

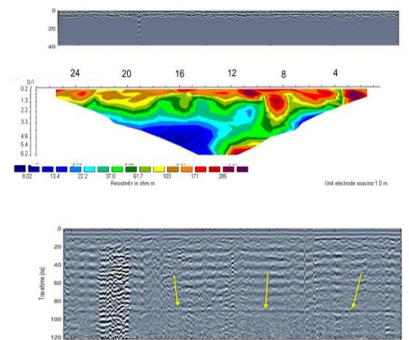
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΓΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**<<ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ
ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΑ ΤΕΙΧΗ ΣΤΗ
ΔΥΤΙΚΗ ΤΑΦΡΟ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ>>**



Εξεταστική επιτροπή:

Βαφείδης Αντώνης, Αν. καθηγητής (Επιβλέπων)

Σουπιός Παντελής, Καθηγητής (ΤΕΙ Κρήτης)

Σπανουδάκης Νικόλαος, ΕΔΙΠ

ΧΑΝΙΑ 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα.....	1
Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	4
1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Περίγραμμα εργασίας.....	5
1.2 Γεωφυσικές διασκοπήσεις και μέθοδοι.....	5
1.3 Περιοχή γεωφυσικής έρευνας-Ενετικά τείχη.....	6
2. Αρχές λειτουργίας των μεθόδων.....	9
2.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης.....	9
2.2 Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	10
2.2.1 Γενικά στοιχεία.....	10
2.2.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων	11
2.2.3 Μη ομογενές μέσο και φαινόμενη ειδική αντίσταση.....	13
2.2.4 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	13
2.2.5 Ηλεκτρική τομογραφία – Πρόγραμμα RES2DINV.....	15
2.3 Αρχή λειτουργίας μεθόδου Γεωραντάρ.....	18
2.3.1 Εξασθένιση H/M κυμάτων	22
2.3.2 Μέθοδοι διασκόπησης	23
3. Μέθοδοι επεξεργασίας μετρήσεων.....	25
3.1 Επεξεργασία καταγραφών γεωραντάρ.....	25
3.2 Δημιουργία συνθετικών δεδομένων γεωραντάρ.....	29
3.2.1 Δημιουργία μοντέλου Build 2-D Model.....	29
3.2.2 Split-step 2-D Modelling.....	30
3.2.3 FDTD 2-D Modelling.....	31
4. Παρουσίαση και ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	34
4.1 Εισαγωγή.....	34
4.2 Επιτόπου μετρήσεις σε σημεία των ενετικών τειχών.....	35
4.3 Αποτελέσματα μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας.....	38
4.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων με μέθοδο γεωραντάρ.....	41
4.4.1 Αποτελέσματα μεθόδου κοινού ενδιάμεσου σημείου.....	41
4.4.2 Αποτελέσματα μεθόδου ανάκλασης.....	44

4.4.3 Δημιουργία κατασκευαστικού μοντέλου 2-D.....	47
4.4.4 Συνθετική τομή προγράμματος Split-step 2-D Modelling.....	48
4.4.5 Συνθετική τομή προγράμματος FDTD 2-D Modelling.....	51
4.4.6 Προσδιορισμός πάχους τείχους.....	53
5. Συμπεράσματα και προτάσεις.....	57
5.1 Συμπεράσματα.....	57
5.2 Προτάσεις.....	57
Βιβλιογραφία.....	59
Παράρτημα.....	60

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί προϊόν μιας λεπτομερούς γεωφυσικής έρευνας, στα πλαίσια του εργαστηρίου εφαρμοσμένης γεωφυσικής του τμήματος Μηχ.Ο.Π του Πολυτεχνείου Κρήτης. Πραγματοποιήθηκε στη δυτική τάφρο των Ενετικών τειχών των Χανίων, με σκοπό την αναγνώριση της δομής των τειχών αλλά και τον εντοπισμό πιθανών στόχων αρχαιολογικού, και όχι μόνο, ενδιαφέροντος. Κατά την έρευνα στο πεδίο εφαρμόστηκε συνδυασμός δύο μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας και η μέθοδος γεωραντάρ, με στόχο την καταγραφή των διαφόρων υποεπιφανειακών δομών βάσει των μετρούμενων γεωφυσικών ιδιοτήτων τους και, πιο συγκεκριμένα, της διαφοροποίησης αυτών σε σχέση με τα περιβάλλοντα υλικά.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αφιερώθηκαν ατέλειωτες ώρες μελέτης, ενασχόλησης και αναζήτησης πληροφοριών σχετικά με το θέμα. Η επιθυμία μου ήταν να δημιουργηθεί μία εργασία με σωστή δομή και όσο το δυνατό πιο επεξηγηματική ακόμα και σε ανθρώπους που δεν έχουν άμεση σχέση με το αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής. Αδιαμφισβήτητα, η όλη διαδικασία εκπόνησής της αποτέλεσε για μένα μια σπουδαία εμπειρία και ένα σημαντικότερο γνωστικό εφόδιο για τη μετέπειτα πορεία μου ως μηχανικός.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αντώνη Βαφείδη για την αρωγή και την άπογη συνεργασία που είχαμε, τους βοηθούς-συντελεστές του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και ιδιαίτερα τον κ. Οικονόμου και τον κ. Κρητικάκη για τη βοήθεια που μου παρείχαν. Επίσης, δε θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένειά μου που με στηρίζει ανελλιπώς, καθώς και όλα εκείνα τα πρόσωπα που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας και η μέθοδος γεωραντάρ κατατάσσονται στις μη καταστροφικές μεθόδους διασκόπησης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως στις γεωφυσικές έρευνες και ιδιαίτερα στις αρχαιολογικές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή των τειχών βασίζεται στις συγκρίσεις των γεωφυσικών τομών που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου για τις δύο μεθόδους. Αποτελέσματα, τα οποία συγκρίνονται, επιπλέον, με επιτόπου έρευνες σε διάφορα προσβάσιμα κατεστραμμένα σημεία των τειχών, όπου υπήρχε εικόνα της εσωτερικής δομής, αλλά και με πληροφορίες από διάφορα άρθρα σχετικά με τα ενετικά τείχη των Χανίων. Περισσότερη βαρύτητα δίδεται στη μέθοδο γεωραντάρ, όπου η ερμηνεία των μετρήσεων πεδίου πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος MATGPR και, πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση συνθετικών δεδομένων για μοντέλα της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα διαφορετικά δομικά υλικά των ενετικών τειχών.

Συνοπτικά, από την έρευνα προκύπτει ότι το πάχος του τείχους στη γραμμή μελέτης (27 μέτρα και ύψος 1.7 μέτρα από το έδαφος) είναι περίπου 3.8 μέτρα. Τα πρώτα 30-35 εκατοστά του πάχους αποτελούν την πρόσοψη του τείχους (επιφανειακό στρώμα), η οποία αποτελείται από ορθογωνισμένους ψαμμίτες συνδεδεμένους με ασβεστοκονίαμα, ενώ το υπόλοιπο τείχος αποτελεί ακανόνιστο μείγμα πετρωμάτων ψαμμίτη, άφθονου ασβεστοκονιάματος και υγρασίας. Συνέχεια του τείχους αποτελούν οι επιχωματώσεις που προέκυψαν από την εκσκαφή της τάφρου, οι οποίες τοποθετήθηκαν στο κενό μεταξύ του τείχους και του φυσικού πρανούς. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αλλά και ερωτηματικά παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων με το πρόγραμμα MATGPR και κυρίως από τη δημιουργία κατασκευαστικού μοντέλου 2-D του τείχους. Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος γεωραντάρ, η οποία δίνει περισσότερο λεπτομερή αποτελέσματα, συνδυαζόμενη με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, μέσω της υπέρθεσης τομών, μπορεί να δώσει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα στην αναγνώριση δομών σχετικά μικρού βάθους, όπως είναι τα ενετικά τείχη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Περίγραμμα εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο αναφέρονται λίγα λόγια για τις γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης, αλλά και για την περιοχή της γεωφυσικής έρευνας, τα Ενετικά τείχη των Χανίων και την ιστορία τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται επεξήγηση των αρχών λειτουργίας των δύο μεθόδων, ενώ στο τρίτο αναφέρονται οι μέθοδοι επεξεργασίας για τη μέθοδο του γεωραντάρ, όπου δόθηκε περισσότερη βαρύτητα. Στη συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου για τις δύο μεθόδους. Τα αποτελέσματα των δύο αυτών μεθόδων επεξεργασίας συγκρίνονται μεταξύ τους, αλλά και με τις επιτόπου μετρήσεις που έγιναν σε διάφορες προσβάσιμες περιοχές όπου τα τείχη έχουν καταστραφεί και φαίνεται η εσωτερική τους δομή. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο αναγράφονται τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω συγκρίσεις, καθώς και ορισμένες προτάσεις σχετικά με παρόμοιες μελλοντικές γεωφυσικές έρευνες που μπορούν να πραγματοποιηθούν με βάση τα συμπεράσματα αυτά.

1.2. Γεωφυσικές διασκοπήσεις και μέθοδοι

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις εφαρμόζονται σε περιπτώσεις εντοπισμού, προσδιορισμού και απεικόνισης του υπεδάφους ή δομών ενδιαφέροντος που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια μιας κατασκευής ή ενός υλικού σώματος. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται πλέον σε τομείς όπως η αρχαιολογία, ο εντοπισμός πετρελαίου και φυσικού αερίου, σε μεταλλευτικές έρευνες, στην εφαρμοσμένη μηχανική, καθώς και σε περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές έρευνες.

Οι κύριες μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων χωρίζονται σε μαγνητικές, βαρυτικές, σεισμικές, ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων. (Περισσότερες πληροφορίες: Βαφείδης, 2001)

1.3. Περιοχή γεωφυσικής έρευνας-Ενετικά τείχη



Εικόνα 1.1: Η εικόνα των Χανίων κατά την κατασκευή των ενετικών τειχών

Τα Χανιά είναι η σπουδαιότερη πόλη της δυτικής Κρήτης, κτισμένη στον ανατολικό μυχό του κόλπου Κυδωνίας, στην τοποθεσία της Αρχαίας Κυδωνίας. Η πόλη υπήρχε μέχρι το τέλος της Πρωτοβυζαντινής περιόδου, όταν και καταστράφηκε από τους Σαρακηνούς (828 μΧ). Μετά την εκδίωξη των Αράβων, ο οικισμός ξανακτίστηκε, αλλά παρέμεινε μια μικρή και ασήμαντη πόλη. Λόγω όμως της οχυρής θέσης της και εξαιτίας των γεγονότων με τους Σαρακηνούς, οι Βυζαντινοί έκτισαν ένα φρούριο στον λόφο που ονόμασαν Καστέλλι.

Οι Ενετοί, των οποίων τα συμφέροντα εξυπηρετούσε άριστα ο οικισμός, ανοικοδόμησαν και εποίκησαν την πόλη το 1252. Αρχικά, εγκαταστάθηκαν στο βυζαντινό Καστέλλι, κτίζοντας τη Μητρόπολή τους Santa Maria, το παλάτι του ρετούρη (νομάρχη) και τις κατοικίες των αξιωματούχων, ενώ στους πρόποδες του λόφου άρχισαν να σχηματίζονται οι πρώτοι βούργοι, δηλαδή συνοικίες πολιτών με διάφορα επαγγέλματα. Τους βούργους αυτούς κατέστρεψαν το 1266 οι Γενουάτες.

Η ανάγκη να οχυρωθεί η πόλη, πέρα από την οχύρωση του Καστελλίου, ήταν ολοφάνερη. Οι φεουδάρχες ζητούσαν από την Κεντρική εξουσία της Βενετίας να κατασκευαστεί ένας περίβολος τειχών που να περιλαμβάνει όλη την πόλη, όπως είχε αναπτυχθεί ως τότε. Η οχύρωση τελικά αποφασίστηκε το 1336 και τα έργα άρχισαν αμέσως, για να ολοκληρωθούν μέσα σε 20 χρόνια. Αυτά ήταν τα πρώτα τείχη των Χανίων.

Φαίνεται όμως ότι και τα τείχη αυτά δεν προσέφεραν πλήρη ασφάλεια στην πόλη, επειδή ήταν χαμηλά και γι' αυτό αργότερα τροποποιήθηκαν. Αλλά και αυτές οι παρεμβάσεις ελάχιστα βελτίωσαν την αμυντική ικανότητα των Χανίων έως το 1536, όταν έφτασε στην πόλη ο μηχανικός των Ενετών Michel Sammicheli και εκπόνησε τα σχέδια για την κατασκευή νέων τειχών γύρω από τα παλιά.

Η κατασκευή των νέων τειχών άρχισε το 1536 και ολοκληρώθηκε σε 32 χρόνια. Τα τείχη, που είχαν σχήμα σχεδόν τετράγωνο, εκτείνονταν σε μια περίμετρο 3085 m, ενώ μια τάφρος μήκους 1942 m, βάθους 10 και πλάτους 50 m, εκτεινόταν παράλληλα με τα τείχη. Η κύρια όψη των οχυρώσεων οικοδομήθηκε με ορθογωνισμένους ψαμμίτες και άφθονο ασβεστοκονίαμα, που δημιουργούσε παχύ ακανόνιστο αρμό. Το τείχος είναι κτισμένο κατά πολύ παχύτερο στη βάση του, με τη χαρακτηριστική κλίση (scarpa), με σταδιακή μείωση του πάχους του μέχρι το σημείο που επιστέφεται από το

ημικυλινδρικό “κορδόνι”, πάνω στο οποίο στηρίζεται το κτιστό “θωράκιο” μικρού πάχους καλυμμένο από λευκό κονίαμα. Η εσωτερική πλευρά του τείχους ήταν κτισμένη από αργούς λίθους μέσα σε πλούσιο ασβεστοκονίαμα και παρουσιάζει μεγάλη συνοχή. Σε κάποια σημεία έχουν εντοπιστεί πυκνές, ορθογώνιες εσωτερικές αντηρίδες, που ενίσχυαν την αντοχή του τείχους και ήταν καλυμμένες από τα χρώματα των επιχωματώσεων. Ο εσωτερικός τοίχος, που συγκρατεί τις επιχωματώσεις προς την πλευρά της πόλης, ήταν κτισμένος από αργούς λίθους, με άφθονο ασβεστοκονίαμα περιορισμένης όμως αντοχής εξαιτίας της απουσίας ενίσχυσης με *scarpa*. Για το λόγο αυτό έχει καταστραφεί σε πολύ μεγάλη έκταση, ιδίως στην ανατολική πλευρά, ενώ σε πολλά σημεία παρουσιάζει απόκλιση. Για τις επιχωματώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα χρώματα από την επιτόπου εκσκαφή της τάφρου.

Επίσης, υπήρχαν 4 προμαχώνες στις γωνιές του τείχους, με έναν επιπρομαχώνα σε κάθε έναν από αυτούς.

1. Στη βορειοδυτική γωνία υπήρχε ο προμαχώνας *San Salvatore* ή *Venier* ή *Griti* με τον επιπρομαχώνα *Revelino San Salvatore*
2. Στη νοτιοδυτική γωνία υπήρχε ο προμαχώνας *Schiavo* ή *San Dimitrio* με τον επιπρομαχώνα *Lando*
3. Στη νοτιοανατολική γωνία υπήρχε ο προμαχώνας *Santa Lucia* με τον επιπρομαχώνα *Santa Lucia*
4. Στη βορειοανατολική γωνία υπήρχε ο προμαχώνας *Sabionera* ή *Monecigo* με τον επιπρομαχώνα *Revelino Michel*

Το Κάστρο των Χανίων, 15 χρόνια πριν από την άλωση του από τους Τούρκους, το 1630, είχε 319 κανόνια, 30695 μπάλες και 413,274 λίμπρες μπαρούτι. Παρά την ισχυρή αυτή οχύρωση, ο στρατηγός *Del Monte* το 1591 έκρινε ότι η πόλη ήταν ανίσχυρη και πρότεινε την εγκατάλειψη της και τη μεταφορά της στη θέση της αρχαίας Απτέρας, στον λόφο του Παλαιόκαστρου. Σύμφωνα με τον *Del Monte* οι αδυναμίες της οχύρωσης της πόλης ήταν οι πολύ οξείες γωνίες του τείχους που άφηναν ακάλυπτες πλευρές, οι στενές επιχωματώσεις και οι μικροί επιπρομαχώνες. Η πρόταση αυτή δεν έγινε ποτέ αποδεκτή. Οι Τούρκοι κατέλαβαν τα Χανιά στις 22 Αυγούστου 1645, ανοίγοντας ρήγμα στο τείχος, στο προμαχώνα *Shiavo*. Αμέσως αναστήλωσαν τα κατεστραμμένα τείχη και αργότερα τα ανακαίνισαν, τα εκσυγχρόνισαν και τα εφοδίασαν με όσες εγκαταστάσεις χρειαζόνταν.

Τα τείχη του κάστρου των Χανίων ήταν σε καλή κατάσταση μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, όταν άρχισαν να γκρεμίζονται για να πάρουν τη θέση τους σπίτια και πολυκατοικίες. Σήμερα δεν υπάρχει σχεδόν τίποτα από τη νότια πλευρά τους, ενώ κάποιος κάποιος μπορεί να δει μερικά τμήματά τους στη δυτική πλευρά τους (προμαχώνας *Shiavo*, επιπρομαχώνας *Lando*, προμαχώνας *San Salvatore* ή *Φιρκάς*).

Στις επεμβάσεις στα τείχη των Χανίων χρησιμοποιούνται μόνο οι παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής και η χρήση των κατάλληλων υλικών. Έτσι η αποκατάσταση της επένδυσης του τείχους γίνεται με υλικό από το αρχικό λατομείο, ενώ για την πλήρωση ανοιγμάτων στις επιφάνειες του τείχους έχει χρησιμοποιηθεί ισχυρή τοιχοποιία. Ανάλογες επεμβάσεις έχουν πραγματοποιηθεί στον ενετικό λιμενοβραχίονα και στο *Rivellino del Porto* (σήμερα γνωστό ως Φρούριο Φιρκά). Στόχος είναι η ανάκτηση όσο το δυνατό μεγαλύτερου μέρους των οχυρώσεων της πόλης με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ώστε να μη δημιουργείται πλαστή εικόνα. Παράλληλα προχωρούν σε ικανοποιητικό βαθμό και οι δαπανηρές ενέργειες απαλλοτρίωσης των τάφρων και άλλων σημείων. Η συνέχιση και εντατικοποίηση του έργου της αποκατάστασης του σημαντικού αυτού μνημείου είναι επιβεβλημένη. (Πηγή: www.cretanbeaches.com)

Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζεται το σημείο όπου έγινε η παρούσα γεωφυσική έρευνα. Η εφαρμογή των δύο μεθόδων έγινε σε οριζόντια γραμμή μελέτης 27 m και σε ύψος 1.7 m από το έδαφος.



Εικόνα 1.2: Η περιοχή της γεωφυσικής έρευνας – Ενετικά τείχη στη δυτική τάφρο των Χανίων

2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

2.1. Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

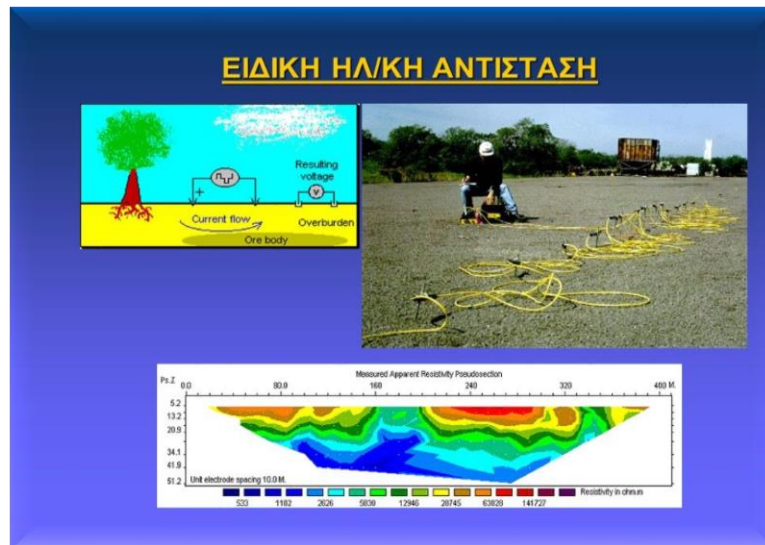
Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης, μέσω της μέτρησης διαφορών δυναμικού, ρευμάτων και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που υπάρχουν φυσικά ή εισάγονται τεχνητά στη γη, στοχεύουν στον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Άρα, ανιχνεύοντας φυσικά φαινόμενα που βασίζονται στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος, επιτυγχάνεται η χαρτογράφηση των οριζόντιων και κατακόρυφων διαφοροποιήσεων των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των στρωμάτων. Με την χαρτογράφηση αυτή δηλαδή, και εφόσον διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους συμβάλλει στην έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και άλλων δομών ενδιαφέροντος.

Στις ηλεκτρικές μεθόδους, οι ιδιότητες των ορυκτών και των πετρωμάτων που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ή το αντίστροφο της, η ηλεκτρική ειδική αντίσταση), το φυσικό ηλεκτρικό δυναμικό, η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική επιδεκτικότητα (έμμεσος παράγοντας). Ταυτόχρονα, διακρίνονται ανάλογα με την χρησιμοποίηση φυσικών ή τεχνητών πεδίων, σε παθητικές (Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού, Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος) και ενεργητικές μεθόδους (Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης, Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας και Μέθοδος των Ισοδυναμικών Γραμμών).

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται:

- Στη χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών
- Στον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση του φαινομένου της υφαλμύρωσης
- Στην κοιτασματολογία
- Στην τεκτονική
- Στην υδρογεωλογία
- Στην τεχνική γεωλογία (π.χ. απεικόνιση ζώνης αποσάθρωσης και υπόγειων έγκοιλων)
- Στη γεωθερμία, στη στρωματογραφία
- Στην αρχαιολογία (π.χ. εντοπισμός σχήματος και μεγέθους θαμμένων αντικειμένων και θεμελιώσεων ιστορικών κτηρίων, αποκάλυψη δομής και ρηγμάτων τοιχοποιιών)
- Σε παρακολούθηση διαρροών σε τεχνητές μεμβράνες στεγανότητας
- Παρακολούθηση περιοχών υγειονομικής ταφής και μετακίνηση μόλυνσης (μέχρι και 10 m βάθος)
- Εύρεση περιοχών ενδιαφέροντος (π.χ. κοιτάσματα κιμπερίτη)
- Ασφάλεια των εργαζομένων (π.χ. εύρεση ασυνεχειών σε γύψο, περιοχές πετρωμάτων χαμηλής αντοχής κ.α.).

Η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους, η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπου χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα έρευνα, βασίζεται στον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της λεγόμενης γεωηλεκτρικής δομής του με τη χρήση της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Μετρήσεις με μέθοδο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η κάτω εικόνα δείχνει μια ηλεκτρική τομογραφία

2.2. Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

2.2.1. Γενικά στοιχεία

Ο υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στηρίζεται στον νόμο του Ohm: Αν μια ορθογώνια ράβδος με διατομή A και μήκος L διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , η τάση V ανάμεσα στις άκρες της ράβδου θα είναι (σχήμα 2.1) :

$$V = IR \quad (2.1)$$

όπου R η ηλεκτρική αντίσταση (Ω) .

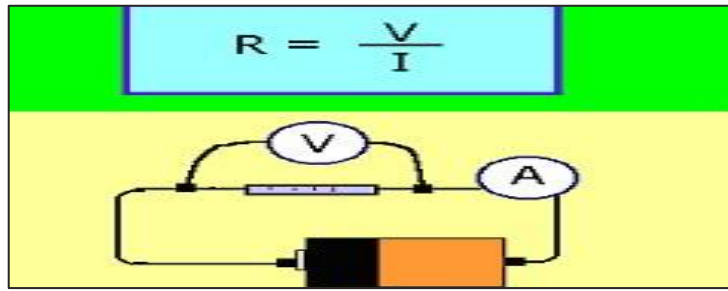
Επομένως ,

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{R}{AL} \quad (2.3)$$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, είναι το Ωm .



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρική αντίσταση

2.2.2. Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , καθώς και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma = 1/\rho$ είναι οι ηλεκτρικές ιδιότητες που καθορίζουν αν ένα πέτρωμα είναι καλός ή κακός αγωγός του ηλεκτρισμού. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα πετρώματα και τα ορυκτά αποτελούν κακούς αγωγούς του ηλεκτρισμού, συνεπώς έχουν υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα περισσότερα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα. Αντιθέτως, τα περισσότερα ιζηματογενή και τα μεταλλικά πετρώματα και ορυκτά αποτελούν καλούς αγωγούς.

Κατά κύριο λόγο, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ιζηματογενών, κυρίως, πετρωμάτων είναι το πορώδες και η περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα (ηλεκτρολυτική αγωγή). Η παρακάτω εμπειρική σχέση συνδέει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ των ιζηματογενών πετρωμάτων και το πορώδες ϕ :

$$\rho = \alpha \rho_n \phi^{-m} \quad (2.4)$$

όπου ρ_n η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος, α , m σταθερές (με τιμές κατά προσέγγιση 0,5-2,5 για το α και 1,3-2,5 για το m) και ϕ το πορώδες, δηλαδή λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος. Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως νόμος του Archie και δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.

Υπάρχουν, όμως, μερικοί ακόμα παράγοντες όπως η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων, η λιθολογία (δομή και πορώδες), η θερμοκρασία, το περιβάλλον απόθεσης (γλυκού ή αλμυρού νερού), καθώς και η ύπαρξη ή μη νερού εντός των πόρων, όπου επίσης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

Ο γενικός αυτός κανόνας δεν ισχύει πάντα και ιδιαίτερα για τα τριτογενή ιζήματα τα οποία έχοντας σχηματιστεί σε γλυκό νερό, κατά κύριο λόγο, έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωικά ιζήματα τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό. Αυτό συμβαίνει αφού, ως γνωστό, η περιεκτικότητα σε ιόντα παίζει αποφασιστικό ρόλο στη διέλευση του ρεύματος.

Συνοπτικά, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υδροφόρων και μη σχηματισμών ελαττώνεται με την αύξηση:

- της περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα του υπόγειου ύδατος
- της θερμοκρασίας (αύξηση της ευκινήσιας των ιόντων)
- του όγκου του νερού στο πέτρωμα

- της περιεκτικότητας σε αργίλους
- του βαθμού κορεσμού του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος
- της εξαλλοίωσης.
- της καρστικοποίησης

Σε διασκοπήσεις μικρού βάθους, το ηλεκτρικό ρεύμα άγεται στο έδαφος πρωτίστως από διαλυμένα άλατα, όπως το ανθρακικό ασβέστιο και το ανθρακικό νάτριο που υπάρχουν στο ίδιο έδαφος, κυρίως για αργιλώδη εδάφη, ή που προέρχονται από τα υποκείμενα γεωλογικά στρώματα, τα σύγχρονα γεωργικά λιπάσματα, τις βροχοπτώσεις ή διάφορες ανθρωπογενείς διαδικασίες. Επίσης, συγκεντρώσεις ριζών και κολλοειδών στο νερό επηρεάζουν την αγωγιμότητα.

Παρακάτω (πίνακας 2.1) παρουσιάζεται ένας πίνακας ενδεικτικών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης γνωστών πετρωμάτων.

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ωm)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Αργίλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
Συμπαγής δολομίτης	>104
Πορώδης δολομίτης	100-1000
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500
ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	102 –106

Πίνακας 2.1: Πίνακας ηλεκτρικών αντιστάσεων διαφόρων πετρωμάτων. (Πηγή: Βαφείδης, 2001)

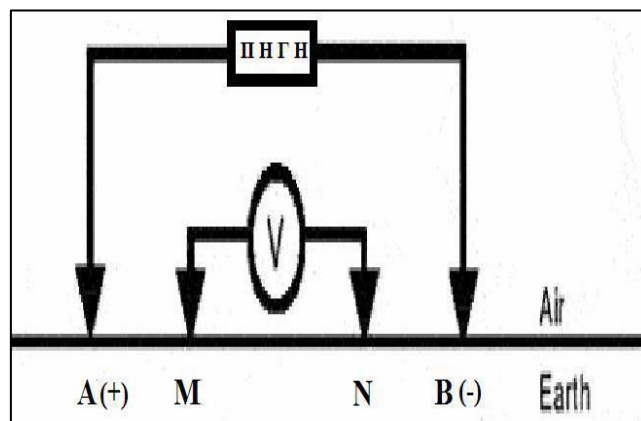
2.2.3. Μη ομογενές μέσο και φαινόμενη ειδική αντίσταση

Τα επιφανειακά στρώματα της γης λόγω της συνεχούς εναλλαγής υλικών δεν είναι ομογενή. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται. Η αντίσταση που εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται σε αυτά τα στρώματα ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Από δύο ηλεκτρόδια ρεύματος A,B διαβιβάζεται στο έδαφος ηλεκτρικό ρεύμα γνωστής έντασης I. Σε δύο άλλα ηλεκτρόδια M,N, τα οποία ονομάζονται ηλεκτρόδια δυναμικού, μετράται η διαφορά δυναμικού ΔV :

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (2.5)$$

Όπου, V_M το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο M, V_N το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο N, ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος και, τέλος, AM, BM, AN, BN οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Διαφορά δυναμικού

Από τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της διαφοράς δυναμικού υπολογίζουμε τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, της οποίας η τιμή εξαρτάται όχι μόνο από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων, αλλά και τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους (γεωηλεκτρική δομή).

2.2.4. Διατάξεις ηλεκτροδίων

Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στην ύπαιθρο είναι αρκετές. Η επιλογή της διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το μέγεθος των δομών που αναμένονται, την εκάστοτε περιοχή, τον απαραίτητο εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές επειδή ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα

της αντίστασης επαφής, δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στην θέση του ηλεκτροδίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο συνηθισμένες (σχήμα 2.3).

- Διάταξη **Wenner**: Σε αυτήν την περίπτωση, τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Ισχύει δηλαδή $AM = MN = NB = a$. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.6)$$

όπου ο γεωμετρικός συντελεστής ισούται με $2\pi a$.

- Διάταξη **Schlumberger**: Εδώ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του δυναμικού MN είναι πολύ μικρότερη της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος AB (ισχύει $MN/AB < 1/3$). Θεωρώντας ότι τα ηλεκτρόδια είναι συμμετρικά τοποθετημένα ως προς ένα σημείο X, η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I} \quad (2.7)$$

Η ποσότητα $\frac{\pi L^2}{2l}$ ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής

- Διάταξη **διπόλου – διπόλου**: Σε αυτή την περίπτωση, τα ηλεκτρόδια ρεύματος σχηματίζουν το δίπολο ρεύματος όπου το ανάπτυγμα παραμένει το ίδιο, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού σχηματίζουν το δίπολο δυναμικού με ανάπτυγμα a . Η απόσταση των διπόλων είναι na , όπου το n είναι ένας ακέραιος αριθμός. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

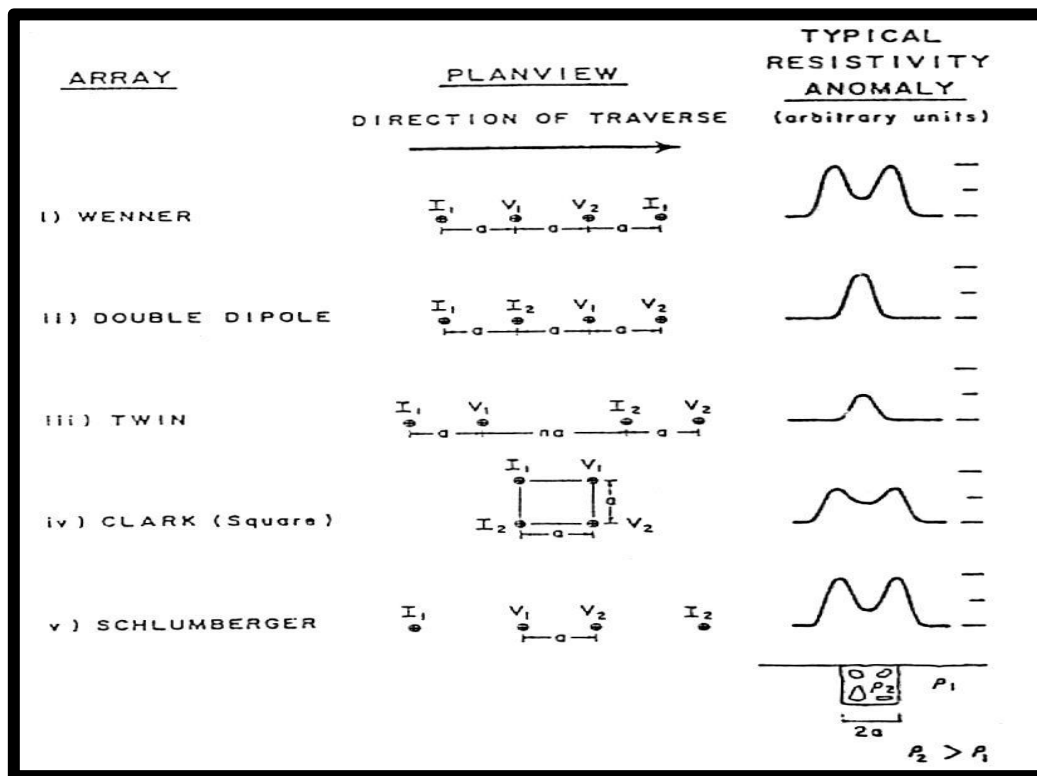
$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.8)$$

όπου $\pi n(n+1)(n+2)a$ είναι ο γεωμετρικός συντελεστής

- Διάταξη **Square**: Εδώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος διατάσσονται σε σχήμα τετραγώνου πλευράς a . Τα ηλεκτρόδια δυναμικού αντιστοιχούν στις κορυφές μιας ακμής του τετραγώνου, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού αντιστοιχούν στις κορυφές της απέναντι ακμής του τετραγώνου. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_a = \frac{(\Delta V/I)(\pi a\sqrt{2})}{(\sqrt{2}-1)} \quad (2.9)$$

- Διάταξη **διδύμου ζεύγους (Twin Array)**: Σε αυτή τη διάταξη, το ένα ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος-δυναμικού παραμένει σταθερό, ενώ το άλλο ζεύγος κινείται. Το ηλεκτρόδιο ρεύματος με το ηλεκτρόδιο δυναμικού έχουν απόσταση a και στα δύο ζεύγη, ενώ η απόσταση μεταξύ των ζευγών μπορεί να πάρει τιμές na , όπου n ακέραιος αριθμός (προτιμότερο $n > 30$)



Σχήμα 2.3: Διατάξεις ηλεκτροδίων. (Πηγή: Βαφείδης, 2001)

2.2.5. Ηλεκτρική τομογραφία – Πρόγραμμα RES2DINV

Η ηλεκτρική τομογραφία είναι η λεπτομερής απεικόνιση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους σε δύο ή τρεις διαστάσεις από τις μετρήσεις που πάρθηκαν με τις παραπάνω μεθόδους. Ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία ουσιαστικά απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, συνήθως σε οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση.

Επειδή ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος από τις μετρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους δεν είναι εύκολος, αρχικά υπολογίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a , όπως προαναφέρθηκε. Στη συνέχεια, η φαινόμενη αυτή ειδική ηλεκτρική αντίσταση χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, που είναι και η ζητούμενη. Ο καθορισμός αυτών των τιμών είναι δυνατός με τη χρήση αλγόριθμων αντιστροφής. Για να πετύχει αυτό το εγχείρημα είναι απαραίτητος ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων, καθώς η αντιστροφή αποτελεί ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss – Newton με εξομάλυνση, η οποία συμβάλλει στην αποφυγή ασταθών λύσεων και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

Όλες οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίστηκαν στο πεδίο συγκεντρώνονται σε μια δισδιάστατη τομή που ονομάζεται ψευδοτομή (σχήμα 2.4). Ισχύει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα των ηλεκτροδίων, τότε οι μετρούμενες αντιστάσεις αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάθη. Συνεπώς κάθε σημείο στην ψευδοτομή αντιστοιχεί στη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίστηκε κάτω από το κέντρο της ηλεκτροδιακής διάταξης σε βάθος ανάλογο με το άνοιγμα των ηλεκτροδίων.

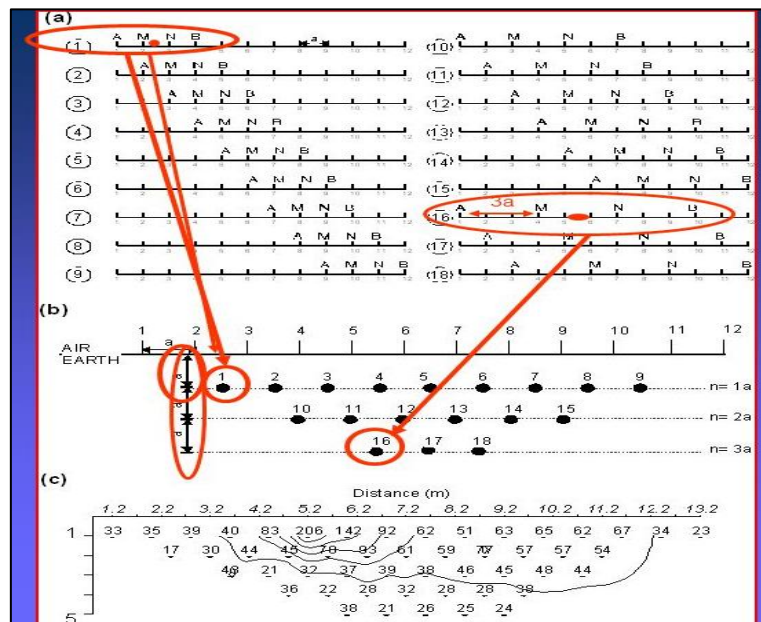
Στη συνέχεια, ακολουθεί η αντιστροφή των δεδομένων. Αναλυτικότερα, ξεκινώντας από αρχικό μοντέλο όπου εισάγεται μία κοινή θεωρητική τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (η τιμή αυτή μπορεί για παράδειγμα να είναι ο μέσος όρος των μετρημένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης), από τις οποίες υπολογίζονται οι θεωρητικές φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό μέσω μαθηματικών σχέσεων (υπολογισμένη ψευδοτομή). Οι θεωρητικές αυτές τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτουν από το μοντέλο, μαζί με τις πραγματικές μετρήσεις στο πεδίο έρευνας και τις παραμέτρους του μοντέλου καθορίζουν ένα σύστημα εξισώσεων. Ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής, όπου επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων με αγνώστους τις παραμέτρους του μοντέλου και υπολογίζεται με τη διαδικασία αυτή ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο.

Η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο τις φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τη σειρά τους με τις πραγματικές μετρήσεις. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο που να δίνει φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις όσο το δυνατό πιο κοντά στις μετρήσεις.

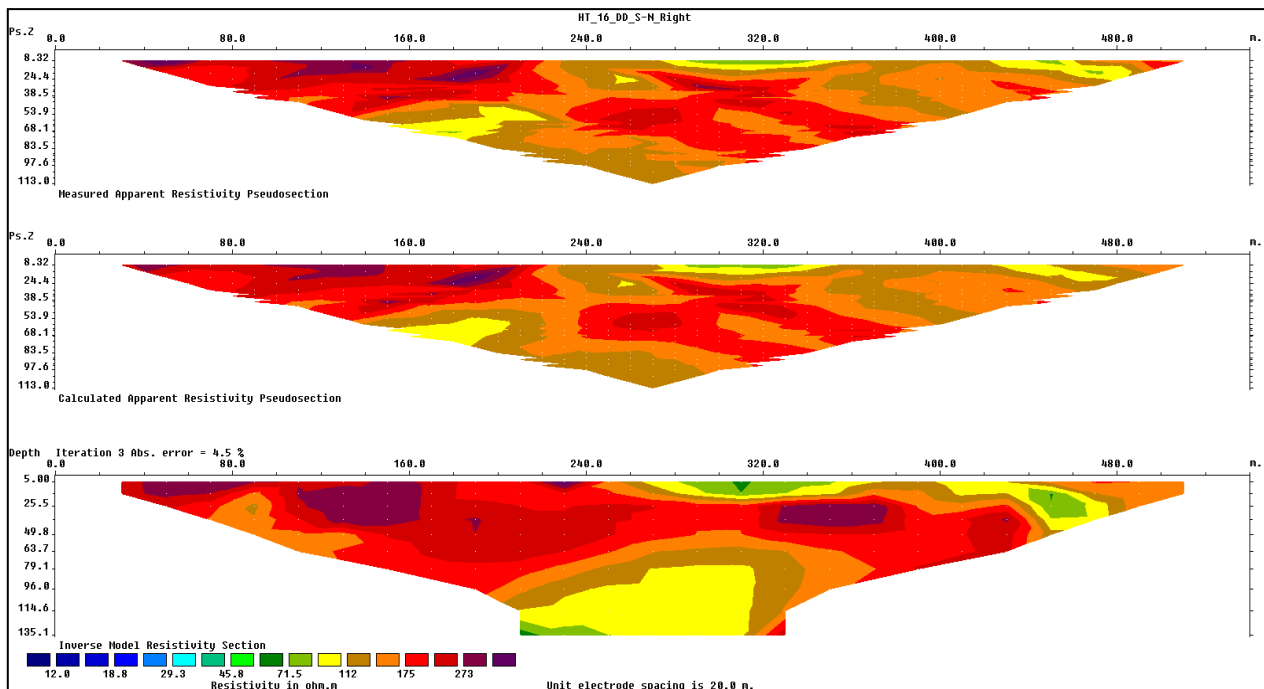
Το πρόγραμμα RES2DINV χρησιμοποιείται με στόχο τη δημιουργία δισδιάστατης απεικόνισης της κατανομής των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο πεδίο της έρευνας και, στην προκειμένη περίπτωση, στο εσωτερικό των ενετικών τειχών.

Η διαδικασία έχει ως εξής: Εισάγονται από το αρχείο dat. τα δεδομένα (μετρημένες φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις) και, αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία της αντιστροφής από το πρόγραμμα, εμφανίζονται στην οθόνη τρεις τομές (σχήμα 2.5). Η πρώτη τομή αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, η δεύτερη αποτελεί την ψευδοτομή των θεωρητικών υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ηλεκτρικής με βάση τα δεδομένα που εισήχθησαν και τις παραμέτρους του προγράμματος που ορίστηκαν. Η τρίτη τομή αποτελεί τη γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει μετά την αντιστροφή και απεικονίζει την κατανομή των πραγματικών τιμών των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στο πεδίο της έρευνας.

Το πρόγραμμα RES2DINV είναι κατασκευασμένο με σκοπό τον όσο το δυνατό πιο αυτόματο τρόπο λειτουργίας. Ο χρήστης μπορεί να καθοδηγήσει τη διαδικασία αντιστροφής ορίζοντας ένα σύνολο παραμέτρων προεπιλογής που διαθέτει το πρόγραμμα. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να απορρίψει μετρήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο σφάλμα, καθώς και να καθορίσει τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής. (Περισσότερες πληροφορίες: Res2dinv, 2001)



Σχήμα 2.4: Δημιουργία ψευδοτομής από μετρήσεις με τη διάταξη Wenner



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας-1) Ψευδοτομή δεδομένων φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης- 2) Ψευδοτομή υπολογισμένων τιμών φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης-3) Γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από αντιστροφή

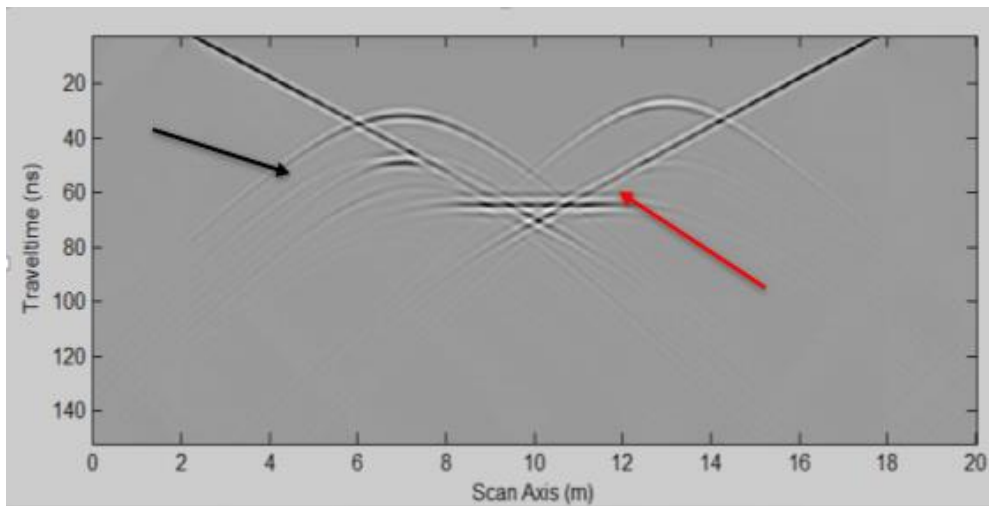
2.3. Αρχή λειτουργίας μεθόδου Γεωραντάρ

Η μέθοδος γεωραντάρ ανήκει στις Η/Μ μεθόδους διασκόπησης και εφαρμόζεται κυρίως στην έρευνα δομών μικρού βάθους (έως 20 m). Εκπέμπονται ραδιοκύματα εύρους συχνότητας από 1 έως 1200 MHz και η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Έχει υψηλή διακριτική ικανότητα που φτάνει τα μερικά εκατοστά του μέτρου. Η μέθοδος γεωραντάρ εφαρμόζεται:

- Σε μη καταστρεπτική εξέταση τσιμέντου και οπλισμένου σκυροδέματος (π.χ. ποιοτικοί έλεγχοι τσιμέντου, ανίχνευση φθοράς και ανομοιογενειών, εξέταση πάχους τσιμέντου κ.α.)
- Στην αρχαιολογία (π.χ. αποκάλυψη εσωτερικής δομής τοιχοποιιών, ανίχνευση ρωγμών, αποκάλυψη θεμελιώσεων ιστορικών κτισμάτων και υπολείμματα διαφόρων κατασκευών στο υπέδαφος)
- Χαρτογράφηση υπόγειων σωληνώσεων (π.χ. ύδρευσης, φυσικού αερίου κ.α.)
- Εξέταση οδοστρωμάτων (π.χ. Χαρτογράφηση ατελειών, πάχους ασφάλτου κ.α.)
- Γεωλογική χαρτογράφηση (π.χ. Αποκάλυψη της τοπογραφίας των πετρωμάτων, χαρτογράφηση βυθού ποταμών και λιμνών, αποκάλυψη υπόγειων νερών και κοιλοτήτων)
- Ορυχεία (π.χ. ανίχνευση πετρωμάτων, κοιλοτήτων και άλλων ανομοιογενειών)

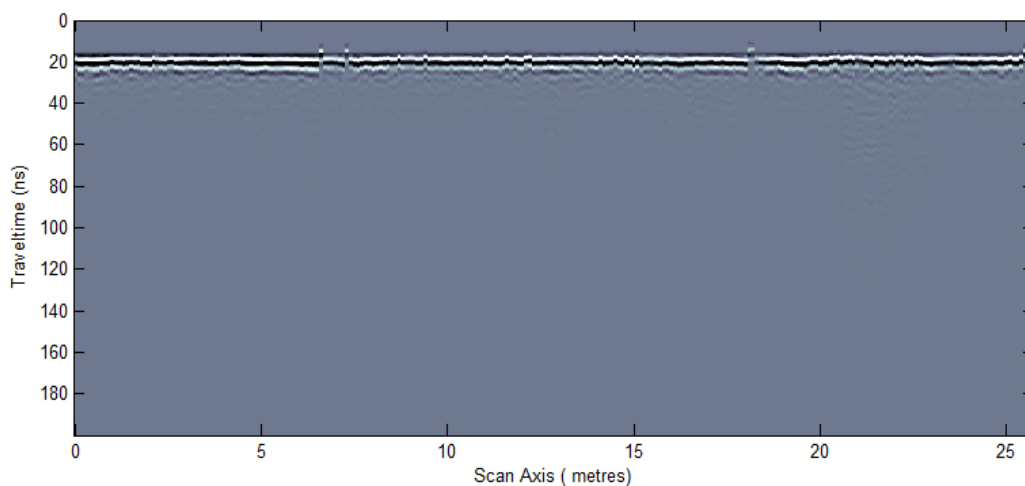
Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι απλή: Το σύστημα του γεωραντάρ αποτελείται από μία κεραία πομπό και μία κεραία δέκτη Η/Μ κυμάτων. Βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα η εκπομπή και η λήψη να γίνεται από την ίδια κεραία. Η κεραία πομπός βρίσκεται σε επαφή με το υπό μελέτη σώμα εκπέμποντας Η/Μ παλμό προς αυτό. Ο παλμός αυτός μικρής διάρκειας (μερικά ns) ταξιδεύει στο υλικό ή το έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες (διεπιφάνεια). Τότε ένα μέρος ανακλάται προς την επιφάνεια και επιστέφει στην κεραία του δέκτη του παλμού (ανακλώμενα κύματα) και ένα μέρος διαδίδεται στο δεύτερο υλικό ή στρώμα του εδάφους. Το σήμα του ανακλώμενου κύματος που λαμβάνει ο δέκτης προωθείται στην μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται το πλάτος του κύματος και ο διπλός χρόνος διαδρομής του. Η διάδοση του παλμού στο υπέδαφος καθορίζεται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης και τη συχνότητας εκπομπής της κεραίας.

Μαζί με τα ανακλώμενα κύματα φθάνουν στο δέκτη και κάποια άλλα κύματα που ονομάζονται περιθλώμενα (σχήμα 2.6). Τα κύματα αυτά προκύπτουν από τη συμβολή διαφορετικών ανακλώμενων κυμάτων που συμβαίνει στη διεπιφάνεια δύο διαφορετικών υλικών εντός του εδάφους ή του υπό μελέτη σώματος, στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφορετικών εδαφικών στρωμάτων ή σε κάποια ασυνέχεια. Τα περιθλώμενα κύματα διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις και εμφανίζονται σε μια τομή με μορφή υπερβολής. Τα ανακλώμενα και τα περιθλώμενα κύματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή συμπερασμάτων, όπως θα δούμε παρακάτω.



Σχήμα 2.6: Εμφάνιση περιθλώμενων (μύαυρο βελάκι) και ανακλώμενων (κόκκινο βελάκι) κυμάτων σε μια τομή. (Πηγή: Τζάνης, 2010)

Εκτός από τα ανακλώμενα και τα περιθλώμενα, η κεραία του δέκτη λαμβάνει και τα απευθείας κύματα ή πρώτες αφίξεις (σχήμα 2.7). Τα απευθείας κύματα χωρίζονται σε δύο είδη: εκείνα που διαδίδονται στον αέρα και εκείνα που διαδίδονται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Τα απευθείας κύματα του αέρα καταφθάνουν πρώτα στον δέκτη, ενώ ακολουθούν τα απευθείας του εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα πρακτικά διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα στον αέρα από ότι σε ένα γεωλογικό σχηματισμό.



Σχήμα 2.7: Απεικόνιση απ' ευθείας κυμάτων (ασπρόμαυρες γραμμές) σε τομή- Μεταξύ αυτών βρίσκονται, επίσης, ανακλώμενα και περιθλώμενα κύματα, όπου χρειάζεται επεξεργασία της τομής για να φανούν πιο καθαρά

Όλα τα απευθείας κύματα καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη σε πολύ μικρούς χρόνους και πριν από όλα τα ανακλώμενα και περιθλώμενα κύματα, εξαιτίας της μικρής διαδρομής που διανύουν, καθώς διαδίδονται από τον πομπό στον δέκτη χωρίς να ανακλαστούν στη διεπιφάνεια κάποιου δεύτερου υλικού ή στρώματος εδάφους. Τα πλάτη αυτών των κυμάτων είναι μεγάλα στις καταγραφές, ενώ έχουν μικρές ενεργειακές απώλειες.

Όταν η απόσταση των κεραιών πομπού – δέκτη υπερβεί μία κρίσιμη τιμή X_c (π.χ. σε μία διασκόπηση κοινού ενδιαμέσου σημείου) τότε ο δέκτης κατοπτρεύει και τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα. Τα κύματα αυτά ανακλώνται στην πρώτη διεπιφάνεια που θα συναντήσουν, διαθλώνται στην επιφάνεια του εδάφους και τελικά διαδίδονται στον αέρα. Η διάθλαση των κυμάτων αυτών στην επιφάνεια του εδάφους προϋποθέτει ότι η γωνία πρόσπτωσης του ανακλώμενου κύματος είναι ίση με την ορική γωνία φ_c . Άρα λοιπόν τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα διαδίδονται εν μέρει στο έδαφος και εν μέρει στον αέρα (με ταχύτητα διάδοσης του φωτός). Συνεπώς, καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη πριν από τα απευθείας κύματα του εδάφους και μετά από τα απευθείας κύματα του αέρα.

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

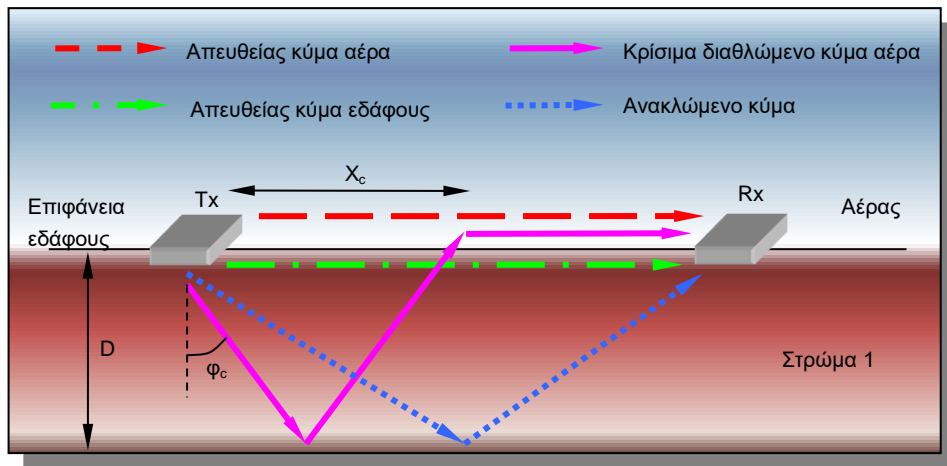
$$t_r = \frac{(4D_r^2 + X^2)^{1/2}}{v} \Leftrightarrow t_r^2 = \frac{4D_r^2}{v^2} + \frac{X^2}{v^2} \quad (2.10)$$

που δίνει

$$D_r = \frac{[(t_r v)^2 - X^2]^{1/2}}{2} \quad (2.11)$$

όπου X είναι η απόσταση πομπού – δέκτη, D_r το βάθος της επιφάνειας ανάκλασης και v η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο διάδοσης. Το βάθος d του ανακλαστήρα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί εφόσον είναι γνωστός ο χρόνος διπλής διαδρομής t_r και η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος v στο μέσο διάδοσης από τη σχέση

$$d = \frac{t_r \cdot v}{2} \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.8: Εκπομπή, μετάδοση και λήψη η/μ κυμάτων. Tx η κεραία πομπός και Rx η κεραία δέκτης. (Πηγή: Βαφειδής, 2001).

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν σε υλικό με καθορισμένη ταχύτητα που εξαρτάται από την ηλεκτρική διαπερατότητα (ο όρος αναφέρεται και ως διηλεκτρική σταθερά) του υλικού. Έτσι ένας παλμός που διαδίδεται μέσα από δύο διαφορετικά υλικά ενός σώματος θα αφιχθεί στον ανιχνευτή σε διαφορετικούς χρόνους. Η ταχύτητα διάδοσης του παλμού είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.13)$$

όπου v , η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, c , η ταχύτητα του φωτός και ϵ_r , η σχετική διαπερατότητα (σχετική διηλεκτρική σταθερά) του υλικού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται σημαντικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες διάφορων υλικών.

Υλικό	Σχετική διαπερατότητα	Ταχύτητες παλμού (m/ns)	Αγωγιμότητα (mS/m)
Αέρας	1	0.3	0
Φρέσκο νερό	81	0.033	0.10-30
Θαλασσινό νερό	70	0.033	400
Άμμος(ξηρή)	4-6	0.15-0.12	0.0001-1
Άμμος(κορεσμένη)	25	0.0055	0.1-1
Γλύς(κορεσμένη)	10	0.095	1-10
Πηλός(κορεσμένος)	8-12	0.106-0.087	100-1000
Ξηρή αμμώδης παραθαλάσσια γη	10	0.095	2
Πάγος από φρέσκο νερό	4	0.15	0.1-10
Πάγος από θαλασσινό νερό	4-12	0.15-0.087	
Μόνιμο στρώμα πάγου	4-8	0.15-0.106	0.01-10
Γρανίτης(ξηρός)	5	0.134	0.00001
Ασβεστόλιθος (ξηρός)	7-9	0.113-0.1	0.000001
Δολομίτης	6-8	0.122-0.106	
Χαλσιζιάς	4	0.15	
Κάρβουνο	4-5	0.15-0.134	
Τσιμέντο	5-10	0.134-0.095	
Ασφαλτός	3-5	0.173-0.134	

Πίνακας 2.2: Πίνακας ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών

2.3.1. Εξασθένιση Η/Μ κυμάτων

Η εξασθένιση και οι ενεργειακές απώλειες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι δύο σημαντικές έννοιες για τις Η/Μ μεθόδους. Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα της μεθόδου γεωραντάρ, καθώς καθορίζει το βάθος διασκόπησης. Η γεωμετρία διάδοσης, η συχνότητα εκπομπής και οι ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες στην εξασθένιση αυτή.

Οι ενεργειακές απώλειες οφείλονται στην πορεία που κάνει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από τη στιγμή και εκπομπής και έπειτα. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες ενέργειας αυξάνονται όσο μεγαλύτερη απόσταση διανύει το κύμα, από τις διεπιφάνειες που συναντάει λόγω ασυνεχειών ή αλλαγής μέσου διάδοσης, καθώς και από τη διεύρυνση της επιφάνειας του μετώπου του κύματος.

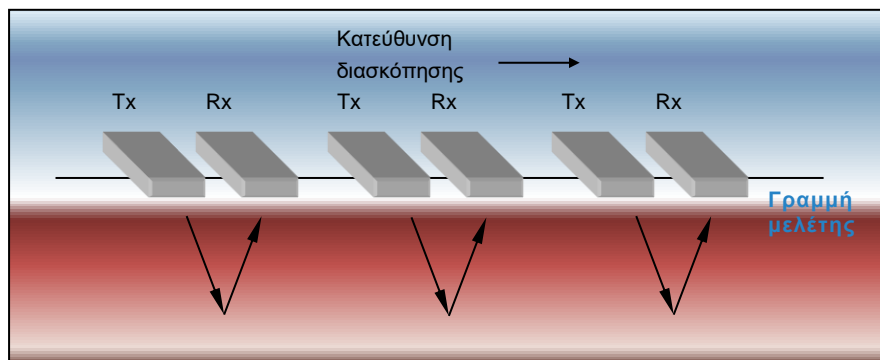
Σε γενικές γραμμές, υψηλές συχνότητες εκπομπής αυξάνουν την εξασθένιση. Οι συνέπειες της ηλεκτρομαγνητικής εξασθένισης είναι η μείωση του πλάτους κύματος, η μείωση της κεντρικής συχνότητας που λαμβάνεται από το δέκτη και η μείωση του βάθους διασκόπησης.

2.3.2. Μέθοδοι διασκόπησης

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις πομπού-δέκτη με τις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος γεωραντάρ. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές είναι:

➤ Η μέθοδος της ανάκλασης

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος και εφαρμόζεται κυρίως σε χαρτογραφήσεις γεωλογικών στρωμάτων. Οι κεραίες του πομπού και του δέκτη διατηρούν συγκεκριμένο προσανατολισμό και σταθερή απόσταση, καθώς κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης (σχήμα 2.9).

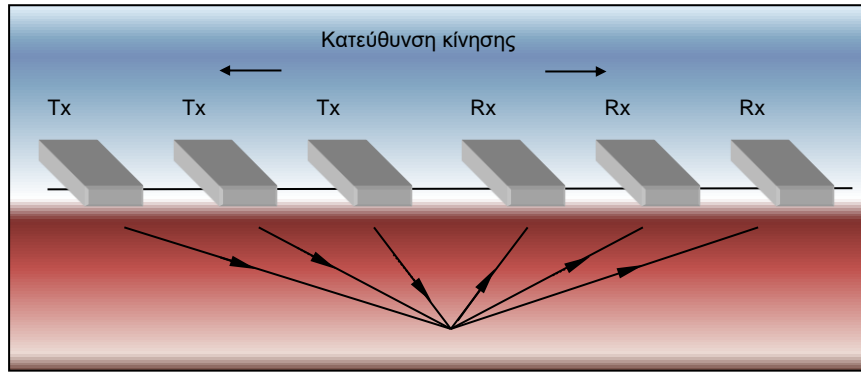


Σχήμα 2.9: Διασκόπηση με την μέθοδο της ανάκλασης όπου Tx είναι η κεραία του πομπού και Rx του δέκτη. (Πηγή: Βαφείδης, 2001)

➤ Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου.

Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση του βάθους. Για το λόγο αυτό οι δύο κεραίες απομακρύνονται από σταθερό σημείο κατά μήκος της γραμμής μελέτης και καταγράφεται ο διπλός χρόνος διαδρομής των κυμάτων για τον ίδιο ανακλαστήρα (σχήμα 2.10). Η βέλτιστη διάταξη των κεραιών θέλει τα ηλεκτρικά πεδία τους παράλληλα, ενώ κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου.

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



Σχήμα 2.10: Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου όπου Tx είναι η κεραία του πομπού και Rx του δέκτη. (Πηγή: Βαφείδης, 2001).

➤ **Η μέθοδος της τομογραφίας.**

Η μέθοδος αυτή δεν στηρίζεται στην ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως οι προηγούμενες, αλλά στη διέλευση του μέσα από την μάζα του υλικού μελέτης. Για να μελετηθούν οι ιδιότητες του υλικού οι κεραίες τοποθετούνται στις δύο απέναντι πλευρές του με τρόπο τέτοιο, ώστε να αντικρίζει η μία την άλλη. Η μελέτη των διερχόμενων κυμάτων μέσα από την μάζα του υλικού μελέτης θα δώσει πληροφορίες για μεταβολές της δομής του υλικού.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1. Επεξεργασία καταγραφών γεωραντάρ

Η ερμηνεία των δεδομένων που συλλέγονται στο πεδίο είναι αρκετά δύσκολη, καθώς τα δεδομένα αυτά περιέχουν παράσιτα, θόρυβο και πολλαπλές ανακλάσεις. Επιπλέον, υπάρχει πιθανότητα τα ακατέργαστα αυτά δεδομένα να μην απεικονίζουν σωστά την κλίμακα του βάθους. Αυτά τα προβλήματα αντιμετωπίζονται μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων.

Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με διάφορα προγράμματα που υπάρχουν στο εμπόριο που λειτουργούν αποκλειστικά σε ψηφιακή μορφή. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων MATGPR. Το πρόγραμμα αυτό διαθέτει ένα μεγάλο εύρος μεθόδων επεξεργασίας. Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένες από αυτές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και στην επεξεργασία των τομών της παρούσας εργασίας. (Για περισσότερες πληροφορίες: Τζάνης, 2010)

➤ **Image colours**

Μέσω αυτής της επιλογής υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των χρωμάτων που θα εμφανίζονται στην τομή. Αυτό γίνεται με στόχο την καλύτερη απεικόνιση των δεδομένων της τομής.

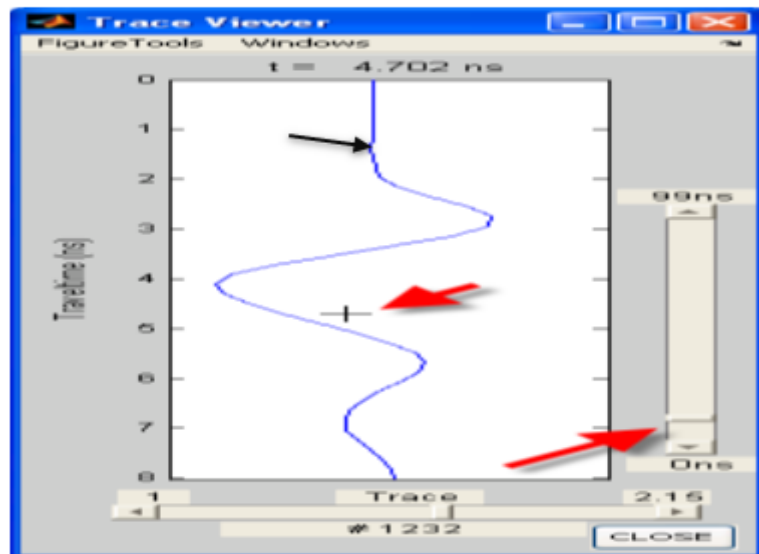
➤ **Φίλτρο Dewow**

Η εκπομπή του παλμού από την κεραία του γεωραντάρ μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία σημάτων χαμηλών συχνοτήτων που δεν διαδίδονται αλλά διαχέονται στο έδαφος και υπερτίθενται στα σήματα ανάκλασης υψηλών συχνοτήτων. Το πλήθος των σημάτων χαμηλών συχνοτήτων και ο τρόπος που εμφανίζονται στα δεδομένα εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και την απόσταση των κεραιών. Το φίλτρο Dewow πρόκειται για ένα φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (highpass filter). Η εφαρμογή του φίλτρου επιτρέπει την διέλευση του φάσματος ακτινοβολίας συγκεκριμένης κεντρικής συχνότητας εκπομπής με μεγάλη πιστότητα, ενώ αντίθετα απαγορεύει την διέλευση σημάτων χαμηλών συχνοτήτων. Η λειτουργία του φίλτρου στηρίζεται στη δημιουργία νοητού παραθύρου σε κάθε σημείο του ίχνους. Κατόπιν, υπολογίζεται η μέση τιμή των σημείων που ανήκουν στο παράθυρο η οποία αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου. Στη συνέχεια το παράθυρο μετατοπίζεται κατά ένα σημείο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

➤ **Adjust Signal Position**

Αυτή η επιλογή επιτρέπει τον έλεγχο της κατακόρυφης θέσης της αντανάκλασης της επιφάνειας, δηλαδή της χρονικής στιγμής όπου ο παλμός ραντάρ εγκαταλείπει την κεραία και εισέρχεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή του σώματος. Επομένως, αυτή η χρονική στιγμή μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ο "χρόνος μηδέν" και η θέση του πρέπει να βρίσκεται στην κορυφή του χρονικού πλαισίου στην τομή. Τα σύγχρονα συστήματα GPR παρέχονται συνήθως με ενσωματωμένες βοηθητικές εφαρμογές, χειροκίνητα ή αυτόματα, για να αναγνωρίζουν την αντανάκλαση της επιφάνειας και να το τοποθετούν σωστά στην κορυφή του χρονικού πλαισίου. Πολύ συχνά, το σύστημα επεμβαίνει, αφήνοντας μια επίπεδη ζώνη δεδομένων στην κορυφή του ίχνους (χωρίς σήμα).

Η μεγάλη αντανάκλαση ακριβώς κάτω από αυτήν την επίπεδη ζώνη δεδομένων είναι η αντανάκλαση της επιφάνειας της γης. Η σωστή τοποθέτηση του μηδενικού χρόνου είναι απαραίτητη, αλλιώς η θέση των ανακλαστήρων μπορεί να προσδιοριστεί εσφαλμένα. Το MATGPR παρέχει τον γραφικό προσδιορισμό και τη ρύθμιση του μηδενικού χρόνου χρησιμοποιώντας το βοηθητικό πρόγραμμα "Trace Viewer" (σχήμα 3.1)



Σχήμα 3.1: Το βοηθητικό πρόγραμμα "Trace Viewer"- Το μαύρο βελάκι δείχνει πού πρέπει να γίνει η τοποθέτηση της κορυφής του χρονικού πλαισίου. Η εικόνα αποτελεί τυχαίο παράδειγμα. (Πηγή: Τζάνης, 2010)

➤ Trim time window

Αυτή η επιλογή μειώνει το μέγεθος του πίνακα δεδομένων GPR απορρίπτοντας τις καθυστερημένες αφίξεις. Πολύ συχνά τα μεταγενέστερα μέρη των ιχνών περιέχουν μόνο άχρηστο θόρυβο που καταλαμβάνει πολύτιμη μνήμη. Αυτή η επιλογή είναι επίσης χρήσιμη όταν κάποιος επιθυμεί να εξάγει ένα συγκεκριμένο μέρος των δεδομένων για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό. Πρέπει να επιλεγθεί ο χρόνος διακοπής κατά τον οποίο θα αφαιρεθεί το χρονικό παράθυρο (τα δεδομένα μετά από αυτή τη χρονική στιγμή ώρα θα απορριφθούν).

➤ Inverse amplitude decay

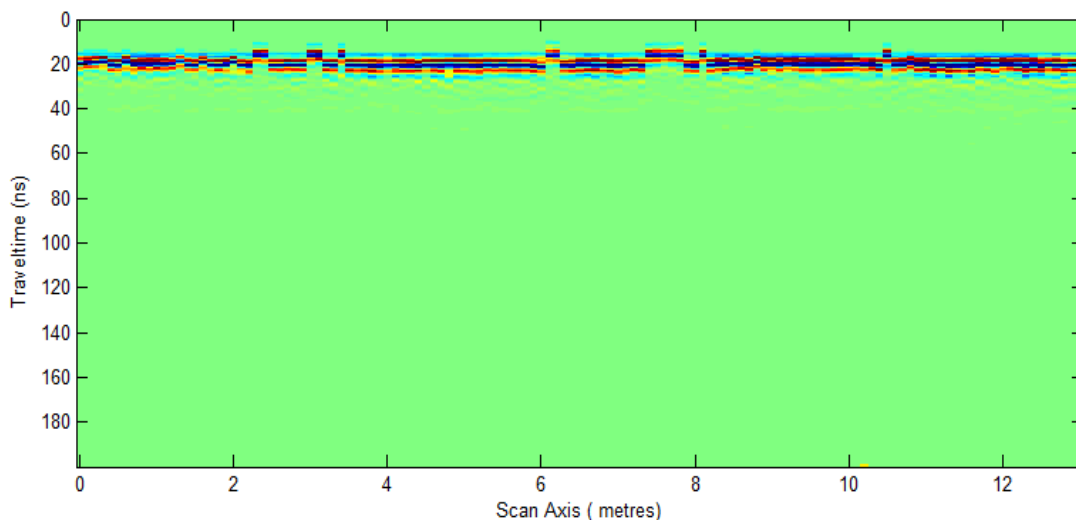
Η επιλογή αυτή αντισταθμίζει την κύρια ή τη μέση εξασθένηση πλάτους που παρατηρείται σε μια τομή GPR δύο διαστάσεων.

➤ Remove global background

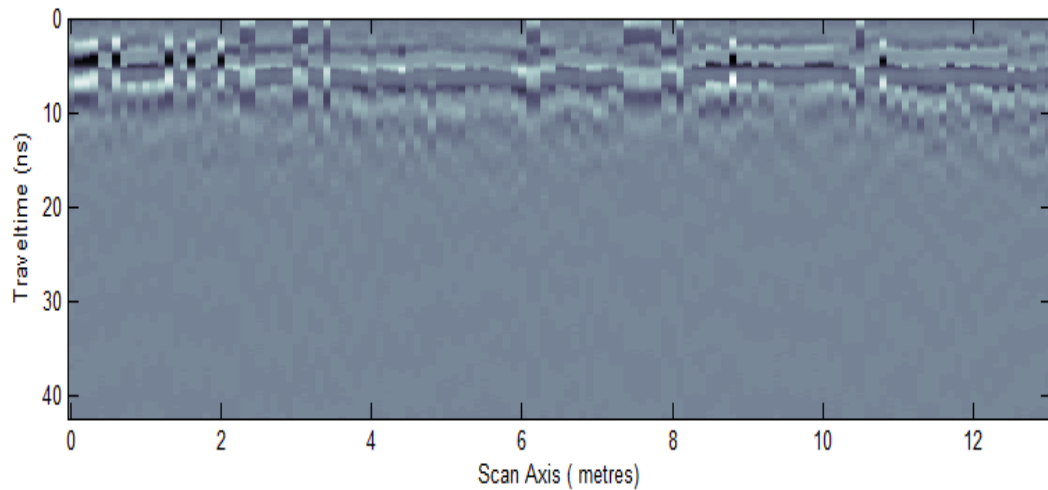
Το φίλτρο αυτό απομακρύνει το μέσο ίχνος από τα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή ενισχύει το σήμα και μειώνει τον θόρυβο. Ωστόσο, πρέπει να επιδεικνύεται προσοχή σε μικρά σύνολα δεδομένων (λιγότερα από περίπου 1000 ίχνη) ή δεδομένα που έχουν ισχυρούς φυσικούς οριζόντιους ανακλαστήρες.

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τομής χωρίς να έχει υποστεί επεξεργασία. Παρατηρούμε ότι στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται το μήκος της γραμμής μελέτης στην οποία έγιναν οι μετρήσεις (Scan Axis), ενώ στον κάθετο άξονα ο βρίσκεται ο χρόνος διαδρομής του παλμού (Traveltime). Στο σχήμα 3.3 η οριζόντια τομή έχει υποστεί επεξεργασία dewow, trim time στα 40 ns (κάθετος άξονας-traveltime), adjust signal position στα 14.2 ns, inverse amplitude decay και remove global background.

Φυσικά, σε κάθε επεξεργασία και σε κάθε βήμα υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης για περαιτέρω επεξεργασία στο μέλλον.



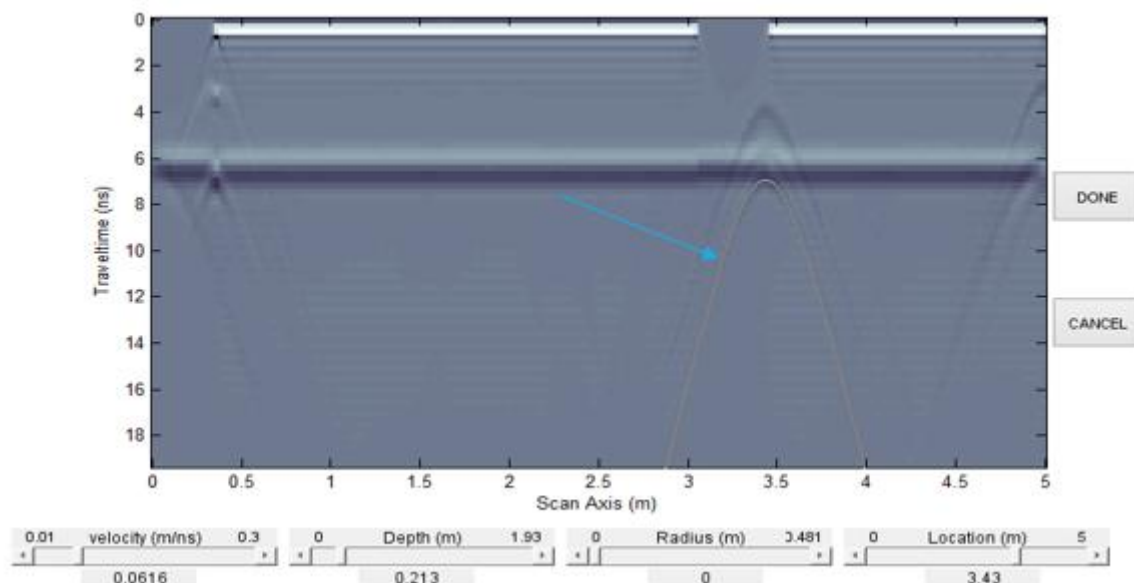
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα τομής χωρίς επεξεργασία.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα της τομής 3.3 έχοντας υποστεί επεξεργασία.

➤ Ανάλυση ταχυτήτων – Fit Diffraction Hyperbola

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας των περιθλώμενων κυμάτων πραγματοποιείται με την βοήθεια του εργαλείου Fit Diffraction Hyperbola που διαθέτει το MATGPR. Το εργαλείο αυτό επιτρέπει στο χρήστη την προσαρμογή της καμπύλης υπερβολικού τύπου σε περιθλώμενο κύμα στην τομή για την εκτίμηση της ταχύτητάς, καθώς, επίσης, το βάθος από το οποίο προέρχεται και την τοποθεσία (σχήμα 3.4)



Σχήμα 3.4: Εφαρμογή Fit Diffraction Hyperbola σε τομή. Το βελάκι δείχνει την προσαρμοσμένη υπερβολή σε ένα περιθλώμενο κύμα και στο κάτω μέρος της εικόνας οι παράμετροι που εμφανίζονται (ταχύτητα, βάθος, τοποθεσία)

3.2. Δημιουργία συνθετικών δεδομένων γεωραντάρ

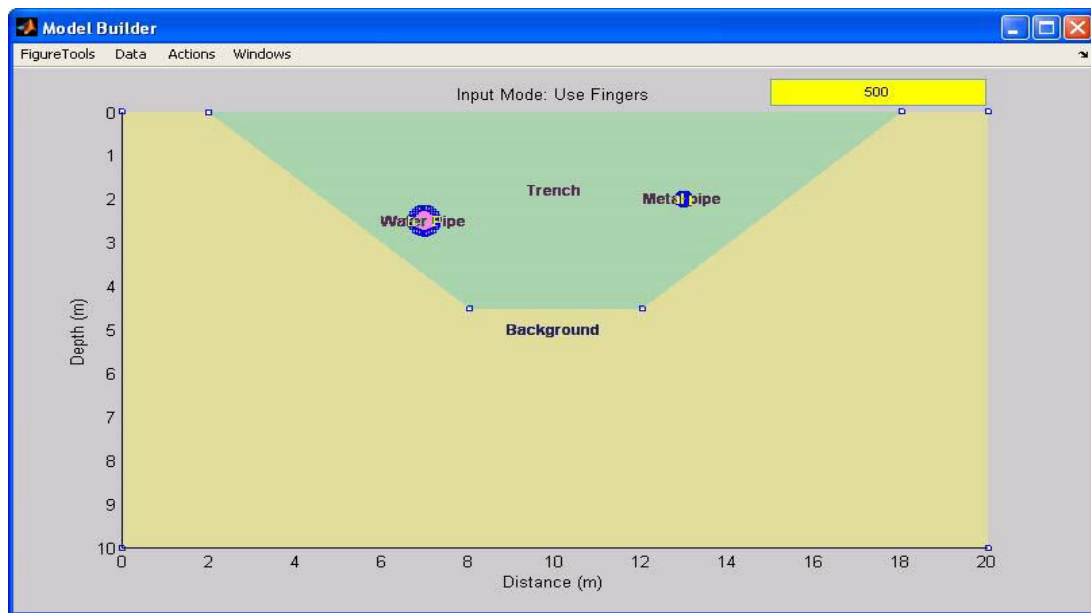
Η ερμηνεία των δεδομένων που προκύπτουν από τις μετρήσεις με τη μέθοδο γεωραντάρ αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία. Εκτός από την αναγκαία επεξεργασία τους, όπως προαναφέρθηκε, σημαντική διευκόλυνση στην κατανόηση των δεδομένων και στη σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων παρέχει η δημιουργία συνθετικών δεδομένων γεωραντάρ με τη χρήση μοντέλων των υπό μελέτη σωμάτων ή εδαφών. Οι συνθετικές τομές δημιουργούνται με σκοπό να συγκριθούν με τις τομές των πραγματικών δεδομένων για πληρέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων και καλύτερη ερμηνεία αυτών.

3.2.1. Δημιουργία μοντέλου Build 2-D Model

Το MATGPR προσφέρει το βοηθητικό πρόγραμμα GUI (Build 2-D Model) για την κατασκευή μοντέλων δύο διαστάσεων. Το πρόγραμμα αυτό, περιλαμβάνοντας ένα σύνολο αντικειμένων με πολυγωνικές ή κυκλικές διατομές, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει αντικείμενα προσομοιώνοντας το υπό μελέτη σώμα ή περιοχή. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να αλληλεπικαλύπτονται και η σειρά με την οποία εισάγονται στο μοντέλο καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα εμφανιστούν.

Η διαδικασία για τη δημιουργία μοντέλου μέσω του MATGPR έχει ως εξής: Αρχικά το πρόγραμμα ζητάει από το χρήστη να ορίσει τις διαστάσεις του μοντέλου και πιο συγκεκριμένα το αριστερό και δεξί όριο του οριζώντιου άξονα που δείχνει την απόσταση, καθώς και το βάθος (κατακόρυφος άξονας). Έπειτα ζητάει τη συχνότητα στην κεραία πομπό H/M κυμάτων και στη συνέχεια την ειδική ηλεκτρική αντίσταση, τη σχετική διηλεκτρική σταθερά και τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υπόβαθρου. Από τη δοθείσα ειδική ηλεκτρική αντίσταση, το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.13) υπολογίζει την ταχύτητα φάσης στο υπόβαθρο και ζητάει επιβεβαίωση για την τιμή αυτή από το χρήστη.

Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολυγωνικά ή/και κυκλικά αντικείμενα σε οποιοδήποτε σημείο του υπόβαθρου επιθυμεί, δημιουργώντας έτσι ένα συνθετικό μοντέλο (σχήμα 3.5). Για κάθε αντικείμενο μπορεί ο χρήστης να ορίσει διαφορετικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς και της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας και, συνεπώς, διαφορετική ταχύτητα διάδοσης H/M κυμάτων. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των παραπάνω παραμέτρων ή διαγραφής κάποιου αντικειμένου οποιαδήποτε στιγμή.



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα δημιουργίας κατασκευαστικού μοντέλου. (Πηγή: Τζάνης, 2010)

3.2.2. Split-step 2-D Modelling

Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιεί υπολογισμούς παραμέτρων σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα λαμβάνει ως δεδομένο ότι το H/M κύμα διαδίδεται κάθετα προς το εσωτερικό της γης, ενώ στο δεύτερο βήμα διορθώνει το κυματικό πεδίο του πρώτου βήματος λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι το H/M κύμα διαδίδεται και πλευρικά.

Μέσω αυτής της επιλογής, εισάγοντας ένα κατασκευαστικό μοντέλο, όπως αυτό στο σχήμα 3.5, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας συνθετικής τομής από το πρόγραμμα κάνοντας αυτόματα υπολογισμούς βασισμένους στις παραμέτρους του συνθετικού μοντέλου που δόθηκαν κατά τη δημιουργία του. Πιο συγκεκριμένα, αφού εισάγει το μοντέλο και με βάση το εύρος των ταχυτήτων που θα υπολογίσει από τις ιδιότητες των στοιχείων του, θα προτείνει στο χρήστη να επιλέξει χαμηλή, μεσαία ή υψηλή ανάλυση για τη συνθετική τομή. Επίσης, προσφέρει την επιλογή προσαρμογής της συνθετικής τομής για συγκεκριμένες απαιτήσεις (π.χ. προσομοίωση των παρατηρούμενων δεδομένων).

Όσον αφορά την επιλογή της ανάλυσης από το χρήστη, αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Η εμπειρία δείχνει ότι η συνθετική τομή υψηλής ανάλυσης δεν είναι, απαραίτητως, η καλύτερη επιλογή, καθώς απαιτεί συνήθως σημαντικό χρόνο επεξεργασίας. Παρουσιάζει, ωστόσο, το ελάχιστο ποσοστό αλλοιώσεων. Η συνθετική τομή χαμηλής ανάλυσης υπολογίζεται γρήγορα και είναι συχνά αποδεκτή, αλλά εμφανίζει περιστασιακά αλλοιώσεις ανάλογα με το μοντέλο. Προτιμάται για την ταχεία αξιολόγηση των δεδομένων. Η τομή μέσης ανάλυσης είναι, επίσης, μια καλή επιλογή και μπορεί να αποκατασταθεί με ασφάλεια (μέσω προσαρμογής), εξοικονομώντας έτσι πολύ χώρο αποθήκευσης και χρόνο υπολογισμού.

3.2.3. FDTD (Finite Differences Time Domain) 2-D Modelling

Το πρόγραμμα αυτό επιλύει την κυματική εξίσωση που περιγράφει τη διάδοση H/M κυμάτων με τη χρήση των πεπερασμένων διαφορών στο χώρο των χρόνων. Λειτουργεί ως εξής: Αρχικά, αφού εισαχθεί το μοντέλο, ζητάει από το χρήστη να διατηρήσει ή να αλλάξει την κεντρική συχνότητα της κεραίας πομπού. Έπειτα, χρησιμοποιεί μία ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης για τη διακριτοποίηση του μοντέλου με βάση κάποιους συσχετισμούς.

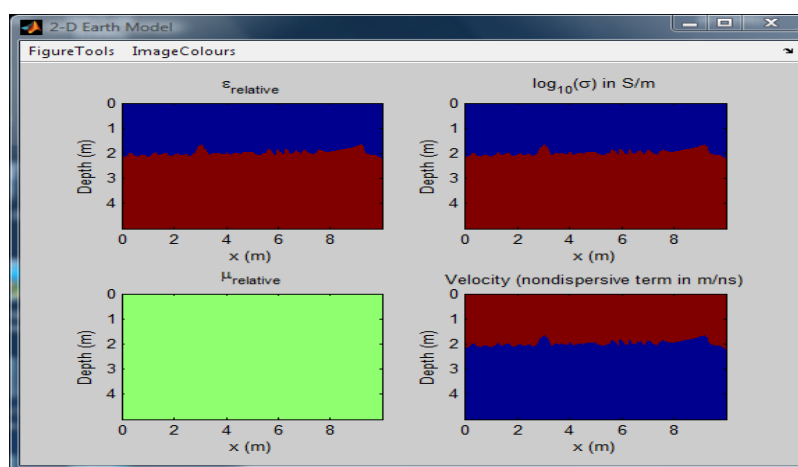
Η χρήση της ελάχιστης ταχύτητας εξασφαλίζει επαρκή διακριτοποίηση των περιοχών, όπου το κύμα διαδίδεται γρήγορα και απαιτείται υψηλότερη ανάλυση για να το μοντελοποιήσει. Μετά την διακριτοποίηση, οι ιδιότητες του μοντέλου εμφανίζονται ως εικόνες της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, της αγωγιμότητας, της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας και των πλεγμάτων ταχύτητας (εικόνα 3.1).

Με βάση τη διακριτοποίηση, το πρόγραμμα υπολογίζει τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές για την ισαπόσταση μεταξύ των ιχνών (trace pacing - dx) και την απόσταση ανάλογα του βάθους (depth spacing - dz). Επίσης, ζητάει την αρχική θέση της πηγής εκπομπής H/M κυμάτων (source location) και την ισαπόσταση πομπού (source spacing) κατά μήκος του άξονα σάρωσης (εικόνα 3.2). Επιπλέον, υπολογίζει τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές για το ρυθμό δειγματοληψίας (sampling interval - dt) και το συνολικό μήκος του άξονα του διπλού χρόνου διαδρομής (total 2-way traveltime) και ζητά από το χρήστη να καθορίσει τις παραμέτρους αυτές (εικόνα 3.3).

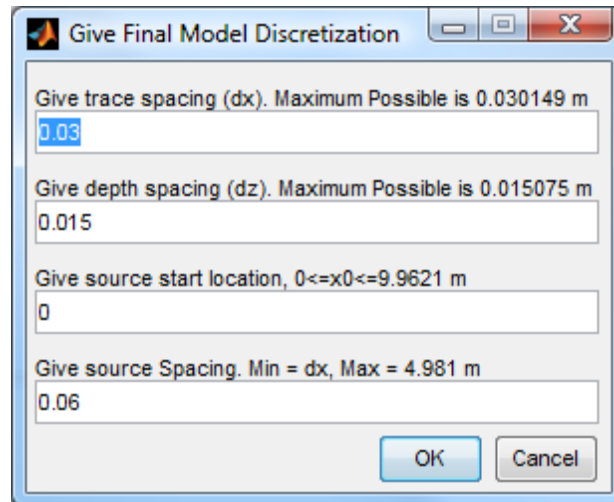
Το πρόγραμμα ζητά από το χρήστη να καθορίσει όλες αυτές τις παραμέτρους, προτείνοντας του τιμές κοντά στο μέγιστο επιτρεπτό. Ο χρήστης μπορεί να βάλει μεγαλύτερες τιμές από αυτές, όμως πιθανότατα θα υπάρξουν αλλοιώσεις στο τελικό μοντέλο.

Με βάση τα παραπάνω, για την δημιουργία της τελικής τομής του μοντέλου το πρόγραμμα ζητάει από το χρήστη να επιλέξει το ρυθμό δειγματοληψίας (write sample to the output every # iterations), όπου σαν αρχική επιλογή δίνει την τιμή 1, και αν θέλει να προβληθεί η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, όπου σε αυτήν την περίπτωση το 1 ισούται με “ΝΑΙ” και το 0 ισούται με “ΟΧΙ” (εικόνα 3.4).

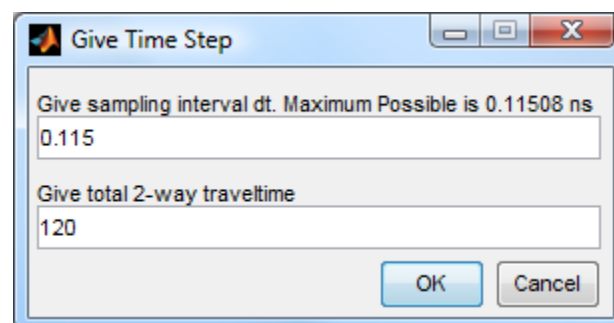
Η διαδικασία δημιουργίας της τελικής συνθετικής τομής ενδέχεται να κρατήσει από μερικά λεπτά έως μερικές μέρες ανάλογα με μέγεθος του προβλήματος και του μοντέλου.



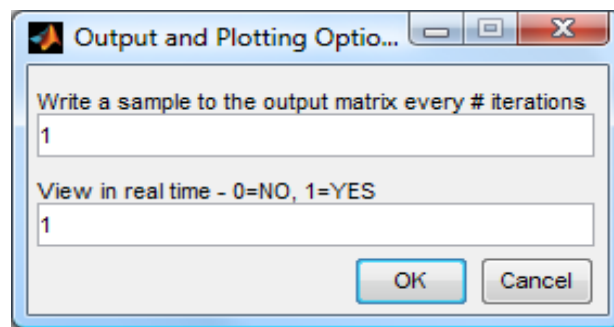
Εικόνα 3.1: Παράδειγμα παρουσίασης ιδιοτήτων μοντέλου σε μορφή εικόνων. (Πηγή: Τζάνης, 2010)



Εικόνα 3.2: Παράθυρο του προγράμματος που ζητάει από το χρήστη να ορίσει τις παραμέτρους για τη διακριτοποίηση του τελικού μοντέλου. (Πηγή: Τζάνης, 2010)



Εικόνα 3.3: Παράθυρο του προγράμματος που ζητάει από το χρήστη να ορίσει τις παραμέτρους σχετικά με το χρόνο. (Πηγή: Τζάνης, 2010)



Εικόνα 3.4: Τελικές παράμετροι του μοντέλου.
(Πηγή: Τζάνης, 2010)

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

4.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν και για τις δύο μεθόδους μετρήσεις από παλαιότερη γεωφυσική έρευνα στην περιοχή, στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας της Γεωργίας Βουράκη (2006). Λαμβάνοντας υπόψιν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από εκείνη την έρευνα και μέσα από διαφορετική επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων, γίνεται μια σύγκριση ώστε να φανεί αν υπάρχει σύγκλιση ή απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, σήμερα, η μορφή του τείχους που φαίνεται στην εικόνα 4.1 έχει αλλάξει σε σχέση με τη χρονιά που έγιναν οι μετρήσεις, καθώς έχουν γίνει και συνεχίζουν να γίνονται επισκευές. Το ύψος του τείχους έχει αυξηθεί (εικόνα 4.2), ενώ δύο τρύπες που υπήρχαν σε κοντινή απόσταση (η μία φαίνεται κάτω δεξιά στην εικόνα 4.1) έχουν μπαζωθεί (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.1: Η εικόνα του τείχους τη χρονιά που έγιναν οι μετρήσεις (2006). Το κόκκινο βέλος δείχνει την οριζόντια γραμμή μελέτης, η οποία έχει μήκος 27 m και βρίσκεται σε ύψος 1.7 m από το έδαφος. Το κίτρινο βέλος δείχνει την τρύπα που υπήρχε, αλλά μπαζώθηκε, αριστερά από την οποία ξεκινάει η γραμμή μελέτης με κατεύθυνση Νότο προς Βορρά.



***Εικόνα 4.2:** Το τείχος όπως είναι σήμερα (2017). Είναι εμφανείς οι επισκευές που έχουν γίνει, καθώς έχει αυξηθεί το ύψος ενώ δεν υπάρχουν πλέον τρύπες.*



***Εικόνα 4.3:** Στην εικόνα διακρίνεται το μπάζωμα της τρύπας της εικόνας 4.1 από την αλλαγή στα χρώματα (2017)*

4.2. Επιτόπου μετρήσεις σε σημεία των ενετικών τειχών

Εκτός από τις γεωφυσικές μετρήσεις, έγιναν και επιτόπου έρευνες σε διάφορες προσβάσιμες περιοχές όπου είχε καταστραφεί το τείχος και φαινόταν η εσωτερική δομή του. Στο σημείο της εικόνας 4.4, που βρίσκεται στη δυτική πλευρά του τείχους των Χανίων κοντά στην υπό μελέτη περιοχή, το πάχος μετρήθηκε περίπου 3.5 m. Στο σημείο της εικόνας 4.5, που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά των Χανίων, το πάχος του τείχους μετρήθηκε περίπου 4 m. Ωστόσο, στο σημείο της εικόνας 4.6, που αποτελεί κατεστραμμένο σημείο του ίδιου τείχους που έγιναν οι μετρήσεις

αλλά αρκετά ψηλότερα από τη γραμμή μελέτης, το πάχος του τείχους μετρήθηκε περίπου στα 2.5 m. Με δεδομένο, λοιπόν, ότι το τείχος είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πιο χοντρό στη βάση και πιο λεπτό στην κορυφή (βλ. εισαγωγή), στη γραμμή μελέτης που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (ύψος 1.7 m από το έδαφος) αναμένεται να έχει πάχος τουλάχιστον 3 m.

Και στις 3 αυτές περιοχές το μήκος των πετρών που αποτελούν το επιφανειακό στρώμα του τείχους μετρήθηκε περίπου 30 cm. Επίσης, το σημείο της εικόνας 4.7 που βρίσκεται και αυτό στη δυτική πλευρά του τείχους των Χανίων κοντά στην περιοχή μελέτης, διακρίνεται το πώς έχει δομηθεί το τείχος μπροστά από το πρανές, όπου το κενό μεταξύ του τείχους και του πρανούς έχει πληρωθεί με επιχωματώσεις που προέκυψαν από την εκσκαφή της τάφρου.



Εικόνα 4.4: Δομή τείχους σε σημείο κοντά στην περιοχή μελέτης. Πάχος περίπου 3.5 m. Μεταξύ των κόκκινων γραμμών απεικονίζεται το επιφανειακό στρώμα του τείχους. Μετρήθηκε περίπου 30 cm.



Εικόνα 4.5: Δομή τείχους σε σημείο στην ανατολική πλευρά των Χανίων.
Πάχος περίπου 4 m



Εικόνα 4.6: Δομή του τείχους όπου έγινε η γεωφυσική έρευνα στη
δυτική τάφρο. Βρίσκεται σε ύψωμα και δεξιά της γραμμής μελέτης.
Πάχος περίπου 2.5 m

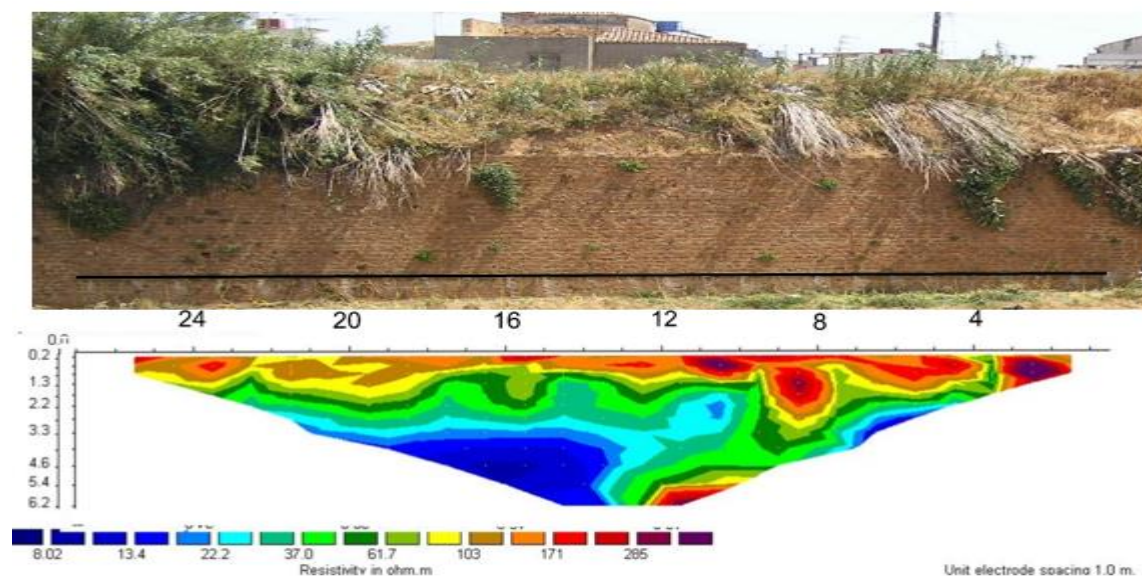


Εικόνα 4.7: Τείχος μπροστά από πρανές. Το κενό μεταξύ τους έχει πληρωθεί με επιχωματώσεις από την εκσκαφή του πρανούς. Στην εικόνα φαίνεται επίσης ότι το τείχος επισκευάζεται.

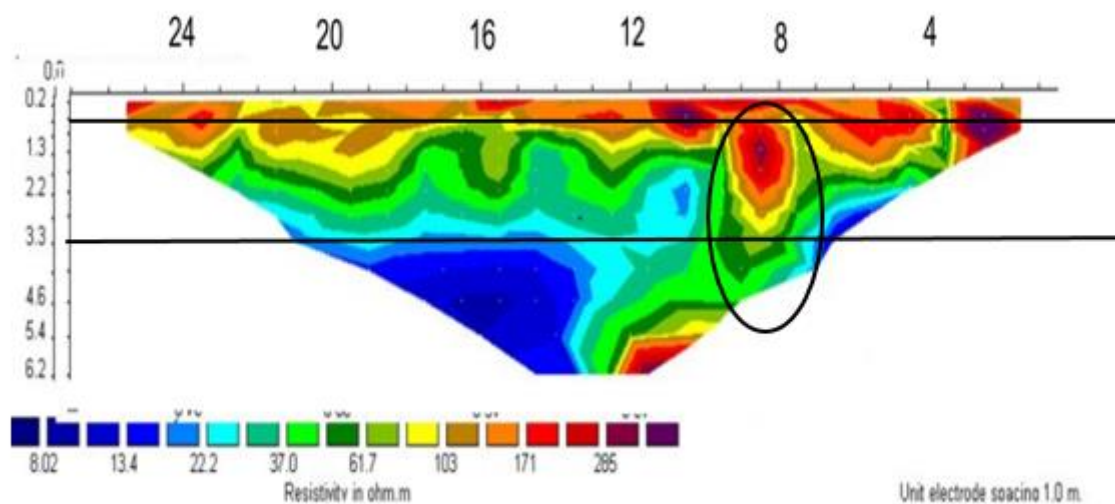
4.3. Αποτελέσματα μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιήθηκαν σε γραμμή μελέτης μήκους 27 m πάνω στα τείχη της δυτικής τάφρου. Η γραμμή αυτή τοποθετήθηκε οριζόντια και σε ύψος περίπου 1.7 m από το έδαφος και με κατεύθυνση Νότο προς Βορρά από δεξιά προς αριστερά (εικόνα 4.1) . Χρησιμοποιήθηκαν 27 ηλεκτρόδια με απόσταση 1 m μεταξύ τους. Οι μετρήσεις έγιναν με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

Η εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα (σχήμα 4.1). Για την ερμηνεία τους θα χρειαστεί ο πίνακας 2.1.



Σχήμα 4.1: Γεωηλεκτρική τομή. Η μαύρη γραμμή είναι η γραμμή μελέτης, ενώ ο κατακόρυφος άξονας στο σχήμα δείχνει το βάθος διασκόπησης (6.2 m).. Η κατεύθυνση της γραμμής από δεξιά προς τα αριστερά είναι Νότος προς Βορρά.. Γραμμή μελέτης 27 m.



Σχήμα 4.2: Προσεγγιστικός διαχωρισμός στρωμάτων τείχους σύμφωνα με την κατανομή των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η κατεύθυνση της γραμμής από δεξιά προς τα αριστερά είναι Νότος προς Βορρά.. Γραμμή μελέτης 27 m. Βάθος διασκόπησης 6,2 m. Έχει επισημανθεί (μαύρη έλλειψη) η ύπαρξη αντιρίδας.

Στη γεωηλεκτρική τομή με βάθος διασκόπησης περίπου τα 6 m, η πλευρική μεταβολή της ηδικής ηλεκτρικής αντίστασης οφείλεται στο ότι τα ενετικά τείχη αποτελούν μια σύνθετη κατασκευή φτιαγμένη από διαφορετικά υλικά με διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Υπάρχουν ενδεικτικά 3 στρώματα (σχήμα 4.2). Το πρώτο επιφανειακό στρώμα φαίνεται να έχει πάχος 0.5 m περίπου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, στο επιφανειακό στρώμα κυριαρχεί το κόκκινο και το καφέ χρώμα που αντιστοιχεί σε υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις (μεταξύ του 103 και του 285 Ωm περίπου). Σύμφωνα και με τον πίνακα 2.1, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις αυτές αντιστοιχούν σε σκληρά πετρώματα γεγονός που δικαιολογεί την ύπαρξη ψαμμίτη σε συνδυασμό με ασβεστοκονίαμα που βρίσκεται μεταξύ των πλακών ψαμμίτη σαν συγκολλητικό υλικό. Το στρώμα αυτό αποτελεί την πρόσοψη του τείχους, όπως τη βλέπει ένας παρατηρητής (εικόνα 4.2).

Το δεύτερο στρώμα φαίνεται να έχει πάχος περίπου 3 m, όπου σε αυτά κυριαρχεί το πράσινο και το κίτρινο χρώμα (ηλεκτρικές αντιστάσεις μεταξύ του 37 και του 103 Ωm περίπου). Συνεπώς, αυτό το στρώμα πιθανότατα αποτελεί τη συνέχεια του τείχους, καθώς υπάρχουν πέτρες με υψηλή ηλεκτρική αντίσταση (ψαμμίτες, ίσως μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, ασβεστοκονίαμα), αλλά και χώμα με υγρασία (οι ψαμμίτες έχουν, επίσης, υψηλό πορώδες) που έχουν λιγότερη ηλεκτρική αντίσταση και προέρχονται από το αμέσως επόμενο στρώμα.

Τέλος, το τρίτο στρώμα φαίνεται να έχει πάχος πάνω από 3 m, καθώς δεν φτάνει σε μεγαλύτερο βάθος η διασκόπηση. Σε αυτό κυριαρχεί το μπλε χρώμα (ηλεκτρικές αντιστάσεις μεταξύ του 8 και του 37 Ωm). Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις αυτές μαρτυρούν την ύπαρξη περισσότερου εδαφικού σχηματισμού και υγρασίας και λιγότερων σκληρών πετρωμάτων, άρα πιθανότατα πρόκειται για εδαφικό υλικό των επιχωματώσεων από την εκσκαφή της τάφρου.

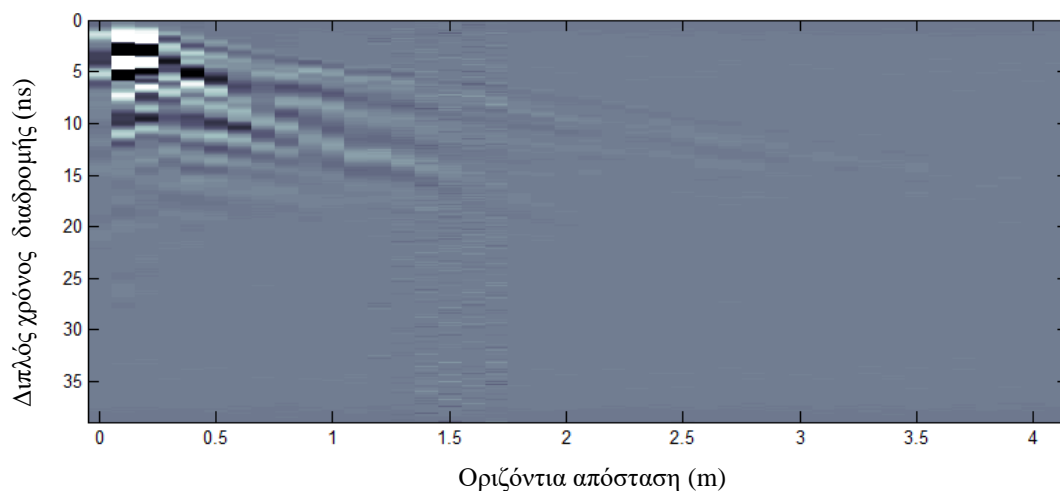
Επιπλέον, στο σχήμα 4.2 παρατηρείται (έχει επισημανθεί με μαύρη έλλειψη) μία ανομοιογένεια στην κατανομή των ηλεκτρικών αντιστάσεων, καθώς διαφαίνεται μία περιοχή υψηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων, όπως αυτές που βρίσκονται στο πρώτο στρώμα, να εισχωρεί εντός του τείχους. Πρόκειται πιθανότατα για αντιρίδα, κατασκευασμένη κυρίως από ψαμμίτη και ασβεστοκονίαμα, που δημιουργήθηκε με σκοπό την αντιστήριξη του τείχους μπροστά από το φυσικό πρανάς της τάφρου.

Συνοψίζοντας, το τείχος φαίνεται να έχει πάχος τουλάχιστον 3.3 m. Η πολυπλοκότητα της κατανομής των ηλεκτρικών αντιστάσεων των υλικών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2, δεν επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των ορίων κάθε στρώματος (τείχος, επιχωματώσεις και εδαφικό υλικό). Αναλυτικότερα αποτελέσματα αναμένονται από τις μετρήσεις με τη μέθοδο του γεωραντάρ που ακολουθούν.

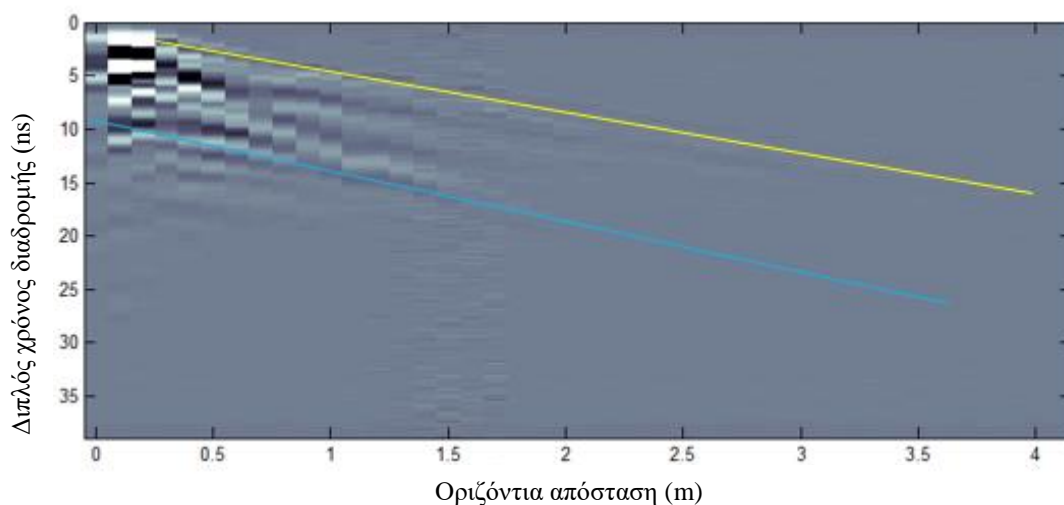
4.4. Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων με μέθοδο γεωραντάρ

4.4.1. Αποτελέσματα μεθόδου κοινού ενδιάμεσου σημείου

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται επεξεργασμένη καταγραφή, η οποία απεικονίζει τις μετρήσεις που έγιναν σε τμήμα τεσσάρων μέτρων της ίδιας γραμμής μελέτης, αλλά με τη μέθοδο του κοινού ενδιάμεσου σημείου. Στο σχήμα 4.4 έχουν επισημανθεί τα απ' ευθείας και τα ανακλώμενα κύματα. Χρησιμοποιήθηκε κεραία πομπού με συχνότητα 450 MHz.



Σχήμα 4.3: Επεξεργασμένη τομή μήκους 4 m στη γραμμή μελέτης με τη μέθοδο του κοινού ενδιάμεσου σημείου. Κεραία πομπού 450 MHz. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά



Σχήμα 4.4: Η κίτρινη γραμμή δείχνει τα απ' ευθείας κύματα (μαύρα ίχνη), ενώ η μπλε γραμμή τα ανακλώμενα (λευκά ίχνη). Αναζητείται η κλίση τους. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά

Η διαδικασία εύρεσης της ταχύτητας από τα απευθείας κύματα απαιτεί, αρχικά, την εκτίμηση της κλίσης k της ευθείας που προσαρμόζεται καλύτερα στους χρόνους διαδρομής των απευθείας κυμάτων με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η ταχύτητα ισούται με $u = 1/k$.

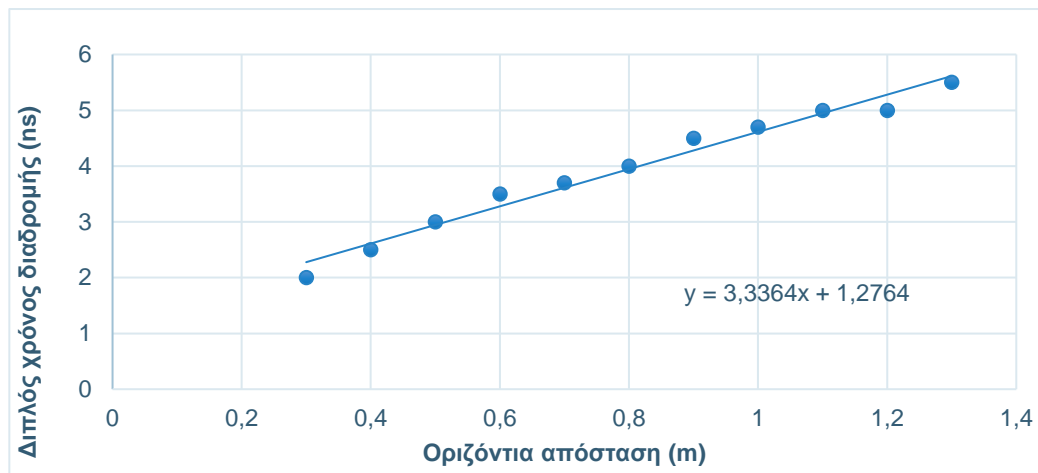
Για την εύρεση της κλίσης k της ευθείας που προσαρμόζεται καλύτερα στους χρόνους διαδρομής των απευθείας κυμάτων ακολουθείται η εξής διαδικασία: Αρχικά, σαν δεδομένα επιλέγονται οι χρόνοι διαδρομής των απευθείας κυμάτων για κάθε ίχνος (πίνακας 4.1). Μέσω του προγράμματος EXCEL με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων βρέθηκε η γραμμική εξίσωση της ευθείας (σχήμα 4.5). Η κλίση στην περίπτωση μας βρέθηκε ίση με 3.3364 . Συνεπώς η ταχύτητα που προκύπτει είναι:

$$u = 1/k = 1/3.3364 = 0.3 \text{ m/ns.}$$

Η τιμή αυτή είναι απολύτως φυσιολογική και δείχνει ότι τα απευθείας κύματα διαδίδονται στον αέρα, καθώς η τιμή αυτή είναι η ταχύτητα διάδοσης των Η/Μ στον αέρα σύμφωνα με τον πίνακα 2.2

ΑΠ'ΕΥΘΕΙΑΣ	
TRAVELTIME (ns)	SCAN AXIS (m)
2	0,3
2,5	0,4
3	0,5
3,5	0,6
3,7	0,7
4	0,8
4,5	0,9
4,7	1
5	1,1
5	1,2
5,5	1,3

Πίνακας 4.1: Πίνακας που δείχνει τις προβολές των ιχνών στους δύο άξονες. Αριστερά ο διπλός χρόνος διαδρομής και δεξιά η οριζόντια απόσταση

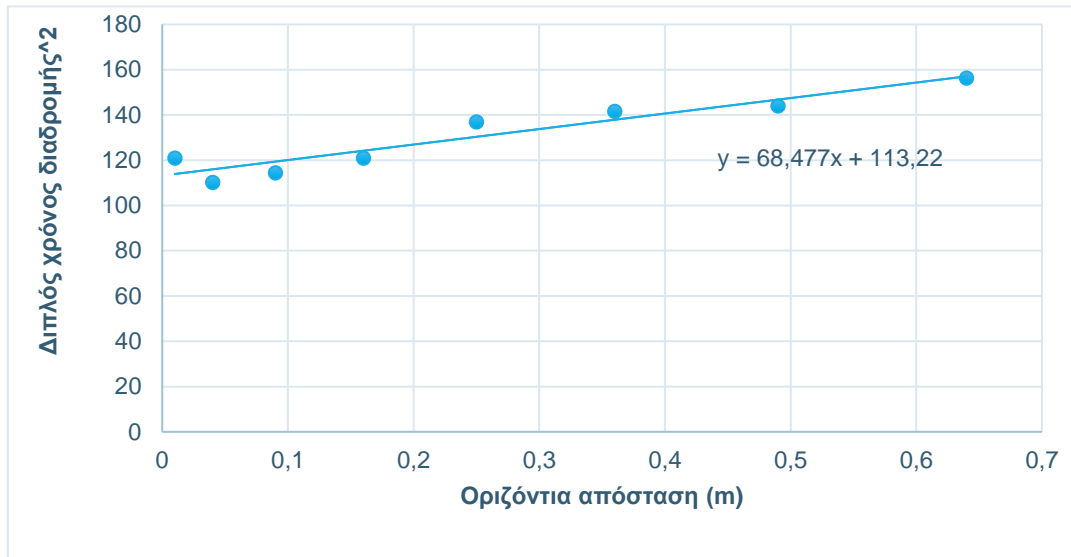


Σχήμα 4.5: Η ευθεία που προσαρμόζουν τα ίχνη των απευθείας κυμάτων και η γραμμική εξίσωση της ευθείας. Η κλίση $k = 3.3364$.

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και στα ανακλώμενα κύματα με τη διαφορά ότι προσδιορίζεται η κλίση της ευθείας που προσαρμόζουν τα τετράγωνα των χρόνων διαδρομής (πίνακας 4.2). Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η ευθεία και η γραμμική της εξίσωση. Η κλίση k ισούται με $k = 68,477$. Στην περίπτωση των ανακλώμενων κυμάτων η ταχύτητα διάδοσης ισούται με $u = \sqrt{1/k} = 0,12 \text{ m/ns}$.

ΑΝΑΚΛΩΜΕΝΑ	
TRAVELTIME (ns) ²	SCAN AXIS (m) ²
121	0,01
110,25	0,04
114,49	0,09
121	0,16
136,89	0,25
141,61	0,36
144	0,49
156,25	0,64

Πίνακας 4.2: Πίνακας των τετραγώνων διπλού χρόνου διαδρομής και οριζόντιας απόστασης



Σχήμα 4.5: Η ευθεία που προσαρμόζουν καλύτερα τα ανακλώμενα κύματα και η γραμμική εξίσωση της ευθείας. Η κλίση είναι $k = 68.477$. Άρα $u = \sqrt{1/k} = 0,12$ m/ns

Η ταχύτητα διάδοσης των ανακλώμενων κυμάτων που προέκυψε ($u = 0.12$ m/ns) αποτελεί φυσιολογική τιμή, δεδομένου ότι το τείχος αποτελείται κατά κύριο λόγο από ψαμμίτη, καθώς η ταχύτητα διάδοσης H/M κυμάτων για ψαμμίτη με υγρασία είναι 0.11 m/ns σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Πηγή: John M. Reynolds, 1997).

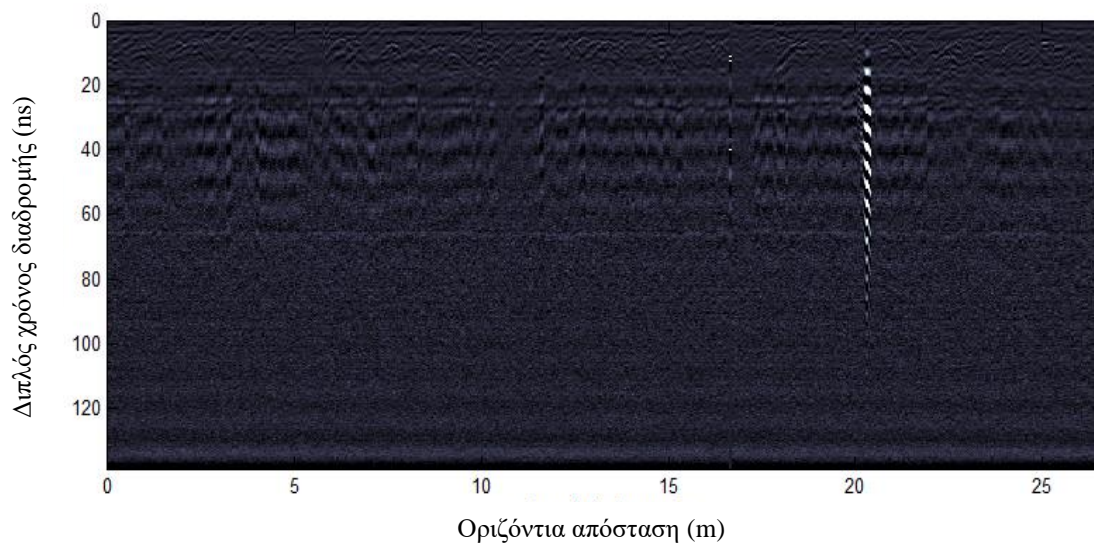
4.4.2. Αποτελέσματα μεθόδου ανάκλασης

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της ανάκλασης έγιναν στην ίδια γραμμή μελέτης με τη μέθοδο της τομογραφίας (27 m). Το βήμα διασκόπησης ήταν 25 cm, ενώ η σάρωση της γραμμής μελέτης είχε κατεύθυνση από το Νότο προς το Βορρά. Χρησιμοποιήθηκε κεραία εκπομπής H/M κυμάτων 450 MHz. Η διαδικασία επαναλήφθηκε και για κεραία εκπομπής H/M κυμάτων 225 MHz. Οι τομές που εμφανίζει το πρόγραμμα MATGPR φαίνονται στα σχήματα 4.6 και 4.7.

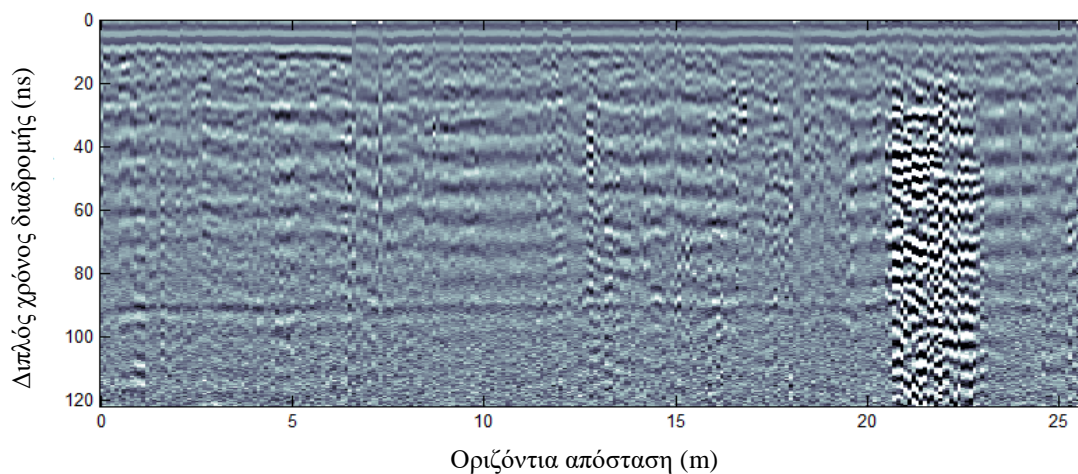
Παρατηρούμε ότι στην τομή για την κεραία εκπομπής H/M κυμάτων συχνότητας 450 MHz, τα περιθλώμενα και ανακλώμενα κύματα που προέρχονται από μικρά βάθη διακρίνονται πολύ καλύτερα απ' ό,τι η τομή για την κεραία συχνότητας 225 MHz. Αντιθέτως, για τα ανακλώμενα και τα περιθλώμενα κύματα από μεγαλύτερα βάθη περισσότερο καθαρή εικόνα έχουμε από την τομή για την κεραία συχνότητας 225 MHz. Επομένως, για την ερμηνεία των τομών και την εξαγωγή συμπερασμάτων θα βασιστούμε και στις δύο τομές.

Για την εύρεση του πάχους του επιφανειακού στρώματος του τείχους θα αναλυθεί η τομή του σχήματος 4.6. Πιο συγκεκριμένα, κάνοντας επιπλέον trim time στα 40 ns στην τομή του σχήματος 4.6, παρατηρούνται τα περιθλώμενα κύματα που προέρχονται από τη διεπιφάνεια του επιφανειακού

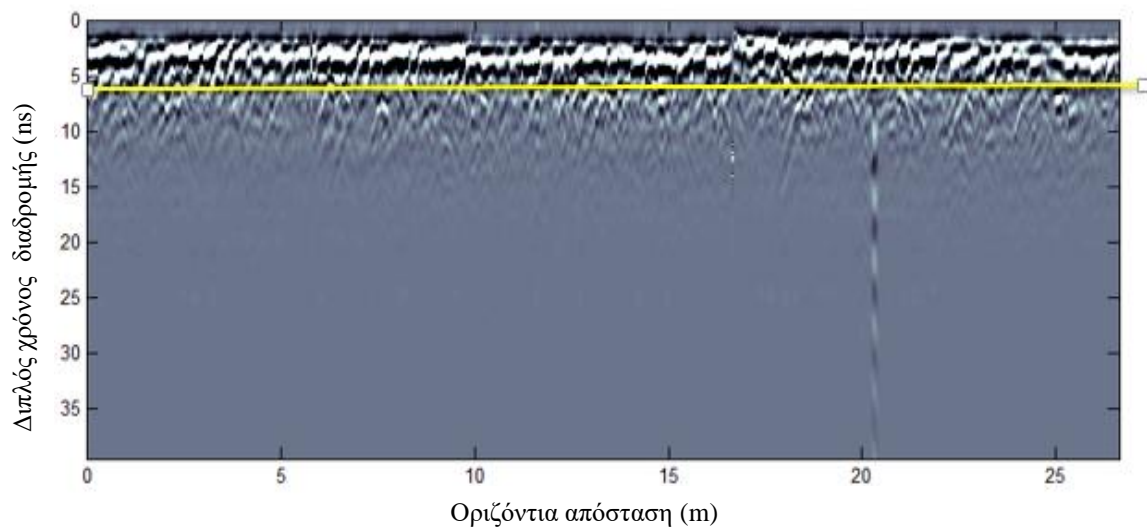
στρώματος του τείχους και του υπόλοιπου τείχους (σχήμα 4.8). Η κίτρινη νοητή γραμμή δείχνει πού βρίσκεται η διεπιφάνεια αυτή. Έπειτα, έγινε ανάλυση ταχυτήτων με σκοπό τον προσδιορισμό της μέσης ταχύτητας διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων, κύματα τα οποία διαδίδονται και στο επιφανειακό στρώμα και στο υπόλοιπο τείχος. Δεν ξεχνάμε ότι ο H/M παλμός διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα σε κάθε υλικό στο τείχος, επομένως η καλύτερη επιλογή είναι να πάρουμε μια μέση τιμή των τιμών αυτών. Με τη βοήθεια της επιλογής **Fit Diffraction Hyperbola** έγινε η προσαρμογή της υπερβολής σε 6 τυχαία περιθλώμενα κύματα σε όλο το μήκος της γραμμής μελέτης κοντά στη διεπιφάνεια (σχήμα 4.9) και εκτιμήθηκε η ταχύτητα διάδοσης για το κάθε ένα.



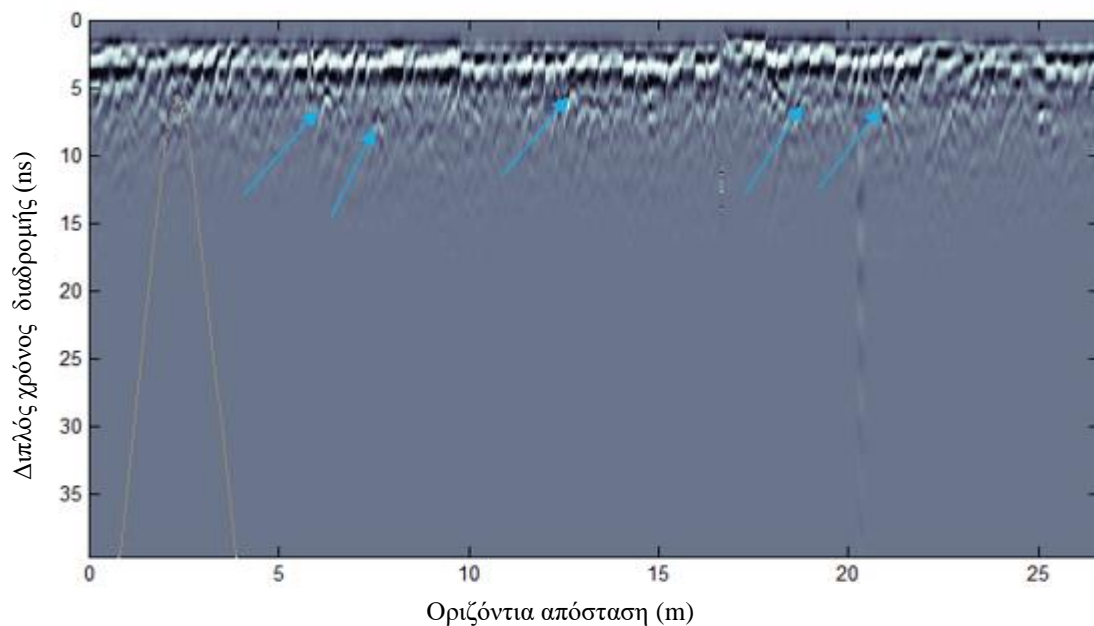
Σχήμα 4.6: Επεξεργασμένη τομή της γραμμής μελέτης (27 m) με συχνότητα πομπού H/M κυμάτων 450 MHz. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά. Η ασπρόμαυρη κάθετη γραμμή που φαίνεται έντονα στα δεξιά της εικόνας, πρόκειται ίσως για κάποιο μεταλλικό αντικείμενο



Σχήμα 4.7: Επεξεργασμένη τομή της γραμμής μελέτης (27 m) με συχνότητα πομπού H/M κυμάτων 225 MHz. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά



Σχήμα 4.8: Η επεξεργασμένη τομή της εικόνας 4.10 έχοντας υποστεί επιπλέον *trim time* στα 40 ns. Στην πάνω διακρίνονται τα απ' ευθείας κύματα και από κάτω τα ανακλώμενα και τα περιθλώμενα. Η κίτρινη νοητή γραμμή δείχνει τη διεπιφάνεια μεταξύ του επιφανειακού στρώματος και του υπόλοιπου τείχους. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά



Σχήμα 4.9: Ανάλυση ταχυτήτων με την επιλογή *Fit Diffraction Hyperbola*. Αριστερά φαίνεται μία υπερβολή προσαρμοσμένη σε ένα περιθλώμενο κύμα. Τα βελάκια δείχνουν τα περιθλώμενα κύματα στα οποία έγινε επίσης προσαρμογή. Η μέση ταχύτητα διάδοσης $u = 0.08 \text{ m/ns}$ προέκυψε ως ο μέσος όρος των ταχυτήτων των περιθλώμενων. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.

Η μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων προέκυψε ότι ισούται με $u = 0.08 \text{ m/ns}$. Λαμβάνοντας αυτή την τιμή σαν δεδομένο για την ταχύτητα διάδοσης, μπορούμε να υπολογίσουμε το πάχος του επιφανειακού στρώματος του τείχους λύνοντας τη σχέση (2.12), όπου ο διπλός κατακόρυφος χρόνος είναι περίπου 6. Σε αυτή την περίπτωση το πάχος προκύπτει ότι είναι περίπου 25 cm.

Για την επιβεβαίωση της τιμής της ταχύτητας διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων που προέκυψε, θα χρησιμοποιηθεί κατασκευαστικό μοντέλο 2-D.

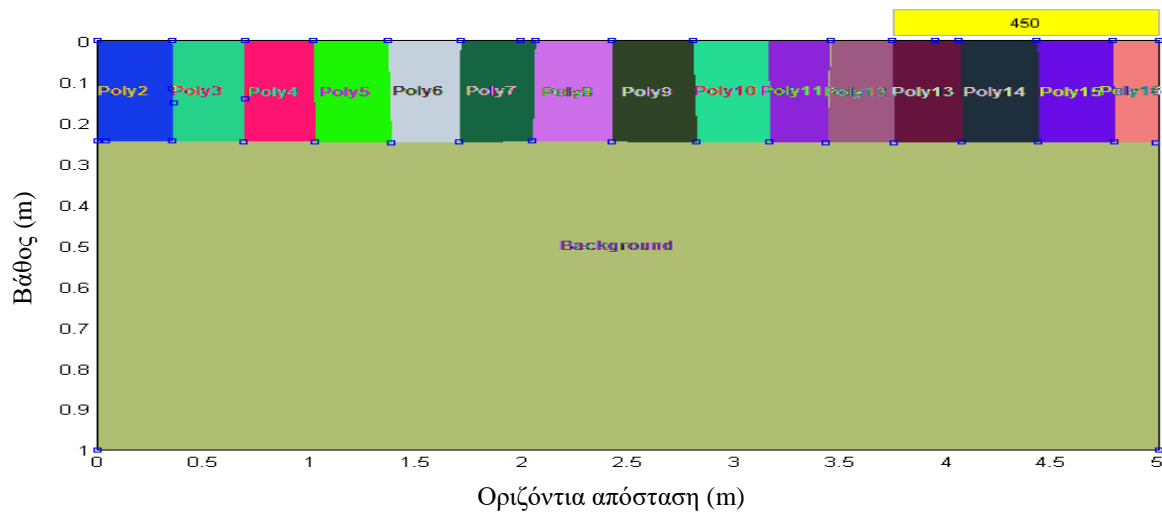
4.4.3. Δημιουργία κατασκευαστικού μοντέλου 2-D

Χρησιμοποιώντας την επιλογή **Build 2-D Model** δημιουργήθηκε κατασκευαστικό μοντέλο, το οποίο αποτελεί προσομοίωση μέρους του τείχους (σχήμα 4.10). Πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο αυτό απεικονίζεται μέρος του συνολικού τείχους (1 m από την εξωτερική επιφάνεια προς το εσωτερικό όπου διακρίνεται το πρώτο και το δεύτερο στρώμα του τείχους), καθώς και 5 m στο μήκος (αντί για 27 m που είναι ολόκληρη η γραμμή μελέτης). Το πάχος κάθε πέτρας που αποτελεί το μετωπιαίο στρώμα του τείχους ορίστηκε στα 25 cm, σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς από τις πραγματικές μετρήσεις, ενώ το μήκος κάθε μιας ορίστηκε προσεγγιστικά στα 30 cm. Επίσης, προκειμένου το μοντέλο να αποτελεί όσο το δυνατό καλύτερη απεικόνιση του πραγματικού τείχους, οι πέτρες που σχεδιάστηκαν στο μοντέλο σκόπιμα δεν έχουν ακριβώς ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα. Συνεπώς, σε κάποια σημεία μεταξύ των πετρών υπάρχει κενό, με την παραδοχή ότι σε αυτά τα σημεία υπάρχει συγκολλητικό υλικό (ασβεστοκονίαμα) με διαφορετική ταχύτητα διάδοσης H/M κυμάτων.

Για τη δημιουργία αυτού του μοντέλου ζητήθηκαν από το πρόγραμμα και ορίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

- Μήκος διασκόπησης: 5 m
- Βάθος διασκόπησης: 1 m
- Συχνότητα κεραίας εκπομπής: 450 MHz
- Ηλεκτρική αντίσταση σε κάθε πέτρα και το υπόβαθρο: $1000 \Omega\text{m}$
- Σχετική μαγνητική διαπερατότητα σε κάθε πέτρα και το υπόβαθρο: 1
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά σε κάθε πέτρα (αρχική τιμή): 14
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά στο υπόβαθρο (αρχική τιμή): 25

Η αρχική τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) στις πέτρες επιλέχθηκε με βάση το γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης του H/M παλμού στις επιφανειακές πέτρες ορίστηκε να είναι $u = 0.08 \text{ m/ns}$ (μέση τιμή από πραγματικές μετρήσεις). Λύνοντας τη σχέση (2.13) ως προς τη σχετική διηλεκτρική σταθερά και γνωρίζοντας ότι $c = 0.3 \text{ m/ns}$ προκύπτει η τιμή 14. Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει η τιμή για τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του υπόβαθρου, όπου σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε προσεγγιστική τιμή της ταχύτητας διάδοσης του H/M παλμού ($u = 0.06 \text{ m/ns}$) στα υλικά που βρίσκονται βαθύτερα στο τείχος, τα οποία αποτελούν μείγμα ψαμμίτη, άφθονου ασβεστοκονιάματος και υγρασίας.



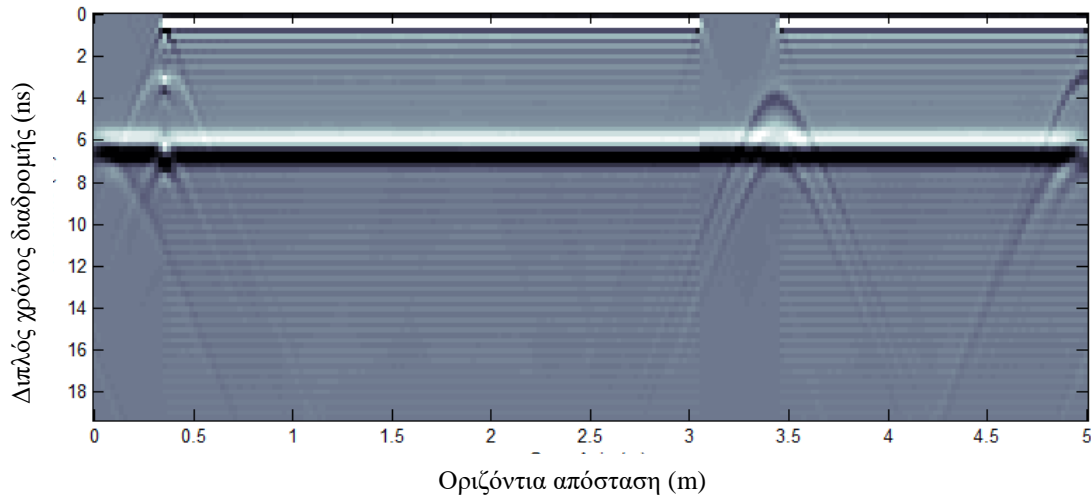
Σχήμα 4.10: Το συνθετικό μοντέλο 2-D του τείχους. Η σειρά με τα πολύγωνα αντιπροσωπεύει το επιφανειακό στρώμα του τείχους, ενώ το υπόβαθρο αντιπροσωπεύει το υπόλοιπο τείχος. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.

4.4.4. Συνθετική τομή προγράμματος Split-Step 2-D Modelling

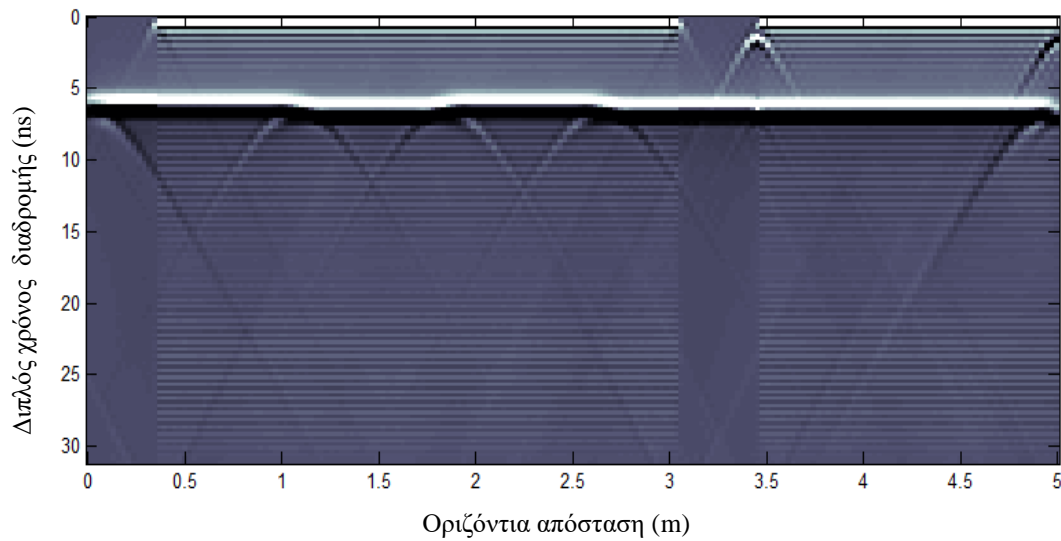
Το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία της συνθετικής τομής, μέσω της επιλογής **Split-Step 2-D Modelling** (σχήμα 4.11). Στην τομή αυτή έγινε ανάλυση ταχυτήτων (Fit Diffraction Hyperbola) σε όλα τα περιθλώμενα κύματα και προέκυψε ότι ο μέσος όρος της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων ισούται με $u = 0.071 \text{ m/ns}$. Η τιμή αυτή αποκλίνει από την τιμή $u = 0.08 \text{ m/ns}$ που υπολογίστηκε από τις πραγματικές μετρήσεις.

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε τρέχοντας το ίδιο κατασκευαστικό μοντέλο με τις ίδιες παραμέτρους, αλλάζοντας μόνο τη σχετική διηλεκτρική σταθερά στις πέτρες και στο υπόβαθρο, και κατ' επέκταση την ταχύτητα διάδοσης, προκειμένου να βρεθεί μια μέση ταχύτητα που να προσεγγίζει καλύτερα την $u = 0.08 \text{ m/ns}$.

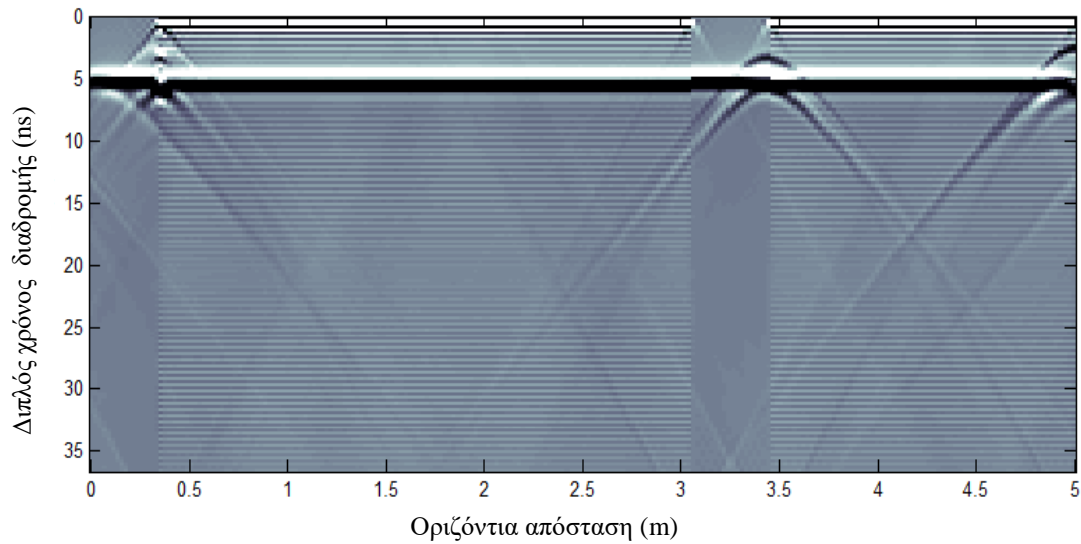
Σε όλες τις περιπτώσεις επιλέχθηκε η παρουσίαση συνθετικής τομής σε υψηλή ανάλυση. Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται τα αποτελέσματα για κάθε συνθετική τομή.



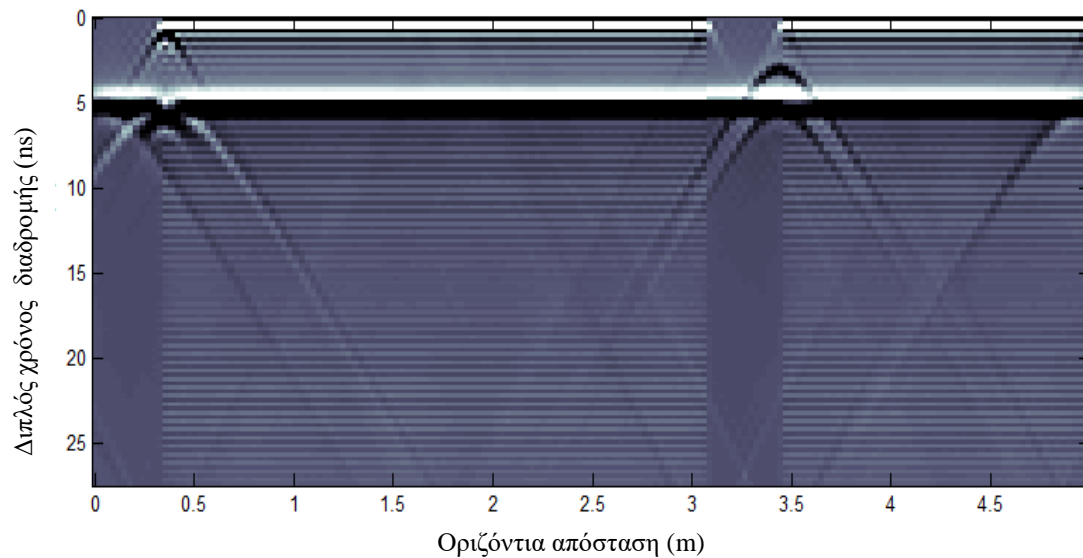
Σχήμα 4.11: Η συνθετική τομή που προκύπτει τρέχοντας το συνθετικό μοντέλο 2-D με $\epsilon_r = 14$ ($u_1 = 0.08$ m/ns) στην κάθε πέτρα και με $\epsilon_r = 25$ ($u_2 = 0.06$ m/ns) στο υπόβαθρο. Μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων που προκύπτει από ανάλυση ταχυτήτων $u = 0.071$ m/ns. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.



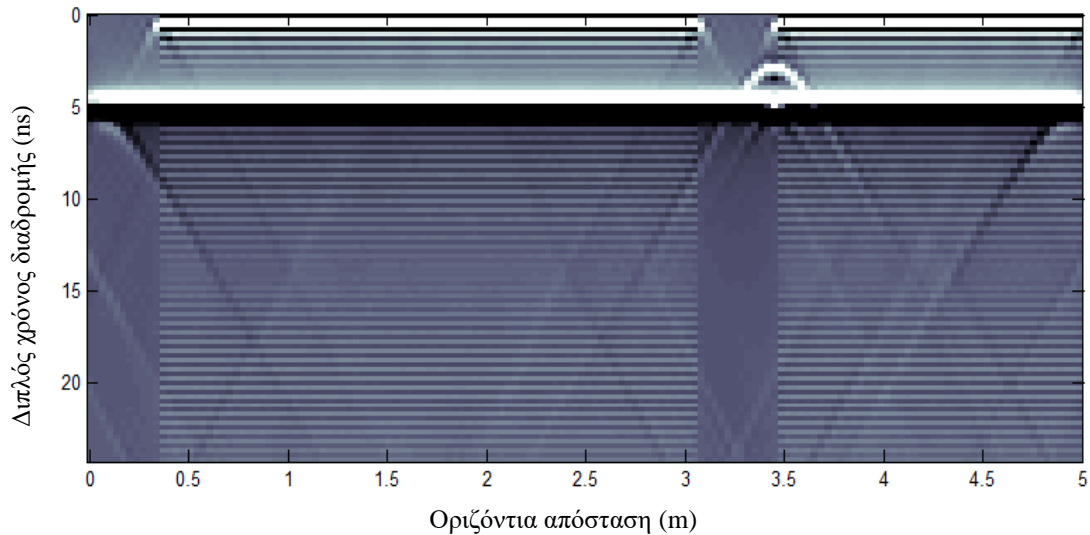
Σχήμα 4.12: Η συνθετική τομή που προκύπτει τρέχοντας το συνθετικό μοντέλο 2-D με $\epsilon_r = 14$ ($u_1 = 0.08$ m/ns) στην κάθε πέτρα και με $\epsilon_r = 18$ ($u_2 = 0.07$ m/ns) στο υπόβαθρο. Μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων που προκύπτει από ανάλυση ταχυτήτων $u = 0.078$ m/ns. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 4.13: Η συνθετική τομή που προκύπτει τρέχοντας το συνθετικό μοντέλο 2-D με $\epsilon_r = 9$ ($u1 = 0.1$ m/ns) στην κάθε πέτρα και με $\epsilon_r = 25$ ($u2 = 0.06$ m/ns) στο υπόβαθρο. Μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων που προκύπτει από ανάλυση ταχυτήτων $u = 0,08$ m/ns. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 4.14: Η συνθετική τομή που προκύπτει τρέχοντας το συνθετικό μοντέλο 2-D με $\epsilon_r = 9$ ($u1 = 0.1$ m/ns) στην κάθε πέτρα και με $\epsilon_r = 14$ ($u2 = 0.08$ m/ns) στο υπόβαθρο. Μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων που προκύπτει από ανάλυση ταχυτήτων $u = 0,09$ m/ns. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 4.18: Η συνθετική τομή που προκύπτει τρέχοντας το συνθετικό μοντέλο 2-D με $\epsilon_r = 9$ ($u1 = 0.1$ m/ns) στην κάθε πέτρα και με $\epsilon_r = 11$ ($u2 = 0.09$ m/ns) στο υπόβαθρο. Μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων που προκύπτει από ανάλυση ταχυτήτων $u = 0,093$ m/ns. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.

Από τις παραπάνω συνθετικές τομές, η τομή του σχήματος 4.13 προσεγγίζει καλύτερα τις πραγματικές μετρήσεις καθώς βγάζει μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων $u = 0.08$ m/ns. Για το τείχος το μοντέλο δίνει ταχύτητα διάδοσης κυμάτων $u1 = 0.1$ m/ns. Η τιμή αυτή είναι λίγο μικρότερη από εκείνη που προέκυψε με τη μέθοδο του κοινού ενδιαμέσου σημείου ($u = 0.12$ m/ns). Η πραγματική τιμή της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων ενδέχεται να είναι μεταξύ 0.1 m/ns και 0.13 m/ns και αυτό διότι η πιθανή ύπαρξη υγρασίας στον ψαμμίτη, αλλά και το ασβεστοκονίαμα, ελαττώνουν την ταχύτητα διάδοσης του H/M κύματος. Επομένως, η τιμή που προέκυψε από τη συνθετική τομή είναι φυσιολογική. Για το υπόβαθρο το μοντέλο δίνει ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων $u2 = 0.06$ m/ns. Πρακτικά, η τιμή αυτή είναι μικρότερη της αναμενόμενης, καθώς για το δεύτερο στρώμα του τείχους, το οποίο αποτελεί ακανόνιστο μίγμα ψαμμίτη, άφθονου ασβεστοκονιάματος και υγρασίας, η τιμή διάδοσης του H/M κύματος αναμένεται να είναι μεταξύ 0.08 m/ns και 0.1 m/ns.

4.4.5. Συνθετική τομή προγράμματος FDTD 2-D Modelling

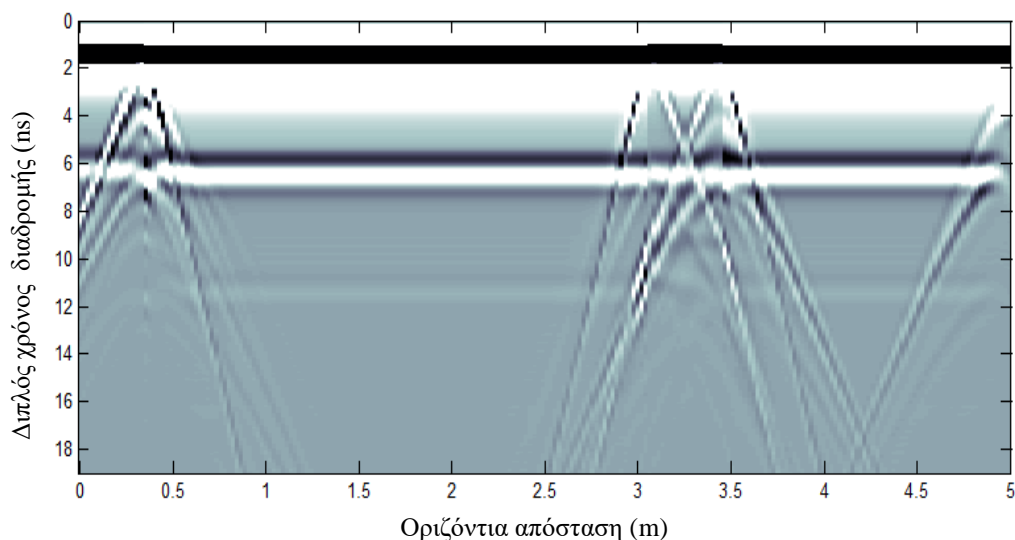
Στη συνέχεια, εισάγοντας το μοντέλο ($u1 = 0.1$ m/ns και $u2 = 0.06$ m/ns) στο πρόγραμμα **FDTD 2-D Modelling**, επιχειρήθηκε η δημιουργία συνθετικής τομής, προκειμένου να συγκριθεί με την τομή του σχήματος 4.13. Από το πρόγραμμα ζητήθηκαν ή ορίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι για τη δημιουργία της τομής:

- Κεντρική συχνότητα κεραίας-πομπού (Antenna Frequency): 450 MHz

- Απόσταση μεταξύ των ιχνών (Trace Spacing): 0.0045 m
- Απόσταση βάθους (Depth Spacing): 0.004 m
- Αρχική τοποθεσία πηγής (Source start location): 0 m
- Απόσταση κεραιών πομπού-δέκτη (Source spacing): 0.0222 m
- Διάστημα δειγματοληψίας (Sampling Interval): 0.031 ns
- Συνολικό διπλό χρόνο διαδρομής (Total 2-way Traveltime): 19 ns
- Write sample to the output every# iterations: 1
- View in real time: 0

Με βάση αυτές τις παραμέτρους προέκυψε η συνθετική τομή του σχήματος 4.19. Κάνοντας ανάλυση ταχυτήτων (Fit Diffraction Hyperbola) στα περιθλώμενα κύματα της τομής και παίρνοντας το μέσο όρο των ταχυτήτων διάδοσης, προέκυψε η τιμή $u = 0.075$ m/ns. Η τιμή αυτή είναι λίγο μικρότερη από εκείνη που προέκυψε από τη συνθετική τομή του προγράμματος **Split-Step 2-D Modelling ($u = 0.08$ m/ns)**.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, η μέθοδος FDTD (Finite Differences Domain Time) αποτελεί μία διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος, περισσότερο λεπτομερής αλλά που απαιτεί αρκετά περισσότερο χρόνο σε σχέση με την Split-Step, η οποία είναι λιγότερο απαιτητική υπολογιστικά και περισσότερο οικονομική ως προς το χρόνο επίλυσης του προβλήματος.



Σχήμα 4.19: Η συνθετική τομή που προκύπτει από το πρόγραμμα **FDTD 2-D Modelling**. Μέση ταχύτητα διάδοσης των περιθλώμενων κυμάτων που προκύπτει από ανάλυση ταχυτήτων $u = 0,075$ m/ns. Η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά είναι από αριστερά προς τα δεξιά.

4.4.6. Προσδιορισμός πάχους του τείχους

Για τον προσδιορισμό του πάχους του τείχους ουσιαστικά χωρίζουμε το τείχος σε δύο μέρη με δύο διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης των Η/Μ κυμάτων, το επιφανειακό στρώμα και το υπόλοιπο τείχος.

Από τις μετρήσεις με τη μέθοδο της ανάκλασης και λαμβάνοντας σαν δεδομένα για το επιφανειακό στρώμα του τείχους την ταχύτητα $u_1 = 0.1 \text{ m/ns}$ και για το υπόλοιπο τείχος όχι την $u_2 = 0.06 \text{ m/ns}$ που προκύπτει από το μοντέλο, αλλά την $u_3 = 0.08 \text{ m/ns}$, προκειμένου να ανταποκρίνεται περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες, και χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.12) προκύπτει ότι:

$$\text{Πάχος Επιφανειακού Στρώματος} = 0.5 * 0.1 \text{ m/ns} * 6 \text{ ns} = 0.3 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

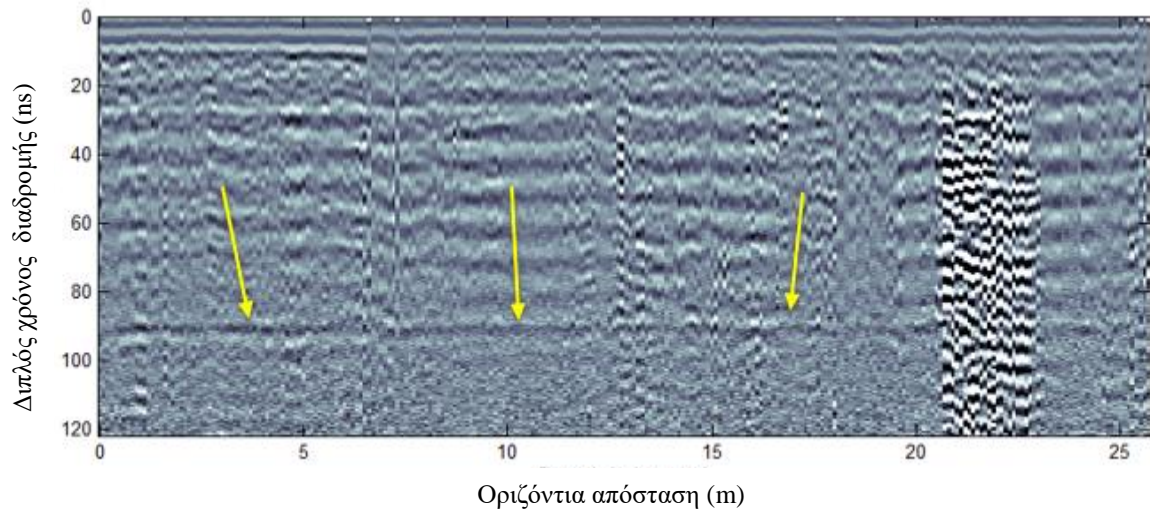
Βλέπουμε ότι το πάχος είναι κατά 5 εκατοστά μεγαλύτερο από αυτό που εκτιμήθηκε στο κεφάλαιο 4.4.2.

Πρέπει να επισημανθεί ότι το πάχος αυτό (30 cm) προκύπτει με βάση την ταχύτητα που προέκυψε από το μοντέλο ($u_1 = 0.1 \text{ m/ns}$). Η πραγματική ταχύτητα διάδοσης στο επιφανειακό στρώμα του τείχους ίσως είναι λίγο μεγαλύτερη, που σημαίνει ότι σε αυτήν την περίπτωση θα αυξηθεί και το πάχος.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό του πάχους του δεύτερου στρώματος του τείχους, το οποίο βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος, χρησιμοποιήθηκε η τομή του σχήματος 4.7, όπου χρησιμοποιήθηκε κεραία-πομπού με συχνότητα 225 MHz. Στην τομή αυτή διακρίνεται η διεπιφάνεια μεταξύ του τείχους και των επιχωματώσεων (σχήμα 4.20).

Η ταχύτητα διάδοσης στο υπόλοιπο τείχος, όπως προαναφέρθηκε, εκτιμάμε ότι θα είναι περίπου $u_3 = 0.08 \text{ m/ns}$. Άρα:

$$\text{Πάχος Δεύτερου Στρώματος} = 0.5 * 0.08 \text{ m/ns} * (95-6) \text{ ns} = 3.56 \text{ m}$$

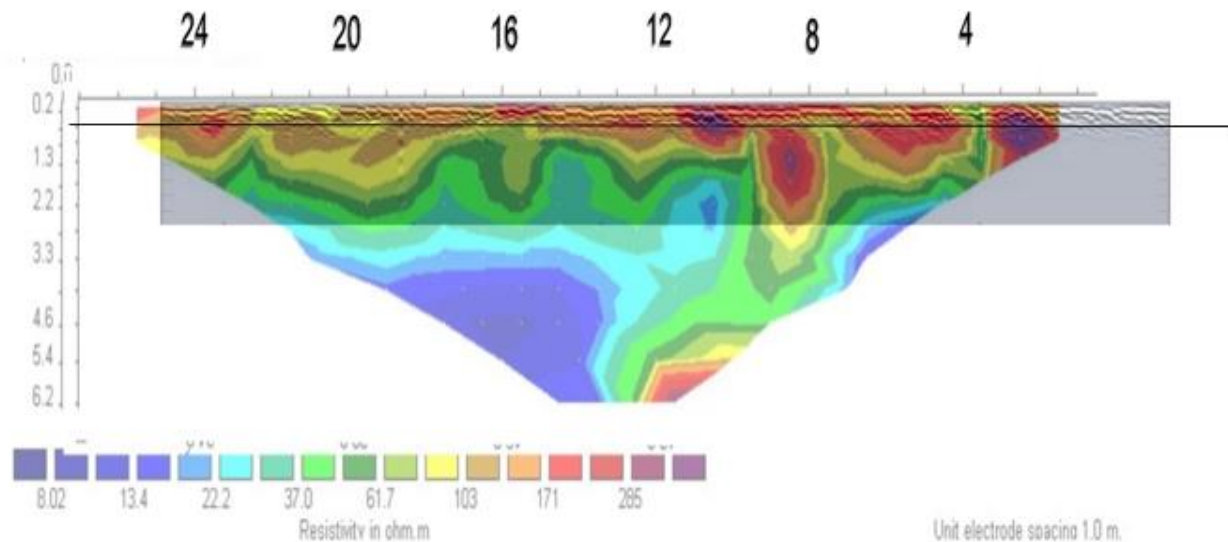


Σχήμα 4.20: Τα κίτρινα βελάκια δείχνουν τη διεπιφάνεια μεταξύ δεύτερου και τρίτου στρώματος που φαίνεται καθαρά στην τομή και τέμνει τον άξονα του διπλού χρόνου διαδρομής περίπου στα 95 ns. Αριστερά προς δεξιά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά. Γραμμή μελέτης 27 m.

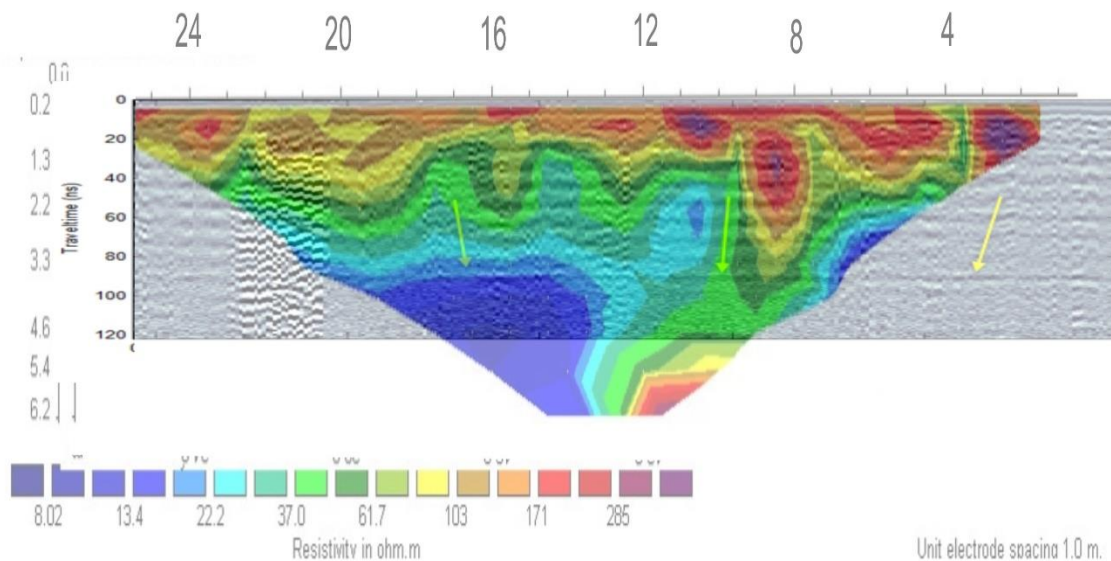
$$\text{Πάχος Τείχους} = 30 \text{ cm} + 3.56 \text{ cm} = 3.86 \text{ m}$$

Άρα, προκύπτει ότι το συνολικό πάχος του τείχους είναι περίπου 3.86 m.

Όσον αφορά τις επιχωματώσεις, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν ταχύτητα διάδοσης H/M κυμάτων η $u_2 = 0.06 \text{ m/ns}$, όμως τα δεδομένα από τις τομές δεν επαρκούν ώστε να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με το πάχος τους, καθώς απαιτείται μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης.



Σχήμα 4.21: Στο σχήμα διακρίνεται η διεπιφάνεια (λεπτή μαύρη οριζόντια γραμμή) μεταξύ του επιφανειακού στρώματος του τείχους και του υπόλοιπου τείχους, μέσα από την υπέρθεση των τομών της της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ (450 MHz). Από δεξιά προς αριστερά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά. Γραμμή μελέτης 27 m.



Σχήμα 4.22: Στο σχήμα διακρίνεται η διεπιφάνεια (δείχνουν τα κίτρινα βελάκια) μεταξύ του τείχους και των επιχωματώσεων από την εκσκαφή του πρανούς, μέσα από την υπέρθεση των τομών της της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ (225 MHz). Από τα δεξιά προς τα αριστερά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά. Γραμμή μελέτης 27 m.

Συνεπώς, σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα της μεθόδου γεωραντάρ και κάνοντας υπέρθεση των τομών γεωραντάρ και ηλεκτρικής τομογραφίας προκύπτει ότι το πάχος του πρώτου

στρώματος του τείχους είναι περίπου 30-35 cm (σχήμα 4.21). Ο προσδιορισμός αυτός βασίζεται κατά κύριο λόγο στα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέθοδο γεωραντάρ και όχι τόσο στην ηλεκτρική τομογραφία, όπου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.21, ο ακριβής καθορισμός των ορίων μεταξύ του επιφανειακού στρώματος του τείχους και του υπόλοιπου τείχους είναι αρκετά δύσκολος λόγω της πολυπλοκότητας της κατανομής των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η απόκλιση αυτή παρατηρούμε ότι μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος, όπου τα αποτελέσματα γεωραντάρ και ηλεκτρικής τομογραφίας συγκλίνουν περισσότερο. Έτσι, σύμφωνα με το σχήμα 4.22 το συνολικό πάχος τείχους ενδέχεται να είναι περίπου 3.86 m, τιμή η οποία, επίσης, συμφωνεί ή βρίσκεται πολύ κοντά στις επιτόπου μετρήσεις. Τέλος, η ύπαρξη αντιρίδας δεν επιβεβαιώνεται από τις τομές γεωραντάρ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1. Συμπεράσματα

Από τη γεωφυσική διασκόπηση με τις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ, αλλά και από τις επιτόπου μετρήσεις σε διάφορα κατεστραμμένα σημεία του τείχους στην πόλη των Χανίων προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα.

Αρχικά, το πάχος και η δομή των ενετικών τειχών των Χανίων δεν είναι ίδια σε όλα τα σημεία. Αυτό οφείλεται αφ' ενός στο γεγονός ότι σε διάφορα σημεία τα τείχη έχουν υποστεί σημαντικές φθορές και έχουν επισκευαστεί αρκετές φορές με το πέρασμα των χρόνων, αφ' ετέρου στο γεγονός ότι, εξ' αρχής, είχαν κατασκευαστεί με διαφορετικό πάχος ανάλογα με την περιοχή, ώστε η αντοχή τους να είναι ανάλογη με το φορτίο που επιδράει πάνω τους (πχ Πρανή, κτήρια κλπ).

Συγκρίνοντας μέσω της υπέρθεσης τομών τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, παρατηρούμε ότι χωρίς τη συνδρομή της μεθόδου γεωραντάρ θα ήταν αρκετά δύσκολο να υπάρξουν ακριβείς εκτιμήσεις, λόγω της πολυπλοκότητας της κατανομής των ηλεκτρικών αντιστάσεων, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.21 και 4.22. Στην ηλεκτρική τομογραφία μπορούμε να διακρίνουμε τα 3 στρώματα (τείχος, επιχωματώσεις) και να προσεγγίσουμε το πάχος τους, όμως είναι αρκετά δύσκολη η ακριβής οριοθέτησή τους, η οποία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της υπέρθεσης των τομών γεωραντάρ, όπου δίνουν πιο λεπτομερή και ακριβή αποτελέσματα.

Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε περιπτώσεις, όπως τα ενετικά τείχη, όπου δεν απαιτείται πολύ μεγάλο βάθος διασκόπησης αλλά περισσότερη ακρίβεια στον προσδιορισμό πάχους ή ορίων υλικών/στρωμάτων, η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας δίνει μια πιο γενική εικόνα. Επίσης, σε αυτή τη μέθοδο παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα για ίχνη τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά στην εξωτερική επιφάνεια όπου βρίσκεται ο εξοπλισμός σε σχέση με τη μέθοδο γεωραντάρ (πχ καθορισμός πρώτου στρώματος). Επομένως, για μικρότερα βάθη διασκόπησης και πολύπλοκες δομές, περισσότερο λεπτομερή αποτελέσματα (ακρίβειες της τάξης των μερικών εκατοστών) προκύπτουν από τη μέθοδο του γεωραντάρ.

Όσον αφορά την επεξεργασία με τη χρήση κατασκευαστικού μοντέλου 2-D του MATGPR, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τέτοιου είδους έρευνες, αν και μέσα από τη χρήση του στην παρούσα εργασία προέκυψαν κάποια ερωτηματικά όσον αφορά την ανάλυση ταχυτήτων.

5.2. Προτάσεις

Σε περιπτώσεις έρευνας όπως αυτή που έγινε στα ενετικά τείχη των Χανίων, ο συνδυασμός των μεθόδων της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ μπορεί να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας μπορούν να αποτελέσουν έναν καλό οδηγό που θα βοηθήσει στην καλύτερη ερμηνεία των λεπτομερέστερων αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τη μέθοδο του γεωραντάρ. Βέβαια αν υπήρχε περιορισμός επιλογής μιας μόνο μεθόδου, η μέθοδος του γεωραντάρ θα ήταν η καλύτερη επιλογή για τέτοιου είδους έρευνες, εκτός των άλλων, και λόγω εξοικονόμησης χρόνου.

Σε ενδεχόμενη μελλοντική έρευνα που θα πραγματοποιηθεί στα τείχη, προκειμένου να υπάρξει ανακάλυψη νέων δομών ενδιαφέροντος θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν επιπλέον μετρήσεις σε μεγαλύτερη γραμμή μελέτης αλλάζοντας βασικές παραμέτρους για κάθε μέθοδο, όπως η συχνότητα, το βήμα διασκόπησης ή η ένταση του ρεύματος, ώστε να αυξηθεί και το βάθος διασκόπησης. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει επιπλέον έρευνα και σε άλλες γραμμές μελέτης στην ευρύτερη περιοχή,

χρησιμοποιώντας αρχικά τη μέθοδο γεωραντάρ και στη συνέχεια τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, όπου κριθεί ότι χρειάζεται, για καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Τζάνης Ανδρέας (2010).** ‘MATGPR’, Εγχειρίδιο χρήσης λογισμικού, Manual, Revision 2.2.4.3., Department of Geophysics University of Athens
- 2. Βαφειδής Α. (2001).** ‘Εφαρμοσμένη Γεωφυσική ΙΙ’. Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- 3. Βουράκη Γεωργία (2006).** ‘Research on a part of the Western Curtain of the Venetian Walls of Hania. Conservation Project focused on the field of building materials and conservation techniques.’, KUL, RILCC (Katholik University of Leuven- Raymond Lemaire Centre for Conservation of Historical buildings and sites) , Vouraki Georgia, Koenraad Van Balen, KUL-RLICC, Agioutantis Zacharias, TUC, Stavroulaki Maria TUC, Leuven
- 4. Γανταδάκη Άννα (2012).** ‘Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας σε χώρο ανέγερσης των κτηριακών εγκαταστάσεων του τμήματος ΜΗ.ΠΕΡ. του Πολυτεχνείου Κρήτης’, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
- 5. Μπουρμπουλά Μαρία (2012).** ‘Επιλεκτική επεξεργασία δεδομένων από την αρχαιομετρική έρευνα στην περιοχή της Αρχαίας Μαντίνειας’, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας
- 7. Πλιάμπας Γεώργιος (2014).** ‘Γεωφυσική διασκόπηση στα Φαλάσαρνα με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας’, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
- 8. Πουλιούδης Γεώργιος (2001).** ‘Μέθοδοι επεξεργασίας καταγραφών γεωραντάρ’, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
- 9. John M. Reynolds (1997)** ‘An Introduction to Applied and Environmental Geophysics’, Geo-Sciences, Ltd, UK
- 10. Res2dinv, (2001).** Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Manual, Version 3.4, Geotomo Software

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

www.haniotika-nea.gr

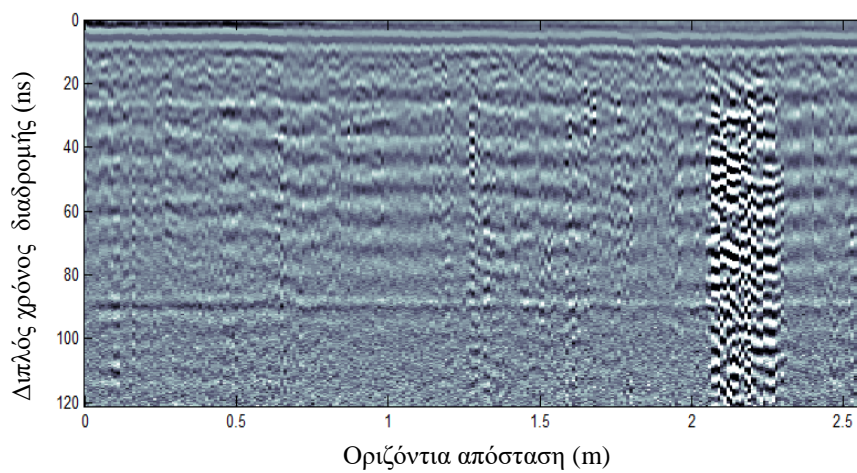
<http://www.cretanbeaches.com>

<http://www.xania.gr>

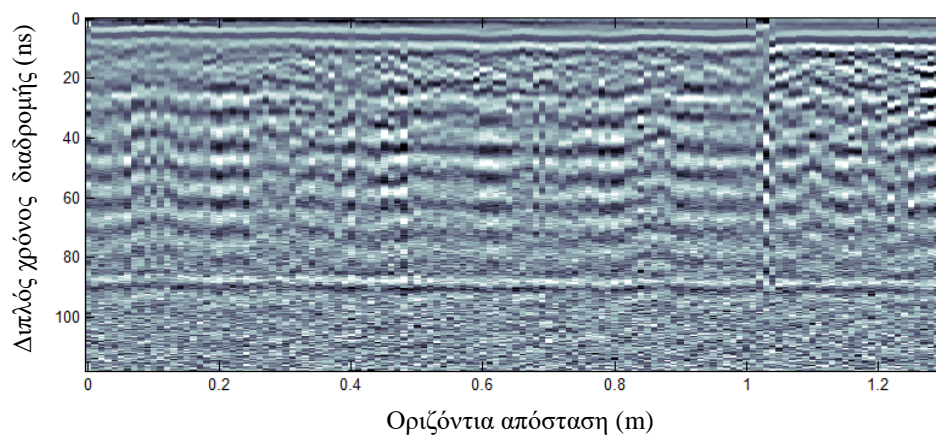
<http://www.geo.auth.gr>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

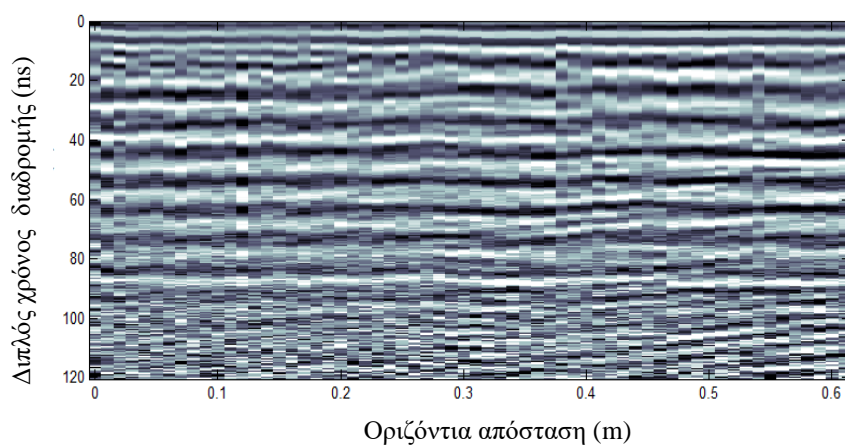
Παρακάτω παρουσιάζονται επιπλέον τομές γεωραντάρ από την περιοχή μελέτης που ερευνήθηκαν, όμως για διάφορους λόγους δεν προέκυψαν χρήσιμα ή επιπλέον συμπεράσματα.



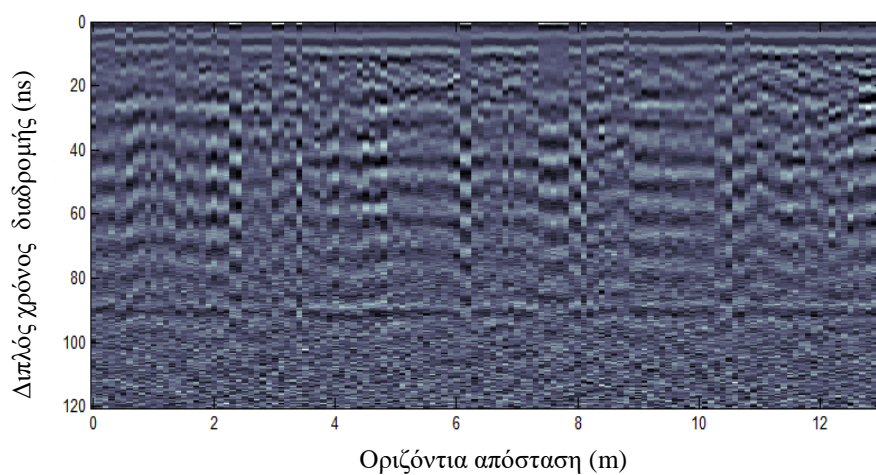
Σχήμα 1: Επεξεργασμένη τομή μήκους 2.5 m. Συχνότητα πομπού H/M κυμάτων 225 MHz. Ύψος γραμμής μελέτης 1.7 m από το έδαφος. Δυτική τάφος. Αριστερά προς δεξιά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά



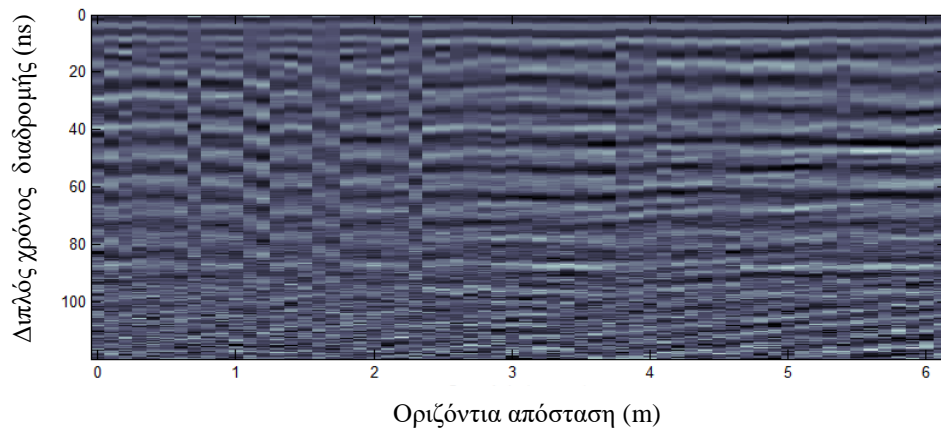
Σχήμα 2: Επεξεργασμένη τομή μήκους 1.2 m. Συχνότητα πομπού H/M κυμάτων 225 MHz.. Ύψος γραμμής μελέτης 1.7 m από το έδαφος. Δυτική τάφος. Αριστερά προς δεξιά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά



Σχήμα 3: Επεξεργασμένη τομή μήκους 0.6 m. Συχνότητα πομπού H/M κυμάτων 225 MHz. Ύψος γραμμής μελέτης 1.7 m από το έδαφος. Δυτική τάφρος. Αριστερά προς δεξιά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά



Σχήμα 4: Επεξεργασμένη τομή μήκους 12 m. Συχνότητα πομπού H/M κυμάτων 225 MHz. Ύψος γραμμής μελέτης 1.7 m από το έδαφος. Δυτική τάφρος. Αριστερά προς δεξιά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά



Σχήμα 5: Επεξεργασμένη τομή μήκους 6 m. Συχνότητα πομπού H/M κυμάτων 225 MHz. Αριστερά προς δεξιά είναι η κατεύθυνση Νότος προς Βορρά. Η τομή αυτή είναι από μετρήσεις που έγιναν στα τείχη της ανατολικής τάφρου των Χανίων.