ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΑΠΤΕΡΩΝ ΤΟΥ Ν.ΧΑΝΙΩΝ

ΕΥΘΥΜΙΟΥ Κ.ΜΑΡΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (επιβλέπων), ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΑΝΟΥΗΛ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ

ΧΑΝΙΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων γεωφυσικής διασκόπησης με τη μέθοδο του γεωραντάρ για την απεικόνιση θαμμένων αρχιτεκτονικών λειψάνων στην περιοχή των Αρχαίων Απτέρων, του νομού Χανίων.

Τα δεδομένα αυτά είχαν αποκτηθεί στα πλαίσια του μαθήματος Ασκήσεις Υπαίθρου IV, στην εγγύς περιοχή της Τρίκλιτης δεξαμενής και του Μοναστηριού, σε δύο κανάβους των 23 και 29 γραμμών μελέτης αντίστοιχα καθώς και σε εννιά επιμέρους κανάβους σε επιλεγμένες θέσεις του αρχαιολογικού χώρου. Το πρώτο στάδιο περιελάμβανε τη δημιουργία τομών γεωραντάρ στιγμιαίου πλάτους, καθώς και οριζόντιων τομών που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς χρόνους καταγραφής με τη χρήση του λογισμικού GPR Pro. Στην συνέχεια για την επεξεργασία των οριζόντιων τομών στιγμιαίου πλάτους χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Transform. Ειδικότερα, εφαρμόστηκε επαναδειγματοληψία με βήμα 0.1 μέτρα και εξομάλυνση των δεδομένων. Από την σύγκριση αυτών των οριζόντιων τομών με αντίστοιχες που δημιουργήθηκαν από το λογισμικό GPRPro προκύπτει ότι το πρόγραμμα Transform αναδεικνύει καλύτερα τις ανθρωπογενείς δομές.

Από την ερμηνεία των οριζόντιων τομών νότια του μοναστηριού, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η οριζόντια τομή σε βάθος 0.7 μέτρα. Οι ανακλάσεις που παρατηρήθηκαν σε αυτή την περιοχή οφείλονται σε δεξαμενή κυκλικής διατομής, διαμέτρου 4 μέτρων. Αντίστοιχο ενδιαφέρον συγκέντρωσε η περιοχή δυτικά της Τρίκλιτης δεξαμενής καθώς και η περιοχή ανατολικά του Μοναστηρίου όπου απεικονίζονται με λεπτομέρεια αρχιτεκτονικά λείψανα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ.κ.Σπανουδάκη Νικόλαο και κ.Οικονόμου Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθειά τους, καθ' όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας των μετρήσεων καθώς και της συγγραφής της εργασίας.

Ευχαριστείες οφείλω στους καθηγητές κ.Μανούτσογλου Εμμ. και κ.Στειακάκη Εμμ. για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιστροπή.

Επίσης ευχαριστείες οφείλω να εκφράσω στους κυρίους Hamdan H. και Ανδρονικίδη Ν. Μηχανικούς Ορυκτών Πόρων για την υποστήριξή τους.

Τέλος θερμά ευχαριστώ την οικογένεια και κυρίως τους γονείς μου, για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αλλά και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου συνολικά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ III

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ III

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ IIIV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 1

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 2

Ο ΧΩΡΟΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ **2**

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 2

2.2 Ο ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ 2

2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ..... **9**

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ 9

3.1 Εισαγωγή 9

3.1.1 Ιστορική αναδρομή του γεωραντάρ. 9

3.1.2 Γενικές εφαρμογές 10

3.1.3 Εφαρμογές στην αρχαιολογία. 13

3.2 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ. 14

3.3 Διατάξεις πομπού δέκτη 15

3.4 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. 16

3.5 Παράμετροι διασκόπισης. 17

3.6 Μέθοδοι διασκόπησης 17

3.7 Επιλογή συχνότητας λειτουργίας. 19

3.8 Επιλογή της διάρκειας καταγραφής. 20

3.9 Διάστημα δειγματοληψίας 20

3.10 Βήμα διασκόπησης 21

3.11 Απόσταση πομπού δέκτη. 21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ..... **23**

ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 23

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 23

4.2 Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ. 24

4.3 Επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων. (Πρώτη ομάδα ψηφιακά επεξεργασμένων εικόνων στην περιοχή του Μοναστηριού.) 25

4.3.1 Μονοδιάστατα Φίλτρα 26

4.4 Επεξεργασία των μετρήσεων που αφορούν στην τρίκλιτη δεξαμενή. 30

4.5 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (Instantaneous Attributes). 33

4.5.1 Αποτελέσματα από την περιοχή του Μοναστηριού. 34

4.5.2 Αποτελέσματα από την περιοχή της Τρίκλιτης Δεξαμενής. 38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 41

ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΤΟΜΕΣ 41

5.1 Δημιουργία Οριζόντιων Τομών 41

5.2 Μέθοδος Ανάδειξης Τοπικών Ανωμαλιών μέσω Εξομάλυνσης..... 41
5.3 Επαναδειγματοληψία 41
5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων. 43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 71

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....71
6.1 Συμπεράσματα..... 71
Βιβλιογραφία..... 72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συγκεκριμένη εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελείται από δύο κύριους θεματικούς άξονες. Σε πρώτη φάση γίνεται επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων που προέκυψαν από τη χρήση της μεθόδου του γεωραντάρ σε περιβάλλον Matlab, και αφορούν στην περιοχή της Τρίκλιτης Δεξαμενής και του Μοναστηριού. Σε δεύτερη φάση γίνεται επεξεργασία και ερμηνεία δεδομένων που προέκυψαν από μετρήσεις σε εννέα επιμέρους κανάβους στην περιοχή μελέτης με χρήση όμως του προγράμματος Transform. Πρόκειται ουσιαστικά για επαναδειγματοληψία που θα εξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο εκτενώς ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιήθηκε.

Πιο συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο, το οποίο και ακολουθεί, γίνεται σύντομη περιγραφή του αρχαιολογικού χώρου και τονίζεται ο σημαντικός ρόλος τον οποίο διαδραμάτισε για πολλά χρόνια ως επίκεντρο οικονομικού και στρατηγικού ενδιαφέροντος.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος διασκόπησης που χρησιμοποιήθηκε, η αρχή λειτουργίας του οργάνου αλλά και οι παράμετροι που επηρεάζουν την εκάστοτε διασκόπηση. Δεν θα μπορούσαν ωστόσο να μην αναφερθούν και οι τομείς στους οποίους βρίσκει εφαρμογή η μέθοδος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των δεδομένων που αφορούν την πρώτη φάση της επεξεργασίας σε περιβάλλον Matlab. Ακολουθεί επεξεργασία των δεδομένων που αφορούν στη μέθοδο του γεωραντάρ, κατά την οποία εφαρμόστηκαν φίλτρα, με σκοπό την αφαίρεση του θορύβου, την αποκοπή υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων, ώστε χαρακτηριστικά των εικόνων που δεν ήταν άμεσα αντιληπτά να γίνουν ευδιάκριτα.

Στο πέμπτο που ακολουθεί εξηγείται ο λόγος της επαναδειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκε στις επιμέρους περιοχές , παρουσιάζονται αναλυτικά οι οριζόντιες τομές που προέκυψαν από την επεξεργασία, ενώ παράλληλα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με παλαιότερη διασκόπηση στις ίδιες περιοχές με χρήση όμως διαφορετικού λογισμικού.

Τέλος η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση συμπερασμάτων σχετικά με την ύπαρξη ανθρωπογενών δομών, αλλά και για την ποιότητα των αποτελεσμάτων μετά τη χρήση των δύο διαφορετικών λογισμικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

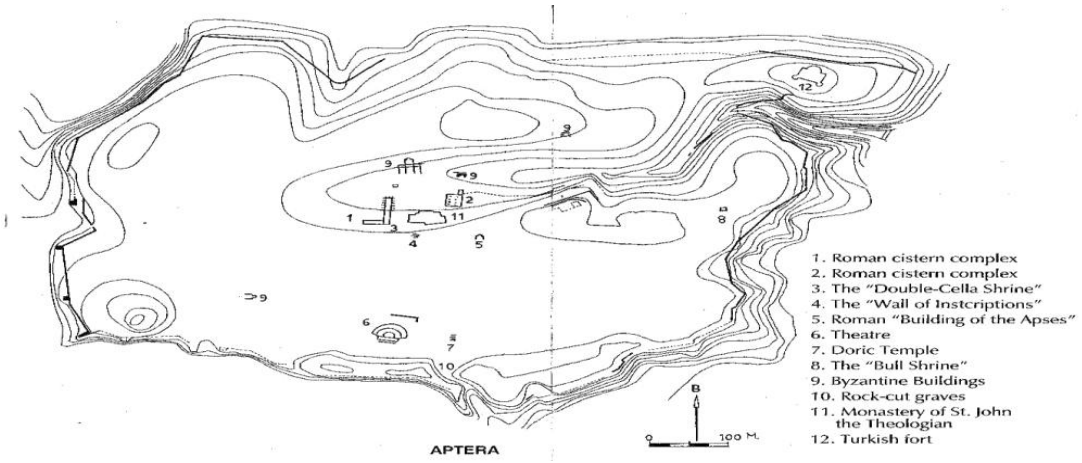
Ο ΧΩΡΟΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αρχαιολογικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή σχετικά με την ονομασία της πόλης των Αρχαίων Απτέρων, την εξέλιξή της, ιστορική και πολιτιστική, στο βάθος των χρόνων.

2.2 Ο ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ

Ο αρχαιολογικός χώρος των Απτέρων βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νομού Χανίων. Βρίσκεται περίπου 20 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης των Χανίων.



Σχήμα 2.1α : Τοπογραφικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής.

2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Πάνω από τον κόλπο της Σούδας, όπου σήμερα βρίσκεται το Παλαιόκαστρο, δεσπόζει η Αρχαία πόλη των Απτέρων.

Σύμφωνα με την παράδοση, το όνομα της πόλης προέρχεται από τον ¨Άπτερο, βασιλιά της Κρήτης, γιο του Κύδωνα και πατέρα του Λάππιου, που έζησε περίπου το 1800 π.Χ. Ο μύθος των Απτέρων σχετικά με την προέλευση του ονόματος της πόλης, αναφέρεται και σε ένα μουσικό διαγωνισμό μεταξύ των Μουσών και των Σειρήνων. Άλλωστε κατά την μυθολογία η πόλη αποτελούσε κέντρο των μουσικών τεχνών.

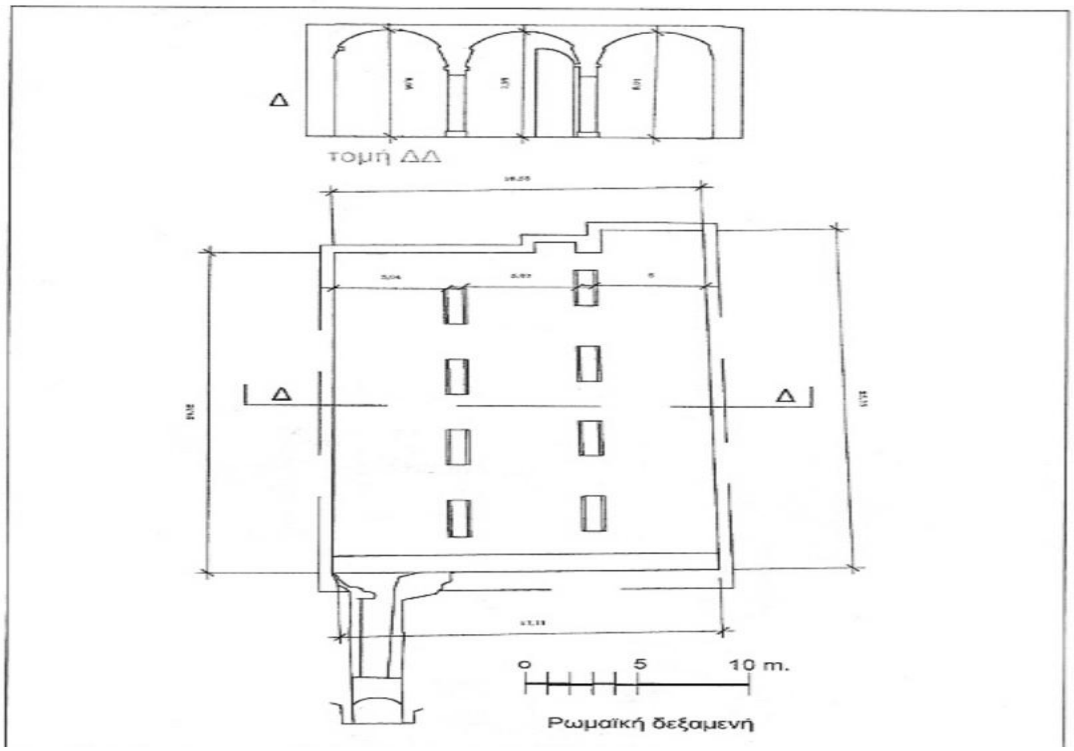
Εικόνα 2.1β Άποψη του Ενετικού Φρούριου της πόλης

Στο τέλος λοιπόν των αγώνων και αφού οι Μούσες στέφθηκαν νικήτριες, οι Σειρήνες προκειμένου να εκφράσουν την απογοήτευσή τους ξερίζωσαν τα φτερά τους, μένοντας «άπτερες«, ενώ τα πούπουλα των φτερών τους μεταμορφώθηκαν στα νησιά Λευκές, που βρίσκονται σήμερα στον κόλπο της Σούδας.

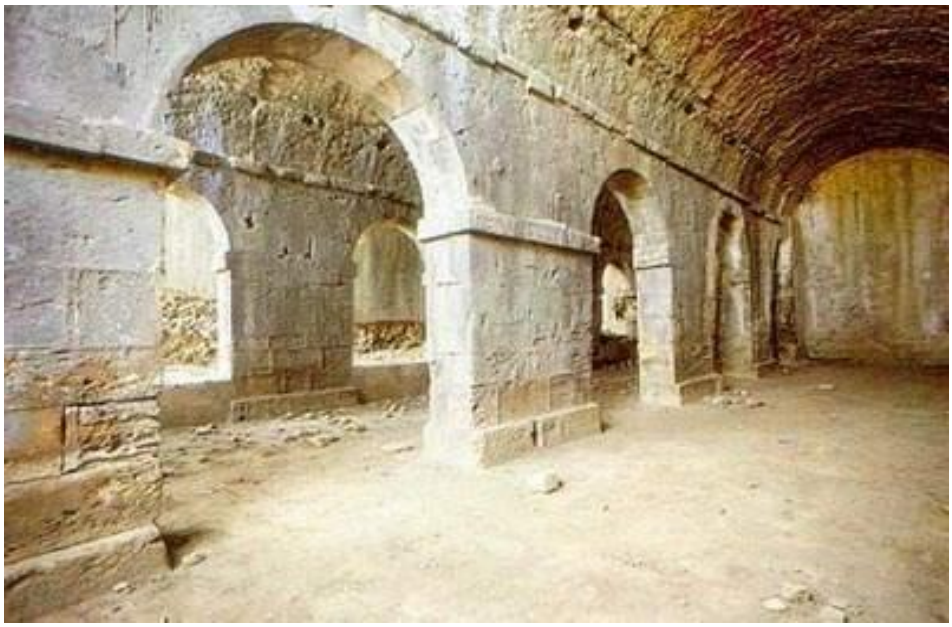
Ως ιδρυτής της πόλης φέρεται ο Γλαύκος ενώ η ακριβής θέση της καθορίστηκε από τις ανασκαφές του Wescher το 1862-64. Οι ανασκαφές του 1958 έφεραν στο φως το Δωρικό τέμπλο, πολύ κοντά στα ερείπια του αρχαίου θεάτρου και του αρχαίου θησαυροφυλακίου όπου φυλάσσονταν νομίσματα, σκεύη και άλλα αντικείμενα που παραπέμπουν στην Ελληνική και Ρωμαϊκή περίοδο. Πολύχρωμες τοιχογραφίες που παριστούν θεούς όπως η Άρτεμις και ο Απόλλωνας, καθώς και τέμπλα αφιερωμένα στη Δήμητρα, ενώ μια σειρά από αρχαίους τάφους γεμάτους νομίσματα και ασημένια σκεύη έφεραν στο φως οι ανασκαφές του Αλεξίου κατά το 1958. Σήμερα ανάμεσα στα τείχη της αρχαίας πόλης, ξεχωρίζουμε την εκκλησία του Αγίου Ιωάννη στη θέση που κάποτε κατείχε το τέμπλο των Μουσών. (www.just-crete.co.uk, περιοδικό Δήμου Σούδας)

Εικόνα 2.2: Άποψη της Μονής του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου. (www.just-crete.co.uk, περιοδικό Δήμου Σούδας)

Εικόνα 2.3: Άποψη της Μονής του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου από την είσοδο. (www.just-crete.co.uk, περιοδικό Δήμου Σούδας)



Εικόνα 2.4: Κάτοψη του τμήματος του συγκροτήματος δεξαμενών της περιόδου της Ρωμαιοκρατίας.



Εικόνα 2.4: Άποψη του τμήματος του συγκροτήματος δεξαμενών της περιόδου της Ρωμαιοκρατίας. (www.just-crete.co.uk, περιοδικό Δήμου Σούδας)

Ο πληθυσμός της πόλης άγγιζε τις 20.000 εκ των οποίων μόνο το 1/5 του πληθυσμού αποτελούνταν από άρχοντες, γαιοκτήμονες και πλοιοκτήτες της εποχής ενώ το υπόλοιπο τμήμα αποτελούσαν σκλάβοι.

Τα ερείπια της εκτιμούνται από την προελληνική, ελληνική και ρωμαϊκή περίοδο, αλλά ακόμη και κατά την βυζαντινή περίοδο η Άπτερα, εξακολούθησε να είναι σπουδαία. Οι πειρατές όμως που λυμαίνονταν τα παράλια της Κρήτης τη λεηλάτησαν πολλές φορές. Τον 7^{ο} αι. μ. Χ φαίνεται πως καταστράφηκε από σεισμό ενώ οι κάτοικοί της μετοίκησαν στη θέση Ράχη που σήμερα βρίσκεται το χωριό Νίππος, Η τελική της καταστροφή φαίνεται να έγινε από Σαρακηνούς το 823 μ.Χ και δεν ανοικοδομήθηκε ξανά σαν πόλη.

Εικόνα 2.5: Άποψη του χώρου με το «Διμερές ιερό>>.(www.just-crete.co.uk, περιοδικό Δήμου Σούδας)

Εικόνα 2.6 : Άποψη της Τρίκλιτης δεξαμενής στην περιοχή μελέτης. (www.crete.gr/ Τουριστικός οδηγός Χανίων)

Όταν κατέλαβαν την Κρήτη οι Βενετσιάνοι, η πόλη ήταν ερειπωμένη και επειδή ήταν φυσικά οχυρή θέση έχτισαν φρούριο για την ασφάλεια του κόλπου. Δημιουργήθηκε μάλιστα και μικρός συνοικισμός στη δυτική πλευρά της πολιτείας και ο Gianpatista Del Monte ήθελε να μεταφέρει εκεί τους κατοίκους των Χανίων, να κατεδαφίσει το φρούριό τους και να μολώσει το λιμάνι τους γιατί κατά τη γνώμη του ήταν ακατάλληλο για άμυνα. Το 1538 το κατέστρεψε ο Μπαρμπαρόσα και την καταστροφή συμπλήρωσε ο Σουλτάν Σελήμ.

Το 1648 οι Τούρκοι έκτισαν στη θέση του κατεστραμμένου φρουρίου έναν πύργο και μετά την επανάσταση του 1866 ο διοικητής Κρήτης Ρεούφ Πασάς το μετέτρεψε πάλι σε φρούριο που του έδωσε το όνομα του πρωτότοκου γιου του Αμπτούλ Αζίζ Ιτζεντίν. Μετά την επανάσταση του 1866 η περιοχή συνοικίστηκε και πάλι και δημιουργήθηκαν τα χωριά Μεγάλα Χωράφια και Παλιόκαστρο . Μετά την απέλαση των Τούρκων από την Κρήτη το φρούριο Ιτζεντίν χρησιμοποιήθηκε από την Κρητική Πολιτεία ως φυλακή.

Εικόνα 2.7:Άποψη του λιμένα της Σούδας από την Άπτερα. (www.just-crete.co.uk, περιοδικό Δήμου Σούδας)

Συνοψίζοντας, οι μελέτες ειδικών της ιστορικής και στρατηγικής σημασίας της πόλης των Απτέρων καταλήγουν ότι η πόλη αποτελούσε πάντα ένα από τα σημαντικότερα εμπορικά και ναυτικά κέντρα της Κρήτης λόγω της ιδιαίτερης γεωγραφικής της θέσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

3.1 Εισαγωγή

Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar GPR) αποτελεί όργανο γεωφυσικών διασκοπήσεων που και εδώ και μερικά χρόνια χρησιμοποιείται στην απεικόνιση του υπεδάφους. Οι εφαρμογές του καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα διαφόρων επιστημών (γεωλογικές, περιβαλλοντικές, αρχαιολογικές κ.α). Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή των εφαρμογών του γεωραντάρ, παρατίθεται σειρά εφαρμογών του και περιγράφεται συνοπτικά η αρχή λειτουργίας της μεθόδου.

3.1.1 Ιστορική αναδρομή του γεωραντάρ.

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

Οι Moffat και Puskar παρουσίασαν ένα από τα πρώτα και πολλά υποσχόμενα συστήματα GPR το 1976. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε πληθώρα περιπτώσεων όπως τον εντοπισμό ρωγμών σε τούνελ και ορυχεία καθώς και της περιεχόμενης υγρασίας των εδαφών. Επιπλέον συνεισφορά των Moffat και Puskar (1976) αποτέλεσε η ανάπτυξη βασικών αρχών για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το 1982 ο Ulriksen και άλλοι επιστήμονες ανέπτυξαν ακόμα πιο βελτιωμένες μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων του γεωραντάρ. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των

υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω βελτίωση των μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων GPR (Smemoe, 2000).

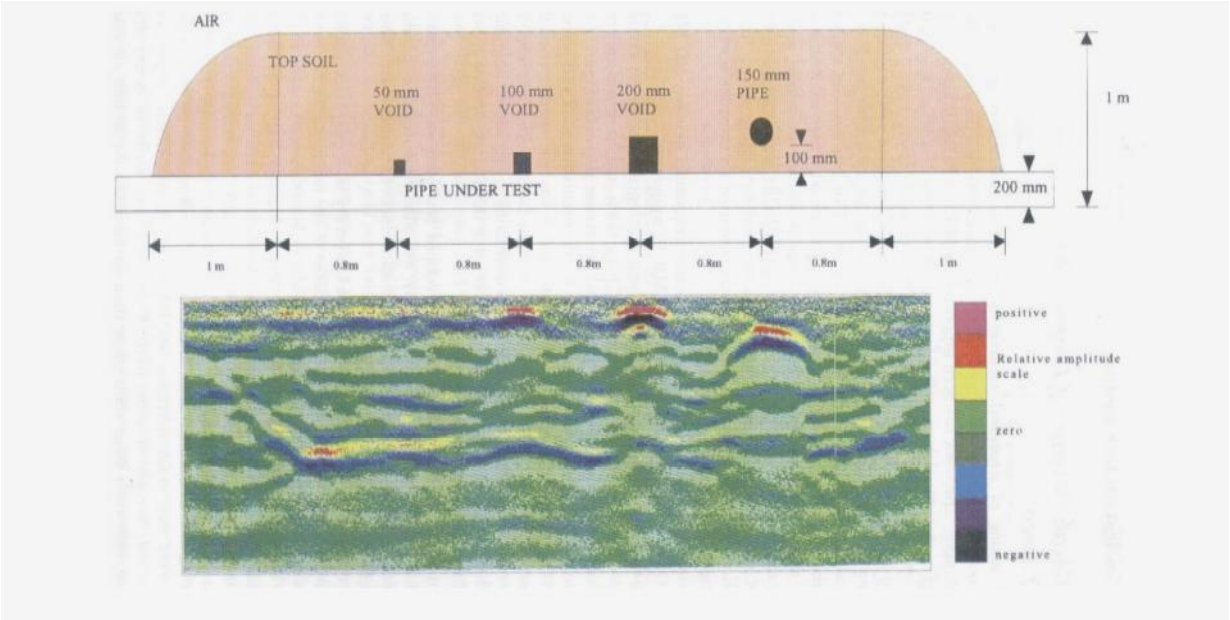
3.1.2 Γενικές εφαρμογές.

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

ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ	**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ**
Ανίχνευση εγκοίλων και ασυνεχειών	Χαρτογράφηση ρυπασμένων περιοχών
Χαρτογράφηση βυθισμάτων	Χαρτογράφηση ρύπων στο υπόγειο νερό
Χαρτογράφηση επιφανειακών κοιτασμάτων	Έρευνες σε χωματερές
Έρευνα κοιτασμάτων και αξιολόγηση ορυκτών πόρων	Εντοπισμός θαμμένων βυτίων και βαρελιών
Πάχος στρωμάτων τύρφης και αξιολόγηση του	Εντοπισμός διαρροής αερίων
Χαρτογράφηση ρωγμών σε ορυκτό αλάτι	Έρευνες για νερό
Χαρτογράφηση προσχώσεων, επιπέδων ασυνεχειών κλπ	
Χαρτογράφηση γεωλογικών δομών	
Χαρτογράφηση λιμναίων και ποτάμιων ιζημάτων.	

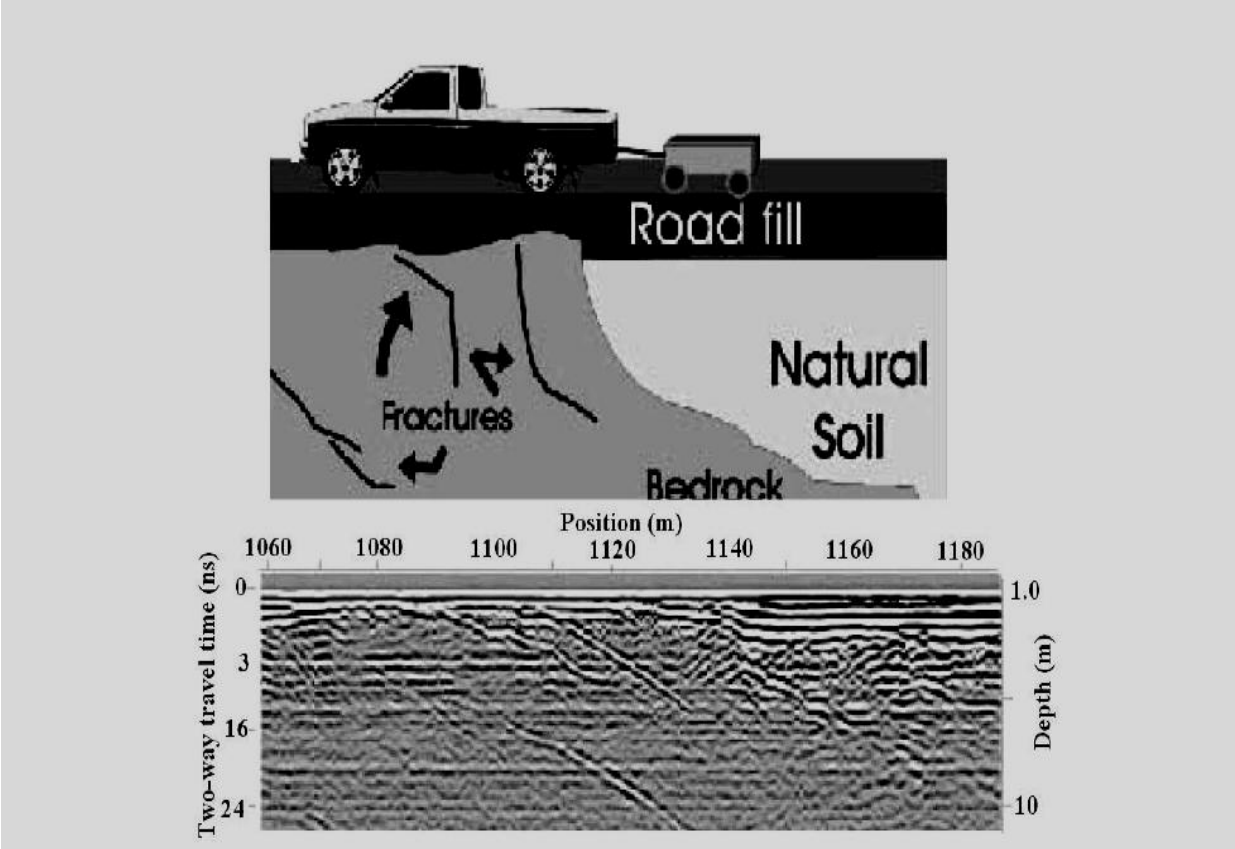
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΑΓΕΤΩΝΩΝ	**ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**
Χαρτογράφηση του πάχους των πάγων Προσδιορισμός εσωτερικής δομής των παγετώνων Μελέτη κίνησης των πάγων Ανίχνευση ρωγμών στη βάση των παγετώνων Χαρτογράφηση της στρωματογραφίας του χιονιού Χαρτογράφηση καναλιών ροής νερού στους παγετώνες Μελέτη της ισορροπίας της μάζας κάτω από τον παγετώνα.	Ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους Ανίχνευση αστοχιών /κενών Προσδιορισμός οπλισμού στο τσιμέντο Προσδιορισμός σωλήνων και καλωδίων Μελέτη ακεραιότητας κατασκευαστικών υλικών Δοκιμές στο τσιμέντο (concrete testing)
ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ	**ΔΙΚΑΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ**
Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών Εντοπισμός αρχαίων τάφων Χαρτογράφηση πριν την εκσκαφή Εντοπισμός, χαρτογράφηση αρχαίων δρόμων	Εντοπισμός θαμμένων στόχων (πτώματα, μπάρες, χρυσού κλπ.

Πίνακας 3.1 : Εύρος χρήσεων γεωραντάρ (Toshioka κ.ά, 1995, Annan, 2002, Daniels, 1996).



Εικόνα 3.1: Εντοπισμός θαμμένων σωλήνων με γεωραντάρ (Daniels, 1996).

Εικόνα 3.2 :Ανίχνευση αστοχιών σε οδόστρωμα με χρήση γεωραντάρ.(Daniels, 1996)



Εικόνα 3.3 : Εφαρμογή του GPR στην οδοποιία (Annan, 2002)

3.1.3 Εφαρμογές στην αρχαιολογία.

Η τεχνολογία των γεωφυσικών διασκοπήσεων έχει συνεισφέρει σημαντικά στην αρχαιολογική έρευνα μέσω της χαρτογραφικής αποτύπωσης των υπεδάφειων μνημείων, της ανακατασκευής απειλούμενων πολιτισμικών χώρων, της απεικόνισης του δομημένου χώρου των αρχαιολογικών θέσεων και της αναβάθμισης του σχεδιασμού των ανασκαφών με κύριο ζητούμενο την προστασία της πολιτισμικής κληρονομιάς.

Χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους και όργανα μετρήσεων, οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μη-καταστροφικές τεχνικές σε διαφορετικές φάσεις της αρχαιολογικής έρευνας, προσφέροντας πληροφορίες σχετικά με το είδος των υπεδάφειων μνημείων, το βάθος και την έκτασή τους και ορισμένες φορές σχετικά με τα επίπεδα κατοίκησης ή την φύση της καταστροφής τους. Μέσω της μέτρησης του μαγνητικού πεδίου της γης, της ηλεκτρικής αντίστασης ή αγωγιμότητας του εδάφους, της έντασης του βαρυτικού πεδίου και των σεισμικών ακουστικών κυμάτων ή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του γεωραντάρ που διεισδύουν στο υπέδαφος και ανακλώνται από τους διάφορους στόχους ή στρώματα του εδάφους, γίνεται εφικτή η χαρτογράφηση των υπεδάφειων μνημείων, και επιτρέπεται ο εντοπισμός και η χαρτογραφική αποτύπωση του δομημένου χώρου των αρχαιολογικών θέσεων προσφέροντας παράλληλα συμπληρωματικές πληροφορίες για το υπεδάφειο γεωμορφολογικό περιβάλλον τους.

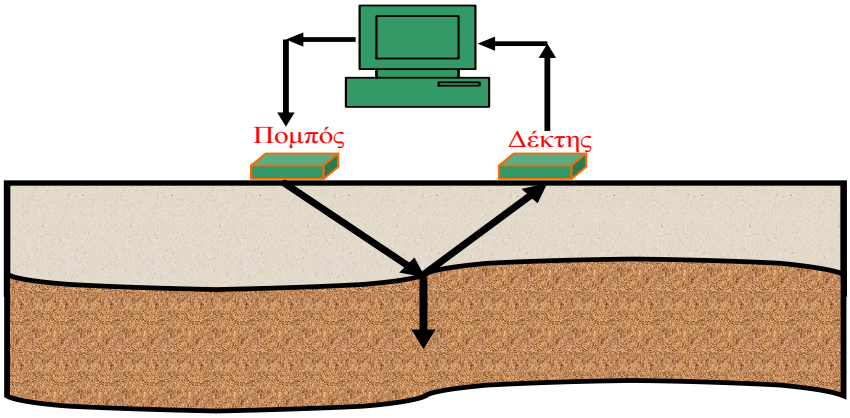
Κτιριακά λείψανα, αρχιτεκτονικές δομές, δρόμοι, κλίβανοι, οχυρωματικά έργα, υπόγειοι θάλαμοι, κανάλια και τάφοι είναι μερικοί από τους πιο υποσχόμενους στόχους της παραπάνω τεχνολογίας που δοκιμάζει συνεχώς τις δυνατότητές της σε νέα πεδία. Λαμβάνοντας υπόψιν τους ανθρωπογενείς και φυσικούς παράγοντες που απειλούν την πολιτιστική κληρονομιά, καθώς και τα μη αναστρέψιμα αποτελέσματα της ανασκαφής, αντιλαμβανόμαστε ότι οι γεωφυσικές διασκοπήσεις,με χρήση γεωραντάρ, αποτελούν ένα εργαλείο της αρχαιολογικής έρευνας που προσφέρει πληροφορίες με τον πλέον αποτελεσματικό, οικονομικό και παραγωγικό τρόπο. (Αρχαιοτηλεπισκοπικά νέα-Τεύχος 5, Ιανουάριος 2002).

3.2 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.

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

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

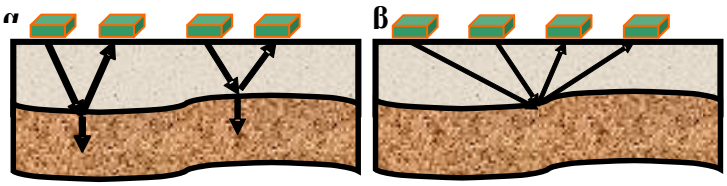
Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη ανεξαρτήτως της διαδρομής του, ονομάζεται χρόνος διαδρομής. Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νανο-δευτερόλεπτο ($1ns = 10^{-9}s$). Δυο κατηγορίες κυμάτων καταγράφονται από το δέκτη. Στην πρώτη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



Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ (Πουλιούδης, 1999, Σπανουδάκης 2001)

3.3 Διατάξεις πομπού δέκτη

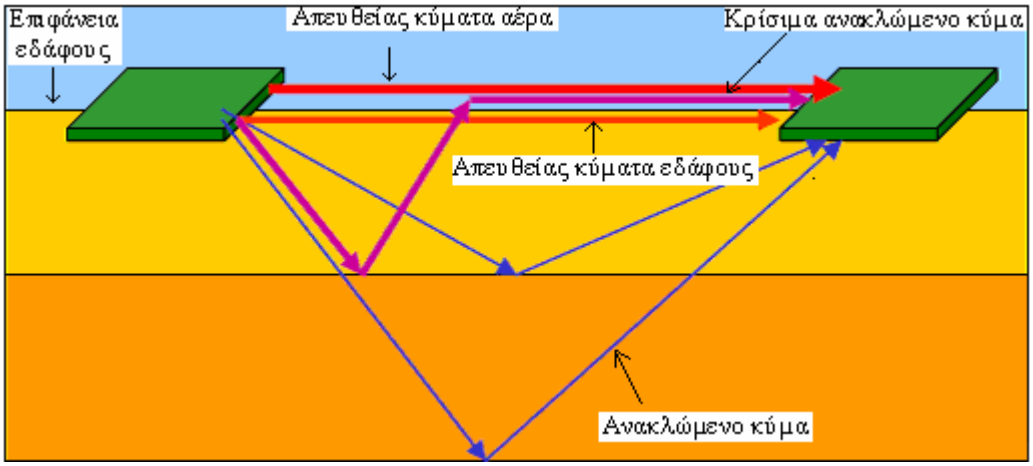
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης πομπού - δέκτη ανάλογα με το σκοπό της έρευνας. Κύρια διάταξη για τη συλλογή δεδομένων γεωραντάρ είναι αυτή της σταθερής απόστασης πομπού δέκτη (common offset) ή ανάκλασης, όπου πομπός και δέκτης κινούνται κατά μήκος γραμμής μελέτης στην επιφάνεια του εδάφους, διατηρώντας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



Σχήμα 3.2: Τρόποι συλλογής δεδομένων. α) Η διάταξη σταθερής απόστασης πομπού δέκτη και β) η διάταξη κοινού σημείου βάθους (Πουλιούδης Γ. 1999, Σπανουδάκης 2001).

3.4 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Όπως φαίνεται στην εικόνα ο δέκτης κατοπτεύει τρία είδη κυμάτων:



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

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

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

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

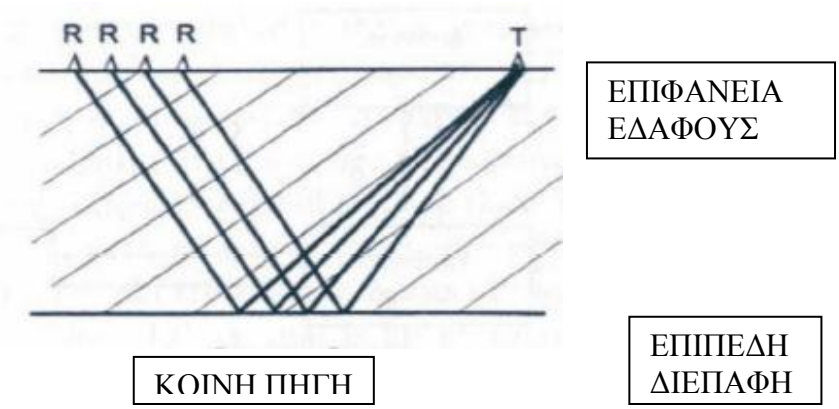
3.5 Παράμετροι διασκόπησης.

- **Συχνότητα εκπομπής:** Το βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα. Μεγάλη συχνότητα συνεπάγεται μεγάλη διακριτική ικανότητα ενώ το βάθος διασκόπησης είναι μικρό. Το αντίθετο συμβαίνει επιλέγοντας μικρότερη συχνότητα εκπομπής.
- **Ο ολικός χρόνος καταγραφής:** Σχετίζεται άμεσα με το βάθος διασκόπησης και καθορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία σταματούν οι καταγραφές.
- **Το διάστημα δειγματοληψίας :** Συνδέεται με το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο καταγραφών. Αν το χρονικό διάστημα είναι μεγάλο τότε πολλές πληροφορίες χάνονται, αν είναι πολύ μικρό τότε οι πληροφορίες είναι μεν πολλές αλλά ο συνολικός όγκος των δεδομένων υπερβολικά μεγάλος.
- **Το βήμα διασκόπησης:** Το βήμα διασκόπησης ορίζει την απόσταση δυο διαδοχικών σημείων πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις.
- **Την απόσταση των κεραιών:** Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης και μεταβολή του συντελεστή ανάκλασης, συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένισης του κύματος αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση.
- **Την υπέρθεση:** Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους με στόχο την απομάκρυνση του τυχαίου θορύβου.
- **Τον προσανατολισμό των κεραιών :** Τέλος μελετάται ο προσανατολισμός των κεραιών, δηλαδή τη σχετική μεταξύ τους θέση και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης.

3.6 Μέθοδοι διασκόπησης

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διασκόπησης με γεωραντάρ εξαρτάται από τον τρόπο και την θέση στη οποία θα τοποθετηθούν ο πομπός και ο δέκτης κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί το γεωραντάρ είναι οι εξής:

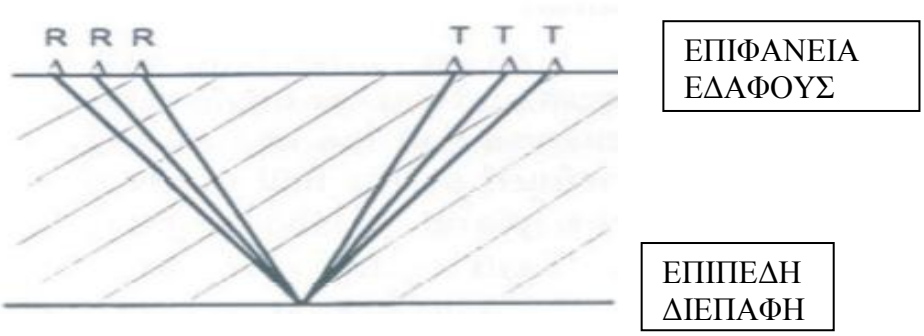
- **<u>Μέθοδος σταθερού πομπού κινούμενου δέκτη (Wide angle reflection and refraction) :</u>** Στην συγκεκριμένη μέθοδο ο πομπός παραμένει σταθερός σε ορισμένο σημείο ενώ ο δέκτης κινείται κατά μήκος της γραμμής μελέτης με σταθερό βήμα.



Σχήμα 3.4 Μέθοδος σταθερού πομπού, κινούμενου δέκτη.

- **<u>Μέθοδος του κινούμενου ενδιάμεσου σημείου (Common Mid Point) :</u>**

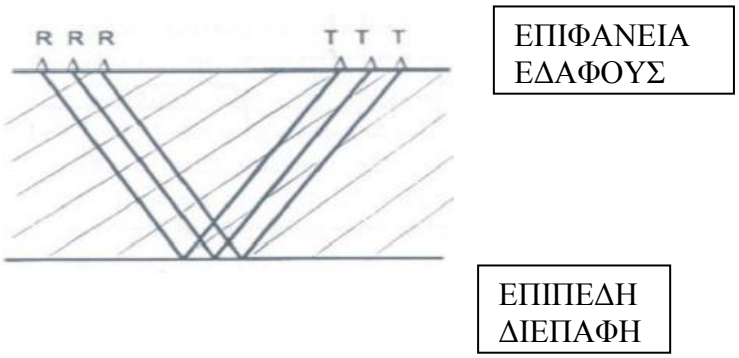
Στην συγκεκριμένη μέθοδο προσδιορίζεται αρχικά σημείο του ανακλαστήρα το οποίο θα αποτελέσει το ενδιάμεσο σημείο. Οι κεραίες τοποθετούνται στην ελάχιστη απόσταση ενώ καθεμιά από αυτές απομακρύνεται από το κέντρο κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η μέγιστη απόσταση δεν πρέπει να ξεπερνάει το βάθος του ανακλαστήρα ο οποίος ερευνάται. Ετσι λοιπόν υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο.



Σχήμα 3.5 Μέθοδος κοινού ενδιάμεσου σημείου.

- **Μέθοδος της ανάκλασης (reflection) :**

Στην συγκεκριμένη μέθοδο οι κεραίες διατηρούν σταθερή απόσταση μεταξύ τους και κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης με σταθερό βήμα. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως στη γεωλογική χαρτογράφηση και στο εντοπισμό μεμονωμένων στόχων.



Σχήμα 3.6 Μέθοδος της ανάκλασης

- **Μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination) :**

Στην συγκεκριμένη μέθοδο οι κεραίες τοποθετούνται αντικριστά, εκατέρωθεν του υπό μελέτη υλικού. Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός διέρχεται από το μέσο και χρησιμοποιείται κυρίως για το χαρακτηρισμό σχηματισμών ανάμεσα στις γεωτρήσεις χωρίς να ανακλάται σε κάποια ασυνέχεια.

3.7 Επιλογή συχνότητας λειτουργίας.

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο αποτελεί η επιλογή της συχνότητας λειτουργίας του γεωραντάρ, η οποία πρέπει να προεπιλεχθεί των μετρήσεων. Όσο μεγαλύτερη συχνότητα εκπομπής έχουμε τόσο υψηλή διακριτικότητα προκύπτει, με το μειονέκτημα όμως του μικρού βάθους διείσδυσης. Αντίθετα η σχετικά μικρή συχνότητα εκπομπής έχει το πλεονέκτημα του μεγάλου βάθους διείσδυσης και το μειονέκτημα της διακριτικής ικανότητας. Μοιραία λοιπόν

καταλαβαίνουμε ότι για την επίτευξη αξιόπιστων μετρήσεων θα πρέπει να υπάρξει ισορροπία ανάμεσα στην επιθυμητή διακριτική ικανότητα και το ζητούμενο βάθος διασκόπησης.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο εξής εμπειρικός τύπος :

$$f = \frac{150}{x \cdot K^{\frac{1}{2}}}$$

Όπου f : συχνότητα εκπομπής (MHz)

x: χωρική διακριτική ικανότητα

K: διηλεκτρική σταθερά του περιβάλλοντα χώρου.

3.8 Επιλογή της διάρκειας καταγραφής.

Για τη επιλογή της διάρκειας καταγραφής χρησιμοποιείται ο εξής τύπος :

$$W = 2,6 \cdot \frac{d_{\max}}{u}$$

Όπου W : ολικός χρόνος καταγραφής (ns)

d_{max} :μέγιστο επιθυμητό βάθος

u: ταχύτητα διάδοση ηλεκτρομαγνητικού παλμού στο μέσο.

Ο συγκεκριμένος τύπος αυξάνει το χρόνο καταγραφής κατά 30% προκειμένου να προβλέψει σφάλματα από τους υπολογισμούς.

3.9 Διάστημα δειγματοληψίας.

Το διάστημα δειγματοληψίας πρέπει να είναι μικρότερο από τη μισή περίοδο του σήματος υψηλότερης συχνότητας στην καταγραφή και καθορίζεται από την αρχή Nyquist.

t = 1000/6f

f: συχνότητα (MHz)

t: χρόνος (ns)

3.10 Βήμα διασκόπησης

Βήμα διασκόπησης ονομάζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων κατά μήκος της γραμμής μελέτης στη οποία πραγματοποιούνται μετρήσεις. Το βήμα διασκόπησης συντελεί σημαντικά στην ακρίβεια των μετρήσεων. Η ακρίβεια των μετρήσεων μειώνεται όταν χρησιμοποιείται μεγάλο βήμα διασκόπησης ειδικά όταν υπάρχουν μεγάλες και απότομες μεταβολές στην κλίση των ανακλαστήρων. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται το κριτήριο Nyquist που εκφράζει ότι το διάστημα δειγματοληψίας είναι το ένα τέταρτο του μήκους κύματος στον περιβάλλοντα χώρο:

$$n_x = \frac{\lambda}{4} = \frac{75}{K^{\frac{1}{2}} \cdot f}$$

Όπου n_x: το βήμα διασκόπησης

f: συχνότητα εκπομπής της κεραίας (MHz)

K: διηλεκτρική σταθέρα του περιβάλλοντα χώρου.

Το ελάχιστο βήμα διασκόπησης πρέπει να επιλέγεται βάση του κριτηρίου Nyquist και εξαρτάται από τη συχνότητα εκπομπής της κεραίας και από τη διηλεκτρική σταθερά του περιβάλλοντα χώρου.

3.11 Απόσταση πομπού δέκτη.

Σημαντικό πλεονέκτημα του συστήματος αποτελεί η δυνατότητα επιλογής της απόστασης πομπού-δέκτη διότι με αυτόν τον τρόπο η γωνία ανάκλασης του κύματος μπορεί να μεταβληθεί. Όσο αυξάνεται η απόσταση πομπού-δέκτη τόσο αυξάνεται και η απόσταση την οποία διανύει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο μέσο με αποτέλεσμα να προκληθεί μεγαλύτερη εξασθένηση. Η απόσταση μεταξύ των κεραιών δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$S = \frac{2 \cdot d_{\sigma\tau\acute{o}\chi o\upsilon}}{(\mathrm{K}-1)^{\frac{1}{2}}}$$

Όπου S: απόσταση πομπού – δέκτη

$d_{\sigma\tau\acute{o}\chi o\upsilon}$: βάθος στο οποίο βρίσκεται ο στόχος

K: διηλεκτρική σταθέρα του περιβάλλοντα χώρου.

Σε περίπτωση απουσίας πληροφοριών σχετικά με την περιοχή μελέτης το S μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το 20% του βάθους του στόχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

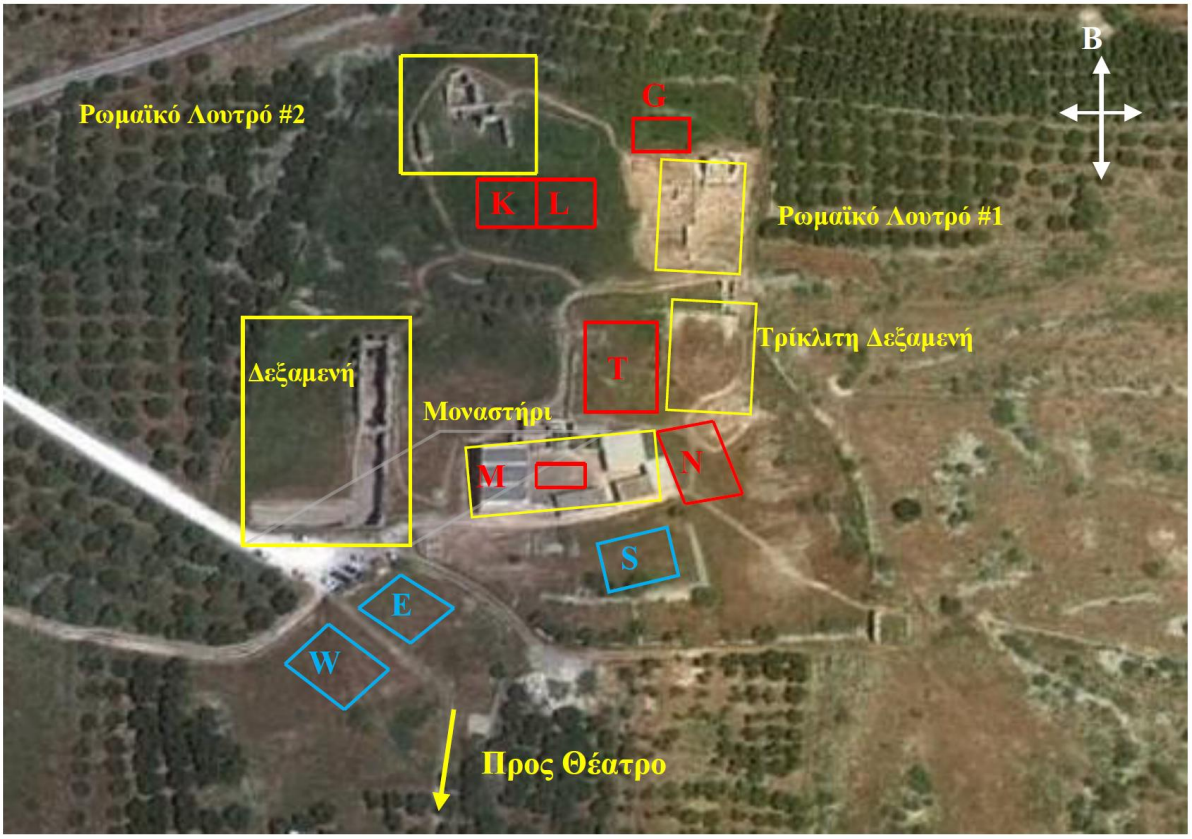
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στον αρχαιολογικό χώρο της περιοχής των Απτέρων. Η γεωφυσική έρευνα περιλαμβάνει μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αποκλειστικά με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Ακολουθεί επεξεργασία των δεδομένων που αφορούν στη μέθοδο του γεωραντάρ, κατά την οποία εφαρμόστηκαν φίλτρα, με σκοπό την αφαίρεση του θορύβου, την αποκοπή υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων, ώστε χαρακτηριστικά των εικόνων που δεν ήταν άμεσα αντιληπτά να γίνουν ευδιάκριτα.

Η γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας με γεωραντάρ, είχε σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων (**Εικόνα 4.1**)

Σε όλους τους ψηφιακούς χάρτες που ακολουθούν, έχουν σημειωθεί ανωμαλίες, που πιθανόν οφείλονται σε θαμμένα αρχαία ερείπια. Τόσο στους χάρτες με τα πρωτογενή στοιχεία όσο και σε αυτούς κατόπιν της επεξεργασίας, που θα επεξηγηθεί στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ανωμαλίες που προέκυψαν από την συνδυασμένη ερμηνεία και αποδίδονται σε θαμμένα ερείπια.

Οι τεχνικές της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι ευρέως διαδεδομένες στην επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων. Συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές της στατιστικής όπου υπολογίζεται ο μέσος όρος μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων και στη συνέχεια είτε αυτός αντικαθιστά το κεντρικό εικονοστοιχείο είτε αφαιρείται από αυτό. Σκοπός της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι είναι να τονίσει κάποια χαρακτηριστικά της εικόνας που δεν είναι άμεσα αντιληπτά. Με τα φίλτρα και τις τεχνικές που παρουσιάζοντα παρακάτω επιτυγχάνεται ο τονισμός των οριζόντιων και κεκλιμένων ανακλαστήρων, η απομάκρυνση του θορύβου και βελτίωση της ποιότητας της εικόνας γενικότερα.



Εικόνα 4.1 : Αεροφωτογραφία του ευρύτερου Αρχαιολογικού Χώρου των Απτέρων Χανίων. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζονται οι σπουδαιότερες εμφανείς αρχαιολογικές δομές. Με μπλέ και κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές οι οποίες διασκοπήθηκαν με τα συστήματα γεωραντάρ SIR300 και PulseEkko 1000 αντίστοιχα.

4.2 Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ.

Η αρχική επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το πρόγραμμα GPRPro το οποίο αναπτύχθηκε από τον κ. Σπανουδάκη Νικόλαο, Μηχανικό Ορυκτών Πόρων και εκτελείται σε περιβάλλον Matlab. Το λογισμικό στηρίζει τη λειτουργία του στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνων. Με τη χρήση διαφόρων φίλτρων και τύπων ενίσχυσης γίνονται ευδιάκριτες λεπτομέρειες οι οποίες θα οδηγήσουν στην εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με το σκοπό της κάθε έρευνας. Με την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα από τις μετρήσεις του γεωραντάρ, προκύπτουν οι απεικονίσεις σε μορφή τομών. Οι τομές αυτές περιγράφουν το διπλό χρόνο διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο έδαφος

συναρτήσει της απόστασης από την αρχική γραμμή μελέτης. Το πρόγραμμα διαθέτει πλήθος φίλτρων τα οποία μπορούμε να εφαρμόσουμε με διάφορους συνδυασμούς στις ακατέργαστες εικόνες των δεδομένων των γεωραντάρ.

Για την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι, κάποιοι από τους οποίους είναι καθιερωμένοι στη επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων (κυρίως δεδομένων γεωραντάρ και σεισμικών δεδομένων ανάκλασης) ενώ κάποιοι άλλοι χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην ψηφιακή ανάλυση εικόνας. Στο λογισμικό αυτό οι αλγόριθμοι έχουν ταξινομηθεί ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους σε διάφορες κατηγορίες.

Να σημειωθεί ωστόσο ότι τα δεδομένα του γεωραντάρ είναι ένας πίνακας του οποίου η κάθε στήλη είναι ένα ίχνος ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε καταγραφές με τον ίδιο χρόνο άφιξης. Συνεπώς οι εικόνες του γεωραντάρ αντιστοιχούν σε άξονες x (m) και t (ns).

Στο τελικό στάδιο της επεξεργασίας, δημιουργήθηκαν οριζόντιες τομές οι οποίες υπέστησαν επεξεργασία με τη χρήση του λογισμικού Transform όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

4.3 Επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων.

Στόχος μας ήταν η δημιουργία τομών με διαφορετικό συνδυασμό φίλτρων μέσω του προγράμματος GPRPRO. Έγινε διαλογή των επεξεργασμένων τομών οι οποίες τόνιζαν ιδιαίτερα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του στόχου με τη σειρά που δίνονται πιο κάτω.

Τα πιο διαδεδομένα φίλτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα σε πρωταρχικό στάδιο, είναι τα εξής:

- **Φίλτρο διόρθωσης Dewow** : Πρόκειται για φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων κάθε ίχνους ξεχωριστά.

- **Εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (SEC)**.Η ενίσχυση SEC έχει σαν την ισοστάθμιση των σημάτων τα οποία αλλοιώνονται λόγω της

γεωμετρικής διασποράς και της εκθετικής απώλειας της ενέργειας των κυμάτων λόγω εξασθένισης.

- **Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background Noise Removal)**: Το Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου εφαρμόζεται για την αποφυγή φαινομένων τα οποία επηρεάζουν το σήμα καταγραφής του γεωραντάρ, όπως τα ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες και δέκτες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και οι μεταλλικές κατασκευές.

Σαν παράδειγμα παρακάτω παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η διαδικασία επεξεργασίας μέσω του λογισμικού που προαναφέραμε στα πρωταρχικά δεδομένα της γραμμής μελέτης στα 8 m (κάναβος S) στη περιοχή του μοναστηριού, καθώς επίσης και της γραμμής μελέτης στα 4 m στον κάναβο που αφορά στην τρίκλιτη δεξαμενή.

4.3.1 Μονοδιάστατα Φίλτρα

Τα μονοδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε να ενεργούν είτε σε χρονοσειρές, λαμβάνοντας υπόψη εικονοστοιχεία που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, είτε σε στιγμιότυπα κύματος λαμβάνοντας υπόψη εικονοστοιχεία τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά ίχνη, αλλά αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο (Σπανουδάκης, 2002)

α) Φίλτρο Διόρθωσης Dewow

Πρόκειται για φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων κάθε ίχνους ξεχωριστά. Αρχικά υπολογίζεται το μήκος του τελεστή από τη σχέση $\frac{2}{f \cdot \Delta t}$, 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 :

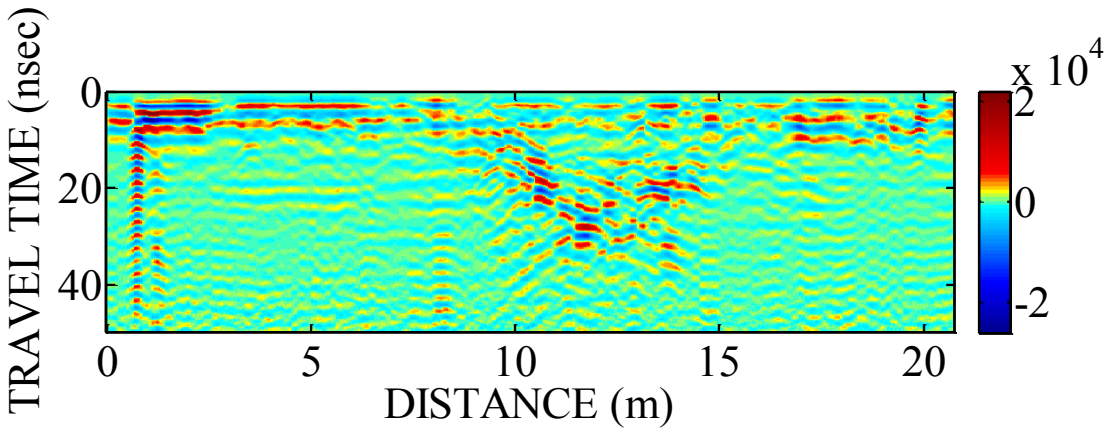
$$\frac{1}{M}\begin{bmatrix}1\\1\\.\\.\\.\\1\end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{M}\begin{bmatrix}0 & . & 0 & 1 & 0 & . & . & 0\\ . & . & . & . & . & . & . & .\\ . & . & . & . & . & . & . & .\\ . & . & . & . & . & . & . & .\\ 0 & . & . & 0 & 1 & . & . & 0\end{bmatrix}$$

όπου M το μήκος του. Τα αρχικά και τα φιλτραρισμένα δεδομένα είναι παρόμοια, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το παραπάνω φίλτρο εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια της καταγραφής. Στις εικόνες που ακολουθούν, έχουν εφαρμοστεί αρχικά σε όλες τόσο διόρθωση Dewow, όσο και εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς πριν από κάθε άλλης μορφής επεξεργασία.

β) Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου(Background noise removal)

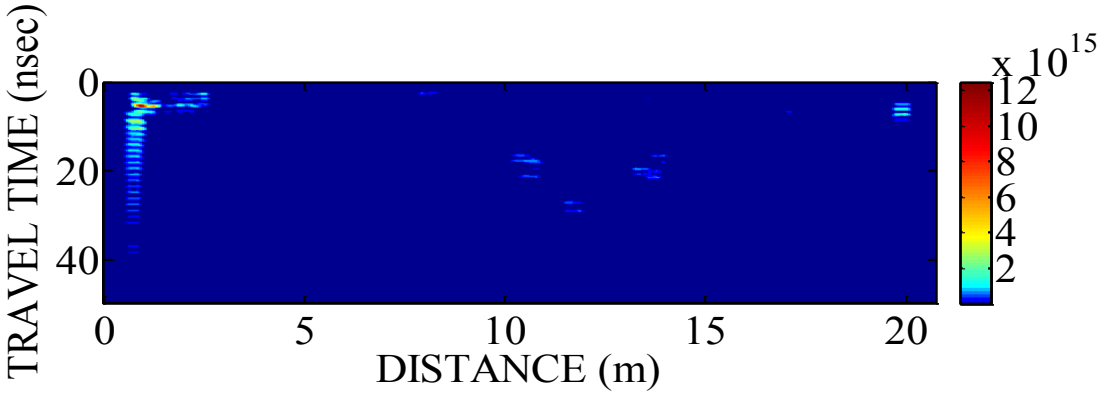
Πολλές φορές λόγω του φαινομένου της αντήχησης των κεραιών (antenna ringing), εμφανίζονται στα δεδομένα, σήματα που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες. Τέτοιοι οριζόντιοι ανακλαστήρες εμφανίζονται και λόγω της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το περιβάλλον. Για παράδειγμα οι χρήστες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

Αυτό πραγματοποιείται καθώς 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 4.1 φαίνεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου όπου τονίζεται σειρά από κεκλιμένους ανακλαστήρες έως και τα 15m που φαίνεται να εκτείνονται βαθύτερα.



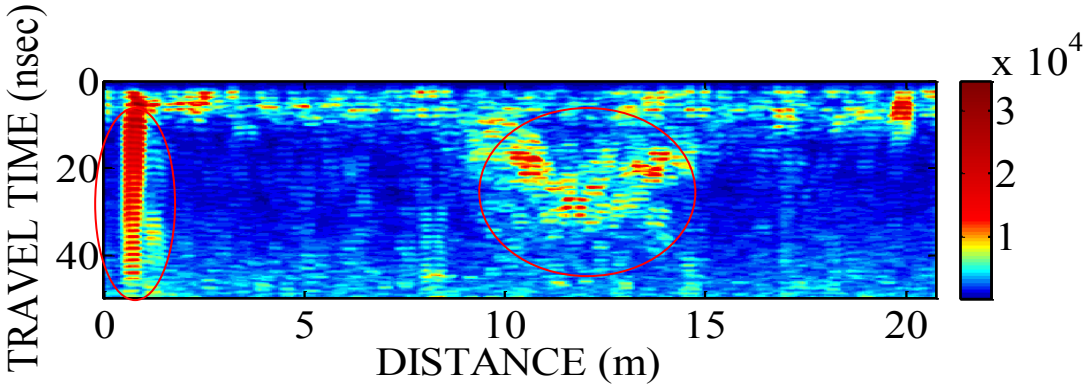
Εικόνα 4.1 : Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Background noise removal. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α (γραμμή μελέτης στα 8 m, παράγραφος 5.4 εικόνα 5.2).

γ) Φίλτρο Local Variance (Διακύμανση) : Ο υπολογισμός της διακύμανσης είναι ένα σημαντικό μέρος πολλών στατιστικών εφαρμογών και αναλύσεων. Είναι το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης. Είναι μία από τις πολλές περιγραφές της κατανομής πιθανοτήτων **,** που περιγράφει σε ποιο βαθμό οι αριθμοί απέχουν από τη μέση αναμενόμενη τιμή. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει σε ένα σύνολο τιμών την απόσταση της μιας τιμής από την άλλη.



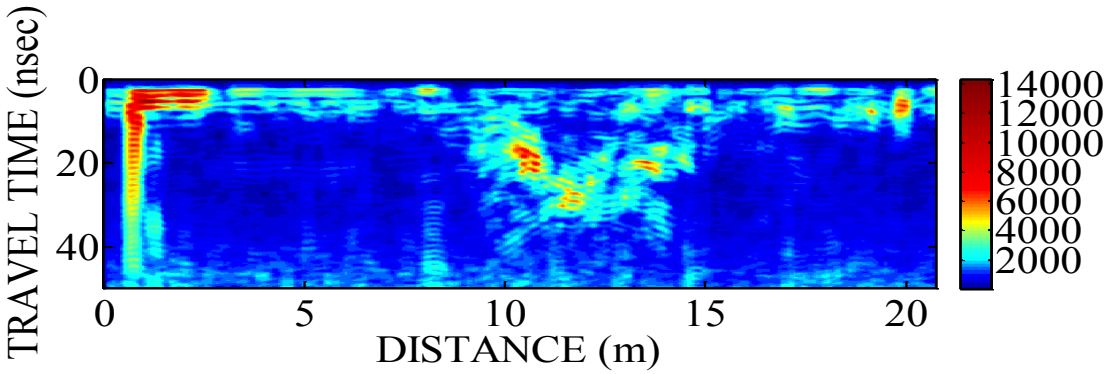
Εικόνα 1.2 : Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Local Variance 7x7 στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1. Η πρώτη σημαντική ανάκλαση εμφανίζεται σε απόσταση περίπου 1m και σε χρόνο διαδρομής μέχρι τα 40 ns.

δ) Φίλτρο Local Range : Χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές, σε μια ορισμένη περιοχή τιμών. Προκύπτουν λοιπόν χρωματικοί χάρτες, όπως θα δούμε στη συνέχεια, όπου τονίζονται αφενός τα μεγάλα πλάτη των απ΄ευθείας κυμάτων σε μικρό βάθος και κατόπιν οι ανακλάσεις τους.



Εικόνα 4.3: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Local Range 7x7 στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1.

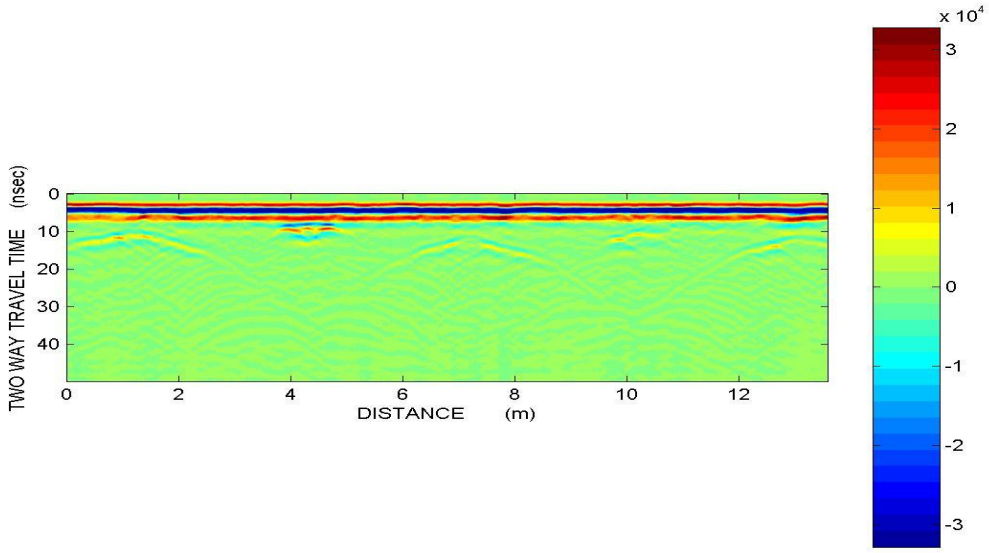
ε) Φίλτρο Local Std (Local Standard Deviation of image) : Η τυπική απόκλιση της εικόνας εκφράζει ένα στατιστικό μέτρο της διακύμανσης των τιμών. Η τυπική απόκλιση είναι η μέση τετραγωνική ρίζα (RMS) απόκλισης των τιμών από το αριθμητικό τους μέσο.



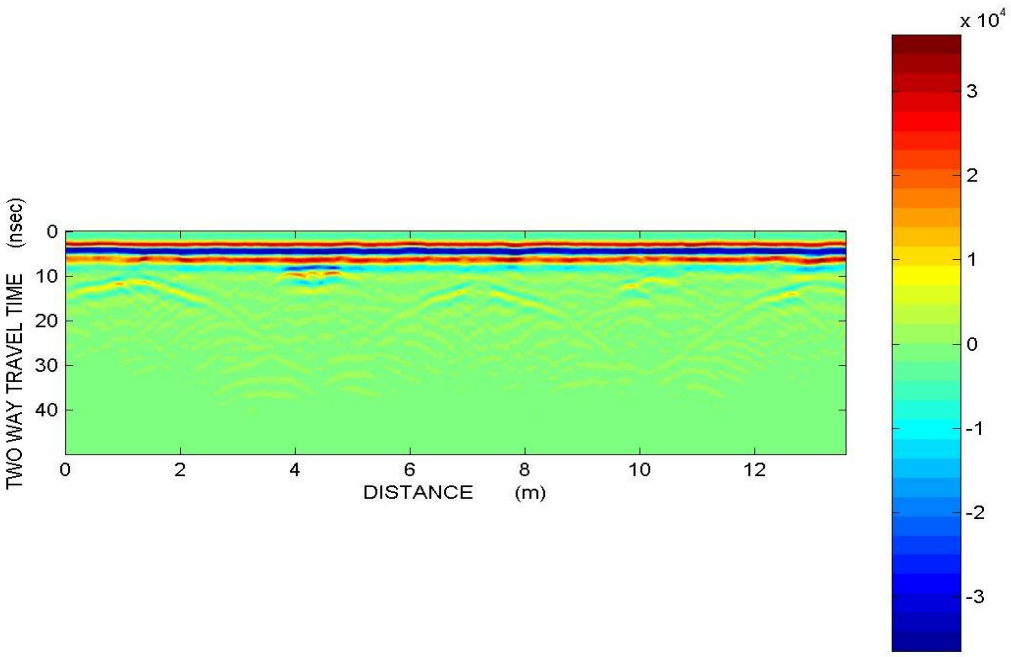
Εικόνα 4.4 : Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Local Std 7x7 στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1 (Local Standard Deviation of image).

4.4 Επεξεργασία των μετρήσεων που αφορούν στην τρίκλιτη δεξαμενή.

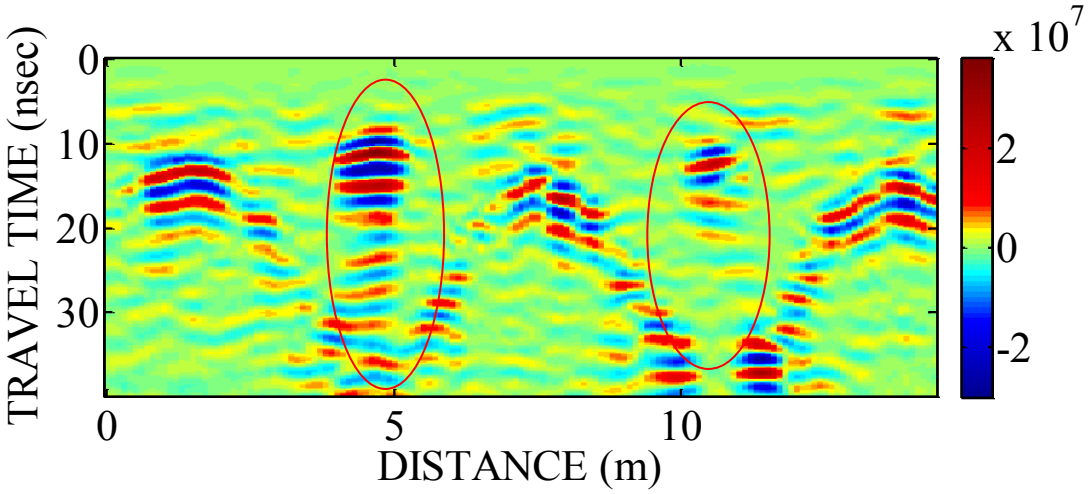
Στην ενότητα που ακολουθεί παρατίθενται οι τομές που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της τρίκλιτης δεξαμενής. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό GPRPro με τα αντίστοιχα φίλτρα εξομάλυνσης των απεικονίσεων προκύπτουν οι παρακάτω τομές ξεκινώντας από την ανεπεξέργαστη τομή που αφορά στην γραμμή μελέτης στα 4 m.



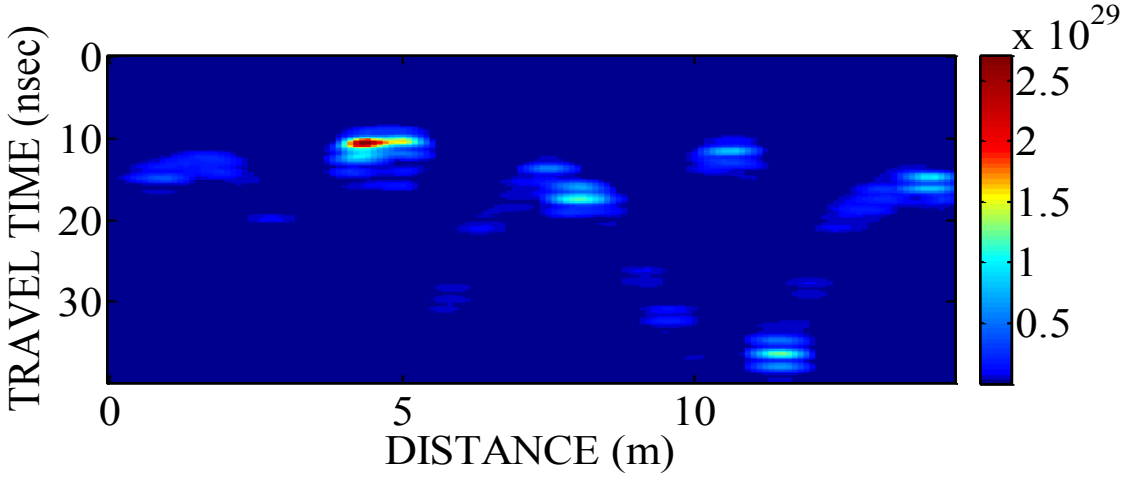
Εικόνα 4.5:Τομή γεωραντάρ πριν την επεξεργασία (γραμμή μελέτης στα 4 m,κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).



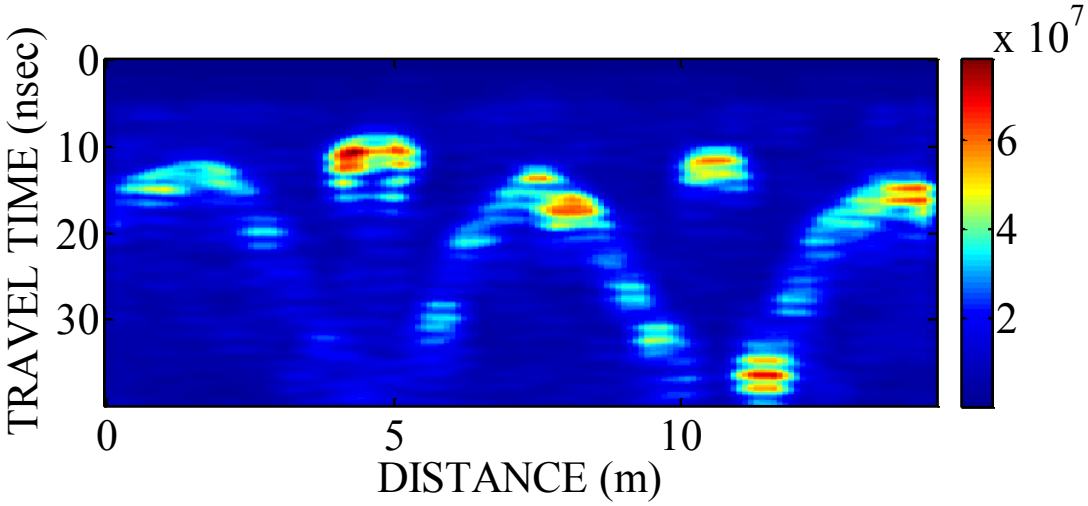
Εικόνα 4.6: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (Dewow) στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.5.



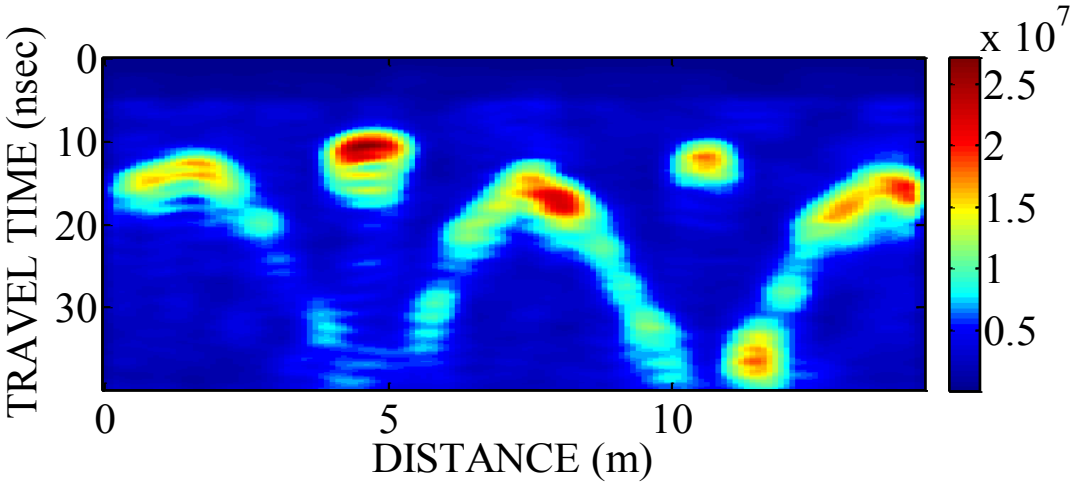
Εικόνα 4.7: Τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 μετά από εφαρμογή Bachground noise Removal. Ξεχωρίζουν οι ανακλάσεις που οφείλονται στην τρίκλιτη (φτάνουν περίπου μέχρι τα 15 m οριζόντια απόσταση και ξεκινούν από τα 10 ns). Επίσης ξεχωρίζουν κάθετα οι δύο πέτρινοι αγωγοί που διαπερνούν τη δεξαμενή (κόκκινα πλαίσια).



Εικόνα 4.8:Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Local Variance 7x7 στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m,κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).



Εικόνα 4.9:Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Local Range 7x7 στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m, κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).



Εικόνα 4.10:Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Local Std 7x7 στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m, κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).

4.5 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (Instantaneous Attributes).

Επιπρόσθετα έγινε χρήση στιγμιαίων μιγαδικών χαρακτηριστικών (**Instantaneous** Attributes) των σημάτων. Το σήμα που στέλνει και λαμβάνει το γεωραντάρ είναι ένας πραγματικός αριθμός. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολία στους υπολογισμούς, το σήμα μετατρέπεται σε μιγαδικό αριθμό (complex trace) με την χρήση του μετασχηματισμού Hilbert. Αυτό που κάνει το λογισμικό του γεωραντάρ είναι να συνδυάζει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του αναλυτικού σύνθετου σήματος (Σπανουδάκης, 2002). Το αναλυτικό σύνθετο σήμα F(t) μπορεί να γραφτεί: F(t)= f(t)+ig(t), όπου f(t) το πραγματικό μέρος (δεδομένα καταγραφής γεωραντάρ) και g(t) το φανταστικό μέρος του σήματος (Taner et al., 1992-2001). Το φανταστικό μέρος (quadrature) είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά 90° πραγματικό μέρος και προκύπτει με μετασχηματισμό Hilbert στο πραγματικό μέρος.Το αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας είναι η ανάκτηση επιπλέον πληροφοριών στην εικόνα του αρχικού σήματος, πολύ χρήσιμες για την αξιολόγηση και ερμηνεία των δεδομένων.

Τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (instantaneous attributes) εκφράζουν τις στιγμιαίες μεταβολές διαφόρων παραμέτρων. Οι στιγμιαίες τιμές των μιγαδικών χαρακτηριστικών (όπως το στιγμιαίο πλάτος και οι παράγωγοί του, η στιγμιαία φάση και η στιγμιαία συχνότητα) μπορούν να προσδιοριστούν από τα αναλυτικά σύνθετα σήματα (Taner et al., 1992-2001).

4.5.1 Αποτελέσματα από την περιοχή του Μοναστηριού (Περιοχή Μ).

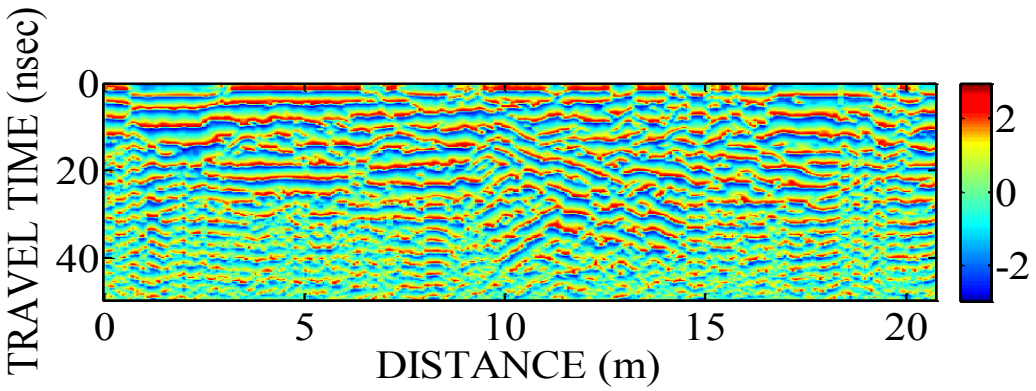
- **Στιγμιαίο πλάτος** (Instantaneous Envelope) : Το στιγμιαίο πλάτος E(t) εκφράζει την ανακλώμενη ισχύ, η οποία είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ολικής ενέργειας του σήματος σε δεδομένη χρονική στιγμή. Αποτελεί δηλαδή το μέτρο του αναλυτικού σύνθετου σήματος. Χρησιμοποιείται για να τονίσει αλλαγές στη λιθολογία και στις γεωλογικές ανομοιομορφίες.

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

- **Στιγμιαία φάση** (Instantaneous Phase) :

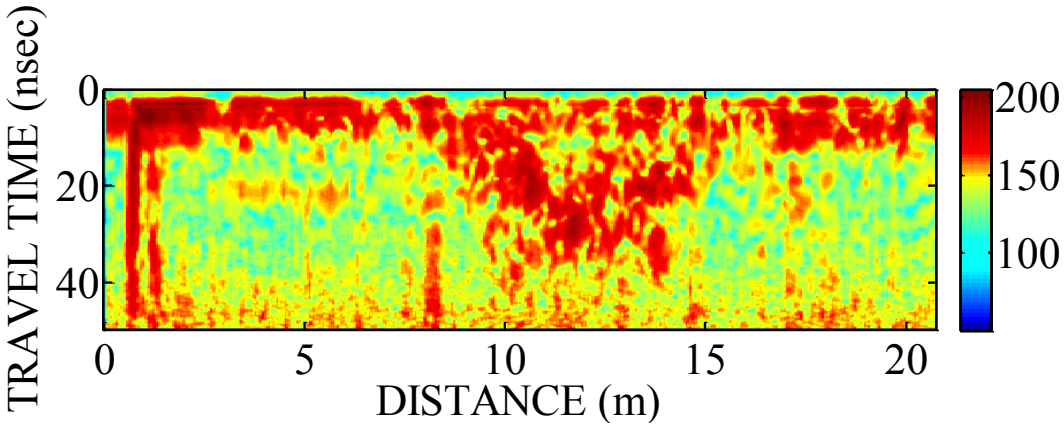
Η Στιγμιαία φάση επιτυγχάνει τη συνεχής απεικόνιση της φάσης του σήματος σε σχέση με το χρόνο, και χρησιμοποιείται κυρίως για να τονίσει την πλευρική συνέχεια των αναλαστήρων αφού μπορεί να κάνει εμφανή σημεία που δεν είναι. Το μιγαδικό αυτό χαρακτηριστικό είναι πολύ χρήσιμο στη γεωλογική χαρτογράφηση διότι χωρίς να παρέχει πληροφορίες για την ισχύ των ανακλάσεων αναδεικνύει τους ανακλαστήρες και τις αλλαγές στη λιθολογία και είναι ανεξάρτητο από το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα αποτελεί το τόξο εφαπτομένης του αναλυτικού σύνθετου σήματος.

$$P_h(\chi, t) = \arctan\left[\frac{g(\chi, t)}{f(\chi, t)}\right]$$



Εικόνα 4.11: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> Iinstantaneous Phase στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1 (γραμμή μελέτης στα 8 m, κάναβος S) όπου έχουν τονιστεί οι οριζόντιοι ανακλαστήρες.

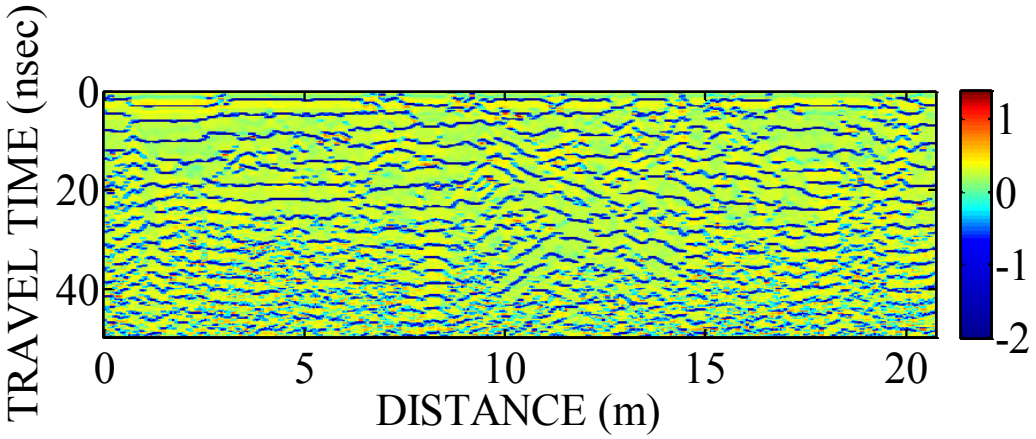
- **Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB** (dB instantaneous envelope): Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB δίνεται από τη σχέση 20logE(t), όπου E(t) αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πλάτος. Η κλίμακα dB χρησιμοποιείται στο πεδίο των συχνοτήτων για την απεικόνιση του φάσματος ισχύος. (power spectrum). (Σπανουδάκης 2002).



Εικόνα 4.12: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> dB Instantaneous Envelope στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1 (γραμμή μελέτης στα 8 m, κάναβος S). Με κόκκινο χρώμα (μεγάλο πλάτος) απεικονίζονται τα πλάτη των απευθείας κυμάτων (για χρόνο διαδρομής μικρότερο από 10ns) και των ανακλώμενων από ανθρωπογενείς δομές (χρόνος διαδρομής κυμάτων – διπλός χρόνος μικρότερος από 50ns).

- **Στιγμιαία συχνότητα (**Instantaneous Frequency).

Η στιγμιαία συχνότητα Freq(x,t). που ορίζεται σαν ο ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας φάσης.



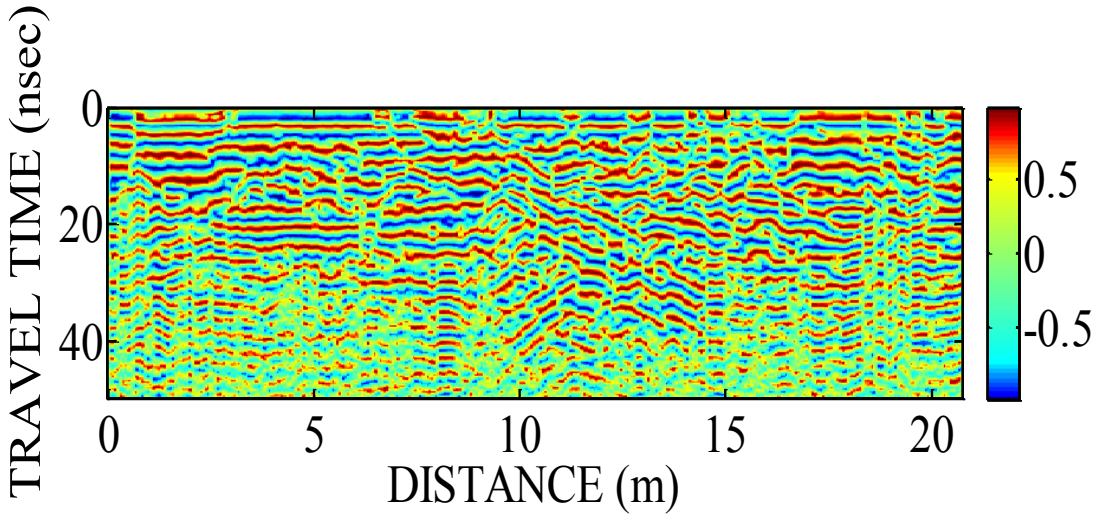
Εικόνα 4.13: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Μιγαδικών Χαρακτηριστικών>>. Instantaneous Frequency στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1 (γραμμή μελέτης στα 8 m, κάναβος S).

Είναι το μέτρο της συχνότητας του ανακλώμενου παλμού και χρησιμοποιείται για να αναδείξει τις αλλαγές στη λιθολογία, τη μεταβολή του πάχους των σχηματισμών, τις διεπιφάνειες και την ύπαρξη ασυνεχειών. Στην εικόνα που ακολουθεί διακρίνονται όλοι οι ανακλαστήρες καθώς έχει τονιστεί και η λεπτή υφή των καταγραφών.

- **Κανονικοποιημένο Πλάτος (Normalized Envelope).**

Το κανονικοποιημένο πλάτος εκφράζεται ως το συνημίτονο της στιγμιαίας φάσης. Το μιγαδικό αυτό χαρακτηριστικό δεν περιέχει πληροφορίες σχετικά με την ισχύ των ανακλάσεων αλλά τονίζει την πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων και οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ -1 και +1.

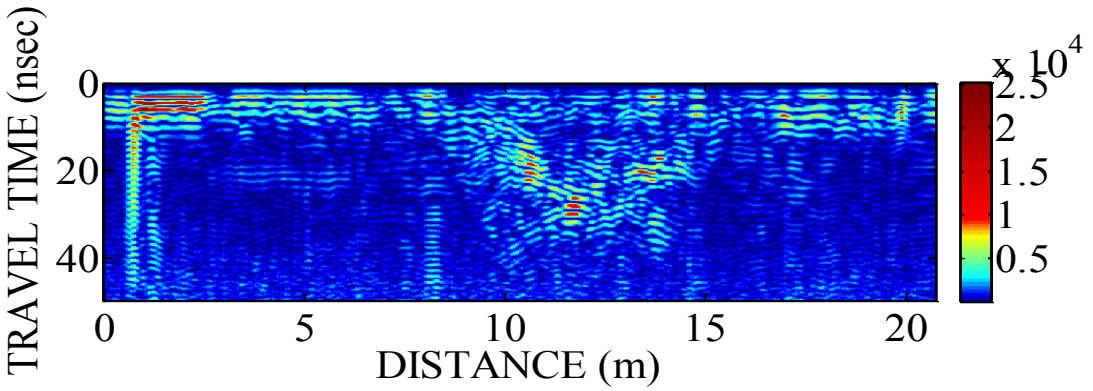
$$\mathrm{normenv}(\chi, t) = \cos\left[P_h(\chi, t)\right]$$



Εικόνα 4.14: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Μιγαδικών Χαρακτηριστικών>> Normalized Envelope στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1 (γραμμή μελέτης στα 8 m, κάναβος S).

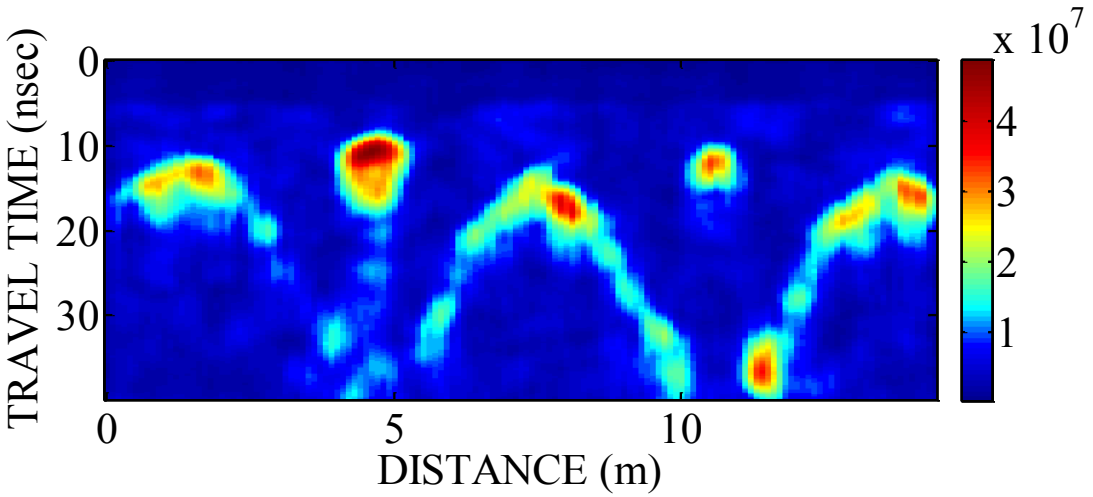
- **Γινόμενο του πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης.(Product of Real Trace and Cosine of Instantaneous Phase).**

Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του πλάτους, κυρίως για τα μηδενικής φάσης δεδομένα. Αναγάγοντας το μέγιστο και ελάχιστο του πλάτους κάθε καταγραφής σε αντίστοιχα ψευδοπλάτη επιτυγχάνεται η καλύτερη ερμηνεία των δεδομένων.

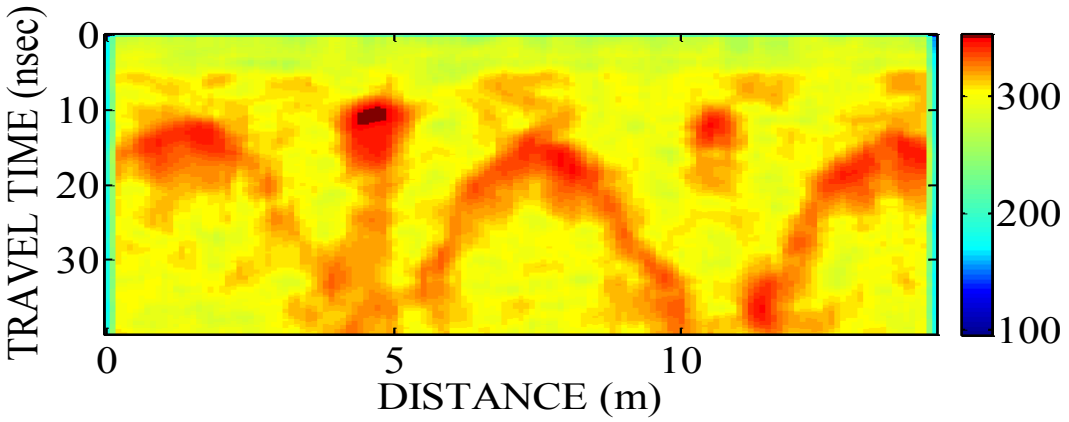


Εικόνα 4.15: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> Product of Real Trace and Consine of Phase στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.1 (γραμμή μελέτης στα 8 m, κάναβος S).

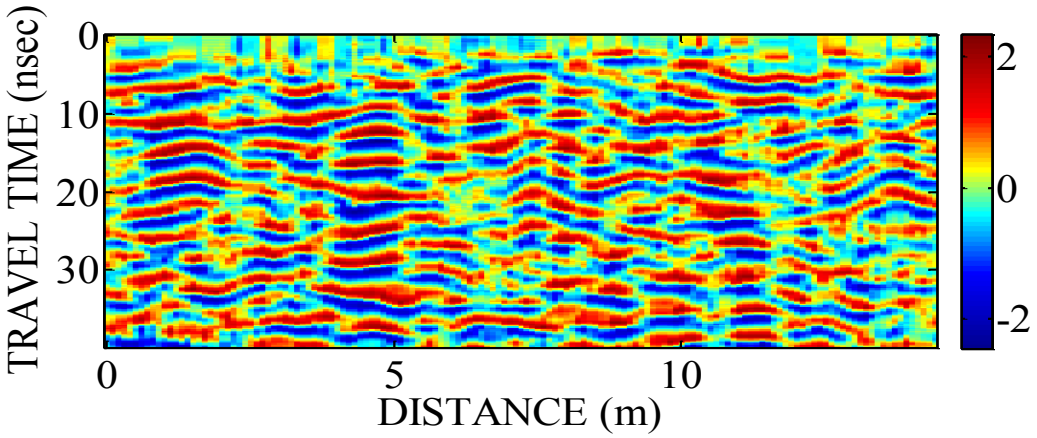
4.5.2 Αποτελέσματα από την περιοχή της Τρίκλιτης Δεξαμενής.



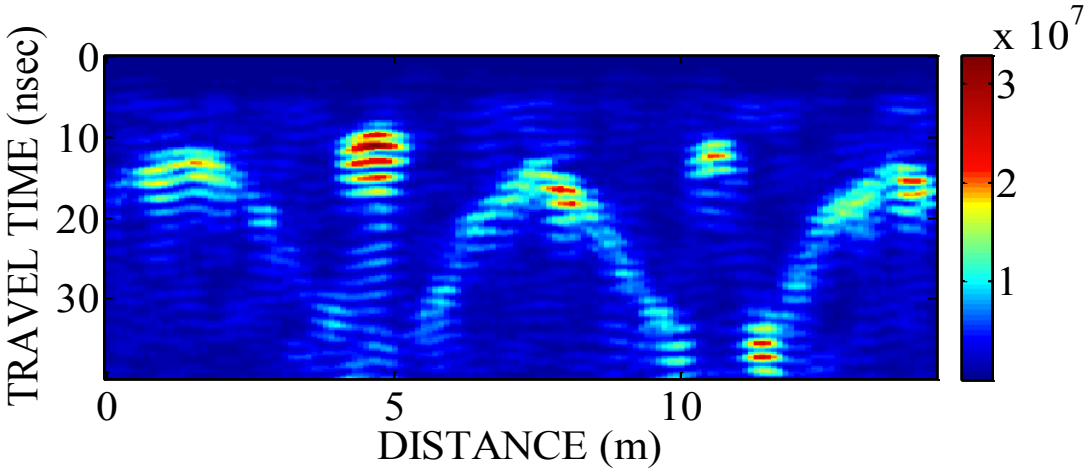
Εικόνα 4.16:Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> Instantaneous Envelope στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m, κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).



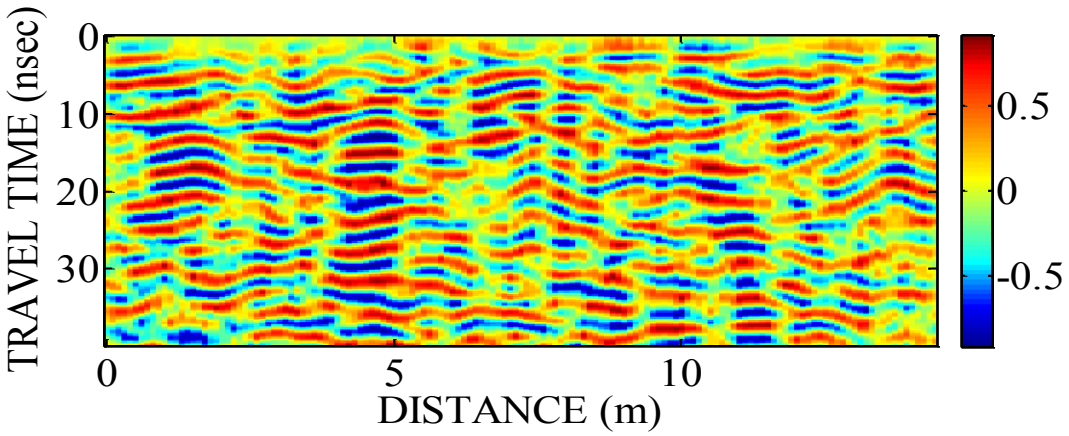
Εικόνα 4.17:Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> dB Instantaneous Envelope στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m, κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).



Εικόνα 4.18: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> Instantaneous Phase στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m, κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).



Εικόνα 4.19: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> Product of Real Trace and Cosine of Phase στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m, κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).



Εικόνα 4.20: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής << Στιγμιαίων Χαρακτηριστικών>> Normalized Envelope στην τομή γεωραντάρ της εικόνας 4.6 (γραμμή μελέτης στα 4 m, κάναβος τρίκλιτης δεξαμενής).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΤΟΜΕΣ

5.1 Δημιουργία Οριζόντιων τομών (Slices).

Για τη δημιουργία οριζόντιων τομών απαραίτητη είναι η ύπαρξη μετρήσεων σε ορθογώνιο κάναβο. Πρόκειται δηλαδή για ένα όγκο δεδομένων με διαστάσεις MxNxK όπου M ο αριθμός των μετρήσεων ανά ίχνος, N αριθμός των ιχνών ανά γραμμή μελέτης και K ο αριθμός των γραμμών μελέτης

5.2 Μέθοδος Ανάδειξης Τοπικών Ανωμαλιών μέσω Εξομάλυνσης.

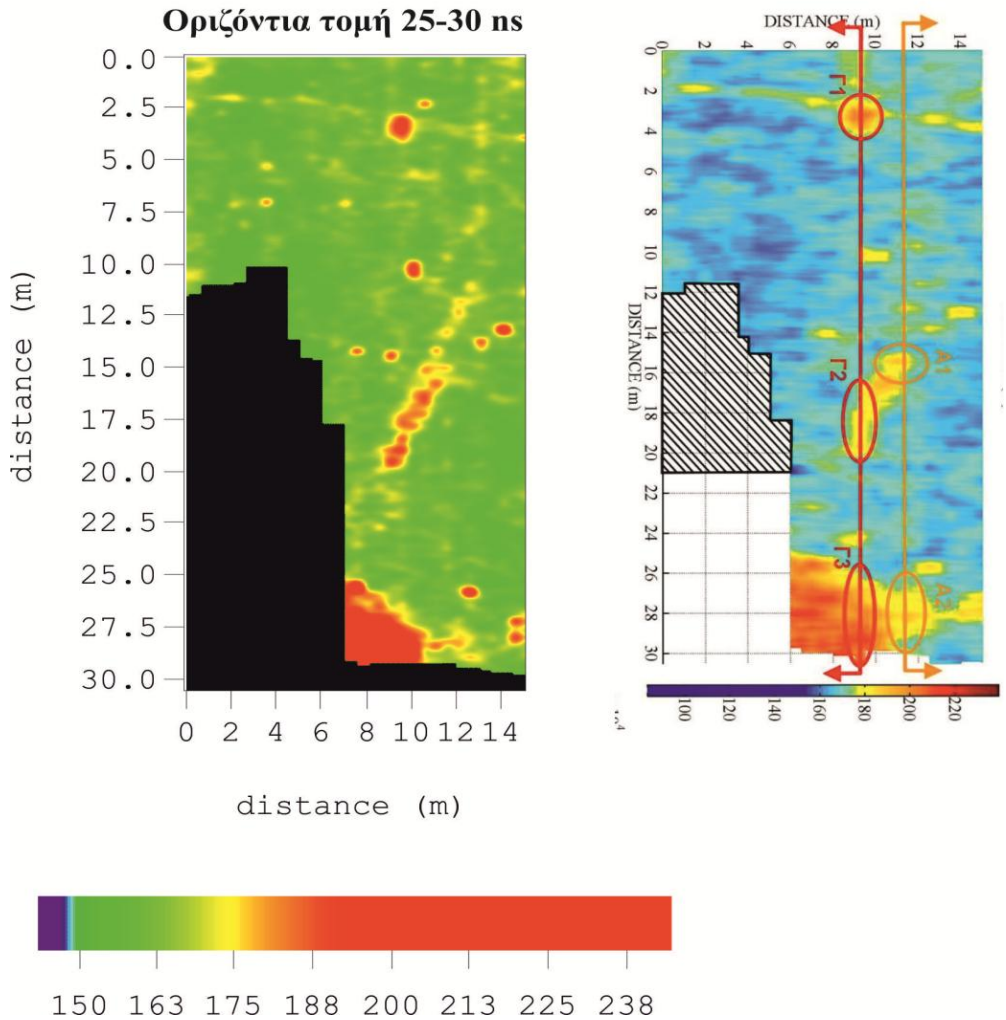
Η μέθοδος εξομάλυνσης χρησιμοποιείται κυρίως για τη μείωση του τυχαίου θορύβου των μετρήσεων. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εξομάλυνσης είναι αυτή του κινητού μέσου.

Στη μέθοδο του κινητού μέσου, η μέση τιμή σε κάθε κόμβο του κανάβου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές στους γειτονικούς κόμβους. Ο μέσος όρος υπολογίζεται από το άθροισμα των γινομένων των τιμών των γειτονικών σημείων επί τον συντελεστή βαρύτητας του καθενός. Ο συντελεστής βαρύτητας του κάθε γειτονικού σημείου είναι αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης του σημείου αυτού από το κέντρο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση , το φίλτρο εξομάλυνσης χρησιμοποιήθηκε πέντε (5) φορές.

5.3 Επαναδειγματοληψία

Μέχρι τώρα, στην παρούσα εργασία, έγινε παράθεση και ερμηνεία των σχημάτων που προέκυψαν από την παρουσίαση των τομών του γεωραντάρ σε περιβάλλον Matlab. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται η δημιουργία μιας τρισδιάστατης απεικόνισης του υπεδάφους, αποτέλεσμα της συγχώνευσης των τομών ενός κανάβου. Η περιοχή χωρίστηκε σε εννέα (9) κανάβους, από όπου προέκυψαν οριζόντιες τομές, για χρόνους διαδρομής από 5 έως 40 ns ανά 5 ns. Κίνητρο για την περαιτέρω επεξεργασία αποτέλεσαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από παλαιότερη διασκόπηση στην ίδια ακριβώς περιοχή (Μανατάκη, 2011). Οι χάρτες που προέκυψαν από την εν λόγω διασκόπηση αν και απέδωσαν πολλές πληροφορίες για την ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων στην περιοχή, δεν τις ανέδειξαν. Αυτό συνέβη διότι

το πλήθος των γραμμών μελέτης ήταν μικρότερο σε σχέση με το πλήθος των ιχνών. Εύκολα παρατηρώντας την εικόνα 5.1 διαπιστώνει κανείς ότι οι εναλλαγές των χρωμάτων σε κάποια σημεία του χρωματικού χάρτη (δεξιά), δίνουν την αίσθηση παραμόρφωσης της εικόνας.



Εικόνα 5.1: Οριζόντια τομή περιοχής διασκόπησης Ν, για διπλό χρόνο καταγραφής 25-30ns μετά από επαναδειγματοληψία και εξομάλυνση (αριστερά), για διπλό χρόνο καταγραφής 25ns (Μανατάκη, 2011).

Ζητούμενο λοιπόν είναι να διερευνηθεί αν μετά από επεξεργασία των δεδομένων με την χρήση του προγράμματος Transform, είναι δυνατόν να προκύψουν χρωματικοί χάρτες καλύτερης ευκρίνειας. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιώντας **επαναδειγματοληψία** (resampling) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας **εξομάλυνση** (smooth) σε κάθε οριζόντια τομή προέκυψε χάρτης ίδιας ανάλυσης και για τις δύο διαστάσεις του. Επιπλέον για κάθε χάρτη χρησιμοποιήθηκε μεταβλητό εύρος χρωματικής κλίμακας απεικόνισης. Με αυτόν τον τρόπο

προέκυψαν χάρτες διαφορετικού εύρους χρωματικής κλίμακας και διαφορετικής κατανομής από αυτούς με την χρήση του MatLab (Μανατάκη, 2011).

Περιοχές 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)
Γεωραντάρ	PulsleEKKO 1000	Sir - 3000	PulsleEKKO 1000	Sir - 3000	Sir - 3000	PulsleEKKO 1000	PulsleEKKO 1000		PulsleEKKO 1000
Αριθμός γραμμών	26	29	32	44	30	42	6	6	8
Μήκος γραμμών	276 m	601 m	713 m	1015 m	810 m	429.5 m	152.60 m	128.8 m	89.80 m
Προσανατολισμός γραμμών	Δ-Α	Δ-Α	Ν-Β	ΒΔ-ΝΔ	ΒΔ-ΝΔ	Δ-Α	Δ-Α		Δ-Α
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
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
Ολικός χρόνος καταγραφής	80 ns	150 ns	80 ns	150 ns	150 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

Πίνακας 5.1: Παράμετροι διασκόπησης των περιοχών μελέτης.

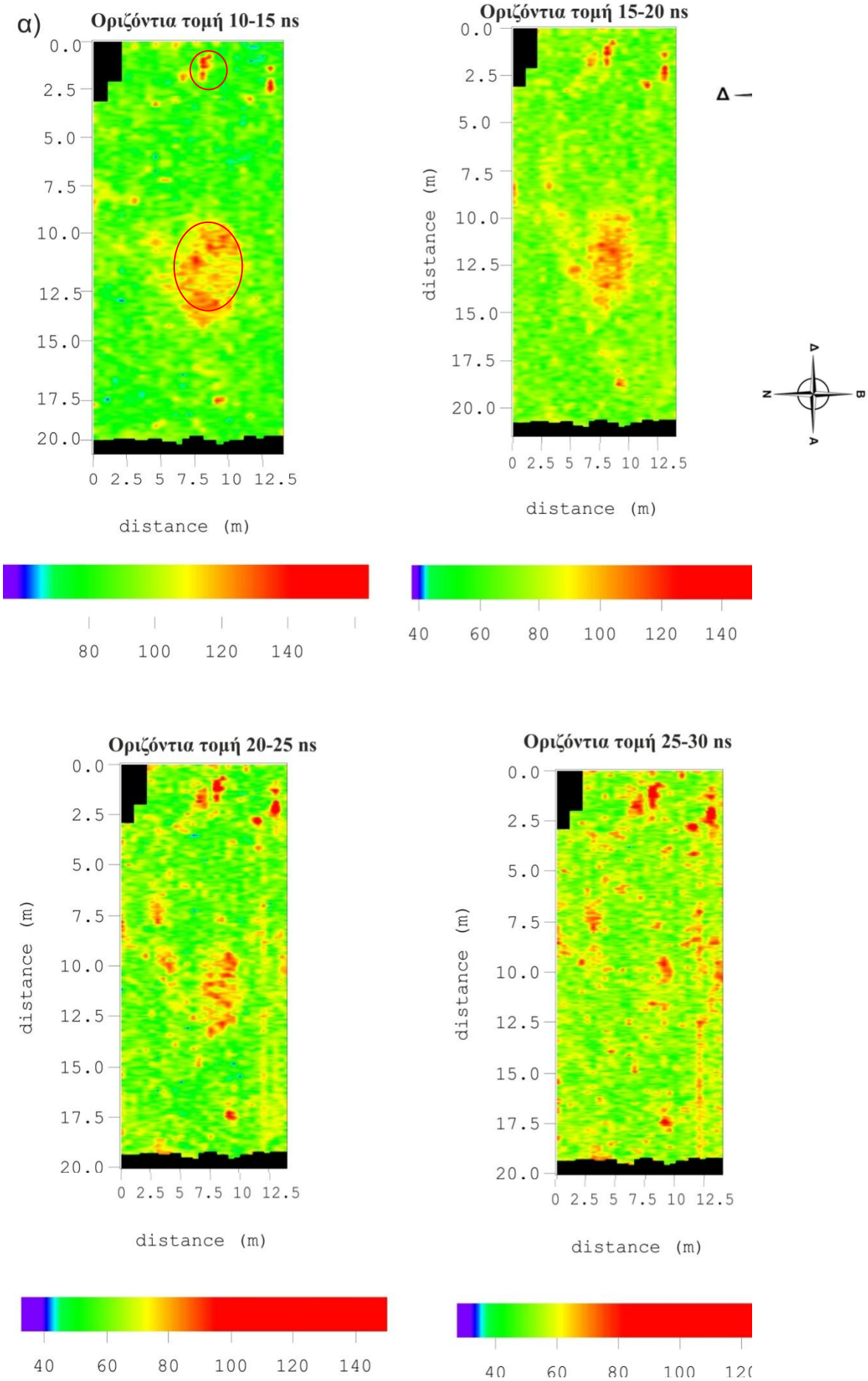
5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

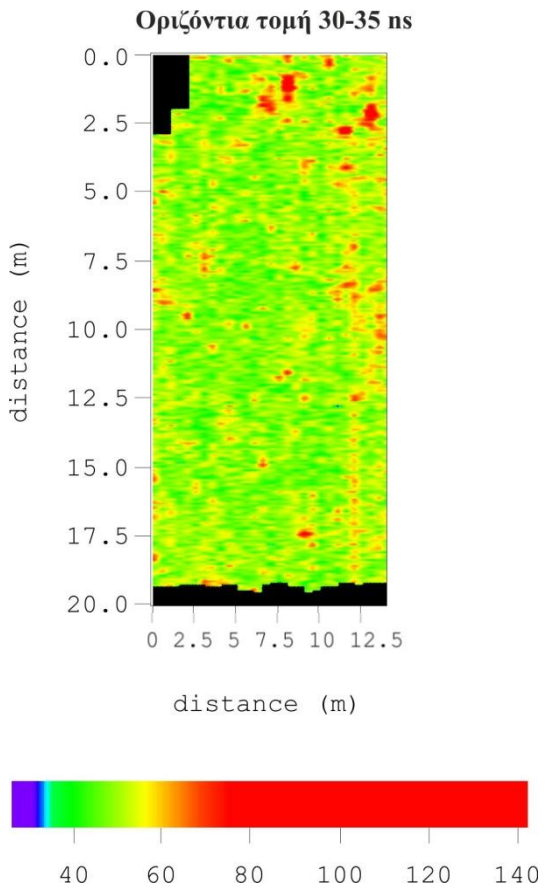
- **Νότια του μοναστηριού (Περιοχή S)**

Για την συγκεκριμένη περιοχή παρατίθενται αρχικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επαναδειγματοληψία (Εικόνα 5.2) και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν μετά την εξομάλυνση (Εικόνα 5.3). Παρατηρώντας κανείς τις δύο ομάδες εικόνες διαπιστώνει ότι η ευκρίνεια της δεύτερης είναι ικανοποιητική.

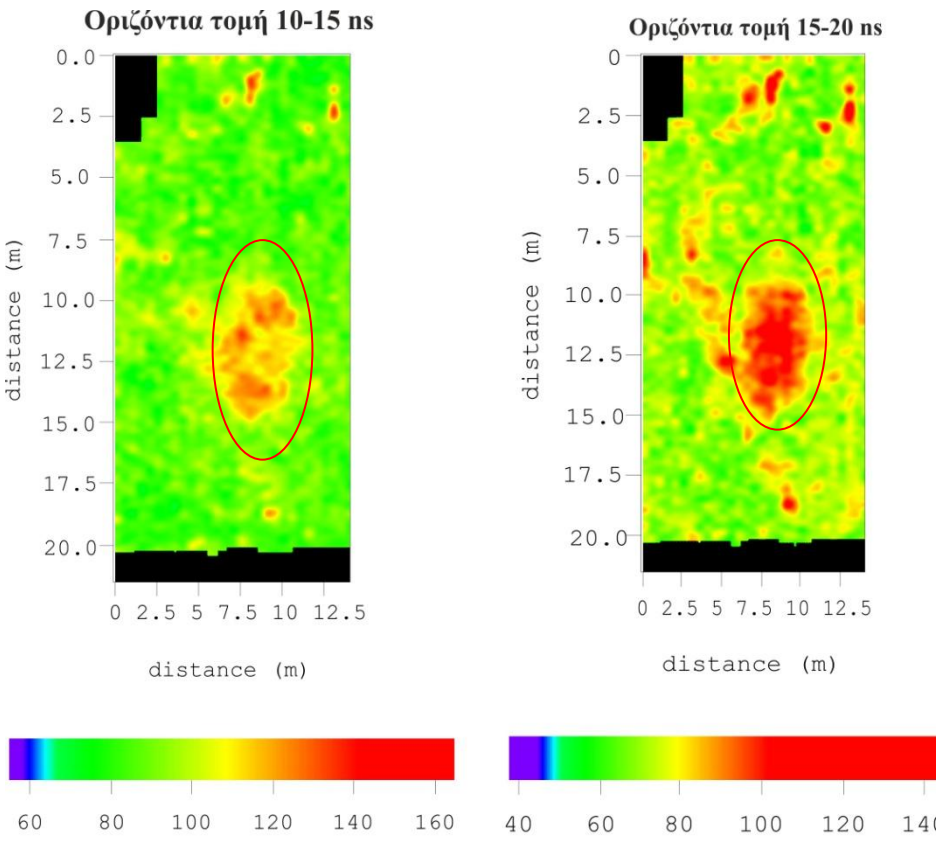
Οι σημαντικότερες ανακλάσεις εμφανίζονται στις οριζόντιες τομές για διπλό χρόνο διαδρομής στα 10-15 ns και 15-20 ns (Εικόνα 5.3) οι οποίες οριοθετούν τα άκρα μιας κατασκευής κυκλικής διατομής. Η κατασκεύη εμφανίζεται ξεκάθαρα σε βάθος 0.7 m (ταχύτητα Η/Μ κυμάτων 0.11 m/ns), η διάμετρός της είναι 4.0m περίπου και το πάχος της είναι 1.0m.

α)

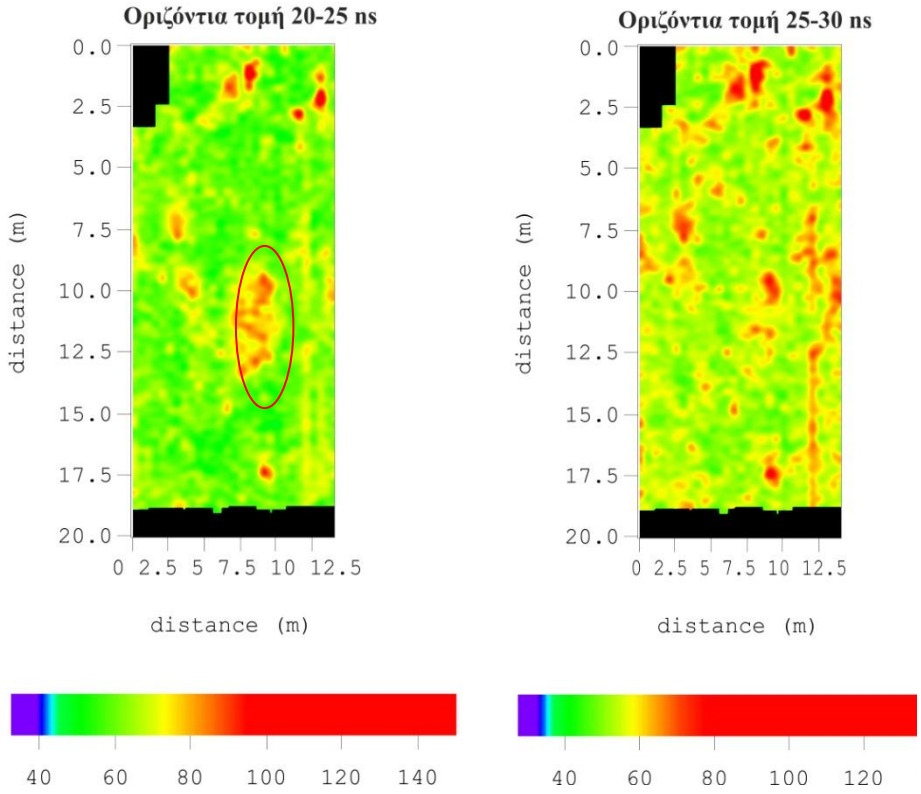

Οριζόντια τομή 10-15 ns
Οριζόντια τομή 15-20 ns
Οριζόντια τομή 20-25 ns
Οριζόντια τομή 25-30 ns
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
20.0
0 2.5 5 7.5 10 12.5
80 100 120 140
40 60 80 100 120 140
Δ
N
B
A

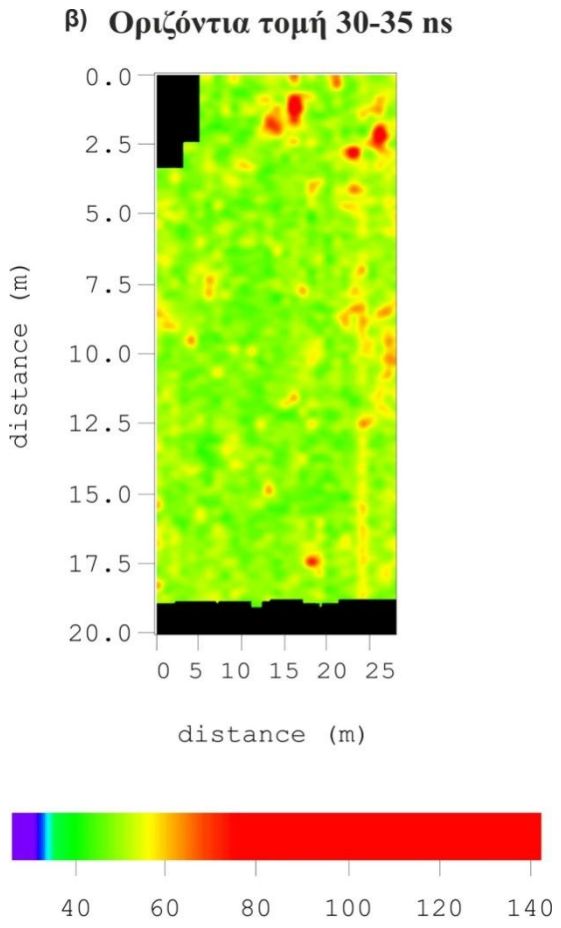


Εικόνα 5.2: Αποτελέσματα κατόπιν επαναδειγματοδηψίας. Χρόνοι καταγραφής από 10-35 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.


Οριζόντια τομή 10-15 ns
Οριζόντια τομή 15-20 ns
distance (m)
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
20.0
0 2.5 5 7.5 10 12.5
60 80 100 120 140 160
40 60 80 100 120

A
B
N
A

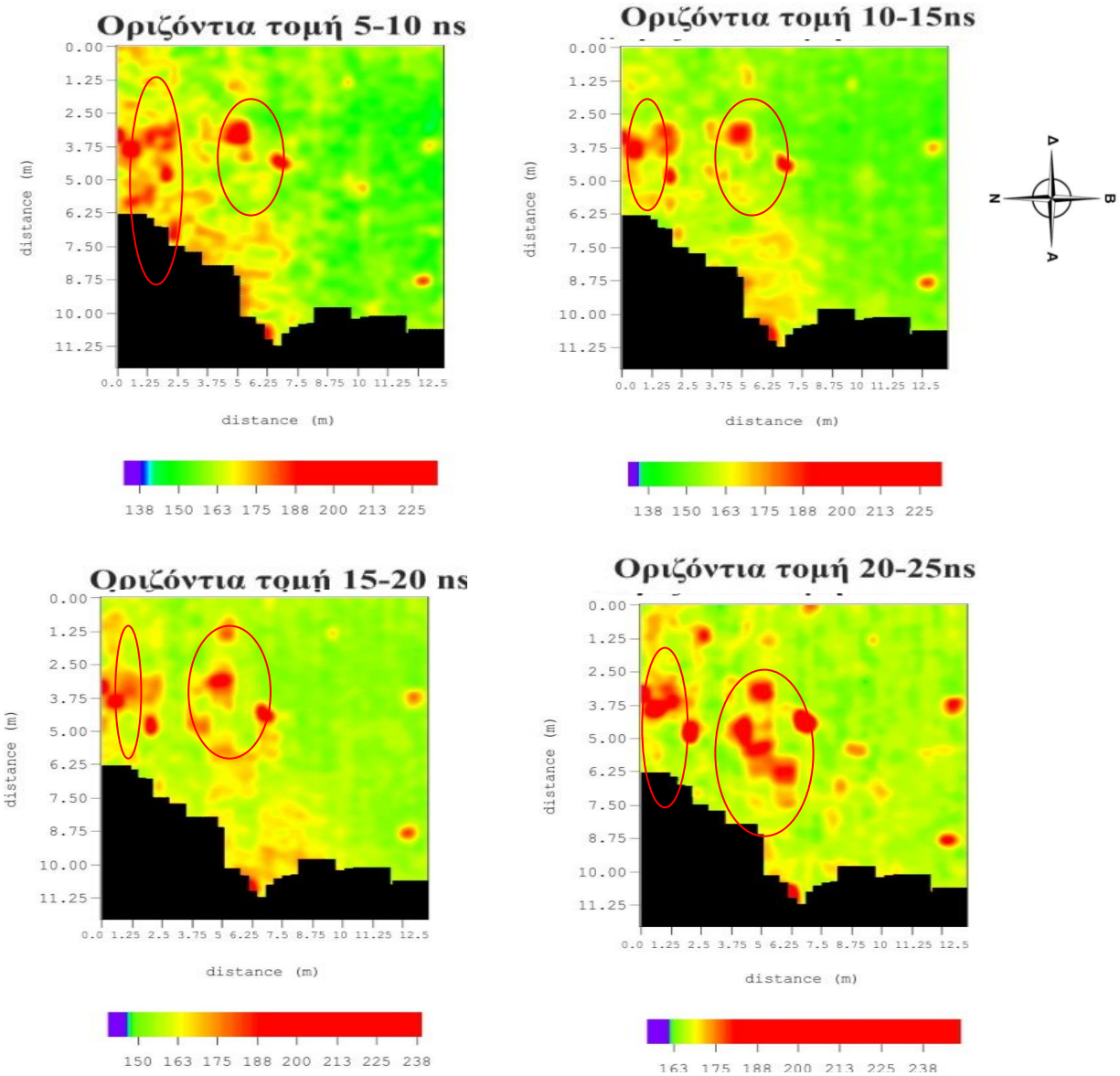

Οριζόντια τομή 20-25 ns
Οριζόντια τομή 25-30 ns
distance (m)
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
20.0
0 2.5 5 7.5 10 12.5
40 60 80 100 120 140
40 60 80 100 120

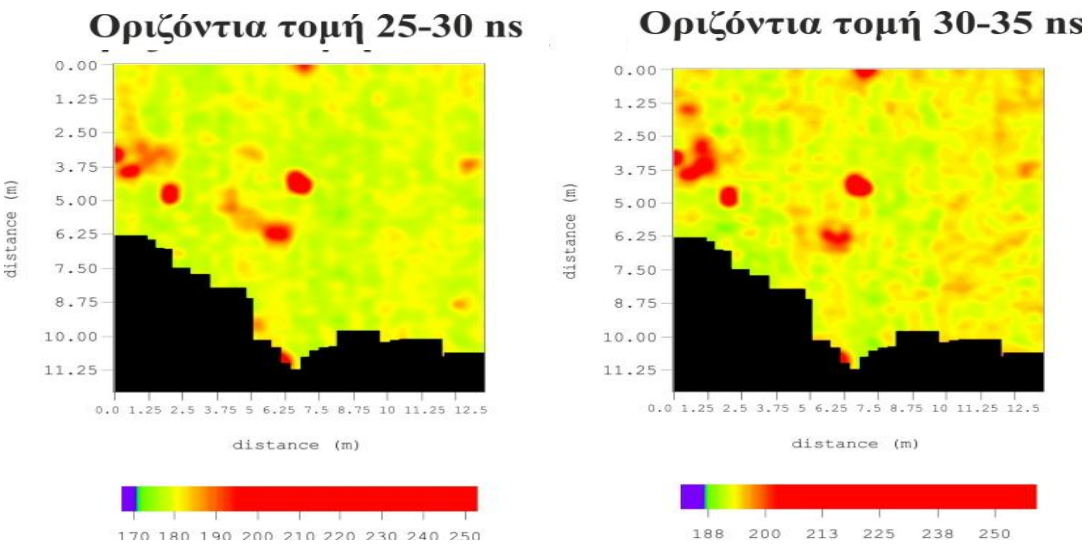


Εικόνα 5.3 : Αποτελέσματα κατόπιν εξομάλυνσης με βελτιωμένη ποιότητα των εικόνων. Χρόνοι καταγραφής από 10-35 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.

- **Δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής (Περιοχή Τ)**

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διασκόπηση στην περιοχή δυτικά της τρίκλιτης δεξαμενής (Εικόνα 5.4). Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρατίθενται οι οριζόντιες τομές από τα 5 έως τα 35 ns ενώ η μεση ταχύτητα υπολογίσθηκε στα 0.09 m/ns. Οι ανακλάσεις από αρχιτεκτονικά λείψανα κατά τη διεύθυνση Α-Δ τοποθετούνται βάθος περίπου στα 0.35m.



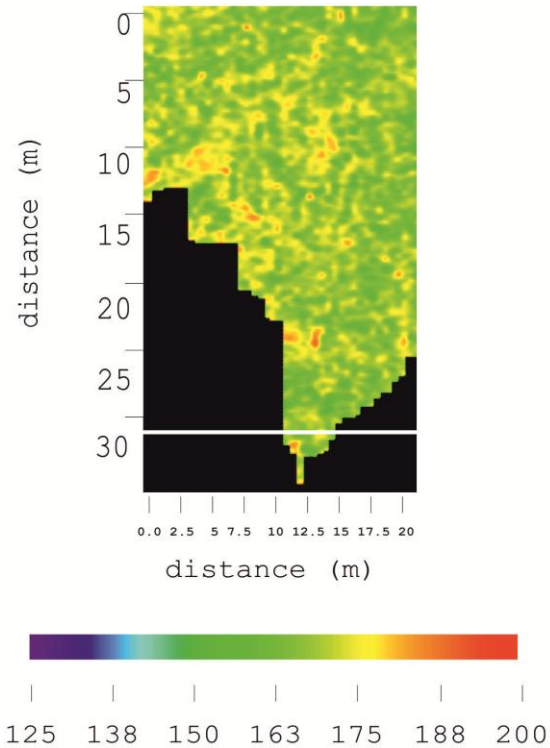


Εικόνα 5.4 : Περιοχή Τ. Χρόνοι καταγραφής από 5-35 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.

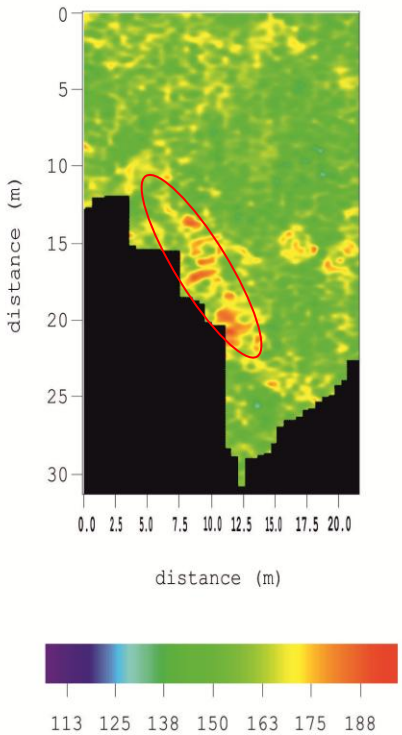
- **Νοτιονατολικά του χώρου στάθμευσης (ΠΕΡΙΟΧΗ Ε).**

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διασκόπηση στην περιοχή νοτιοανατολικά του χώρου στάθμευση (Εικόνα 5.5). Για την παρουσίαση των αποτεσμάτων παρατίθενται οι οριζόντιες τομές από τα 5 έως τα 30 ns ενώ η μέση ταχύτητα υπολογίσθηκε στα 0.10 m/ns. Στο χώρο υπάρχει μια δεξαμένη και γι' αυτο ο κάναβος αναπτύχθηκε περιμετρικά της. Πιο συγκεκριμένα οι ανακλάσεις που εμφανίζονται στην οριζόνια τομή με διπλό χρόνο διαδρομής 5-10 ns είναι αρκετά ασθενείς και μάλλον οφείλονται στην ίδια τη δεξαμενή.

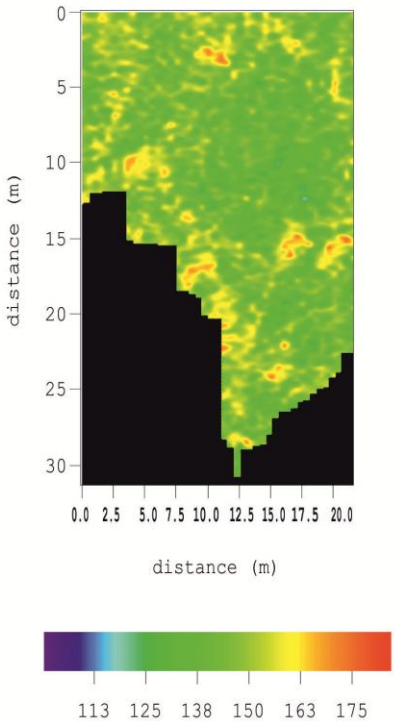
Οριζόντια τομή 5-10 ns



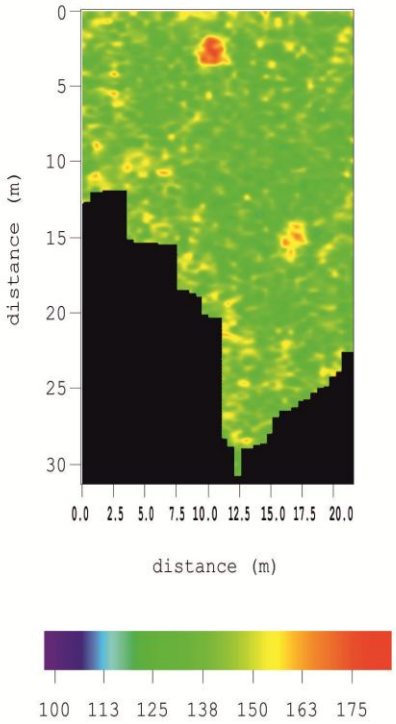
Οριζόντια τομή 10-15 ns

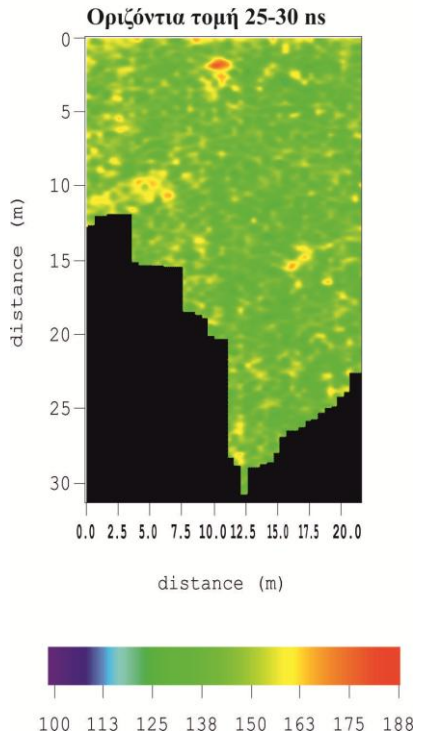


Οριζόντια τομή 15-20 ns



Οριζόντια τομή 20-25 ns

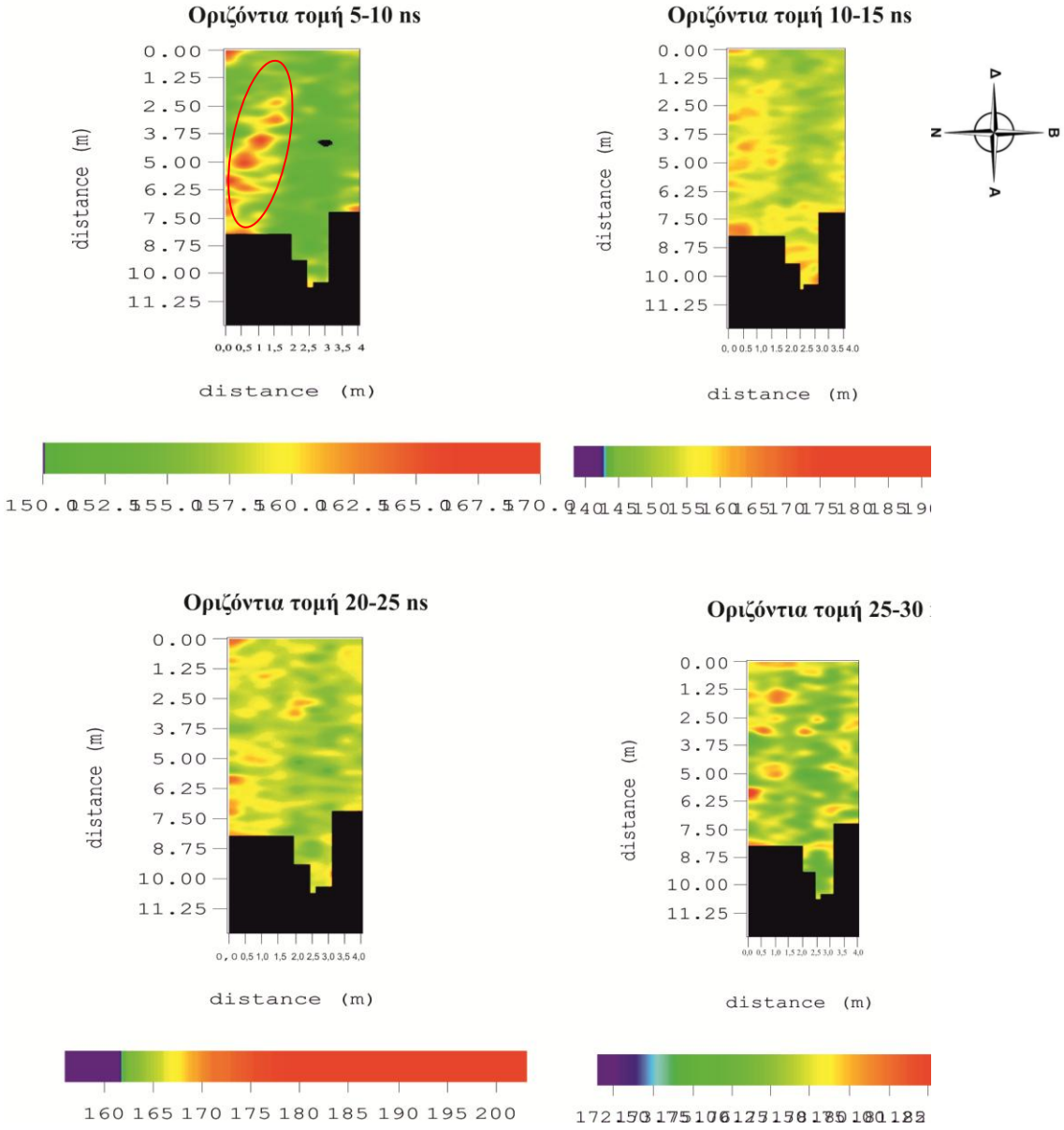


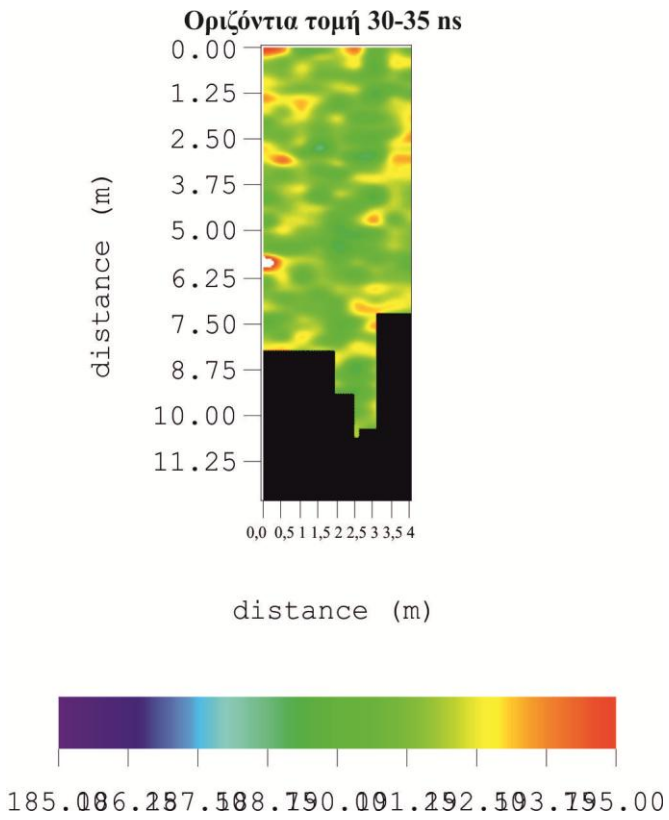


Εικόνα 5.5 : Χρόνοι καταγραφής από 5-30 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.

- **Γούβα (ΠΕΡΙΟΧΗ G).**

Η περιοχή βρίσκεται ΒΔ του ρωμαϊκού λουτρού, και λόγω μορφολογίας πιθανολογείται ότι χρησίμευε στην απομάκρυνση των υδάτων από το λουτρό. Η μέση ταχύτητα είναι 0.10 m/ns. Οι εμφανέστερες ανακλάσεις παρατηρούνται στην οριζόντια τομή των 5-10 ns(κόκκινο πλαίσιο), και κατά τη διεύθυνση Δ-Α τοποθετούνται από τα 2.5 έως τα 8.0 περίπου μέτρα.(Εικόνα 5.6). Οι ανακλάσεις που φαίνονται στα όρια του κανάβου αποδίδονται στη μορφολογία της περιοχής και πιθανότατα σε ασβεστολιθικές εμφανίσεις.

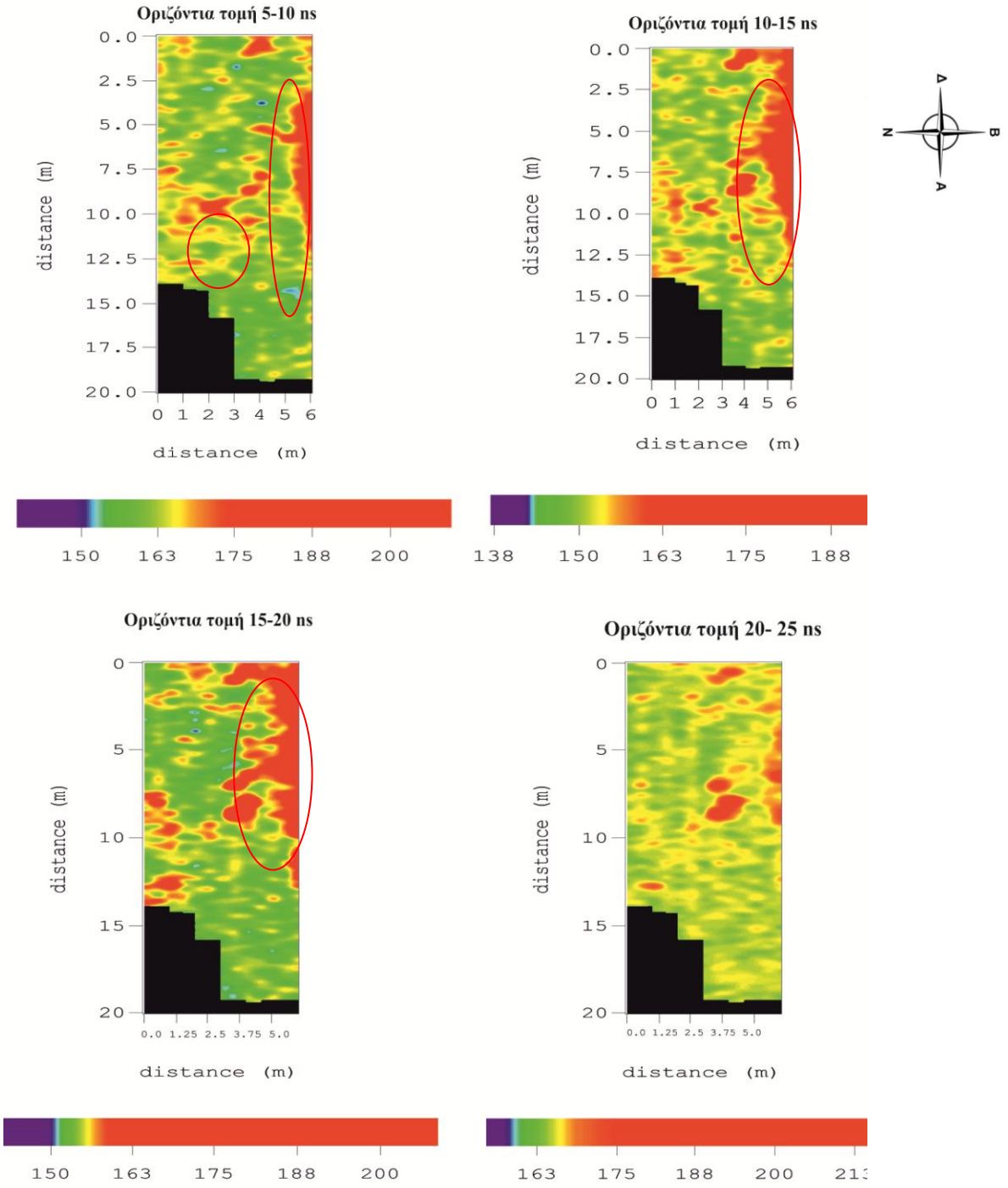


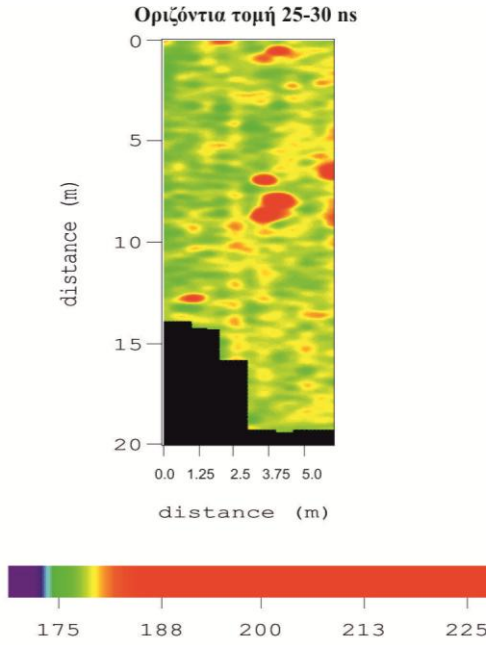


Εικόνα 5.6 : Περιοχή Γούβας. Χρόνοι καταγραφής από 5-35 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.

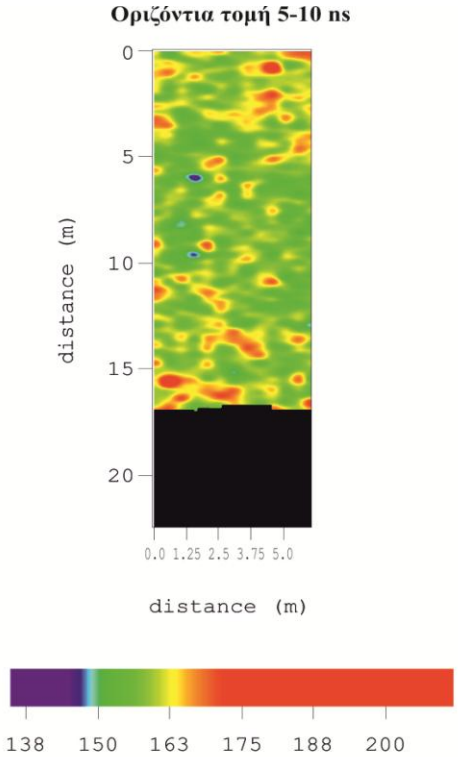
- **Λουτρά (ΠΕΡΙΟΧΗ Κ & L)**

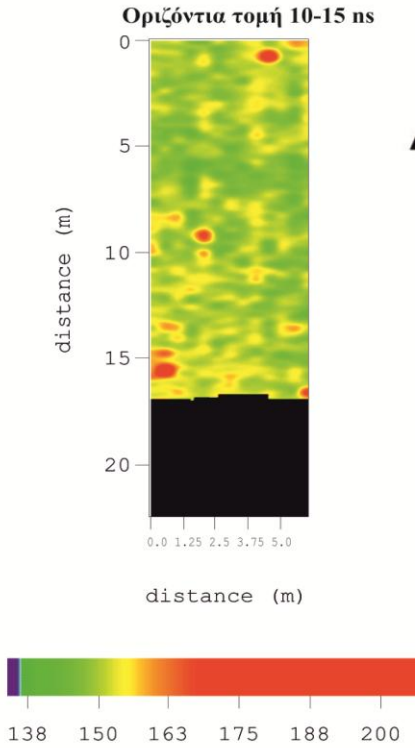
Στην περιοχή των λουτρών διασκοπήθηκαν δύο κάναβοι.(Κ&L). Ο κάναβος Κ αποτελεί επέκταση του κανάβου L προς τα δυτικά. (Εικόνες 5.7-5.8). Οι ανακλάσεις και στους δύο κανάβους είναι έντονες. Οι σημαντικότερες από τις ανακλάσεις αυτές εμφανίζονται στα ανατολικά όρια του κανάβου Κ.



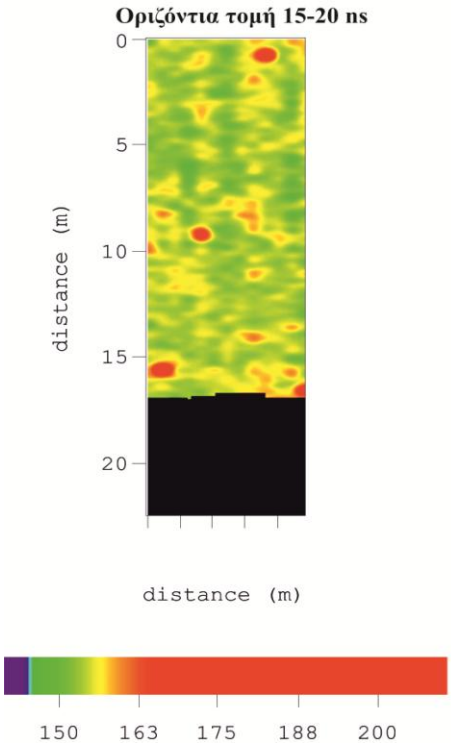


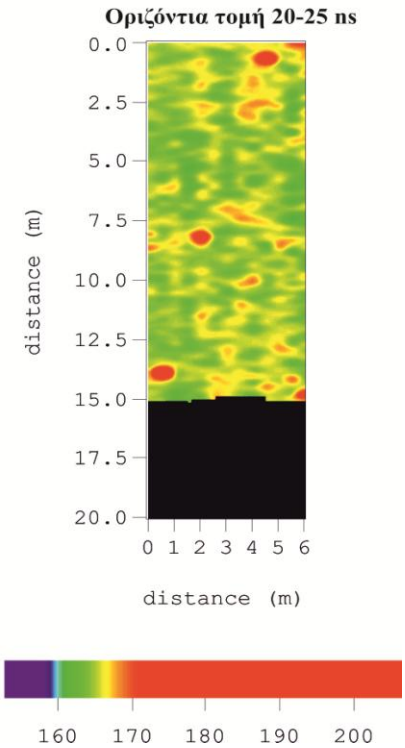
Εικόνα 5.7: Περιοχή λουτρών, κάναβος Κ. Χρόνοι καταγραφής από 5-30 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.

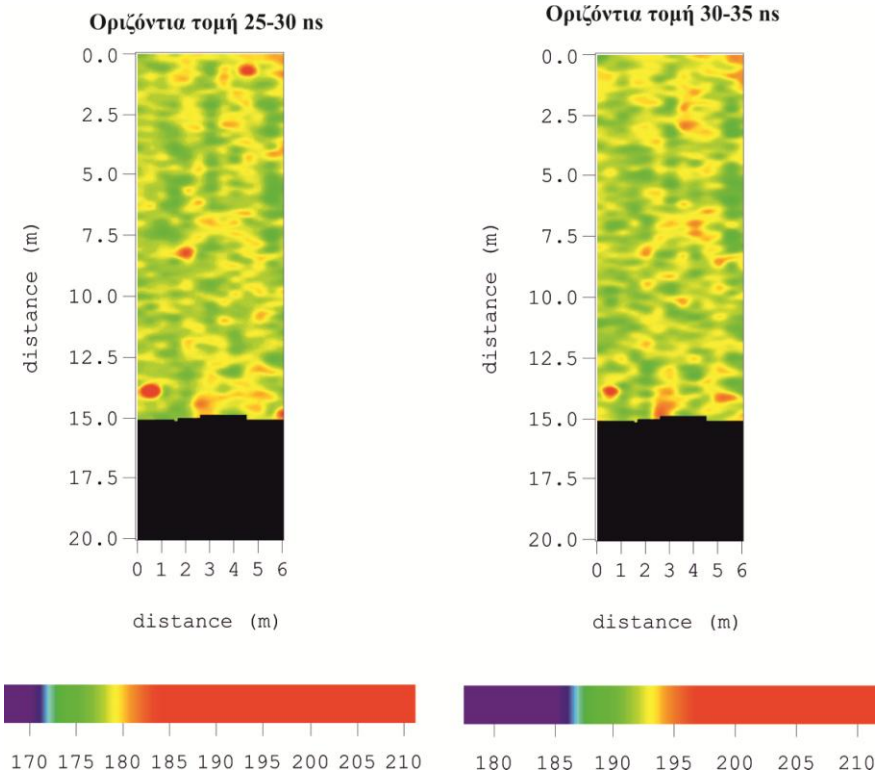

Οριζόντια τομή 5-10 ns
distance (m)
0
5
10
15
20
0.0 1.25 2.5 3.75 5.0
distance (m)
138 150 163 175 188 200


Οριζόντια τομή 10-15 ns
distance (m)
0
5
10
15
20
0.0 1.25 2.5 3.75 5.0
distance (m)
138 150 163 175 188 200

Δ
Β
Ν
Α


Οριζόντια τομή 15-20 ns
distance (m)
0
5
10
15
20
distance (m)
150 163 175 188 200


Οριζόντια τομή 20-25 ns
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
20.0
0 1 2 3 4 5 6
distance (m)
160 170 180 190 200

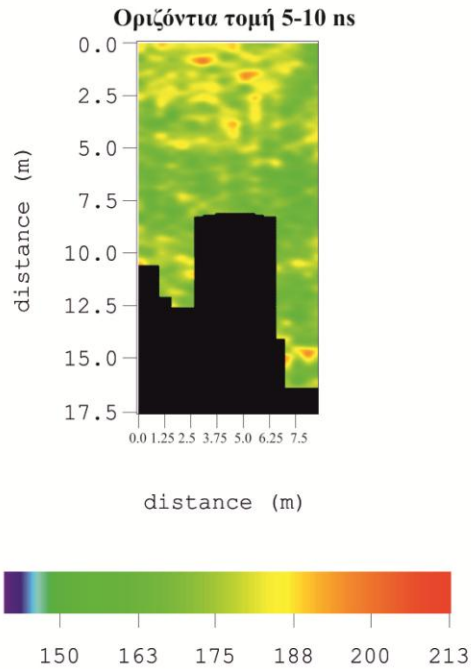


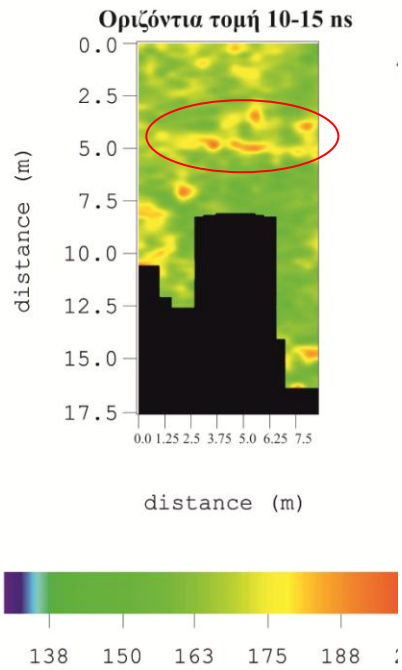
Εικόνα 5.8: Περιοχή λουτρών, κάναβος L. Χρόνοι καταγραφής από 5-35 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.

- **Αυλή Μοναστηριού (ΠΕΡΙΟΧΗ Μ).**

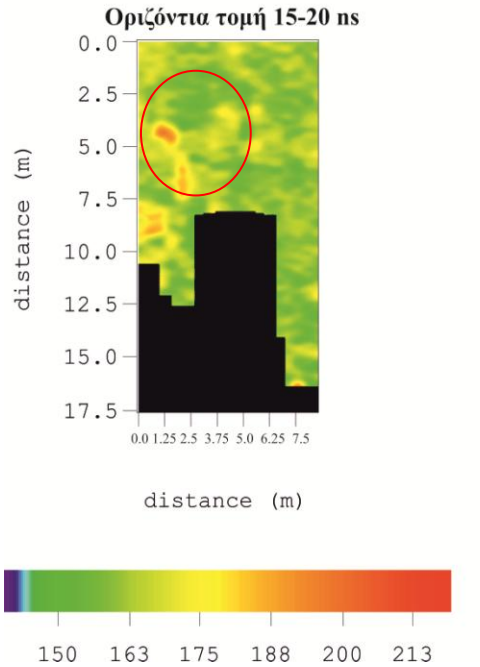
Τα σημαντικότερα αποτελέσματα από πλευράς ανακλάσεων παρουσιάζονται στην εικόνα 5.9. Η μέση ταχύτητα είναι στα 0.09 m/ns. Η πιο ενδιαφέρουσα τομή είναι αυτή στα 10-15 ns, όπου οι ανωμαλίες που εμφανίζονται (κόκκινα πλαίσια), κατά διεύθυνση Ν-Β παρουσιάζουν μια γραμμικότητα μεταξύ τους. Κατά πάσα πιθανότητα αποδίδονται σε θεμέλια ανθρωπογενούς δομής.

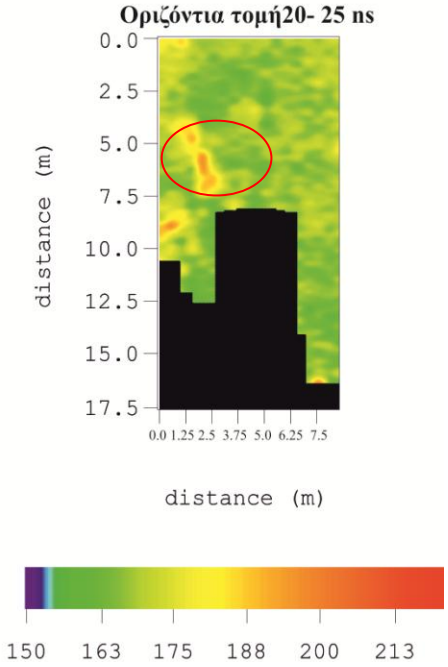
Σχετικό ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει και η ανάκλαση η οποία είναι εμφανής στις τομές των 15-20 και 20-25ns ενώ εξασθενεί όπως φαίνεται για χρόνους διαδρομής 25-30 και 30-35ns. Κατά τη διεύθυνση Α-Δ τοποθετείται στα 4.5 m με 7.5 m περίπου στην διεύθυνση Β-Ν ενώ κατά τη διεύθυνση Α-Δ ξεκινάει στα 2m. Η παραπάνω ανάκλαση μπορεί να σχετίζεται με τις τρείς προηγούμενες ή να οφείλεται σε άλλο ανακλαστήρα.

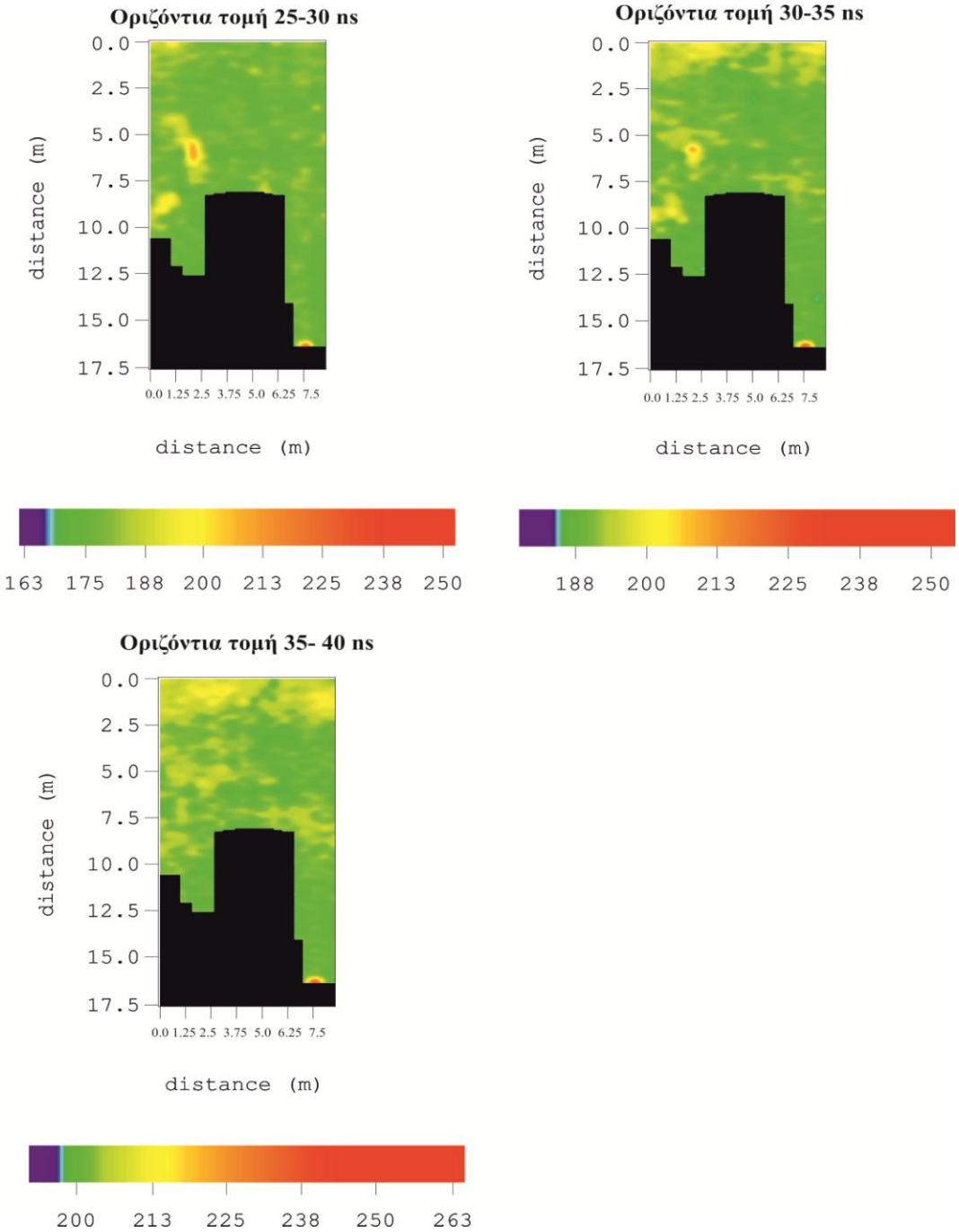

Οριζόντια τομή 5-10 ns
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
0.0 1.25 2.5 3.75 5.0 6.25 7.5
distance (m)
150 163 175 188 200 213


Οριζόντια τομή 10-15 ns
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
0.0 1.25 2.5 3.75 5.0 6.25 7.5
distance (m)
138 150 163 175 188

Δ
Β
Ν
Α


Οριζόντια τομή 15-20 ns
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
0.0 1.25 2.5 3.75 5.0 6.25 7.5
distance (m)
150 163 175 188 200 213


Οριζόντια τομή20- 25 ns
distance (m)
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
0.0 1.25 2.5 3.75 5.0 6.25 7.5
distance (m)
150 163 175 188 200 213



Εικόνα 5.9: Αυλή μοναστηριού. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α. Χρόνοι καταγραφής απο 5-40 ns.

- **Ανατολικά Μοναστηριού (ΠΕΡΙΟΧΗ Ν)**

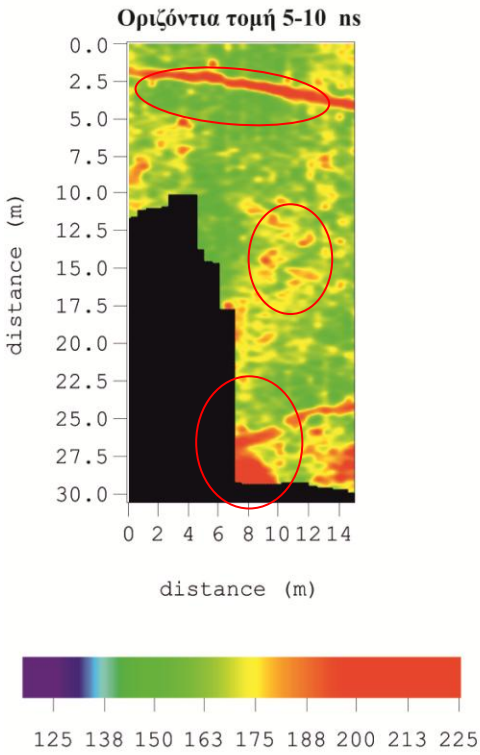
Τα αποτελέσματα της διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή ανατολικά του Μοναστηριού παρουσιάζονται στην εικόνα 5.10. Η μέση ταχύτητα είναι 0.12 m/ns και η σκιαγραφημένη περιοχή που φαίνεται αντιστοιχεί στο σκάμμα που υπάρχει στην περιοχή.

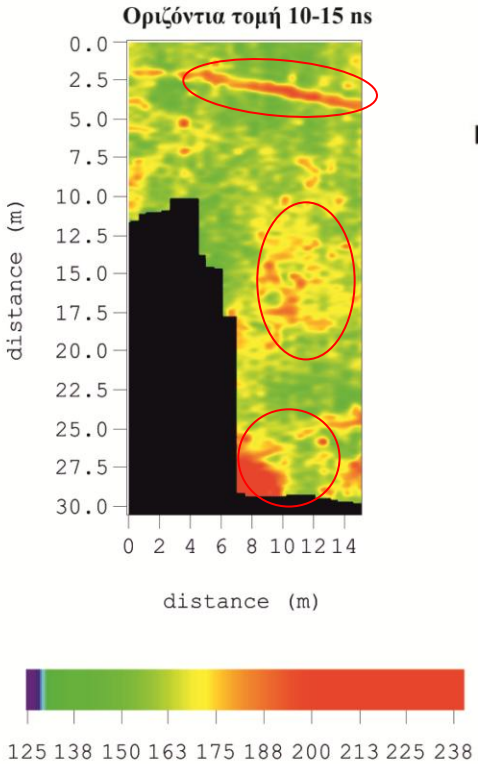
Στην περιοχή αυτή εμφανίστηκαν τρείς ομάδες σημαντικών ανακλάσεων. Η πρώτη ομάδα, που εμφανίζει έντονη γραμμικότητα στις οριζόντιες τομές με χρόνους καταγραφής από 5 έως 35 ns, κατά τη διεύθυνση Ν-Β εμφανίζεται περίπου στα 2.5 m.

Η δεύτερη ομάδα ανακλάσεων που εμφανίζει έντονη γραμμικότητα τοποθετείται στη μέση του κανάβου κατά Ν-Β από 10 έως 22 m και γίνεται έντονα αντιληπτές στις οριζόντιες τομές που αφορούν στους χρόνους καταγραφής από 20-25 έως 30-35 ns. Δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση για αυτές τις δύο ομάδες ανακλάσεων φαίνεται όμως να συνεχίζουν από το σκάμμα όπου έχουν εντοπιστεί αρχαία τοιχία.

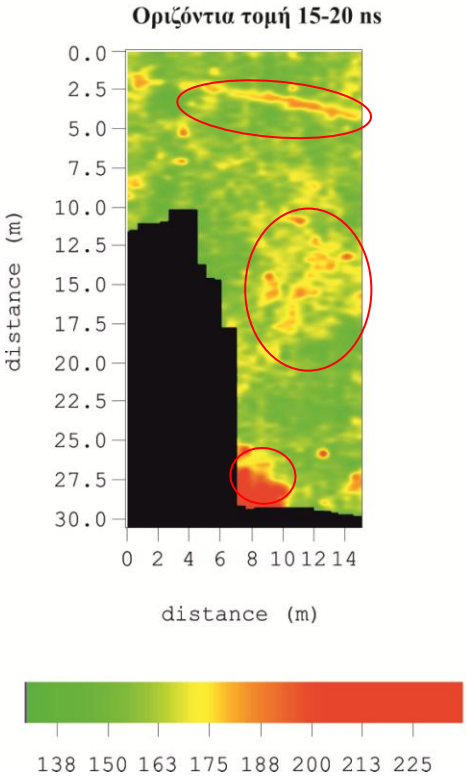
Η τρίτη ομάδα ανακλάσεων που αφορά στο βορειοανατολικό άκρο της τρίκλιτης δεξαμενής και ξεκινά κατά τη διεύθυνση Ν-Β από τα 25m περίπου είναι περισσότερο εμφανής επίσης στις οριζόντιες τομές που αφορούν στους χρόνους καταγραφής από 20-25 έως 30-35 ns.

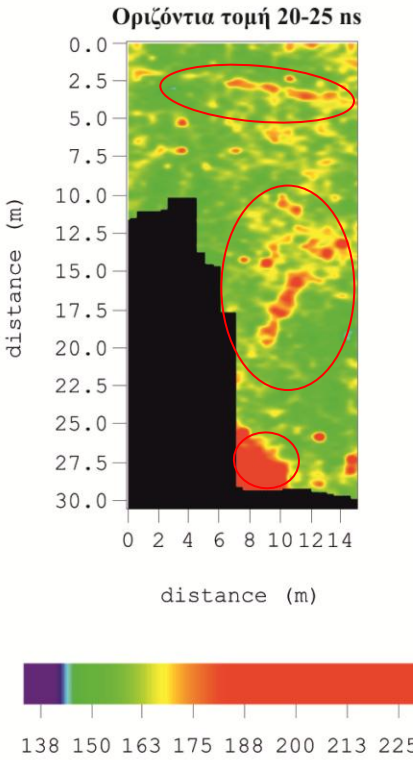
Όπως φαίνεται λοιπόν από τα αποτελέσματα πρόκειται για μια από τις περιοχές που εμφάνισε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

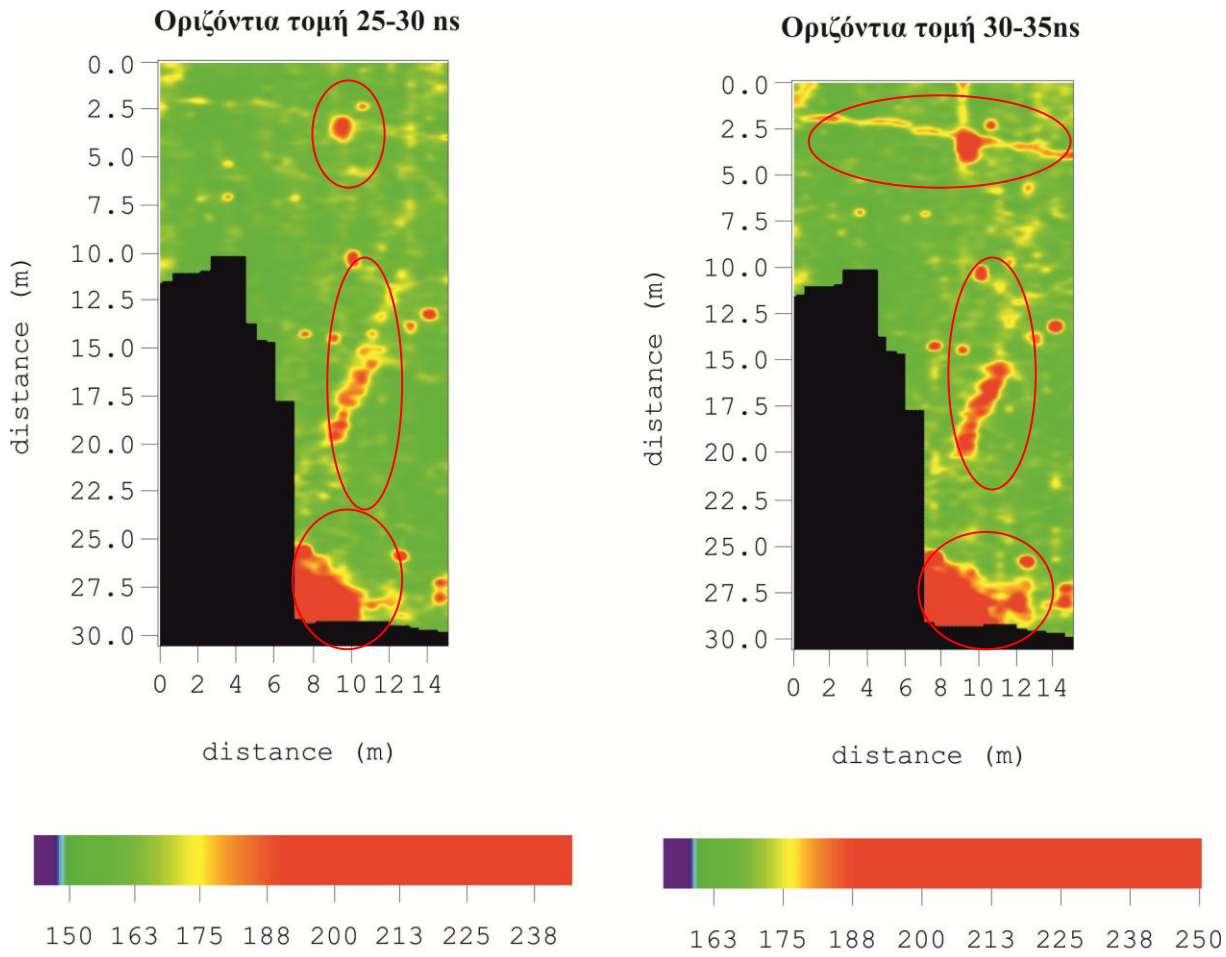

Οριζόντια τομή 5-10 ns
distance (m)
distance (m)
125 138 150 163 175 188 200 213 225


Οριζόντια τομή 10-15 ns
distance (m)
distance (m)
125 138 150 163 175 188 200 213 225 238

N
A
Δ
B


Οριζόντια τομή 15-20 ns
distance (m)
distance (m)
138 150 163 175 188 200 213 225

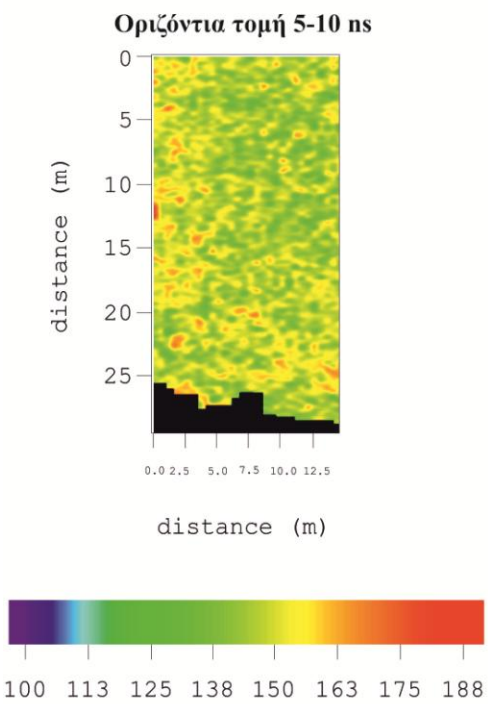

Οριζόντια τομή 20-25 ns
distance (m)
distance (m)
138 150 163 175 188 200 213 225

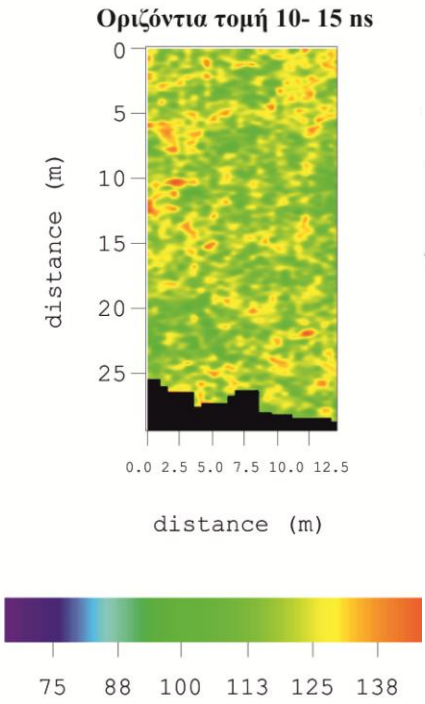


Εικόνα 5.10 : Αντολικά Μοναστηριού. Χρόνοι καταγραφής από 5-35 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Ν-Β.

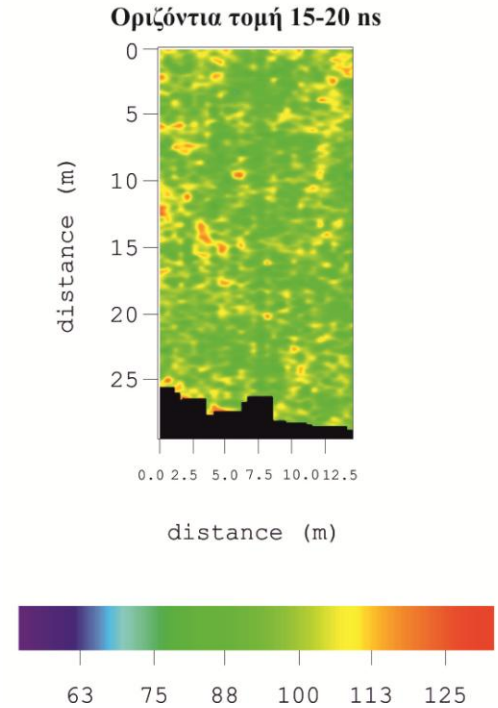
- **Δυτικά χώρου στάθμευσης (ΠΕΡΙΟΧΗ W).**

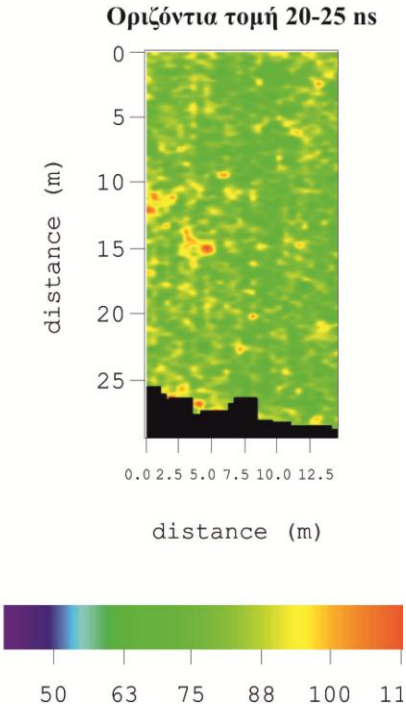
Στην εικόνα 5.11 παρουσιάζονται οι οριζόντιες τομές από τη διασκόπηση στην περιοχή δυτικά του χώρου στάθμευσης . Η μέση ταχύτητα είναι 0.10 m/ns. Οι ανακλάσεις που φαίνονται αντιστοιχούν σε διπλούς χρόνους καταγραφής από 5 έως 40 ns, είναι εντονότερες χωρίς όμως να οδηγούν σε κάποιο συμπέρασμα για το που θα μπορούσαν να οφείλονται. Κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ εμφανίζονται στα 10 με 20 m περίπου.

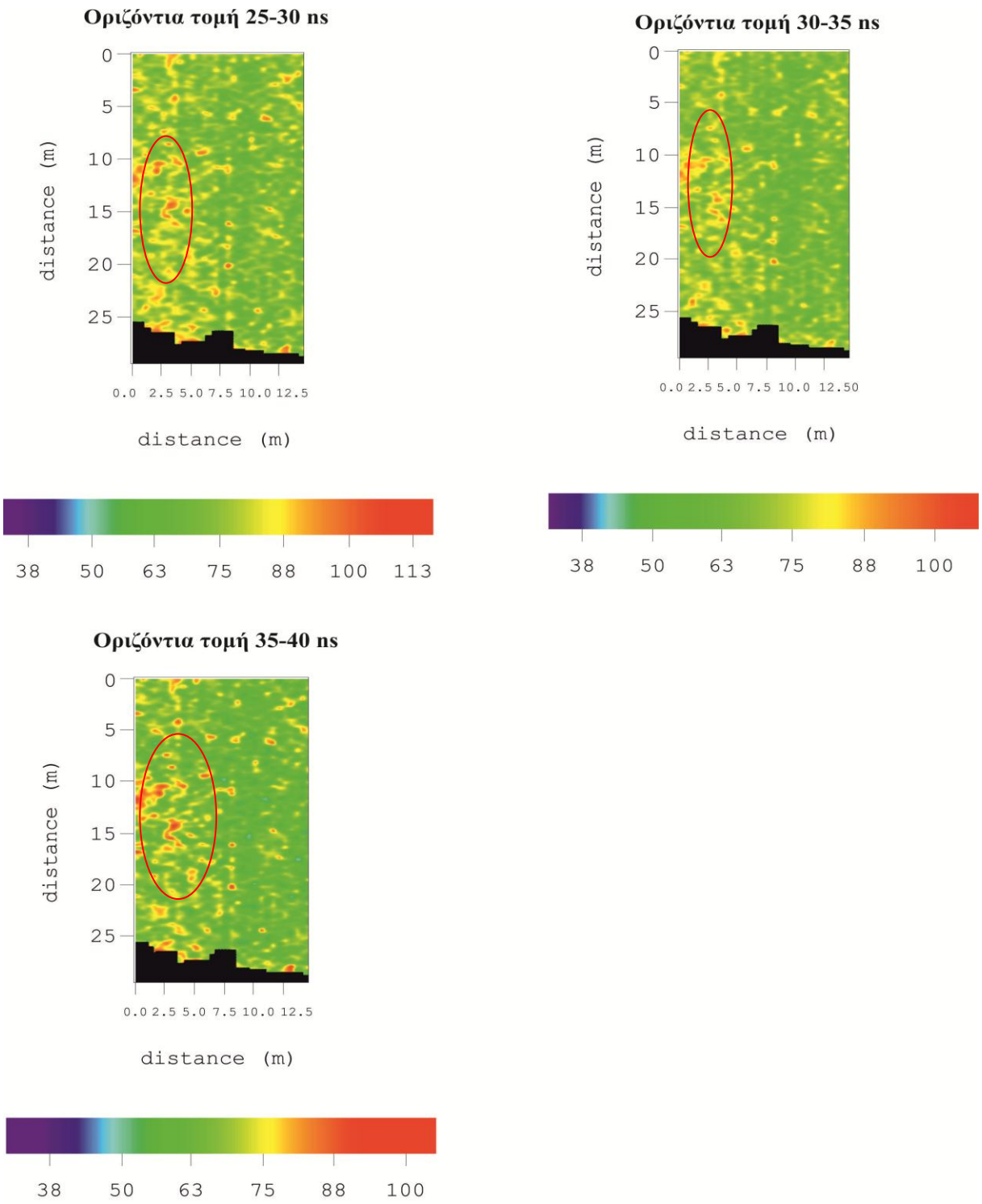

Οριζόντια τομή 5-10 ns
distance (m)
0
5
10
15
20
25
0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5
distance (m)
100 113 125 138 150 163 175 188


Οριζόντια τομή 10- 15 ns
distance (m)
0
5
10
15
20
25
0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5
distance (m)
75 88 100 113 125 138

A
B
N
A


Οριζόντια τομή 15-20 ns
distance (m)
0
5
10
15
20
25
0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5
distance (m)
63 75 88 100 113 125


Οριζόντια τομή 20-25 ns
distance (m)
0
5
10
15
20
25
0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5
distance (m)
50 63 75 88 100 11

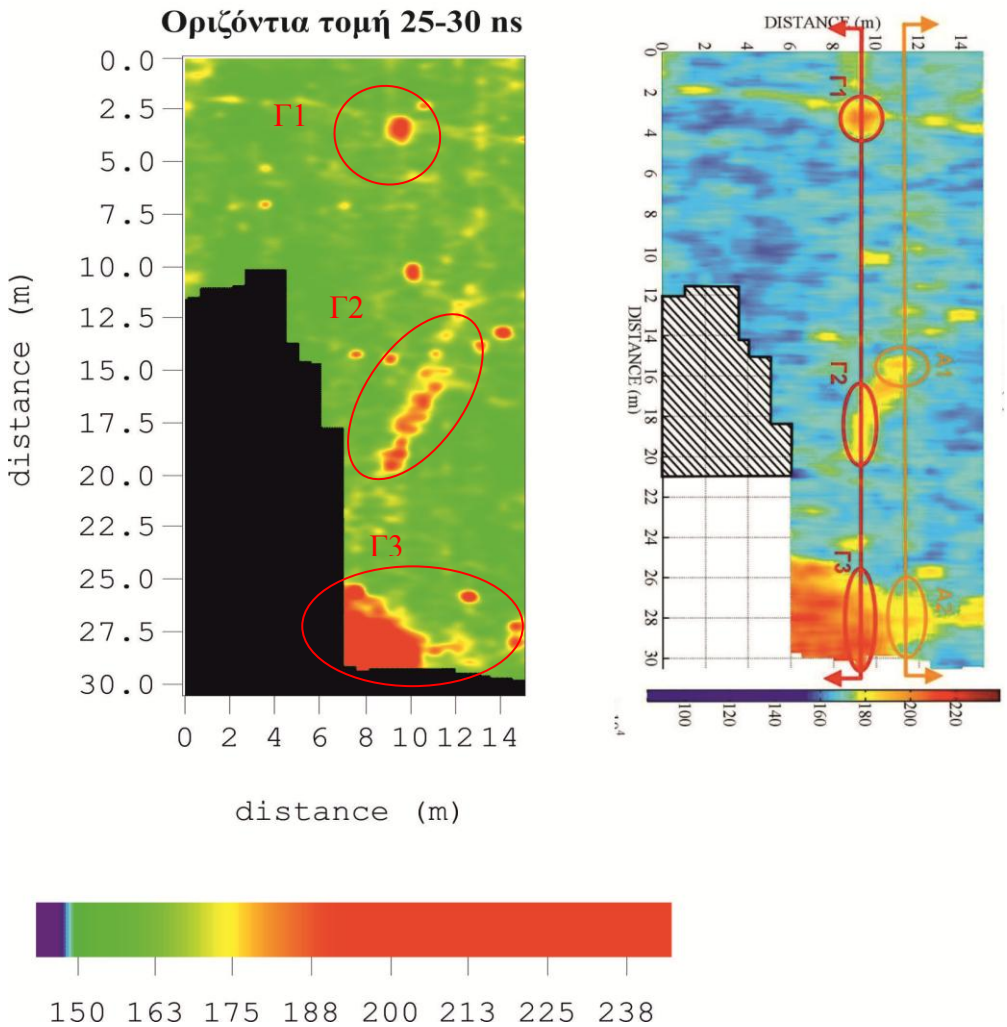


Εικόνα 5.11: Δυτικά χώρου στάθμευσης. Χρόνοι καταγραφής από 5-40 ns. Προσανατολισμός γραμμών διασκόπησης Δ-Α.

5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων.

- Περιοχή Ν (Ανατολικά του Μοναστηριού)

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα προηγούμενης διασκόπησης, παρατηρείται στις ίδιες περιοχές παρατηρείται ότι οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν με την επαναδειγματοληψία είναι βελτιωμένες. Η σκιαγραφημένη περιοχή των οριζόντιων τομών αντιστοιχεί στο σκάμμα που υπήρχε στην περιοχή. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ανακλάσεις σε διπλό χρόνο καταγραφής 25-30 ns.



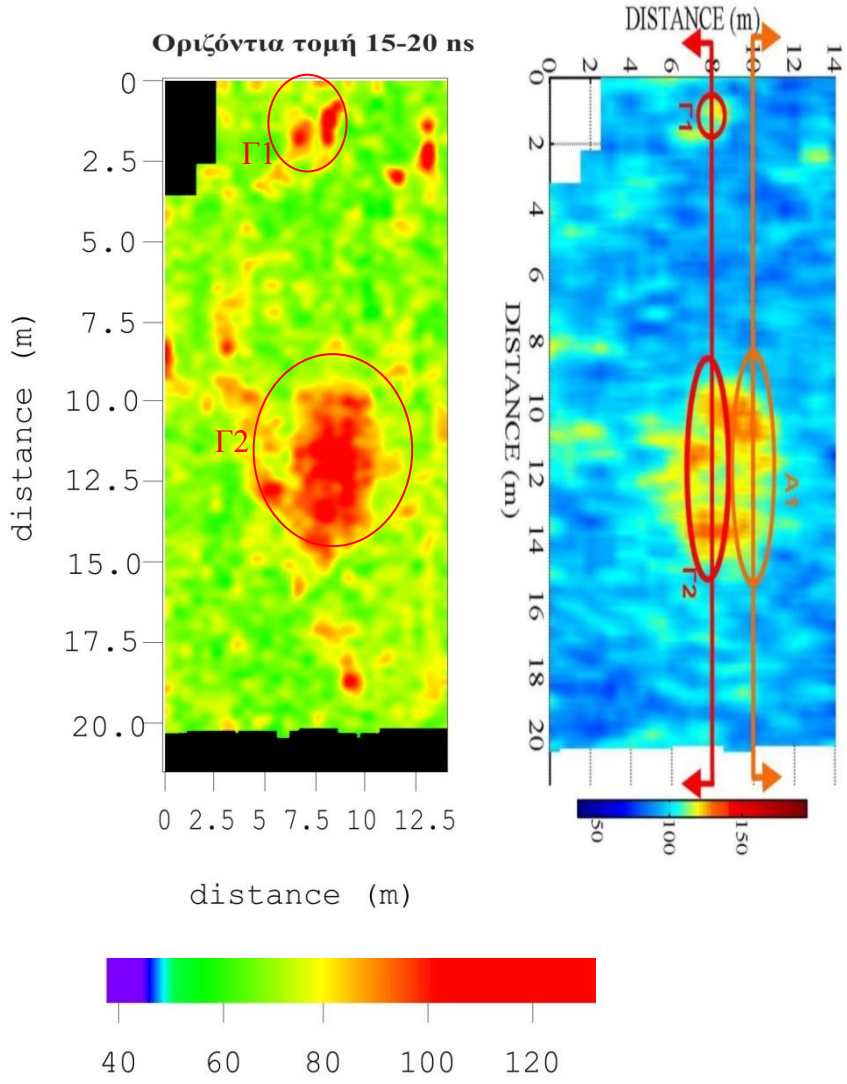
Εικόνα 5.12: Ανατολικά του Μοναστηριού, κάναβος Ν. Προσανατολισμός διασκόπησης Ν-Β.

Η ανάκλαση Γ2 αποδίδεται πιθανότατα σε θεμέλια κάποιου αρχαίου κτίσματος. Η τρίτη κατά σειρά ανάκλαση Γ3 αποδίδεται στην τρίκλιτη δεξαμενή.

Στην αριστερή εικόνα, που αφορά στην επαναδειγματοληψία, είναι σαφώς πιο έντονα και διακριτά τα σημεία ενδιαφέροντος.

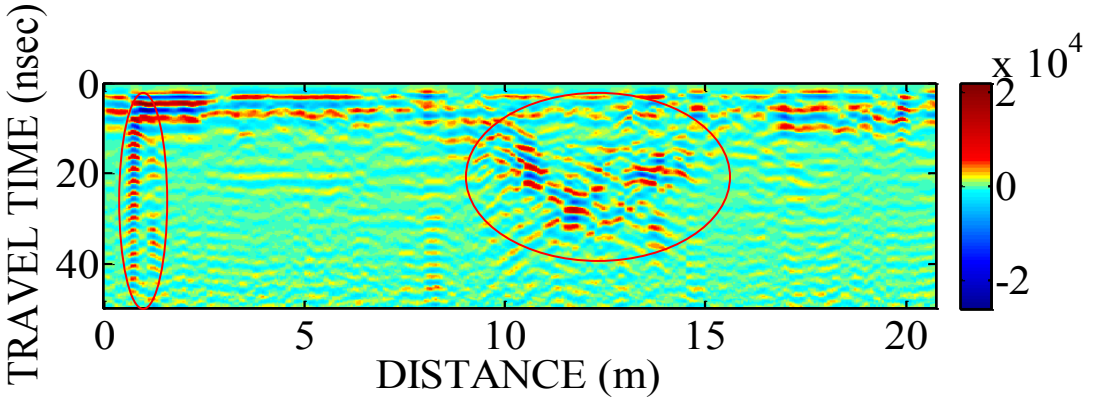
- Περιοχή S (Νότια του Μοναστηριού).

Στην εικόνα 5.13 παρουσιάζονται οι οριζόντιες τομές από τη διασκόπηση στην περιοχή νότια του μοναστηριού.



Εικόνα 5.13 : Ανατολικά του Μοναστηριού. Προσανατολισμός διασκόπησης Α-Δ.

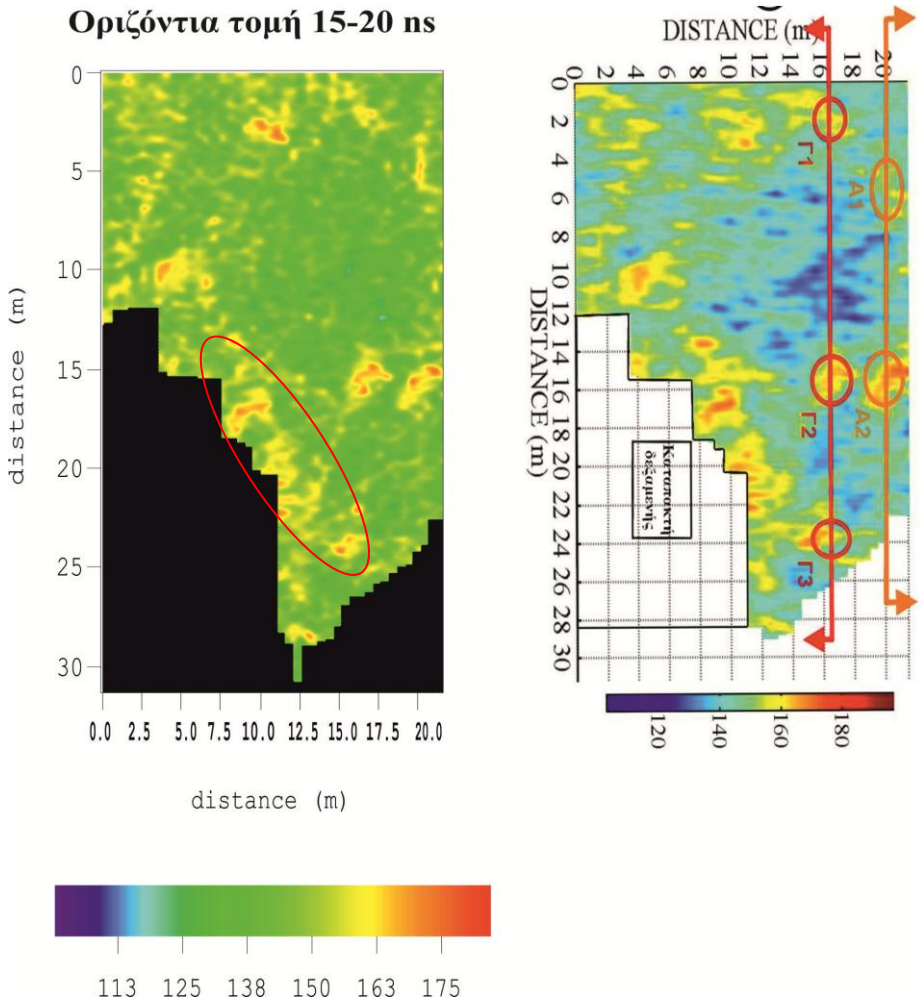
Η ανάκλαση Γ1 ξεκινάει απο τα 5 ns (εικόνα 5.2). Η Γ2 έχει διάμετρο περίπου 4 m. Στην τομή γεωραντάρ (Εικόνα 5.14) ενφανίζεται η ανωμαλία Γ2 κατά μήκος της γραμμής μελέτης στα 8 m.



Εικόνα 5.14 :Τομή γεωραντάρ (Background Noise Removal file 23). Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι έντονες ανακλάσεις.

- Περιοχή Ε (Νοτιοανατολικά χώρου στάθμευσης).

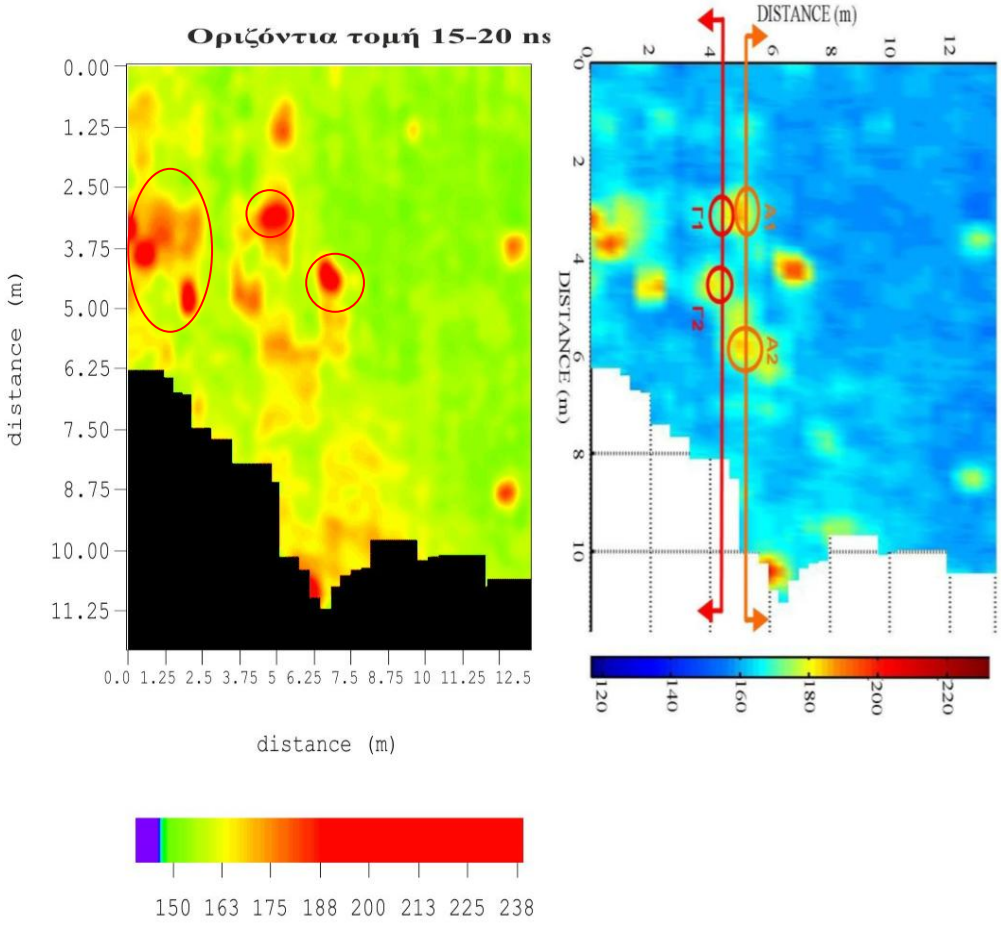
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οριζόντιες τομές από τη διασκόπηση στην περιοχή ανατολικά του χώρου στάθμευσης. Οι ανακλάσεις που φαίνονται αντιστοιχούν σε διπλό χρόνο καταγραφής 15-20 ns. Στο χώρο αυτό υπάρχει μια δεξαμενή και γι'αυτό ο κάναβος αναπτύχθηκε γύρω από αυτή. Στην τομή που ακολουθεί έχει σημειωθεί προσεγγιστικά η θέση της καταπακτής της δεξαμενής.



Εικόνα 5.15 : Νοτιοανατολικά χώρου στάθμευσης. Προσανατολισμός διασκόπησης Α-Δ. Οι ανακλάσεις στο κόκκινο πλαίσιο αριστερά είναι και πάλι πιο διακριτές σε σχέση με τη δεξιά εικόνα.

- Περιοχή Τ (Δυτικά της Τρίκλιτης Δεξαμενής).

Στην εικόνα 5.16 παρουσιάζεται η διασκόπηση για την περιοχή Δυτικά της Τρίκλιτης δεξαμενής . Οι ανακλάσεις που φαίνονται αντιστοιχούν σε διπλό χρόνο καταγραφής 15-20 ns.



Εικόνα 5.16 : Δυτικά της Τρίκλιτης Δεξαμενής. Προσανατολισμός διασκόπησης Α-Δ.

Και σε αυτή την περιοχή η οριζόντια τομή από την επαναδειγματοληψία είναι και πάλι πολύ πιο ευδιάκριτη σε σχέση με την εικόνα δεξιά που αφορά σε παλαιότερη διασκόπηση ενώ τονίζοται και ανακλάσεις που παλαιότερα δεν είχαν γίνει αντιληπτές (Εικόνα 5.16)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η χρήση συγκεκριμένων εφαρμογών του προγράμματος Transform απέδωσαν χρωματικούς χάρτες των περιοχων μελέτης με ελάχιστες παραμορφώσεις σε σχέση με αυτούς που προκύπτουν με την χρήση του MatLab, και ιδιαίτερα σημαντικές πληροφορίες για την ακριβή θέση θαμμένων αρχαιοτήτων.

Πιο συγκεκριμένα από τα αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης προκύπτει ότι υπάρχουν περιοχές, στις οποίες πρέπει να γίνει επιβεβαίωση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων. Σημαντικές περιοχές είναι εκείνη νότια και εκείνη ανατολικά του μοναστηριού. Οι ανακλάσεις που παρατηρήθηκαν νότια του μοναστηριού οφείλονται σε δεξαμενή κυκλικής διατομής, διαμέτρου 4m. Διάφορες γραμμικές ανωμαλίες πιθανής ανθρωπογενούς προέλευσης επίσης παρατηρήθηκαν σε όλες σχεδόν τις περιοχές, οι οποίες χρήζουν επαλήθευσης μέσω ανασκαφικών τομών.

Αντίστοιχο ενδιαφέρον συγκέντρωσε και η περιοχή της τρίκλιτης δεξαμενής όπου οι πληροφορίες που αντλήθηκαν υπέδειξαν όχι μονο την ακριβή θέση της αρχαίας δεξαμενής, αλλά και το χαρακτηριστικό σχήμα της οροφής του κτίσματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Annan, 2001, GPR—History, Trends, and Future Developments, Subsurface Sensing Technologies and Applications Vol. 3, No. 4.
2. Daniels 1996, Surface Penetrating Radar. Institution of Engineering and Technology. ISBN 978-0-86341-360-5.
3. Moffatt D.L., Puskar R.J. (1976). A Subsurface Electromagnetic Pulse Radar. Journal of Applied Geophysics.
4. Smemoe C.M. (2000). Processing and Visualization of GPR Data for Assessing Natural Hydrogeologic Conditions. Term Paper Civil and Environmental Engineering 540.
5. Toshioka T., Tsuchida T., Sasahara K. (1995). Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes. Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, pp. 119-124.
6. Βαφείδης Α., 2007, Γεωφυσική Διασκόπηση στον Αρχαιολογικό Χώρο των Απτέρων Χανίων.
7. Μανατάκη Μ., 2011, Συμβολή του γεωραντάρ στη χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων – Εφαρμογή στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας, Διπλωματική εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης , Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
8. Πουλιούδης Γ., 1999, Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ. Διπλωματική εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης , Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
9. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2001.
10. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα”, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά 2002.

<u>Διαδυκτιακές αναφορές</u>

1. http://www.justcrete.co.uk
2. http://www.crete.gr/el/pages/ancient-aptera.php
3. www.geo_analysis.com

4. www.geophysical.com
5. www.historycooperative.org/journals
6. Google