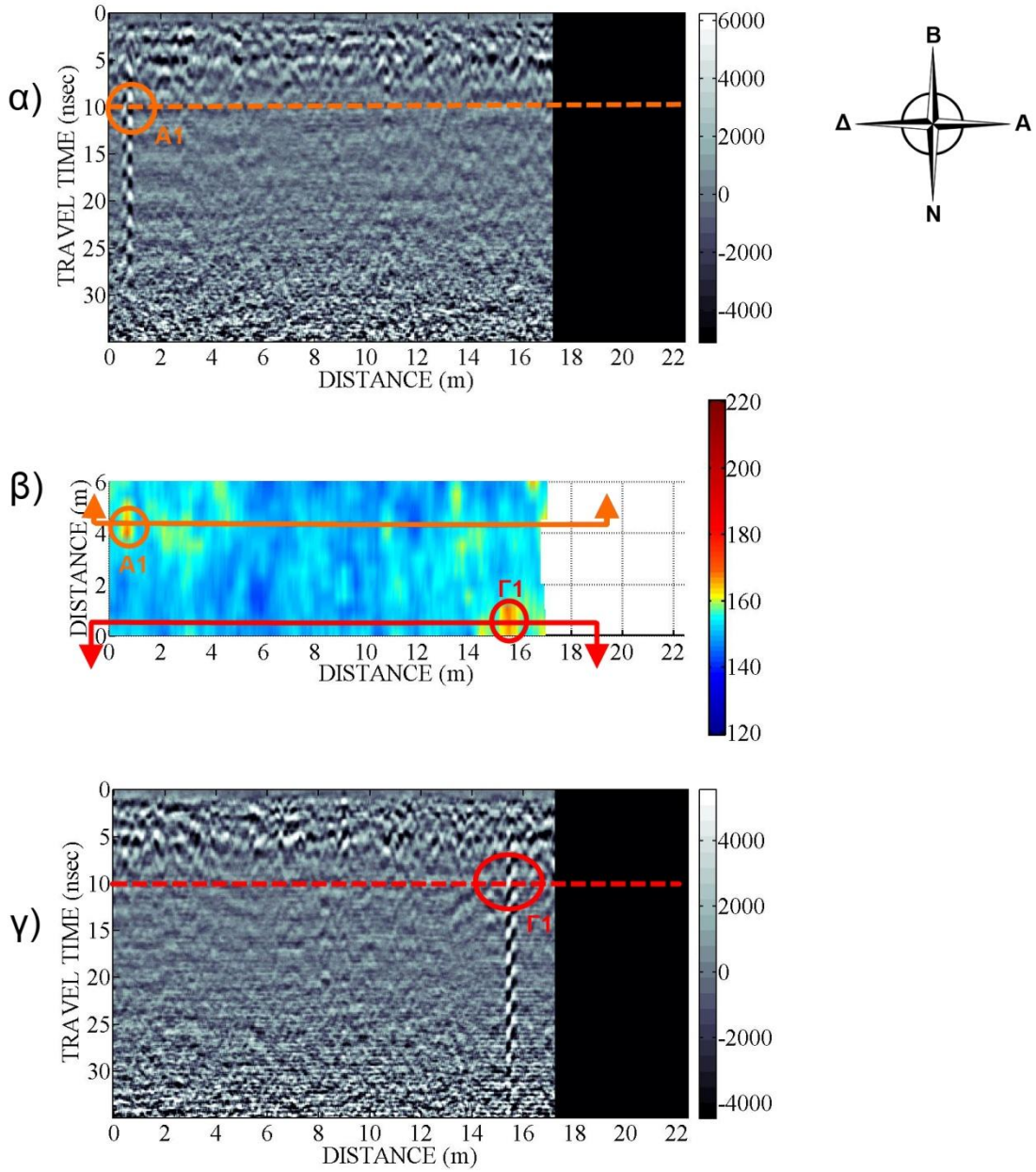
4.6.1 Κάναβος L

Στον συγκεκριμένο κάναβο δεν παρουσιάστηκε κανένα ενδιαφέρον από πλευράς ανακλάσεων. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η εικόνα 4.22, όπου φαίνεται η οριζόντια τομή των 10ns και δύο γραμμές διασκόπησης στο 0.5 m και στα 4.5 m. Εμφανίζονται δύο ανακλάσεις για την κάθε γραμμή:

- Η ανάκλαση Α1 της γραμμής διασκόπησης στα 4.5 m, ξεκινάει από τα 5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 30ns. Δηλαδή ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 25 cm περίπου και συνεχίζει μέχρι το 1.5 m. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στο 0.5 m περίπου. Λόγω της μορφής της, είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται σε σφάλμα κατά τη μέτρηση.
- Η ανάκλαση Γ1 της γραμμής διασκόπησης στο 0.5 m, ξεκινάει από τα ~5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα ~40ns, δηλαδή από 0.25 έως τα 2.0 m βάθος. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 15.7 m περίπου. Παρατηρείται ότι μοιάζει αρκετά με την ανάκλαση Α1 της ίδιας εικόνας. Είναι πολύ πιθανό να οφείλεται και αυτή σε σφάλμα.

4.6.2 Κάναβος K

Ο κάναβος K αποτελεί επέκταση του κάναβου L προς τα δυτικά (βλ. Εικόνα 3.8). Τα αποτελέσματα της διασκόπησης παρουσιάζονται στις εικόνες 4.23 με 4.24.



Εικόνα 4.22: Κάναβος L. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 4.5m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 10ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 0.5m.

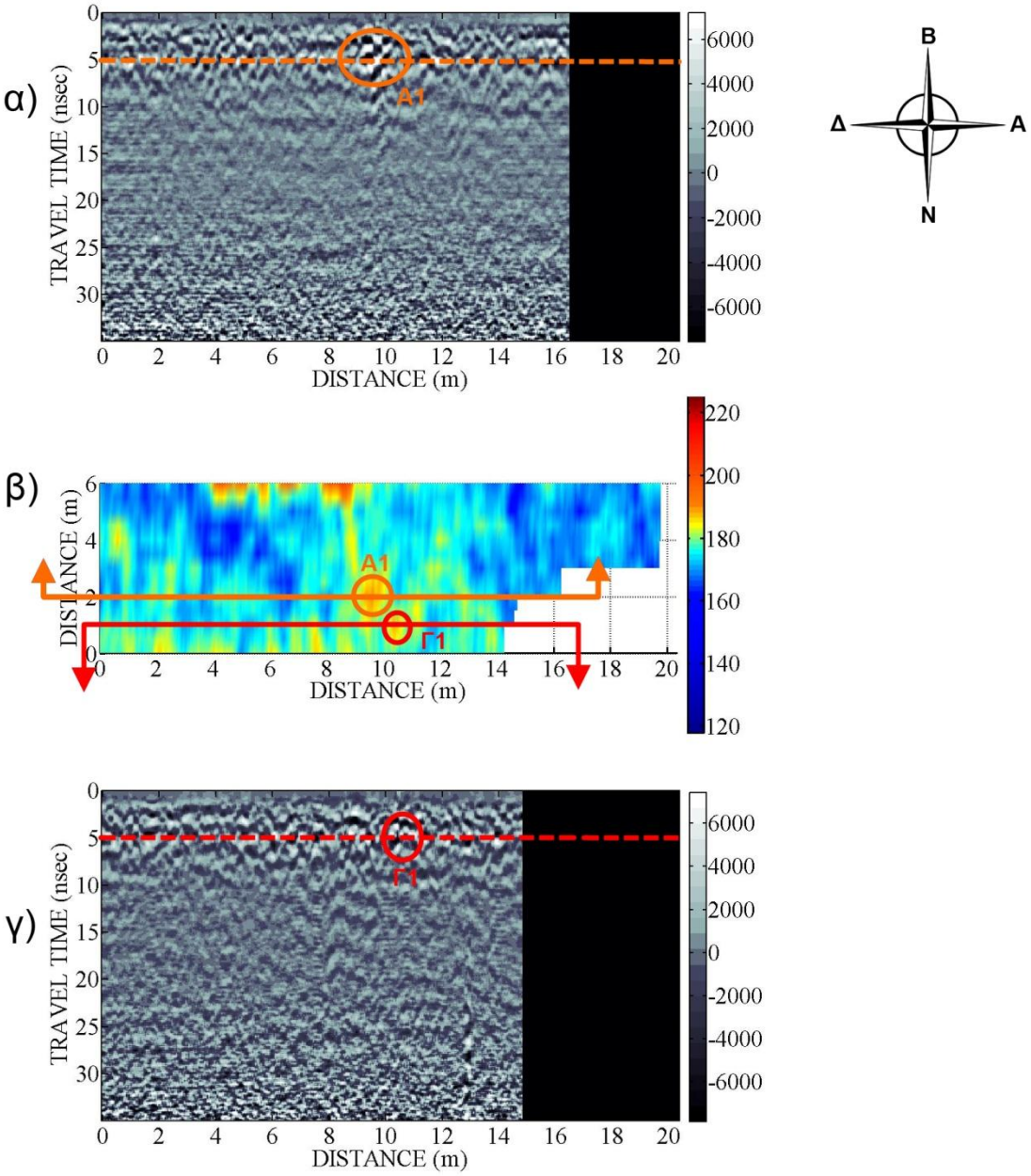
Η εικόνα 4.23, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της μελέτης για την οριζόντια τομή των 5ns. Πάνω της προβάλλονται δύο γραμμές διασκόπησης, στο 1.0 m και στα 2.0 m. Οι ανακλάσεις για την κάθε γραμμή:

- Η ανάκλαση Α1 της γραμμής διασκόπησης στα 2.0 m, ξεκινάει από τα 2ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 10ns, όπου και εξασθενούν. Παρουσιάζεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 10 cm και συνεχίζει μέχρι το 0.5 m. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται περίπου στα 10.0 m περίπου.
- Η ανάκλαση Γ1 της γραμμής διασκόπησης στο 1.5 m, παρουσιάζεται στα 5ns. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 10.5 m περίπου.

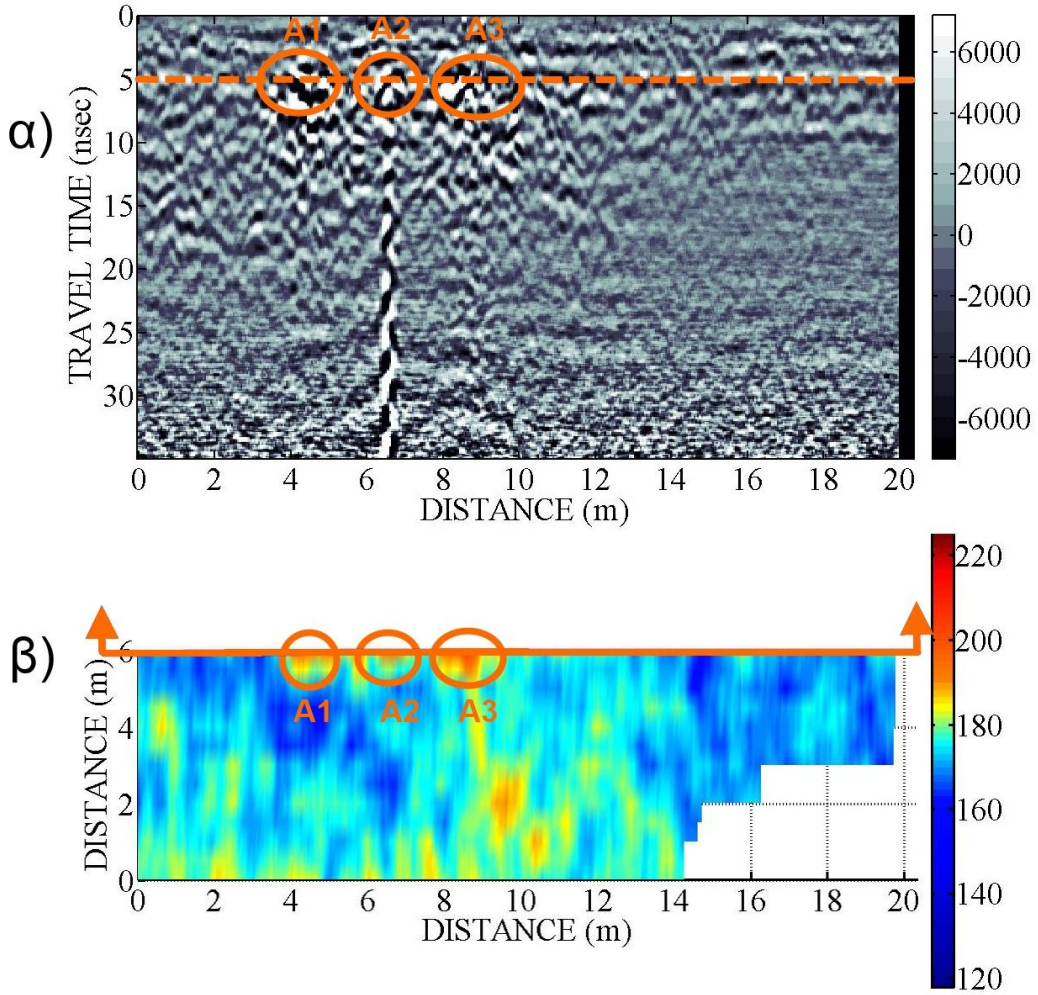
Παρόλο που στην οριζόντια τομή οι ανακλάσεις παρουσιάζονται έντονες, οι πολλαπλές τους δεν εκτείνονται σημαντικά ως προς το βάθος, και δεν μπορούν να αποδοθούν σε αρχαία. Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζεται ακόμα μία τομή για το ίδιο βάθος:

- Οι ανακλάσεις Α1, Α2, Α3 που παρουσιάζονται στη γραμμή διασκόπησης των 6.0 m, οφείλονται σε φυσικό κοίλωμα το οποίο εκτεινόταν κατά μήκος του κανάβου. και οριοθετεί το τέλος του κατά τη διεύθυνση Δ-Α. Παρόλο που οι πολλαπλές ανακλάσεις της Α2 φαίνεται να συνεχίζουν σε βάθος, δεν μπορεί να αποδοθεί σε θαμμένο αρχαίο όπως π.χ. τοίχο.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα για την περιοχή των λουτρών, δεν υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη αρχαίων ευρημάτων. Η σκόρπιες ανωμαλίες που παρουσιάζονται στον κάναβο Κ μπορεί να οφείλονται σε ασβεστολιθικά πετρώματα, που δεν έχουν σχέση με τη λίθο δόμησης των οικοδομημάτων της περιοχής καθώς το βάθος που παρουσίασε το μεγαλύτερο ενδιαφέρον βρίσκεται μόλις στα 25 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Επιπλέον, οι οριζόντιες τομές σε μεγαλύτερα βάθη δεν παρουσίασαν κανέναν ενδιαφέρον.



Εικόνα 4.23: Κάναβος Κ. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 2.0m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 5ns, γ) τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 1.0m.



Εικόνα 4.24: Κάναβος Κ. Γραμμή διασκόπησης με προσανατολισμό Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στα 6.0 m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 5ns.

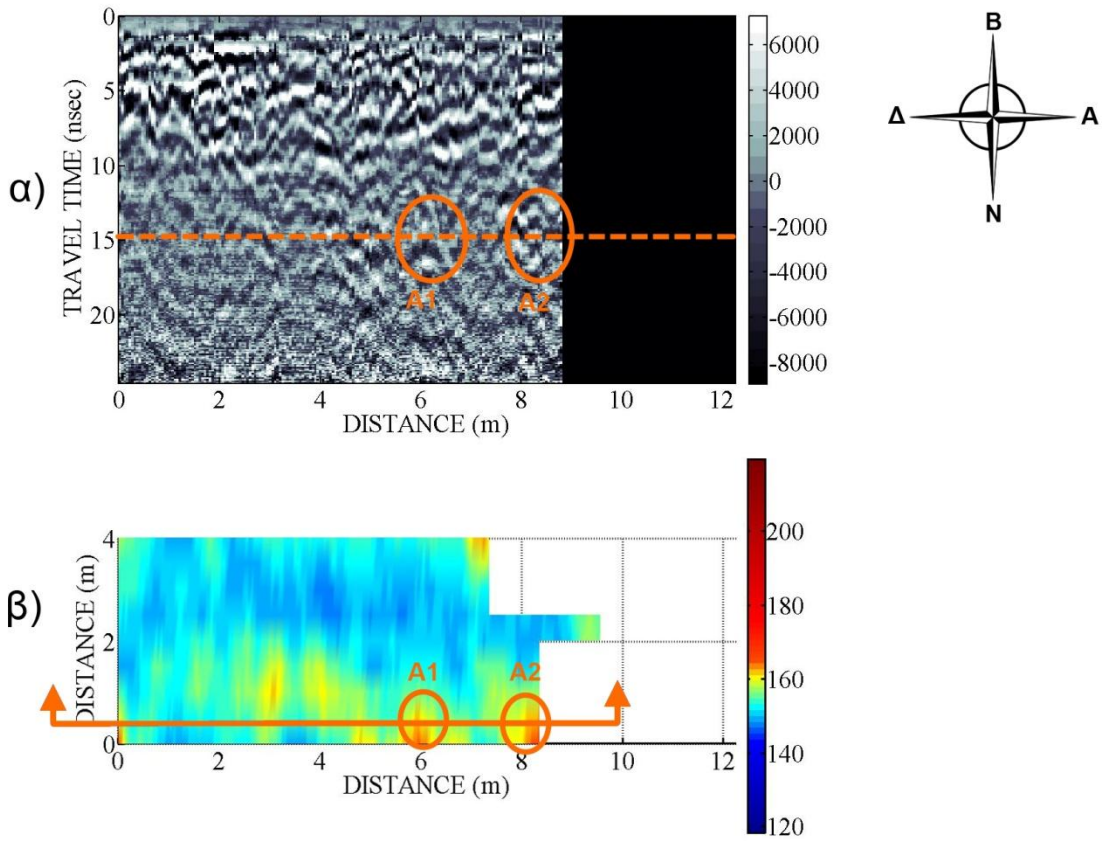
4.7 Περιοχή G

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται ΒΔ του ρωμαϊκού λουτρού (βλ. Εικόνα 3.8). Λόγω της μορφολογίας της, υπάρχει η υποψία ότι χρησιμοποιούταν για την απομάκρυνση των υδάτων από το λουτρό. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα της διασκόπησης δεν έδειξαν κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ενδεικτικά παρατίθεται η εικόνα 4.25 όπου παρουσιάζει την οριζόντια τομή στον χρόνο των 15ns και η τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 0.5 m. Η μέση ταχύτητα έχει υπολογισθεί στα 0.10ns/m.

Οι ανακλάσεις που παρουσιάζονται είναι οι ακόλουθες:

- Η ανάκλαση A1 παρουσιάζεται στα 10ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις δεν φαίνεται να συνεχίζουν με το βάθος. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται περίπου στα 6.0 m.
- Η ανάκλαση A2 ξεκινάει από τα 5ns και οι πολλαπλές ανακλάσεις διακρίνονται μέχρι τα 17ns. Κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετείται στα 8.5 m περίπου.

Οι παραπάνω ανακλάσεις που βρίσκονται στο όριο του κανάβου, μπορεί να οφείλονται στη μορφολογία της περιοχής. Κατά μήκος της τομής γεωραντάρ παρατηρείται ένα στρώμα που περιλαμβάνει πολλαπλές ανακλάσεις. Ξεκινάει από τα 2ns (0.1 m) και εκτείνεται μέχρι τα ~10ns περίπου (0.5 m). Το πάχος του είναι περίπου 0.3 m. Μπορεί να είναι στρώμα καταστροφής, αλλά είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται σε κοινά ασβεστολιθικά πετρώματα.



Εικόνα 4.25: Περιοχής μελέτης G. Γραμμή διασκόπησης με προσανατολισμό Δ-Α. α) Τομή γεωραντάρ για τη γραμμή διασκόπησης στο 0,5 m, β) οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης για διπλό χρόνο καταγραφής 15ns.

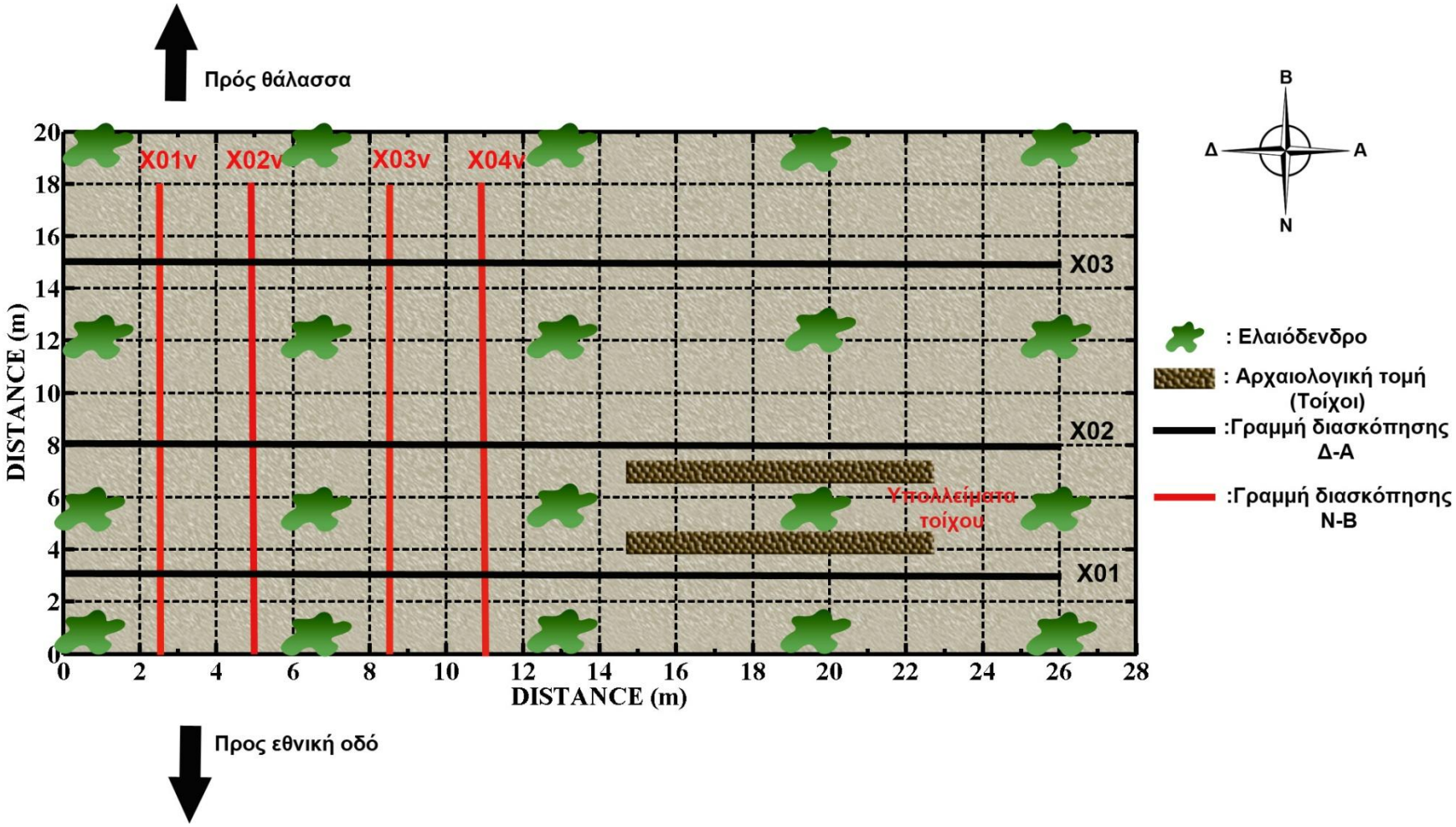
4.8 Οικόπεδο στο Καλάμι (Περιοχή F)

Η συγκεκριμένη περιοχή που είναι καλυμμένη με ελαιόδενδρα, προορίζεται για αλλαγή χρήσης. Σε δύο τομές, βάθους ~0.5 m, που πραγματοποιήθηκαν από την αρχαιολογία βρέθηκαν υπολείμματα ενός τοίχου (βλ. Εικόνα 3.14α και 3.14β). Για αυτό το λόγο σχεδιάστηκε διασκόπηση ώστε να εξακριβωθεί αν υπάρχουν περισσότερα αρχαιολογικά ευρήματα στο χώρο.

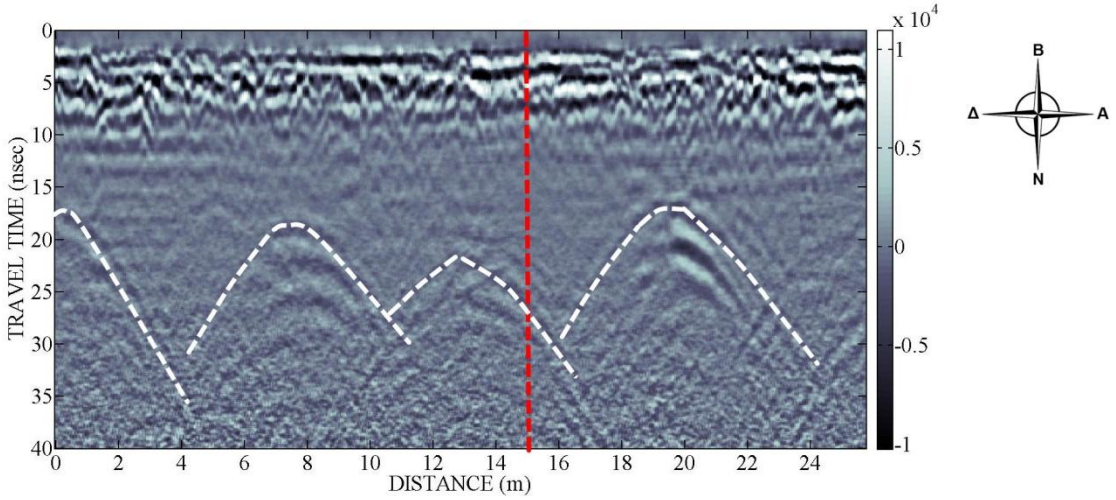
Επειδή δεν ήταν δυνατό να οριστεί κάναβος, όπως έγινε και στις προηγούμενες περιοχές, πραγματοποιήθηκαν επτά γραμμές διασκόπησης, από τις οποίες οι τρεις έχουν διεύθυνση Δ-Α και οι υπόλοιπες τέσσερις έχουν διεύθυνση Ν-Β, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Οι γραμμές διασκόπησης Χ01 και Χ02 περνάνε πολύ κοντά και από τις δύο τομές, αλλά δεν παρουσιάστηκαν ανακλάσεις που να σχετίζονται με τον τοίχο και να υποδεικνύουν κάποια συνέχεια του στο χώρο. Το ίδιο ισχύει και για τις υπόλοιπες τομές της περιοχής. Ενδεικτικά παρατίθενται οι εικόνες 4.26 και 4.27 των γραμμών διασκόπησης Χ02 και Χ03v αντίστοιχα.

Στην εικόνα 4.26 παρουσιάζεται η γραμμή διασκόπησης Χ02, η οποία τοποθετείται στα 8.0 m (βλ.Σχήμα 4.2). Παρατηρούνται τέσσερις περιθλάσεις (λευκή διακεκομμένη γραμμή) ο οποίες οφείλονται στις ρίζες των δέντρων. Με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή οριοθετείται η αρχή της αρχαιολογικής τομής και όπως φαίνεται δεν παρουσιάζεται καμία ανάκλαση.

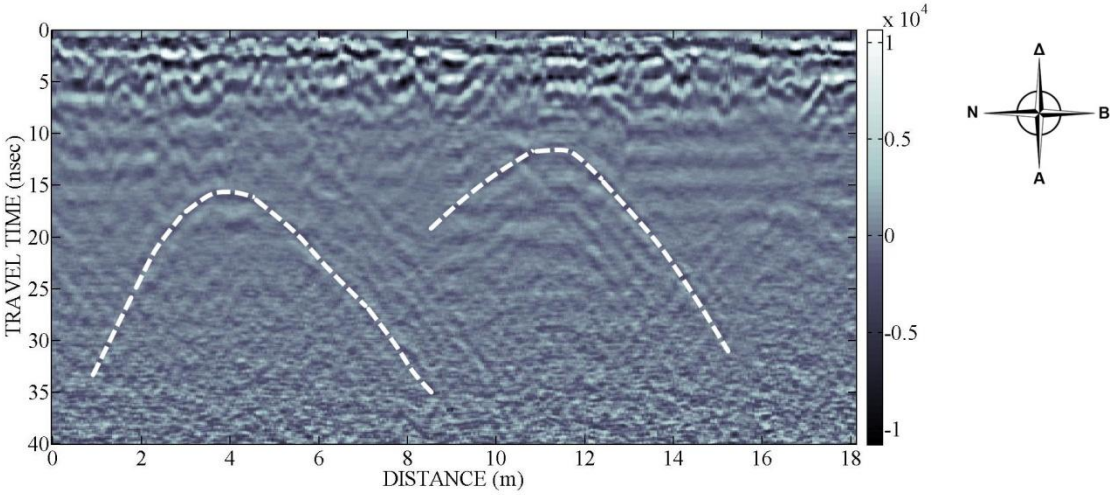
Στην εικόνα 4.27 παρουσιάζεται η τομή γεωραντάρ της γραμμής διασκόπησης Χ03v, η οποία, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2, τοποθετείται στα 8.5 m ως προς τη διεύθυνση Ν-Β. Οι περιθλάσεις που προκαλούνται από τις ρίζες των δέντρων εμφανίζονται και εδώ, αλλά περισσότερο εξασθενημένες. Το ίδιο φαινόμενο παρουσιάζεται σε όλες τις γραμμές διασκόπησης οι οποίες επισυνάπτονται στο παράρτημα Α.



Σχήμα 4.2: Κάτοψη της περιοχής μελέτης στο Καλάμι, Ν.Χ. κατά το δυνατό υπό κλίμακα. Πάνω στο σχήμα προβάλλονται τα ελαιόδενδρα, οι αρχαιολογικές τομές και οι γραμμές διασκόπησης



Εικόνα 4.26:Γραμμή διασκόπησης Χ02. Η διεύθυνση της είναι Δ-Α. Με άσπρη διακεκομμένη γραμμή τονίζονται οι περιθλάσεις που προκλήθηκαν από τις ρίζες των ελαιόδενδρων, ενώ με την κόκκινη γραμμή σημειώνεται η αρχή της αρχαιολογικής τομής.



Εικόνα 4.27: Γραμμή διασκόπησης Χ03ν. Η διεύθυνση της είναι Ν-Β. Με άσπρη διακεκομμένη γραμμή τονίζονται οι περιθλάσεις που προκλήθηκαν από τις ρίζες των ελαιόδενδρων.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - Προτάσεις

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η γεωφυσική μέθοδος του γεωραντάρ στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας. Σκοπός της μελέτης είναι η διευκόλυνση του έργου των αρχαιολόγων. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι περιοχές που δεν παρουσίασαν ενδιαφέρον είναι οι ακόλουθες:

- Νοτιοδυτικά του χώρου στάθμευσης
- Λουτρά
- Γούβα
- Οικόπεδο στο καλάμι

Οι περιοχές στις οποίες η μέθοδος παρουσίασε θετικά αποτελέσματα είναι οι παρακάτω:

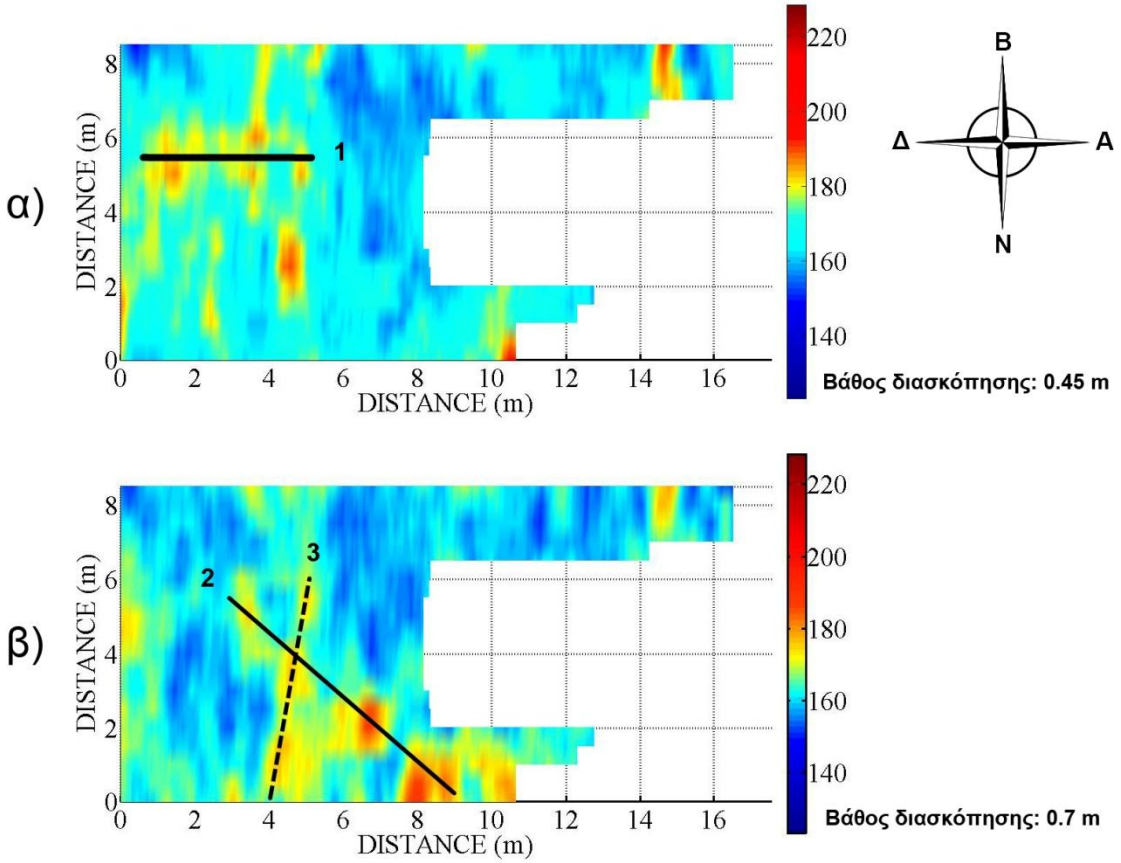
- Αυλή του μοναστηριού (Α)
- Νότια του μοναστηριού (Β)
- Ανατολικά του μοναστηριού (Γ)
- Νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης (Δ)
- Δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής (Ε)

Για πρακτικούς λόγους, οι παραπάνω περιοχές συνοψίζονται στην δορυφορική εικόνα 5.1 όπου προβάλλονται οι σημαντικότερες οριζόντιες τομές των περιοχών.

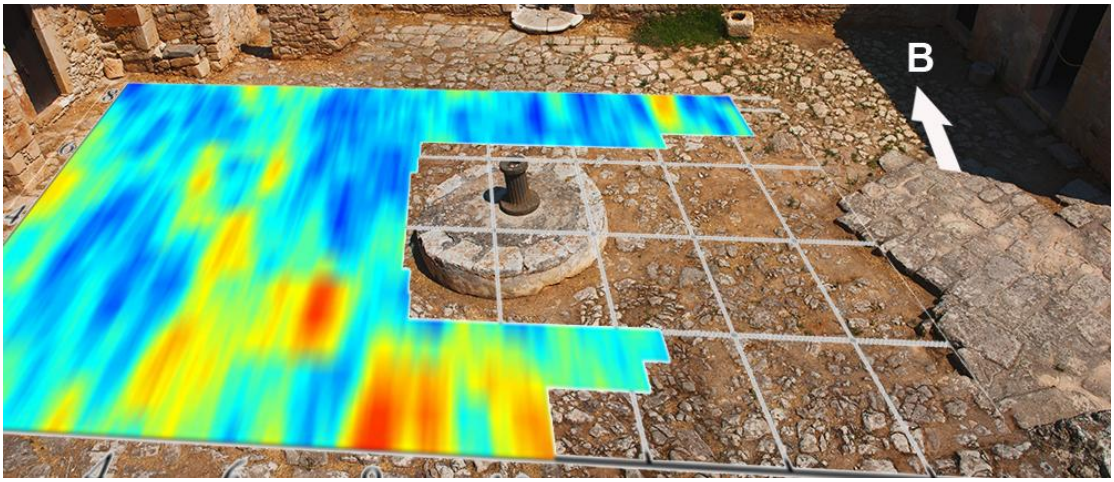
Εικόνα 5.1: Οριζόντιες τομές των περιοχών διασκόπησης. Δορυφορική εικόνα του αρχαιολογικού χώρου στην οποία έχουν τοποθετηθεί οι οριζόντιες τομές των περιοχών υψηλού ενδιαφέροντος.

Για την περιοχή μελέτης που βρίσκεται στην αυλή του μοναστηριού, το βάθος στο οποίο παρουσιάζεται το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι τα 0.7 m περίπου. Πιθανά σενάρια για την σχέση μεταξύ των ανωμαλιών παρουσιάζονται στην εικόνα 5.2. Οι ανακλάσεις της γραμμής 1 τοποθετούνται στα 0.45 m και πιθανόν να σχετίζονται με τις ανακλάσεις της γραμμής 2 που παρουσιάζονται βαθύτερα, στα 0.7 m και εκτείνονται μέχρι το 1.5 m περίπου. Αντίστοιχα μπορεί να συμβαίνει το ίδιο και με τις ανακλάσεις της γραμμής 3, οι οποίες όμως συνεχίζουν σε μικρότερο βάθος συγκριτικά με την γραμμή 2.

Στην συγκεκριμένη περιοχή, δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί αρχαιολογική τομή, λόγω της πλακόστρωσης και επειδή στεγάζονται γραφεία και τα συντηρήτρια. Αντί αυτού, για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων προτείνεται η εφαρμογή άλλων γεωφυσικών μεθόδων όπως μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, μέθοδος κινούμενου πομπού δέκτη κ.α. Τέλος στην εικόνα 5.3 παρουσιάζεται μία φωτογραφία της αυλής στην οποία προβάλλεται η οριζόντια τομή που αντιστοιχεί στα 0.7 m κατά το δυνατό υπό κλίμακα.



Εικόνα 5.2 Πιθανά σενάρια για την περιοχή μελέτης στην αυλή του μοναστηριού.

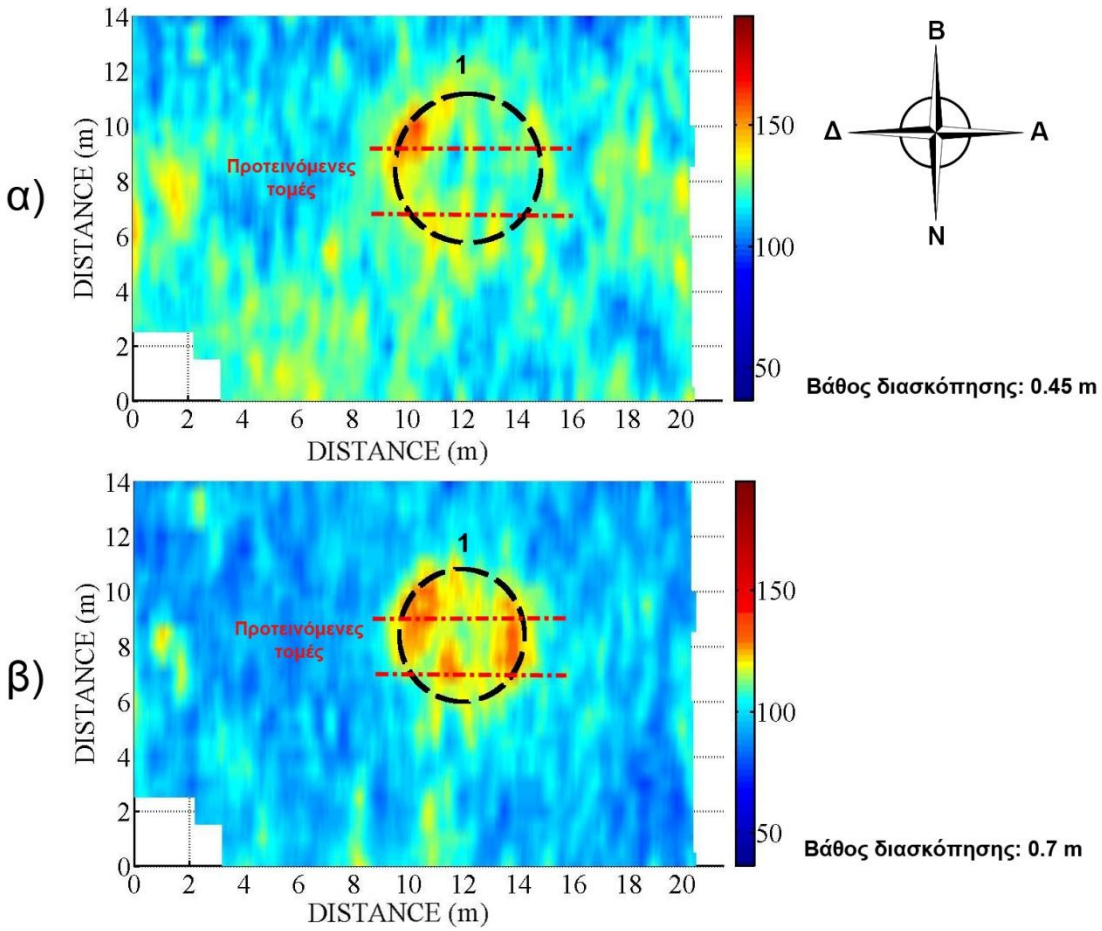


Εικόνα 5.3 : Προβολή οριζόντιας τομής σε φωτογραφία της αυλής του μοναστηριού. Το βάθος που προβάλλεται είναι τα 0.7 m.

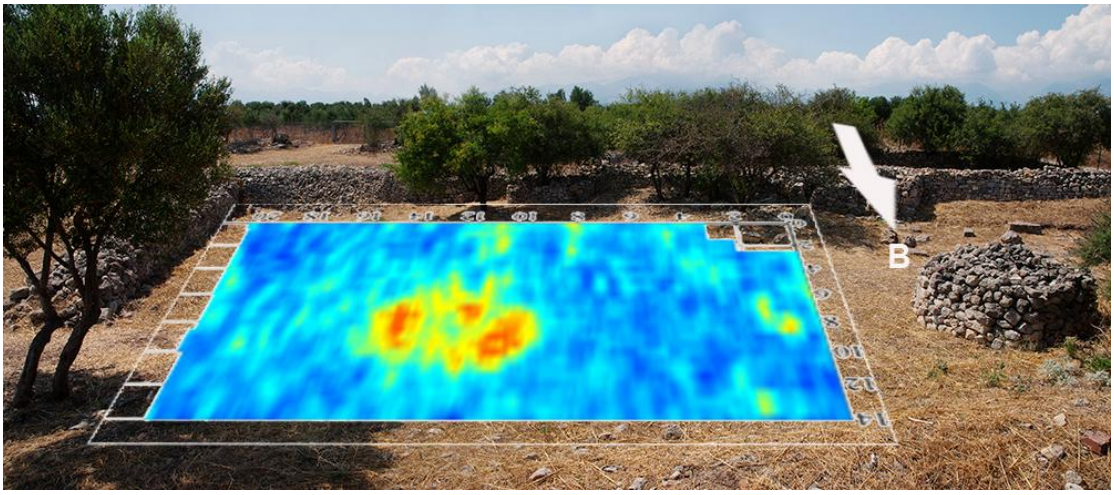
Για την περιοχή μελέτης που βρίσκεται νότια του μοναστηριού, το βάθος στο οποίο παρουσιάζεται το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι τα 0.7 m περίπου. Οι ανακλάσεις που παρουσιάζονται, όπως φαίνεται στις εικόνες 5.4α και 5.4β με την διακεκομμένη γραμμή 1, δημιουργούν μία κυκλική διατομή. Ένα μέρος της ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια, στα 0.2 m και συνεχίζει μέχρι τα 1.8 m περίπου. Ο στόχος που προκάλεσε τις ανακλάσεις μπορεί να είναι δεξαμενή, διαμέτρου 4.0 m περίπου και κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση έχει μήκος περίπου 1.5 m. Στην συγκεκριμένη περιοχή προτείνεται:

- Τομή μήκους 7.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α, η οποία ξεκινά από τα 9.0 m κατά τις διεύθυνσης Δ-Α και Ν-Β.
- Τομή μήκους 7.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α, η οποία ξεκινά από τα 9.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α και στα 7.0 m κατά τη διεύθυνση Ν-Β.

Στην εικόνα 5.5 έχει προβληθεί η οριζόντια τομή που αντιστοιχεί σε βάθος 0.7 m, πάνω σε φωτογραφία της περιοχής.



Εικόνα 5.4: Προτεινόμενες τομές για την περιοχή διασκόπησης νότια του μοναστηριού.



Εικόνα 5.5: Προβολή οριζόντιας τομής σε φωτογραφία της περιοχής που βρίσκεται νότια του μοναστηριού. Η οριζόντια τομή αντιστοιχεί σε βάθος των 0.7 m.

Για την περιοχή μελέτης που βρίσκεται ανατολικά του μοναστηριού, παρουσιάζεται ενδιαφέρον σχεδόν σε όλο το βάθος της διασκόπησης. Στις εικόνες 5.6α και 5.6β παρουσιάζονται οι σημαντικότερες ανακλάσεις σε βάθος 0.6 m και 1.5 m αντίστοιχα. Η ανάκλαση που τονίζεται με την γραμμή 1, ξεκινάει πολύ κοντά στην επιφάνεια. Το μέσο πάχος της, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι 1.5 m. Μπορεί να οφείλεται σε αποχετευτικό σωλήνα ή σε τοιχίο. Οι ανακλάσεις που τονίζονται με την γραμμή 2 (εικόνα 5.6α) φαίνεται να είναι συνέχεια του σκάμματος αλλά δεν επεκτείνονται με το βάθος. Το ίδιο ισχύει και για τις ανακλάσεις της γραμμής 3, αλλά σε αυτή την περίπτωση εκτείνονται μέχρι τα 2.0 m σε βάθος. Μία υπόθεση που μπορεί να γίνει, είναι οι ανακλάσεις της γραμμής 2 να αποτελούν στρώμα καταστροφής των ανακλάσεων της γραμμής 3.

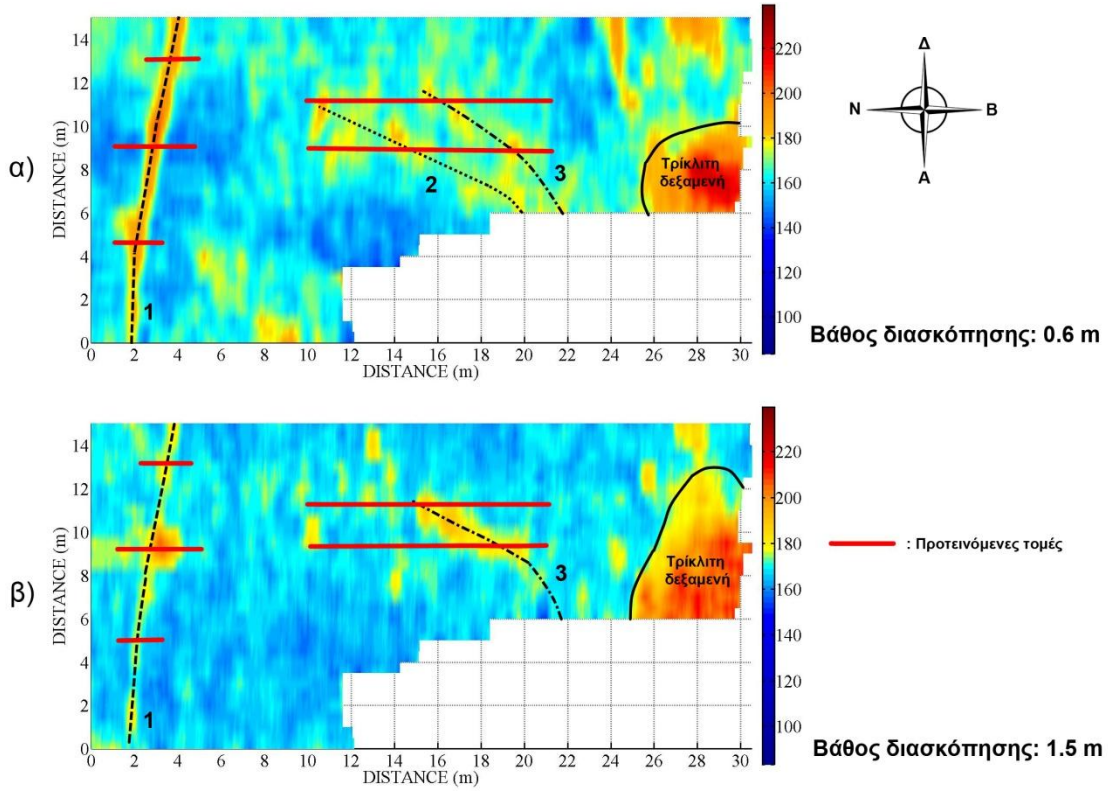
Στην περίπτωση όπου οι ανακλάσεις της γραμμής 1, δεν οφείλονται σε αποχετευτικό σωλήνα προτείνεται:

- Τομή μήκους 2.0 m κατά τη διεύθυνση Ν-Β, η οποία ξεκινά από το 1.0 m κατά την διεύθυνση Ν-Β και στα 5.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α.
- Τομή μήκους 4.0 m κατά τη διεύθυνση Ν-Β, η οποία ξεκινά από το 1.0 m κατά την διεύθυνση Ν-Β και στα 9.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α
- Τομή μήκους 2.0 m κατά τη διεύθυνση Ν-Β, η οποία ξεκινά από τα 2.0 m κατά την διεύθυνση Ν-Β και στα 13.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α.

όπως φαίνεται στις εικόνες 5.6α και 5.6β.

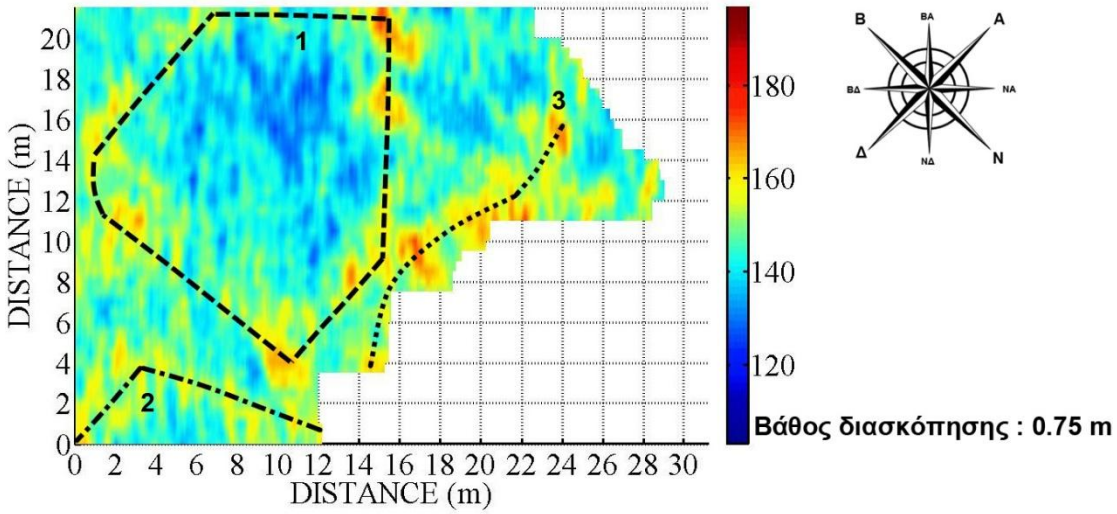
Για τις ανωμαλίες των γραμμών 1 και 2, προτείνεται:

- Τομή μήκους 11.0 m κατά τη διεύθυνση N-B, η οποία ξεκινά από τα 10.0 m κατά την διεύθυνση N-B και στα 9.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α.
- Τομή μήκους 11.0 m κατά τη διεύθυνση N-B, η οποία ξεκινά από τα 10.0 m κατά την διεύθυνση N-B και στα 11.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α.



Εικόνα 5.6 Προτεινόμενες τομές για την περιοχή διασκόπησης ανατολικά του μοναστηριού.

Για την περιοχή μελέτης που βρίσκεται νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης παρουσιάστηκαν πολλές ανακλάσεις στο βάθος των 0.75 m (Εικόνα 5.7) . Ελάχιστες από αυτές όμως εκτείνονται με το βάθος, και γι' αυτό το λόγο δεν μπορεί να ληφθεί κάποιο συμπέρασμα. Εστιάζοντας στην οριζόντια τομή της εικόνας 5.7, τα σενάρια και οι υποθέσεις που μπορεί να γίνουν όσο αφορά την διάταξη των ανωμαλιών στο χώρο, είναι πολλά. Το φαινόμενο που παρατηρείται ίσως να ερμηνεύεται σαν στρώμα καταστροφής. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται επανάληψη της διασκόπησης , σε συνδυασμό με άλλες γεωφυσικές μεθόδους.



Εικόνα 5.7: Πιθανά σενάρια για την περιοχή μελέτης νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευσης.

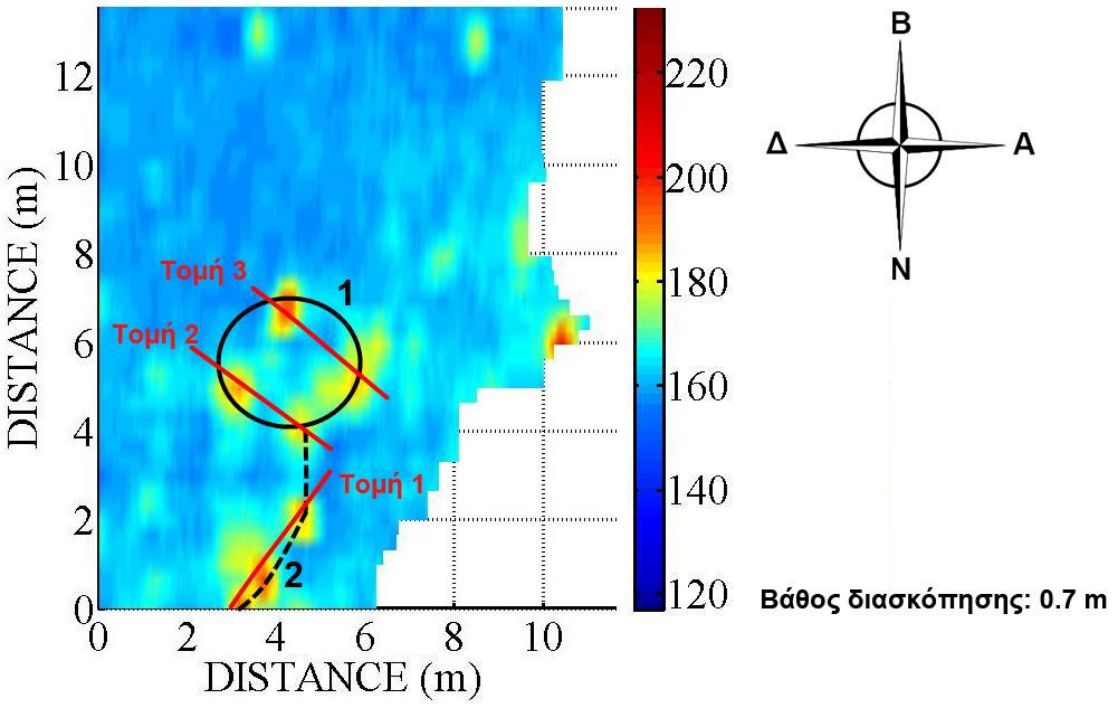
Στην περιοχή μελέτης που βρίσκεται δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής οι ανακλάσεις που εμφανίζονται παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Δηλαδή ξεκινάνε πολύ κοντά στην επιφάνεια, μόλις στα 0.2 m και εκτείνονται μέχρι και τα 1.8 m. Στην εικόνα 5.8 παρουσιάζονται τα πιθανά σενάρια για το που μπορεί να οφείλονται οι ανωμαλίες.

Οι ανακλάσεις που υπάρχουν εντός της περιοχής 1, φαίνεται να είναι υπολείμματα μιας μικρής δεξαμενής, διαμέτρου περίπου 2.5 m. Οι ανωμαλίες που βρίσκονται στην γραμμή 2, παρουσιάζουν μία γραμμικότητα μεταξύ τους και ίσως συνδέονται με την δεξαμενή. Είναι πολύ πιθανό να εκτείνονται εκτός τον ορίων του κανάβου.

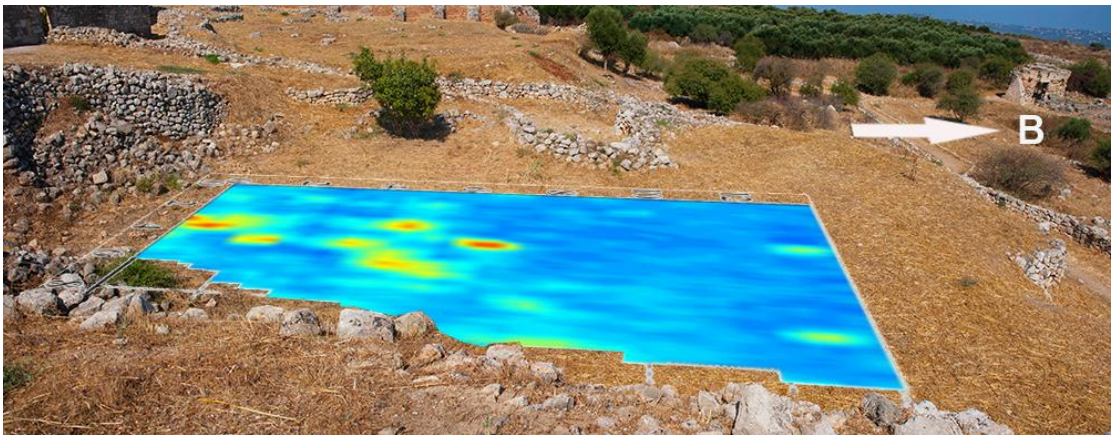
Σύμφωνα με την εικόνα 5.8 προτείνονται:

- Τομή μήκους 4.0 m κατά τη διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ, η οποία στα 3.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α, όπως φαίνεται στην εικόνα. (Τομή 1)
- Τομή μήκους 4.0 m κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, η οποία ξεκινά από τα 6.0 m κατά την διεύθυνση Ν-Β και στα 2.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α (Τομή 2).
- Τομή μήκους 3.5 m κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, η οποία ξεκινά από τα 7.0 m κατά την διεύθυνση Ν-Β και στα 4.0 m κατά τη διεύθυνση Δ-Α (Τομή 3).

Τέλος στην εικόνα 5.9 έχει προβληθεί η οριζόντια τομή που αντιστοιχεί στο βάθος των 0.7 m, σε πανοραμική φωτογραφία της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 5.8: Προτεινόμενες τομές για την περιοχή μελέτης που βρίσκεται δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής.



Εικόνα 5.9 Περιοχή μελέτης δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής, όπου προβάλλεται η οριζόντια τομή για το βάθος των 0.7 m.

Βιβλιογραφία

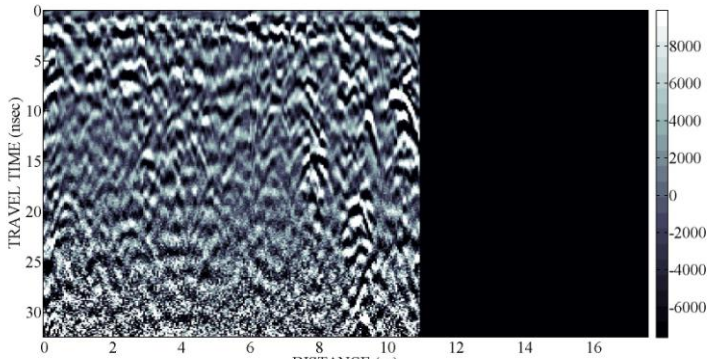
- Annan A. P. (2001). *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. Sensor & Software Inc., Canada.
- Annan A. P. (2002). GPR-History, Trends, and Future Developments. Subsurface Sensing Technologies and Applications . Vol. 3, No 4, pp 1566-0184.
- Bracewell N. R. (1986). *The Fourier transform and its applications*. Mc Graw- Hill international editions. Stanford.
- Daniels J. J. (2000). Ground Penetrating Radar Fundamentals. Prepared as an appendix to a report to the U.S.EPA, Region V.
- Jol H. M. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elesvier B.V., Great Britain.
- Rene R. M., Fitter J. L. (1986). Multicomponent seismic studies using complex trace analysis. Geophysics. Vol. 51. No 6. pp. 1235-1251.
- Spanoudakis S. N., Vafidis A. (2010). GPR-Pro : A MATLAB module for GPR data proseccing. XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, 21-25 June 2010.
- Taner M. T., Koehler F., Sheriff R. E. (1979). Complex seismic trace analysis. Geophysics. Vol. 44. No 6. pp 1041-1063.
- Αγιουτάντης Ζ., Μαυριγιαννάκης Σ., Καλλίθρακας Ν., Εξαδάχτυλος Γ., Μπαράκος Γ. (2006). Μελέτη Επεμβάσεων συντήρησης στο τείχος της αρχαίας Απτέρας. Πολυτεχνείο Κρήτης
- Βαφείδης Α. (2007). Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο των Απτέρων Χανίων. Έκθεση γεωφυσικής έρευνας. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μερτίκας Σ. (1999). *Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας*. Ιων.
- Νινιού Β. (2006) – *Απτέρα, Ιστορικό λεύκωμα*. Υπουργείο Πολιτισμού. Ελλάδα.
- Πουλιούδης Γ. (2001). Μέθοδοι επεξεργασίας καταγραφών γεωραντάρ. Μεταπτυχιακή εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.

- Σπανουδάκης Ν. (2002). Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Μεταπτυχιακή εργασία. Τμήμα Μανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.

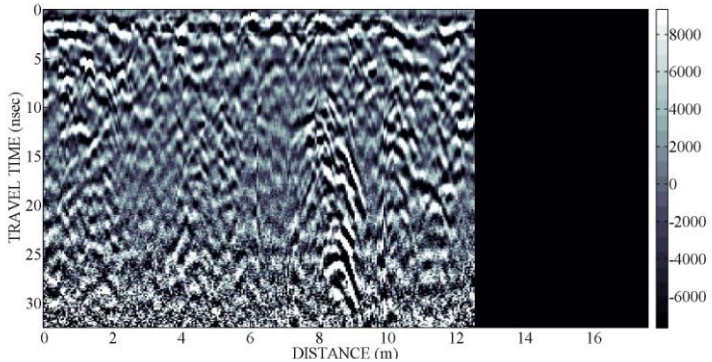
Παράρτημα Α:
Τομές γεωραντάρ των περιοχών διασκόπησης

Αυλή Μοναστηριού (Περιοχή Μ)

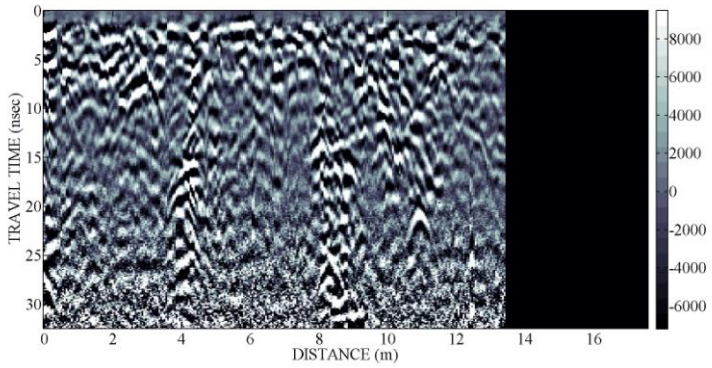
- **Γραμμή Μ01 (0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



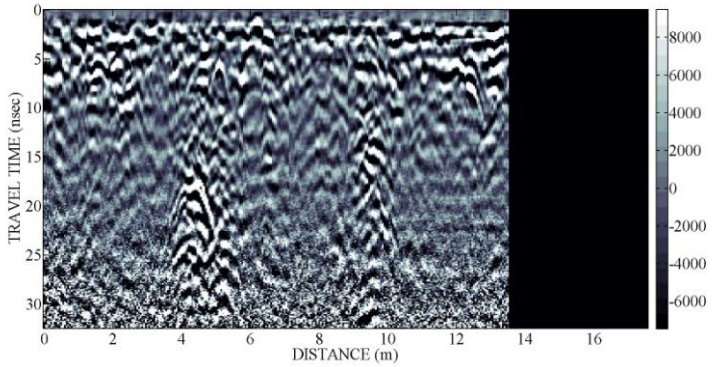
- **Γραμμή Μ02 (0.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



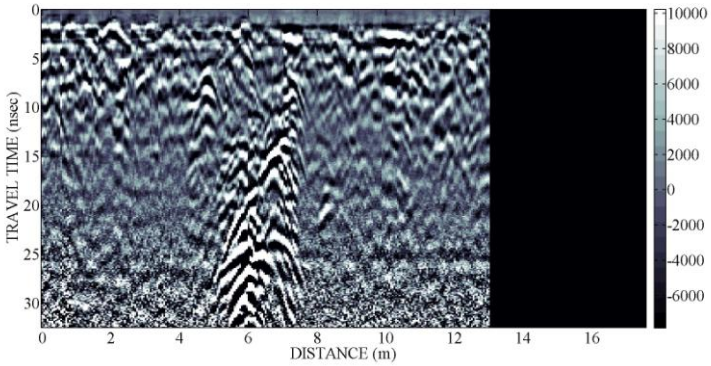
- **Γραμμή Μ03 (1.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



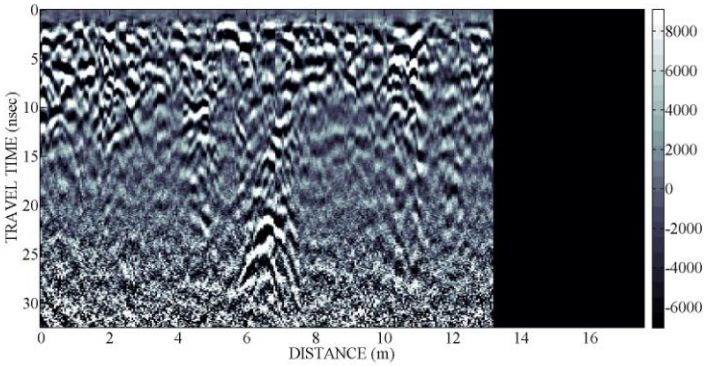
- **Γραμμή Μ04 (1.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



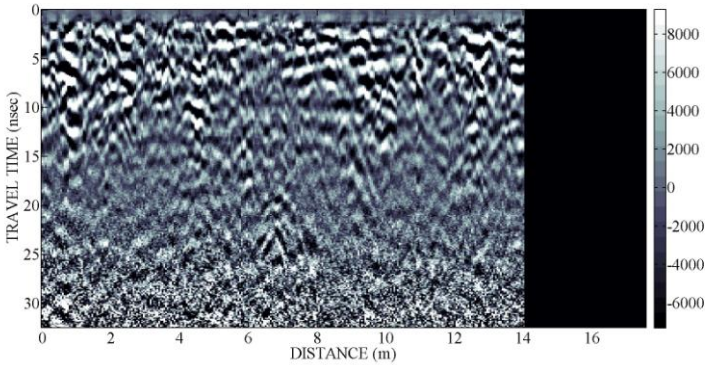
- **Γραμμή M05 (2.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



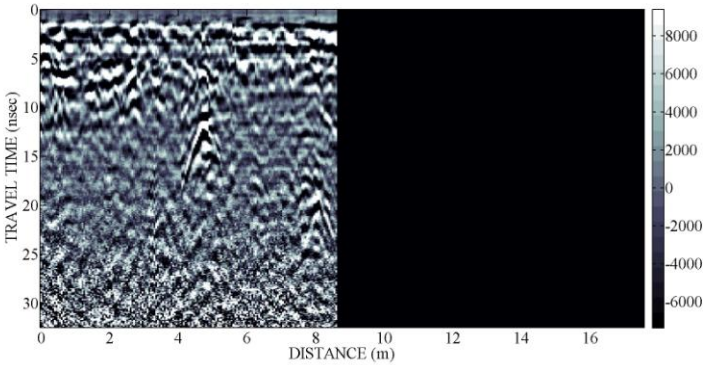
- **Γραμμή M06 (2.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



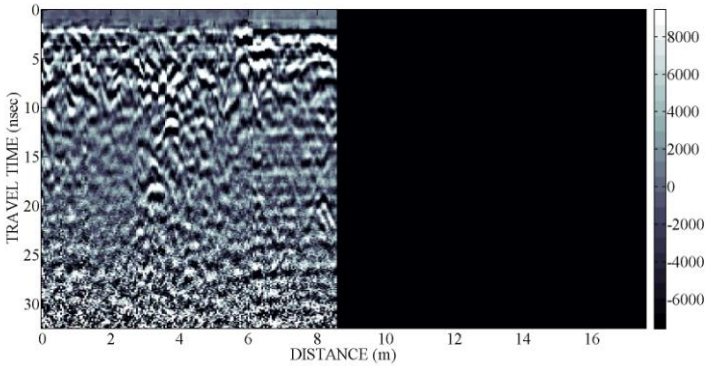
- **Γραμμή M07 (3.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



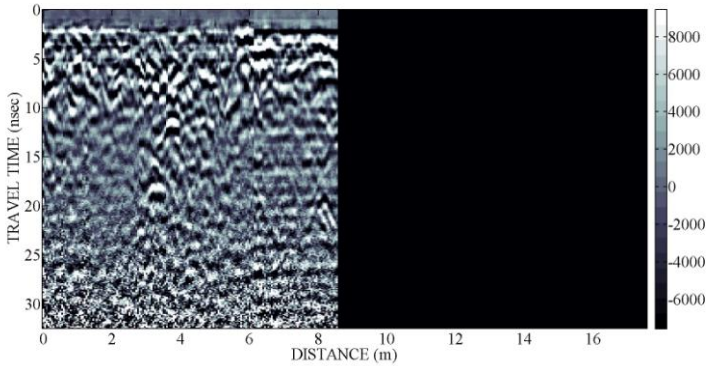
- **Γραμμή M08 (3.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



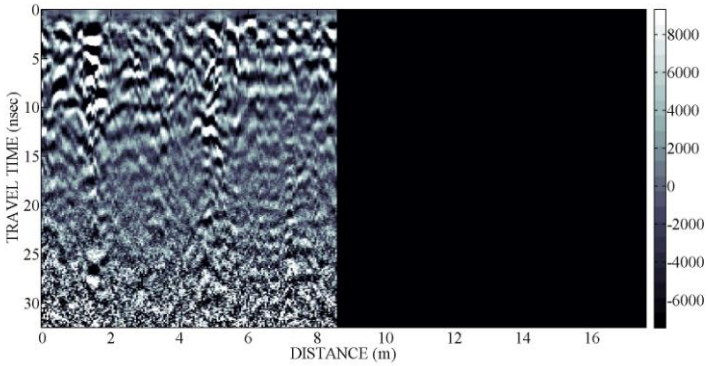
- **Γραμμή M09 (4.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



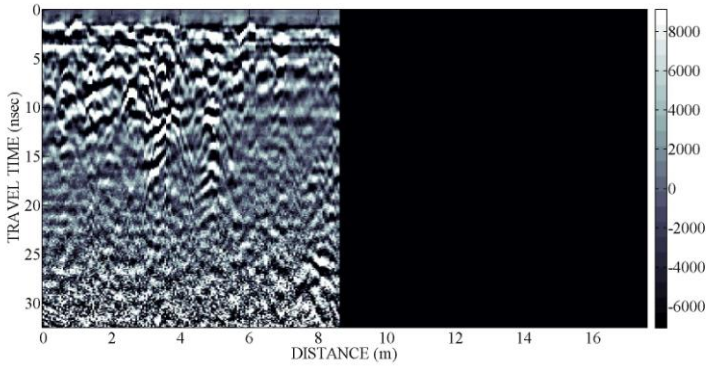
- **Γραμμή M10 (4.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



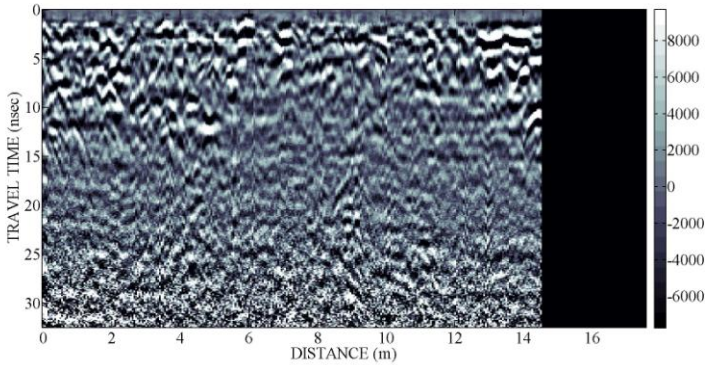
- **Γραμμή M11 (5.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



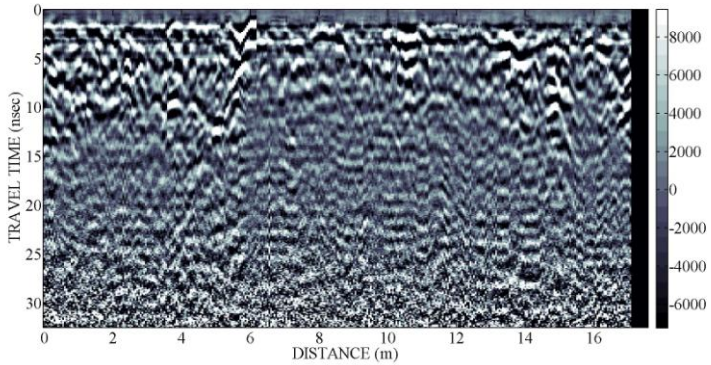
- **Γραμμή M12 (5.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



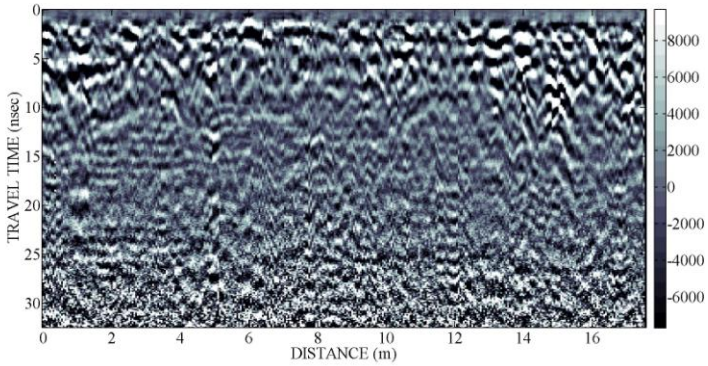
- **Γραμμή M13 (6.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



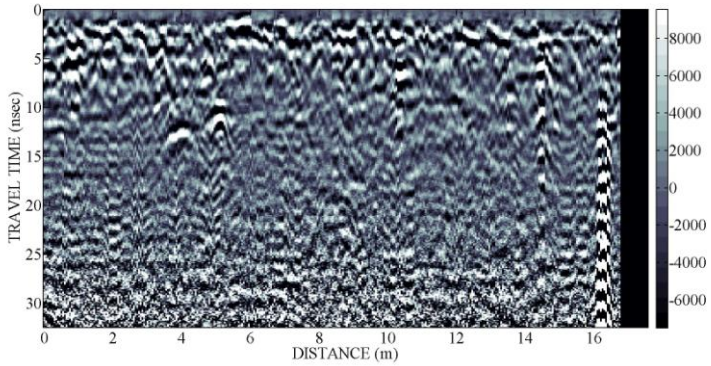
- **Γραμμή M14 (6.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



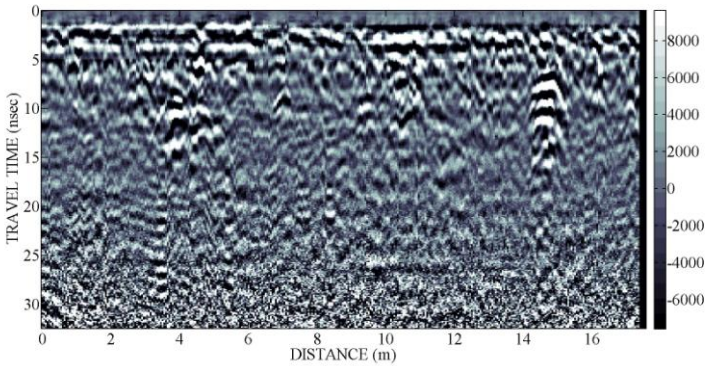
- **Γραμμή M15 (7.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



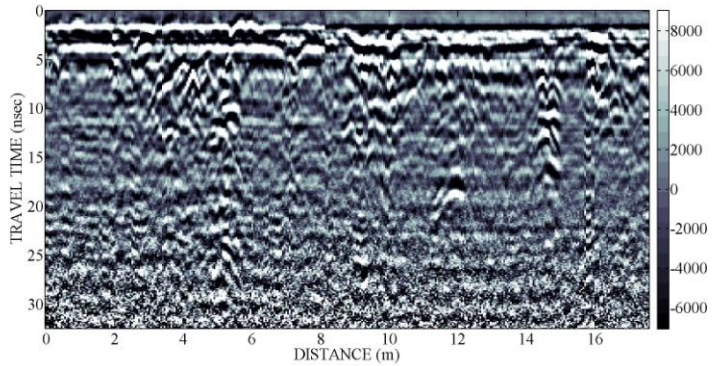
- **Γραμμή M16 (7.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



- **Γραμμή M17 (8.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

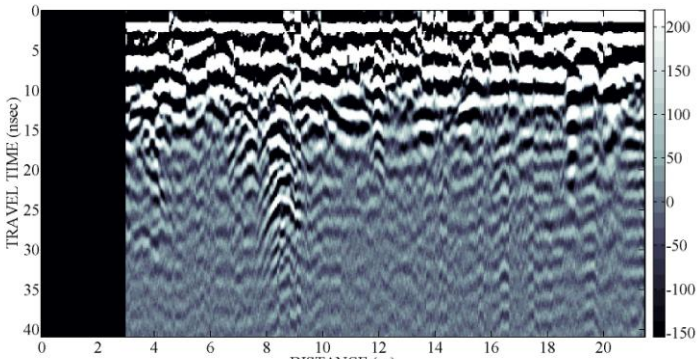


- **Γραμμή M18 (8.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

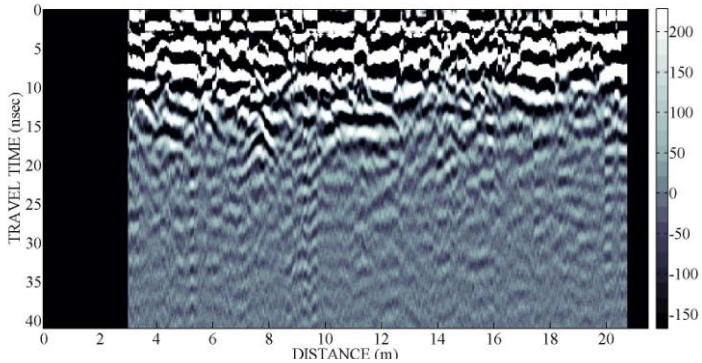


Νοτιά του Μοναστηριού (Περιοχή S)

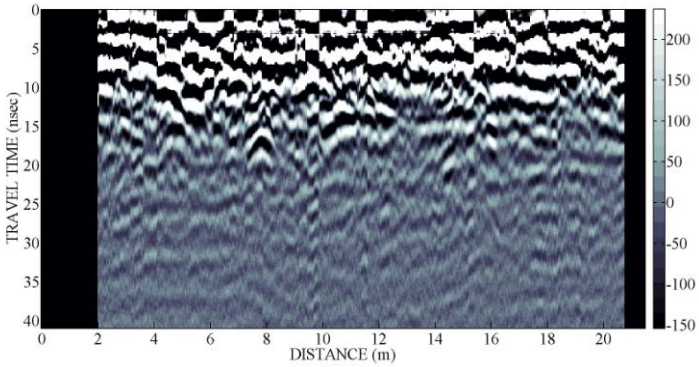
- **Γραμμή S01 (0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



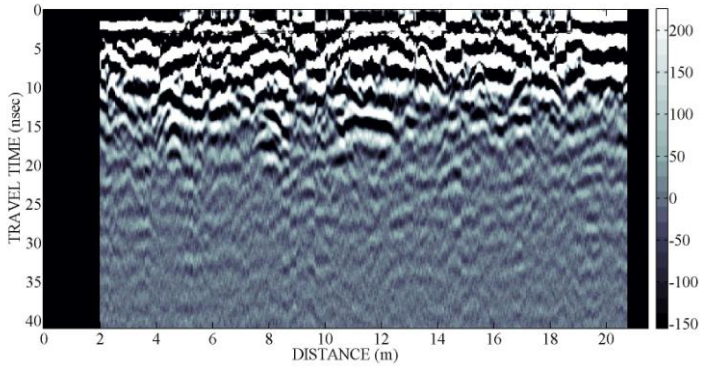
- **Γραμμή S02 (0.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



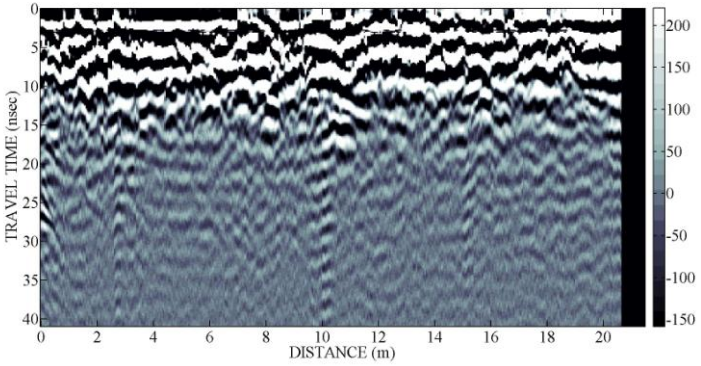
- **Γραμμή S03 (1.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



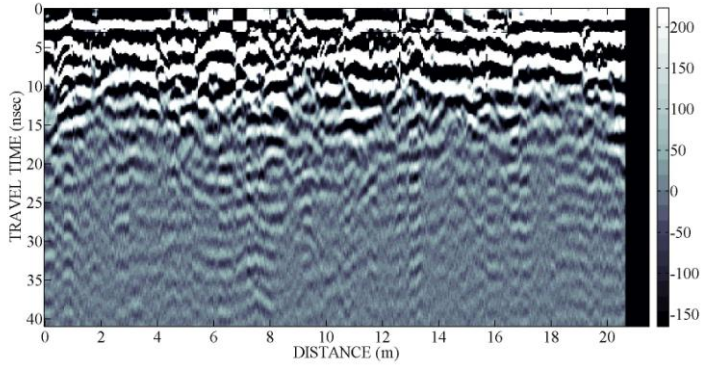
- **Γραμμή S04 (1.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



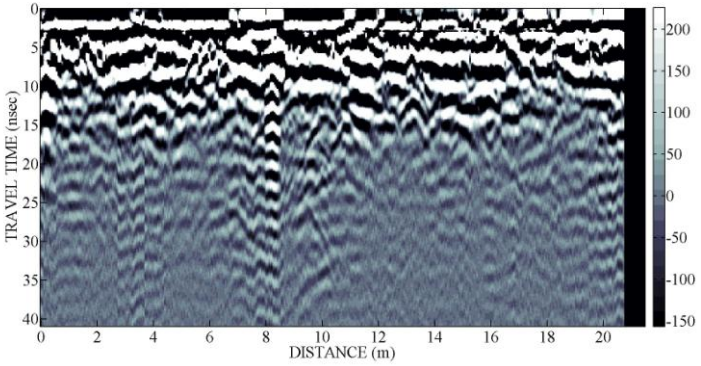
- **Γραμμή S05 (2.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



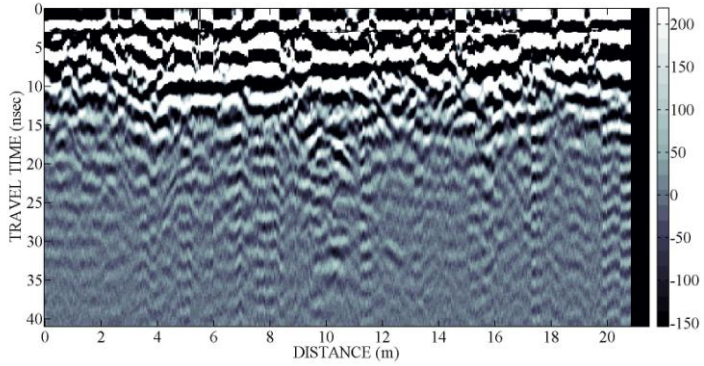
- **Γραμμή S06 (2.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



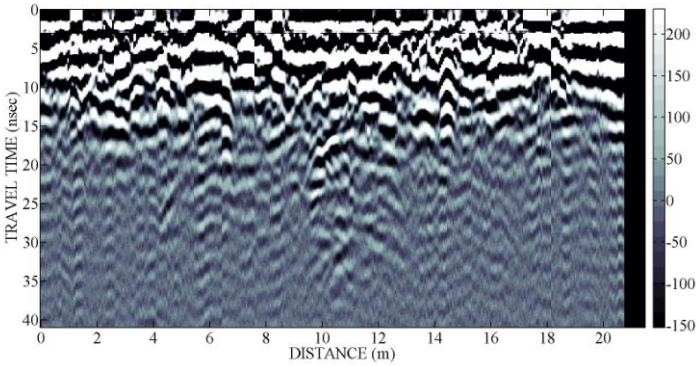
- **Γραμμή S07 (3.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



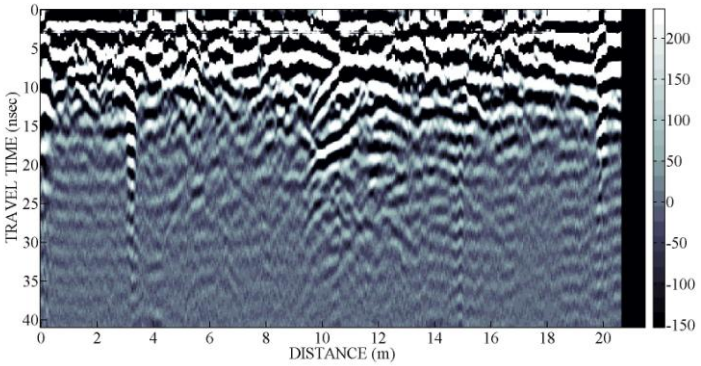
- **Γραμμή S08 (3.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



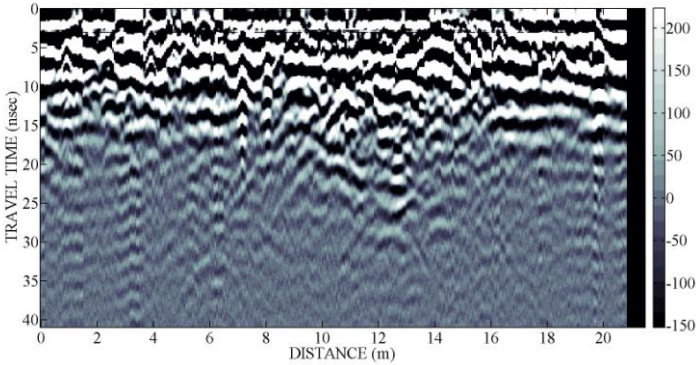
- **Γραμμή S09 (4.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



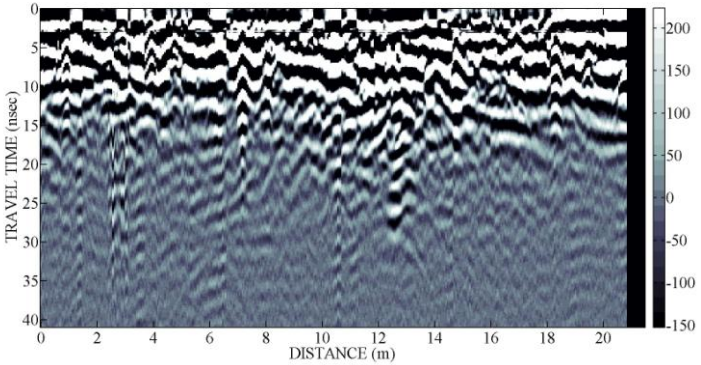
- **Γραμμή S10 (4.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



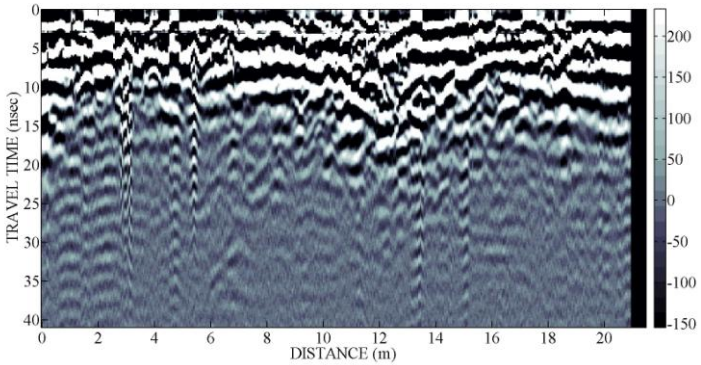
- **Γραμμή S11 (5.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



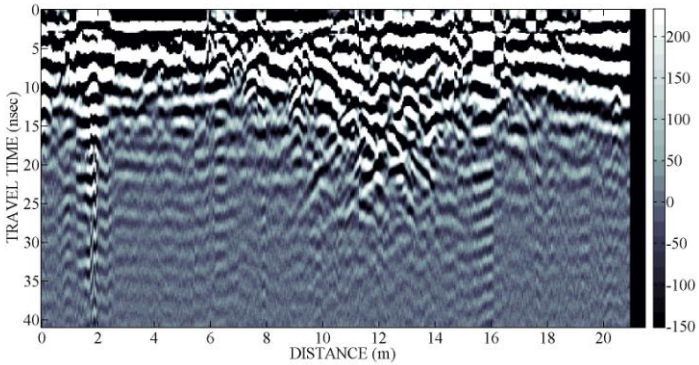
- **Γραμμή S12 (5.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



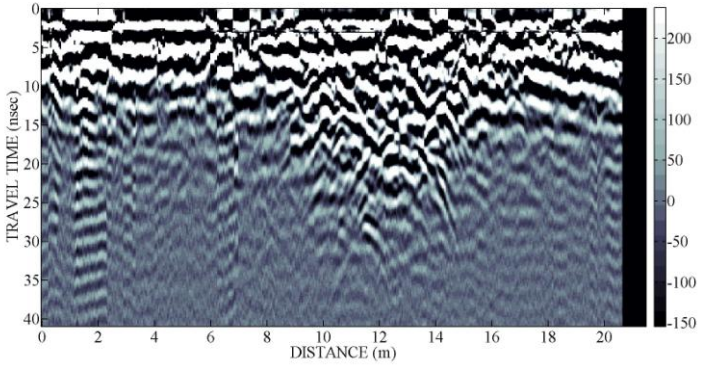
- **Γραμμή S13 (6.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



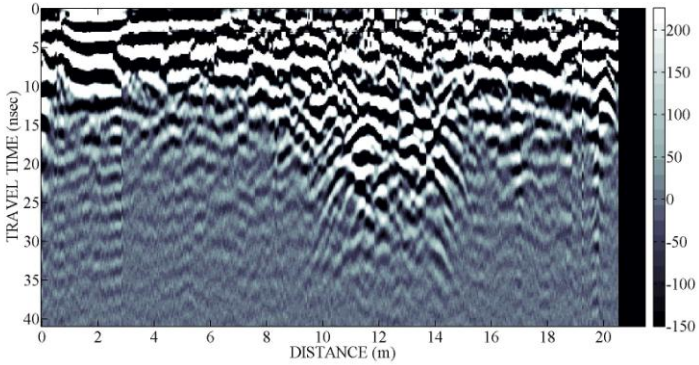
- **Γραμμή S14 (6.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



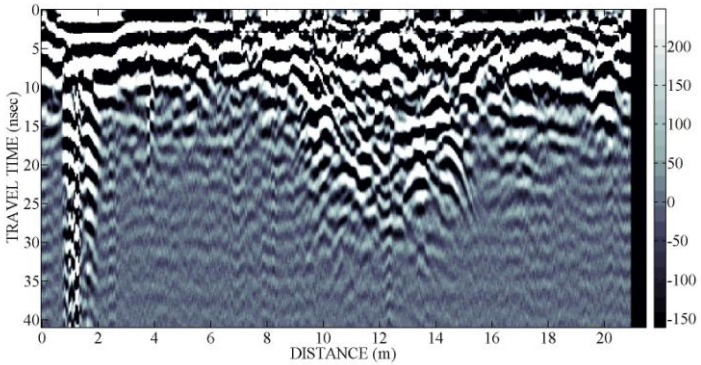
- **Γραμμή S15 (7.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



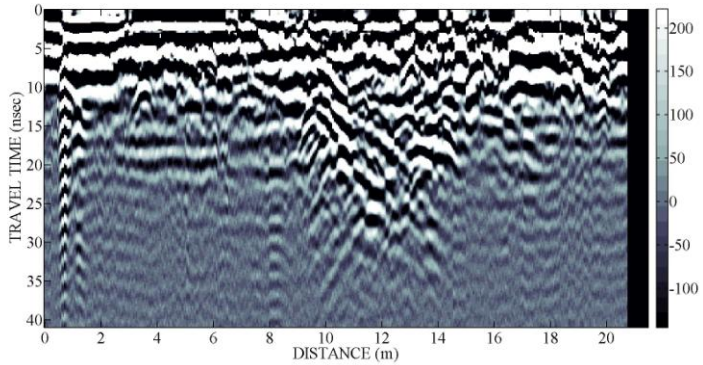
- **Γραμμή S16 (7.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



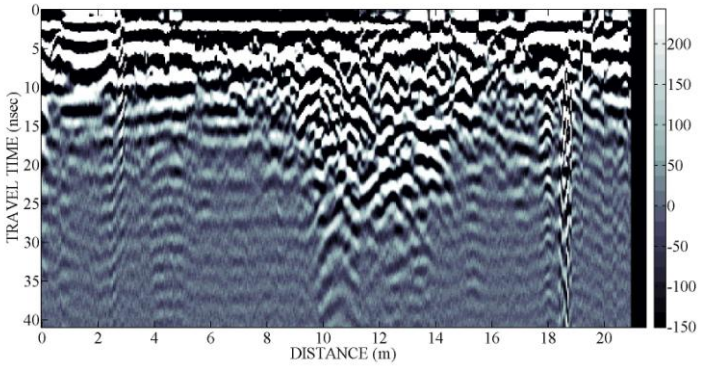
- **Γραμμή S17 (8.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



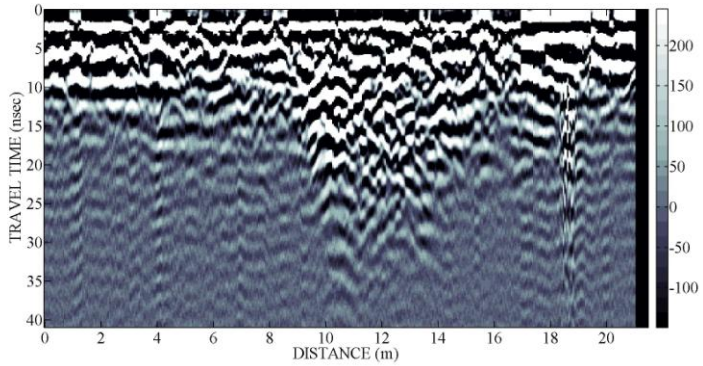
- **Γραμμή S18 (8.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



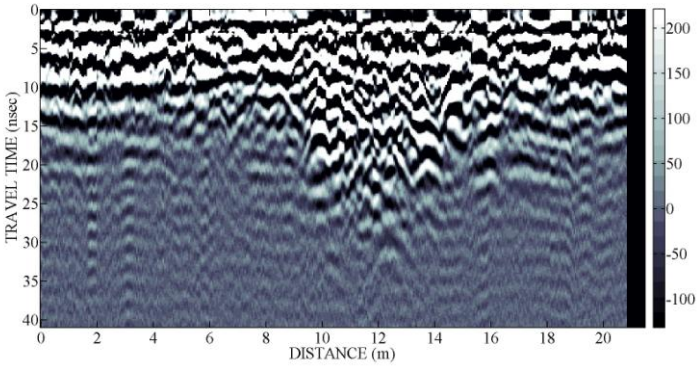
- **Γραμμή S19 (9.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



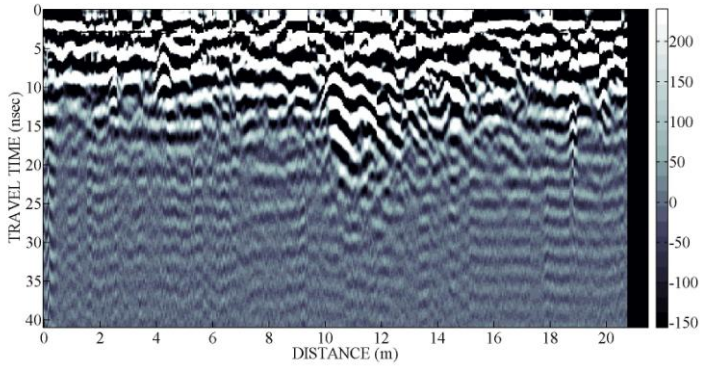
- **Γραμμή S20 (9.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



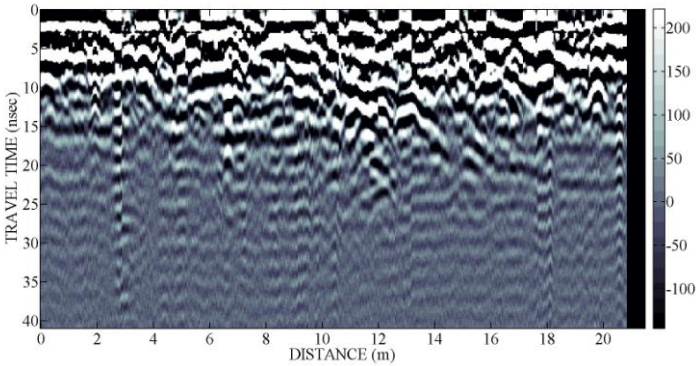
- **Γραμμή S21 (10.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



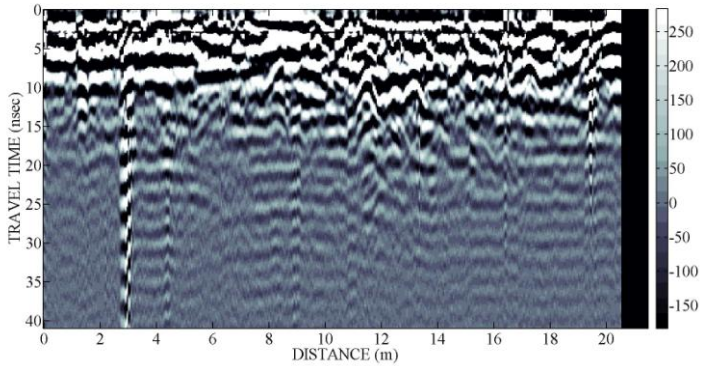
- **Γραμμή S22 (10.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



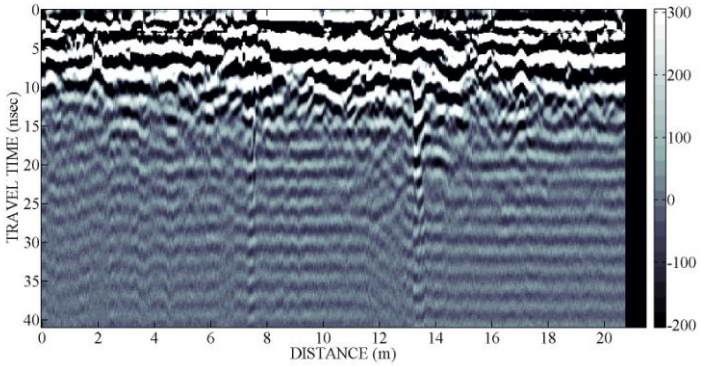
- **Γραμμή S23 (11.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



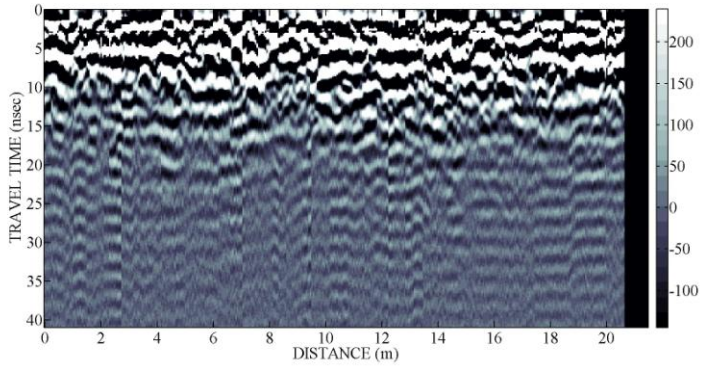
- **Γραμμή S24 (11.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



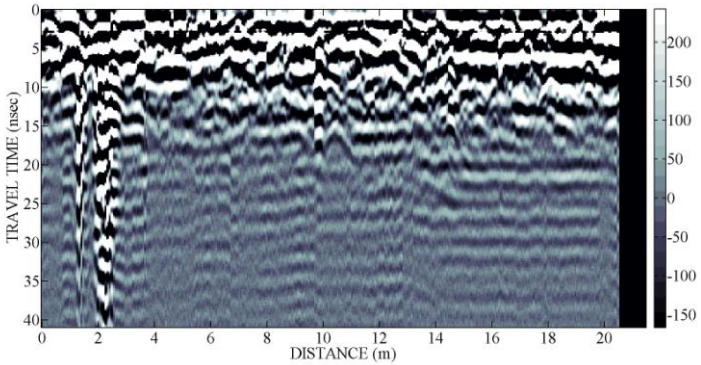
- **Γραμμή S25 (12.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



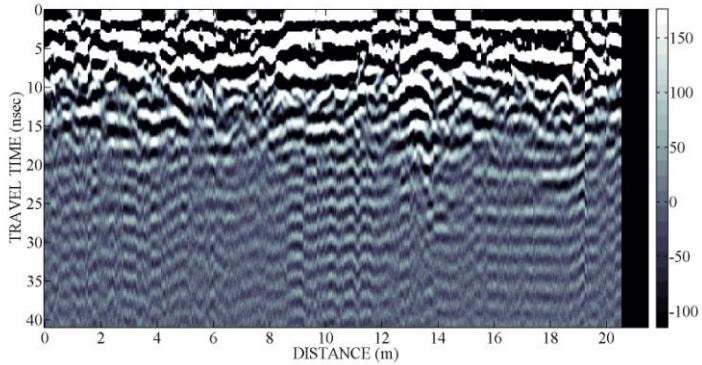
- **Γραμμή S26 (12.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



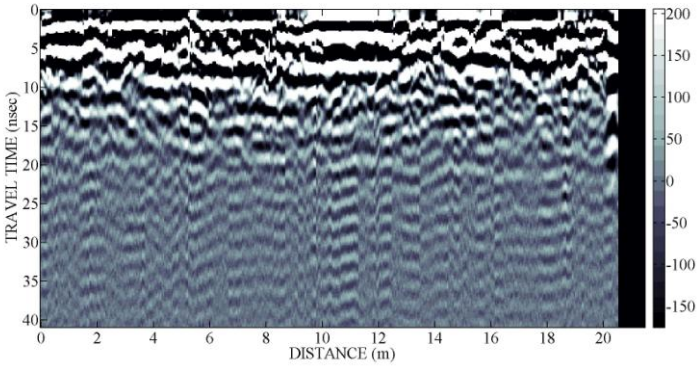
- **Γραμμή S27 (13.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



- **Γραμμή S28 (13.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

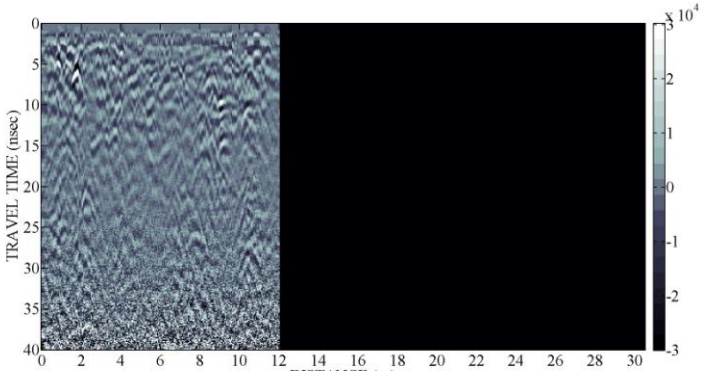


- **Γραμμή S29 (14.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

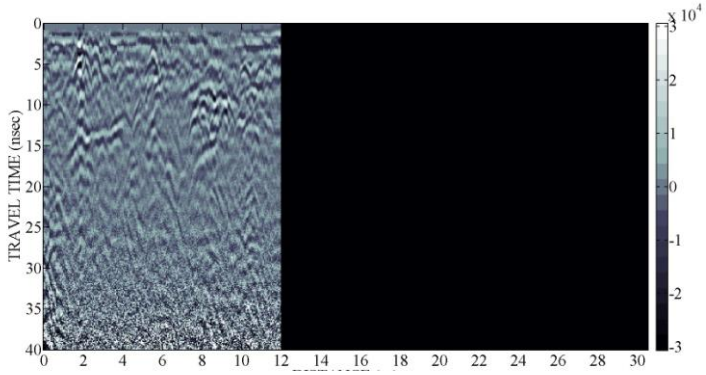


Ανατολικά του Μοναστηριού (Περιοχή Ν)

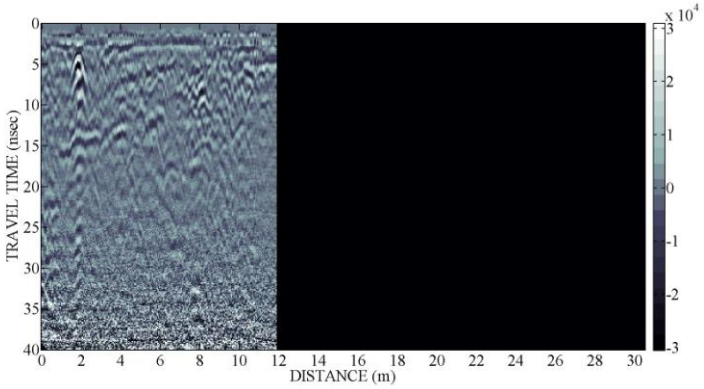
- **Γραμμή N01 (0 m) - Διεύθυνση N-B**



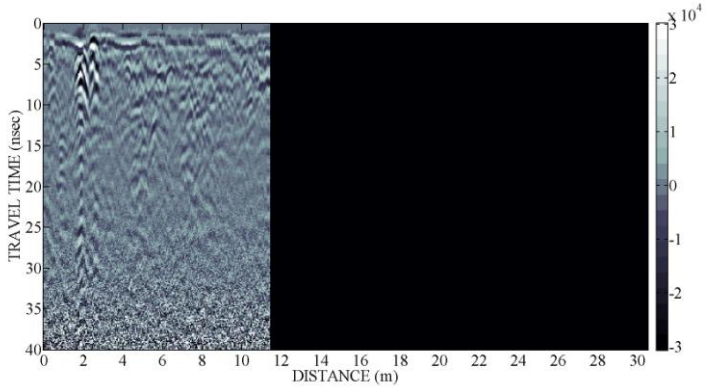
- **Γραμμή N02 (0.50 m) - Διεύθυνση N-B**



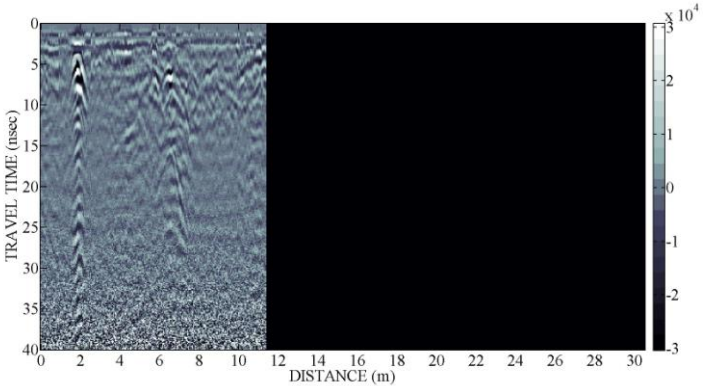
- **Γραμμή N03 (1.00 m) - Διεύθυνση N-B**



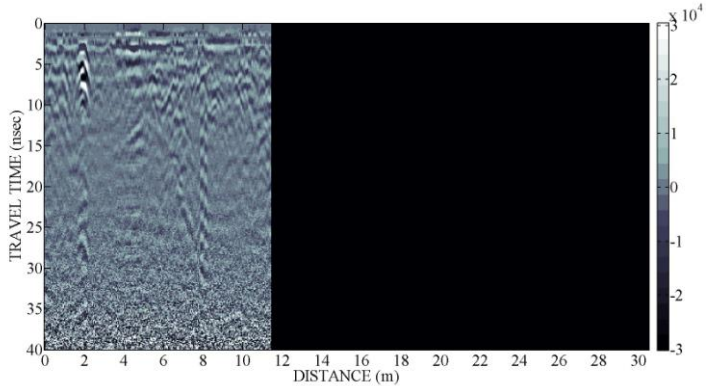
- **Γραμμή N04 (1.50 m) - Διεύθυνση N-B**



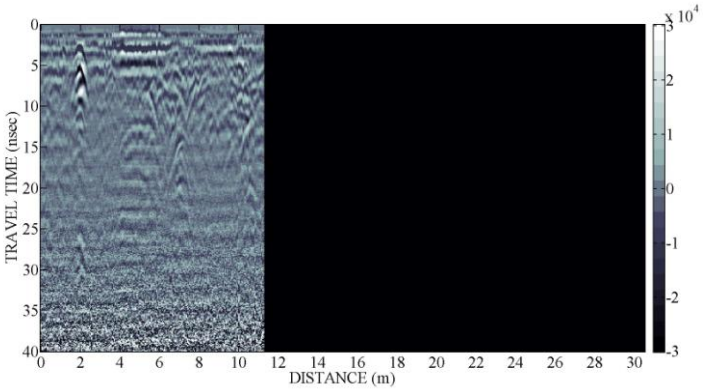
- **Γραμμή N05 (2.00 m) - Διεύθυνση N-B**



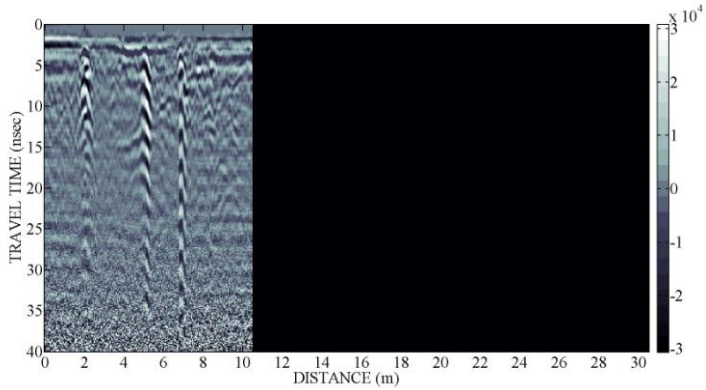
- **Γραμμή N06 (2.50 m) - Διεύθυνση N-B**



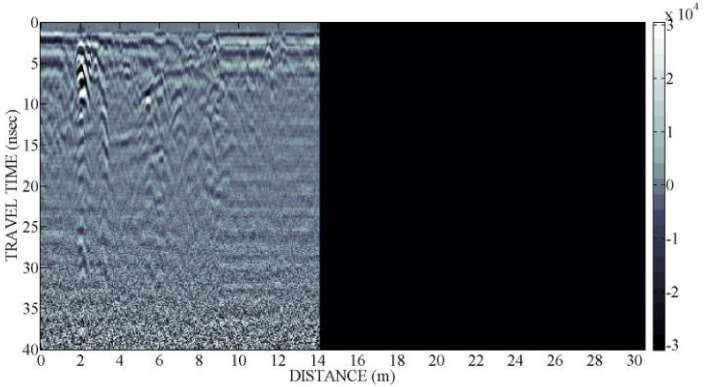
- **Γραμμή N07 (3.00 m) - Διεύθυνση N-B**



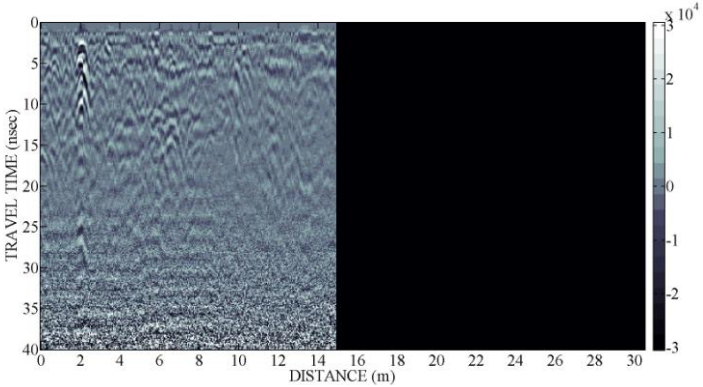
- **Γραμμή N08 (3.50 m) - Διεύθυνση N-B**



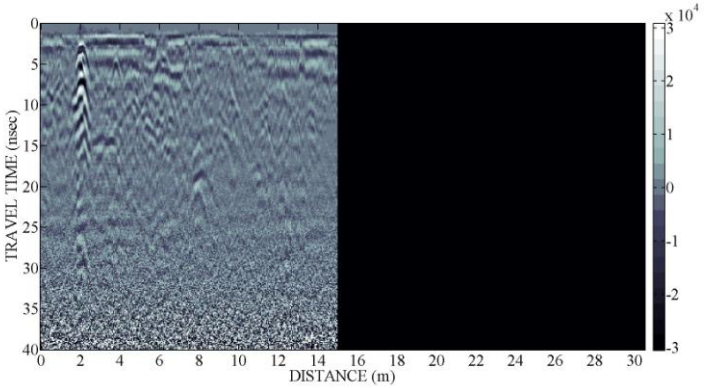
- **Γραμμή N09 (4.00 m) - Διεύθυνση N-B**



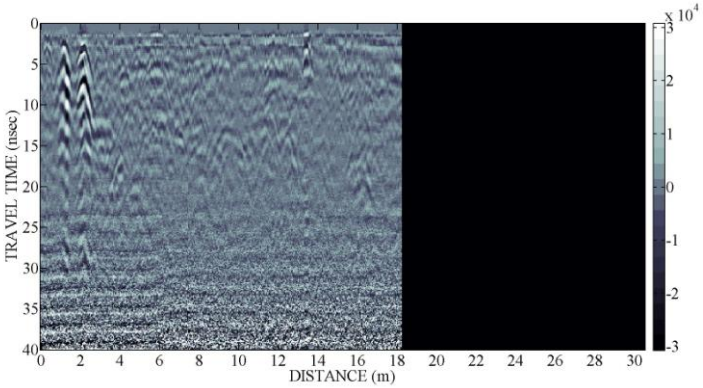
- **Γραμμή N10 (4.50 m) - Διεύθυνση N-B**



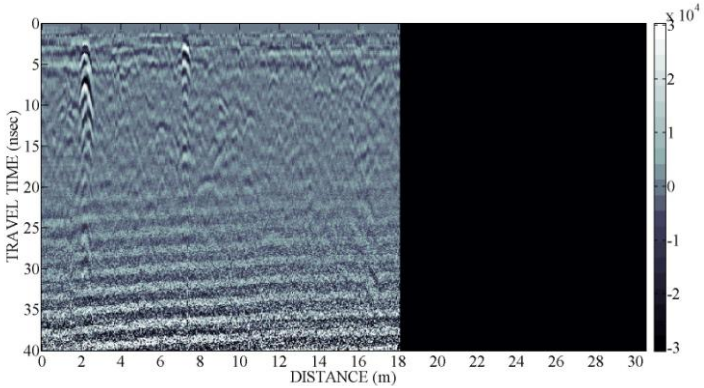
- **Γραμμή N11 (5.00 m) - Διεύθυνση N-B**



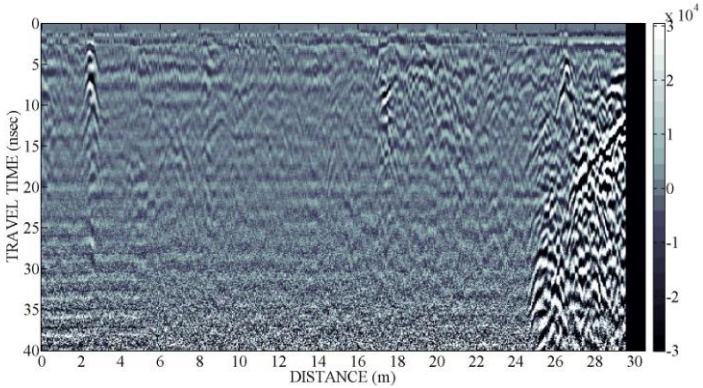
- **Γραμμή N12 (5.50 m) - Διεύθυνση N-B**



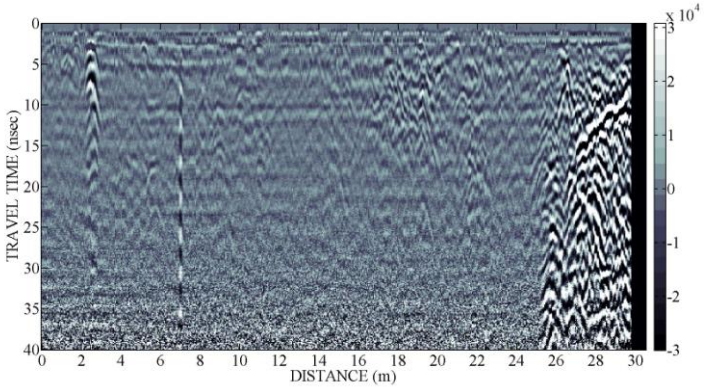
- **Γραμμή N13 (6.00 m) - Διεύθυνση N-B**



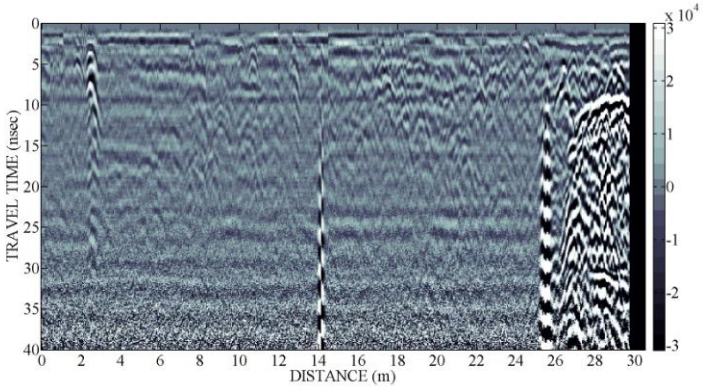
- **Γραμμή N14 (6.50 m) - Διεύθυνση N-B**



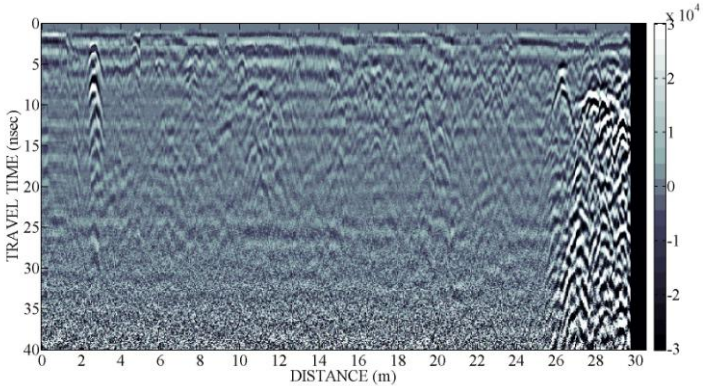
- **Γραμμή N15 (7.00 m) - Διεύθυνση N-B**



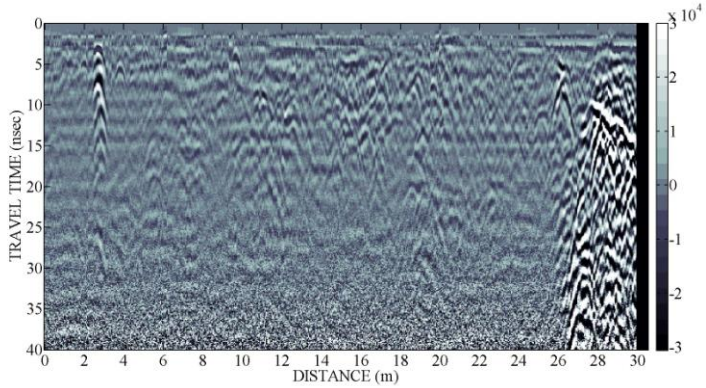
- **Γραμμή N16 (7.50 m) - Διεύθυνση N-B**



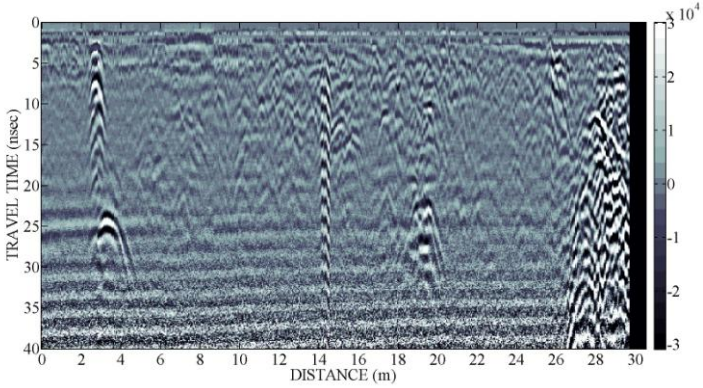
- **Γραμμή N17 (8.00 m) - Διεύθυνση N-B**



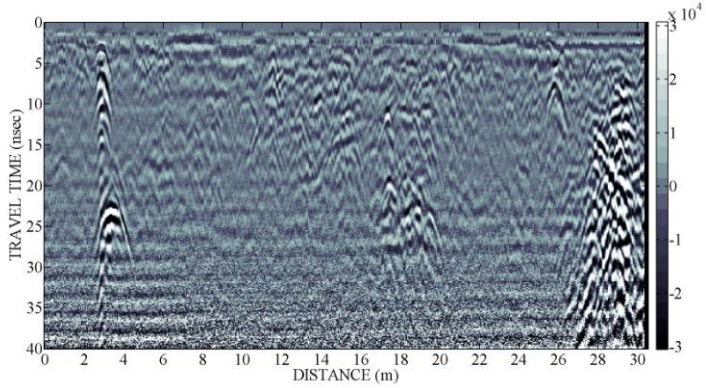
- **Γραμμή N18 (8.50 m) - Διεύθυνση N-B**



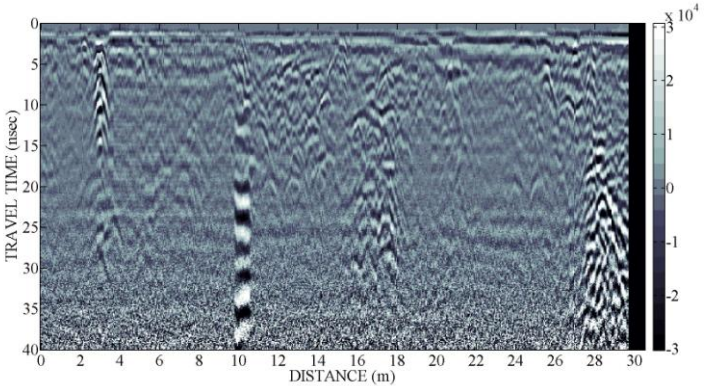
- **Γραμμή N19 (9.00 m) - Διεύθυνση N-B**



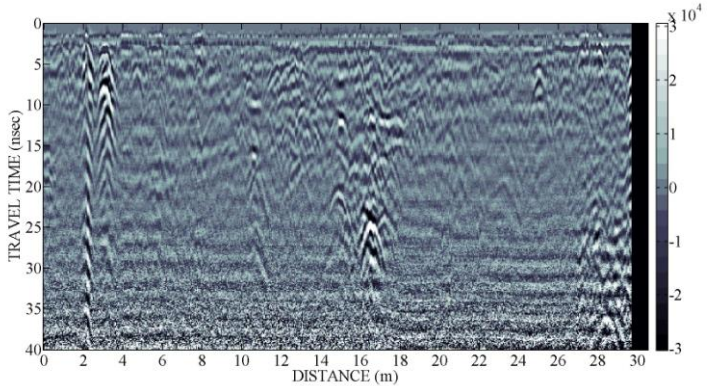
- **Γραμμή N20 (9.50 m) - Διεύθυνση N-B**



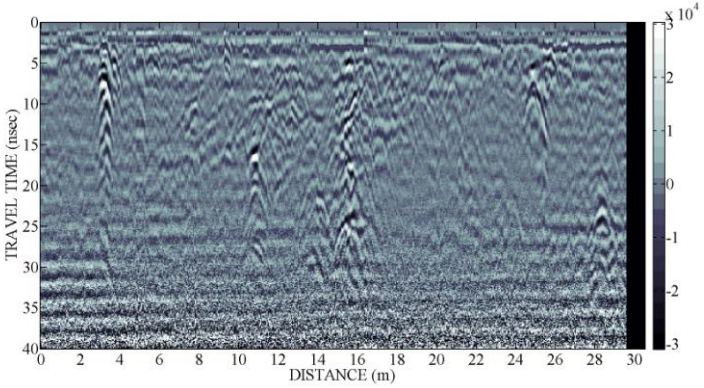
- **Γραμμή N21 (10.00 m) - Διεύθυνση N-B**



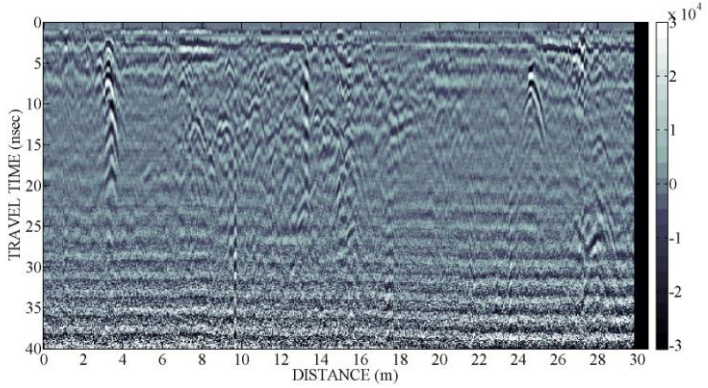
- **Γραμμή N22 (10.50 m) - Διεύθυνση N-B**



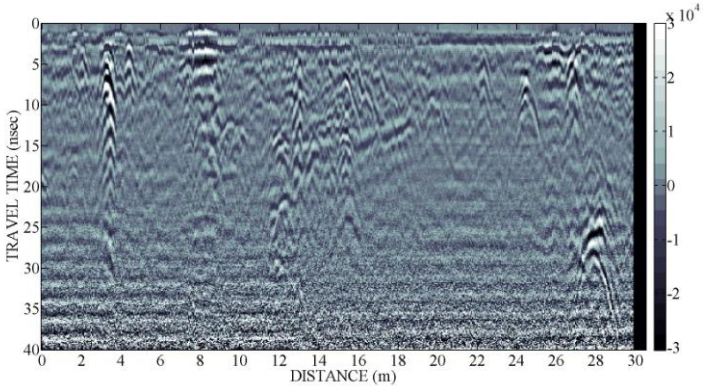
- **Γραμμή N23 (11.00 m) - Διεύθυνση N-B**



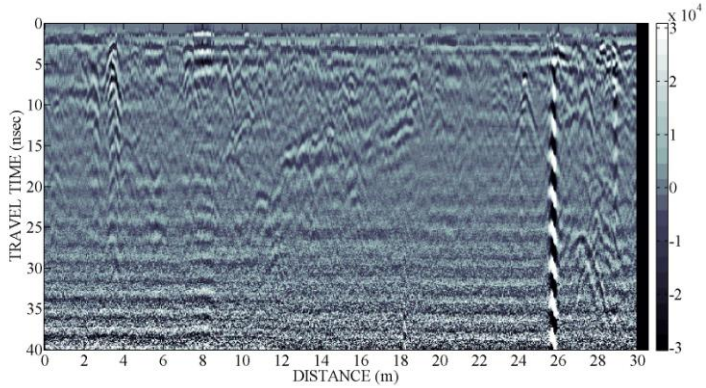
- **Γραμμή N24 (11.50 m) - Διεύθυνση N-B**



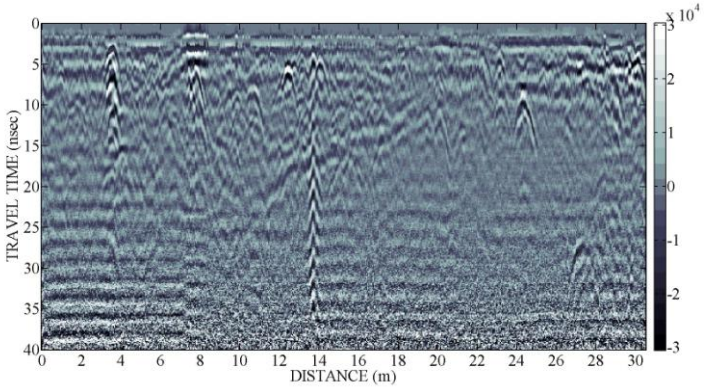
- **Γραμμή N25 (12.00 m) - Διεύθυνση N-B**



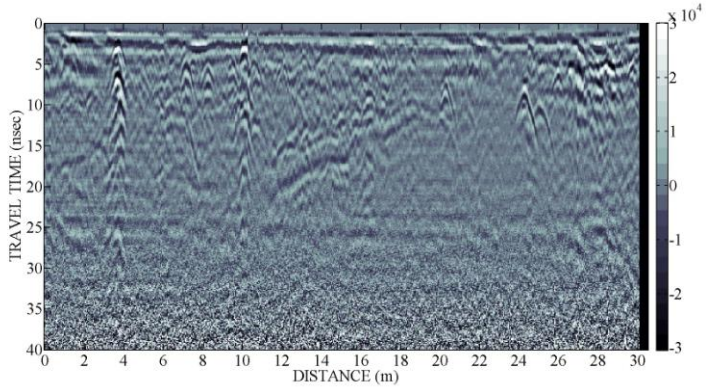
- **Γραμμή N26 (12.50 m) - Διεύθυνση N-B**



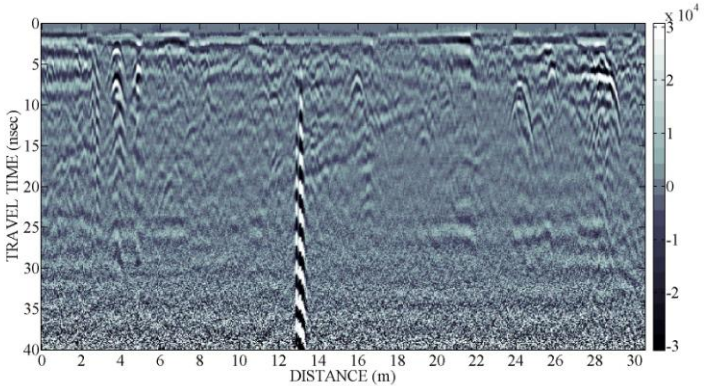
- **Γραμμή N27 (13.00 m) - Διεύθυνση N-B**



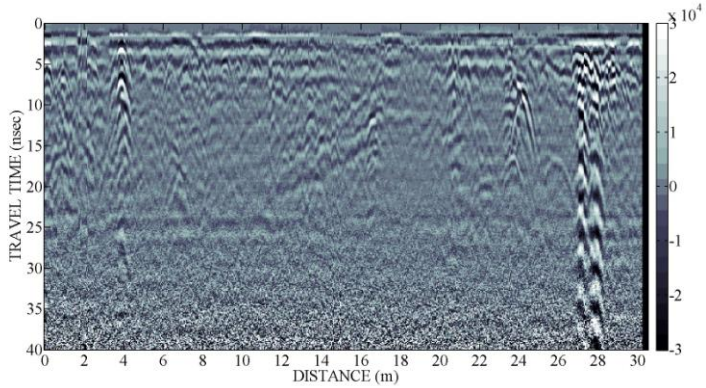
- **Γραμμή N28 (13.50 m) - Διεύθυνση N-B**



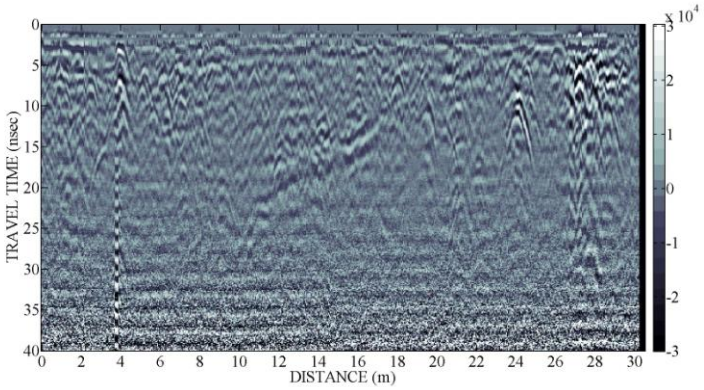
- **Γραμμή N29 (14.00 m) - Διεύθυνση N-B**



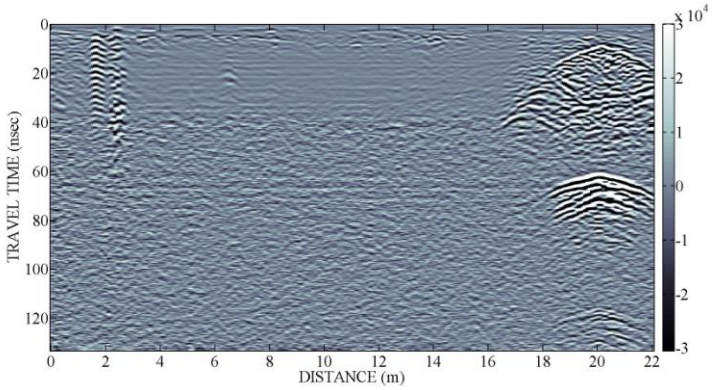
- **Γραμμή N30 (14.50 m) - Διεύθυνση N-B**



- **Γραμμή N31 (15.00 m) - Διεύθυνση N-B**

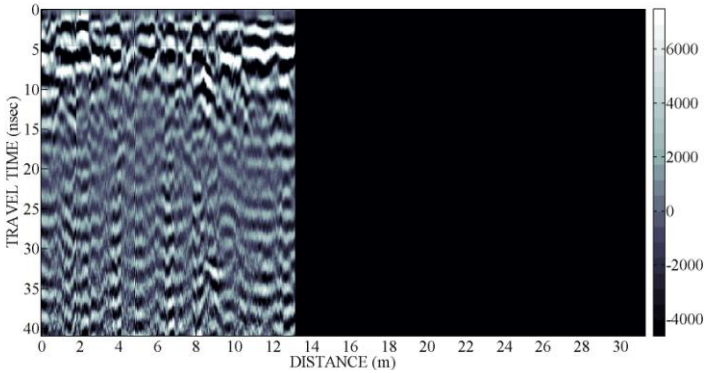


- **Γραμμή διασκόπησης με διεύθυνση Δ-Α**

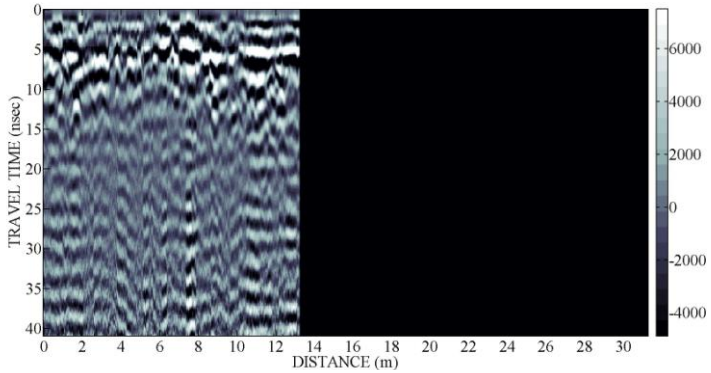


Νοτιανατολικά του Χώρου Στάθμευσης (Περιοχή Ε)

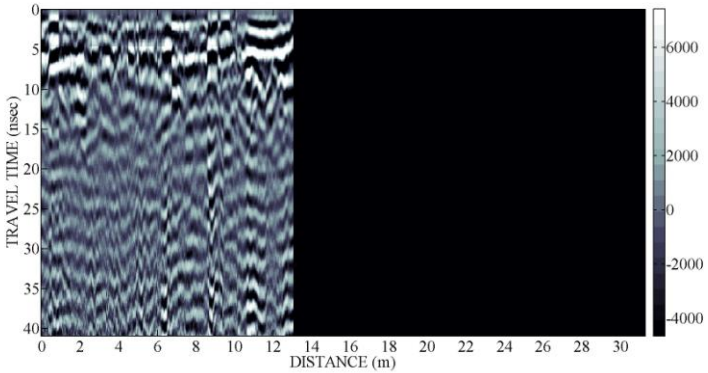
- **Γραμμή Ε01 (0 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



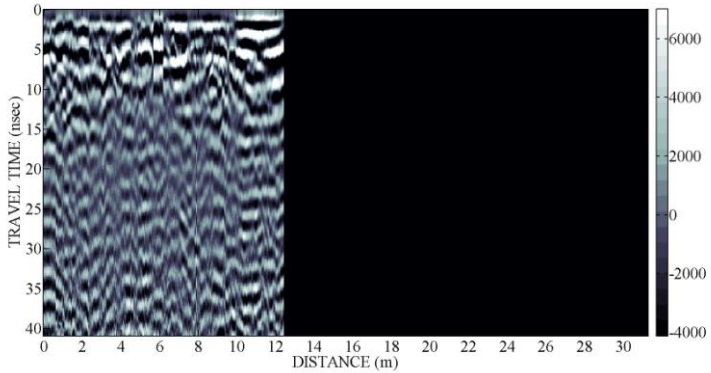
- **Γραμμή Ε02 (0.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



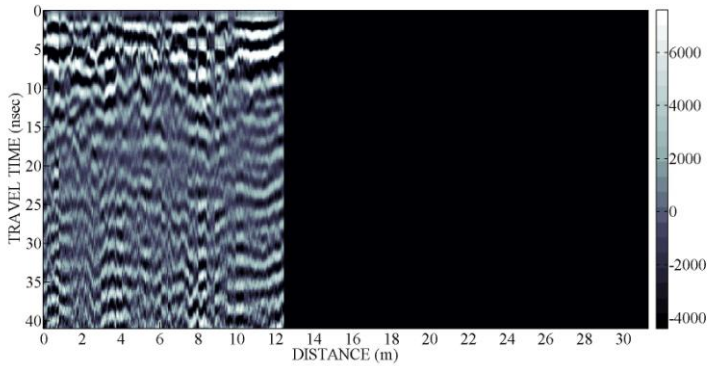
- **Γραμμή Ε03 (1.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



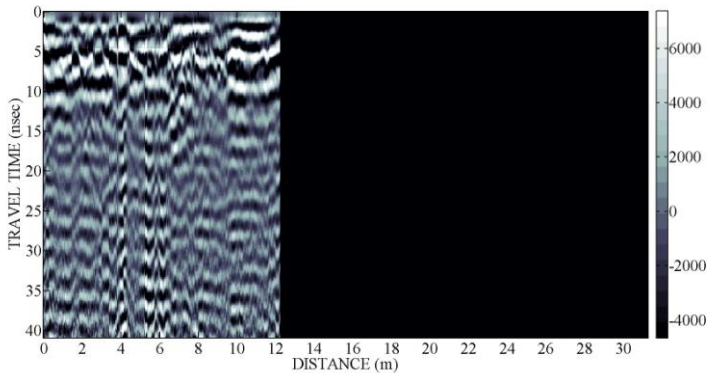
- **Γραμμή Ε04 (1.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



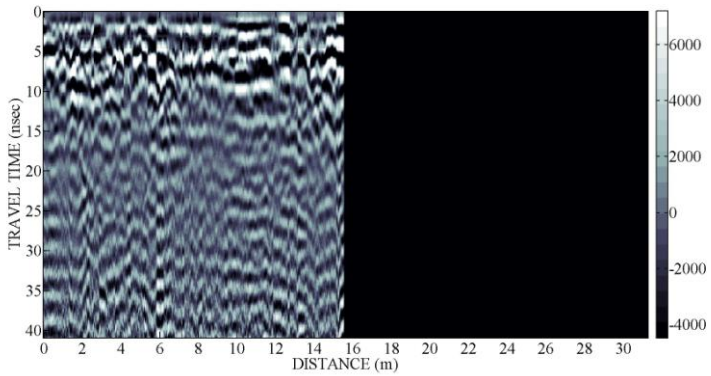
- **Γραμμή E05 (2.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



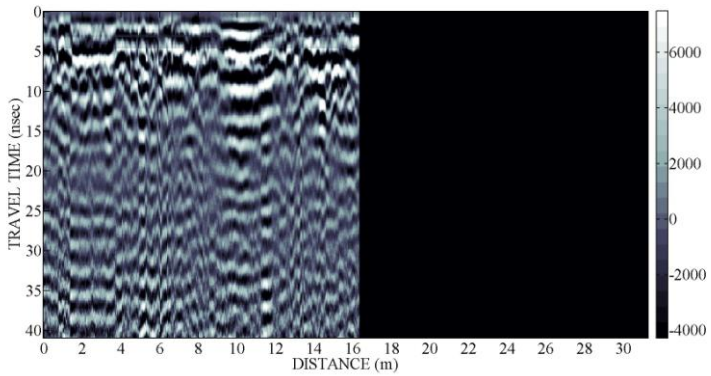
- **Γραμμή E06 (2.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



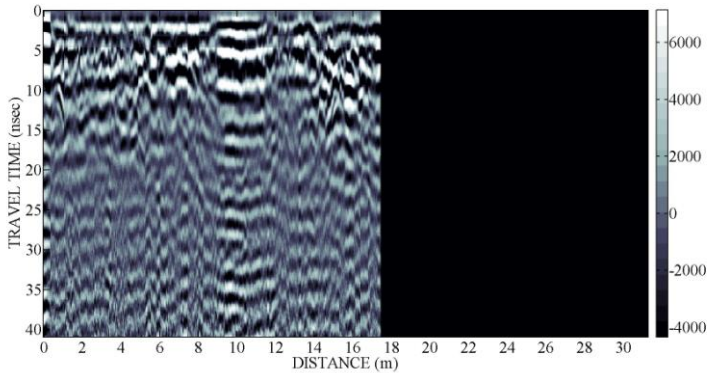
- **Γραμμή E07 (3.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



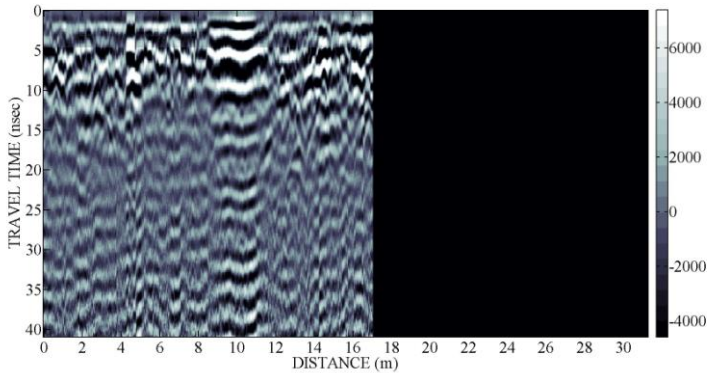
- **Γραμμή E08 (3.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



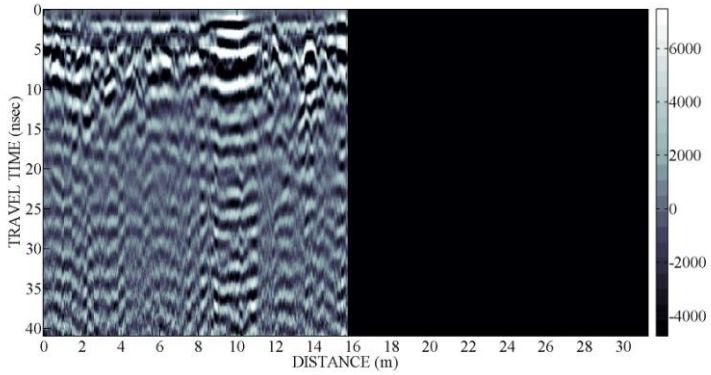
- **Γραμμή E09 (4.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



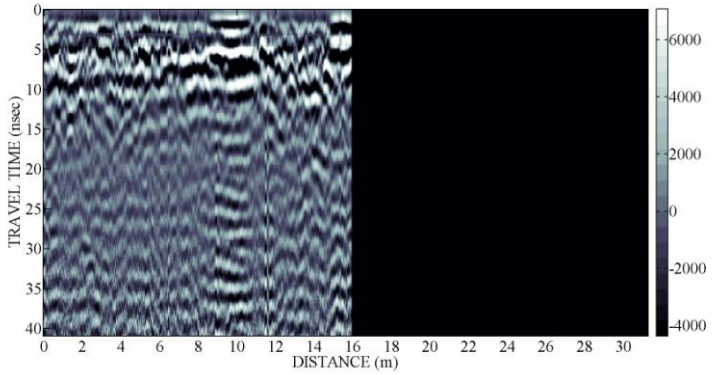
- **Γραμμή E10 (4.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



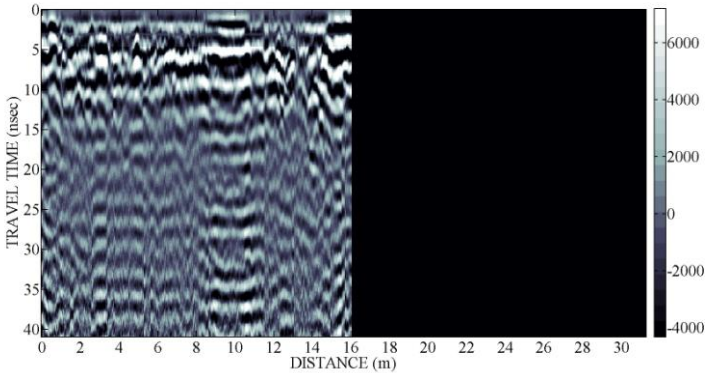
- **Γραμμή E11 (5.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



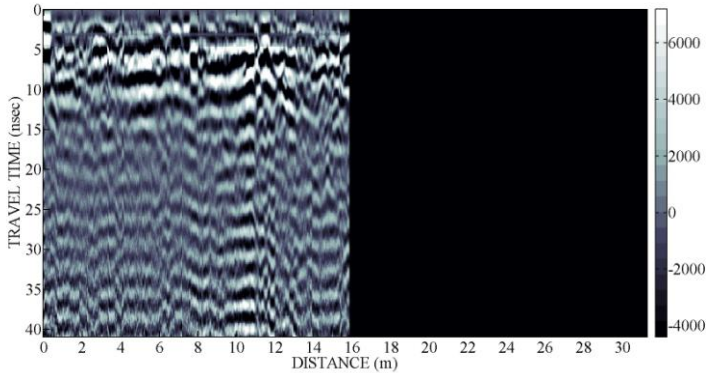
- **Γραμμή E12 (5.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



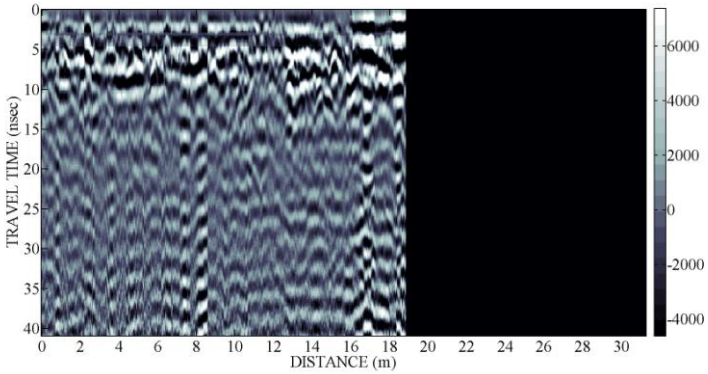
- **Γραμμή Ε13 (6.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



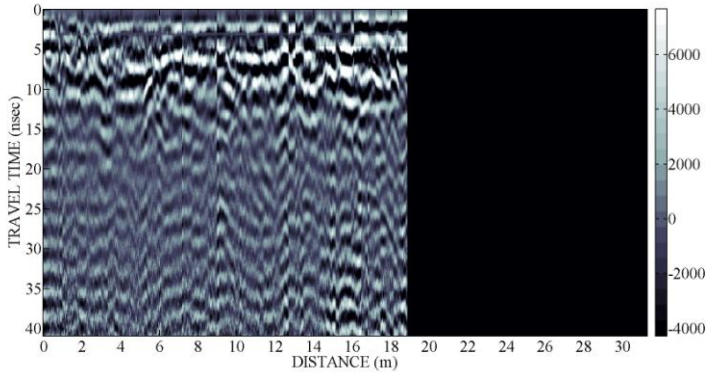
- **Γραμμή Ε14 (6.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



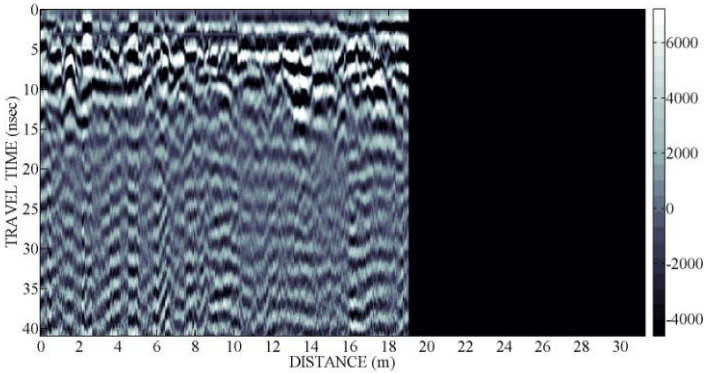
- **Γραμμή Ε15 (7.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



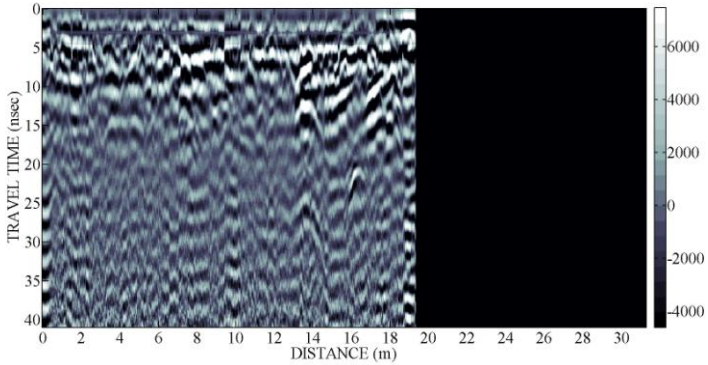
- **Γραμμή Ε16 (7.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



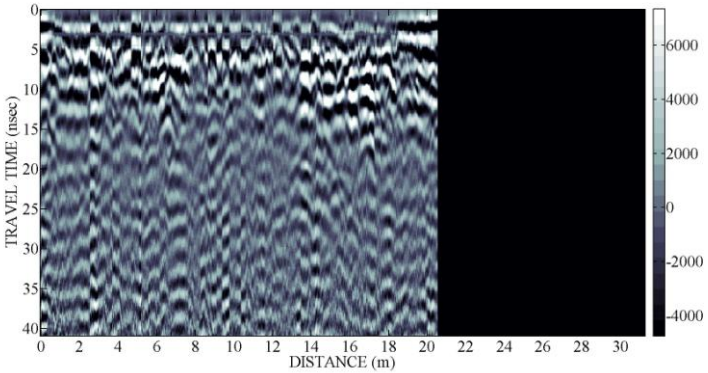
- **Γραμμή E17 (8.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



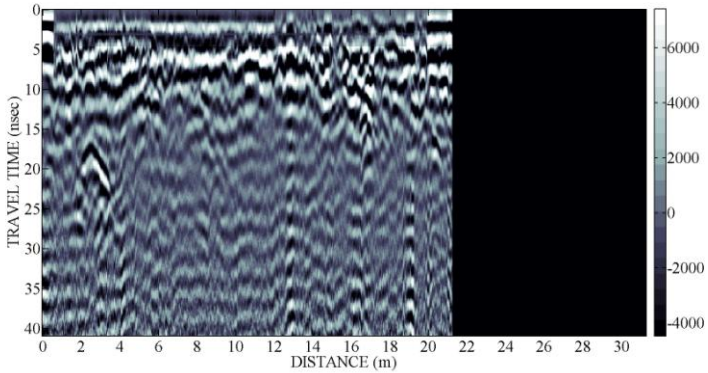
- **Γραμμή E18 (8.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



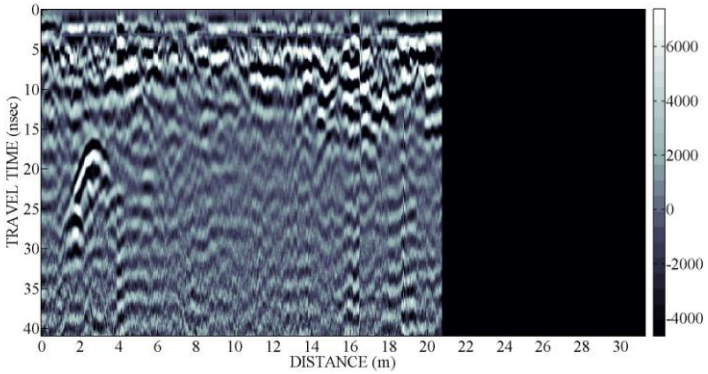
- **Γραμμή E19 (9.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



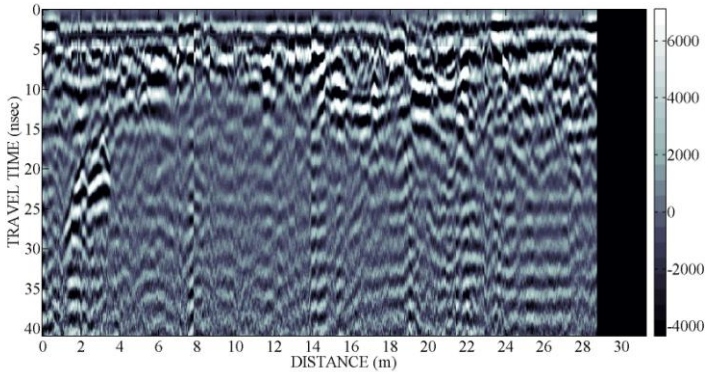
- **Γραμμή E20 (9.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



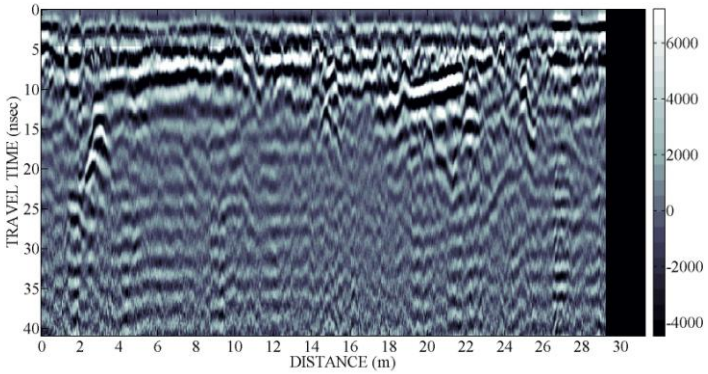
- **Γραμμή Ε21 (10.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



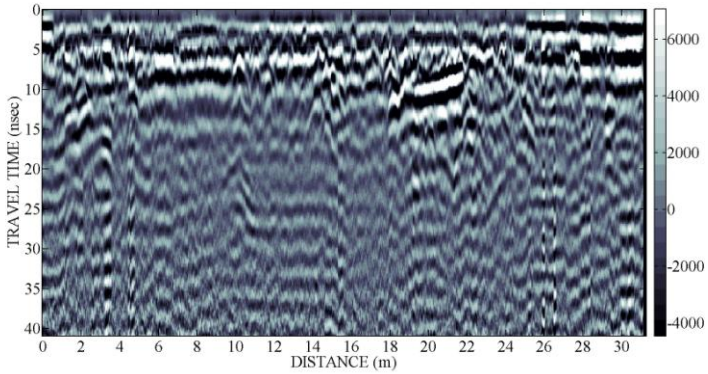
- **Γραμμή Ε22 (10.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



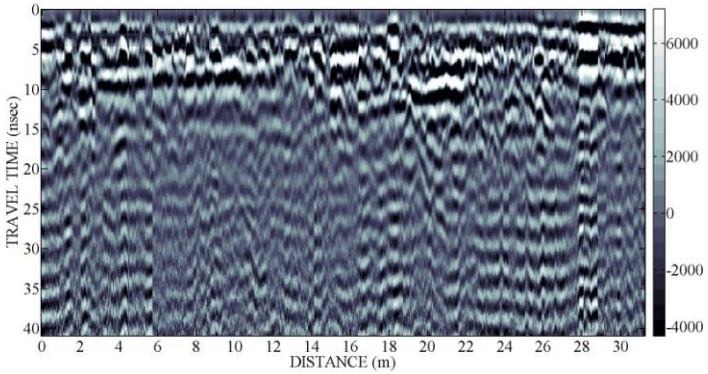
- **Γραμμή Ε23 (11.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



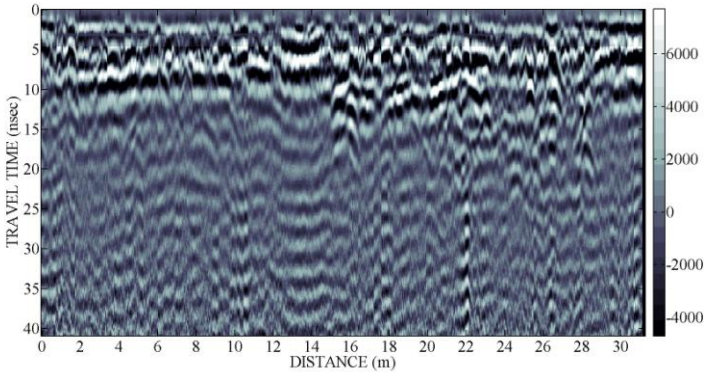
- **Γραμμή Ε24 (11.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



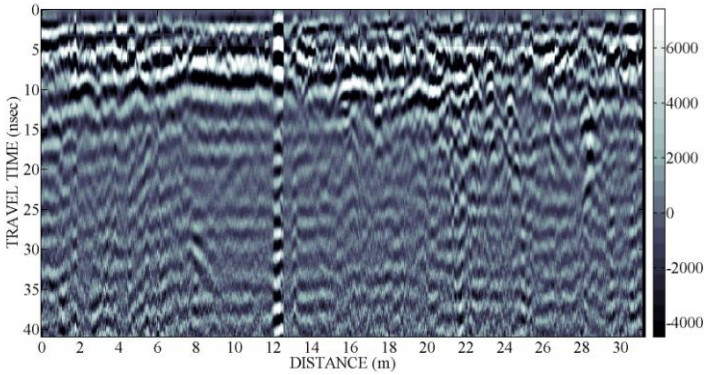
- **Γραμμή Ε25 (12.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



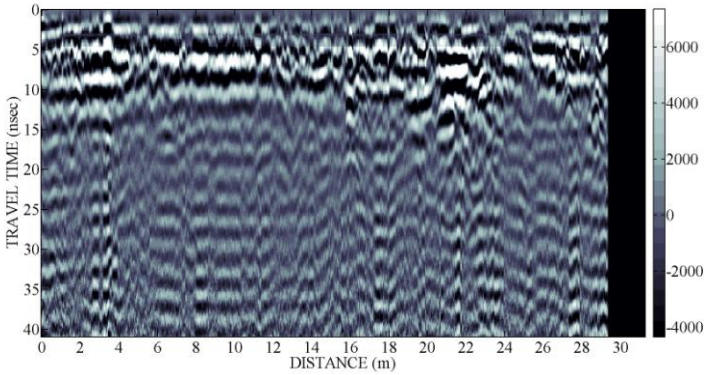
- **Γραμμή Ε26 (12.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



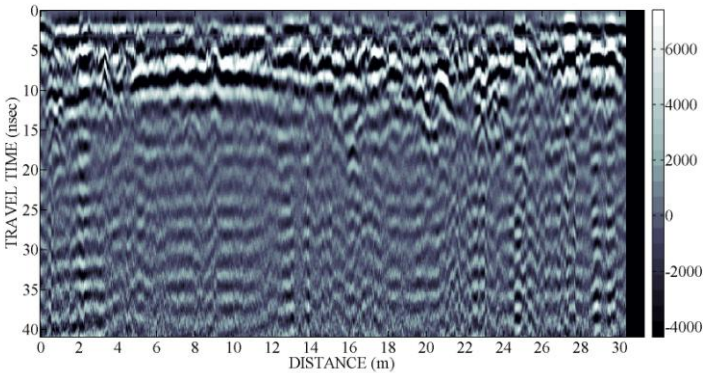
- **Γραμμή Ε27 (13.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



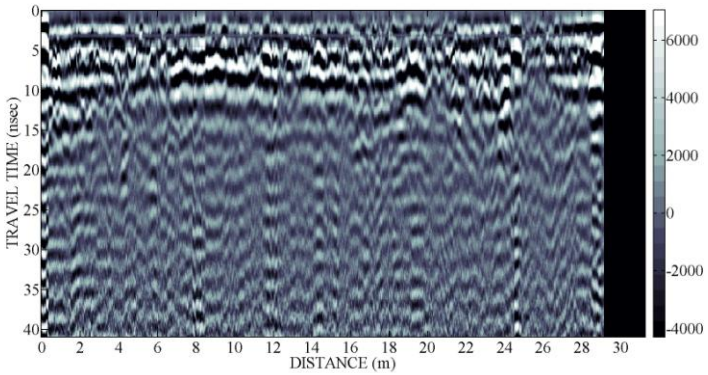
- **Γραμμή Ε28 (13.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



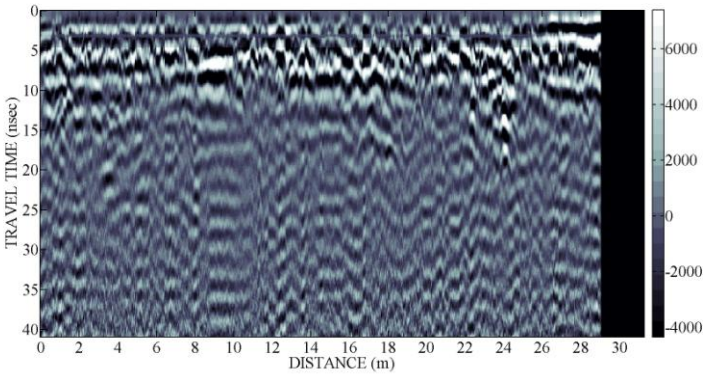
- **Γραμμή Ε29 (14.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



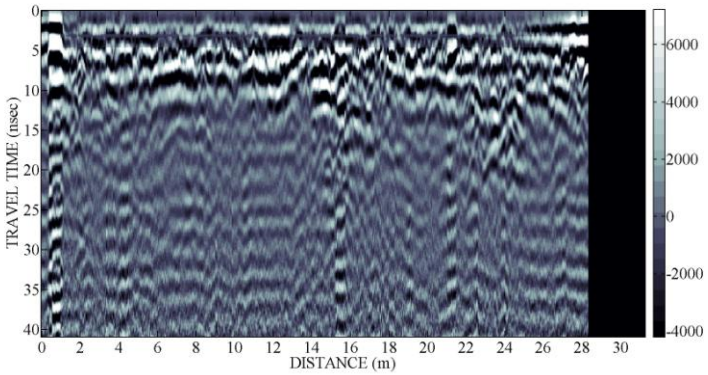
- **Γραμμή Ε30 (14.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



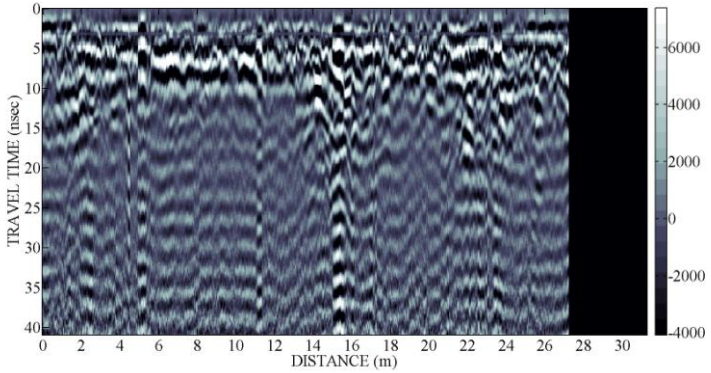
- **Γραμμή Ε31 (15.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



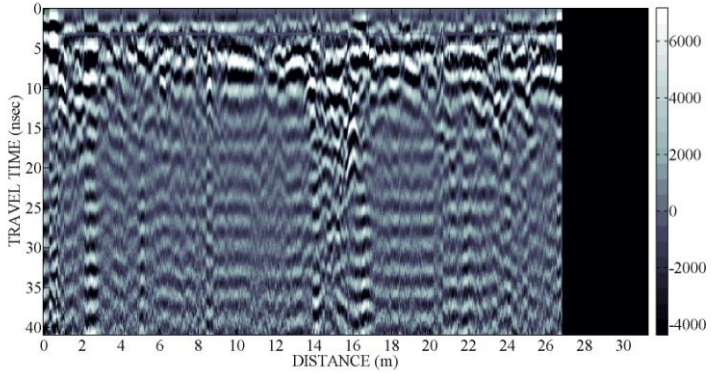
- **Γραμμή Ε32 (15.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



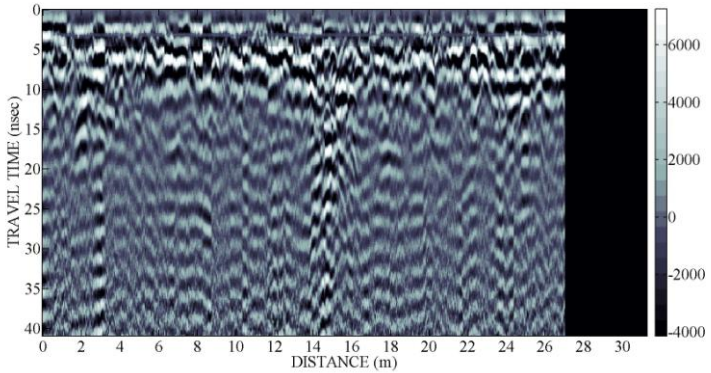
- **Γραμμή Ε33 (16.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



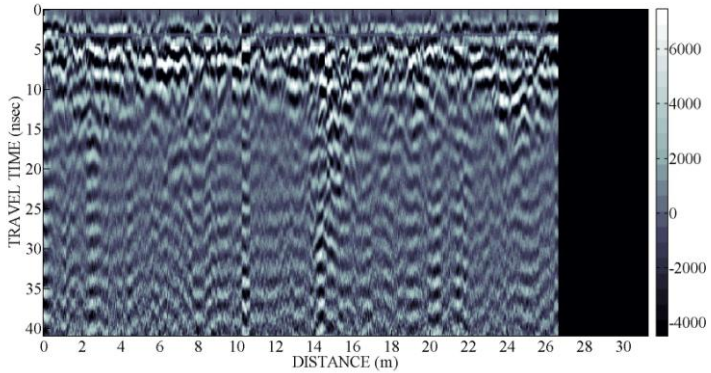
- **Γραμμή Ε34 (16.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



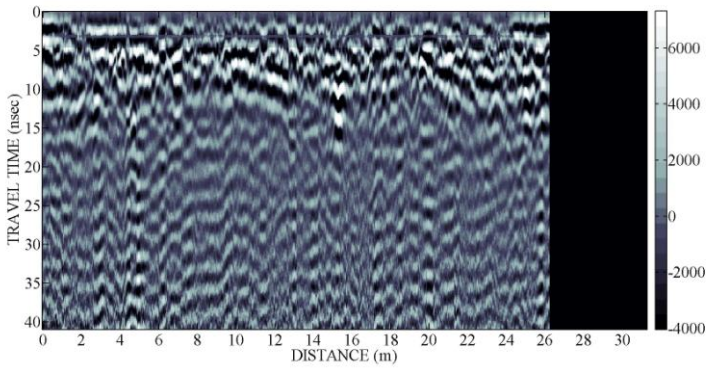
- **Γραμμή Ε35 (17.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



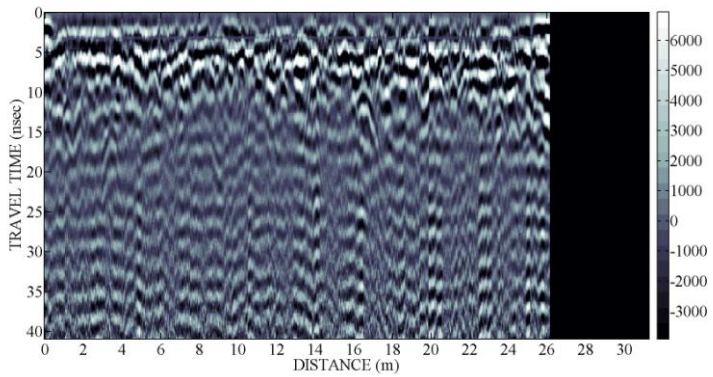
- **Γραμμή ΡΕ36 (17.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



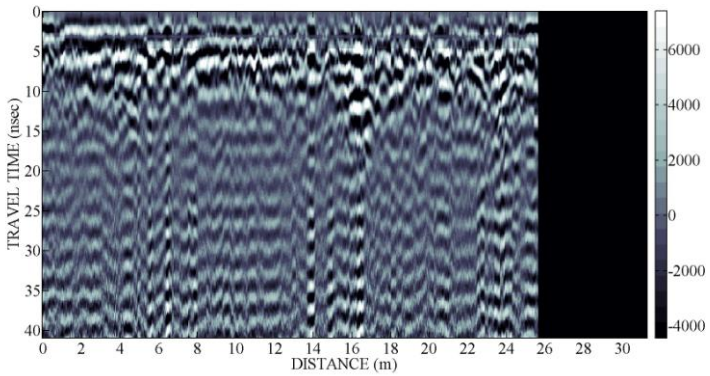
- **Γραμμή Ε37 (18.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



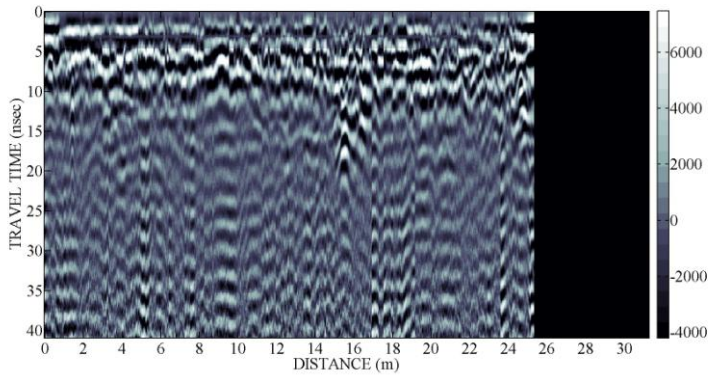
- **Γραμμή Ε38 (18.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



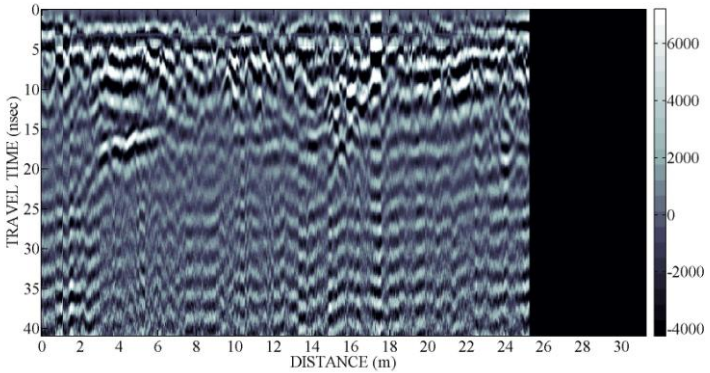
- **Γραμμή Ε39 (19.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



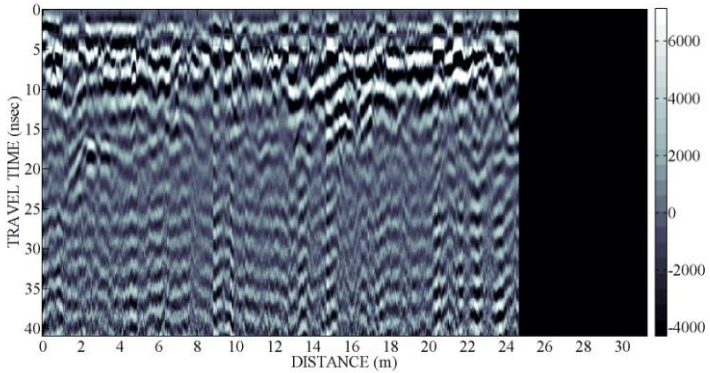
- **Γραμμή Ε40 (19.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



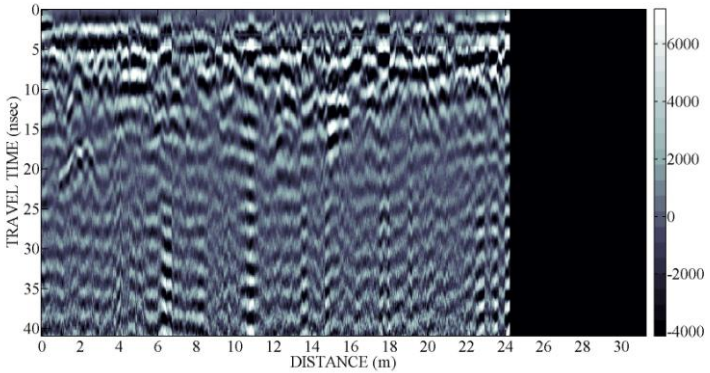
- **Γραμμή E41 (20.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



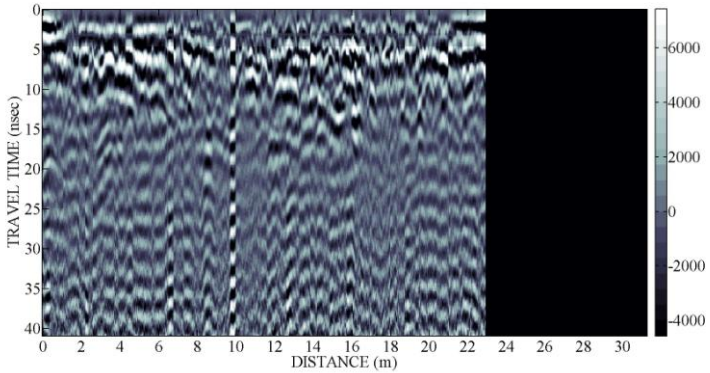
- **Γραμμή E42 (20.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



- **Γραμμή E43 (21.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**

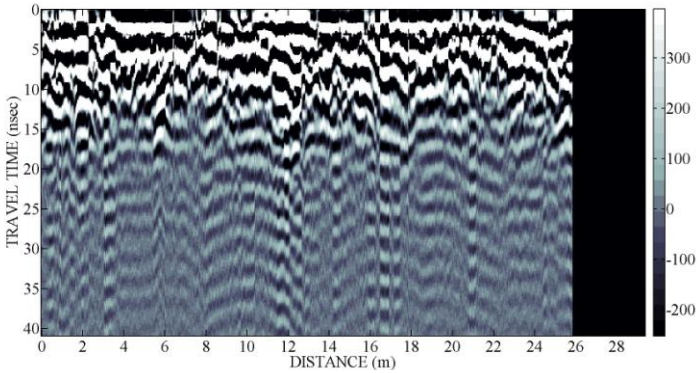


- **Γραμμή E44 (21.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**

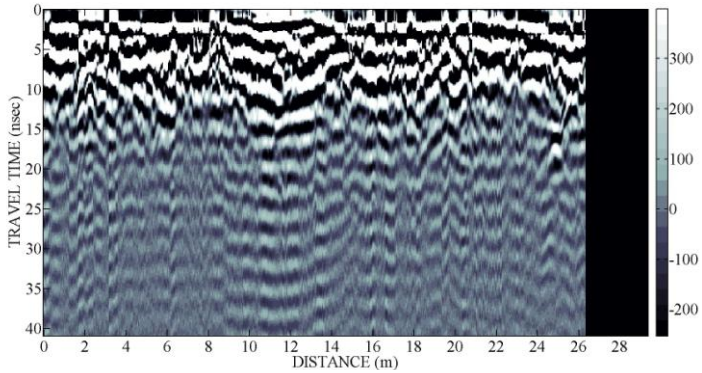


Νοτιοδυτικά του Χώρου Στάθμευσης (Περιοχή W)

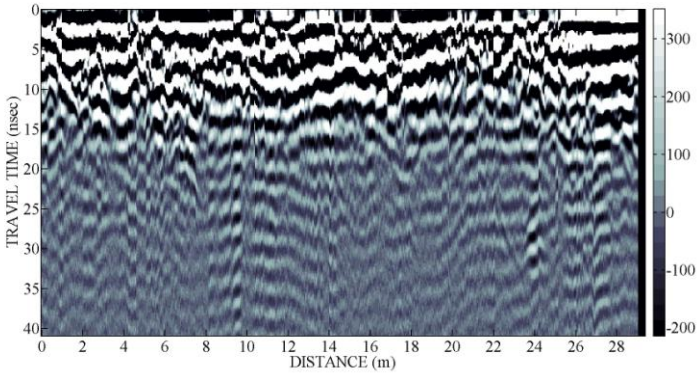
- **Γραμμή W01 (0 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



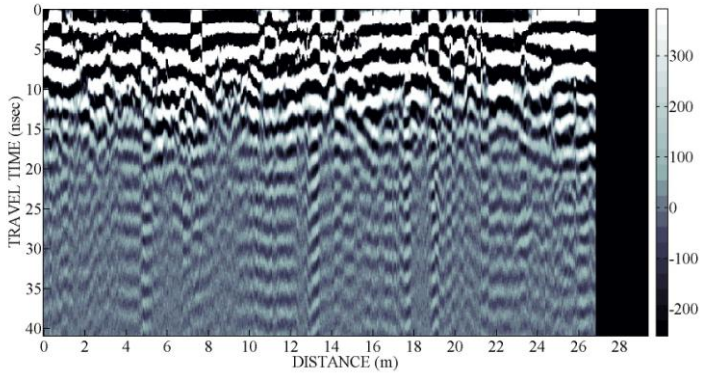
- **Γραμμή W02 (0.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



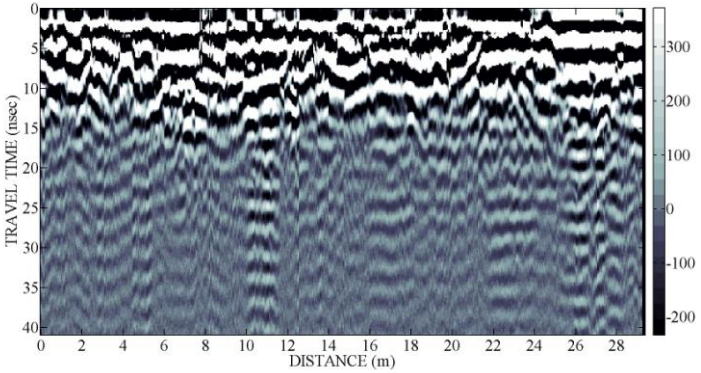
- **Γραμμή W03 (1.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



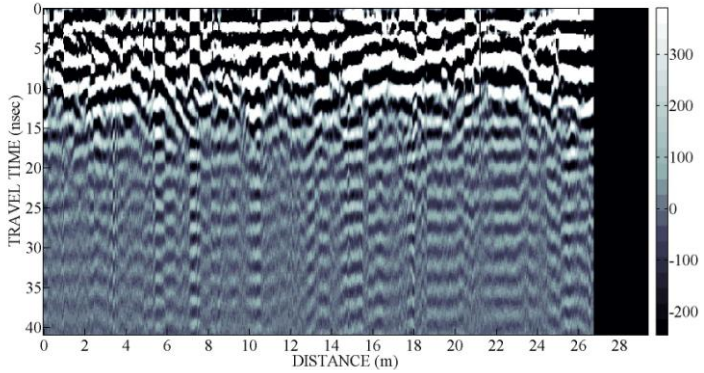
- **Γραμμή W04 (1.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



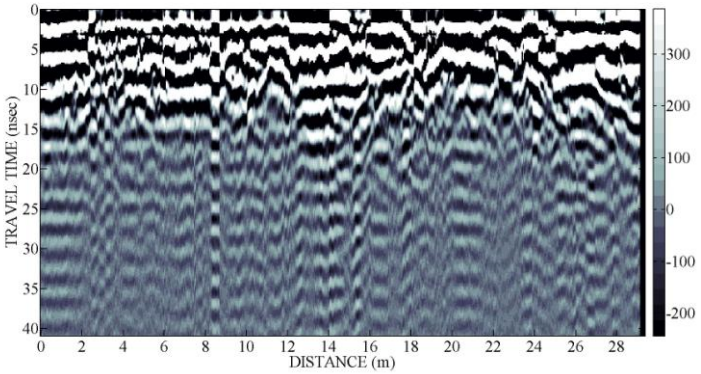
- **Γραμμή W05 (2.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



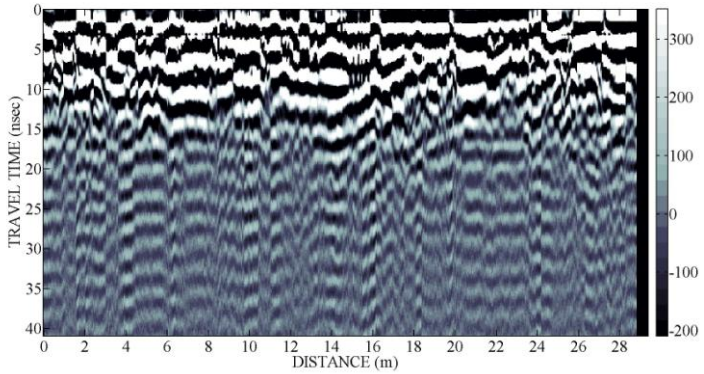
- **Γραμμή W06 (2.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



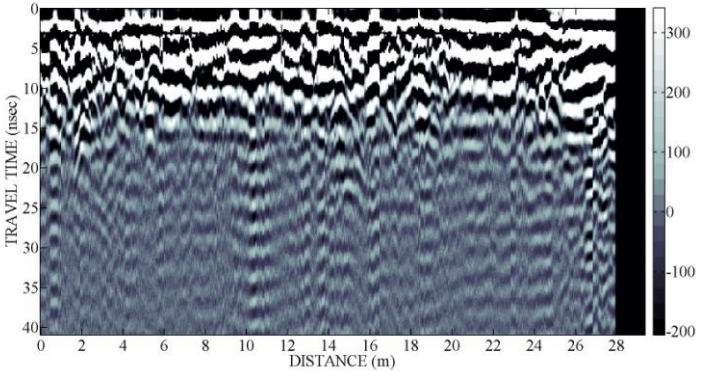
- **Γραμμή W07 (3.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



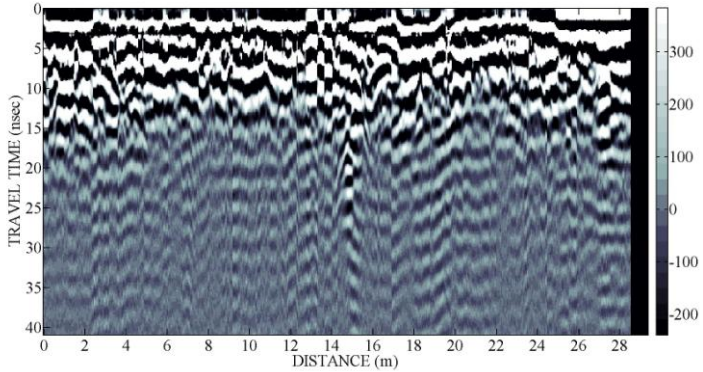
- **Γραμμή W08 (3.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



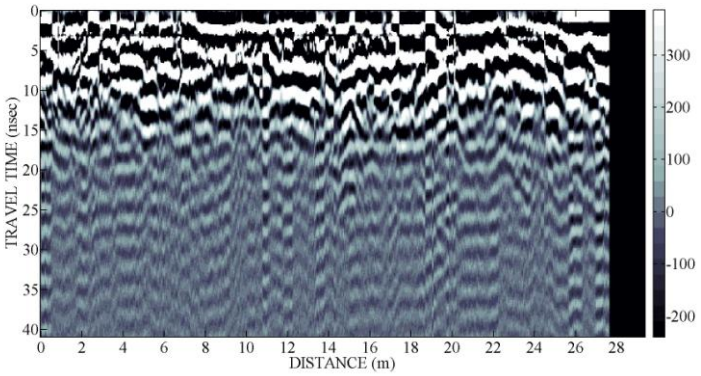
- **Γραμμή W09 (4.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



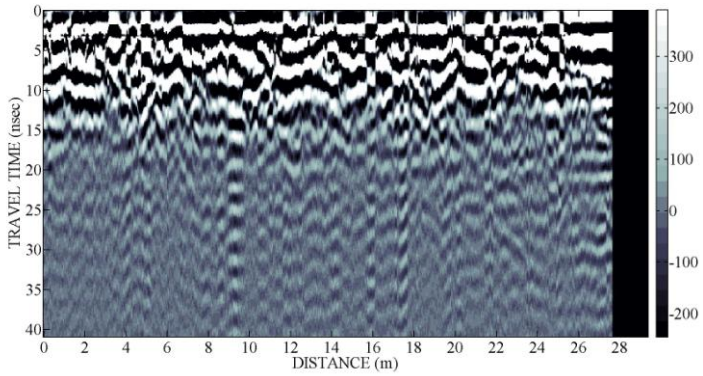
- **Γραμμή W10 (4.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



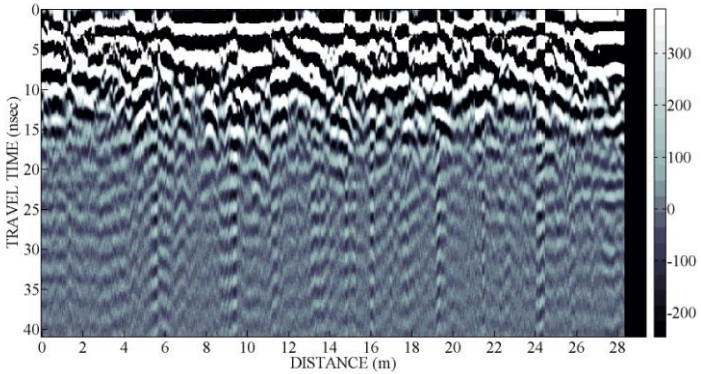
- **Γραμμή W11 (5.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



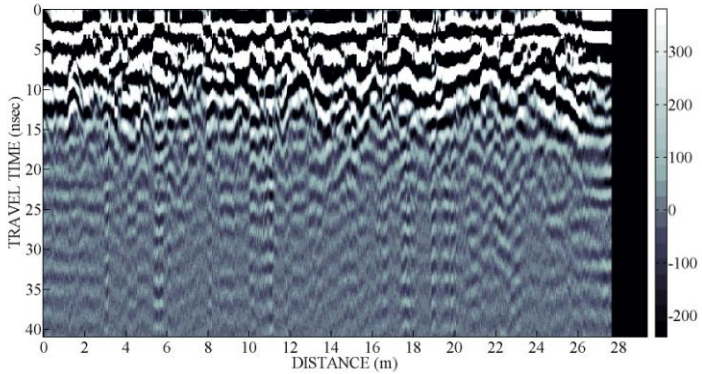
- **Γραμμή W12 (5.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



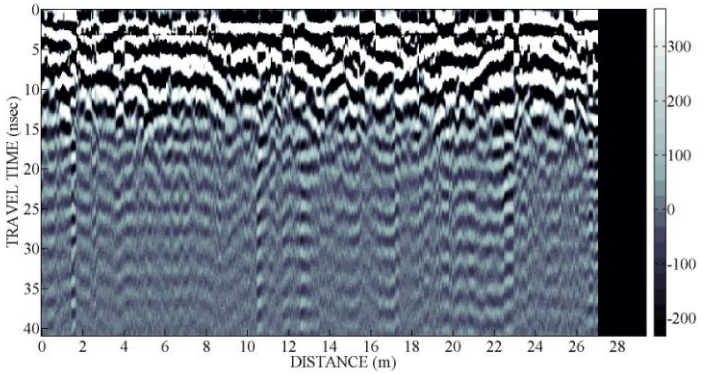
- **Γραμμή W13 (6.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



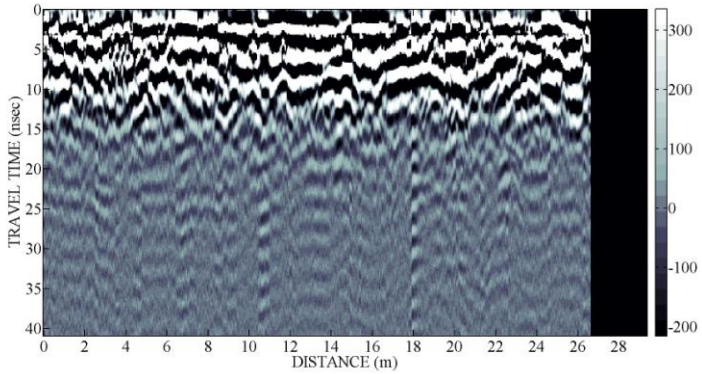
- **Γραμμή W14 (6.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



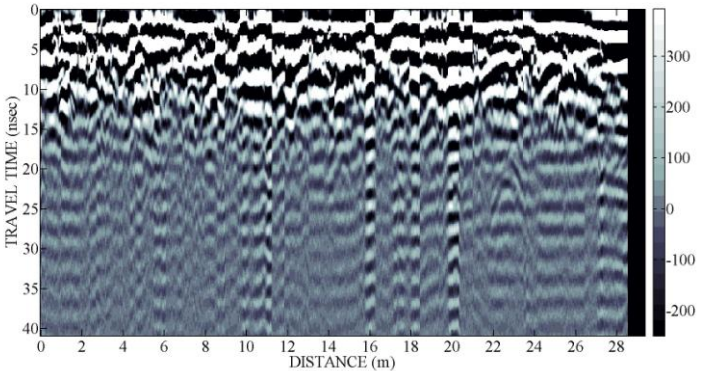
- **Γραμμή W15 (7.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



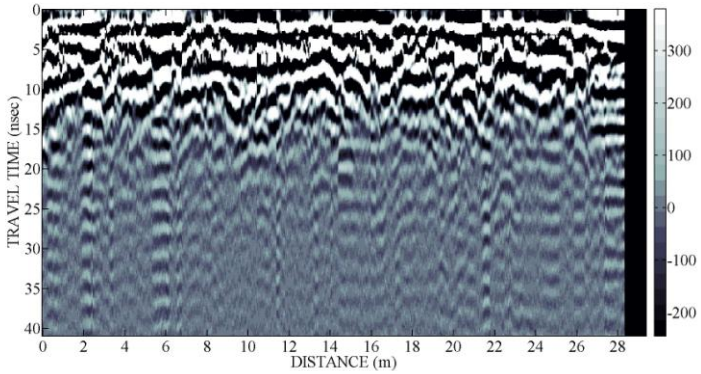
- **Γραμμή W16 (7.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



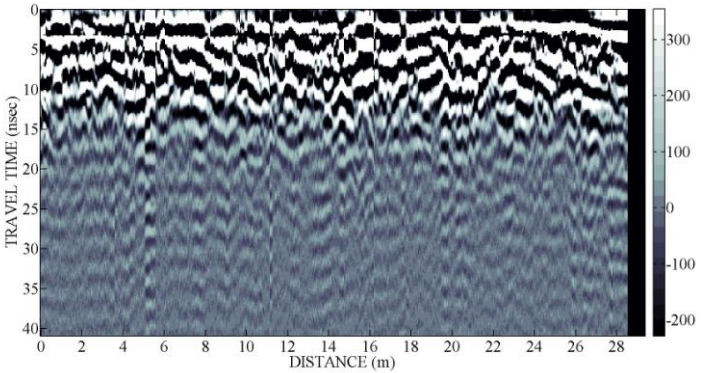
- **Γραμμή W17 (8.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



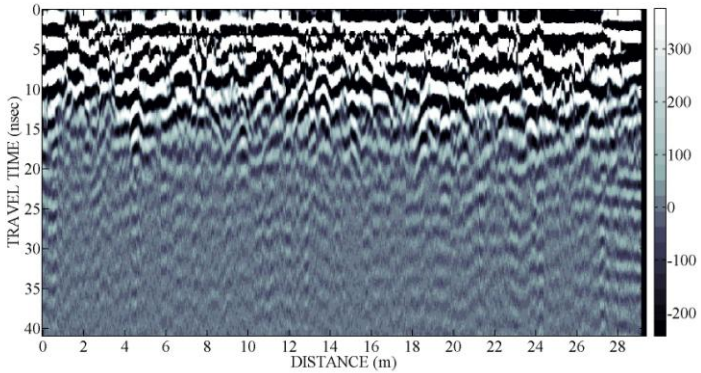
- **Γραμμή W18 (8.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



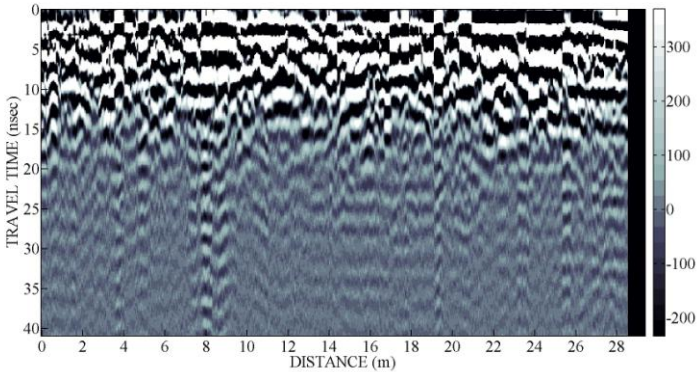
- **Γραμμή W19 (9.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



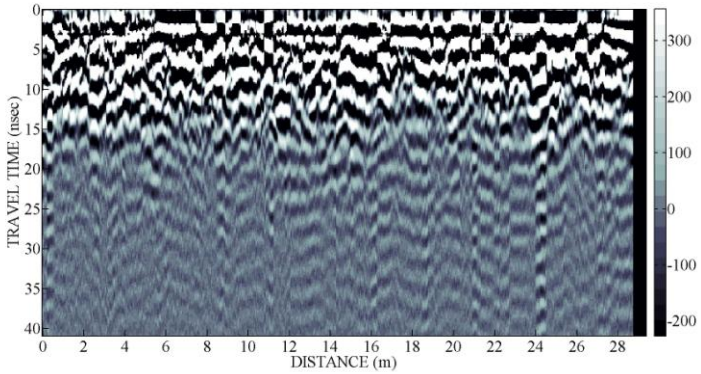
- **Γραμμή W20 (9.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



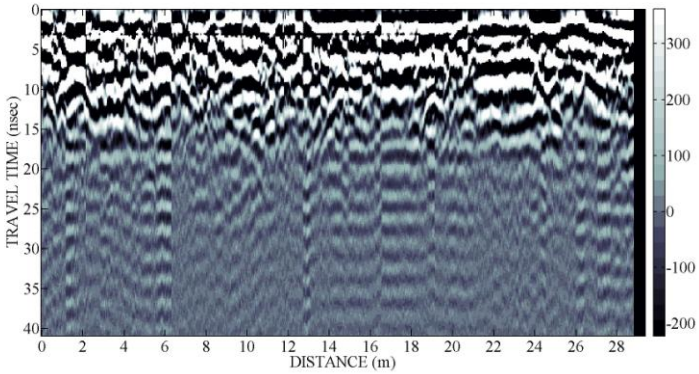
- **Γραμμή W21 (10.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



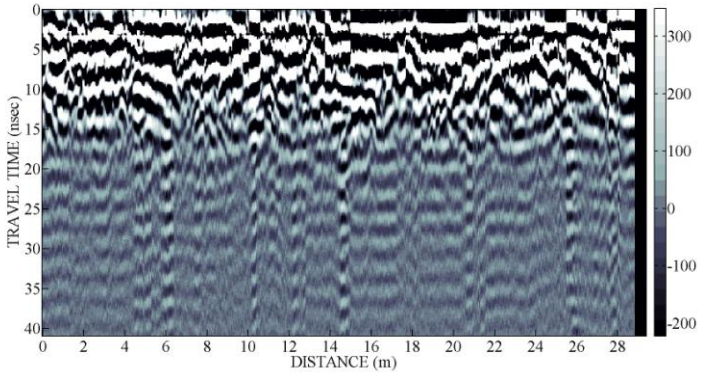
- **Γραμμή W22 (10.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



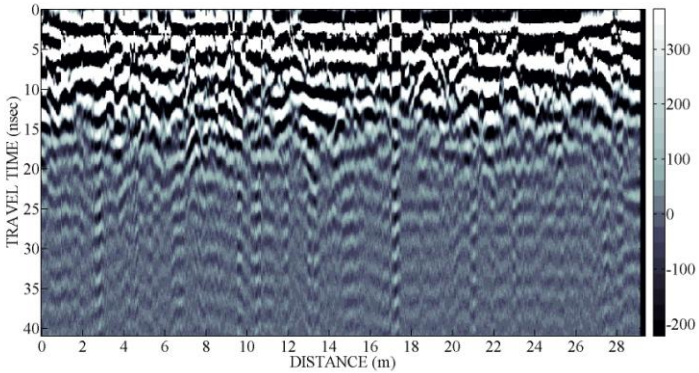
- **Γραμμή W23 (11.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



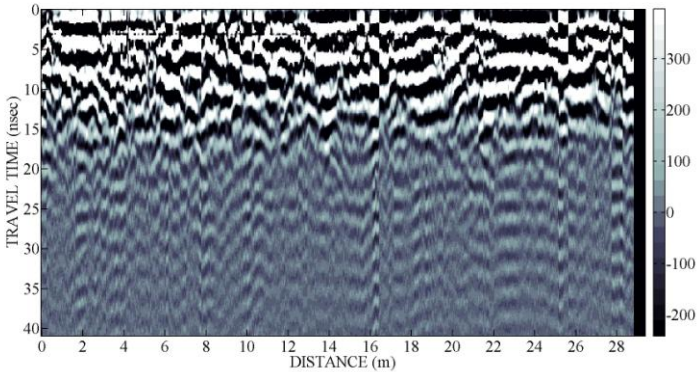
- **Γραμμή W24 (11.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



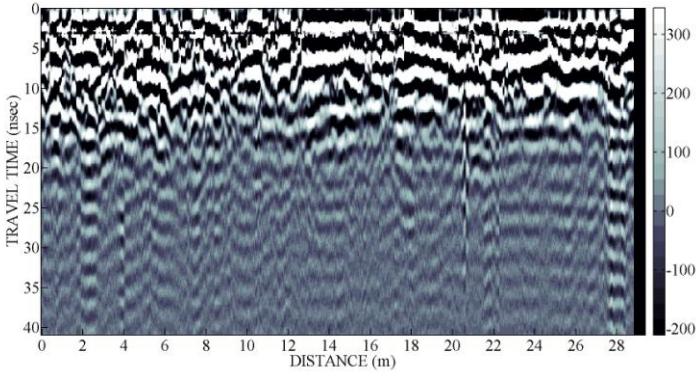
- **Γραμμή W25 (12.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



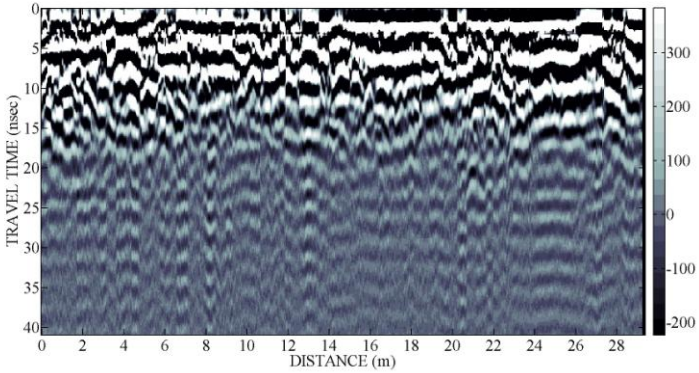
- **Γραμμή W26 (12.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



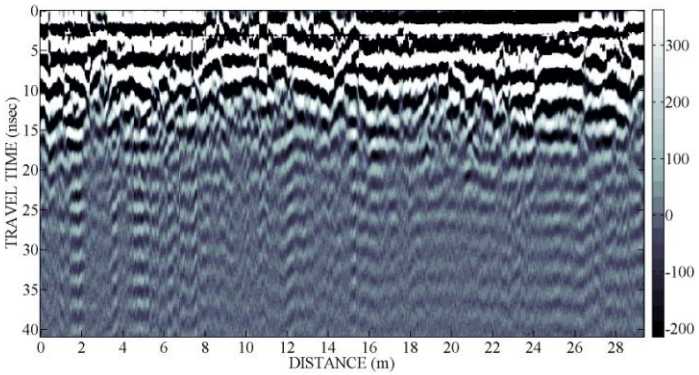
- **Γραμμή W27 (13.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



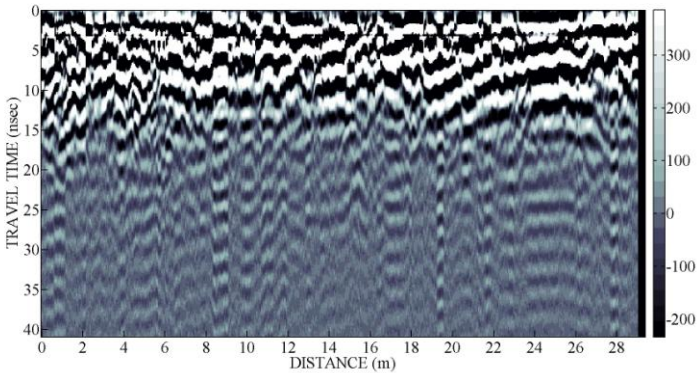
- **Γραμμή W28 (13.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**



- **Γραμμή W29 (14.00 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**

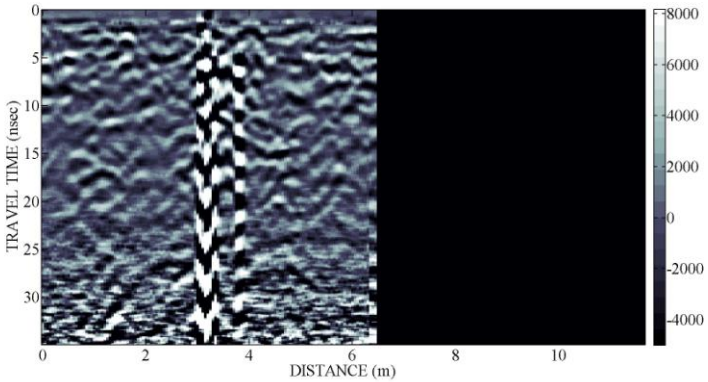


- **Γραμμή W30 (14.50 m) - Διεύθυνση ΒΔ-ΝΔ**

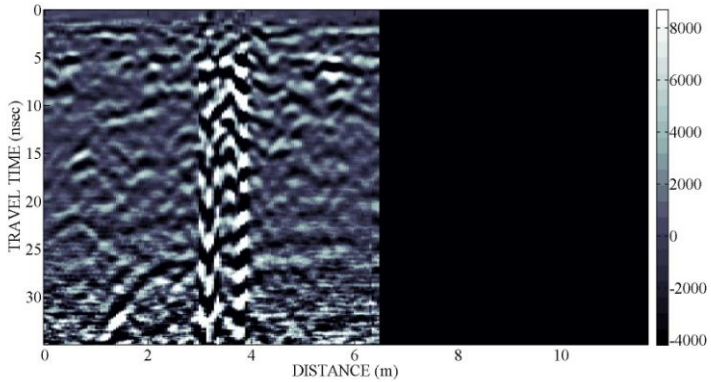


Δυτικά της Τρίκλιτης Δεξαμενής (Περιοχή Τ)

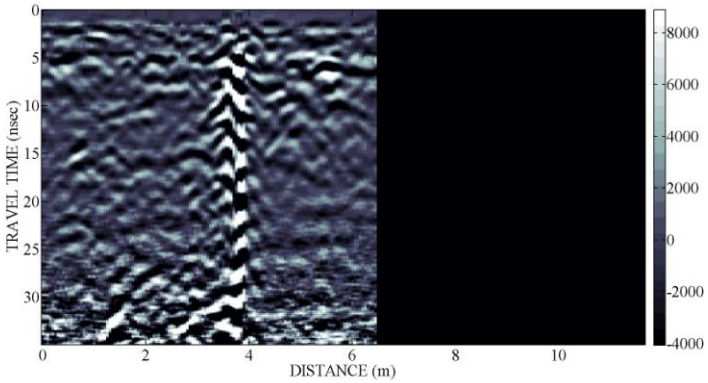
- **Γραμμή Τ01 (0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



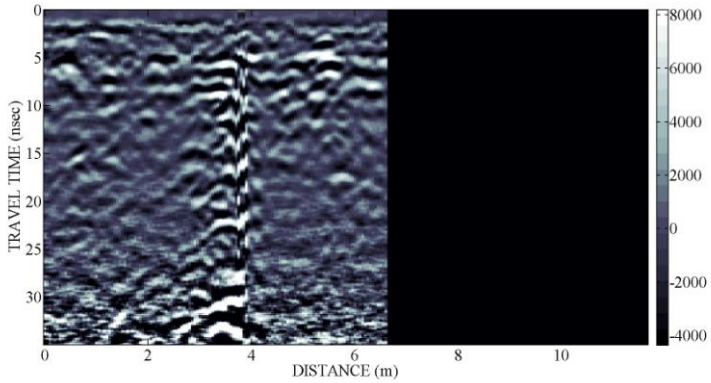
- **Γραμμή Τ02 (0.33 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



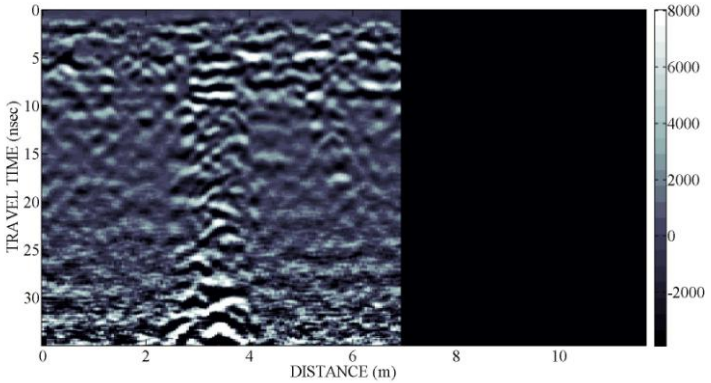
- **Γραμμή Τ03 (0.66 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



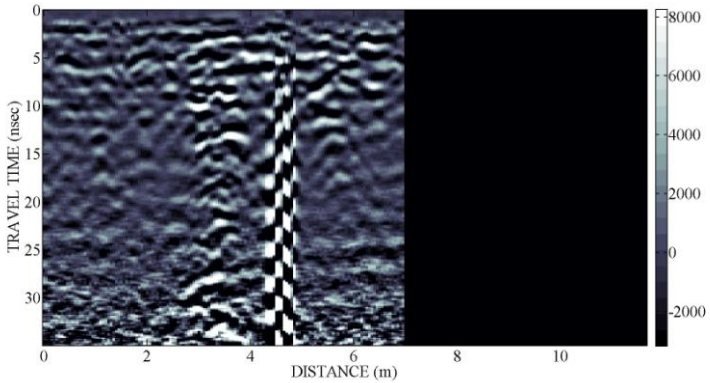
- **Γραμμή Τ04 (0.99 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



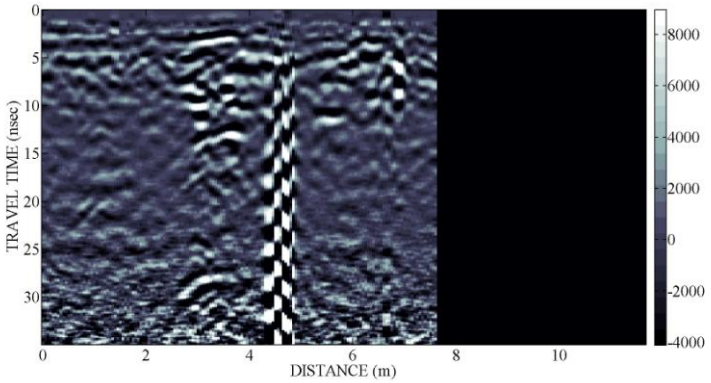
- **Γραμμή T05 (1.32 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



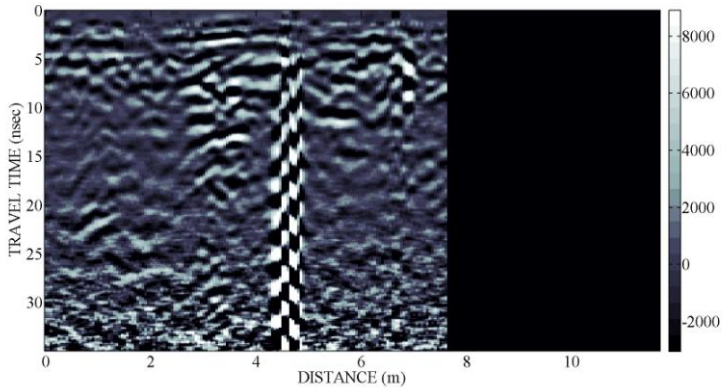
- **Γραμμή T06 (1.65 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



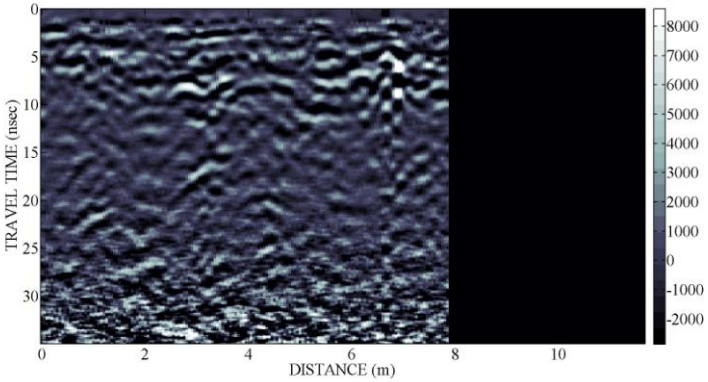
- **Γραμμή T07 (1.98 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



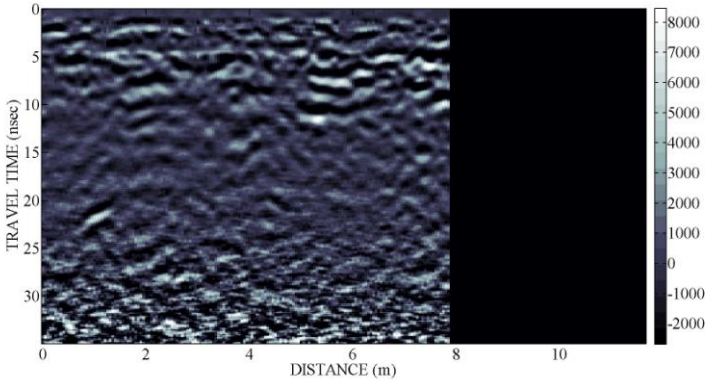
- **Γραμμή T08 (2.31 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



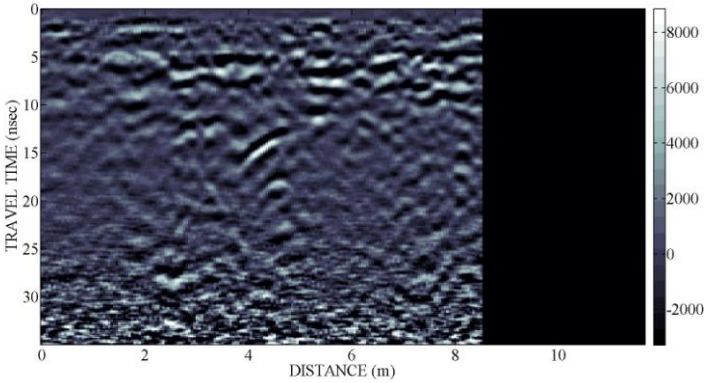
- **Γραμμή T09 (2.64 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



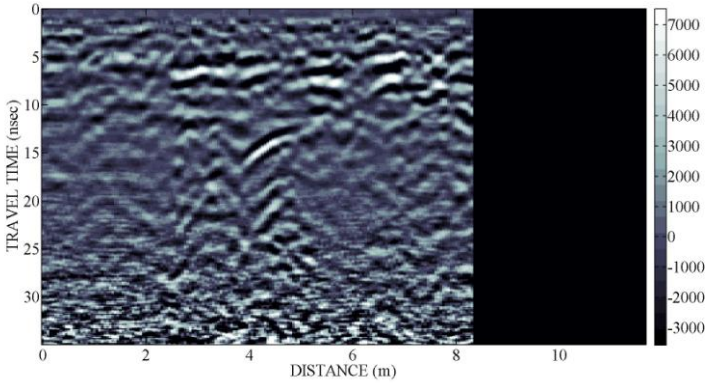
- **Γραμμή T10 (2.97 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



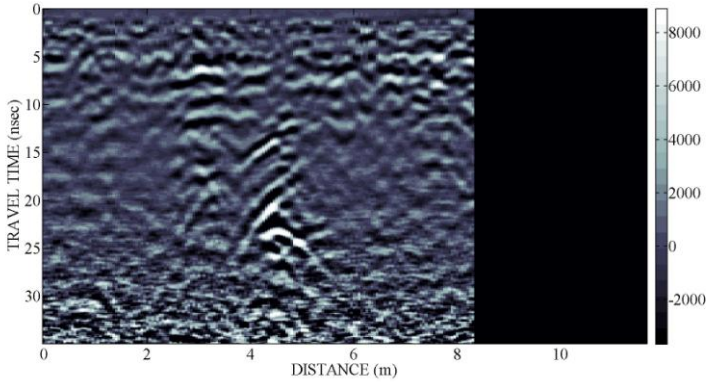
- **Γραμμή T11 (3.3 m)**



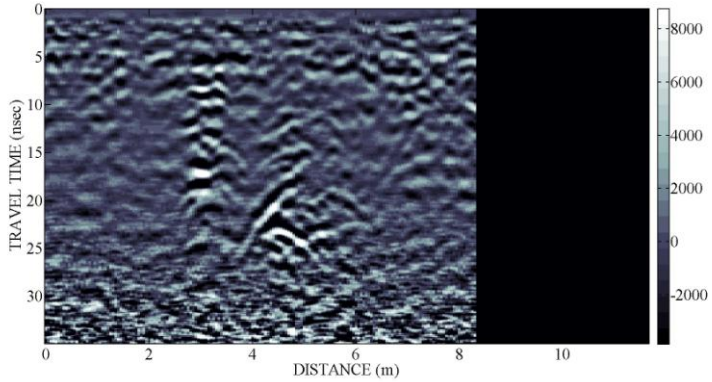
- **Γραμμή T12 (3.63 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



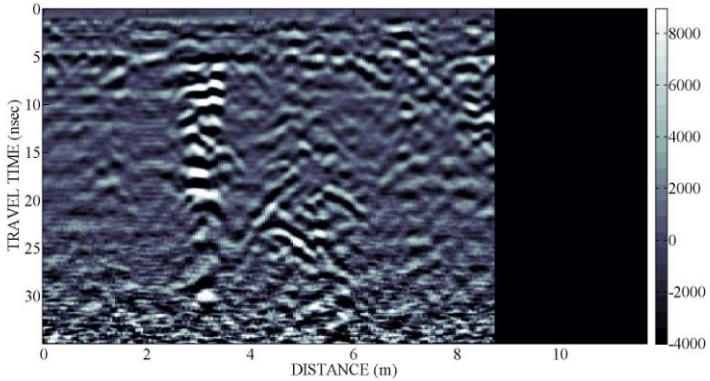
- **Γραμμή T13 (3.96 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



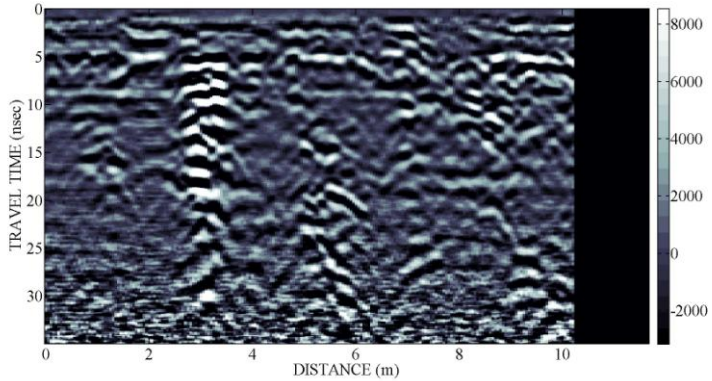
- **Γραμμή T14 (4.29 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



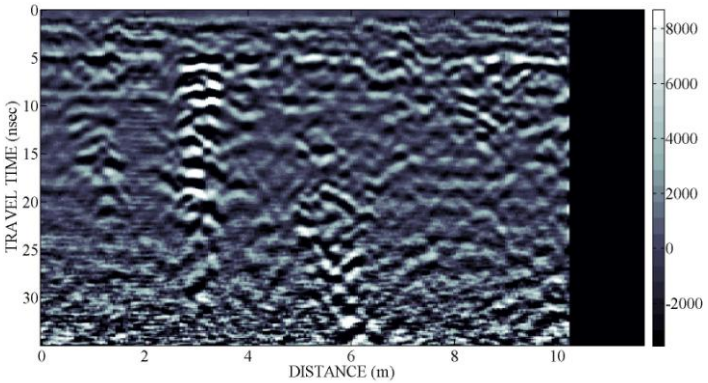
- **Γραμμή T15 (4.62 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



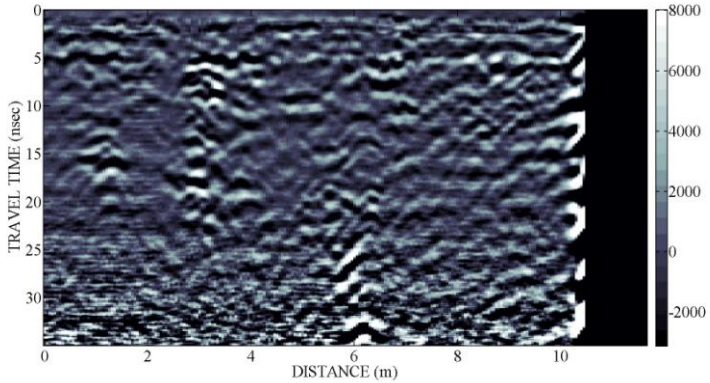
- **Γραμμή T16 (4.95 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



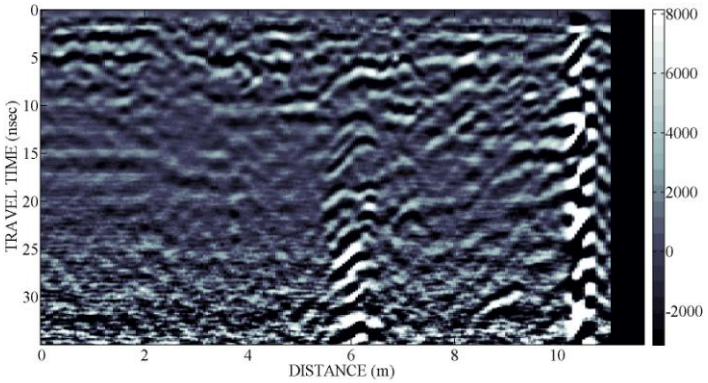
- **Γραμμή T17 (5.28 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



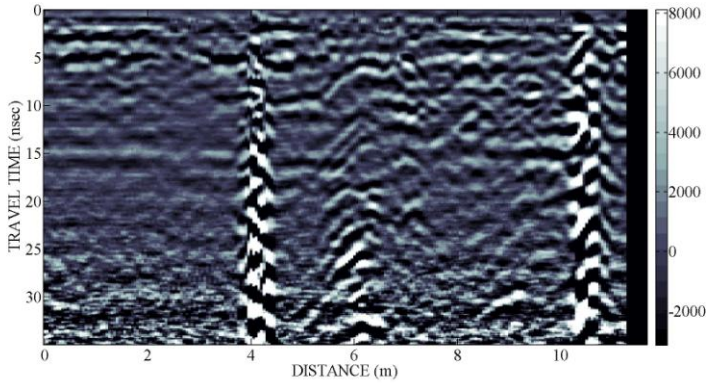
- **Γραμμή T18 (5.61 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



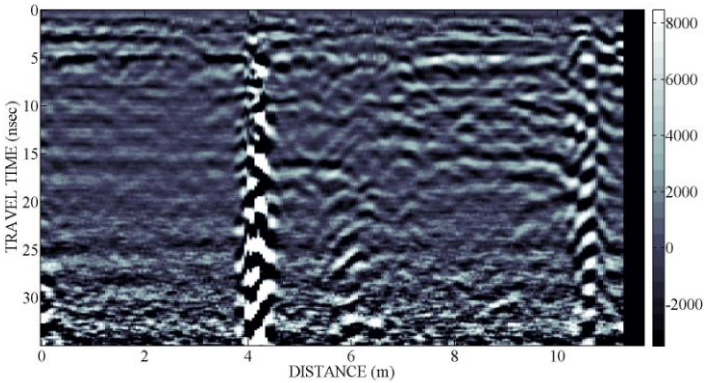
- **Γραμμή T19 (5.94 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



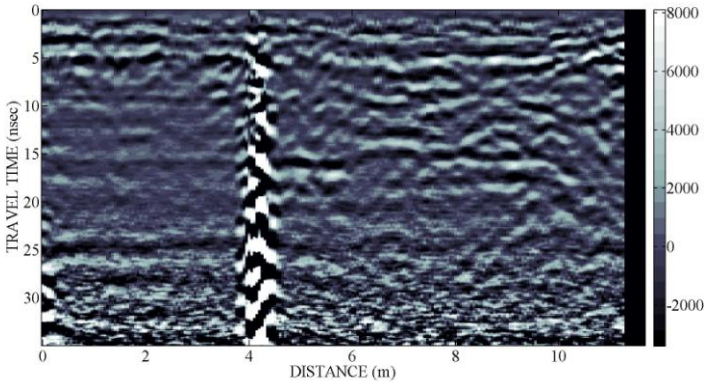
- **Γραμμή T20 (6.27 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



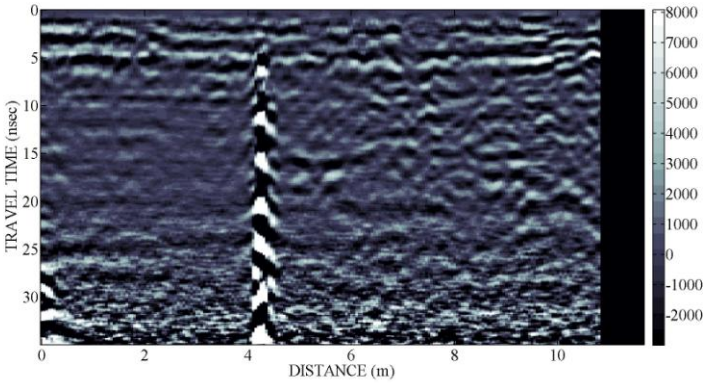
- **Γραμμή T21 (6.6 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



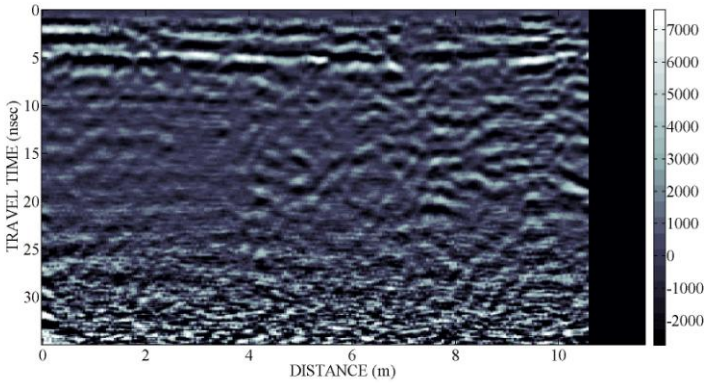
- **Γραμμή T22 (6.93 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



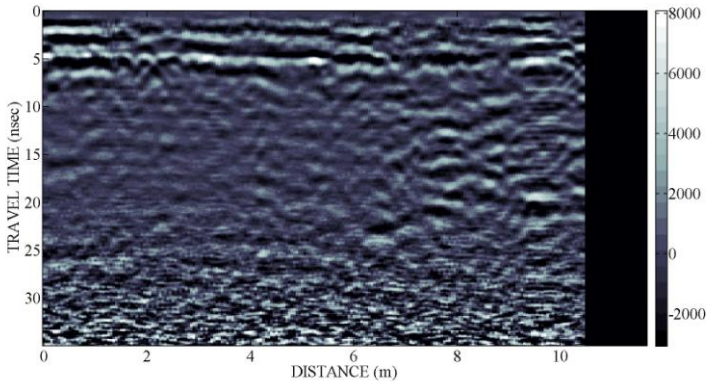
- **Γραμμή T23 (7.26 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



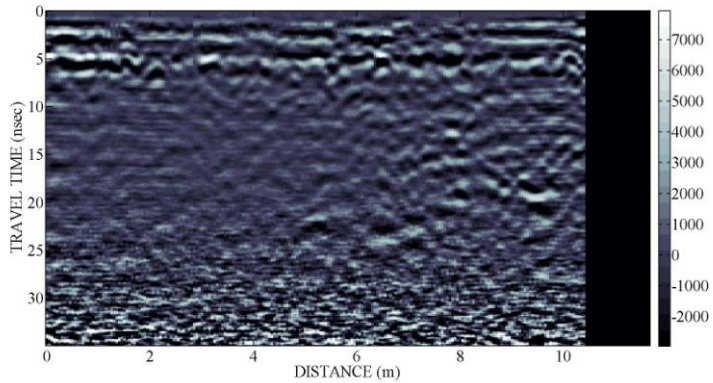
- **Γραμμή T24 (7.59 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



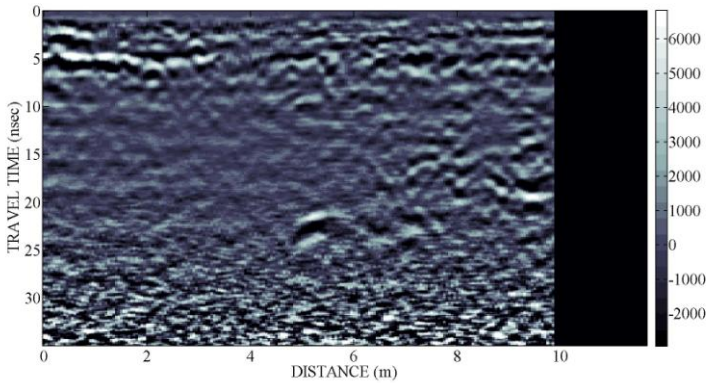
- **Γραμμή T25 (7.92 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



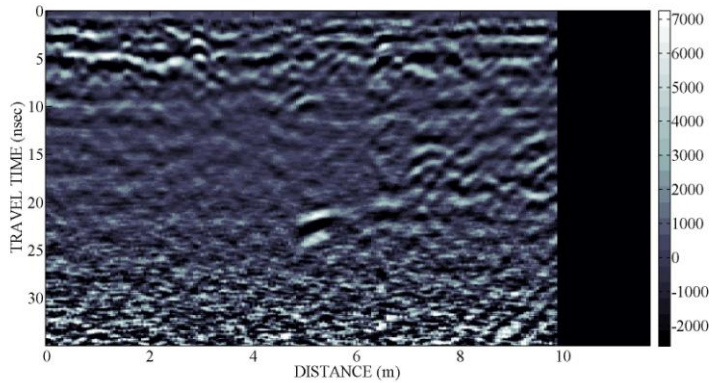
- **Γραμμή T26 (8.25 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



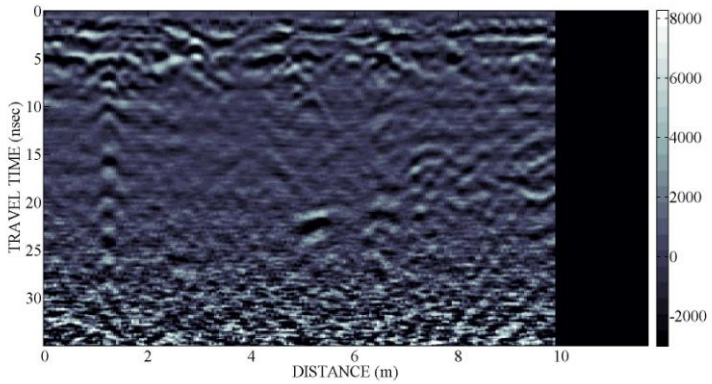
- **Γραμμή T27 (8.58 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



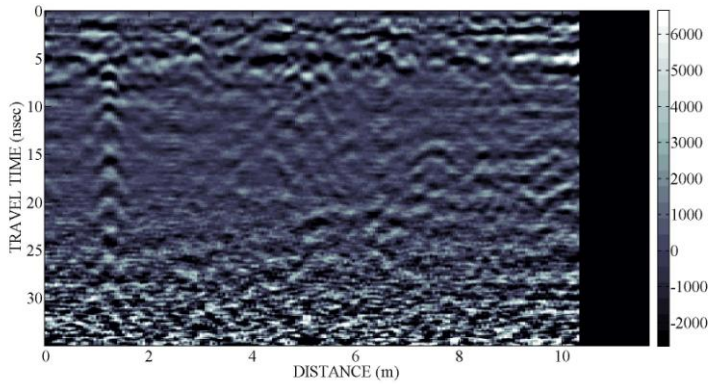
- **Γραμμή T28 (8.91 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



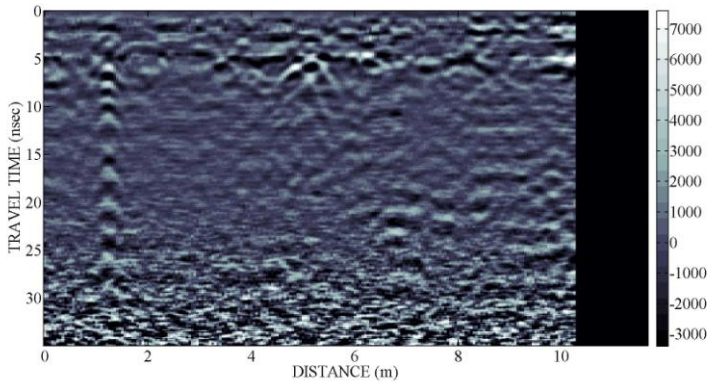
- **Γραμμή T29 (9.24 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



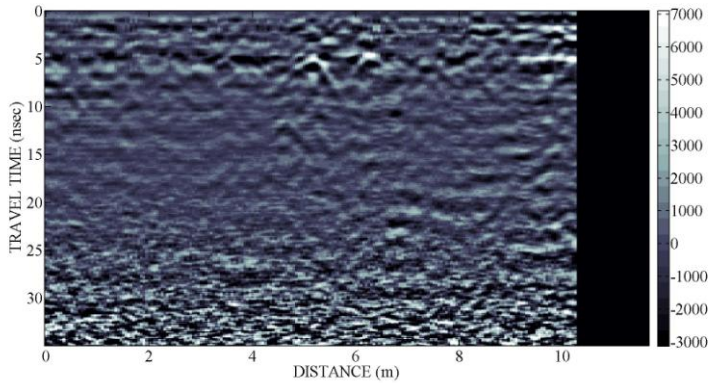
- **Γραμμή T30 (9.57 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



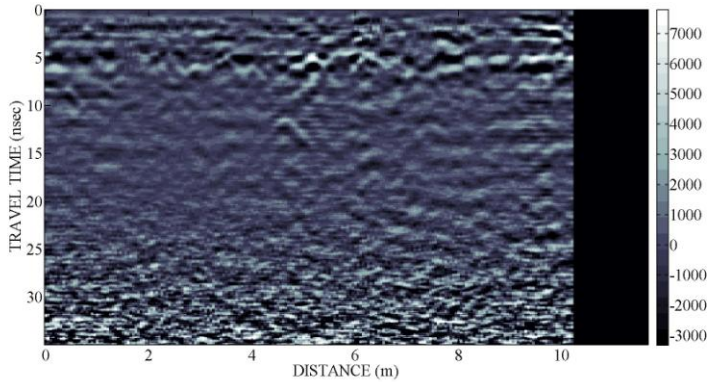
- **Γραμμή T31 (9.9 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



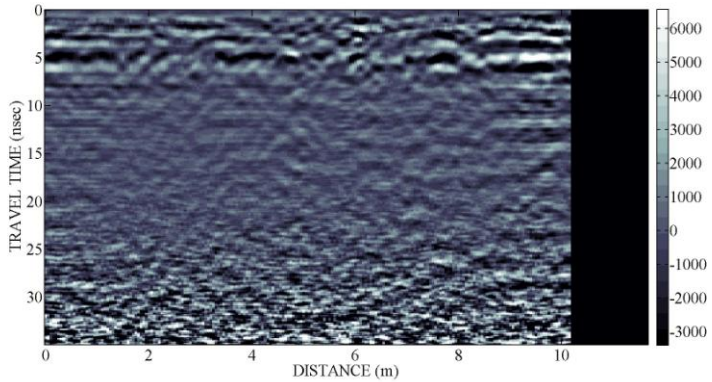
- **Γραμμή T32 (10.23 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



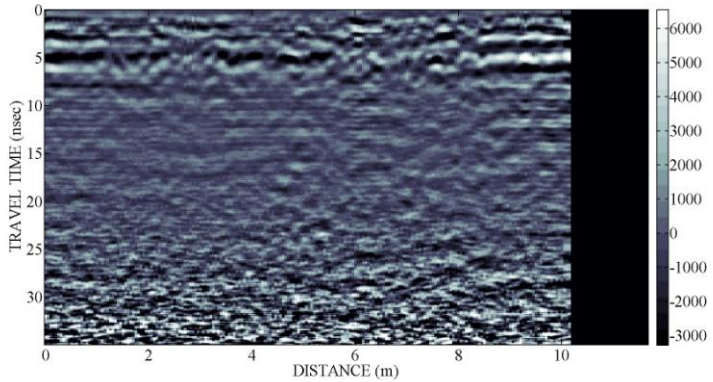
- **Γραμμή Τ33 (10.56 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



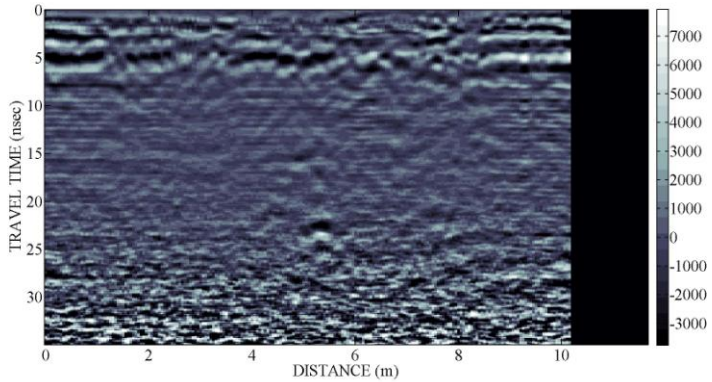
- **Γραμμή Τ34 (10.89 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



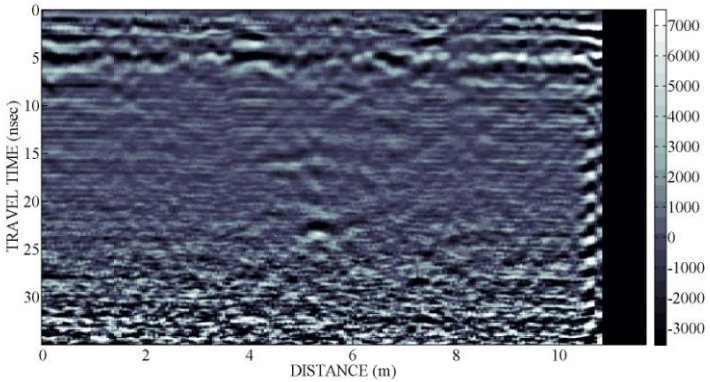
- **Γραμμή Τ35 (11.22 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



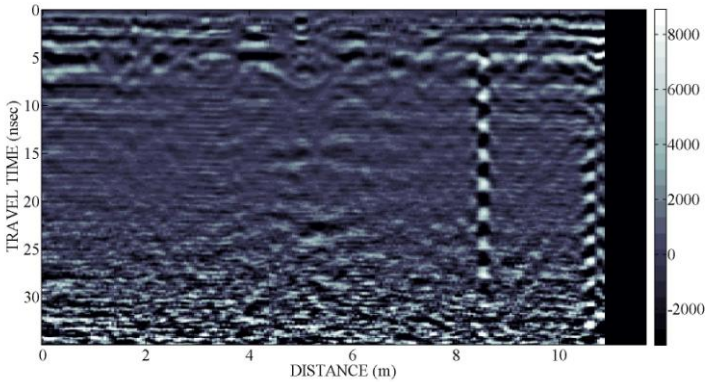
- **Γραμμή Τ36 (11.55 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



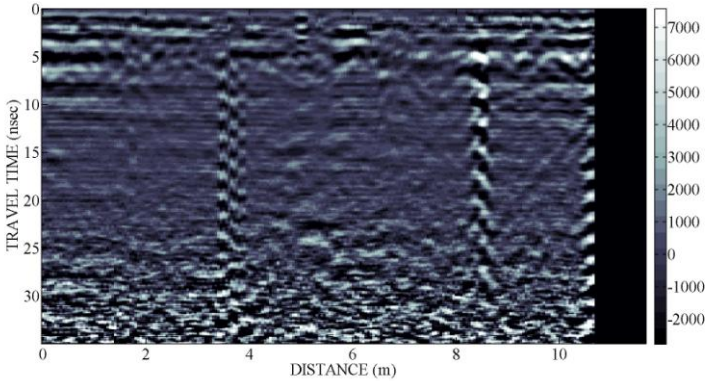
- **Γραμμή T37 (11.88 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



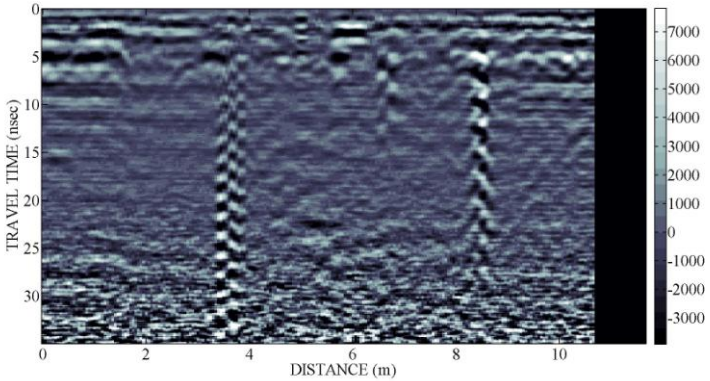
- **Γραμμή T38 (12.21 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



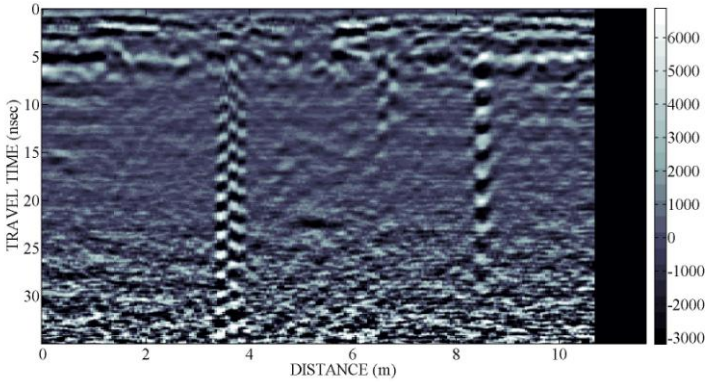
- **Γραμμή T39 (12.54 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



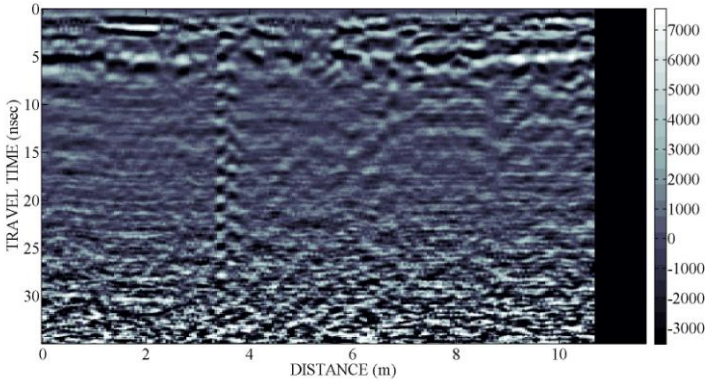
- **Γραμμή T40 (12.87 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



- **Γραμμή T41 (13.2 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

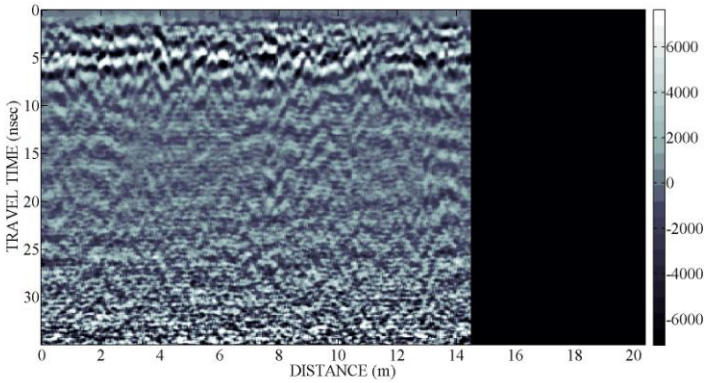


- **Γραμμή T42 (13.53 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

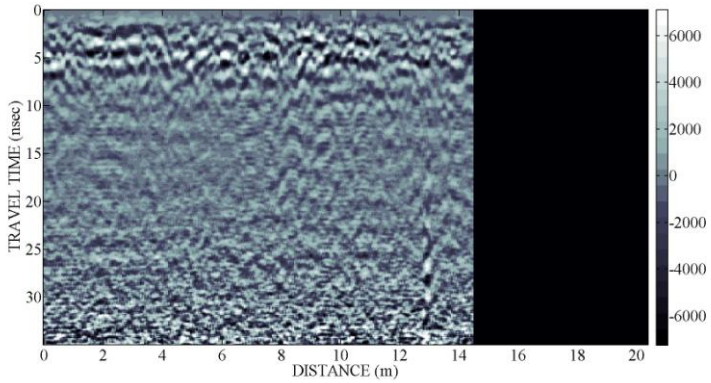


Περιοχή Λουτρών (Κάναβος Κ)

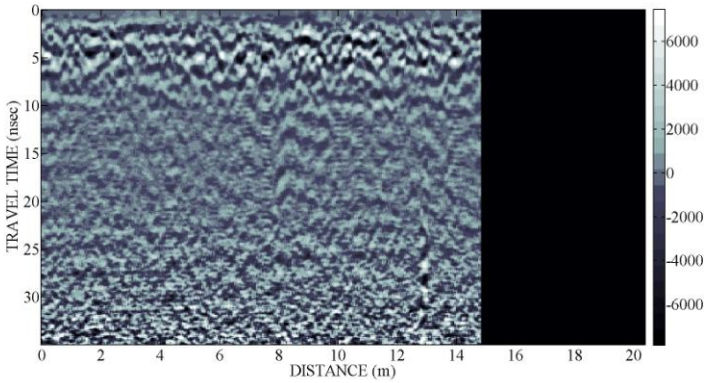
- **Γραμμή Κ01 (0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



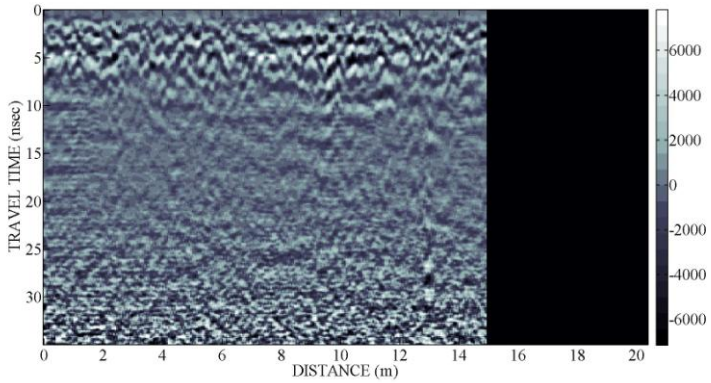
- **Γραμμή Κ02 (0.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



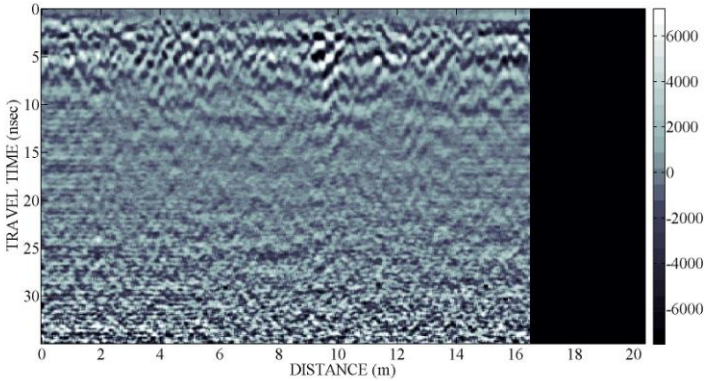
- **Γραμμή Κ03 (1.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



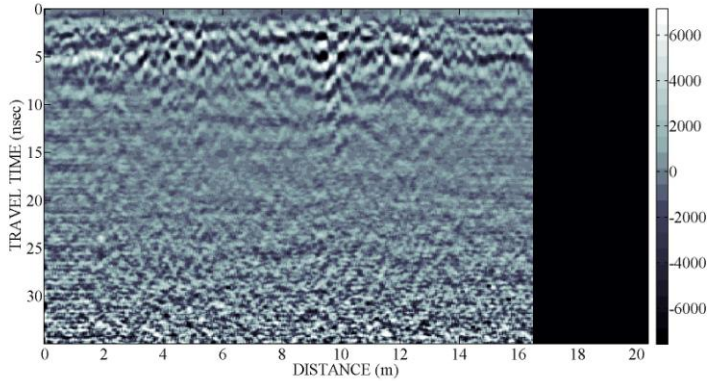
- **Γραμμή Κ04 (1.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



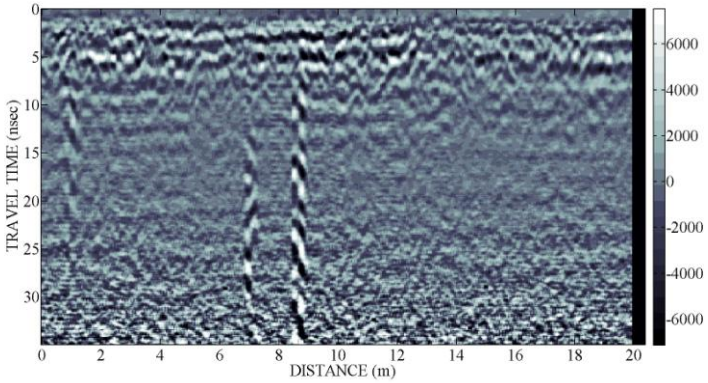
- **Γραμμή K05 (2.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



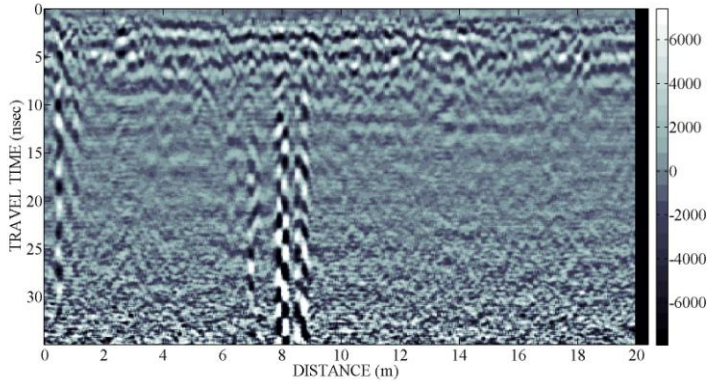
- **Γραμμή K06 (2.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



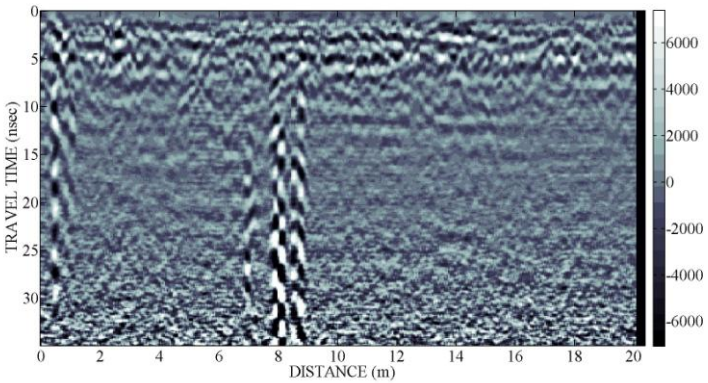
- **Γραμμή K07 (3.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



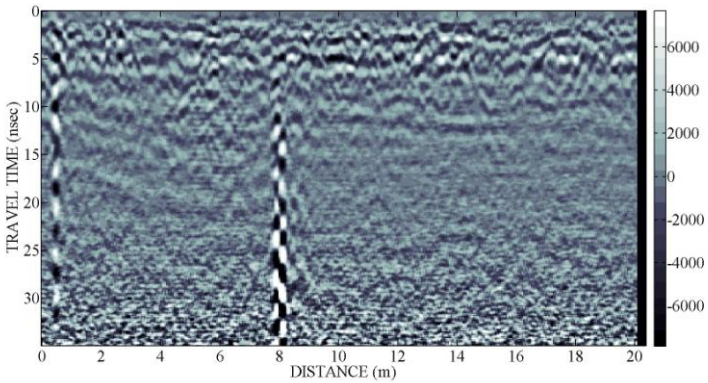
- **Γραμμή K08 (3.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



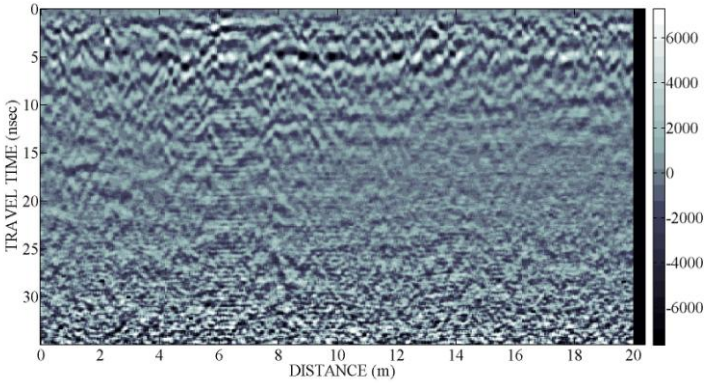
- **Γραμμή K09 (4.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



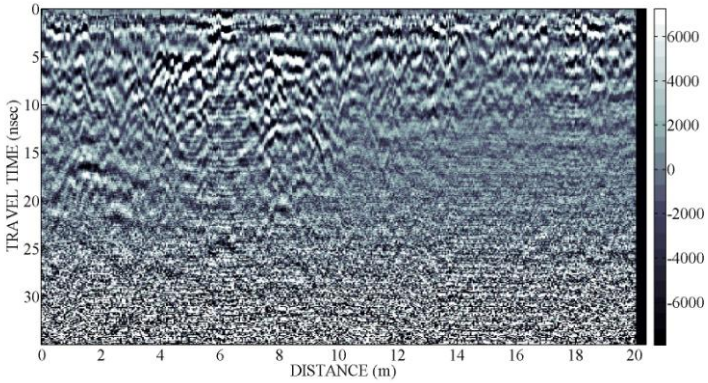
- **Γραμμή K10 (4.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



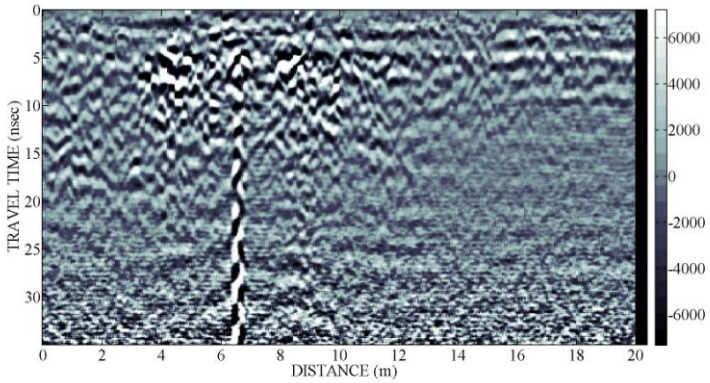
- **Γραμμή K11 (5.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



- **Γραμμή K12 (5.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

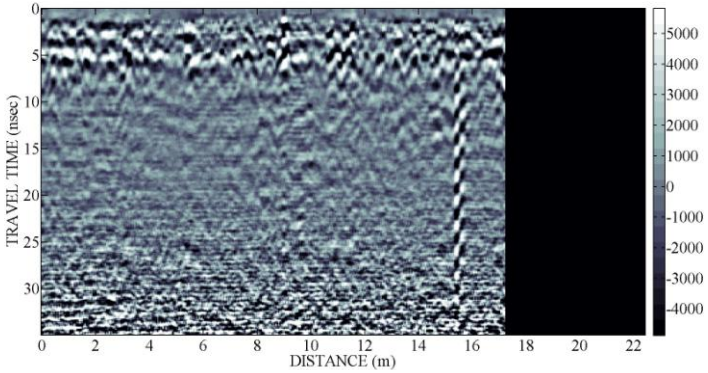


- **Γραμμή K13 (6.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

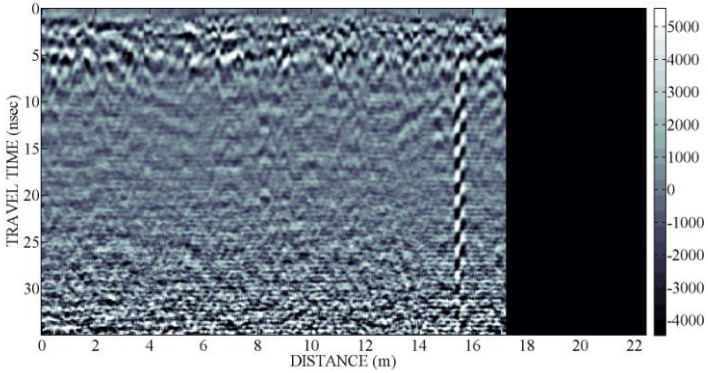


Περιοχή Λουτρών (Κάναβος Λ)

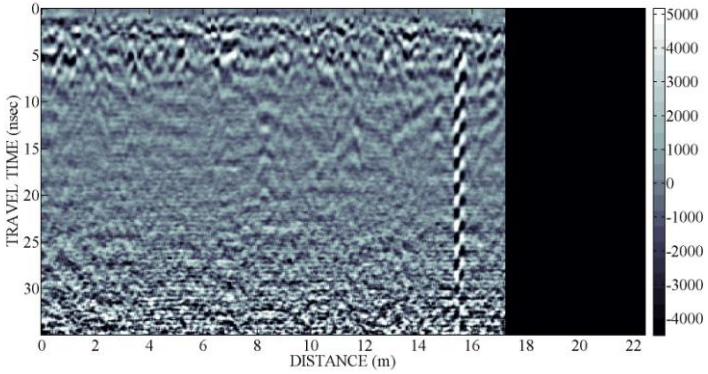
- **Γραμμή Λ01 (0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



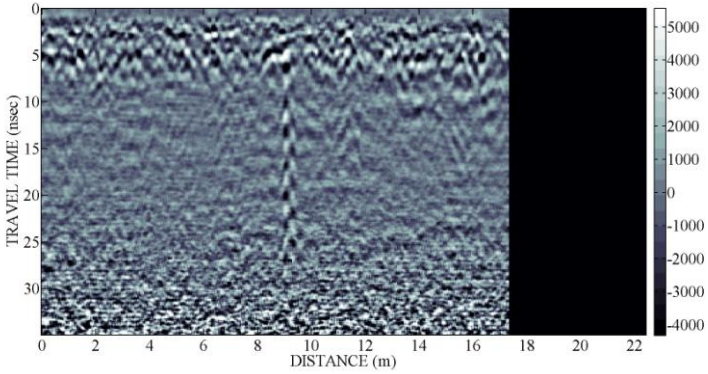
- **Γραμμή Λ02 (0.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



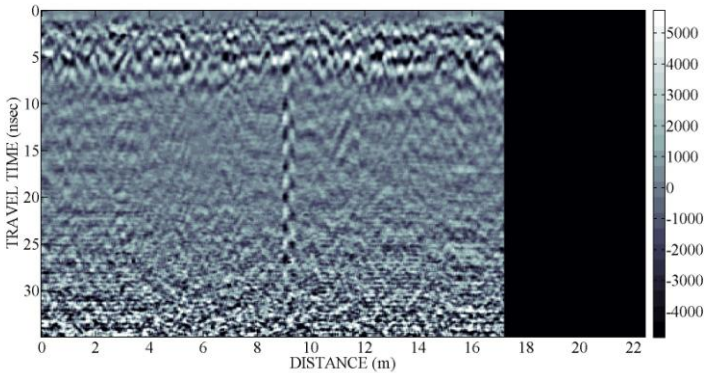
- **Γραμμή Λ03 (1.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



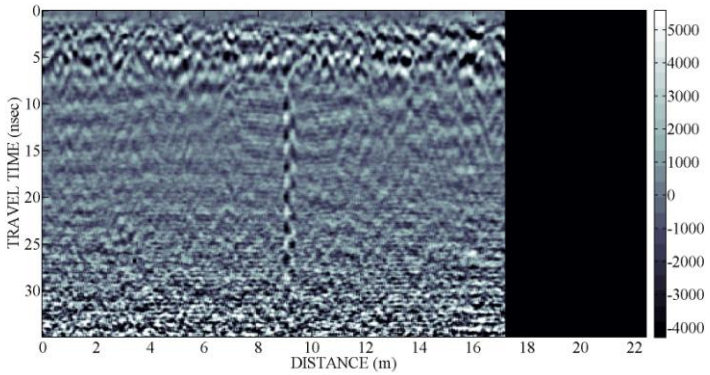
- **Γραμμή Λ04 (1.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



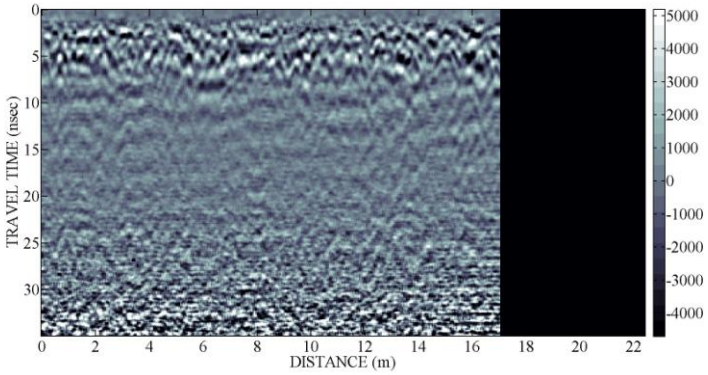
- **Γραμμή Λ05 (2.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



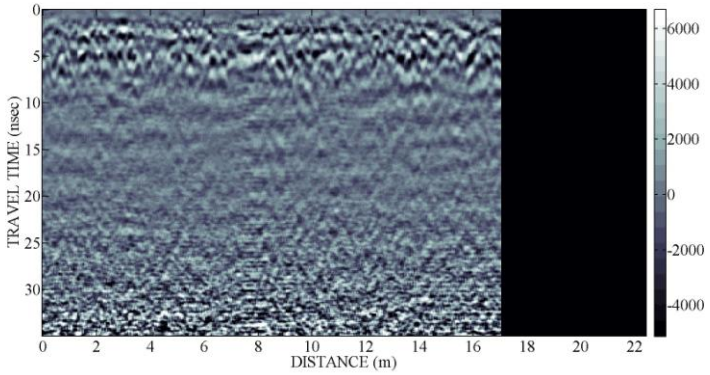
- **Γραμμή Λ06 (2.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



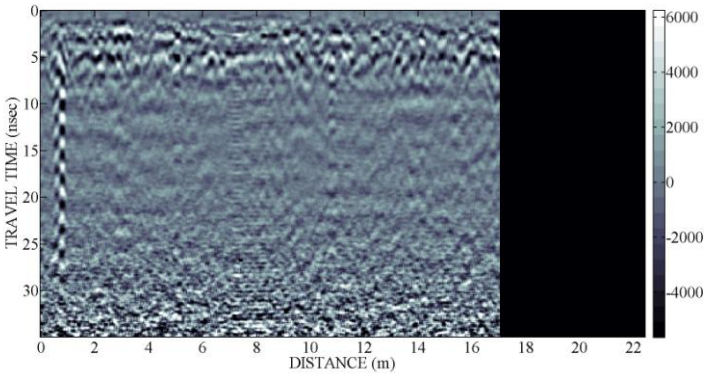
- **Γραμμή Λ07 (3.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



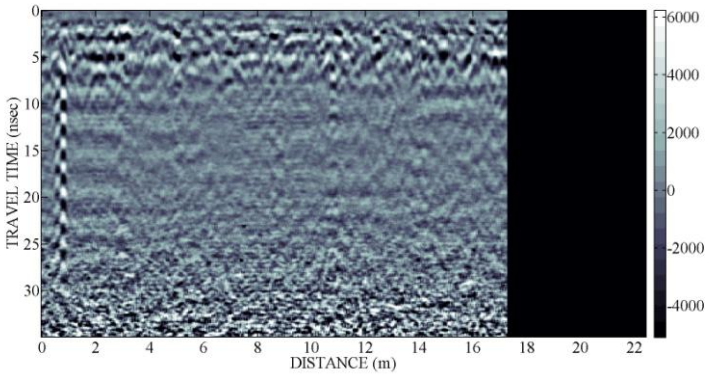
- **Γραμμή Λ08 (3.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



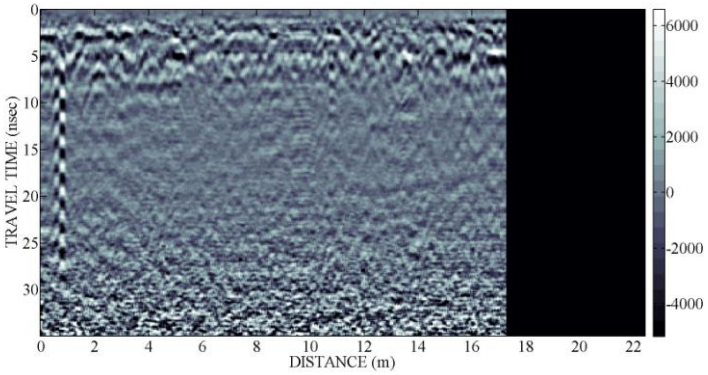
- **Γραμμή Λ09 (4.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



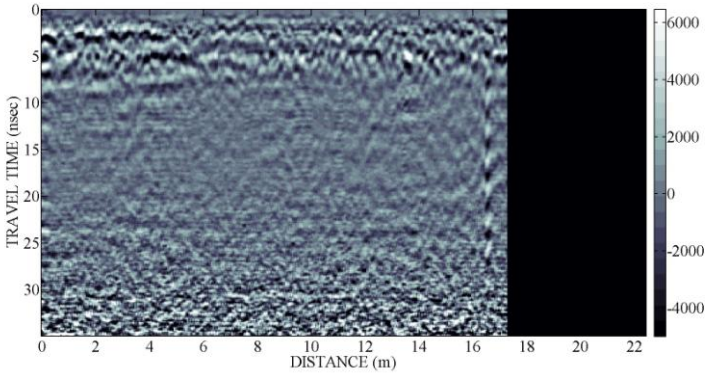
- **Γραμμή Λ10 (4.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



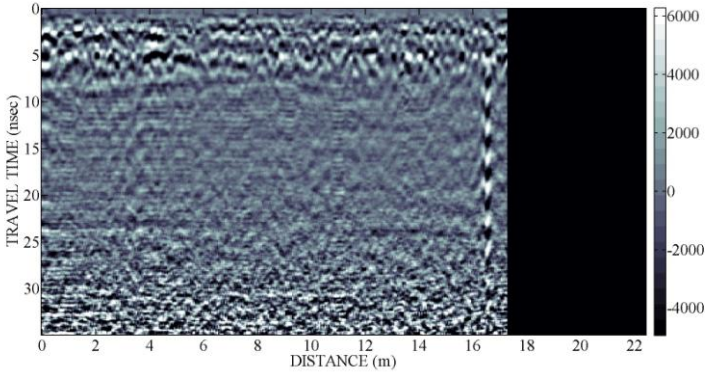
- **Γραμμή Λ11 (5.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



- **Γραμμή Λ12 (5.5 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

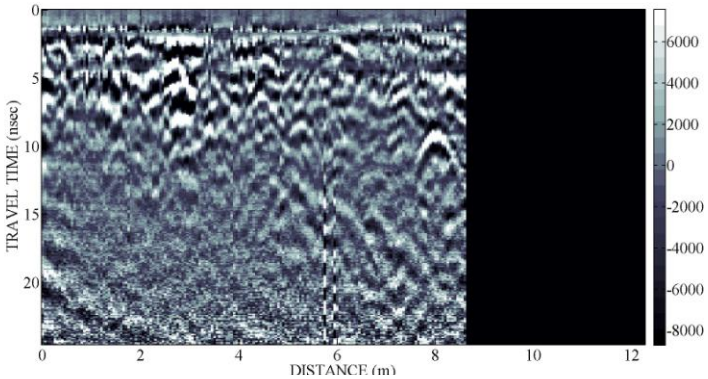


- **Γραμμή Λ13 (6.0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

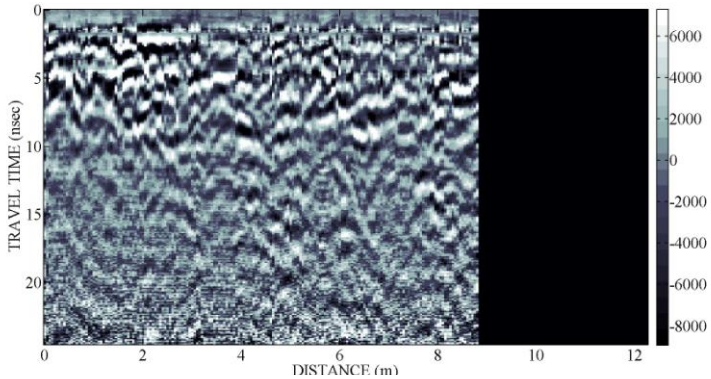


Περιοχή G

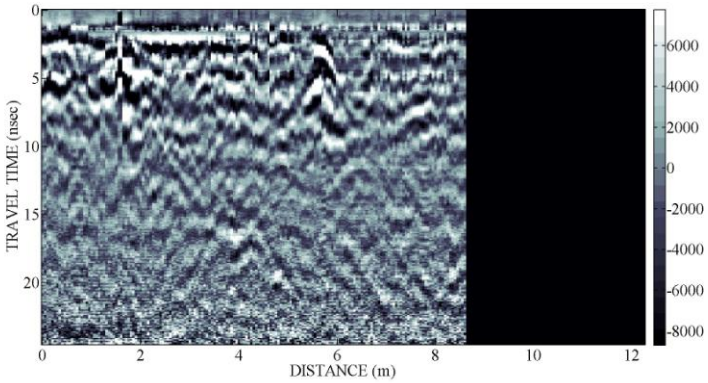
- **Γραμμή G01 (0 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



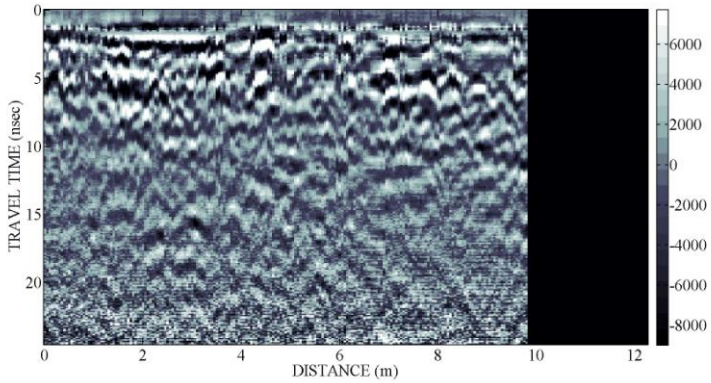
- **Γραμμή G02 (0.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



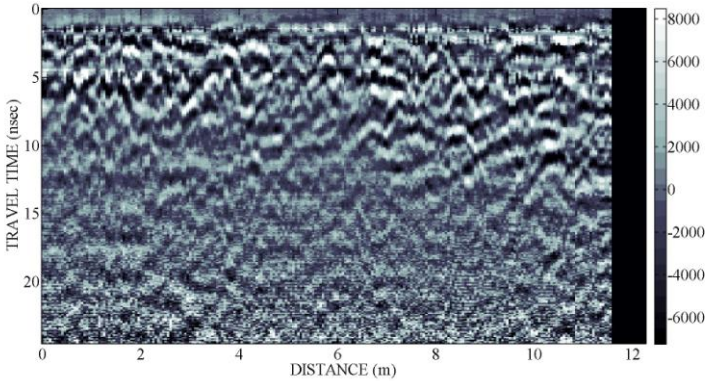
- **Γραμμή G03 (1.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



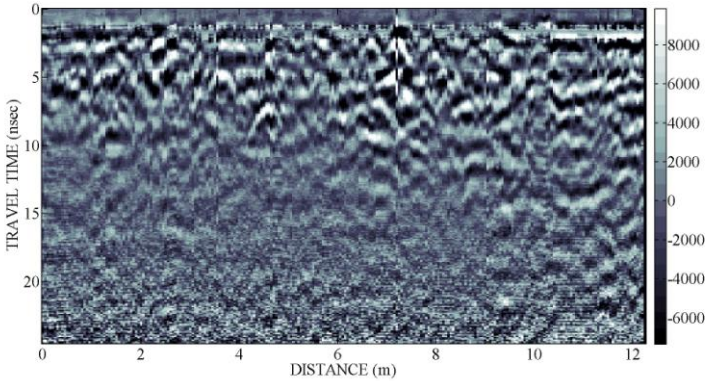
- **Γραμμή G04 (1.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



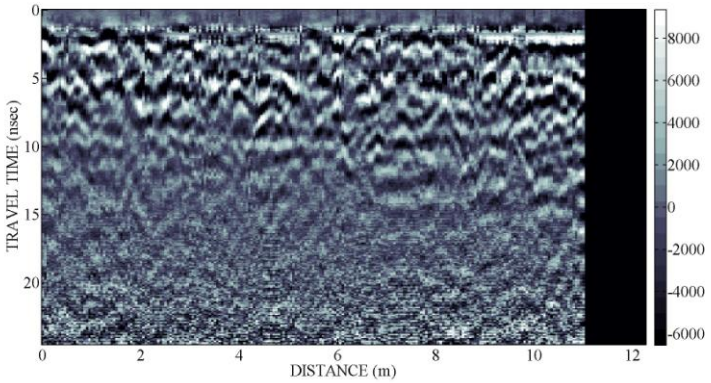
- **Γραμμή G05 (2.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



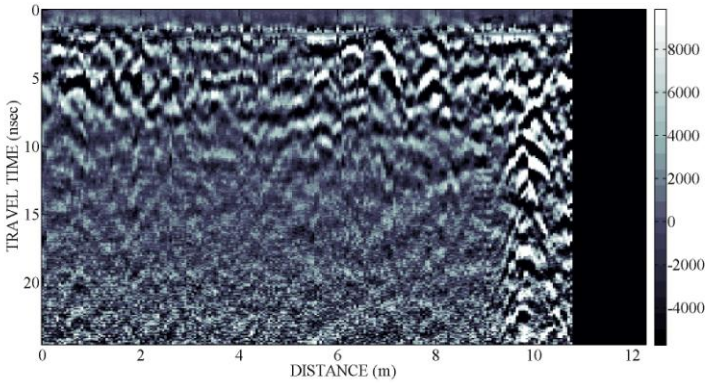
- **Γραμμή G06 (2.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



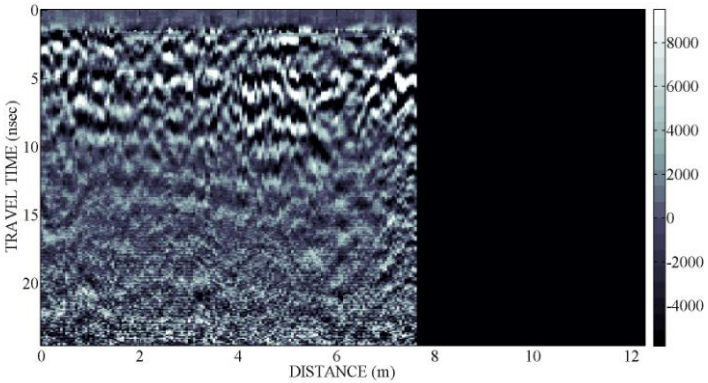
- **Γραμμή G07 (3.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



- **Γραμμή G08 (3.50 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

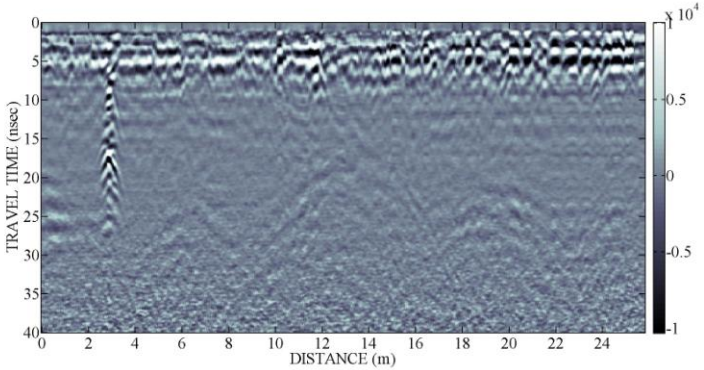


- **Γραμμή G09 (4.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**

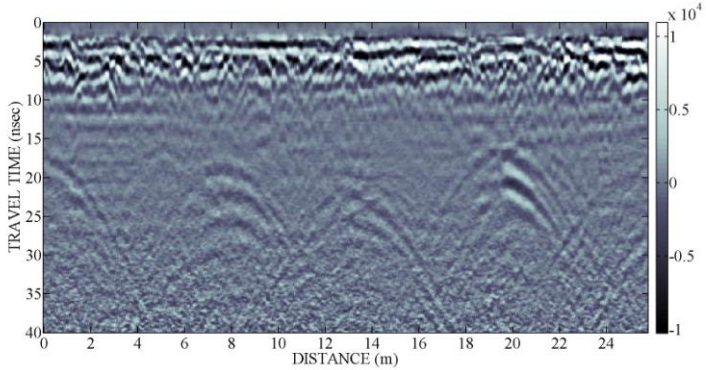


Οικόπεδο στο Καλάμι Σούδας Ν.Χ. (Περιοχή F)

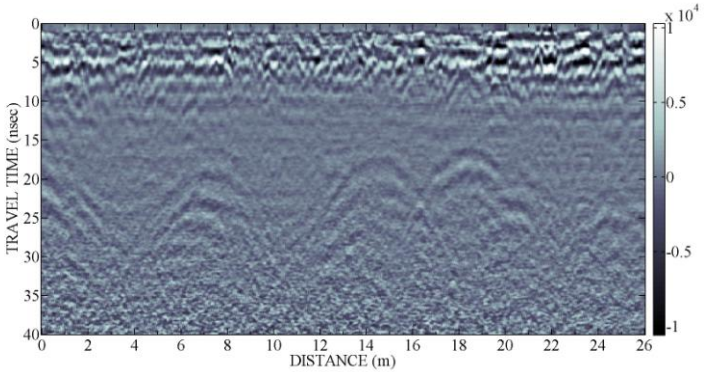
- **Γραμμή Χ01 (5.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



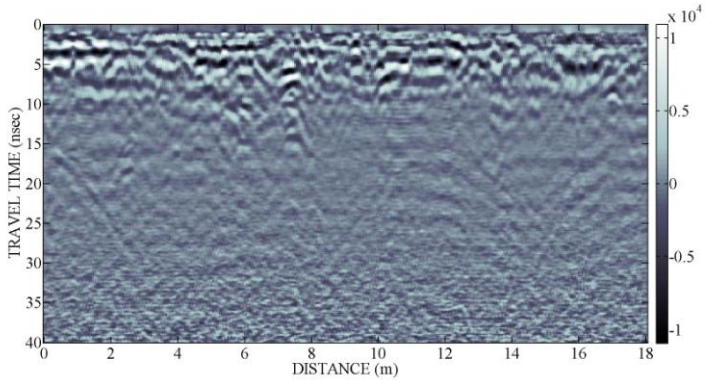
- **Γραμμή Χ02 (8.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



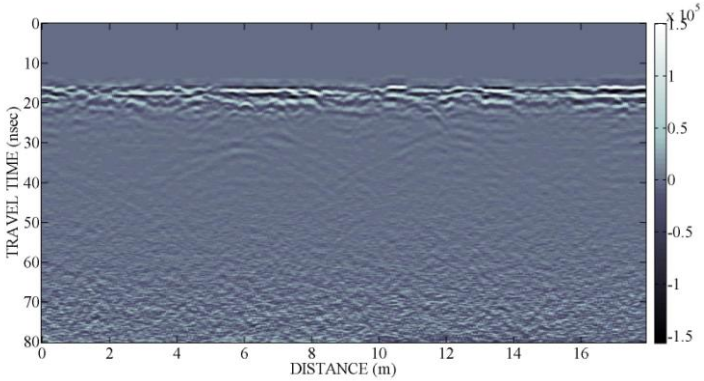
- **Γραμμή Χ03 (15.00 m) - Διεύθυνση Δ-Α**



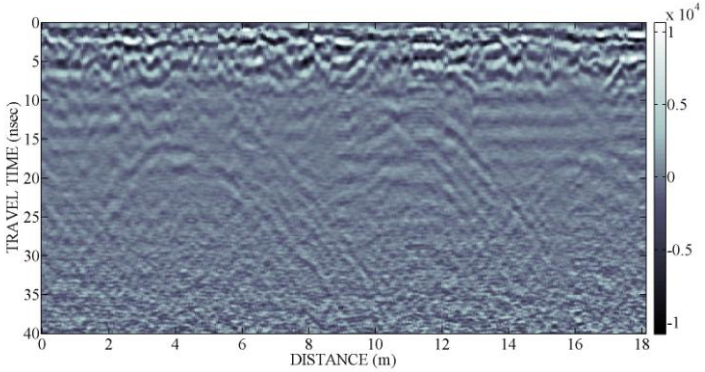
- **Γραμμή Χ01v (2.50 m) - Διεύθυνση Ν-Β**



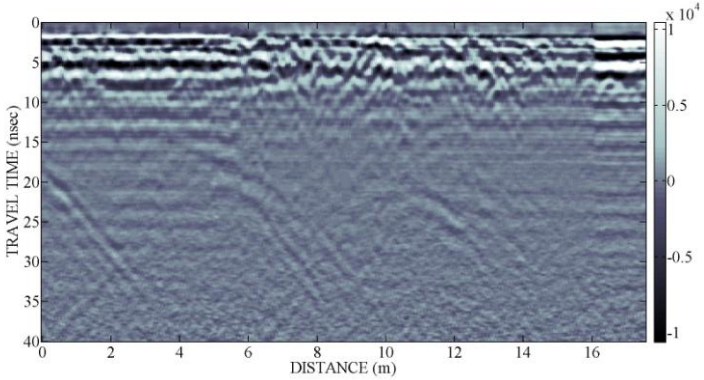
- **Γραμμή X02v (5.00 m) - Διεύθυνση N-B**



- **Γραμμή X03v (7.00 m) - Διεύθυνση N-B**



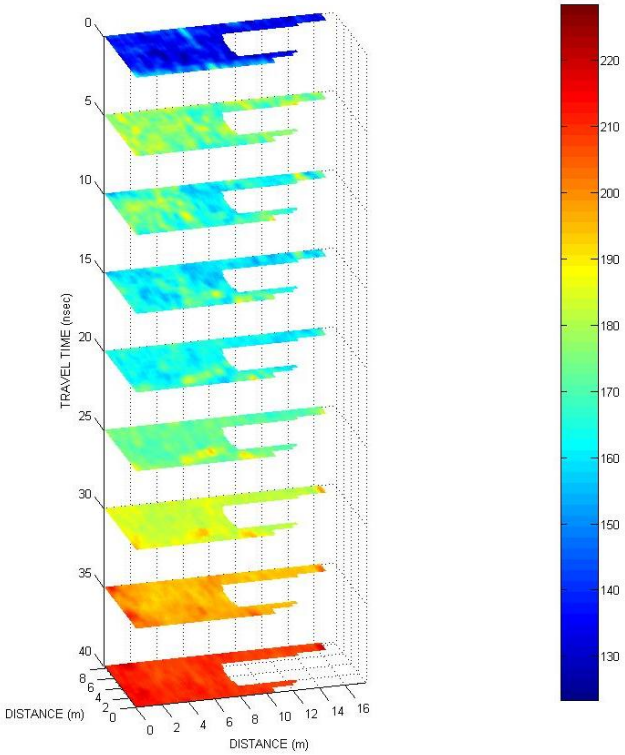
- **Γραμμή X04v (11.00 m) - Διεύθυνση N-B**



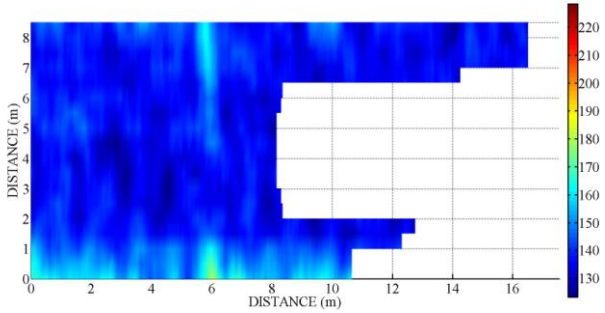
Παράρτημα Β:
Τρισδιάστατη απεικόνιση δεδομένων - Οριζόντιες τομές

Αυλή Μοναστηριού (Περιοχή Μ)

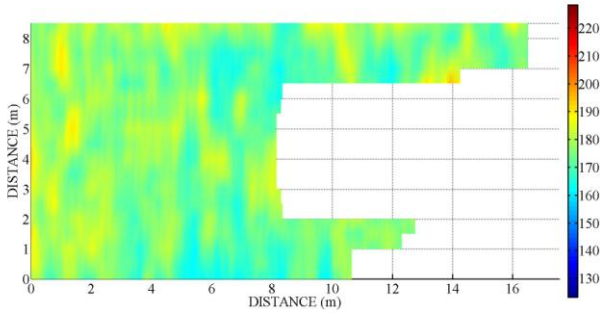
- **Τρισδιάστατο**



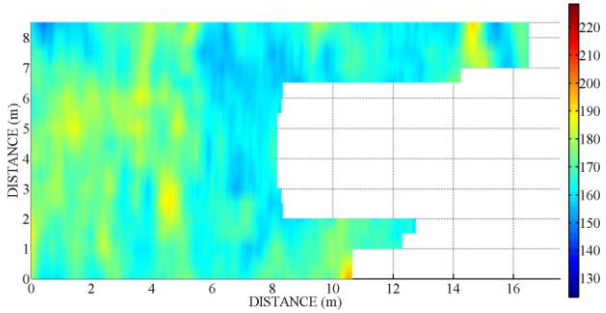
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



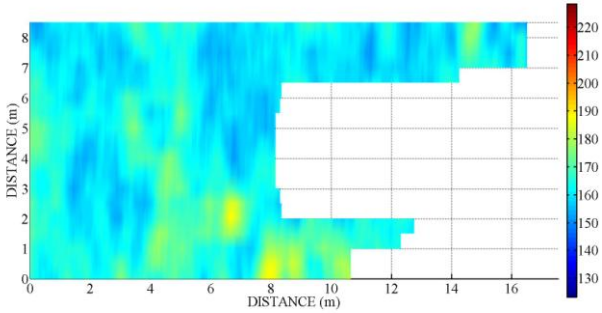
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.2 m βάθος)**



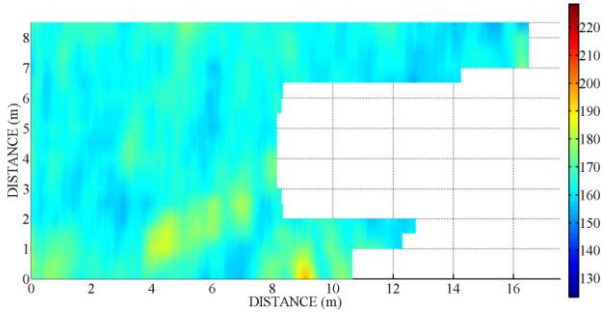
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.45 m βάθος)**



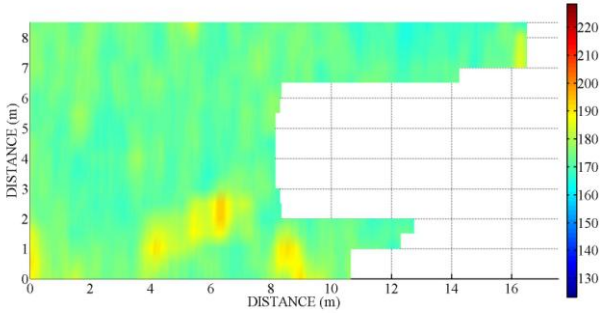
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.7 m βάθος)**



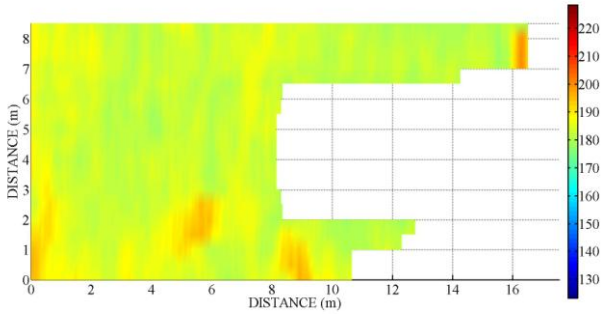
- **Οριζόντια τομή 20 ns (0.9 m βάθος)**



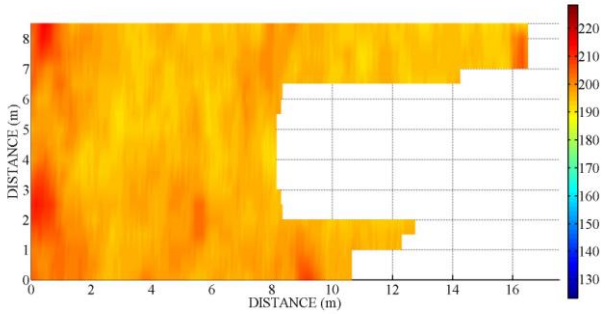
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.1 m βάθος)**



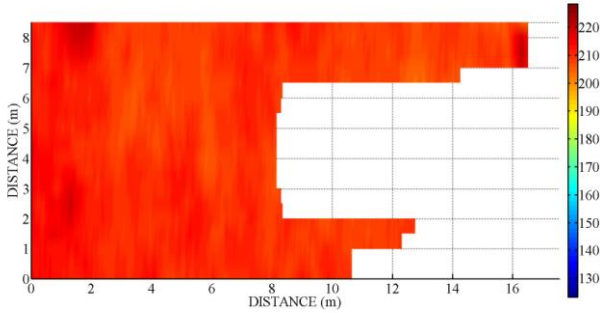
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.35 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.6 m βάθος)**

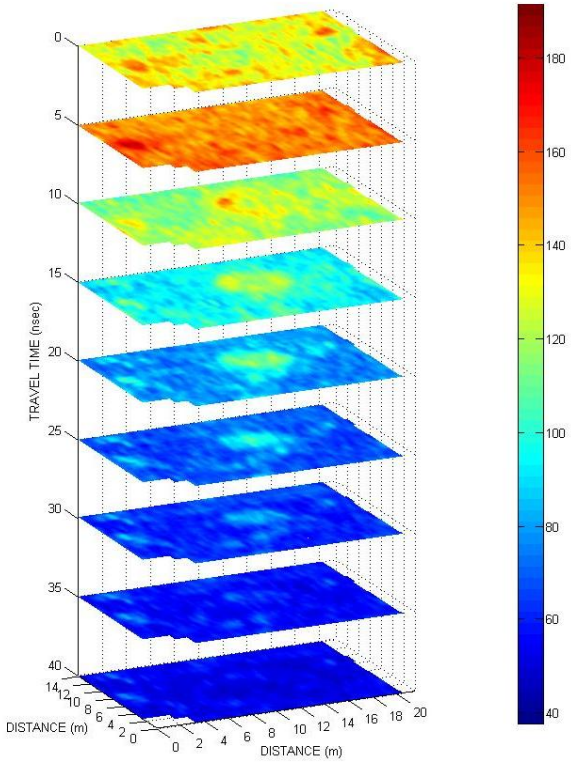


- **Οριζόντια τομή 40 ns (1.8 m βάθος)**

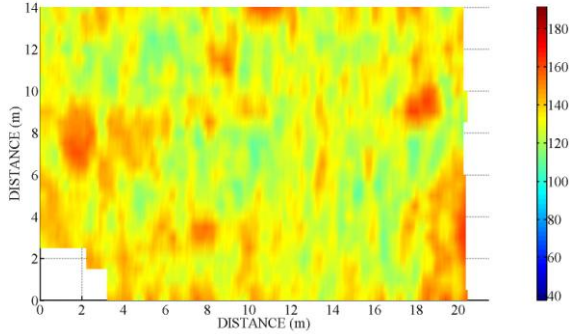


Νότια του Μοναστηριού (Περιοχή S)

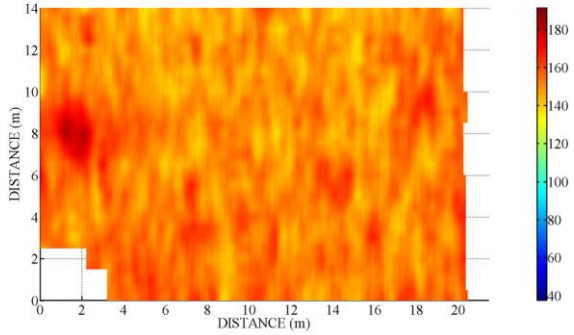
- **Τρισδιάστατο**



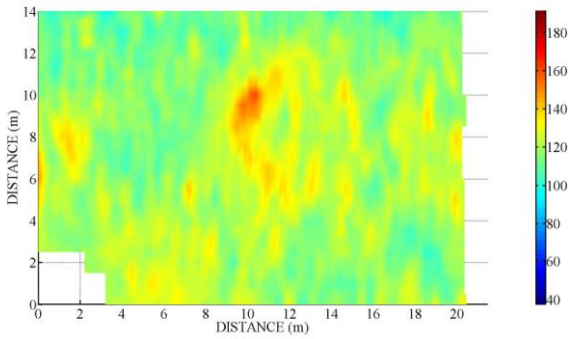
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



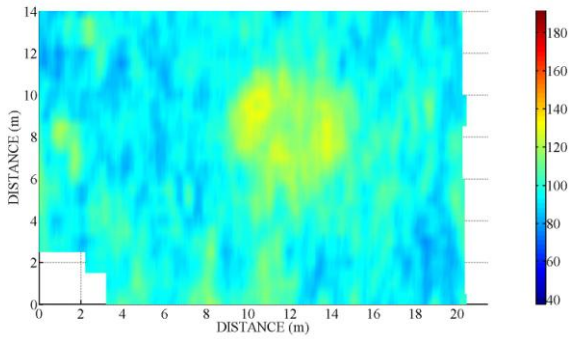
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.2 m βάθος)**



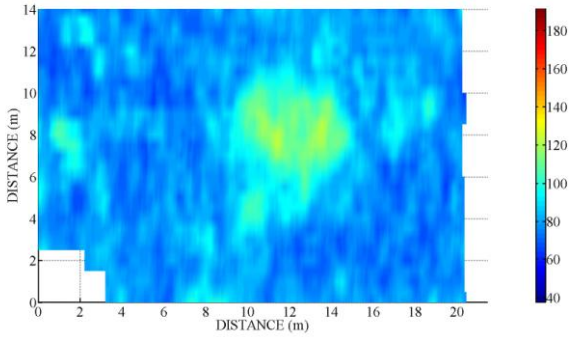
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.45 m βάθος)**



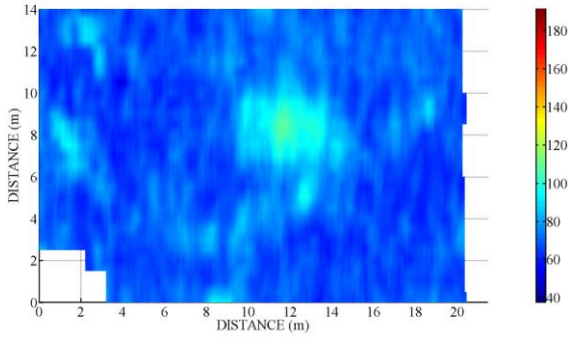
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.7 m βάθος)**



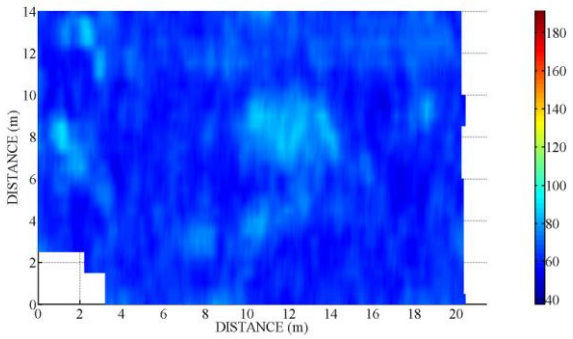
- **Οριζόντια τομή 20 ns (0.9 m βάθος)**



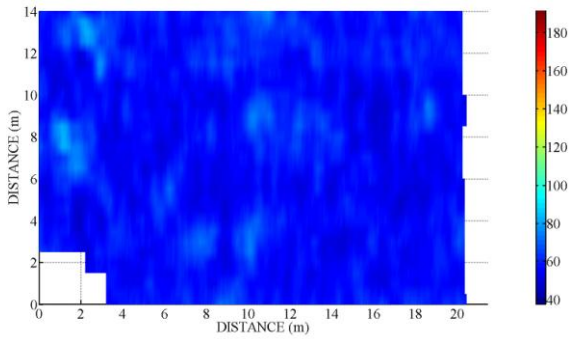
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.1 m βάθος)**



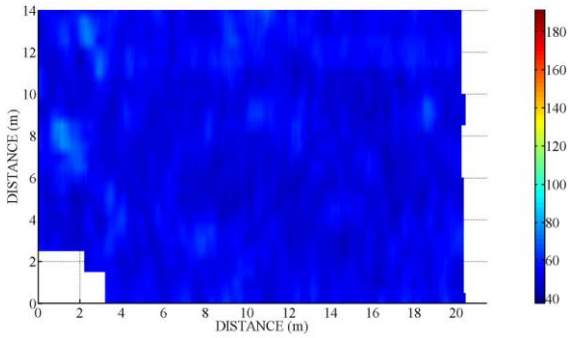
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.35 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.6 m βάθος)**

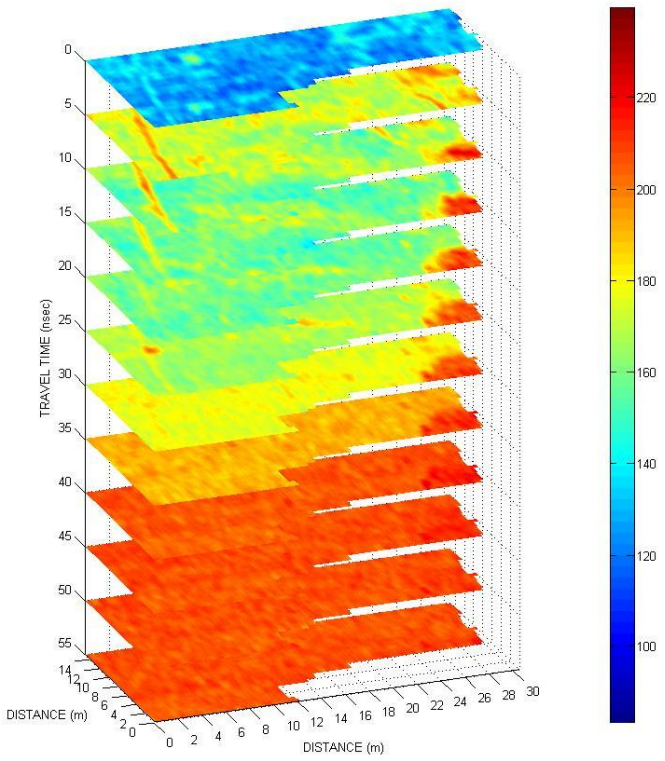


- **Οριζόντια τομή 40 ns (1.8 m βάθος)**

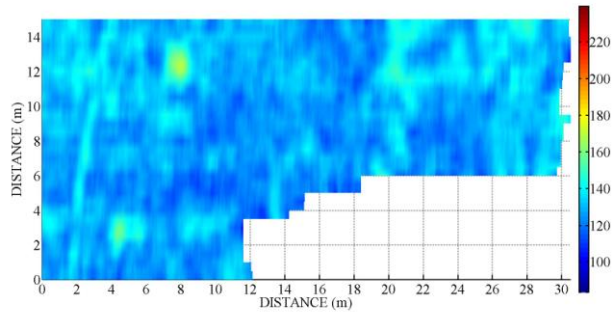


Ανατολικά του Μοναστηριού (Περιοχή Ν)

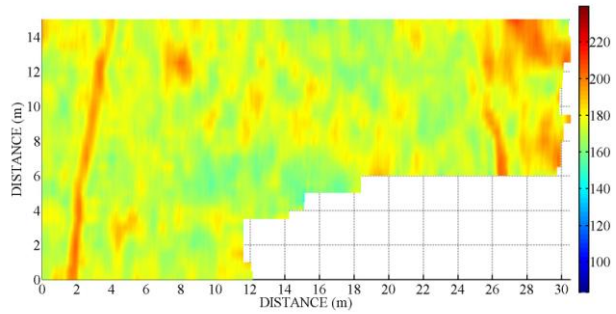
- **Τρισδιάστατο**



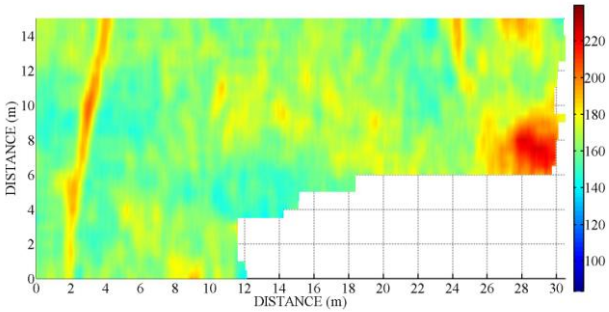
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



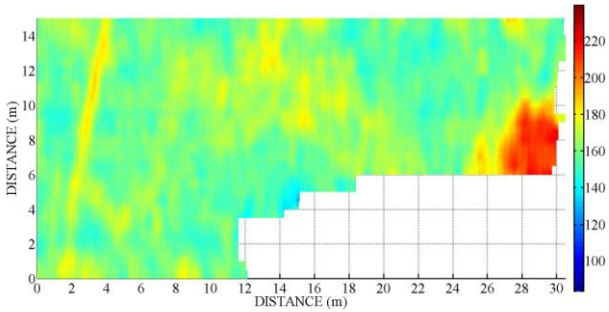
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.3 m βάθος)**



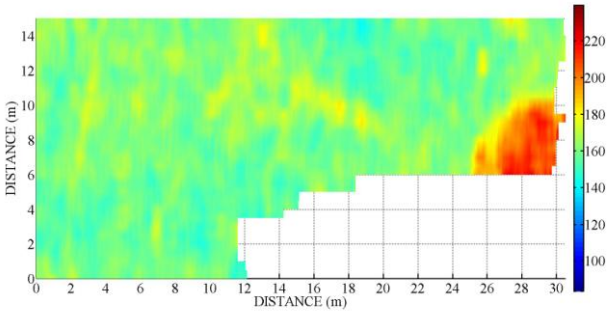
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.6 m βάθος)**



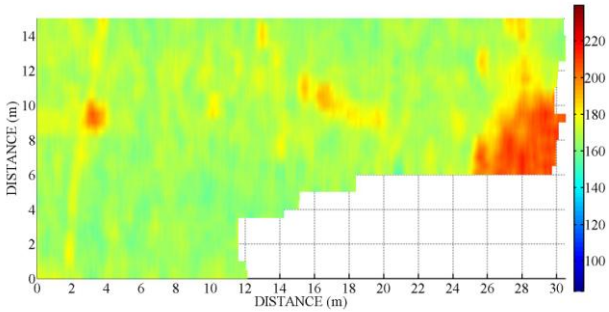
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.9 m βάθος)**



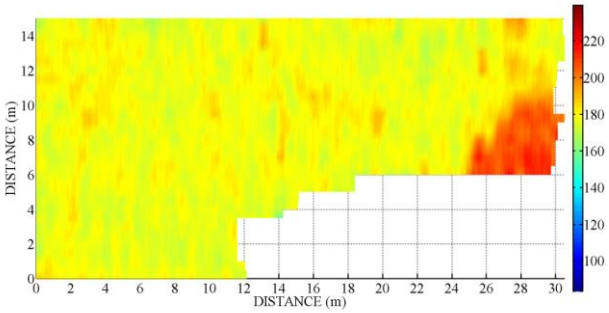
- **Οριζόντια τομή 20 ns (1.2 m βάθος)**



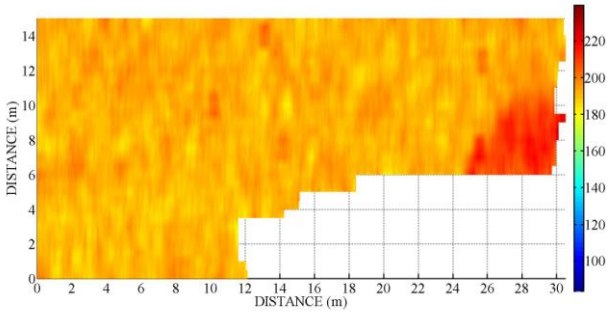
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.5 m βάθος)**



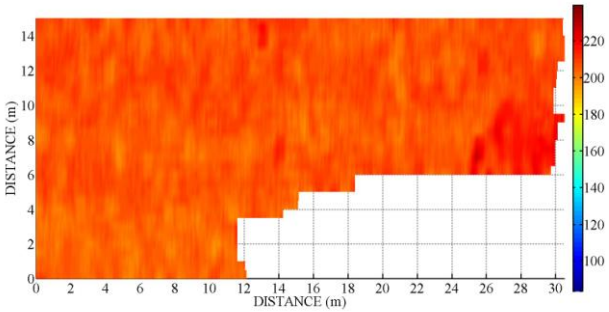
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.8 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (2.1 m βάθος)**

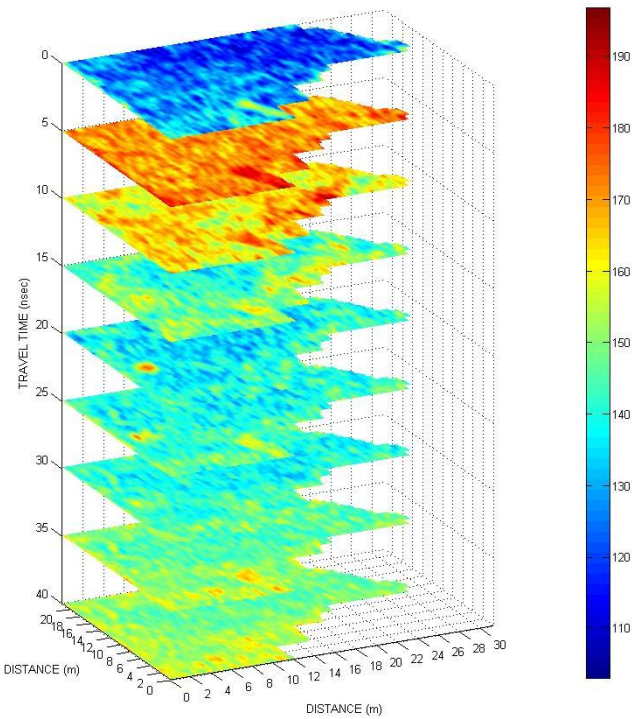


- **Οριζόντια τομή 40 ns (2.4 m βάθος)**

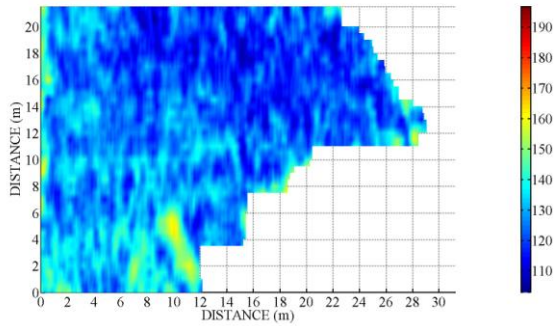


Νοτιανατολικά του Χώρου Στάθμευσης (Περιοχή Ε)

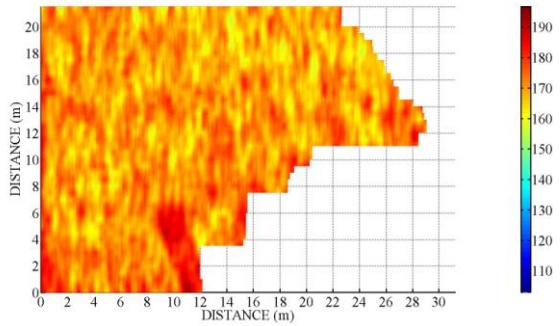
- **Τρισδιάστατο**



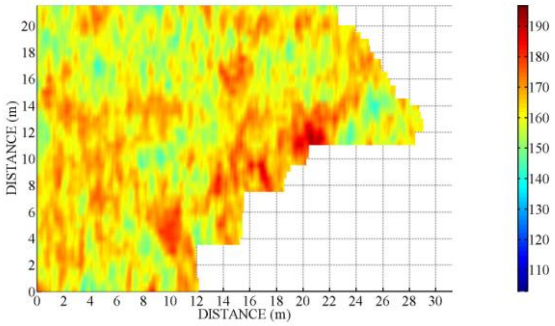
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



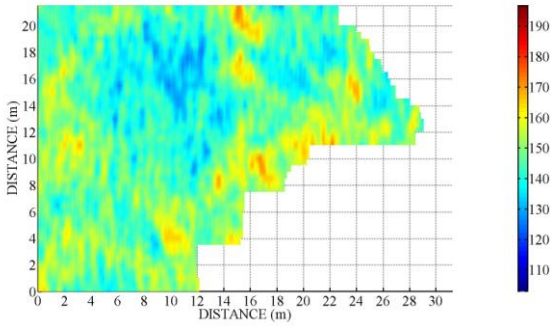
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.25 m βάθος)**



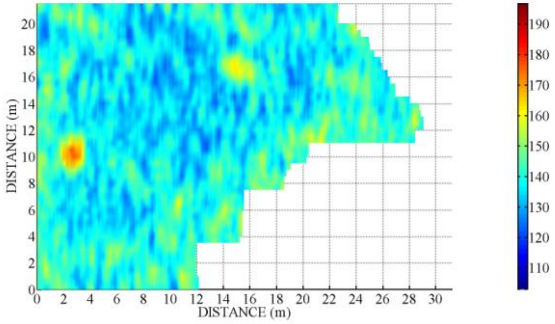
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.5 m βάθος)**



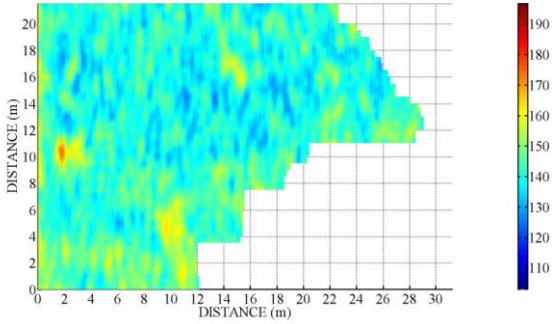
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.75 m βάθος)**



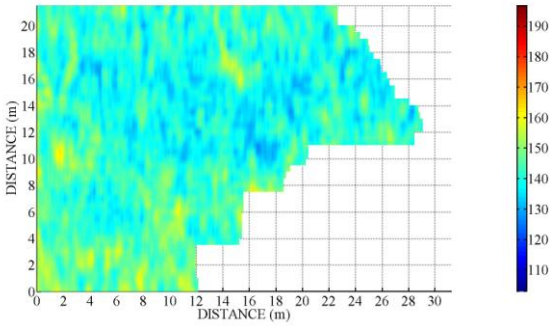
- **Οριζόντια τομή 20 ns (1.0 m βάθος)**



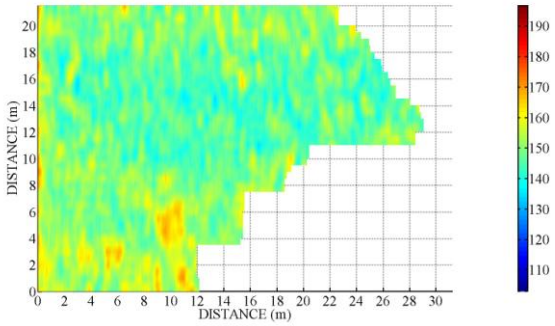
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.25 m βάθος)**



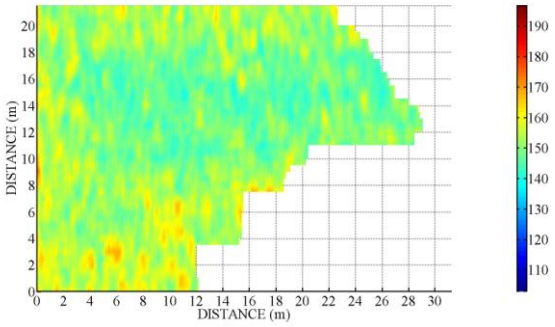
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.5 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.8 m βάθος)**

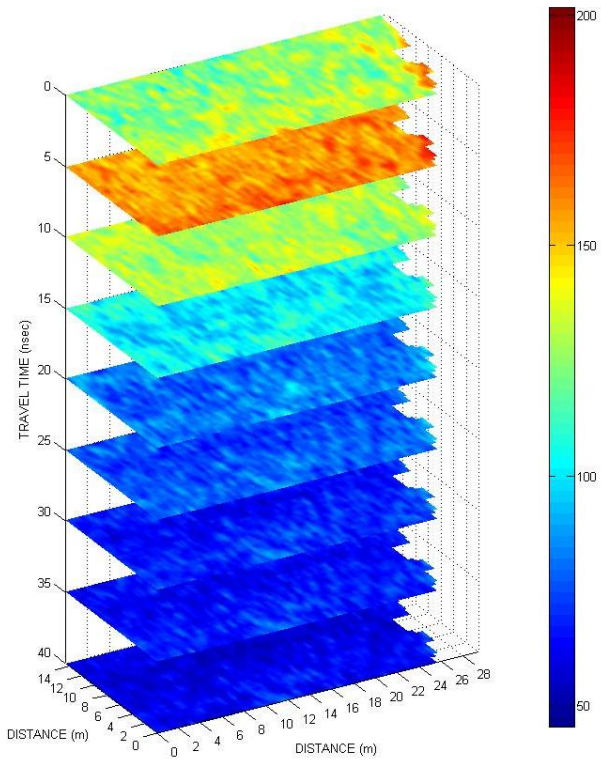


- **Οριζόντια τομή 40 ns (2.0 m βάθος)**

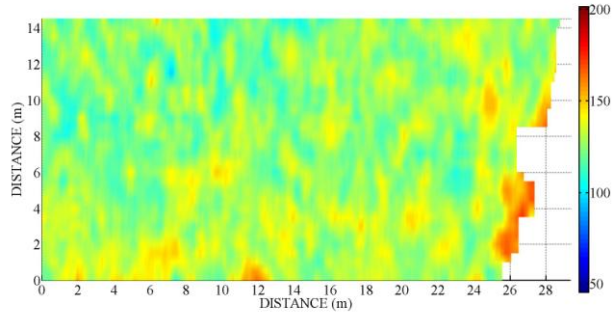


Νοτιοδυτικά του Χώρου Στάθμευσης (Περιοχή W)

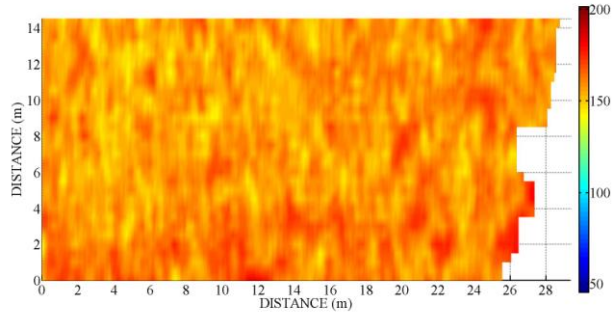
- **Τρισδιάστατο**



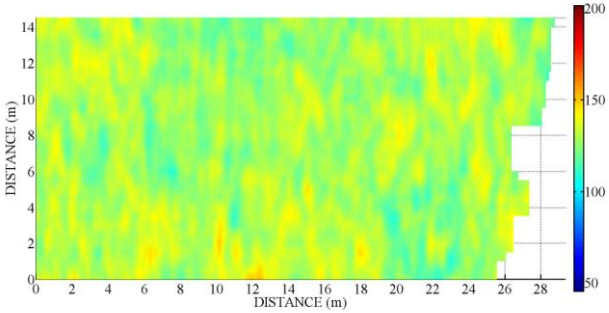
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



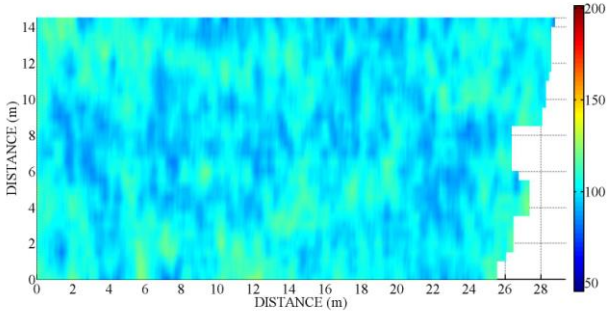
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.25 m βάθος)**



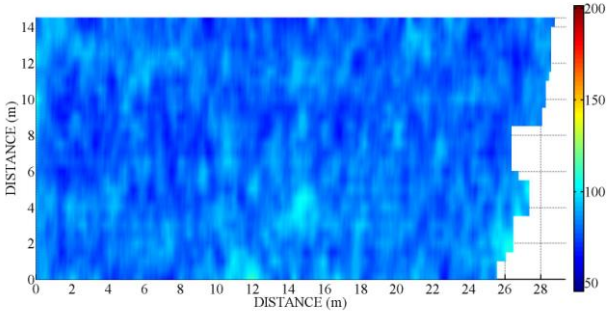
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.5 m βάθος)**



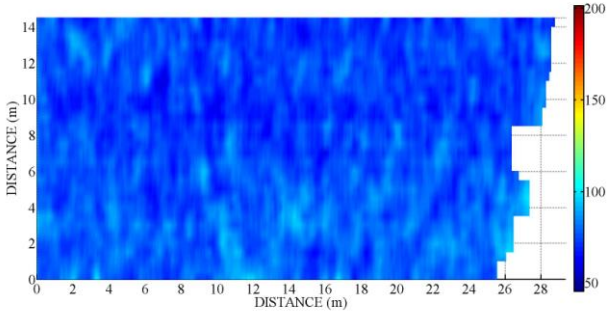
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.75 m βάθος)**



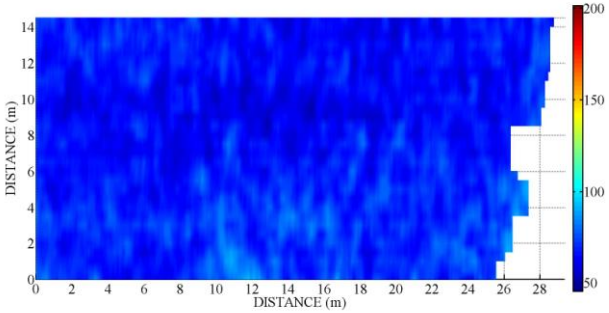
- **Οριζόντια τομή 20 ns (1.0 m βάθος)**



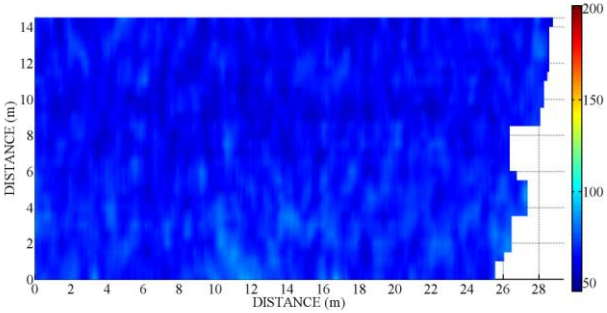
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.25 m βάθος)**



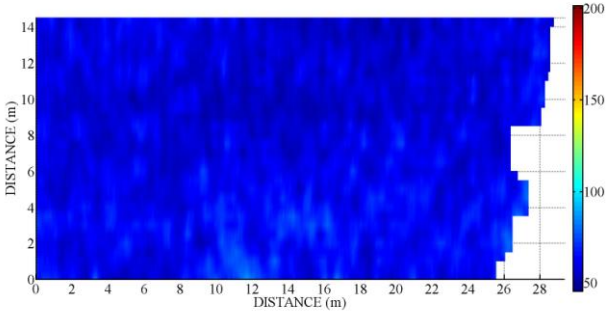
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.5 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.8 m βάθος)**

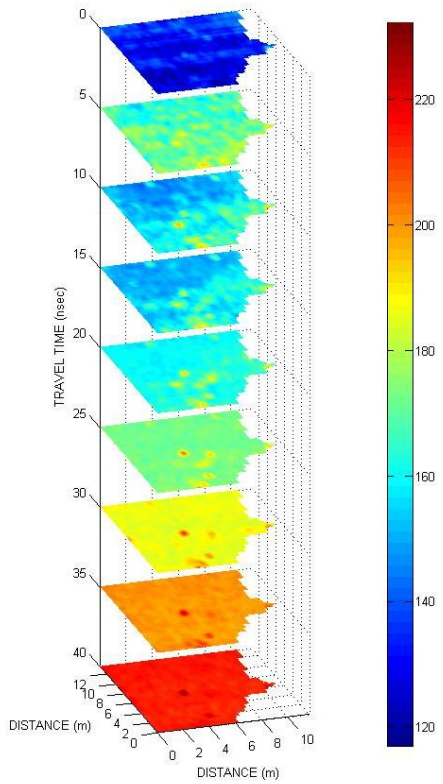


- **Οριζόντια τομή 40 ns (2.0 m βάθος)**

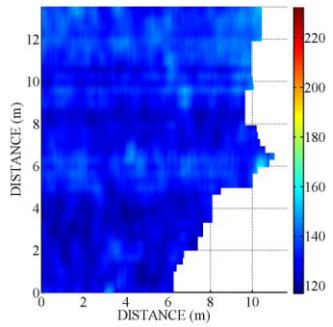


Δυτικά της Τρίκλιτης Δεξαμενής (Περιοχή Τ)

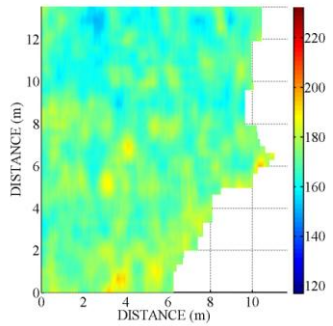
- **Τρισδιάστατο**



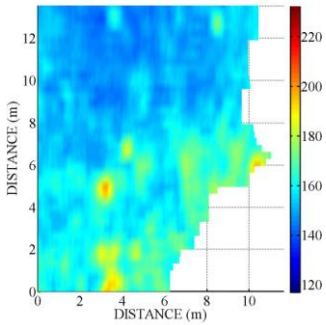
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



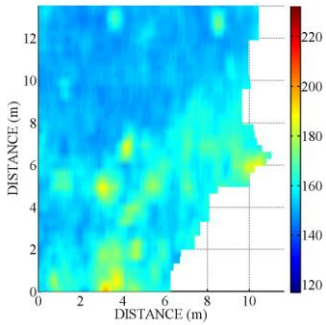
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.2 m βάθος)**



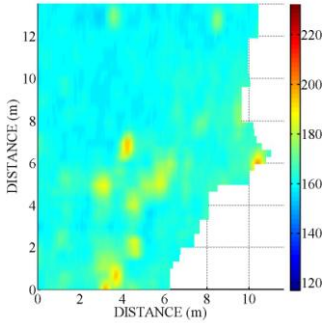
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.45 m βάθος)**



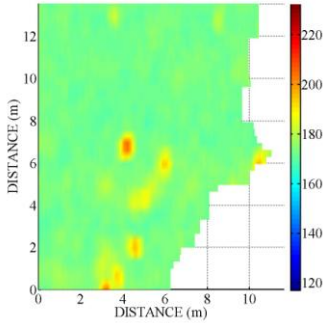
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.7 m βάθος)**



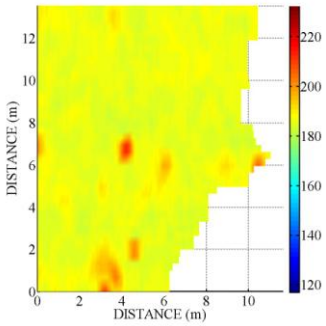
- **Οριζόντια τομή 20 ns (0.9 m βάθος)**



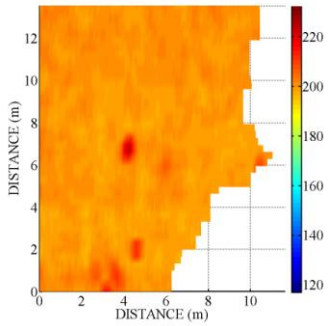
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.1 m βάθος)**



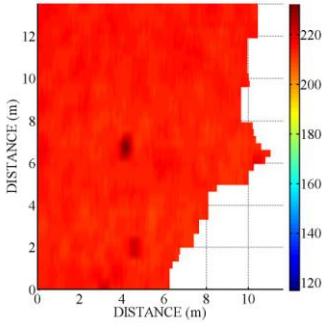
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.35 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.6 m βάθος)**

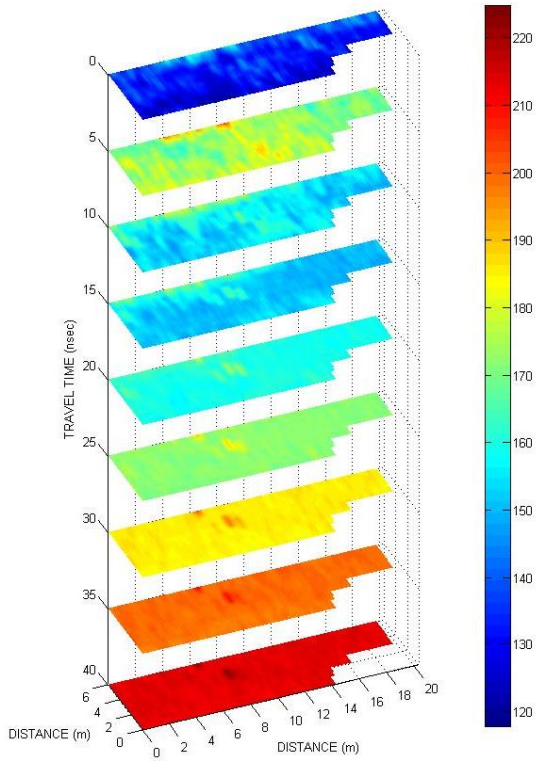


- **Οριζόντια τομή 40 ns (1.8 m βάθος)**

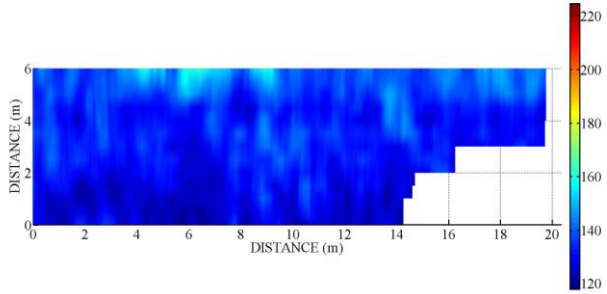


Περιοχή Λουτρών (Κάναβος Κ)

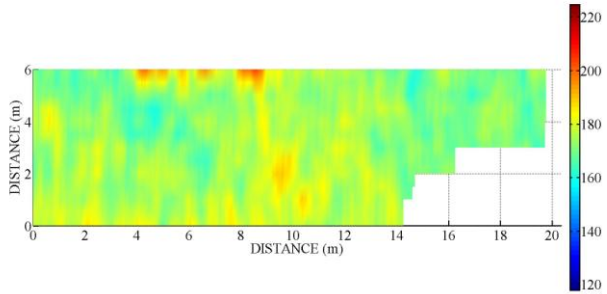
- **Τρισδιάστατο**



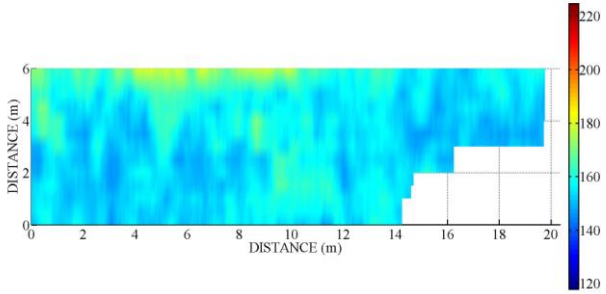
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



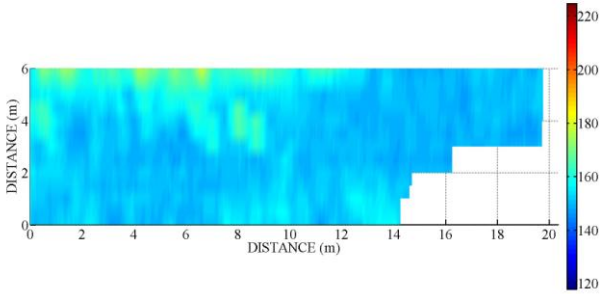
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.25 m βάθος)**



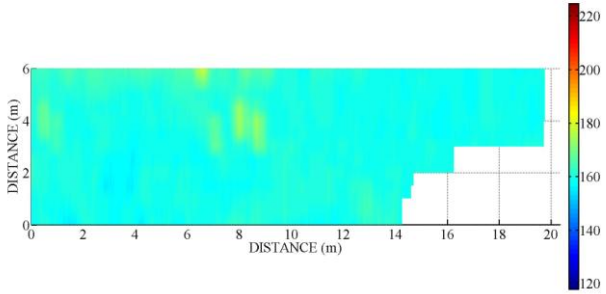
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.5 m βάθος)**



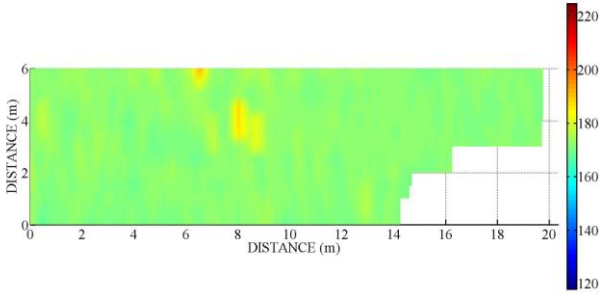
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.75 m βάθος)**



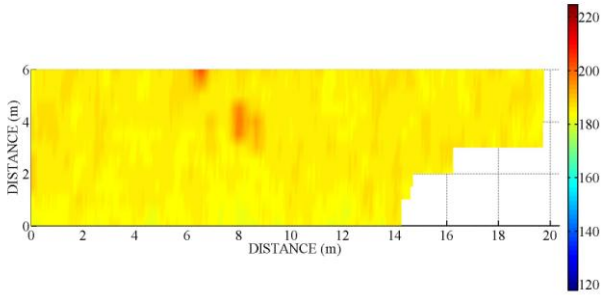
- **Οριζόντια τομή 20 ns (1.0 m βάθος)**



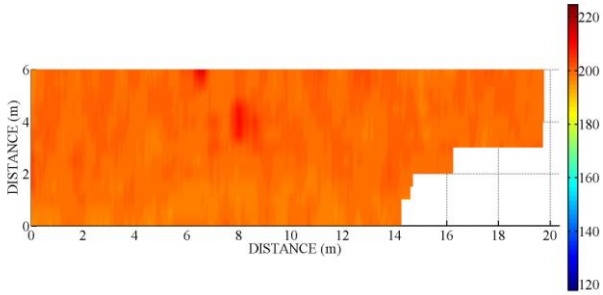
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.25 m βάθος)**



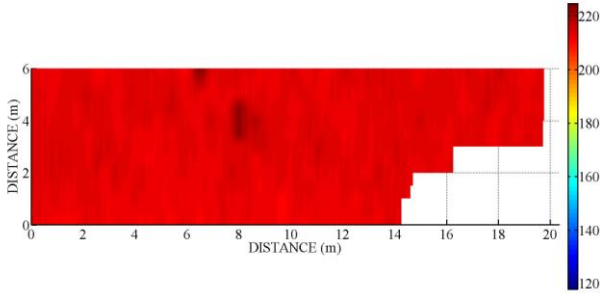
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.5 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.8 m βάθος)**

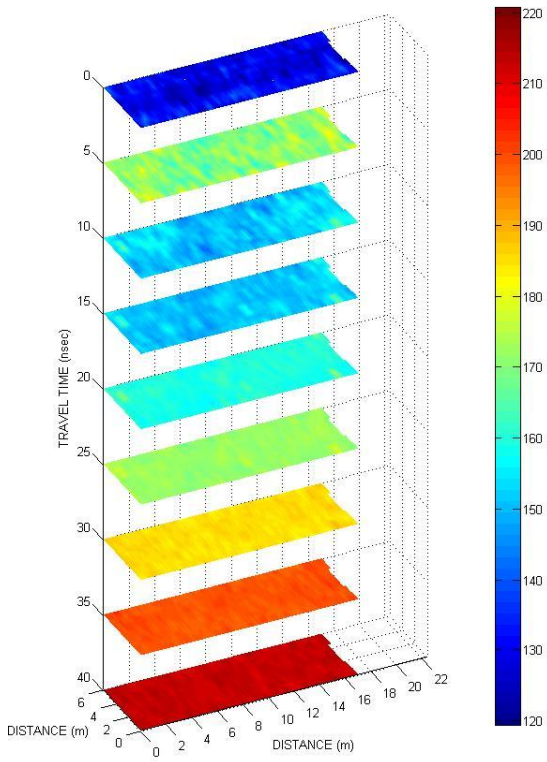


- **Οριζόντια τομή 40 ns (2.0 m βάθος)**

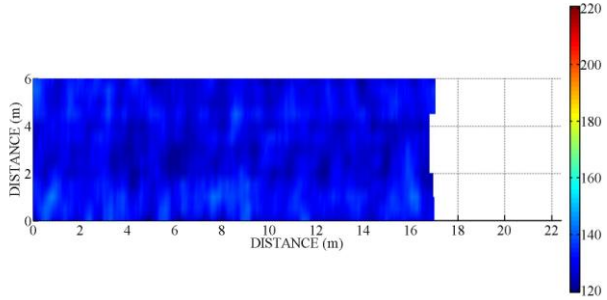


Περιοχή Λουτρών (Κάναβος Λ)

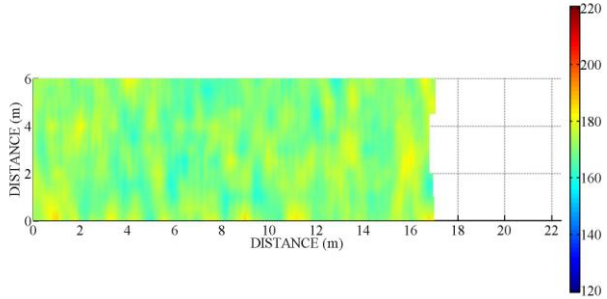
- **Τρισδιάστατο**



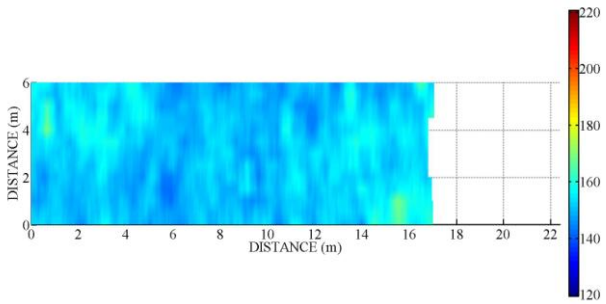
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



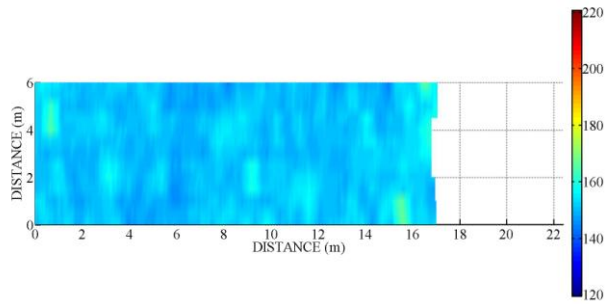
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.25 m βάθος)**



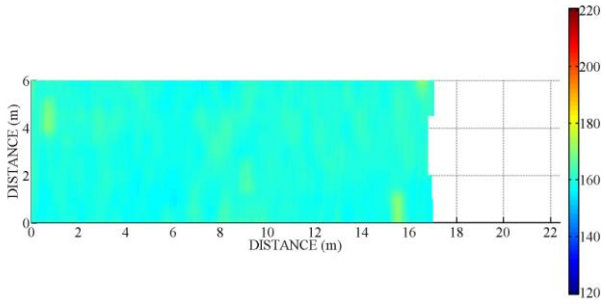
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.5 m βάθος)**



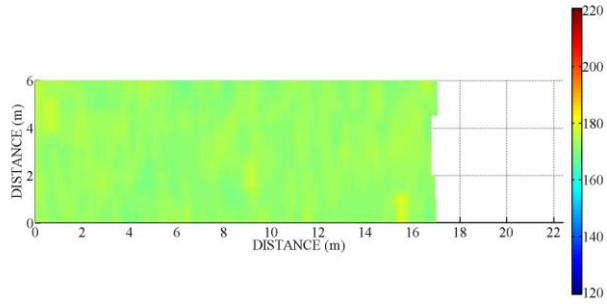
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.75 m βάθος)**



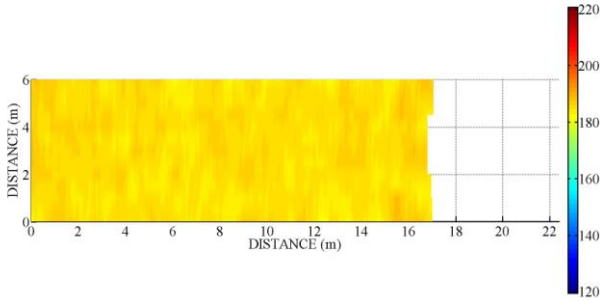
- **Οριζόντια τομή 20 ns (1.0 m βάθος)**



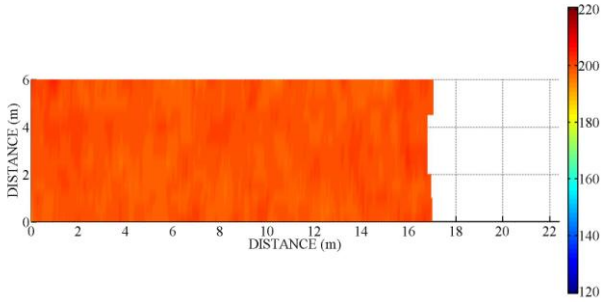
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.25 m βάθος)**



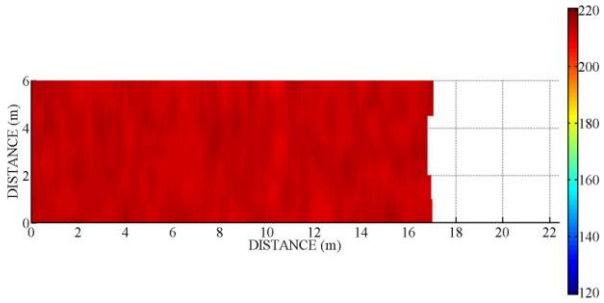
- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.5 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.8 m βάθος)**

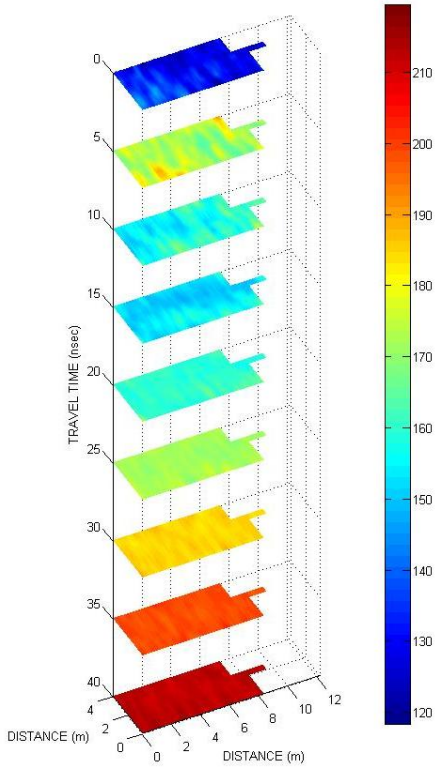


- **Οριζόντια τομή 40 ns (2.0 m βάθος)**

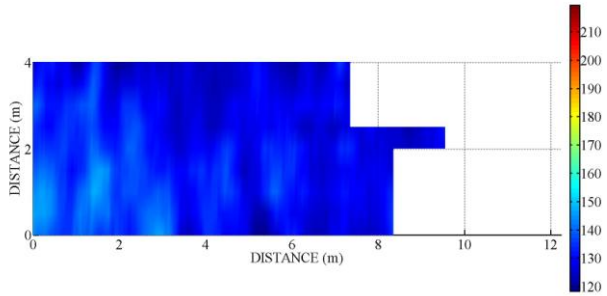


Περιοχή G

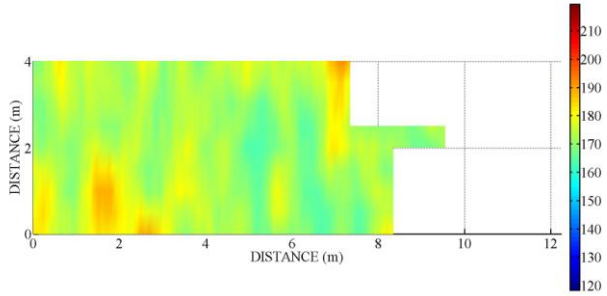
- **Τρισδιάστατο**



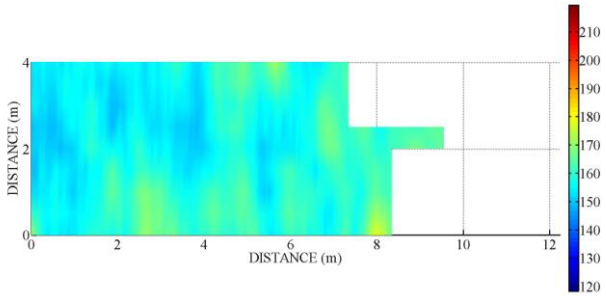
- **Οριζόντια τομή 0 ns**



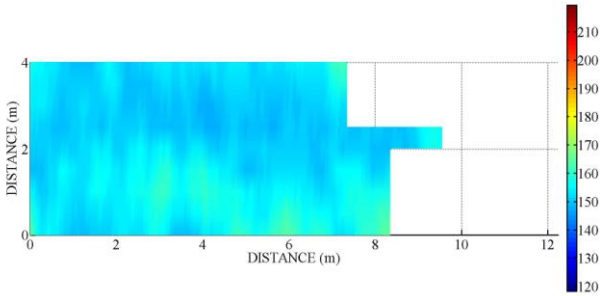
- **Οριζόντια τομή 5 ns (0.25 m βάθος)**



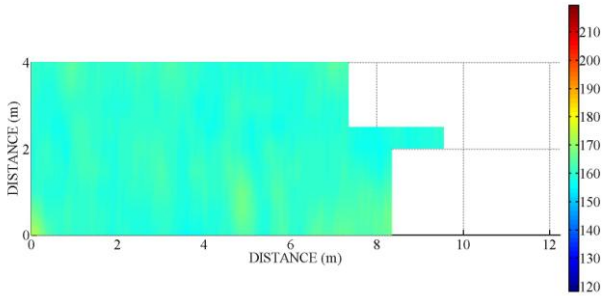
- **Οριζόντια τομή 10 ns (0.5 m βάθος)**



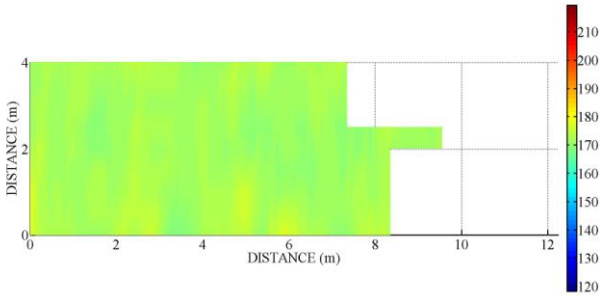
- **Οριζόντια τομή 15 ns (0.75 m βάθος)**



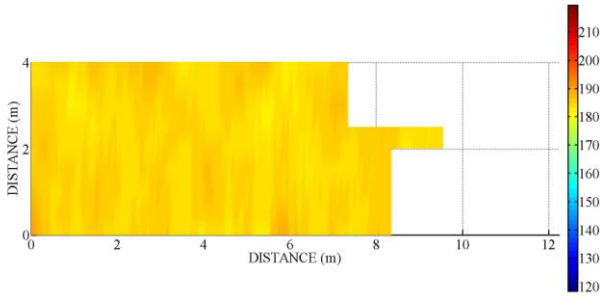
- **Οριζόντια τομή 20 ns (1.0 m βάθος)**



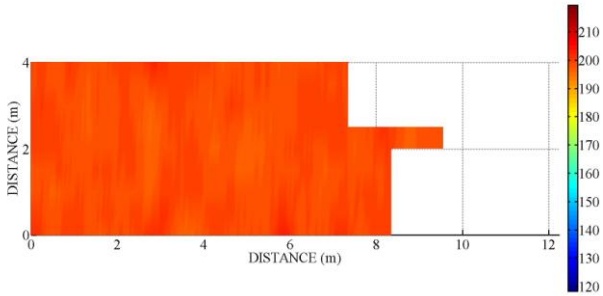
- **Οριζόντια τομή 25 ns (1.25 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 30 ns (1.5 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 35 ns (1.8 m βάθος)**



- **Οριζόντια τομή 40 ns (2.0 m βάθος)**