



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΦΙΛΙΠΠΑΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
‘ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ’,
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ‘ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ’

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΦΙΛΙΠΠΑΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών ‘Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία’, Κατεύθυνση
‘Εφαρμοσμένη Γεωφυσική

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 21/07/2021

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Αναπληρωτής Καθηγητής Γεώργιος Βαργεμέζης, Επιβλέπων

Καθηγητής Παναγιώτης Τσούρλος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής Γρηγόριος Τσόκας, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής



© Φιλίππακος Γεώργιος, Γεωλόγος, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Filippakos Georgios, Geologist, 2021

All rights reserved.

STUDY OF WALL REINFORCEMENT IN TUNNELS WITH THE APPLICATION
OF GEOPHYSICAL METHODS – *Master Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή αποτελεί μελέτη περίπτωσης με αντικείμενο τη διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των παρακάτω γεωφυσικών μεθόδων σε περιβάλλον σήραγγας. Συγκεκριμένα, της μεθόδου του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας, σε συνδυασμό με τη μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ. Η περιοχή έρευνας όπου έλαβε μέρος η διασκόπηση είναι η σήραγγα που βρίσκεται στην περιοχή των καταρρακτών της Έδεσσας.

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο δυτικό τοίχιο της σήραγγας χαρτογραφήθηκε ο μεταλλικός οπλισμός, το πάχος του οπλισμένου σκυροδέματος, η επαφή του σκυροδέματος με την τραβερτινική βραχώμαζα, ζώνες υγρασίας καθώς και πιθανές ασυνέχειες στον τραβερτινικό σχηματισμό.

Οι παραπάνω γεωφυσικές μέθοδοι αποδείχτηκαν αποτελεσματικές καθώς συνέβαλαν συνδυαστικά στη χαρτογράφηση πολλαπλών εσωτερικών δομών. Η μοντελοποίηση δεδομένων συνετέλεσε σημαντικά ως προς την ερμηνεία των γεωφυσικών προφίλ και συνείσφερε στην εξαγωγή συμπερασμάτων.



ABSTRACT

This master's thesis is a case study to investigate the applicability of the following geophysical methods in a tunnel environment. Specifically, the method of geo-radar and electrical tomography, in combination with the modeling of geo-radar data. The research area where the survey took place is the tunnel located in the area of the waterfalls of Edessa.

The research carried out on the western wall of the tunnel mapped the metal reinforcement, the thickness of the reinforced concrete, the contact of the concrete with the travertine rock mass, moisture zones as well as possible discontinuities in the travertine formation.

The combination of the above geophysical methods proved to be effective as it resulted to the mapping of multiple internal structures. Data modeling contributed significantly to the interpretation of geophysical profiles and contributed to the conclusions.



Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλα τα άτομα που συνέβαλαν με το δικό τους τρόπο στην περάτωση της παρούσας εργασίας. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διατριβής κ. Βαργεμέζη Γεώργιο, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ., για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε καθώς και την πολύτιμη συνδρομή του στην βελτίωση της επιστημονική μου προσέγγισης.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Γιαννόπουλο Αντώνη, ανώτερο λέκτορα του πανεπιστημίου του Εδιμβούργου, για την αρχική ανάπτυξη του λογισμικού grpMAX.

Ευχαριστώ ακόμα τη Δρ. Διαμαντή Νεκταρία για τη συμβολή της στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και για τις ουσιαστικές προτάσεις της σε θέματα του grpMAX.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Αγγελή Δημήτρη για τις χρήσιμες συμβουλές του, τη βοήθεια κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καθώς και για την παραχώρηση του λογισμικού μοντελοποίησης.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσούρλο Παναγιώτη, καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ., για τις υποδείξεις του καθώς και για τη συνεργασία του κατά τη διάρκεια συλλογής δεδομένων.

Επιπλέον ευχαριστώ το Δρ. Φίκο Ηλία για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής.

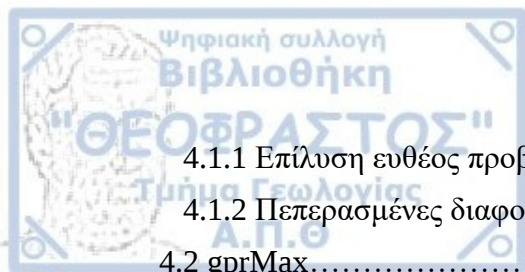
Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στους συμφοιτητές μου Νίκο Κορδάτο, Χρήστο Χριστοφόρου, Άγγελο Αλμπάνη, Ευτυχία Αμανατίδου και Μυρτώ Γρούμπα για τη βοήθειά τους στη συλλογή δεδομένων καθώς και για τη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου στην οποία οφείλω όλη την πορεία των σπουδών μου μέχρι σήμερα.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διατριβής.....	1
1.2 Μεθοδολογία.....	2
1.3 Δομή.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	4
2.1 Ιστορικά στοιχεία και μορφολογικά χαρακτηριστικά.....	4
2.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	6
2.3 Σύντομη περιγραφή του προβλήματος.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	9
3.1 Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar).....	9
3.1.1 Εφαρμογές.....	9
3.1.2 Βασικές αρχές.....	10
3.1.3 Βασικές διατάξεις.....	12
3.1.4 Διακριτική ικανότητα και βάθος διείσδυσης	13
3.1.5 Ορολογία.....	14
3.1.6 Επεξεργασία.....	15
3.2 Ηλεκτρική τομογραφία (Electrical Resistivity Tomography).....	18
3.2.1 Εφαρμογές.....	18
3.2.2 Βασικές αρχές.....	18
3.2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	19
3.2.4 Διακριτική ικανότητα και βάθος διείσδυσης	22
3.2.5 Θόρυβος και ευαισθησία διατάξεων	23
3.2.6 Επεξεργασία.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	26
4.1 Αριθμητικές μέθοδοι.....	26



4.1.1 Επίλυση ευθέος προβλήματος (GPR Forward Problem).....	27
4.1.2 Πεπερασμένες διαφορές στο πεδίο του χρόνου (FDTD).....	28
4.2 gprMax.....	30
4.2.1 Κατασκευή μοντέλου.....	30
4.2.2 Εντολές μοντελοποίησης (CMD).....	33
4.3 Μοντελοποίηση.....	35
4.3.1 1 ^ο Χαρακτηριστικά στόχων και γεωραντάρ.....	35
4.3.2 Σχηματισμός μοντέλων.....	36
4.4 Χρήση επιπλέον λογισμικών.....	47
4.4.1 Model Designer.....	47
4.5 Συμπεράσματα.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	51
5.1 Γεωραντάρ.....	53
5.1.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός.....	53
5.1.2 Επεξεργασία.....	54
5.1.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία.....	55
5.2 Ηλεκτρική τομογραφία.....	65
5.2.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός.....	65
5.2.2 Επεξεργασία.....	67
5.2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία.....	69
5.3 Συνδυαστική ερμηνεία.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	76
6.1 Συμπεράσματα.....	76
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα εισαγωγικά στοιχεία της διατριβής. Περιλαμβάνει την περιγραφή της μελέτης περίπτωσης και το σκοπό της, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και τη δομή της.

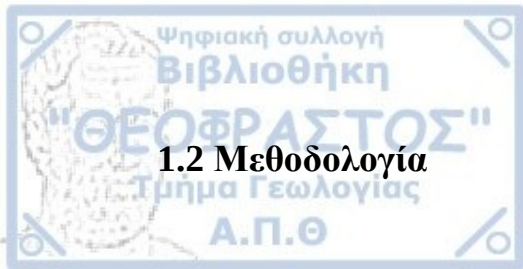
1.1 Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης

Η διάνοιξη μιας σήραγγας γίνεται συνήθως τμηματικά. Μετά τη διάνοιξη της διατομής της σήραγγας τοποθετείται άμεσα ένα σύστημα προσωρινής υποστήριξης. Η προσωρινή υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, αγκύρια και μεταλλικά πλαίσια. Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα συντίθεται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή υλικά και εκτοξεύεται υπό πίεση. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της διάνοιξης και η βραχώμαζα ισορροπήσει, τοποθετείται η μόνιμη επένδυση. Η μόνιμη επένδυση κατασκευάζεται από άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, από δακτυλίους σκυροδέματος ή προκατασκευασμένα κομμάτια σκυροδέματος. (Στρατηγέας, 2010, Μπλάνα, 2011).

Η μελέτη περίπτωσης διερευνεί την εφαρμοσιμότητα των παρακάτω γεωφυσικών μεθόδων σε περιβάλλον σήραγγας. Συγκεκριμένα, του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας σε συνδυασμό με τη μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ. Η περιοχή έρευνας όπου έλαβε μέρος η διασκόπηση είναι η σήραγγα που βρίσκεται στην περιοχή των καταρρακτών της Έδεσσας

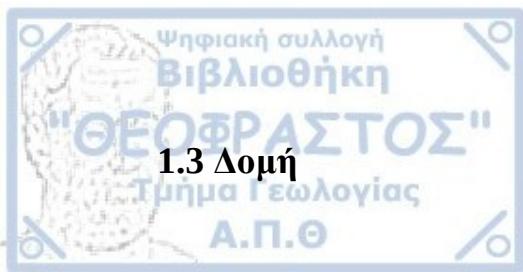
Στόχος της γεωφυσικής διασκόπησης ήταν η χαρτογράφηση γεωλογικών και τεχνικών δομών της σήραγγας. Συγκεκριμένα η χαρτογράφηση του μεταλλικού οπλισμού, του πάχους του οπλισμένου σκυροδέματος, της επαφής σκυροδέματος-τραβερτινικής βραχώμαζας καθώς και των γεωλογικών δομών της.

Έχουν γίνει πολλές γεωφυσικές διασκοπήσεις σε σήραγγες με στόχο την χαρτογράφηση των εσωτερικών τεχνικών δομών καθώς και των γεωλογικών. Κάποιες από αυτές έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνδυαστική χρήση γεωφυσικών μεθόδων, όπως σεισμικών με ηλεκτρικών (Heikkinen and Saksa, 1998, Lin et al., 1996, Cardarelli and Bernabini, 1997), ή ηλεκτρικών με γεωραντάρ (Santarato et al., 1998).



Παρακάτω παρουσιάζεται με βήματα η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

1. Συγκέντρωση και μελέτη βιβλιογραφίας σχετικής με το αντικείμενο μελέτης.
2. Εκτίμηση της καταλληλότερης μεθόδου γεωφυσικής διασκόπησης, γεωραντάρ και ηλεκτρική τομογραφία. Συλλογή δεδομένων από την εφαρμογή των μεθόδων στην περιοχή έρευνας.
3. Κατασκευή γεωφυσικού μοντέλου και επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων.
4. Συνδυαστική ερμηνεία αποτελεσμάτων γεωφυσικών διασκοπήσεων και γεωφυσικού μοντέλου



1.3 Δομή

Η δομή της εργασίας διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια. Το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου με εξαίρεση το πρώτο που είναι η εισαγωγή συνοψίζεται παρακάτω.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται η περιγραφή της περιοχής μελέτης. Παρουσιάζονται μορφολογικά και γεωλογικά δεδομένα για την περιοχή της σήραγγας κάτω από τους καταρράκτες της Έδεσσας, ιστορικά στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή καθώς και μια συνοπτική περιγραφή του ερευνητικού σκοπού.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικές θεωρίες και λειτουργίες που διέπουν τις μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης που εφαρμόστηκαν. Στη συνέχεια περιγράφεται το στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων της κάθε μεθόδου.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η κατασκευή του γεωφυσικού μοντέλου για την περιοχή της σήραγγας στην Έδεσσα. Επιπλέον, περιγράφεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή αυτού του μοντέλου καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει την εφαρμογή του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή έρευνας. Περιγράφεται η διαδικασία των μετρήσεων για τη συλλογή δεδομένων, το στάδιο της επεξεργασία τους και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους.

Τέλος, στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής καθώς και απόψεις για μελλοντικές έρευνες.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

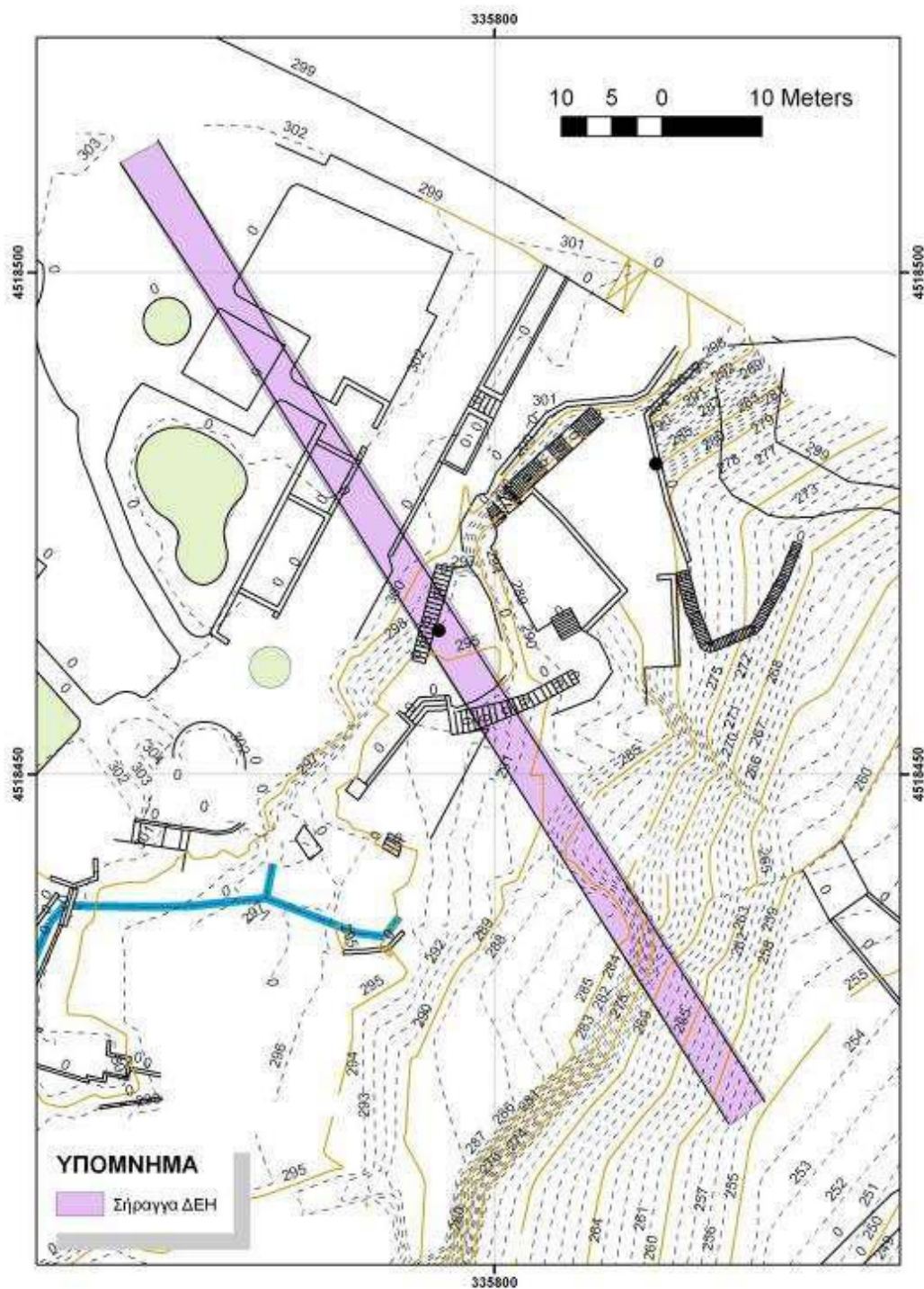
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί εξετάζεται η σήραγγα που βρίσκεται στην περιοχή των καταρρακτών της Έδεσσας ως προς τα μορφολογικά της χαρακτηριστικά, τα ιστορικά της στοιχεία και τη γεωλογία της. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται συνοπτικά οι στόχοι της έρευνας.

2.1 Ιστορικά στοιχεία και μορφολογικά χαρακτηριστικά

Η σήραγγα κατασκευάστηκε τη δεκαετία του '60 ως έργο της ΔΕΗ και βρίσκεται μεταξύ του πάρκου καταρρακτών και του Κανναβουργείου. Οι διαστάσεις της είναι περίπου 4 m πλάτος και 117 m μήκος, η οροφή της έχει σχήμα θόλου με μέγιστο ύψος τα 4.5 m που είναι στο κέντρο. Βασικός σκοπός κατασκευής της σήραγγας ήταν η εκτροπή επιφανειακού τμήματος του Εδεσσαίου ποταμού. Η εκτροπή αυτή θα είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από την εκμετάλλευση της ενέργειας ροής μέσα από τη σήραγγα. Ο σκοπός αυτού του έργου αποτράπηκε έτσι η σήραγγα δεν έφτασε ποτέ στην επιφάνεια (Vargemezis et al, 2009).

Υψομετρικά η σήραγγα τοποθετείται ανάμεσα στην περιοχή του πάρκου-εστιατορίου που είναι στα 302 m και στο σημείο όπου καταλήγουν τα νερά από την πτώση των καταρρακτών (**Σχήμα 2.1**). Η είσοδος της σήραγγας βρίσκεται σε ύψος 253 m και η κλίση της είναι περίπου 14.5°. Ο υπολογισμός της κλίσης έγινε με χωροβάτη που χρησιμοποιήθηκε από την είσοδό της σήραγγας. Κατά μήκος της σήραγγας οι τιμές της κλίσης κυμαίνονται από 14.30° έως 14.55°, γεγονός που οφείλεται στο χωμάτινο δάπεδο. Από την κλίση και το μήκος μπορεί υπολογιστεί το υψόμετρο του δαπέδου και της οροφής στο τέλος της σήραγγας. Η τιμή του δαπέδου υπολογίζεται στα 283 m ενώ της οροφής στα 288 m αντίστοιχα. Η υψομετρική διαφορά του επιπέδου της σήραγγας στο τέλος της με το επίπεδο του πάρκου-εστιατορίου είναι περίπου 14 με 15 m (Vargemezis et al, 2009).

Το μεγαλύτερο μέρος της σήραγγας έχει επενδυθεί από οπλισμένο σκυρόδεμα (shotcrete, gunite). Συγκεκριμένα, από τα 117 m του συνολικού της μήκους, τα 95 m των τοιχωμάτων της είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ στα τελευταία 25 m διακρίνεται κατασκευή σιδηροδοκών και παρουσιάζεται σχηματισμός τραβερτίνη.



Σχήμα 2.1 Τοπογραφικός χάρτης της σήραγγας όπου φαίνονται τα σημεία καθόδου στο χώρο του καταρράκτη.

2.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης γεωλογικά ανήκει στη ζώνη Αξιού των εσωτερικών Ελληνίδων και πιο συγκεκριμένα στην υποζώνη της Αλμωπίας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που χαρακτηρίζουν την υποζώνη της Αλμωπίας είναι: οφιόλιθοι με συνοδά ιζηματογενή βαθιά θάλασσας (ασβεστόλιθοι, σχιστόλιθοι) και ιζήματα Άνω Κρητιδικού τα οποία έχουν αποτεθεί σε μεταμορφωμένα πετρώματα.

Με βάση το γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (**Σχήμα 2.2**) για την ευρύτερη περιοχή μελέτης, γίνεται περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών από τους νεότερους προς τους παλαιότερους:

Ολόκαινο:

Σύγχρονα ποταμολιμναία χαλίκια και ιλύς (Al_1).

Σύγχρονοι και πρόσφατοι κώνοι χειμαρρωδών αποθέσεων (Cs_5).

Πλειστόκαινο:

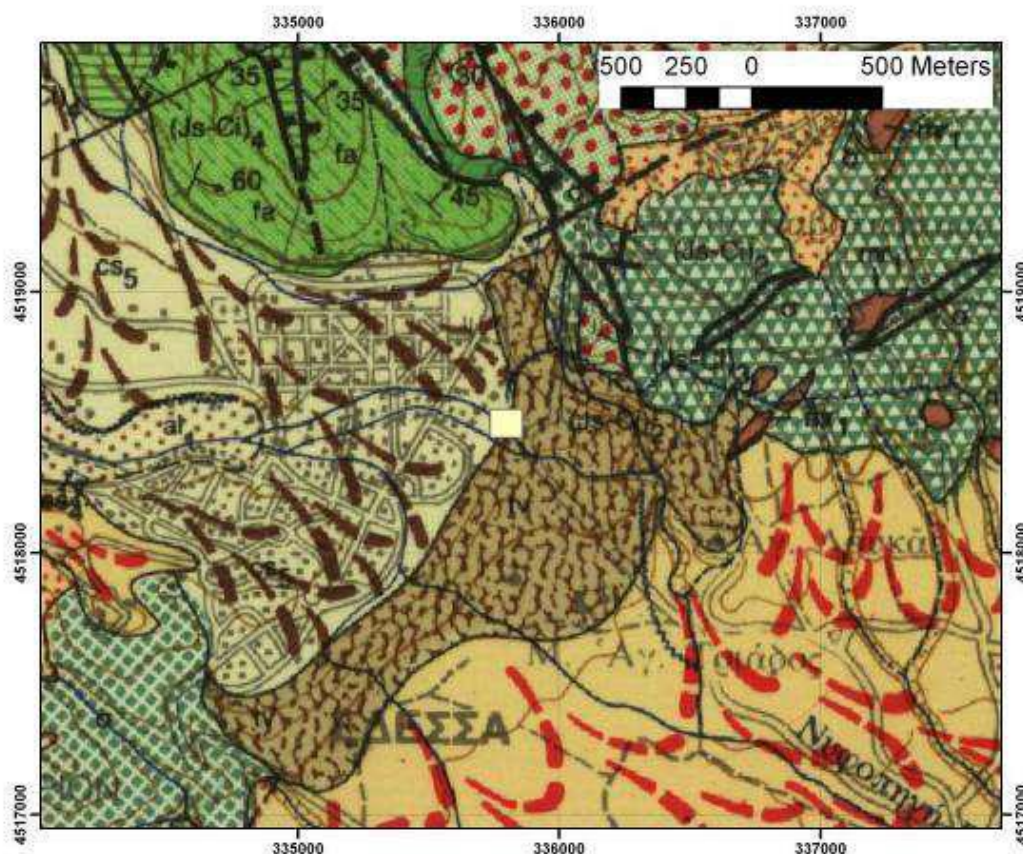
Παλαιοί κώνοι χειμαρρωδών αποθέσεων ελαφρά συγκολλημένοι (Cs_3).

Ασβεστολιθικοί τραβερτίνες, αναβαθμίδες Φλαμουριάς και Έδεσσας, με σπόρους και γύρη τεταρτογενούς ηλικίας (Tn).

Φλύσχης Αλμωπίας, αδιαίρετος με εναλλαγές από πάνω προς τα κάτω: μαύροι ασβεστόλιθοι και ασβεστοσχιστόλιθοι, σχιστόλιθοι και ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και σχιστόλιθοι και μαύροι σχιστόλιθοι (Fa).

Ιζηματογενή μίγματα με τοφφιτικό συνδετικό υλικό της ενότητας Εκκλησοχωρίου. Από πάνω προς τα κάτω συντίθενται από τεμάχια ασβεστολίθων, σχιστόλιθους τοφφιτικούς και πυροκλαστικά, λατυποπαγή, τόφφους κα μεταρυόλιθους ($(Js-Cl)_3$).

Οφιολιθικά μίγματα με πρασινιτικό συνδετικό υλικό της ενότητας Εκκλησοχωρίου ($(Js-Cl)_2$).



Σχήμα 2.2 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής έρευνας (γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, Φύλλο Έδεσσας) , η περιοχή ενδιαφέροντος απεικονίζεται με κίτρινο τετράγωνο.

Η σήραγγα έχει κατασκευαστεί στο σχηματισμό του τραβερτίνη (CaCO_3) στον οποίο έχει δημιουργηθεί και το σπήλαιο της Έδεσσας. Για το συγκεκριμένο τύπο τραβερτίνη δεν έχουν γίνει ιδιαίτερες μελέτες σχετικά με τη φύση και τη δημιουργία του.

Σε εργασία του ο Βαβλιάκης (1998) διερευνά τον τρόπο σχηματισμού του σπηλαίου της Έδεσσας και συμπεραίνει πως η ταχύτητα απόθεσης του CaCO_3 είναι μεγαλύτερη από 1 cm το χρόνο και η απόθεσή του πραγματοποιείται με δυο τρόπους :

1) Κατά τη ροή του επιφανειακού νερού, το CaCO_3 διαλυτοποιείται και αποτίθεται σταδιακά. Η σύσταση του νερού σε CaCO_3 κυμαίνεται από 250 mg/l έως 337 mg/l ανάλογα με την εποχή (Soulios, 1978) έτσι το CaCO_3 αποτίθεται με τη μορφή στρώσεων μεγάλης ή μικρής κλίσης. Ο τραβερτίνης που σχηματίζεται με αυτό τον τρόπο ονομάζεται στρωματομόρφος

2) Το CaCO_3 που περιέχεται στο νερό των καταρρακτών αποτίθεται στο υγρό υπόστρωμα κάτω από του καταρράκτες όπου διαβιούν βρυόφυτα. Τα βρυόφυτα βαθμιαία καλύπτονται από ένα στρώμα CaCO_3 (περιασβέστωση) και με το πέρασ του χρόνου νεκρώνονται. Στα ήδη περιασβεστωμένα βρυόφυτα αναπτύσσονται καινούρια τα οποία στη συνέχεια ακολουθούν την ίδια διαδικασία και έτσι σχηματίζεται ο βρυοφυτικός τραβερτίνης.



Σχήμα 2.3 Βρυοφυτικός (πάνω) και στρωματόμορφος τραβερτίνης (κάτω) (Vargemezis et al., 2008)

2.3 Σύντομη περιγραφή του προβλήματος

Με την πάροδο του χρόνου τα τεχνικά έργα συμπεριλαμβανομένου και τη σήραγγα στην Έδεσσα γίνονται επιρρεπή σε φθορές λόγω υγρασίας αλλά και των δομικών τους χαρακτηριστικών. Οι φθορές αυτές εξελίσσονται προοδευτικά σε μεγάλο χρονικό διάστημα και η αντιμετώπισή τους προϋποθέτει την έγκαιρη ανίχνευση καθώς και παρακολούθηση. Οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν μη καταστρεπτικά την εσωτερική δομή του τεχνικού έργου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια περιγραφής της δομής του οπλισμού της σήραγγας, του ζωνών υγρασίας καθώς και της επικαλυμμένης τραβερτινικής βραχώμαζας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζονται η μέθοδος του Γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας. Το γεωραντάρ αποτελεί μια ηλεκτρομαγνητική μέθοδο ενώ η ηλεκτρική τομογραφία είναι μια ηλεκτρική μέθοδος. Για την κάθε μέθοδο περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας, οι εφαρμογές, οι τυπικές διατάξεις λειτουργίας καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων τους.

3.1 Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)

Το γεωραντάρ είναι μια σύγχρονη μέθοδος γεωφυσικών διασκοπήσεων με ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αποτελεί μια διαδεδομένη μέθοδο η οποία αναπτύχθηκε ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης. Αντικείμενο της διασκόπησης με γεωραντάρ είναι η διάκριση υποεπιφανειακών διαχωριστικών επιφανειών μεταξύ υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες.

3.1.1 Εφαρμογές

Η χρήση του γεωραντάρ απαντάται σε μια πληθώρα εφαρμογών που κυμαίνεται από μελέτες σε παγετώνες μέχρι πλανητικές έρευνες (Fa, 2013). Έχει τις περισσότερες εφαρμογές από οποιαδήποτε γεωφυσική τεχνική. Οι εφαρμογές του μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με τη διακριτική ικανότητα και το βάθος διασκόπησης που απαιτείται για το σκοπό της εκάστοτε έρευνας (Travassos et al., 2018). Συγκεκριμένα, σε έρευνες που απαιτείται υψηλότερη διακριτική ικανότητα χρησιμοποιούνται υψηλότερης συχνότητας κεραίες ενώ σε έρευνες που θεωρείται πιο σημαντικό το βάθος διείσδυσης χρησιμοποιούνται κεραίες χαμηλότερης συχνότητας.

Μερικές από τις πιο τυπικές εφαρμογές του γεωραντάρ παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μελέτες σε τεχνικά έργα (σήραγγες, οδοποιία, γέφυρες, κτήρια).
- Γεωλογικές και περιβαλλοντικές μελέτες.
- Αρχαιολογικές μελέτες.
- Ανίχνευση ναρκών.

Στις δημοσιευμένες εργασίες που ακολουθούν υπάρχει μια πιο εκτενής παρουσίαση των εφαρμογών του γεωραντάρ: Cardimona, 2002, Leucci, 2008, Annan, 2009, Sudakova and Vladov, 2018.

3.1.2 Βασικές αρχές

Η βασική αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ έγκειται στην ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από κάποια διεπιφάνεια μεταξύ υλικών με διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Ακόμη, η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης έχει την ίδια βασική αρχή λειτουργίας μόνο που τα κύματα είναι σεισμικά.

Η κεραία εκπομπής (πομπός) του γεωραντάρ παράγει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς οι οποίοι διαδίδονται με ταχύτητα σε μονάδες νανοδευτερολέπτων (nsec). Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του κάθε μέσου διάδοσης. Όταν ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός ταξιδέψει εντός διεπιφάνειας μεταξύ υλικών διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, ένα τμήμα του θα ανακλαστεί και ένα τμήμα του θα διαθλαστεί συνεχίζοντας τη διάδοση. Το τμήμα που θα ανακλαστεί, επανέρχεται και καταγράφεται από την κεραία λήψης (δέκτης) ως χρόνος διαδρομής (nsec) και πλάτος κύματος. Η βασική αρχή της λειτουργίας του γεωραντάρ αναπαριστάται στο σχήμα 3.1.

Στην κεραία λήψης καταγράφονται και επιπλέον κύματα τα οποία χωρίζονται σε :

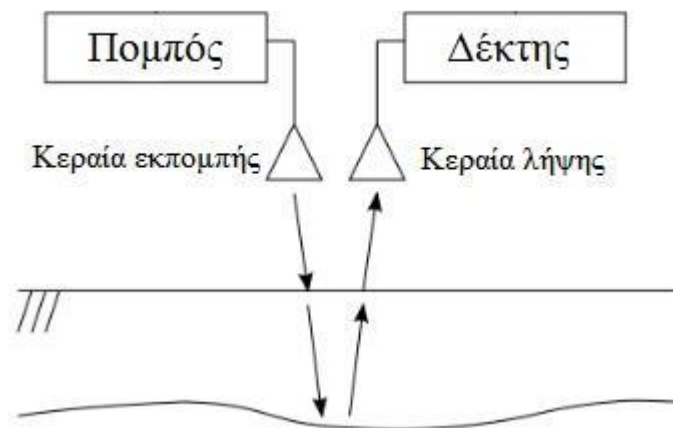
Απευθείας κύματα: Τα κύματα αυτά μεταδίδονται από τον πομπό στο δέκτη μέσω του αέρα. Τα κύματα στον αέρα διαδίδονται με τη ταχύτητα του φωτός (0,3 m/nsec) και για αυτό καταγράφονται πριν από τα υπόλοιπα κύματα. Παρουσιάζουν μεγάλα πλάτη στις καταγραφές τους λόγω μικρών απωλειών (Diamanti and Annan, 2017).

Κύματα υπεδάφους: Τα κύματα αυτά μεταδίδονται από τον πομπό στο δέκτη μέσω του υπεδάφους. Πρόκειται για κύματα τα οποία έχουν ανακλαστεί από κάποια διεπιφάνεια (ανακλώμενα κύματα), για πολλαπλά κύματα που παράγονται λόγω αντήχησης, για κύματα που δημιουργούνται λόγω της περίθλασης καθώς και για οριακά διαθλώμενα κύματα τα οποία διαδίδονται παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια (Diamanti and Annan, 2017).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς και σχετική διηλεκτρική σταθερά είναι ιδιότητες υλικών μεγάλης σπουδαιότητας για τη μέθοδο του γεωραντάρ. Ονομάζονται αλλιώς, διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών.

Σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r): Συχνά αναφέρεται και ως ηλεκτρική διαπερατότητα. Εκφράζει την αποθηκευτική ικανότητα ενός υλικού ως προς την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Προσδιορίζεται από το λόγο της ηλεκτρικής διαπερατότητας του υλικού (ϵ) προς την ηλεκτρική διαπερατότητα στο κενό (ϵ_0).

Ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ): Εκφράζει την ικανότητα των ηλεκτρικών φορτίων να διέρχονται σε κάποιο υλικό. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα επηρεάζει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσω της απώλειας ενέργειας. Υλικά με υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας χαρακτηρίζονται από μεγάλες απώλειες ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.



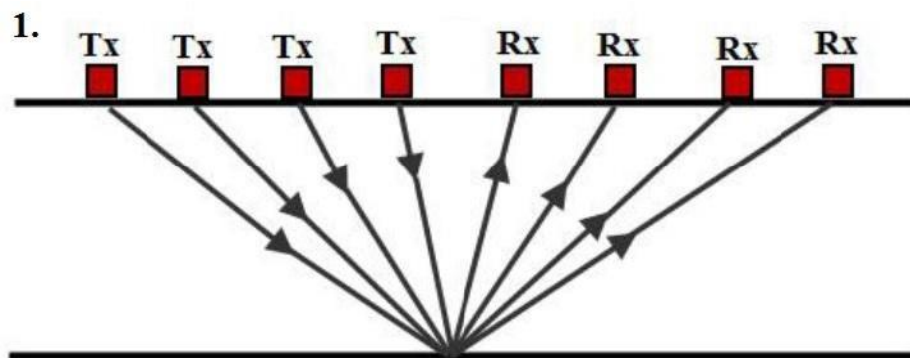
Σχήμα 3.1 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.

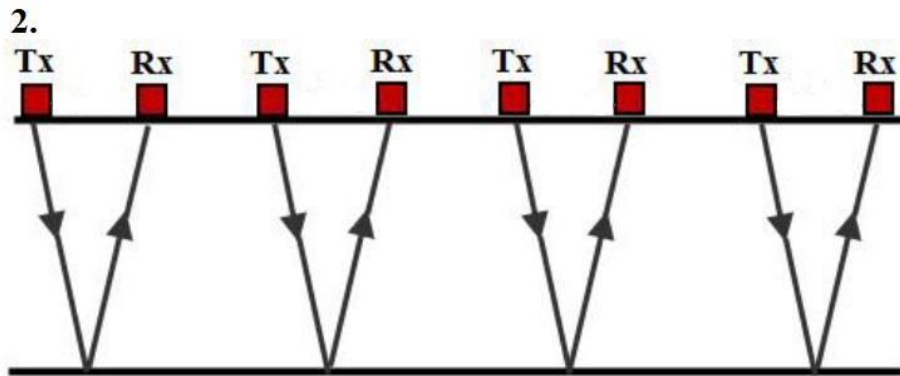
3.1.3 Βασικές διατάξεις

Ανάλογα με το αντικείμενο της διασκόπησης με γεωραντάρ επιλέγεται η κατάλληλη διάταξη λειτουργίας. Οι βασικές διατάξεις είναι η μέθοδος του κοινού σημείου (Common Mid-Point) και η μέθοδος σταθερής απόστασης (Common Offset).

Η διάταξη με τη μέθοδο του κοινού σημείου (Common Mid-Point) χρησιμοποιεί κάποιο σταθερό σημείο και από τις δύο πλευρές του τοποθετούνται ο πομπός και ο δέκτης. Οι αποστάσεις μεταξύ των δύο κεραιών αυξάνονται με σταθερό βήμα και με κέντρο το κοινό σημείο (**Σχήμα 3.2.1**). Για την εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ως προς το βάθος, χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη διάταξη, όπου μετράται η μεταβολή του χρόνου από και προς το σημείο ανάκλασης.

Η διάταξη με τη μέθοδο της σταθερής απόστασης (Common Offset) χρησιμοποιεί μια σταθερή απόσταση ανάμεσα στο πομπό και στο δέκτη (**Σχήμα 3.2.2**). Οι μετρήσεις γίνονται με τη ταυτόχρονη μετακίνηση του πομπού και του δέκτη κατά μήκος ενός προφίλ σάρωσης. Θεωρείται απαραίτητο σε αστικά περιβάλλοντα οι δύο είναι κεραίες να τοποθετούνται σε θωρακισμένο κουτί (shielded box) ώστε να αποφεύγονται ανακλάσεις από επιφανειακά αντικείμενα (Jol, 2008, Jazayeri, 2018).



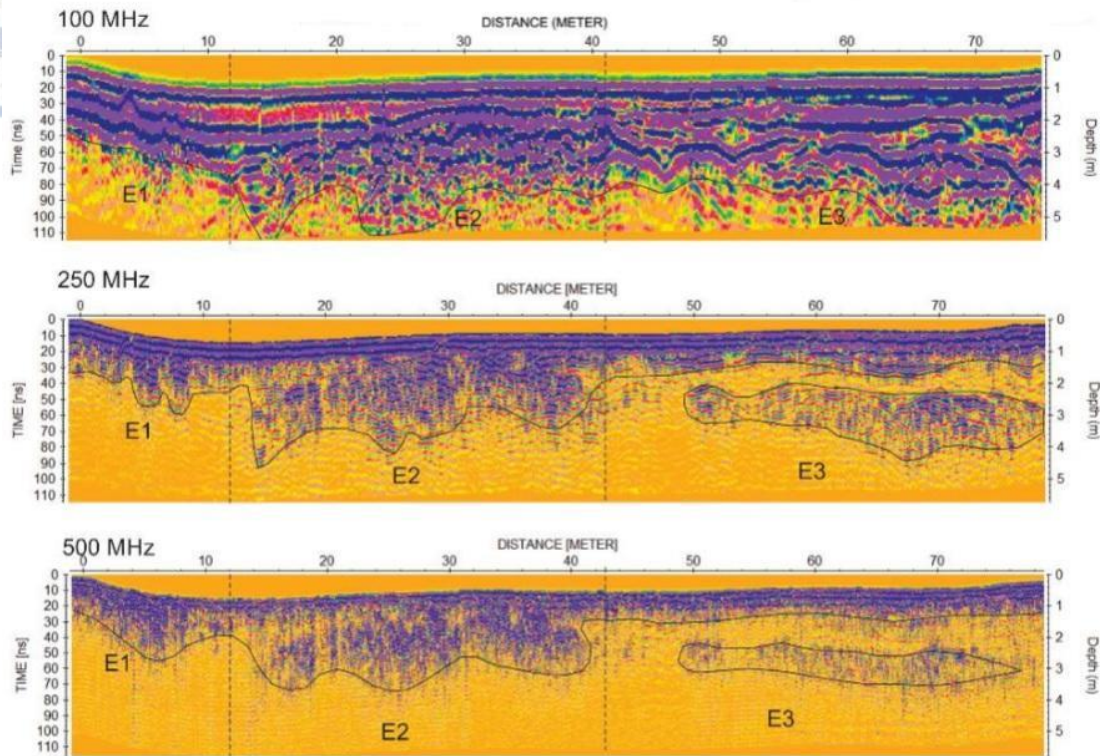


Σχήμα 3.2 Αναπαραστάσεις των διατάξεων πομπού δέκτη. **1.** Διάταξη κοινού σημείου,
2. Διάταξη σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη.

3.1.4 Διακριτική ικανότητα και βάθος διείσδυσης

Το βάθος διείσδυσης καθώς και η διακριτική ικανότητα επηρεάζονται από την συχνότητα λειτουργίας της κεραίας (**Σχήμα 3.3**). Όταν χρησιμοποιείται κεραία υψηλής συχνότητας αυξάνεται η εξασθένιση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος συνεπάγοντας μικρότερο βάθος διείσδυσης αλλά υψηλότερη διακριτική ικανότητα. Αντιθέτως, όταν χρησιμοποιείται κεραία χαμηλής συχνότητας το βάθος διείσδυσης μεγαλώνει όμως η διακριτική ικανότητα μειώνεται.

Η εξασθένιση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι πιθανό να οφείλεται στη γεωμετρική εξάπλωση των κυμάτων, στη σκέδαση καθώς και στην απόσβεση που αποτελεί αξιοσημείωτο παράγοντα. Η απόσβεση είναι ανάλογη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού, δηλαδή σε υλικά μεγαλύτερης ηλεκτρικής αγωγιμότητας η απόσβεση θα είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 3.3 Προφίλ σάρωσης που ελήφθησαν στην ίδια περιοχή χρησιμοποιώντας κεραίες των 100MHz, 250MHz και 500MHz οι οποίες επηρεάζουν το βάθος διασκόπησης και τη διακριτική ικανότητα (Campos et al., 2019).

3.1.5 Ορολογία

Παρακάτω διασαφηνίζονται χρήσιμες ορολογίες οι οποίες θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια. Κάποιες από τις ορολογίες χρησιμοποιούνται και ως παράμετροι στη μέθοδο του γεωραντάρ.

Συχνότητα λειτουργίας (Operating frequency): Πρόκειται για τη κεντρική συχνότητα λειτουργίας της κεραίας η οποία μεταδίδει 0.5 με 2 φορές τη συχνότητα της κεντρικής. Η κεντρική συχνότητα λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως από 10 έως 10.000 MHz

Ίχνος (Trace/A-scan): Το ίχνος αποτελεί ένα τρόπο αποτύπωσης των δεδομένων που ελήφθησαν από τις μετρήσεις σε μια θέση. Αναπαριστά το εύρος του πλάτους του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ως συνάρτηση του χρόνου διαδρομής.

Βήμα διασκόπησης (Trace step): Είναι η ενδιάμεση απόσταση εντός δύο διαδοχικών μετρήσεων (απόσταση μεταξύ γειτονικών ιχνών).

Δείγμα (Sample): Είναι η κάθε καταγραφή πλάτους και αντίστοιχου χρόνου άφιξης. Μεγαλύτερος αριθμός καταγραφών συνεπάγεται ομαλότερη καμπύλη με καλύτερη ανάλυση αλλά μεγαλύτερο όγκο δεδομένων

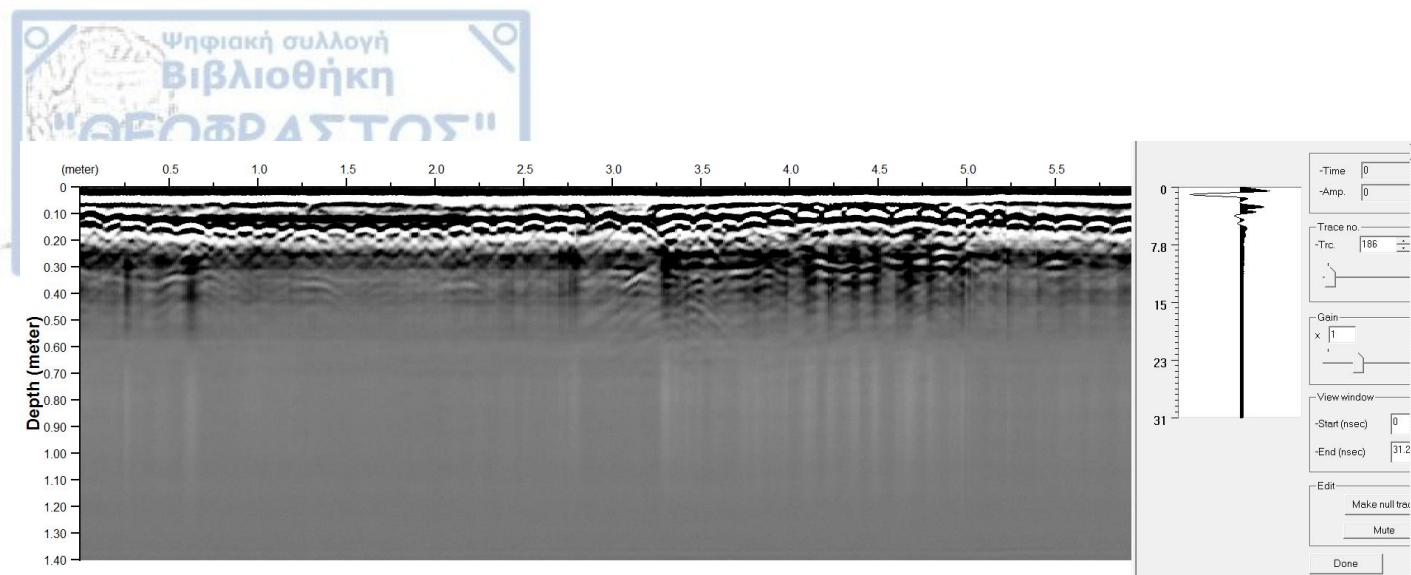
Συχνότητα δειγματοληψίας (Sampling frequency): Είναι η συχνότητα καταγραφής με το γεωραντάρ.

Διάστημα δειγματοληψίας (Sampling interval): Είναι η χρονική διαφορά μεταξύ δύο καταγραφών. Μικρότερο διάστημα δειγματοληψίας συνεπάγεται καλύτερη ανάλυση δεδομένων.

Χρονικό παράθυρο (Time window): Ορίζεται ως ο συνολικός χρόνος (nsec) καταγραφής δεδομένων. Είναι ανάλογος του βάθους διεξόδουσης.

3.1.6 Επεξεργασία

Η τομή γεωραντάρ (B-scan) δημιουργείται από την τοποθέτηση των επιμέρους ιχνών (A-scan) τα οποία έχουν ανακτηθεί από τη συνεχή καταγραφή κατά μήκος μιας οριζόντιας σάρωσης. Η τομή γεωραντάρ αναφέρεται και ως δισδιάστατο προφίλ σάρωσης με τον οριζόντιο άξονα να αντιστοιχεί στην απόσταση (m) και τον κατακόρυφο στο χρόνο διπλής διαδρομής (nsec). Τα πλάτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων απεικονίζονται με τη χρήση χρωματικής κλίμακας που συνήθως είναι αποχρώσεις του γκρι (**Σχήμα 3.4**).



Σχήμα 3.4 Μη επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ (αριστερά) και ίχνος (δεξιά).

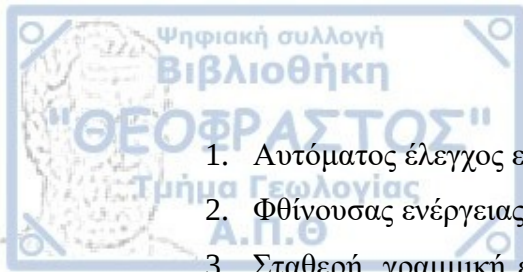
Η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ αποσκοπεί στην ενίσχυση των στοιχείων που σχετίζονται με το αντικείμενο της διασκόπησης καθώς και στη μείωση των υπολοίπων. Κάποιες από τις βασικές μεθόδους που εφαρμόζονται είναι η ενίσχυση του σήματος με το χρόνο, η αφαίρεση του θορύβου καθώς και η απομάκρυνση των πολλαπλών ανακλάσεων.

Πριν την επεξεργασία τα δεδομένα προεπεξεργάζονται. Συνήθως σε αυτό το στάδιο συνενώνονται ή αφαιρούνται δεδομένα, αντιστρέφεται ο άξονας της απόστασης, διορθώνονται ελαττωματικά ίχνη και πραγματοποιείται αναδειγματοληψία στον άξονα της απόστασης και του χρόνου.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων εφαρμόζονται αρχικά, φίλτρα αποκοπής των πολύ χαμηλών συχνοτήτων (*dewowing*). Οι χαμηλές αυτές συχνότητες συνήθως συνδέονται με φαινόμενα επαγωγής ή με το περιορισμένο συχνοτικό εύρος του γεωραντάρ (Annan, 2005).

Ακολούθως, διορθώνονται οι χρόνοι πρώτης άφιξης (*Zero time adjustment*). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι πρώτες αφίξεις δεν ανιχνεύονται με ακρίβεια από το γεωραντάρ, έτσι οι ανακλάσεις ευθυγραμμίζονται λανθασμένα.

Στη συνέχεια ενισχύεται το σήμα με το χρόνο (*Time gain*). Το ηλεκτρομαγνητικό σήμα εξασθενεί με την αύξηση του βάθους λόγω φαινομένων απόσβεσης. Επομένως, σε μεγαλύτερα βάθη δεν γίνονται ευδιάκριτες οι ανακλάσεις. Ακόμη, κατά τη διαδικασία της ενίσχυσης του σήματος μπορεί να ενισχυθεί και ο θόρυβος, για αυτό θα πρέπει να γίνεται με σύνεση. Οι βασικές τεχνικές ενίσχυσης παρουσιάζονται παρακάτω (Jol, 2008).



1. Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (Automatic gain control).
2. Φθίνουσας ενέργειας (Energy decay).
3. Σταθερή, γραμμική εκθετική ή ενίσχυση , ορισμένη από το χρήστη (Custom Gain).

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, τα δεδομένα υποβάλλονται σε ειδική επεξεργασία (special processing). Τα βήματα από τα οποία συνήθως αποτελείται είναι:

1. Φιλτράρισμα στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency domain filtering).
2. Φιλτράρισμα στο πεδίο των κυματρίθμων (Wavenumber domain filtering).
3. Φιλτράρισμα στο το χώρο συχνότητας/κυματαρίθμων (FK filtering).
4. Αφαίρεση του θορύβου υποβάθρου καθώς και των πολλαπλών ανακλάσεων που δημιουργούνται από την αντήχηση (Background noise removal).
5. Αποσυνέλιξη των δεδομένων για τον περιορισμό των πολλαπλών ανακλάσεων και τη αύξηση της χρονικής ακριβείας (Deconvolution).
6. Μετασχηματισμός Hilbert για τη εύρεση του στιγμιαίου πλάτους (Hilbert transformation).
7. Προσδιορισμός της ταχύτητας του μέσου διάδοσης στο οποίο γίνεται η έρευνα. Με βάση την ταχύτητα μετατρέπεται ο άξονας του χρόνου σε βάθος. Η ταχύτητα χρησιμοποιείται στο φίλτρο επανατοποθέτησης ιχνών (Migration) όπου διαγράφονται οι περιθλάσεις και βελτιώνονται οι κλίσεις των στρωμάτων.

3.2 Ηλεκτρική τομογραφία (Electrical Resistivity Tomography)

Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο των ηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης. Με την ηλεκτρική τομογραφία είναι δυνατό να απεικονιστούν με ακρίβεια η ηλεκτρικές ιδιότητες του υπό μελέτη μέσου. Η ηλεκτρική τομογραφία που ονομάζεται επίσης και μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, παρέχει πληροφορίες σχετικά με την πλευρική και τη σε βάθος μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Χαρακτηριστικά γνωρίσματα της μεθόδου αποτελούν η λήψη μεγάλου αριθμού μετρήσεων με αυτοματοποιημένο τρόπο καθώς και οι εξελιγμένες τεχνικές ερμηνείας που χρησιμοποιεί.

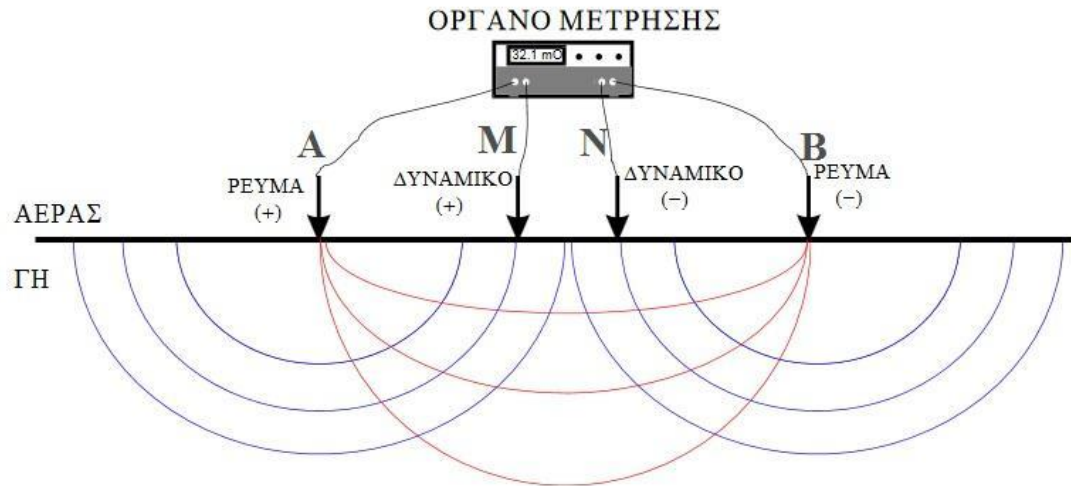
3.2.1 Εφαρμογές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλεκτρική τομογραφία είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης, γεγονός που οφείλεται στο χαμηλό της κόστος καθώς και στην πληθώρα των εφαρμογών της. Χρησιμοποιείται κυρίως σε τοποθεσίες κατασκευής γεωτεχνικών έργων, στην αρχαιομετρία, στην υδρογεωλογία καθώς και στην αναζήτηση μεταλλευμάτων.

3.2.2 Βασικές αρχές

Κατά τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας διοχετεύεται εναλλασσόμενο ρεύμα στο υπό μελέτη μέσο και μετράται η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται. Η διαφορά δυναμικού υποδηλώνει την αντίσταση του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάδοσή του και έτσι μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα η τιμή της αντίστασης για το μέσο της έρευνας. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να ανιχνευθούν δομές διαφορετικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

Για τη διοχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (A, B) και ταυτόχρονα για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού, χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (M, N), όπως απεικονίζονται στο σχήμα 3.5.



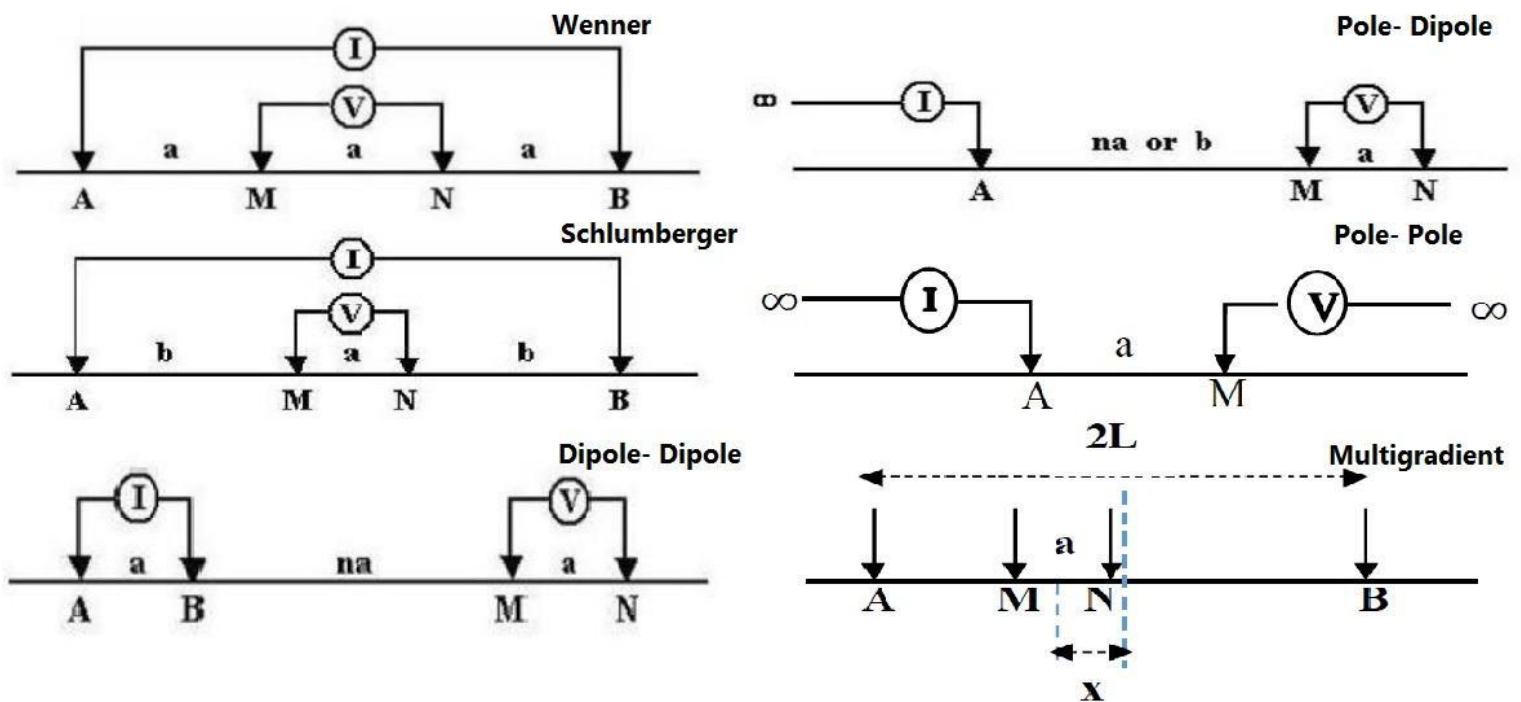
Σχήμα 3.5 Βασική διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σε ανομοιογενή και ανισότροπα μέσα διάδοσης, η τιμή της μετρούμενης ηλεκτρικής αντίστασης αλλάζει σε σχέση με τις αποστάσεις που τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού καθώς και με τη γεωηλεκτρική δομή του μέσου. Επομένως, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι η πραγματική αλλά η φαινόμενη και αναφέρεται ως φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Επομένως, από τη διαδοχική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων καταγράφεται η διακύμανση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μέσου, στον οριζόντιο καθώς και στον κατακόρυφο άξονα. Με αυτό το τρόπο προκύπτει η κατανομή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την περιοχή έρευνας.

3.2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Η γεωμετρία των μετρήσεων στο χώρο επηρεάζει τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Επομένως, οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεταβάλλονται ανάλογα με τον τρόπο της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στο μέσο καθώς και με τις αποστάσεις μεταξύ τους. Οι ευρύτερα διαδεδομένες διατάξεις ηλεκτροδίων παρουσιάζονται ακολούθως (**Σχήμα 3.6**):



Σχήμα 3.6 Οι κυριότερες διατάξεις ηλεκτροδίων

- **Wenner:** Σε αυτή τη διάταξη ηλεκτροδίων ισχύει η σχέση $AM = MN = NB = a$. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού τοποθετούνται έτσι ώστε να ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a . Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που προκύπτει υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (3.1)$$

- **Schlumberger:** Σε αυτή τη διάταξη πραγματοποιείται συμμετρική τοποθέτηση των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού με κέντρο συμμετρίας το κέντρο της διάταξης. Η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος. Ισχύει $MN = 2l$, $AB = 2L$ και $L \gg l$. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που προκύπτει υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \cdot \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (3.2)$$

— **Διπόλου – διπόλου (dipole – dipole):** Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού τοποθετούνται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους, η οποία είναι $AB = 2l$ και $MN = 2l$ αντίστοιχα. Όμως, τα δίπολα μεταξύ τους βρίσκονται σε πολλαπλάσια απόσταση, $BM = n(2l)$. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που προκύπτει υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho_a = 2\pi n(n+1)(n+2)l \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (3.3)$$

— **Πόλου – διπόλου (pole – dipole):** Σε αυτή τη διάταξη ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε άπειρη απόσταση (δηλαδή αρκετά μακριά από το άλλο ηλεκτρόδιο), η οποία υπολογίζεται μέσω της σχέσης $AB > 15 \cdot \max(n) \cdot l$. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού τοποθετούνται σε απόσταση $MN = l$. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που προκύπτει υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho_a = 2\pi n(n+1)l \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (3.4)$$

— **Πόλου – πόλου (pole – pole):** Σε αυτή τη διάταξη το ένα από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού τοποθετείται σε άπειρη απόσταση από το άλλο, $AB > 30a$ και $MN > 30a$, ενώ τα εναπομείναντα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού τοποθετούνται σε απόσταση a μεταξύ τους. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που προκύπτει υπολογίζεται ως εξής:

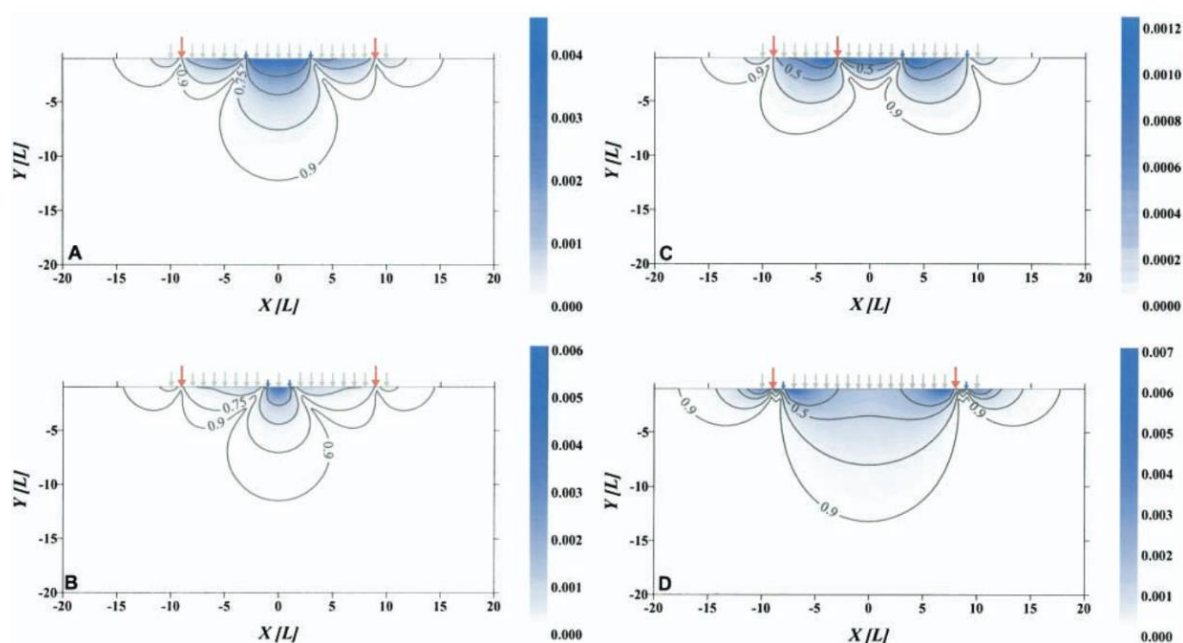
$$\rho_a = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (3.5)$$

— **Πολλαπλής βαθμίδας (Multigradient):** Σε αυτή τη διάταξη δημιουργείται ένα πολυκαναλικό σύστημα με τη βοήθεια του οποίου καθίσταται εφικτό να διεξαχθούν πολλές μετρήσεις ταυτοχρόνως, διατηρώντας τα ηλεκτρόδια ρεύματος σε σταθερή θέση και αλλάζοντας θέση στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετούνται σε απόσταση $(s+2)a$, όπου s είναι ο συντελεστής διαχωρισμού και a η μικρότερη σχετική απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που προκύπτει υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho_a = \frac{\pi(L^2 - x^2)^2 V_{MN}}{a(L^2 + x^2) I_{AB}} \quad (3.6)$$

3.2.4 Διακριτική ικανότητα και βάθος διείσδυσης

Η σχέση μεταξύ του βάθους διείσδυσης και των αποστάσεων των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι ανάλογη. Ακόμα, το βάθος διείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο με την αύξηση της διακριτικής ικανότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος στο μέσο και όσο κατέρχεται σε βάθος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάχυση ενώ ταυτόχρονα συναντά και μεγαλύτερη αντίσταση. Επακολούθως, καθίσταται εμφανές ότι οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων, εμφανίζουν διαφορετική απόκριση αναφορικά με το βάθος διείσδυσης και τη διακριτική ικανότητα της διάταξης. Στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος σε σχέση με τις διατάξεις των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.7 Χάρτες διακριτικής ικανότητας για τις διατάξεις: A) Wenner, B) Schlumberger, C) διπόλου-διπόλου και D) μερικώς επικαλυπτόμενες διατάξεις. Οι καμπύλες ενώνουν σημεία ίδιας αθροιστικής διακριτικής ικανότητας. Οι θέσεις των ηλεκτροδίων σημειώνονται με βέλη.

Τα κόκκινα βέλη αντιστοιχούν στις τωρινές θέσεις των ηλεκτροδίων ενώ τα μπλε στις μελλοντικές τους θέσεις. Ο βαθμός της ευαισθησίας διαφέρει ανά διάταξη (Furman, 2003).

3.2.5 Θόρυβος και ευαισθησία διατάξεων

Βασικά κριτήρια για την επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων σε μια γεωφυσική έρευνα αποτελούν: 1) η ευαισθησία της στις μεταβολές της αντίστασης σε κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο και 2) ο λόγος σήματος-θορύβου, ο οποίος είναι καθοριστικός παράγοντας για το μέγιστο βάθος διείσδυσης. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.1) συγκεντρώνονται και αξιολογούνται οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων ως προς την ευαισθησία και το θόρυβο που παρουσιάζουν.

Διατάξεις	Λόγος Σήματος- Θορύβου	Πλευρικές μεταβολές	Κατακόρυφες μεταβολές
Wenner	5	2	5
Schlumberger	4	2	5
Διπόλου–διπόλου	1	5	2
Πόλου–διπόλου	3	4	2
Πόλου–πόλου	5	4	2
Gradient	3	1	5

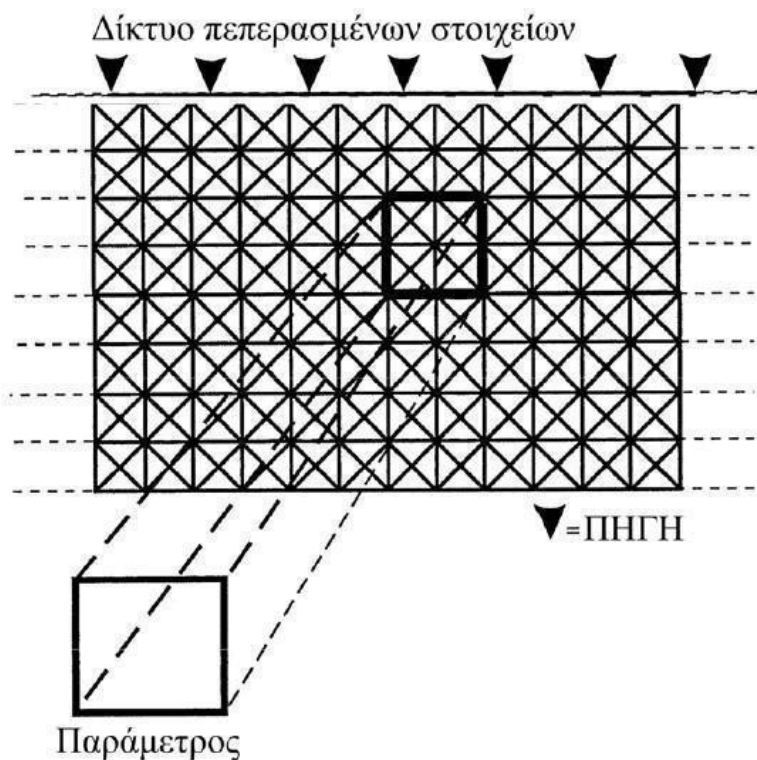
Πίνακας 3.1 Αξιολόγηση διατάξεων (αύξουσα βαθμολόγηση, με 1 τη χειρότερη και 5 την καλύτερη) (Ward, 1988).

3.2.6 Επεξεργασία

Βάσει των προηγούμενων, τα δεδομένα των μετρήσεων πεδίου, δεν εκφράζουν τη πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, αλλά τη φαινόμενη. Για να εκτιμηθούν οι πραγματικές ειδικές αντιστάσεις με τη βοήθεια των φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων, απαιτείται μια πολύπλοκη διαδικασία, σε μαθηματικό και υπολογιστικό επίπεδο, η οποία λέγεται αντιστροφή (Inversion). Αυτή έχει ως στόχο να δημιουργήσει μετρήσεις οι οποίες να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές. Για να εφαρμοστεί η αντιστροφή, πρέπει να επιλυθεί το ευθύ πρόβλημα (Electrical resistivity forward problem). Σκοπός του ευθέος προβλήματος είναι ο υπολογισμός των φαινόμενων ηλεκτρικών αντιστάσεων για μια διασκόπηση με γνωστή διάταξη ηλεκτροδίων και γνωστή κατανομή πραγματικών αντιστάσεων εντός του μέσου. Για την επίλυση του ευθέος προβλήματος εφαρμόζονται αριθμητικές μέθοδοι (Numerical

methods), εκ των οποίων οι πλέον διαδεδομένες είναι η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite difference method) (Bergmann et al., 1998, Gianopoulos, 2005) και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite element method) (Sasaki, 1994, Tsourlos and Ogilvy, 1999, Monorchio et al., 2004). Η δεύτερη χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

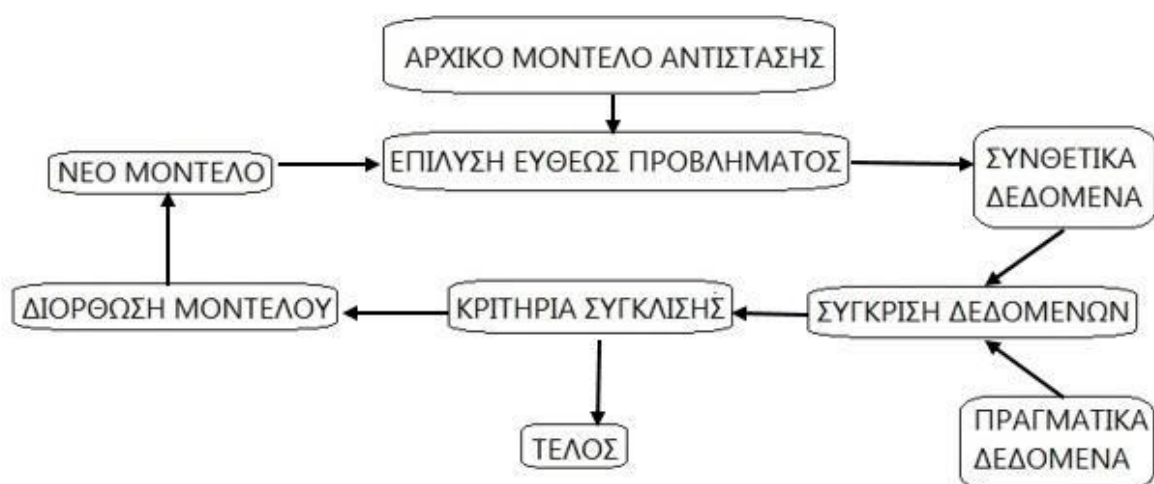
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αφορά τη διάσπαση του μέσου σε επιμέρους ομογενή τριγωνικά στοιχεία διαφορετικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας, καθίσταται εφικτή η επίλυση οποιασδήποτε κατανομής ηλεκτρικών αντιστάσεων. Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.8) παρουσιάζεται ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.8 Παράμετρος και δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Κάθε παράμετρος χωρίζεται σε τριγωνικά στοιχεία σε περιοχές των οποίων υπολογίζεται το δυναμικό (Tsourlos, 1995).

Από την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος επιχειρείται ο καθορισμός του μοντέλου των αντιστάσεων, από το οποίο είναι δυνατόν να παραχθούν μετρήσεις τέτοιες, ώστε να προσεγγίσουν τις πραγματικές. Εξαιτίας της μη γραμμικότητας του γεωηλεκτρικού προβλήματος, η εν λόγω διαδικασία μετατρέπεται σε επαναληπτική. Πραγματοποιείται διάσπαση και επίλυση μικρότερων γραμμικών προβλημάτων μέχρι τα συνθετικά δεδομένα να πλησιάσουν τα πραγματικά. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της μέσης τετραγωνικής ρίζας (RMS) μεταξύ συνθετικών και πραγματικών δεδομένων (Σχήμα 3.9)

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Least square) (Lines and Treitel, 1984, Min et al., 2015), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης (Damped least – square) (Marquadt, 1963, Bing et al., 1992, Snieder and Trampert, 1999, Ekinici and Demirci, 2008) η μέθοδος της εξομαλυμένης αντιστροφής (Smoothness constrained) (Constable et al., 1987, VanDecar and Snieder, 1994) και η μέθοδος των ιδιάζουσων τιμών (Eigenvalues) (Snieder and Trampert, 1999, Faucher et al., 2020).



Σχήμα 3.9 Ροή και αλληλουχία ενεργειών της διαδικασίας αντιστροφής.



ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των δεδομένων γεωραντάρ, η οποία προηγήθηκε της λήψης των πραγματικών δεδομένων. Στις ακόλουθες υποενότητες περιγράφεται το ευθύ πρόβλημα που εμφανίζεται στη μέθοδο του γεωραντάρ, καθώς και μία από της μεθόδους που αξιοποιούνται για την επίλυση αυτού. Επιπλέον, πραγματοποιείται παρουσίαση του προγράμματος, με τη βοήθεια του οποίου διεξήχθη η κατασκευή των δισδιάστατων μοντέλων, τα μοντέλα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Περιγράφονται δύο ακόμα προγράμματα, η λειτουργία τους και ο σκοπός για τον οποίο χρησιμοποιούνται. Στο τέλος του κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη μοντελοποίηση

4.1 Αριθμητικές μέθοδοι

Ο τομέας της μοντελοποίησης και της αριθμητικής προσομοίωσης έχει εξελιχθεί με ταχείς ρυθμούς τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της υπολογιστικής τεχνολογίας. Τα εργαλεία αυτά είναι χρήσιμα έως απαραίτητα, αναφορικά με την κατανόηση, ανάλυση και επίλυση σχεδόν κάθε επιστημονικού προβλήματος (Inan and Marshall, 2011).

Η αριθμητική προσομοίωση συμβάλλει σημαντικά στη μέθοδο του γεωραντάρ. Επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών διάδοσης, συμβάλλοντας στην βελτιστοποίηση των ερευνών. Επιπροσθέτως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή παραμέτρων σε πραγματικές μελέτες (Giannakis et al, 2015).

4.1.1 Επίλυση του ευθέως προβλήματος (GPR Forward Problem)

Οι εξισώσεις του Maxwell καθορίζουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εντός υπεδάφους καθώς και όλα τα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού (Balanis, 1989, Stratton, 2007). Οι εξισώσεις αυτές είναι 1^{ης} τάξεως διαφορικές και περιγράφουν τη συμπεριφορά ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, καθώς και οι αλληλεπιδράσεις που αυτά εμφανίζουν με την ύλη.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \vec{D} = q \quad (4.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (4.4)$$

όπου, $\vec{E}$ = ένταση ηλεκτρικού πεδίου (Volt/m),

$\vec{H}$ = ένταση μαγνητικού πεδίου (Ampere/m),

$\vec{D}$ = διηλεκτρική μετατόπιση (Coulomb/m²),

$\vec{B}$ = μαγνητική επαγωγή (Weber/m²),

$\vec{J}$ = πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (Ampere/m²),

q = πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου (Coulomb/m³),

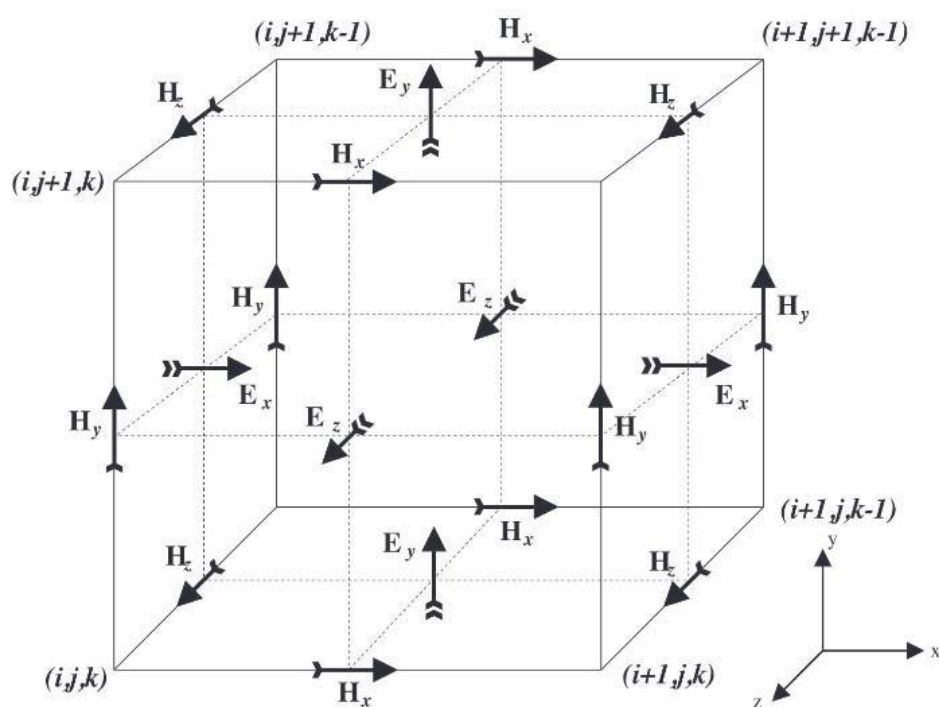
t = χρόνος (sec).

Στη μέθοδο του γεωραντάρ, η επίλυση του ευθέως προβλήματος, επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των ανωτέρων εξισώσεων. Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες αρχικές και οριακές συνθήκες καθώς αυτό αποτελεί ένα πρόβλημα αρχικών τιμών δίχως όρια.

Η επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου πραγματοποιείται με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων (Numerical methods). Από τις αριθμητικές μεθόδους διακρίνεται η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain, FDTD) (Giannopoulos, 1997, Bergmann et al., 1998, Inan and Marshall, 2011).

4.1.2 Πεπερασμένες διαφορές στο πεδίο του χρόνου (FDTD)

Στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD), πραγματοποιείται διάσπαση του χώρου και του χρόνου σε μικρότερα τμήματα. Αναπαριστώντας το πραγματικό πρόβλημα ως μια διακριτοποιημένη προσομοίωση περιορισμένου μεγέθους. Το πλέγμα το οποίο παράγεται από αυτό το διαχωρισμό καλείται πλέγμα πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου και τα δομικά στοιχεία που το απαρτίζουν λέγονται κελιά (Yee cell) (Yee, 1966). Ένα τέτοιο πλέγμα παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Το 3D Yee cell που αποτελεί δομικό στοιχείο του πλέγματος FDTD. Με H_x , H_y , H_z συμβολίζονται οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου και με E_x , E_y , E_z συμβολίζονται οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου ως προς τις x , y , z διευθύνσεις (Yee, 1966).

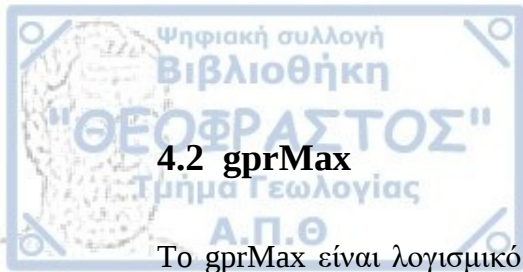
Ο διαχωρισμός του χώρου και του χρόνου σε επιμέρους τμήματα Δx Δy Δz Δt καθορίζει την ακρίβεια του μοντέλου. Μικρότερα διαστήματα καθιστούν ένα ορθότερο μοντέλο. Βέβαια, το τίμημα της μεγάλης διακριτοποίησης είναι η αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές των βημάτων οφείλουν να είναι πεπερασμένες, μιας και η μνήμη και η ταχύτητα επεξεργασίας ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι εξίσου συγκεκριμένη και όχι απεριόριστη (Diamanti 2008, Warren et al., 2016).

Για την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Maxwell που περιγράφηκαν προηγουμένως, σε κάθε κελί ξεχωριστά. Η προσομοίωση του χρόνου πραγματοποιείται με την επίλυση του προβλήματος επαναληπτικά κάθε φορά, για χρονικό διάστημα που αυξάνει με βήμα Δt , έτσι ώστε κάθε επανάληψη να αφορά μια t χρονική στιγμή. Το πρόβλημα που ανακύπτει είναι ότι καθώς επιδιώκουμε την επίλυση απευθείας στο χρόνο, οι τιμές Δx , Δy , Δz και Δt δεν είναι δυνατό να οριστούν ανεξάρτητα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να σχετίζονται με την συνθήκη ονόματι CLF που ακολουθεί:

$$\Delta \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (4.5)$$

όπου, c = ταχύτητα του φωτός (m/sec)

Όπως έχει ήδη λεχθεί, το ευθύ πρόβλημα εξαιτίας της φύσεως του, στη μέθοδο του γεωραντάρ καθορίζεται ως ένα πρόβλημα δίχως όρια. Βασική προϋπόθεση για την επίλυσή του είναι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως ότου επέλθει μηδενισμός της ενέργειας που αυτά φέρουν, δηλαδή διάδοση τους μέχρι το άπειρο. Καθίσταται προφανές ότι αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών που διαθέτουμε σήμερα. Ως εκ τούτου αναπτύχθηκε η *οριακή συνθήκη απορρόφησης* (Absorbing Boundary Condition, ABC) και πιο συγκεκριμένα το *όριο απορρόφησης*, το οποίο αποτελεί την περιοχή όπου η ενέργεια που μεταφέρουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μηδενίζεται, δηλαδή το κύμα απορροφάται (Mur, 1981).



4.2 gprMax

Το gprMax είναι λογισμικό που προσομοιώνει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την επίλυση των τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων του Maxwell. Η επίλυση γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain Method) (Warren, 2009).

Πρόκειται για ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα το οποίο αναπτύχθηκε το 1996 από το Γιαννόπουλο, όταν η μοντελοποίηση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου βρίσκονταν σε πρώιμο επίπεδο (Giannopoulos, 2005). Με την εξέλιξη της υπολογιστικής τεχνολογίας πλέον είναι δυνατή η δημιουργία σύνθετων μοντέλων.

Το gprMax διαθέτει μια σειρά από προηγμένα χαρακτηριστικά όπως η μοντελοποίηση ανισότροπων υλικών, κατασκευή δομών με τραχείες επιφάνειες, προχωρημένες συνθήκες απορρόφησης (Advanced absorbing boundary conditions), μεγάλη ποικιλία ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων για μοντελοποίηση υλικών κ.α.

Το λογισμικό δεν περιέχει γραφικό περιβάλλον γεγονός που του επιτρέπει να εκτελεί σύνθετα μοντέλα με υψηλότερη απόδοση. Οι εντολές δίνονται σε περιβάλλον DOS (disk operating system). Για τη χρήση του gprMax χρειάζεται ένα αρχείο που περιλαμβάνει τις κατάλληλες πληροφορίες για τη μοντελοποίηση. Οι οδηγίες κατασκευής του αρχείου καθώς και οι εντολές που χρησιμοποιούνται δίνονται παρακάτω.

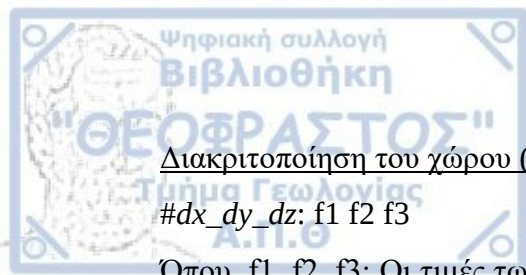
4.2.1 Κατασκευή μοντέλου

Το αρχείο εισαγωγής (input file) είναι απαραίτητο για τη μοντελοποίηση και περιλαμβάνει τις παραμέτρους του μοντέλου καθώς και όλα τα στοιχεία για τη γεωμετρία του. Μπροστά από κάθε εντολή πρέπει να υπάρχει “#” διαφορετικά λαμβάνεται ως σχόλιο. Οι θέσεις δίνονται σε μέτρα (m) και ορίζονται σε σύστημα συντεταγμένων x y z. Ακόμη, η σειρά των εντολών δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Μέγεθος χώρου (Domain size)

#domain: f1 f2 f3

Όπου, f1, f2, f3: Οι συντεταγμένες x y z σε μέτρα (m).



Διακριτοποίηση του χώρου (Discretization of space)

`#dx_dy_dz: f1 f2 f3`

Όπου, $f1$, $f2$, $f3$: Οι τιμές των διαστημάτων Δx , Δy , Δz . Ο υπολογισμός του Δt γίνεται αυτόματα μέσω της σχέσης 4.5 και δηλώνει το διάστημα δειγματοληψίας.

Αξίζει να σημειωθεί πως αν το $dy = y$, τότε το μοντέλο θα είναι δύο διαστάσεων (2D), ενώ αν $y > dy$ το μοντέλο θα είναι τριών διαστάσεων (3D).

Κυματομορφή πηγής (Waveform)

`#waveform: str1 f1 f2 str2`

Όπου, $str1$, $f1$, $f2$, $str2$: Ο τύπος της κυματομορφής, το μέγιστο πλάτος κυματομορφής, η συχνότητα κυματομορφής (Hz) και μία ονομασία για το id , αντιστοίχως.

Πηγή (Source)

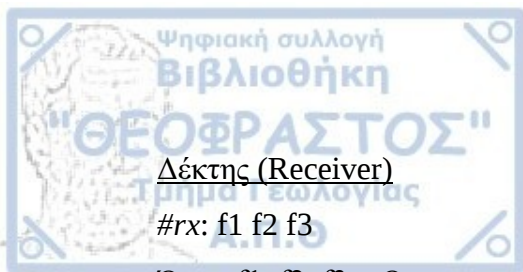
`#hertzian_dipole: c1 f1 f2 f3 str1`

Όπου, $c1$, $f1$, $f2$, $f3$, $str1$: Πόλωση πηγής x , y ή z , συντεταγμένες x y z πηγής και το id της κυματομορφής, αντιστοίχως.

Για την όδευση πρέπει να δοθούν στοιχεία για την κίνηση της πηγής και του δέκτη.

`#src_steps: f1 f2 f3`

Όπου, $f1$, $f2$, $f3$: Τα βήματα της πηγής στους άξονες x y z (π.χ `#src_steps: 0.04 0 0` κίνηση κατά τον άξονα x 4 cm ανά ίχνος).



Δέκτης (Receiver)

#rx: f1 f2 f3

Όπου f1, f2, f3, : Οι συντεταγμένες x y z του δέκτη.

#rx_steps: f1 f2 f3

Όπου, f1, f2, f3: Τα βήματα του δέκτη στους άξονες x y z.

Χρονικό παράθυρο (Time window)

#time_window: f1

Όπου, f1: Το χρονικό παράθυρο σε δευτερόλεπτα (s).

Υλικά μοντέλου (Materials)

#material: f1 f2 f3 f4 str1

Όπου, f1, f2, f3, f4, str1: Η σχετική διηλεκτρική επιδεκτικότητα (ϵ_r , relative permittivity), η αγωγιμότητα (σ , conductivity Siemens/meter), η μαγνητική διαπερατότητα (μ_r , relative permeability), η μαγνητική απώλεια (σ^* , magnetic loss Ohms/meter) και η ονομασία υλικού (id), αντιστοίχως.

Σχετικά με τα υλικά μοντέλου:

Όταν δεν υπάρχουν μαγνητικά υλικά οι παράμετροι μ_r και σ^* ισοδυναμούν με 1 και 0 αντίστοιχα.

Στο gprMax περιέχονται τρία ενσωματωμένα υλικά που είναι: free_space, pec (perfect electric conductor) και water. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται με την ονομασία τους και δε χρειάζεται να δηλωθούν οι παράμετροι ϵ_r , σ , μ_r και σ^* .

Στόχοι (Object construction commands)

Μετά τη δημιουργία των υλικών του μοντέλου ακολουθεί η δημιουργία και τοποθέτηση στον χώρο των περιοχών ή στόχων.

Για την δημιουργία διαφόρων σχημάτων υπάρχει ένα σύνολο εντολών για παράδειγμα:

#box: f1 f2 f3 f4 f5 f6 str1

Όπου, f1, f2, f3: Συντεταγμένες xyz κάτω αριστερά κορυφής

f3, f4, f5: Συντεταγμένες xyz της πάνω και πίσω δεξιά κορυφής

str1: Το id ενός υλικού από αυτά που έχουν δημιουργηθεί.



`#sphere`, `#cylinder`, `#triangle`, `#plate` και διάφορες άλλες με τρόπο τοποθέτησης που μπορεί να βρεθεί στο εγχειρίδιο του λογισμικού.

Προβολή Γεωμετρίας (Geometry view)

`#geometry_view`: f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 file1 c1

Όπου, f1, f2, f3: Οι συντεταγμένες x y z της κάτω αριστερά κορυφής όλου του χώρου (συνήθως η αρχή των αξόνων είναι 0 0 0).

f3, f4, f5: Οι συντεταγμένες x y z της πάνω και πίσω δεξιά κορυφής όλου του χώρου. Αποτελούν τις τιμές του `#domain`

f6, f7, f8: Οι τιμές των διαστημάτων Δx , Δy , Δz .

file1: Το όνομα του αρχείου vti.

c1: Αντιπροσωπεύει τη γεωμετρία ανά κελί ή τη γεωμετρία ανά άκρη κελιού.

4.2.2 Εντολές μοντελοποίησης (CMD)

Μοντελοποίηση ατσαλένιας ράβδου.

- Περιεχόμενα αρχείου γεωμετρίας μοντέλου (example.in).

`#domain`: 3.30 1.1 0.005

`#dx_dy_dz`: 0.005 0.005 0.005

`#waveform`: ricker 1 1e9 rick

`#hertzian_dipole`: z 0.105 1.00 0 rick

`#src_steps`: 0.01 0 0

`#rx`: 0.175 1.00 0

`#rx_steps`: 0.01 0 0

`#time_window`: 36e-9

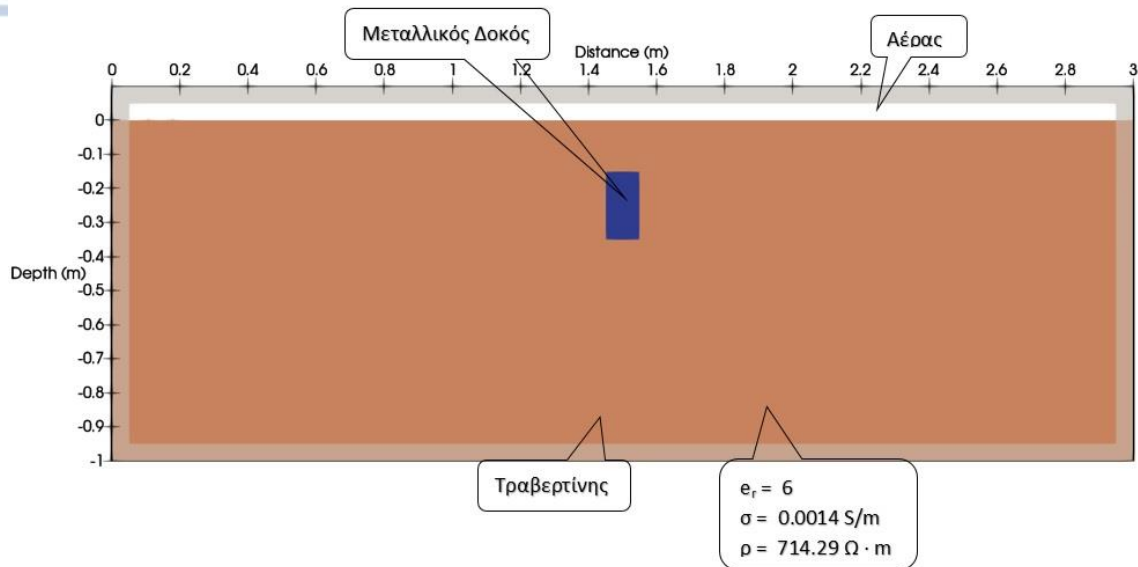
`#material`: 6 0.0014 1.0 0.0 Travertine

`#box`: 0.00 1.00 0.00 3.30 1.1 0.005 free_space

`#box`: 0.00 0.00 0.00 3.30 1.00 0.005 Travertine

`#box`: 1.55 0.65 0.00 1.65 0.85 0.005 pec

`#geometry_view`: 0 0 0 3.30 1.1 0.005 0.005 0.005 0.005 example n

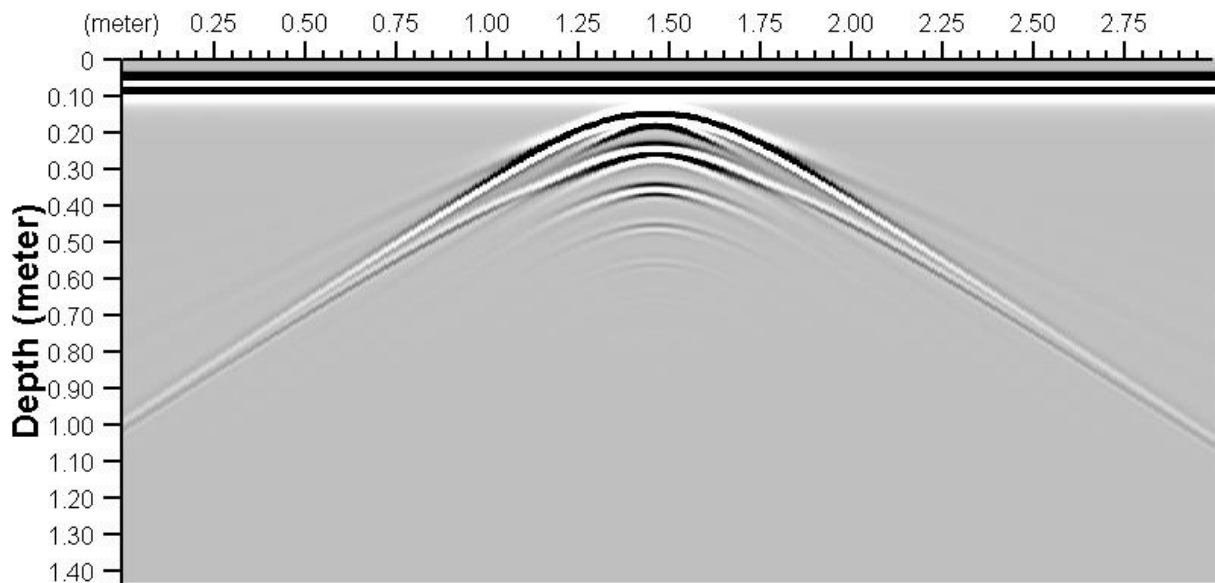


Σχήμα 4.2 Γεωμετρία μοντέλου.

Ο χρήστης πρέπει να κατευθυνθεί χρησιμοποιώντας τη γραμμή εντολών (CMD) στο φάκελο όπου βρίσκεται το αρχείο γεωμετρίας μοντέλου. Το λογισμικό ενεργοποιείται με την εντολή “Activate gprMax”.

Το gprMax υπολογίζει ίχνη (traces) με βάση το αρχείο γεωμετρίας, οπότε όταν το αρχείο έχει ρυθμιστεί σε ένα βήμα πομπού-δέκτη 0,01m, η διαδικασία θα επαναληφθεί 300 φορές για 3 μέτρα. **python -m gprMax model/example.in -n 300 --geometry-fixed**

Με την παραπάνω εντολή θα δημιουργηθούν 200 ξεχωριστά αρχεία .out με τη μορφή HDF5. Η συγχώνευση αυτών παράγει την τομή γεωραντάρ (Bscan). Η συγχώνευση εκτελείται με την εντολή “**python -m tools.outputfiles_merge model/example**”, ενώ η εντολή “**python -m tools.plot_Bscan example_merged.out Ey**” χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της τομής. (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3 Τομή γεωραντάρ (Bscan) μοντέλου.

4.3 Μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση είχε ως στόχο τη περαιτέρω κατανόηση των δεδομένων γεωραντάρ. Δημιουργήθηκαν μοντέλα αυξανόμενης πολυπλοκότητας τα οποία σταδιακά προσομοίαζαν τις πραγματικές δομές της περιοχής μελέτης. Σκοπός ήταν η μελέτη των απλούστερων δομών που συνθέτουν τους τεχνικούς και γεωλογικούς σχηματισμούς.

4.3.1 1^ο Χαρακτηριστικά στόχων και γεωραντάρ

Η ανομοιογένεια των διηλεκτρικών σταθερών στην περιοχή των μετρήσεων είναι υπεύθυνη για τα περισσότερα χαρακτηριστικά μιας τομής γεωραντάρ. Συγκεκριμένα το μέγεθος της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων υλικών όσον αφορά την σχετική διηλεκτρική επιδεκτικότητα (ϵ_r), είναι υπεύθυνο για την ένταση των ανακλάσεων.

Ένα άλλο φυσικό χαρακτηριστικό ενός υλικού που επηρεάζεται από την σχετική διηλεκτρική επιδεκτικότητα είναι η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω αυτού. Το παραπάνω περιγράφεται από τον τύπο ($v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$, c = ταχύτητα φωτός), μικρότερη διαλεκτική σταθερά συνεπάγεται σε μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης.

Όσο αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης τόσο η εμφάνιση των ανακλάσεων πάνω στον άξονα των χρόνων άφιξης, τείνει στο μηδέν. Επίσης, μειώνεται και η χρονική διαφορά μεταξύ των ανακλάσεων.

Ένα συχνό ζήτημα στην χρήση γεωραντάρ είναι η παρατήρηση στόχων σε μεγαλύτερο βάθος. Η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού παλμού μειώνεται κατά την διέλευση του μέσα από την περιοχή μέτρησης, κατά συνέπεια μειώνοντας την διαθέσιμη ενέργεια ανάκλασης από κάποιο πιθανό στόχο σε μεγαλύτερο βάθος. Το παραπάνω φαινόμενο λέγεται απόσβεση και είναι εντονότερο σε υλικά με μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα ($\sigma(S/m)$).

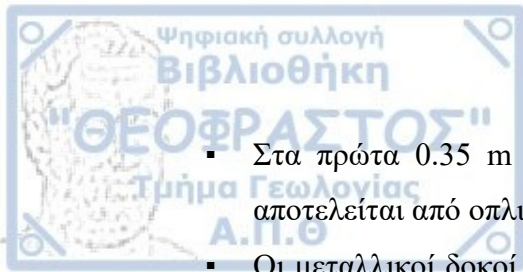
Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες σε μια διασκόπηση είναι η κεντρική συχνότητα της πηγής. Μια υψηλή κεντρική συχνότητα οδηγεί σε μικρό μήκος κύματος και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα. Όμως, συνοδεύεται και από γρηγορότερη εναλλαγή της πολικότητας που επιταχύνει την απώλεια ενέργειας και την απόσβεση.

Αντιστρόφως ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός από μια κεραία με χαμηλότερη κεντρική συχνότητα θα αποσβένει με μικρότερους ρυθμούς παρουσιάζοντας τις βαθύτερες ανακλάσεις με μεγαλύτερο πλάτος αλλά και με μικρότερη διακριτική ικανότητα λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος.

4.3.2 Σχηματισμός μοντέλων

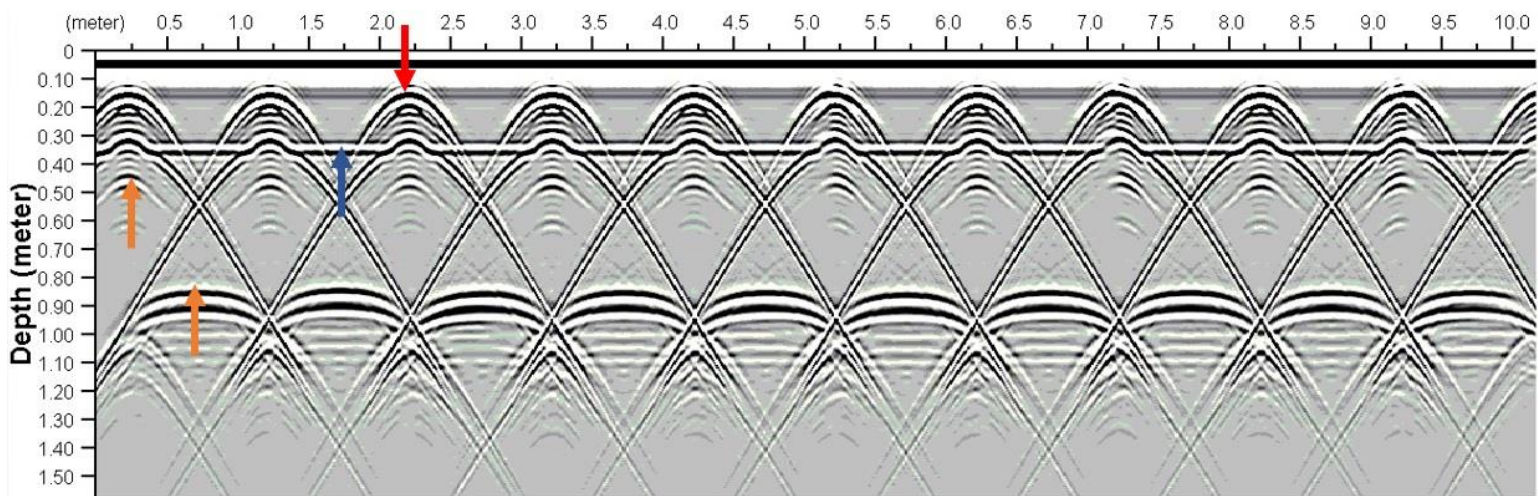
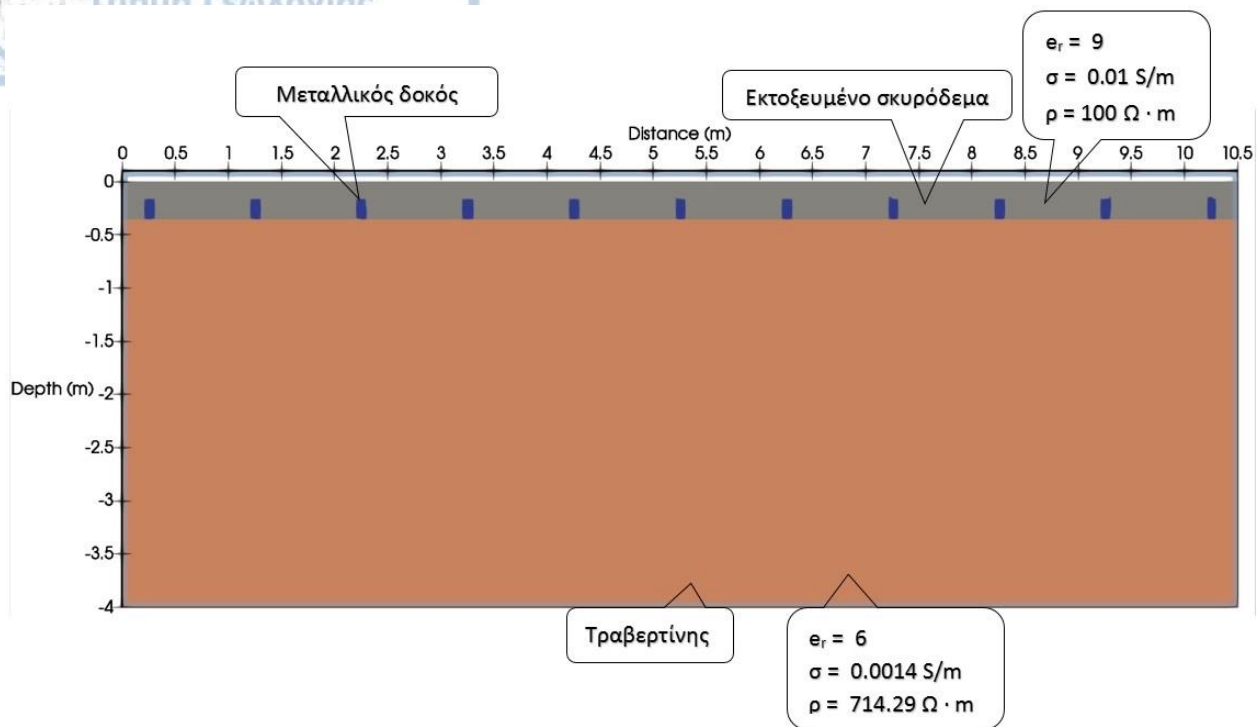
1ο ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Παρακάτω παρουσιάζονται το πρώτο συνθετικό μοντέλο καθώς και η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση (**Σχήμα 4.4**). Το συνολικό μήκος και βάθος της τομής είναι 10.50 m και 4.00 m, αντίστοιχα. Το μοντέλο προσομοιάζει τις συνθήκες στο πεδίο, περιέχει το τοιχίο της στοάς που αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, την επικαλυμμένη τραβερτινική βραχώμαζα καθώς και τις τομές των μεταλλικών δοκών. Οι μεταλλικοί δοκοί είναι κατασκευασμένοι από σίδηρο, έχουν πάχος 10cm x 20cm και είναι προσανατολισμένοι κάθετα ως προς την κατεύθυνση της γραμμής σάρωσης. Πιο αναλυτικά, στο μοντέλο περιλαμβάνονται:



- Στα πρώτα 0.35 m βάθους το τοιχίο που επικαλύπτει τον τραβερτίνη και αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Οι μεταλλικοί δοκοί σε βάθη από 0.15 m μέχρι 0.35 m οπύ απέχουν μεταξύ τους 0.90 m.
- Ο υποκείμενος τραβερτινικός σχηματισμός από την επαφή του με το οπλισμένο σκυρόδεμα που είναι σε βάθος 0.35 m.

Στην επεξεργασμένη τομή που προέκυψε από την προσομοίωση φαίνονται οι ανακλάσεις που αντιστοιχούν στα επιμέρους χαρακτηριστικά του μοντέλου. Οι ανακλάσεις αυτές είναι το αποτέλεσμα δομών με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες σε σχέση με το περιβάλλον τους. Με κόκκινο βέλος έχουν σημειωθεί οι μεταλλικοί δοκοί που φαίνεται να δημιουργούν έντονες ανακλάσεις σε αποστάσεις ανά 1.00 m. Με μπλε βέλος έχει μαρκαριστεί η επαφή του τραβερτίνη με το οπλισμένο σκυρόδεμα στο βάθος των 0.33 m. Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα εισέρχεται στους μεταλλικούς δοκούς, παράγονται ανακλάσεις σε βάθη 0.15 m και αντιστοίχως όταν το κύμα εξέρχεται από αυτούς παρατηρούνται σε βάθη 0.30 m. Κάτω από αυτές τις ανακλάσεις δημιουργούνται πολλαπλές ανακλάσεις σε βάθη 0.44 m και 0.83 m (πορτοκαλί βέλη). Οι πολλαπλές ανακλάσεις είναι αποτέλεσμα της υψηλής αγωγιμότητας των δοκών. Για τη μετατροπή του άξονα του χρόνου (ns) σε βάθος (m) ορίζεται μια μέση ταχύτητα από τις ταχύτητες που αντιστοιχούν στις εσωτερικές δομές του μέσου διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η ταχύτητα του κάθε μέσου ορίζεται απ' την σχετική διηλεκτρική σταθερά. Η σταθερά αυτή καθορίζεται κατά το στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα μελέτη, η ταχύτητα που επιλέχθηκε είναι 90 m/usec και είναι σταθερή για όλα τα μοντέλα. Η ταχύτητα αυτή παράγει μια προσομοίωση όπου οι ανακλάσεις που αντιστοιχούν στους μεταλλικούς δοκούς λαμβάνουν μέρος σε βάθος 0.15 m όπως αναμένεται. Εμφανίζει όμως τις υπόλοιπες δομές σε ελαφρώς διαφορετικά βάθη από τα αναμενόμενα, οι διαφορές κυμαίνονται μεταξύ 1 με 3 cm.



Σχήμα 4.4 Το πρώτο συνθετικό μοντέλο (πάνω). Η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση (κάτω). Με κόκκινο βέλος σημειώνονται οι ανακλάσεις των μεταλλικών δοκών και με μπλε βέλος η ανάκλαση από την επαφή οπλισμένου σκυροδέματος-τραβερτίνη. Με πορτοκαλί βέλη σημειώνονται οι πολλαπλές ανακλάσεις.

2ο ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Ακολουθώντας στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται το δεύτερο συνθετικό μοντέλο και η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση. Σύμφωνα με παρατηρήσεις στο πεδίο, στο μοντέλο έχει προστεθεί:

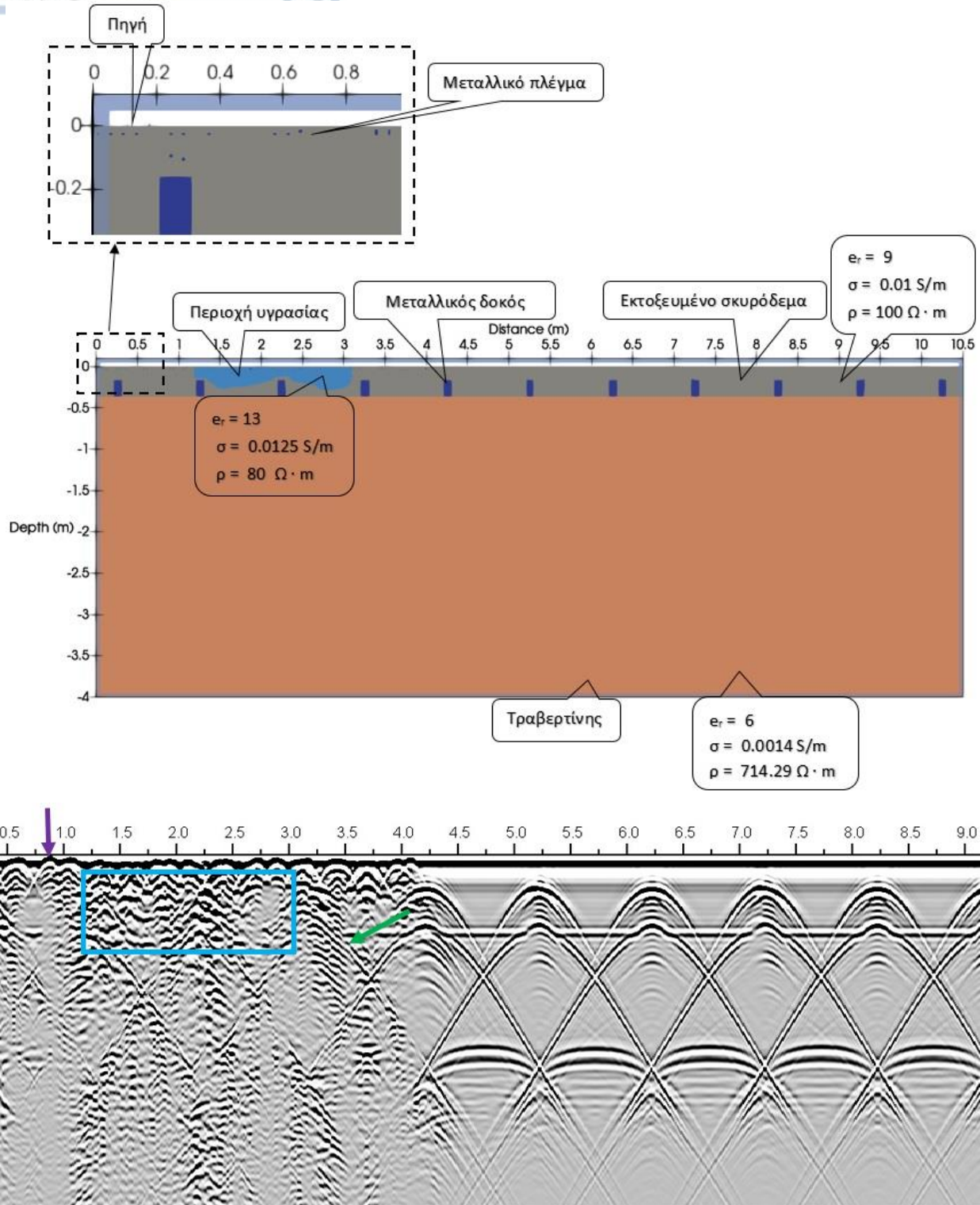
- Οι ράβδοι μεταλλικού οπλισμού τύπου πλέγματος τα οποία τέμνονται κάθετα από το γεωραντάρ. Το πλέγμα αποτελείται από ράβδους πάχους 1 cm και καλύπτει ένα μέρος της απόστασης του μοντέλου, μέχρι τα ~ 4.10 m. Οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι ακαθόριστες και το βάθος στο οποίο διακρίνονται είναι στα 1-2 cm κάτω από την επιφάνεια του τοιχίου.
- Περιοχή υγρασίας που εμφανίζεται από τα 1.25 m μέχρι τα 3.20 m του μοντέλου σε βάθος από την επιφάνεια μέχρι τα ~ 0.25 m. Η περιοχή αυτή έρχεται σε επαφή με το μεταλλικό πλέγμα και εμπεριέχεται στο τοιχίο.

Στην επεξεργασμένη τομή που προέκυψε από την προσομοίωση φαίνονται οι ανακλάσεις που αντιστοιχούν στα επιμέρους χαρακτηριστικά του μοντέλου. Η τομή στα ~ 4.10 m διαχωρίζεται σε δύο μέρη, στο πρώτο μέρος προσομοιάζονται το μεταλλικό πλέγμα και η περιοχή υγρασίας ενώ το δεύτερο μέρος έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το πρώτο συνθετικό μοντέλο. Ο κύριος σκοπός αυτού του διαχωρισμού ήταν να γίνει εμφανής ο βαθμός με τον οποίο οι ανακλάσεις του μεταλλικού πλέγματος επικρατούν και αποκρύπτουν τις ανακλάσεις των δοκών. Ο δεύτερος σκοπός ήταν ο προσδιορισμός της απεικόνισης που θα είχε η περιοχή υγρασίας σε ανάλογες πραγματικές συνθήκες.

Οι ανακλάσεις του μεταλλικού πλέγματος υφίστανται στο πρώτο μέρος της τομής. Είναι δυσδιάκριτες λόγω των απ' ευθείας αποκρίσεων αλλά πάλι μπορούν να παρατηρηθούν σε βάθος 1-2 cm όπως αναμένεται (μωβ βέλος).

Στο πρώτο μέρος της τομής, από τα 7 cm βάθους και μετά καταγράφονται πολλαπλές ανακλάσεις που οφείλονται στο μεταλλικό πλέγμα. Σε σχέση με το δεύτερο μέρος της τομής, οι ανακλάσεις αυτές καθιστούν δυσδιάκριτη αν και παρατηρήσιμη την ανάκλαση που υποδεικνύει την επαφή μεταξύ τραβερτίνη και οπλισμένου σκυροδέματος. Οι πολλαπλές αποκρύπτουν τις ανακλάσεις που προέρχονται από τους μεταλλικούς δοκούς. Όμως, συμβάλουν με αυτές σχηματίζοντας συστάδες ανά 1.00 m (πράσινο βέλος). Από την καταγραφή των συστάδων γίνεται δυνατή η παρατήρηση των δοκών στο πρώτο μέρος της τομής παρ'όλο που οι αντίστοιχες ανακλάσεις έχουν αποκρυφτεί.

Ακόμη, στην περιοχή του τοιχίου όπου υπάρχει περιοχή υγρασίας παρατηρείται εξασθένηση του σήματος (μπλε πλαίσιο).



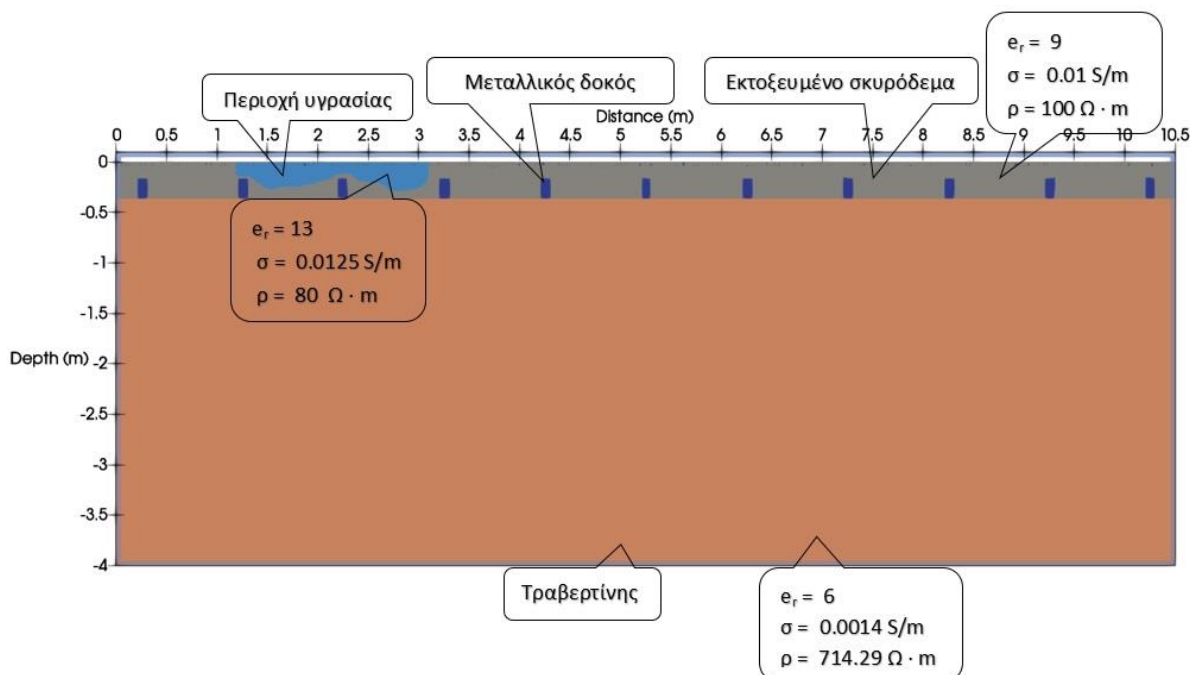
Σχήμα 4.5 Το δεύτερο συνθετικό μοντέλο (πάνω). Η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση (κάτω). Με μωβ βέλος σημειώνονται οι ανακλάσεις του μεταλλικού πλέγματος, ενώ με πράσινο οι συστάδες ανακλάσεων. Με μπλε πλαίσιο σημειώνονται περιοχές με εξασθενημένο σήμα προερχόμενες από ζώνες υγρασίας.

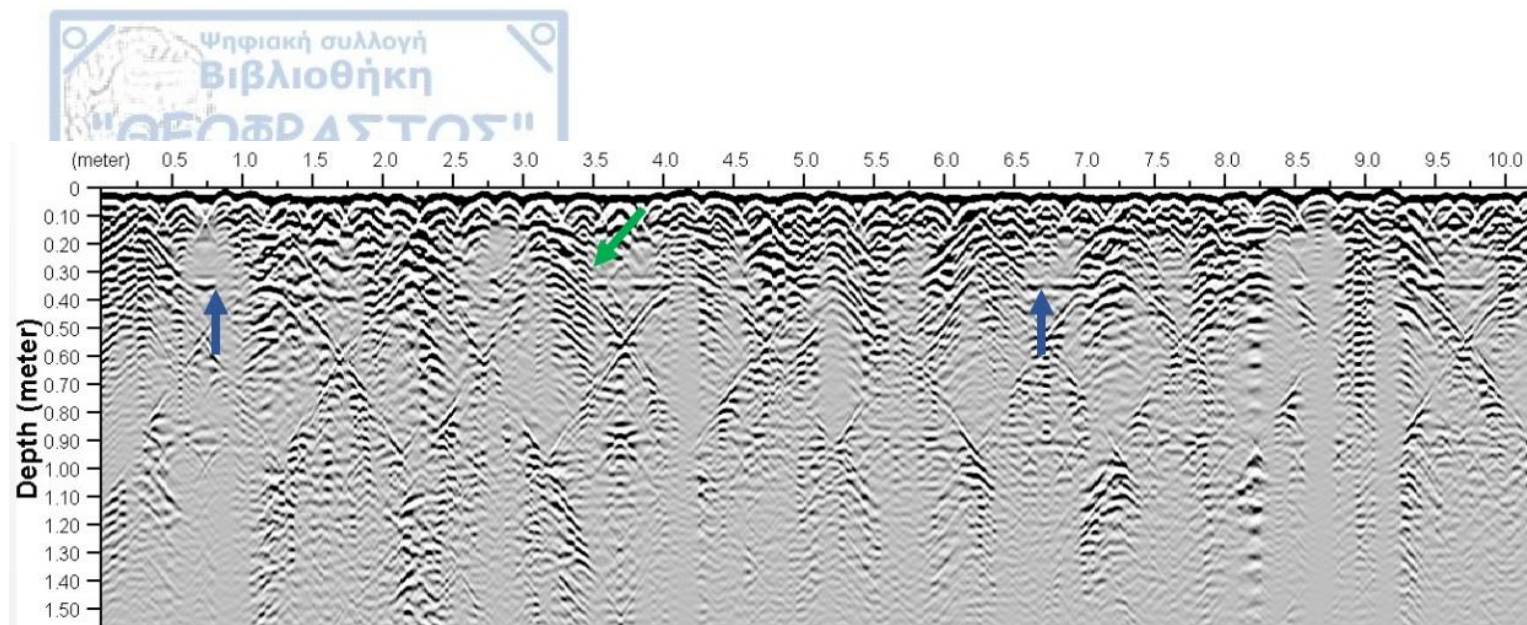
3ο ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το τρίτο συνθετικό μοντέλο (Σχήμα 4.6) περιλαμβάνει τα ίδια χαρακτηριστικά με το δεύτερο, με τη μόνη διαφορά πως έχουν προστεθεί οι ράβδοι του μεταλλικού πλέγματος σε όλη του την έκταση.

Στην επεξεργασμένη τομή (Σχήμα 4.6) που προέκυψε από την προσομοίωση καταγράφονται οι ανακλάσεις που οφείλονται στο μεταλλικό πλέγμα. Από τα 7 cm και μετά παράγονται πολλαπλές ανακλάσεις σε όλο το μήκος της τομής. Αυτό έχει ως συνέπεια:

- 1) Η ανάκλαση που υποδεικνύει την επαφή μεταξύ τραβερτίνης και οπλισμένου σκυροδέματος στα 0.33 m να γίνεται δυσδιάκριτη αν και παρατηρήσιμη σε όλο το μήκος της τομής (μπλε βέλη).
- 2) Οι πολλαπλές ανακλάσεις που αποκρύπτουν τις ανακλάσεις των μεταλλικών δοκών, να συμβάλλουν με αυτές σχηματίζοντας συστάδες ανά 1.00 m σε όλο το μήκος της τομής (πράσινο βέλος). Από τις συστάδες γίνονται παρατηρήσιμοι οι μεταλλικοί δοκοί.





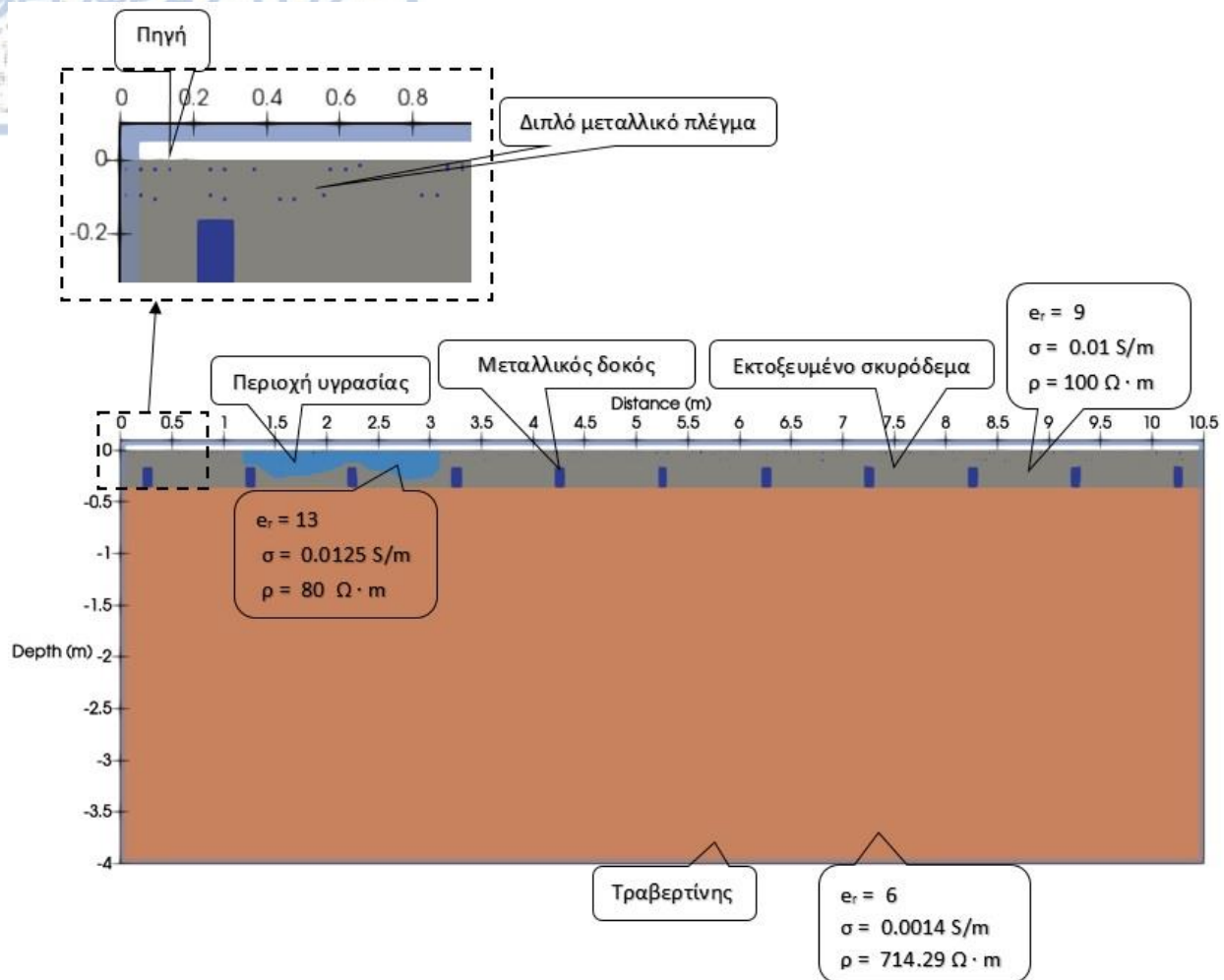
Σχήμα 4.6 Το τρίτο συνθετικό μοντέλο (πάνω). Η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση (κάτω). Με μπλε βέλη σημειώνεται η ανάκλαση από την επαφή οπλισμένου σκυροδέματος-τραβερίνη, ενώ με πράσινο βέλος σημειώνονται οι συστάδες ανακλάσεων.

4ο ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το τέταρτο συνθετικό μοντέλο στο οποίο έχει προστεθεί μια δεύτερη στρώση μεταλλικού πλέγματος. Με αυτό τον τρόπο το μοντέλο προσεγγίζει περισσότερο τις παρατηρήσεις στο πεδίο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επεξεργασμένη τομή (**Σχήμα 4.7**) που προέκυψε από την προσομοίωση. Οι πολλαπλές ανακλάσεις που οφείλονται στο μεταλλικό πλέγμα γίνονται περισσότερες. Οι συστάδες γίνονται εντονότερες και καταλαμβάνουν μεγαλύτερη έκταση κατά τον οριζόντιο άξονα της τομής (πράσινα βέλη). Τα αποτελέσματα αυτής της μεταβολής είναι:

- 1) Η ανάκλαση που υποδεικνύει την επαφή μεταξύ τραβερίνη και οπλισμένου σκυροδέματος να γίνεται ακόμα πιο δυσδιάκριτη αν και παρατηρήσιμη.
- 2) Οι μεταλλικοί δοκοί να γίνονται ακόμα πιο δυσδιάκριτοι.
- 3) Η κάλυψη της περιοχής υγρασίας από τις πολλαπλές ανακλάσεις, καθιστώντας την έτσι μη ορατή.



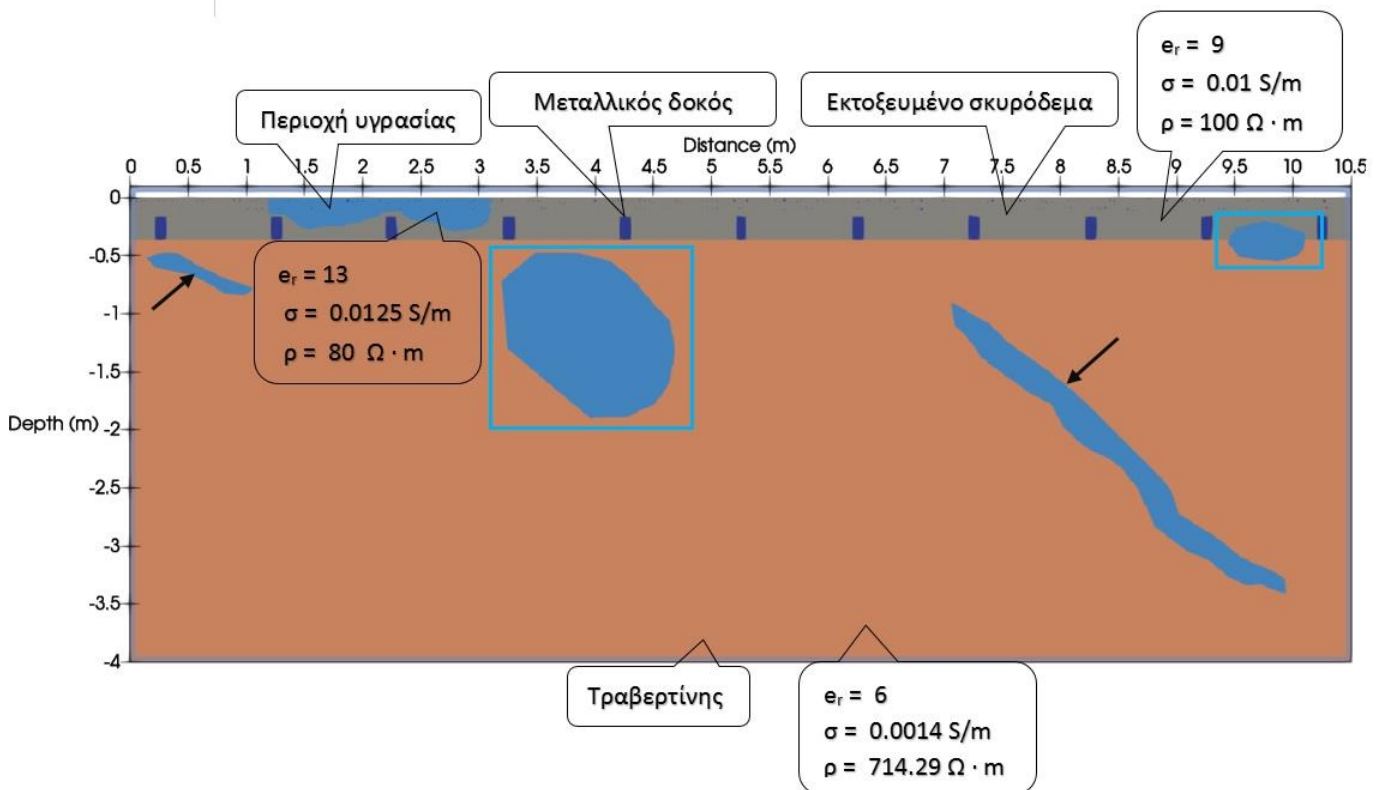
Σχήμα 4.7 Το τέταρτο συνθετικό μοντέλο (πάνω). Η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση (κάτω). Με πράσινα βέλη σημειώνονται οι συστάδες ανακλάσεων.

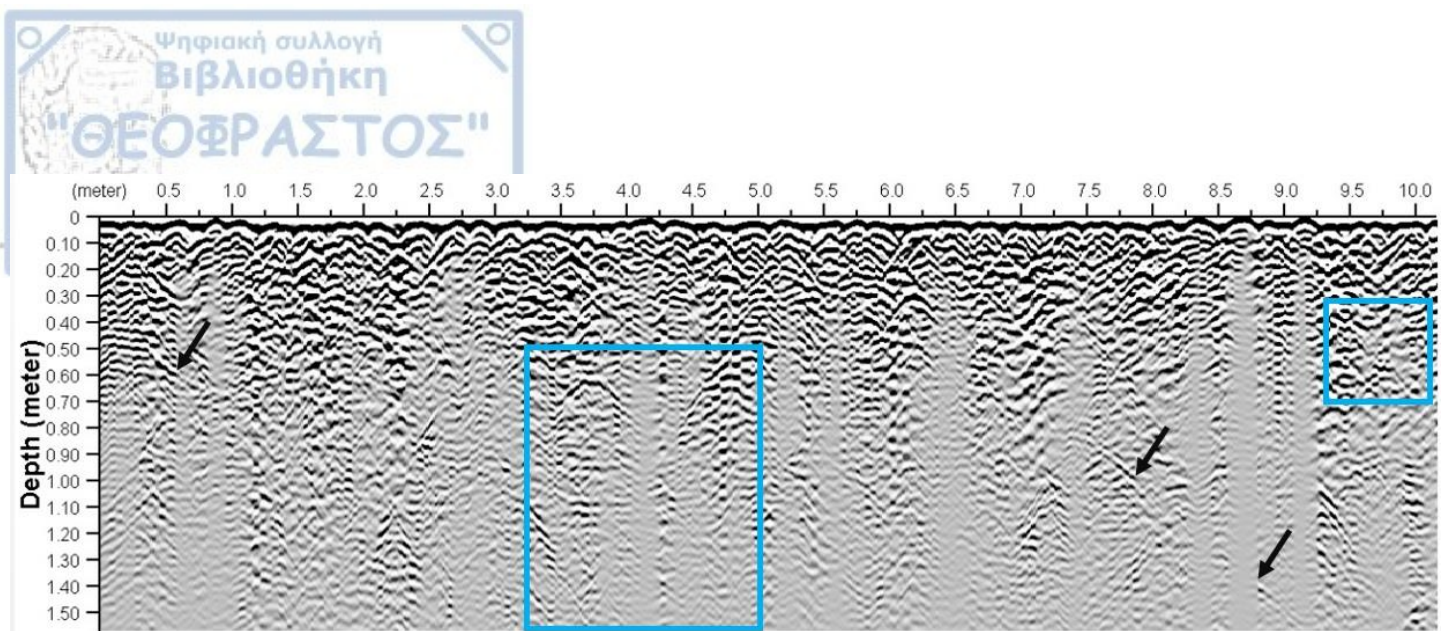
5ο ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το πέμπτο συνθετικό μοντέλο στο οποίο έχουν προστεθεί περιοχές υγρασίας καθώς και ρήγματα. Τα ρήγματα είναι δυο και σημειώνονται με μαύρα βέλη. Το πρώτο τοποθετείται από τα 0.20 m έως τα 1.20 m του μοντέλου, σε βάθος από 0.50 m έως 0.90 m ενώ το δεύτερο, σε απόσταση από τα 7.10 m έως τα 10.00 m και σε βάθος από 0.70 m έως 3.50 m. Οι περιοχές υγρασίας είναι συνολικά τρεις και εμφανίζονται κατά σειρά:

- Από τα 1.25 m μέχρι τα 3.10 m και σε βάθος από την επιφάνεια μέχρι τα ~ 0.25 m.
- Από τα 3.25 m μέχρι τα 4.75 m και σε βάθος από τα 0.50 m μέχρι τα 2.00 m (μπλε πλαίσιο).
- Από τα 9.40 μέχρι τα 10.20 m και σε βάθος από τα 0.40 m έως τα 0.50 m (μπλε πλαίσιο).

Στην επεξεργασμένη τομή (Σχήμα 4.8) παρουσιάζονται οι ανακλάσεις που αντιστοιχούν στις περιοχές υγρασίας και στα ρήγματα. Με μαύρα βέλη έχουν μαρκαριστεί οι ανακλάσεις που συνδέονται με την ύπαρξη των ρηγμάτων. Με μπλε χρώμα έχουν πλαισιωθεί οι περιοχές υγρασίας όπου παρατηρείται εξασθένηση του σήματος.



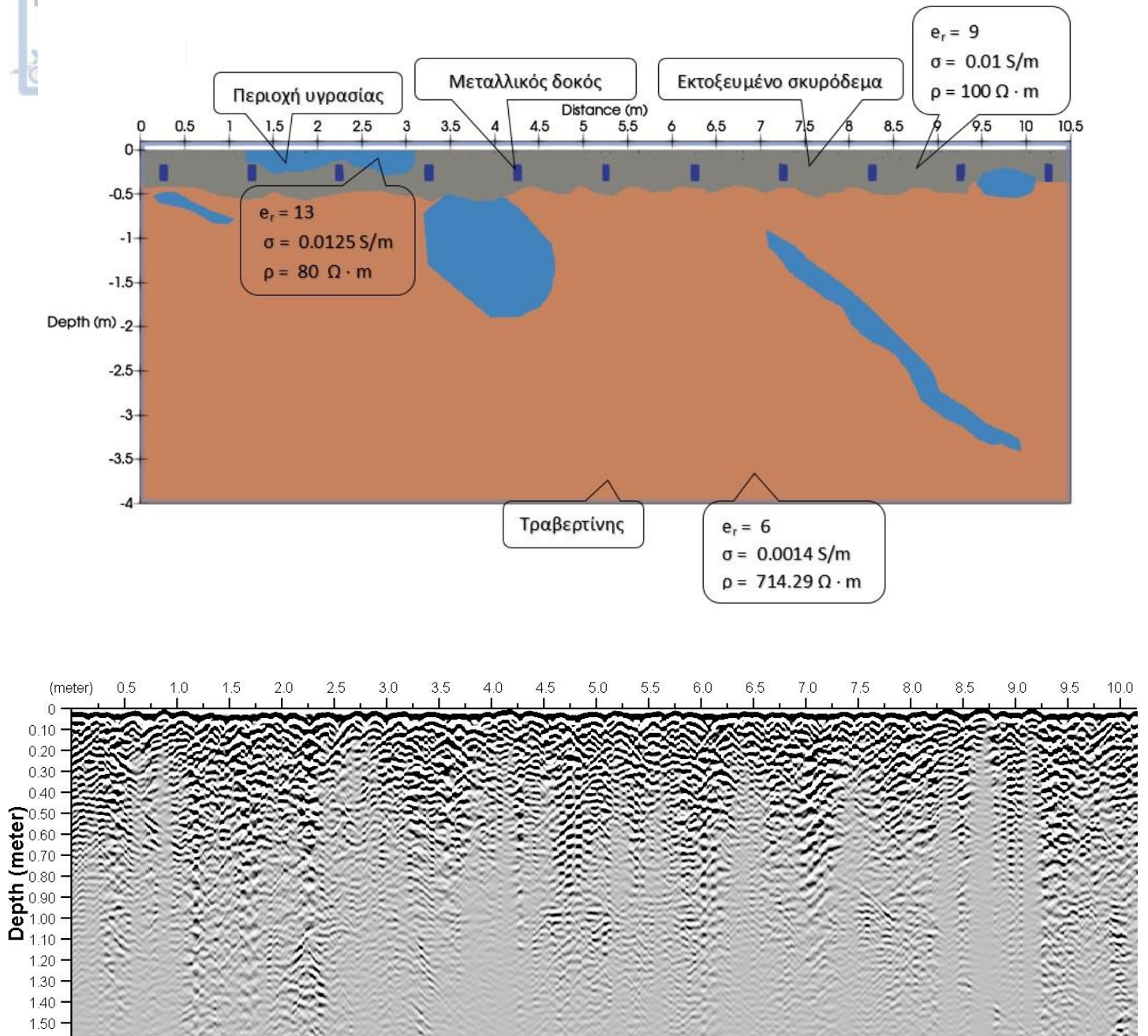


Σχήμα 4.8 Το πέμπτο συνθετικό μοντέλο (πάνω). Η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση (κάτω). Με μπλε πλαίσιο σημειώνονται περιοχές με εξασθενημένο σήμα προερχόμενες από ζώνες υγρασίας. Με μαύρα βέλη σημειώνονται οι ανακλάσεις των ρηγμάτων.

6ο ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο έκτο συνθετικό μοντέλο (**Σχήμα 4.9**) έχει προστεθεί η ανομοιομόρφη επαφή μεταξύ του τοιχίου και του τραβερτίνη.

Στην επεξεργασμένη τομή (**Σχήμα 4.9**) δεν μπορεί πλέον να εξακριβωθεί η επαφή λόγω των επιπλέον ανακλάσεων που παράγονται από την αλλαγή στην επιφάνειά επαφής τους.



Σχήμα 4.9 Το έκτο συνθετικό μοντέλο (πάνω). Η επεξεργασμένη τομή όπως προέκυψε από την προσομοίωση (κάτω), οι δομές είναι πιο δυσδιάκριτες.

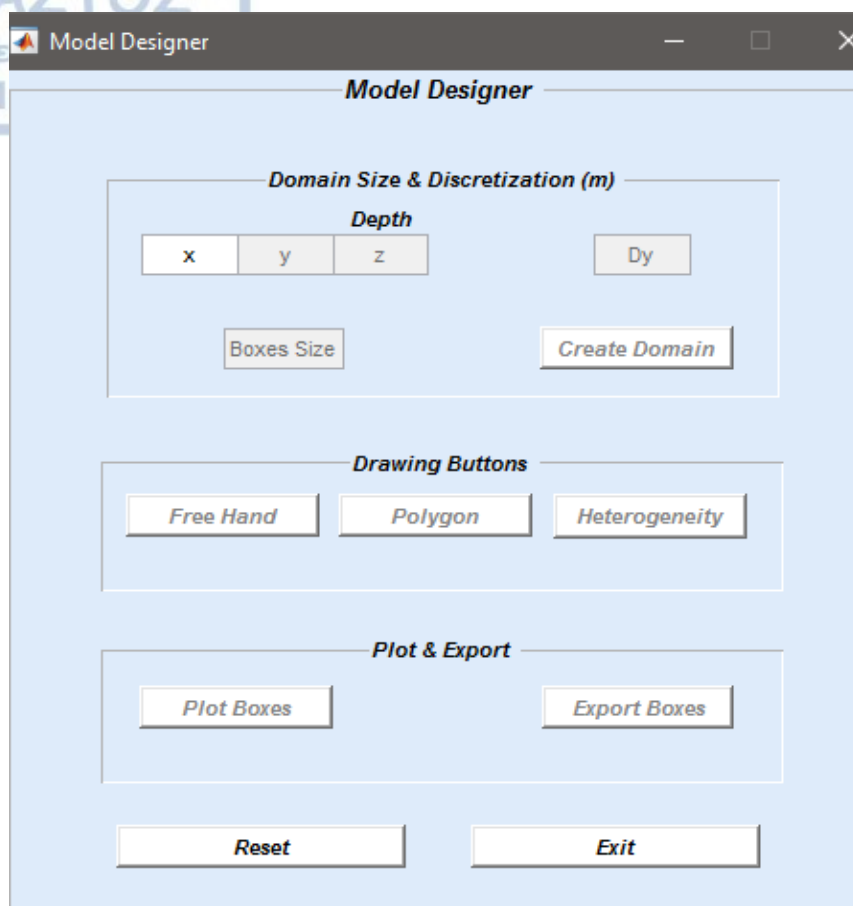
4.4 Χρήση επιπλέον λογισμικών

Το πρόγραμμα Model Designer (Αγγελής, 2017) είναι ένα πρόγραμμα σχεδιασμού που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία πιο σύνθετων μοντέλων. Από τη χρήση του Model Designer παρήχθησαν πολύπλοκα σχήματα και στόχοι στο μοντέλο. Το λογισμικό RADPROfWin (Kim, 2004) περιέχει διάφορες μεθόδους απεικόνισης και ανάλυσης δεδομένων και χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων.

Όπως έχει αναφερθεί, τα αρχεία που δημιουργήθηκαν από τη μοντελοποίηση μέσω του gprMax είναι της μορφής HDF5. Τα προγράμματα επεξεργασίας δεν είναι συμβατά με αυτή τη μορφή αρχείου. Η μορφή των αρχείων γεωραντάρ μετατράπηκε με τη χρήση αλγορίθμου Matlab (Αγγελής, 2017). Συγκεκριμένα η αρχική μορφή ήταν η .HDF5 και μετατράπηκε σε μορφή .Rd3/.Rad η οποία είναι συμβατή με τα προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ.

4.4.1 Model Designer

Για το σχεδιασμό ενός στόχου στο gprMax δίνονται εντολές και συντεταγμένες στο αρχείο εισαγωγής (input file). Με αυτό το τρόπο δημιουργείται μια δομή η οποία με τις κατάλληλες συντεταγμένες ορίζεται στο χώρο. Ωστόσο, για το σχεδιασμό πιο σύνθετων δομών ο βαθμός δυσκολίας της παραπάνω διαδικασίας αυξάνεται. Το πρόγραμμα που απεικονίζεται στο σχήμα 4.10 διευκολύνει τη δημιουργία πολυπλοκότερων δομών. Με τη χρήση αυτού προγράμματος διακριτοποιείται ο χώρος που χρησιμοποιείται στο μοντέλο σε επιμέρους κουτιά. Το καθένα από αυτά λαμβάνει μια ξεχωριστή ταυτότητα υλικού (material id) η οποία έχει δηλωθεί στο αρχείο εισαγωγής.



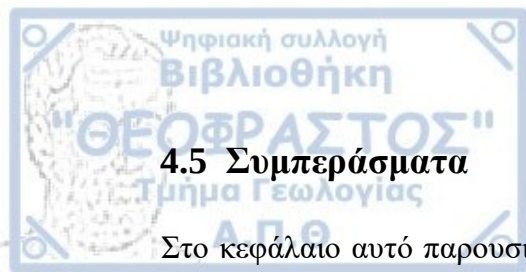
Σχήμα 4.10 Απεικόνιση της επιφάνεια εργασίας του Model Designer



Παράδειγμα κατασκευής σύνθετου μοντέλου

Μετά τη δημιουργία του αρχείου εισαγωγής στο grfMax, ορίζονται οι μεταβλητές x , y , z , Dy στο Model Designer. Με αυτό το τρόπο υπολογίζονται τα μεγέθη των κουτιών τα οποία ισοδυναμούν με 10 φορές το Dy . Το διάστημα Dy μπορεί να αλλάξει εάν είναι επιθυμητή μια πιο αραιή διακριτοποίηση ή μια πιο εξομαλυμένη δομή. Με την επιλογή “Create Domain” κατασκευάζεται ο χώρος της μοντελοποίησης στον οποίο θα πρέπει να δοθεί μια ταυτότητα υλικού (material id). Στο χώρο της μοντελοποίησης με τις επιλογές “Free Hand” ή “Polygon” δημιουργούνται και ταυτοποιούνται δομές. Για την τυχαία ταυτοποίηση κουτιών επιλέγεται το “heterogeneity” όπου χρειάζεται η εισαγωγή ενός ποσοστού που έχει σχέση με το συνολικό αριθμό των κουτιών.

Η παρουσίαση του αποτελέσματος με χρώματα μπορεί να γίνει με το κουμπί “Plot Boxes”. Οι συντεταγμένες και η ταυτότητα υλικού (material id) του κάθε κουτιού μπορούν να εξαχθούν σε αρχείο με την επιλογή “Export Boxes”. Στο αρχείο εισαγωγής του grfMax μπορούν να εισαχθούν οι παραπάνω πληροφορίες.



4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση των δεδομένων γεωραντάρ. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση ήταν το grtMax. Εκτός από τα παραπάνω μοντέλα δημιουργήθηκαν και άλλα που είχαν ως σκοπό την εξοικείωση με τα δεδομένα του γεωραντάρ.

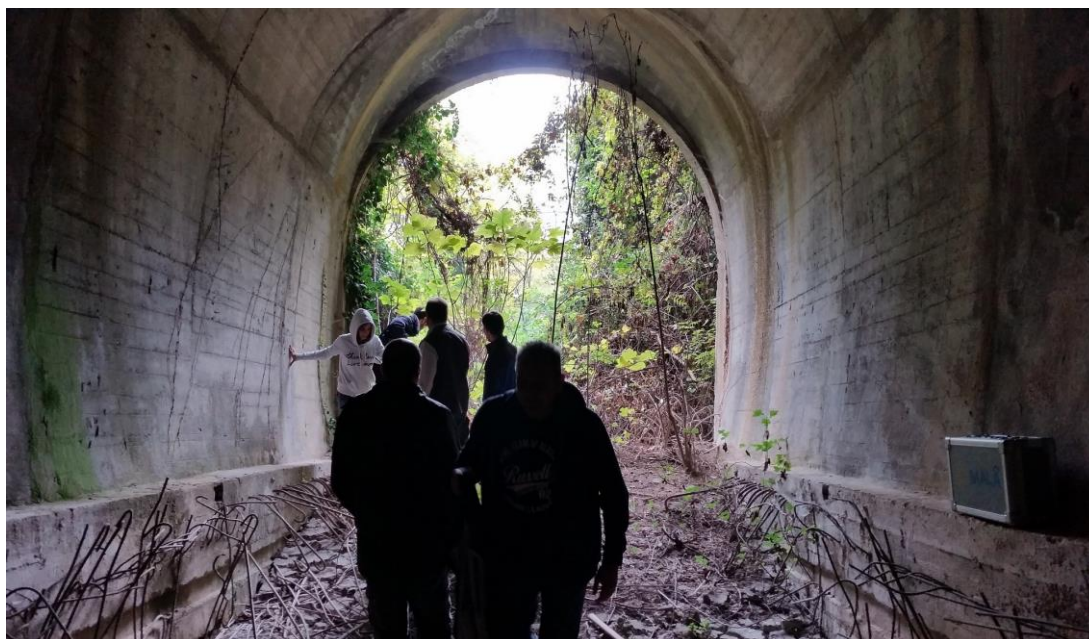
Τα αποτελέσματα των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των μετρήσεων υπαίθρου, ενώ συντέλεσαν και ως προς την ακριβέστερη ερμηνεία των δεδομένων που θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Αν και το μεταλλικό πλέγμα δυσχεραίνει την παρατήρηση των υπόλοιπων δομών, όλες οι δομές είναι διακριτές με εξαίρεση την ανώμαλη επαφή τραβερτίνη- τοιχίου. Αξίζει να σημειωθεί πως οι μεταλλικοί δοκοί είναι παρατηρήσιμοι μόνο μέσω των συστάδων που προκαλούν.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Στο 5ο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωφυσική διασκόπηση που έλαβε μέρος στην σήραγγα στην περιοχή των καταρρακτών της Έδεσσας. Αναλύεται ο εξοπλισμός, η επεξεργασία των δεδομένων, τα αποτελέσματα και η ερμηνεία τους.

Ο σκοπός της διασκόπησης ήταν ο έλεγχος των τοιχωμάτων της σήραγγας όσον αφορά την κατάσταση του οπλισμού, του μεταλλικού πλέγματος, της τραβερτινικής βραχώμαζας καθώς και της επαφής μεταξύ τους. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν ήταν του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχήμα 5.2).





Σχήμα 5.1 Περιοχή μελέτης, πάνω η είσοδος στη σήραγγα, κάτω χαρακτηριστική εικόνα του εσωτερικού της σήραγγας.



Σχήμα 5.2 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης όπου φαίνεται η προβολή της σήραγγας.

Το συνολικό μήκος της σήραγγας είναι 117 m. Με πράσινο σημειώνεται το μήκος της όδευσης γεωραντάρ που είναι 80.75 m και βρίσκεται από τα 10.00 m έως τα 90.75 m της σήραγγας. Με πορτοκαλί σημειώνεται το συνολικό μήκος της ηλεκτρικής τομογραφίας που είναι 11.50 m, η έκταση που καλύπτει στη σήραγγα είναι από τα 23.00 m έως τα 34.50 m. Το μπλε σημείο υποδηλώνει την ύπαρξη επιφανειακής υγρασίας που βρίσκεται από τα 27.50 m έως τα 29.50 m της σήραγγας.

5.1 Γεωραντάρ

5.1.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Οι μετρήσεις γεωραντάρ διεξάχθηκαν με τη λήψη δύο παράλληλων προφίλ στα δυτικά της σήραγγας. Το πρώτο προφίλ ξεκινά στα 2.34 m από το δάπεδο της σήραγγας και το δεύτερο στα 1.40 m. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι το σύστημα γεωραντάρ της *Sensors & Software* με την θωρακισμένη κεραία κεντρικής συχνότητας 1Ghz (Σχήμα 5.3), καθώς ύστερα από δοκιμές κρίθηκε επαρκής ως προς την διακριτική ικανότητα και το βάθος διείσδυσης. Το βήμα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 0.01 m, ενώ το χρονικό παράθυρο ορίστηκε στα 31.4 και 31.3 ns αντιστοίχως.





Σχήμα 5.3 Συλλογή δεδομένων με την κεραία 1000 MHz της Sensors & Software.

5.1.2 Επεξεργασία

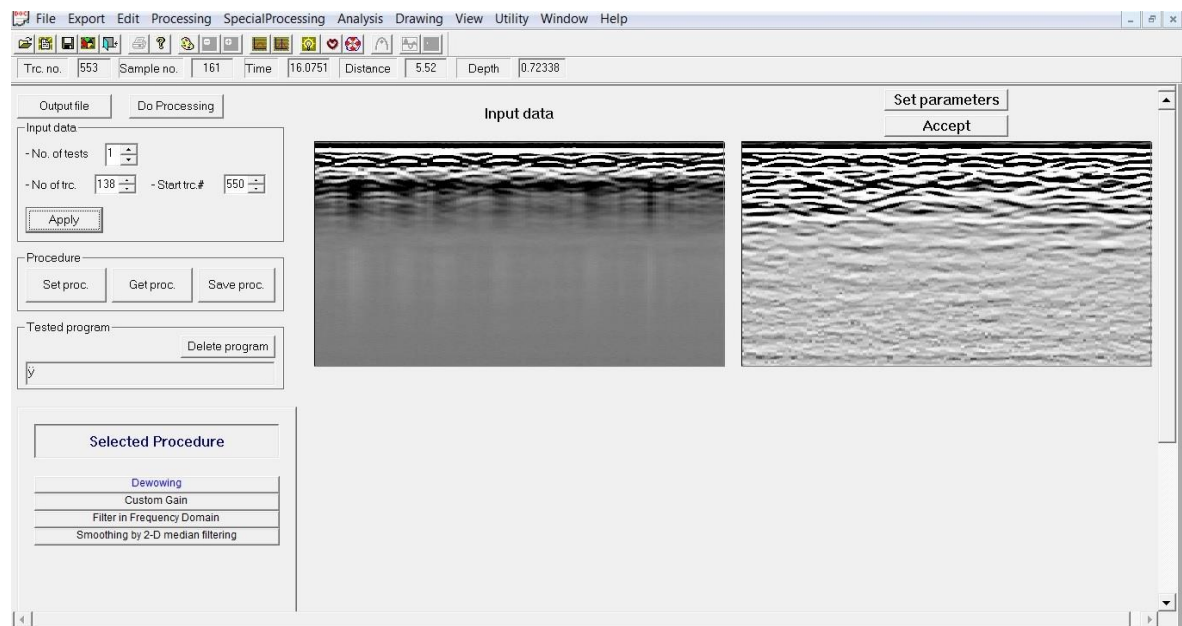
Η επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων έγινε με τη χρήση του λογισμικού RADPROfWin (Kim, 2004). Το παραπάνω λογισμικό παρέχει πληθώρα τεχνικών καθώς και γραφικό περιβάλλον που είναι εξατομικευμένα για την ανάλυση, επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων γεωραντάρ (Σχήμα 5.4).

Στα προφίλ διορθώθηκαν οι χρόνοι πρώτης άφιξης (**Zero time adjustment**), απομακρύνθηκε η επαγωγική συνιστώσα (**dewow**) και αφαιρέθηκε ο θόρυβος υποβάθρου (**Background noise removal**). Ακολούθως, τα δεδομένα ενισχύθηκαν χρονικά (**Custom time gain**) και φιλτραρίστηκαν στο πεδίο των συχνοτήτων (**Frequency filtering**).

Για να επιτευχθεί η ανάδειξη των περιοχών με υψηλή ανακλαστικότητα εφαρμόστηκε στα επεξεργασμένα δεδομένα ο μετασχηματισμός Hilbert (**Hilbert Transform**). Ο μετασχηματισμός Hilbert υπολογίζει το στιγμιαίο πλάτος, το οποίο απεικονίζεται σε τομές γεωραντάρ χωρίς αρνητικές τιμές. Το παραπάνω χαρακτηριστικό τον καθιστά κατάλληλο και την ανάδειξη δομών έντονης ανακλαστικότητας όπως για παράδειγμα ο μεταλλικός οπλισμός.

Με την χρήση υπερβολών, καθώς και στόχων γνωστού βάθους (κατασκευή μεταλλικών

δοκών όπου η τραβερτινικός σχηματισμός είναι εμφανής) υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης του H/M παλμού στα 90m/μs.



Σχήμα 5.4 Επεξεργασία δεδομένων μέσω του λογισμικού RADPROWin (Kim, 2004).

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν δύο οριζόντιες σαρώσεις κατά μήκος της στοάς. Οι σαρώσεις ήταν παράλληλες και η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ τους ήταν 94 cm. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων μέσω δισδιάστατων τομών.

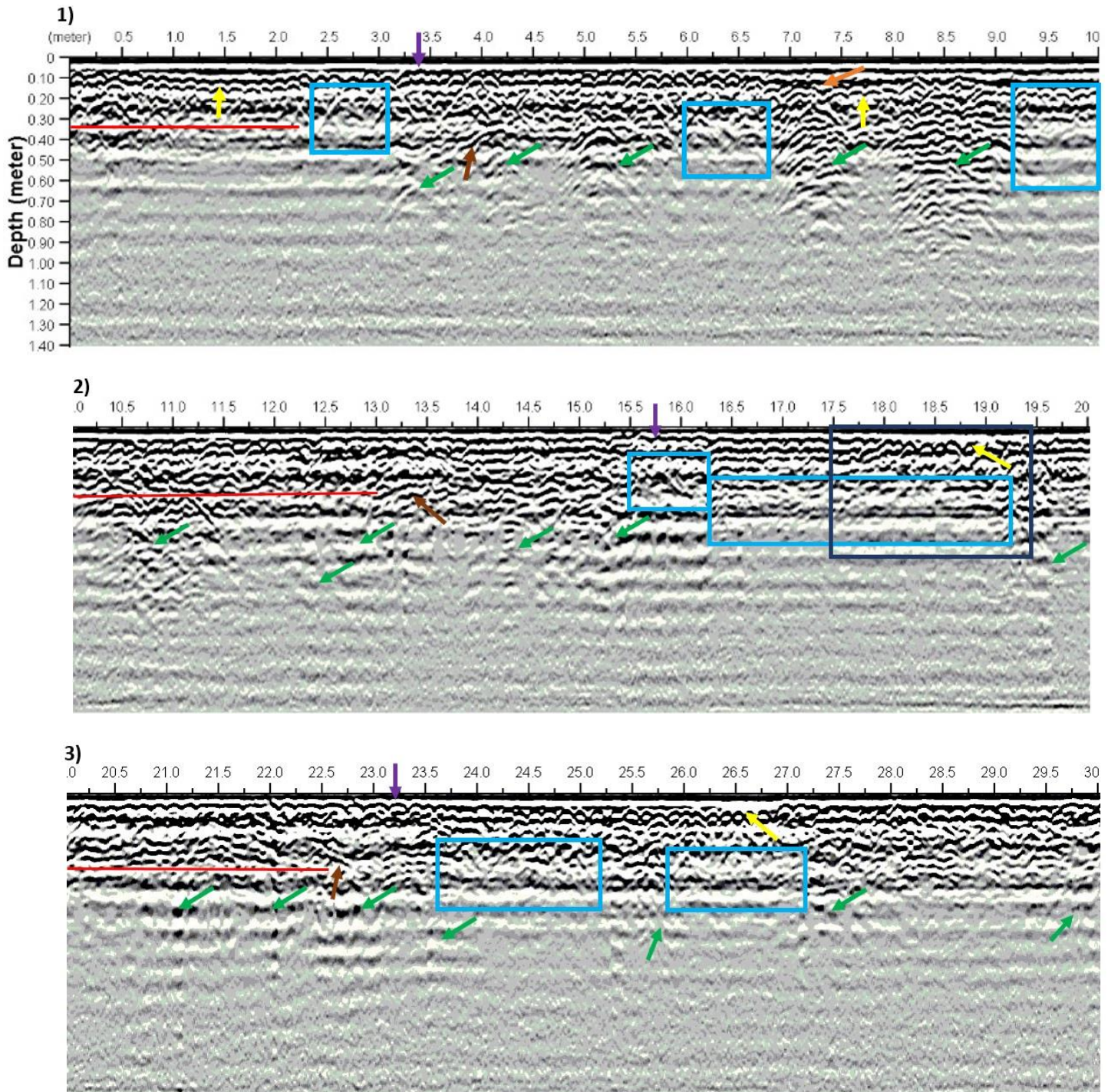
5.1.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ του πρώτου προφίλ σάρωσης από την σήραγγα της Έδεσσας. Η τομή έχει χωριστεί ανά 10 m για ευκολότερη ερμηνεία. Το ύψος της τομής είναι στα 2.34 m από το δάπεδο της σήραγγας. Το βάθος και η έκταση της τομής είναι 1.40 m και 80.75 m, αντίστοιχα ενώ το χρονικό παράθυρο ορίστηκε στα 31.4 ns. Η μετατροπή της κατακόρυφης συνιστώσας του χρόνου σε βάθος έγινε με τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που ήταν 90 m/usec.

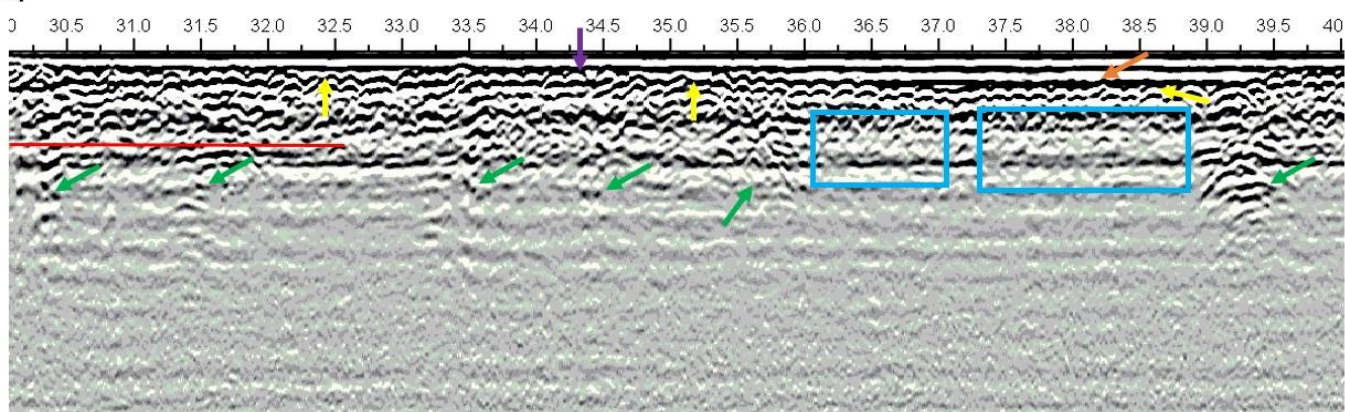
Στα πρώτα εκατοστά του βάθους παρατηρούνται ανακλάσεις που αντιστοιχούν στο μεταλλικό πλέγμα και έχουν σημειωθεί με μωβ βέλη. Σε ορισμένα σημεία της τομής οι ανακλάσεις αυτές εμφανίζονται σε μεγαλύτερα βάθη (κίτρινα βέλη). Πιθανώς το μεταλλικό πλέγμα εγκαταστάθηκε σε μεγαλύτερο βάθος για λόγους αντιστήριξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις το πλέγμα ανιχνεύεται σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη. Εκεί γίνονται αντιληπτές γραμμικές ανακλάσεις (πορτοκαλί βέλη) που πιθανώς να σχετίζονται με τα τμήματα του μεταλλικού πλέγματος που είναι παράλληλα στη διεύθυνση όδευσης του γεωραντάρ. Με μπλε πλαίσια επισημαίνονται οι περιοχές όπου το σήμα είναι πιο εξασθενημένο και πιθανώς σχετίζονται με περιοχές υψηλής αγωγιμότητας π.χ. περιοχές υγρασίας, όπως διαπιστώνεται και στην τομή της προσομοίωσης. Επίσης συμπίπτουν με την επιφανειακή υγρασία (Σχήμα 5.5 εικόνα 2). Το τμήμα που αντιστοιχεί στην επιφανειακή υγρασία έχει σημειωθεί με σκούρο μπλε πλαίσιο. Με καφέ βέλη έχουν σημειωθεί ανακλάσεις που πιθανότατα συνδέονται με ασυνέχειες ή ρήγματα. Στο βάθος των ~ 0.15 m ξεκινάνε συστάδες ανά ~ 1.00 m και σημειώνονται με πράσινα βέλη. Οι συστάδες παρομοιάζουν τις συστάδες που παρατηρήθηκαν στην τομή της προσομοίωσης. Στην συνθετική τομή είναι γνωστό ότι οι συστάδες είναι αποτέλεσμα της συμβολής των ανακλάσεων που οφείλονται στο μεταλλικό πλέγμα με τις ανακλάσεις από τους μεταλλικούς δοκούς. Έτσι, θεωρείται πως πιθανώς και στα πραγματικά δεδομένα οι συστάδες να δηλώνουν την παρουσία μεταλλικών δοκών. Σε κάποια σημεία της τομής οι συστάδες εμφανίζονται εντονότερες ενώ σε άλλα τείνουν να εξαφανιστούν γεγονός που πιθανώς να αποδίδεται στην πιθανή παρουσία δομών με μεγαλύτερη αγωγιμότητα όπως για παράδειγμα πυκνότερες περιοχές του μεταλλικού πλέγματος, περιοχές υγρασίας στο τοιχίο και περιοχές υγρασίας στην επαφή του τοιχίου με τον τραβερτίνη. Κατά μήκος της τομής σε ~ 0.35 m βάθος εμφανίζεται μια ασθενής ανάκλαση (κόκκινη γραμμή) με ανεστραμμένη πολικότητα που ενδεχομένως να αντιστοιχεί στην επαφή μεταξύ του οπλισμένου σκυροδέματος και του τραβερτίνη. Η ίδια ασθενής ανάκλαση παρατηρείται και στη συνθετική τομή από την επαφή των παραπάνω δομών.

Στη περίπτωση της επαφής οπλισμένου σκυροδέματος- τραβερτίνη λόγω της χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) του τραβερτίνη που εκτιμάται πως είναι 6 σε σχέση με του οπλισμένου σκυροδέματος που εκτιμάται στα 9, αναμένεται η πολικότητα του ανακλώμενου σήματος να είναι ανεστραμμένη. Αυτό σημαίνει πως οι ανακλάσεις στην τομή θα απεικονίζονται με μια αρχική λευκή ζώνη που θα ακολουθείται από μια μαύρη

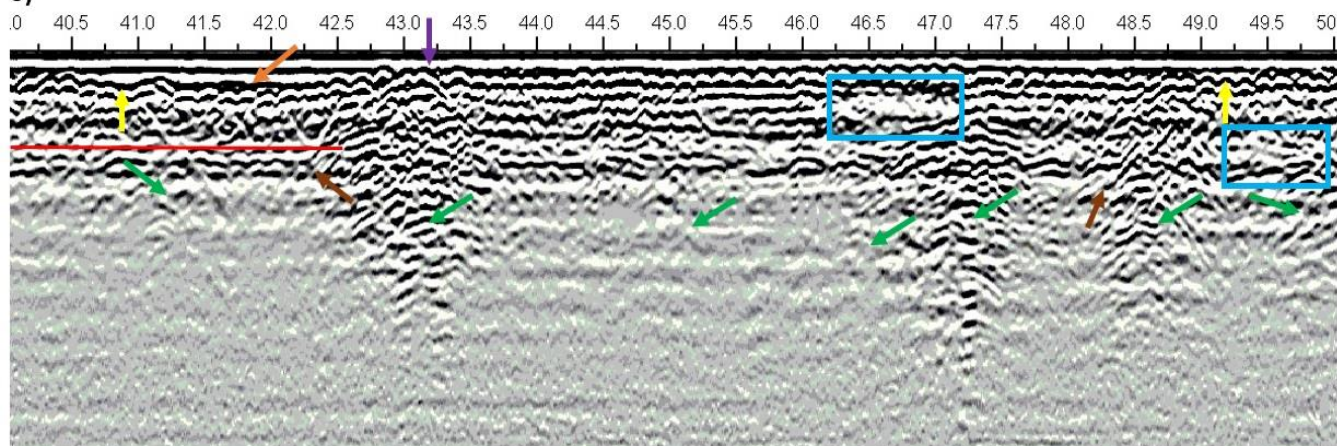
ζώνη. Η λευκή ζώνη αντιστοιχεί σε μια αρνητική κορυφή της καμπύλης υπερβολής ενώ η μαύρη ζώνη σε μια θετική κορυφή. Στην αντίθετη περίπτωση που η πολικότητα του ανακλώμενου σήματος προκύπτει από μια τυπική αλληλουχία αυξανόμενης διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r), θα παρουσιάζει μια θετική κορυφή ακολουθούμενη από μία αρνητική κορυφή.



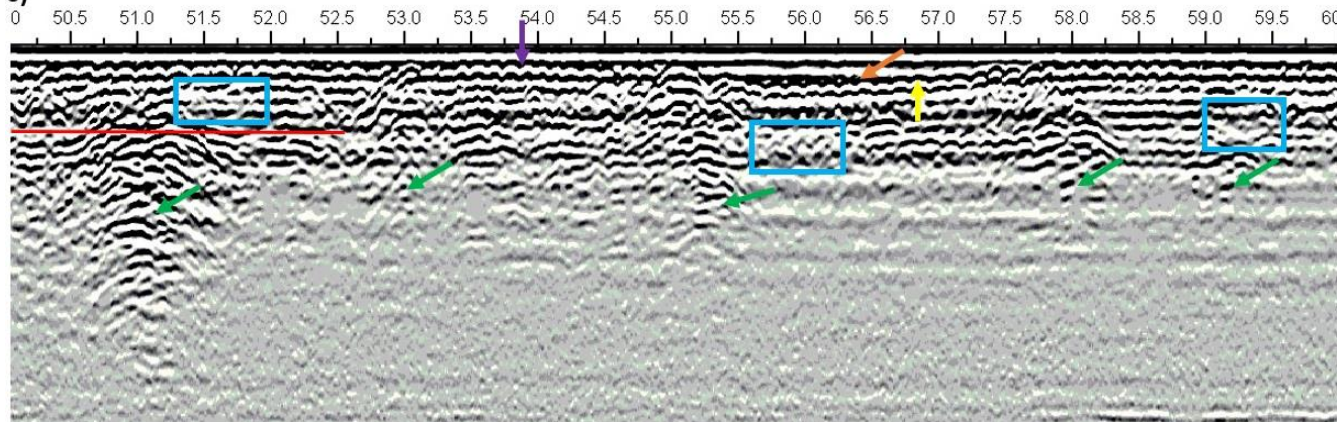
4)

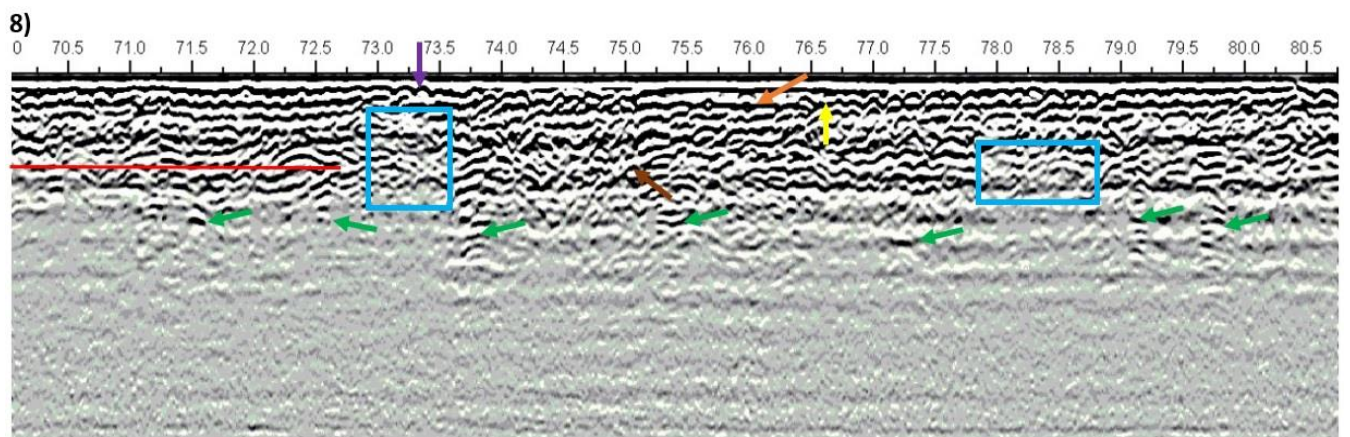
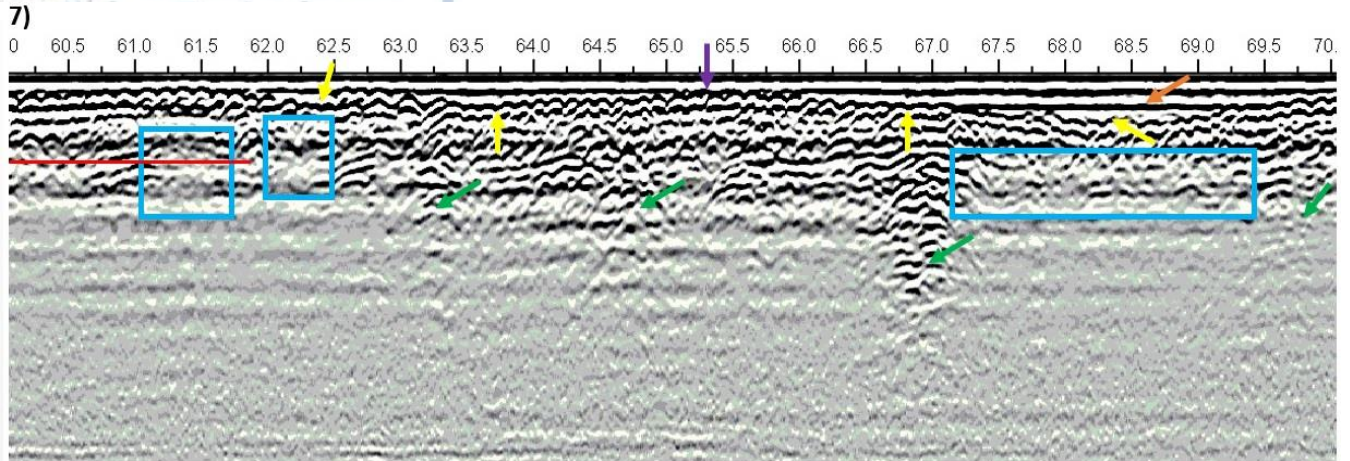


5)



6)



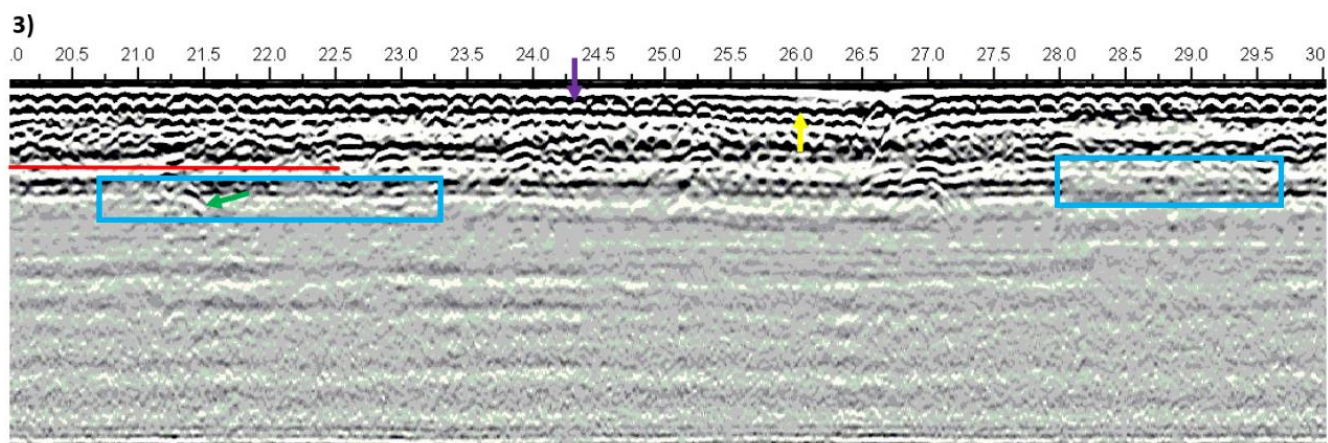
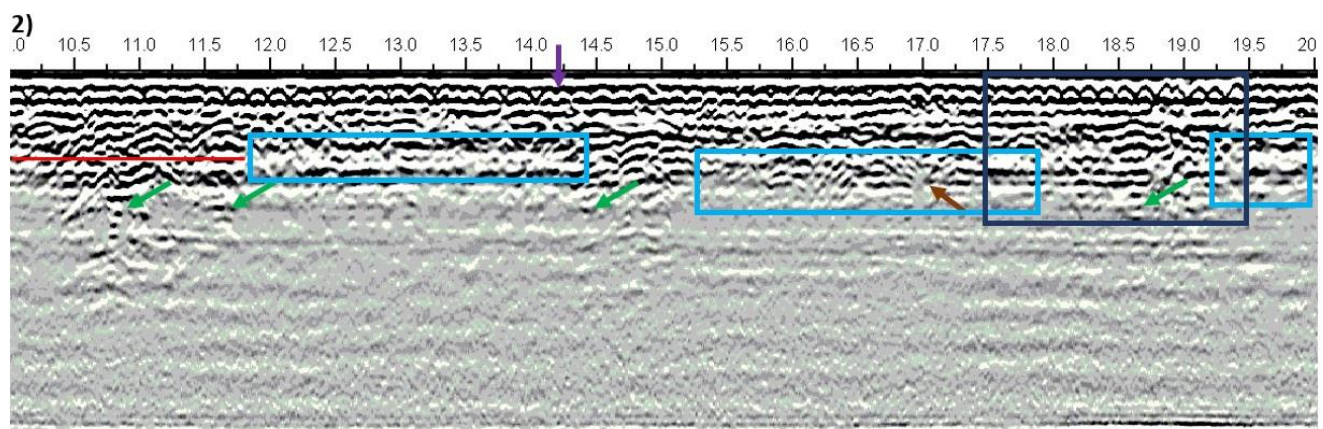
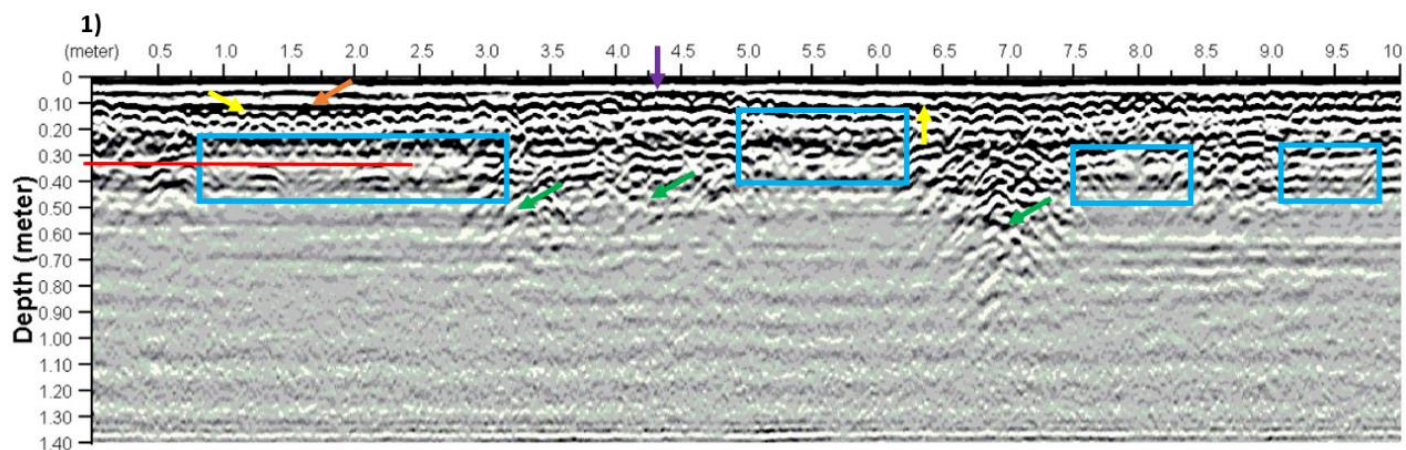


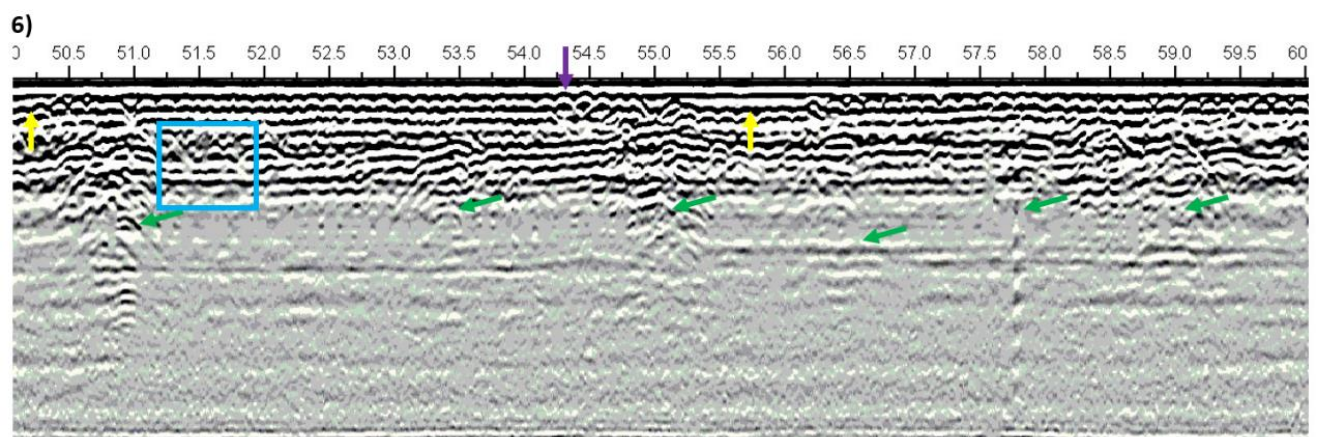
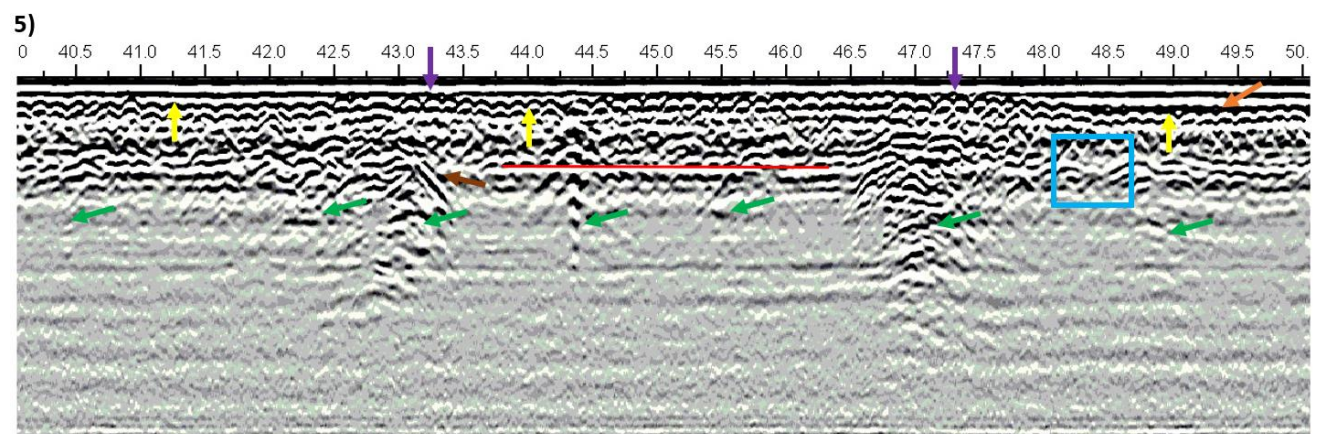
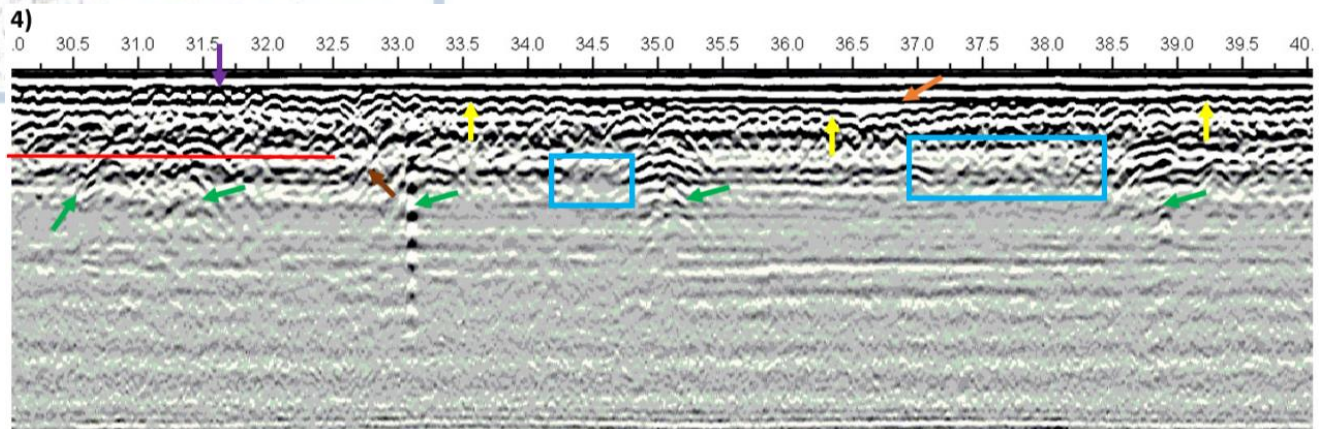
Σχήμα 5.5 Η πρώτη επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ χωρισμένη ανά 10 m. Έχουν υποδειχθεί οι ανακλάσεις των εξής δομών: μεταλλικό πλέγμα (μωβ βέλος), περιοχές όπου το μεταλλικό πλέγμα βρίσκεται σε μεγαλύτερα βάθη (κίτρινο βέλος), τμήματα του μεταλλικού πλέγματος παράλληλα στη διεύθυνση όδευσης (πορτοκαλί βέλος), επαφή τοιχίου-τραβερτίνη (υπόδειξη με κόκκινη γραμμή), περιοχές υψηλής αγωγιμότητας (μπλε πλαίσιο), ασυνέχειες (καφέ βέλος) και συστάδες [μεταλλικοί δοκοί] (πράσινο βέλος). Με σκούρο μπλε πλαίσιο έχει σημειωθεί το τμήμα που αντιστοιχεί στην περιοχή επιφανειακής υγρασίας που έχει παρατηρηθεί στο πεδίο.

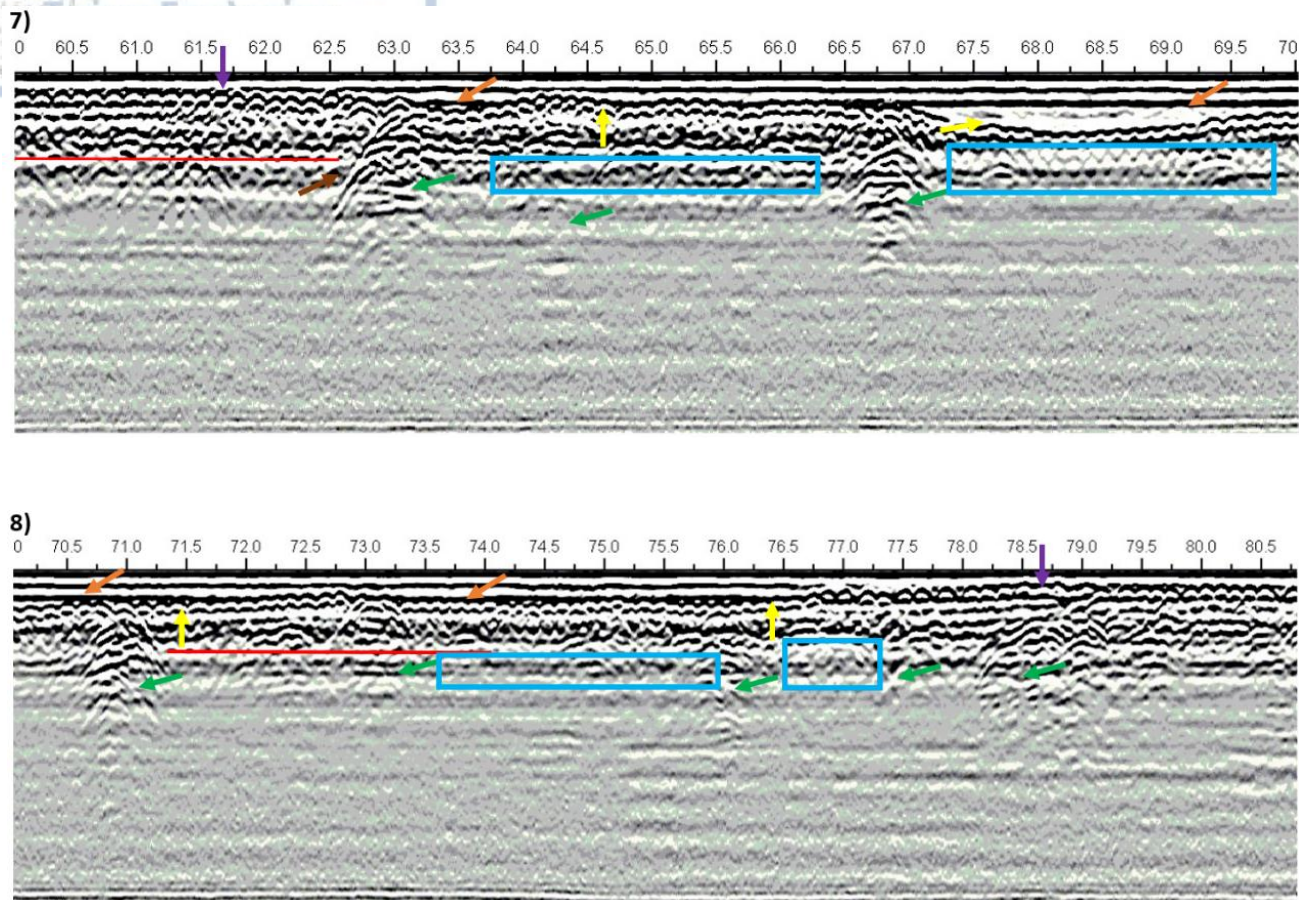
Στο **σχήμα 5.6** παρουσιάζεται οι επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ από το δεύτερο προφίλ σάρωσης. Όπως εφαρμόστηκε και παραπάνω, η τομή έχει χωριστεί ανά 10 m. Η τομή είναι παράλληλη με την τομή από την πρώτη σάρωση και βρίσκεται 94 cm κάτω από αυτή, 1.40 m πάνω από το δάπεδο της σήραγγας. Το βάθος και η έκταση της τομής ανέρχονται στα 1.40 m και 80.75 m, αντίστοιχα, το χρονικό παράθυρο έχει οριστεί στα 31.3 ns. Η μετατροπή της κατακόρυφης συνιστώσας του χρόνου σε βάθος έγινε υπολογίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού στα 90 m/usec.

Παρατηρώντας την τομή διακρίνονται οι παρακάτω δομές:

Με μωβ βέλη έχουν σημειωθεί ανακλάσεις που αντιστοιχούν στο μεταλλικό πλέγμα οι οποίες μπορούν να παρατηρηθούν και σε μεγαλύτερα βάθη (κίτρινα βέλη). Σε ορισμένες περιπτώσεις το πλέγμα ανιχνεύεται σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, διακρίνονται γραμμικές ανακλάσεις (πορτοκαλί βέλη) που όπως έχει αναφερθεί στην παραπάνω τομή, πιθανώς να σχετίζονται με τα τμήματα του μεταλλικού πλέγματος που είναι παράλληλα στη διεύθυνση όδευσης. Αξίζει να σημειωθεί πως στις εικόνες 7, 8 (**Σχήμα 5.6**), οι βαθύτερες ανακλάσεις που αντιστοιχούν στο μεταλλικό πλέγμα καταλαμβάνουν μεγαλύτερη έκταση, που είναι από τα ~ 62.0 m μέχρι τα ~ 77.0 m και το βάθος τους φτάνει μέχρι τα 0.25 m. Στις εικόνες 2, 4, και 5 έχουν μαρκαριστεί με καφέ βέλη ανακλάσεις που πιθανώς συνδέονται με ασυνέχειες ή ρήγματα. Ακόμη, στην τομή παρατηρούνται περιοχές με ασθενές σήμα οι οποίες ενδεχομένως να σχετίζονται με περιοχές υψηλής αγωγιμότητας (π.χ. υγρασία) και επισημαίνονται με μπλε πλαίσια. Όπως και παραπάνω, οι περιοχές αυτές συμπίπτουν με την επιφανειακή υγρασία (**Σχήμα 5.6**, εικόνα 2) και το τμήμα που αντιστοιχεί στην επιφανειακή υγρασία έχει σημειωθεί με σκούρο μπλε πλαίσιο. Επιπροσθέτως, σημειώνονται συστάδες (πράσινα βέλη) που ξεκινούν στα 0.15 m και απέχουν μεταξύ τους ~ 1.00 m. Σε ορισμένα σημεία των τομών οι συστάδες διακρίνονται αμυδρά έως και καθόλου. Μία πιθανή εξήγηση είναι η ύπαρξη υπερκείμενων ζωνών υγρασίας. Όπως ήδη έχει περιγραφεί, οι συστάδες υποδεικνύουν την παρουσία κύριου μεταλλικού οπλισμού. Τέλος, με κόκκινη γραμμή επισημαίνεται στο βάθος των ~ 0.35 m μια ασθενής ανάκλαση. Ομοίως η ανάκλαση αυτή εμφανίζει ανεστραμμένη πολικότητα και ενδεχομένως να αντιστοιχεί στη επαφή οπλισμένου σκυροδέματος - τραβερτίνη.





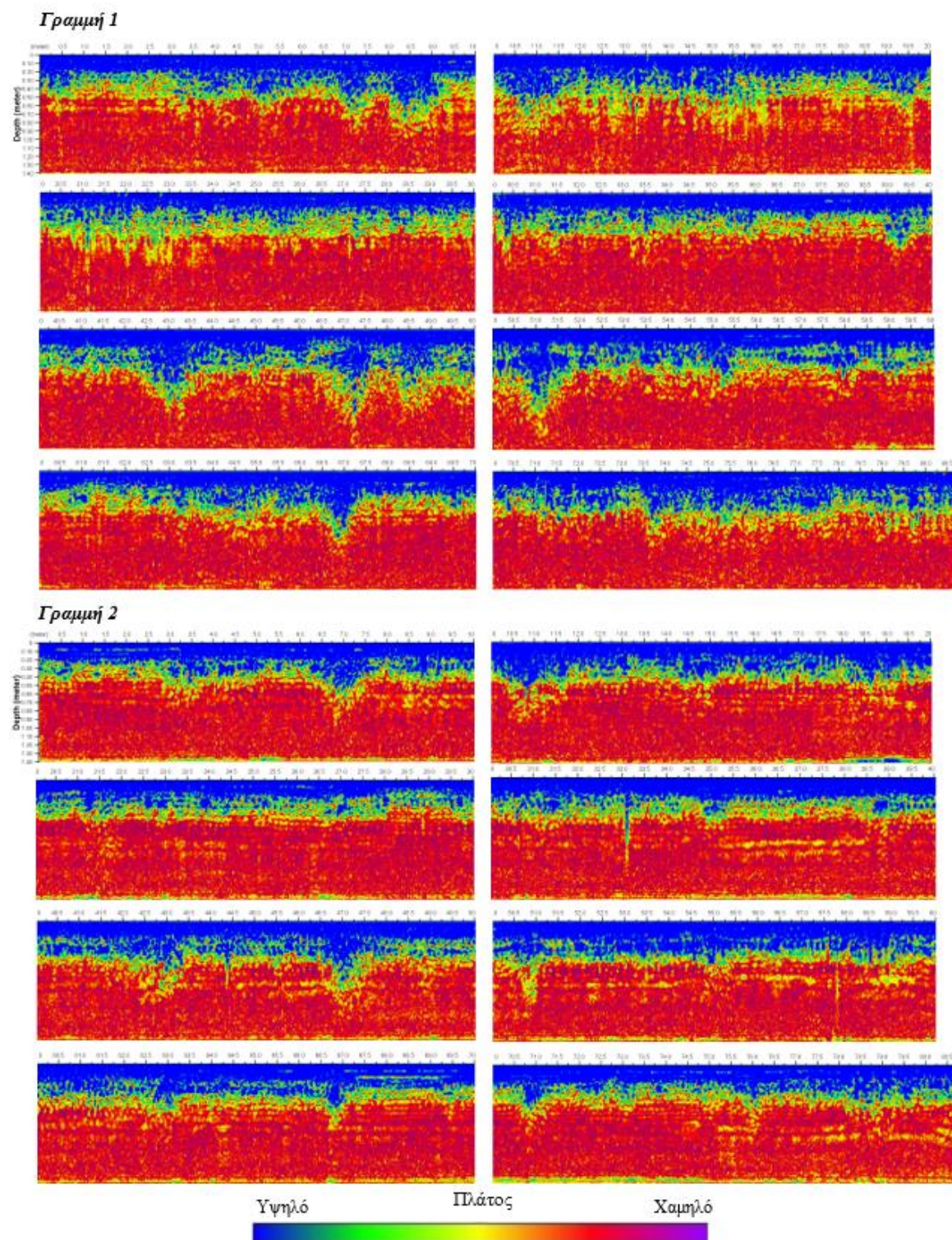


Σχήμα 5.6 Η δεύτερη επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ χωρισμένη ανά 10 m. Έχουν υποδειχθεί οι ανακλάσεις των εξής δομών: μεταλλικό πλέγμα (μωβ βέλος), περιοχές όπου το μεταλλικό πλέγμα βρίσκεται σε μεγαλύτερα βάθη (κίτρινο βέλος), τμήματα του μεταλλικού πλέγματος παράλληλα στη διεύθυνση όδευσης (πορτοκαλί βέλος), επαφή τοιχίου-τραβερίνη (υπόδειξη με κόκκινη γραμμή), περιοχές υψηλής αγωγιμότητας (μπλε πλαίσιο), ασυνέχειες (καφέ βέλος) και συστάδες [μεταλλικοί δοκοί] (πράσινο βέλος). Με σκούρο μπλε πλαίσιο έχει σημειωθεί το τμήμα που αντιστοιχεί στην περιοχή επιφανειακής υγρασίας που έχει παρατηρηθεί στο πεδίο.

Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 5.7**) παρουσιάζονται οι μετασχηματισμένες τομές γεωραντάρ για τη γραμμή 1 και 2. Οι τομές έχουν χωριστεί ανά 10 m με σκοπό την ευκολότερη ερμηνεία τους. Ο μετασχηματισμός Hilbert επιτυγχάνει την απεικόνιση του στιγμιαίου πλάτους. Σκοπός της εφαρμογής του μετασχηματισμού Hilbert ήταν να αποτυπωθούν οι ισχυρές και οι ασθενείς ανακλάσεις.

Με μπλε απεικονίζονται οι ισχυρές ανακλάσεις μεγάλου πλάτους που αντιστοιχούν στο μεταλλικό οπλισμό και στις πολλαπλές ανακλάσεις του. Οι ισχυρές ανακλάσεις διακρίνονται κατά μήκος των τομών και σε βάθη από την επιφάνεια μέχρι τα ~ 0.40 m.

Με μικρότερο πλάτος και στο ίδιο βάθος με το μεταλλικό οπλισμό αποτυπώνονται οι ζώνες υγρασίας (πράσινο). Οι ισχυρές ανακλάσεις σε συνδυασμό με την υψηλή συχνότητα (1 GHz) οδηγούν σε απόσβεση του σήματος και ασθενείς ανακλάσεις αμέσως μετά τον οπλισμό (κόκκινο-μωβ).



Σχήμα 5.7 Μετασχηματισμένες τομές γεωραντάρ των προφίλ 1 και 2. Οι ισχυρές ανακλάσεις αποτυπώνονται ψυχρά χρώματα ενώ οι ασθενείς ανακλάσεις με θερμά.

5.2 Ηλεκτρική τομογραφία

5.2.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Για τη λήψη ηλεκτρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκαν δύο ηλεκτρικές τομογραφίες, παράλληλες στα δυο προφίλ γεωραντάρ. Το ύψος των τομογραφιών από το δάπεδο της σήραγγας ήταν 1.40 m και 1.80 m, αντίστοιχα. Σε κάθε ηλεκτρική τομογραφία η λήψη των δεδομένων έγινε με δύο διατάξεις, διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας (multigradient). Το συνολικό μήκος της κάθε τομογραφίας είναι 11.50 m και η έκταση που καλύπτουν στη σήραγγα είναι από τα 23.00 m έως τα 34.50 m. Η έκταση αυτή αντιστοιχεί από τα 13.00 m έως τα 24.50 m του μήκους των τομών γεωραντάρ. Οι τομές γεωραντάρ έχουν παραχθεί 10.00 m μετά την είσοδο της σήραγγας.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο πεδίο παρατηρήθηκε επιφανειακή υγρασία (Σχήμα 5.8) από τα 27.50 m μέχρι τα 29.50 m της σήραγγας. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί από τα 17.50 m μέχρι τα 19.50 m του συνολικού τους μήκους των τομών γεωραντάρ. Κατά τη λήψη των μετρήσεων η διάταξη των ηλεκτροδίων τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε επιφανειακή υγρασία να βρίσκεται στο μέσο της.

Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν με φορά από το εσωτερικό προς την είσοδο της σήραγγας. Η τοποθέτηση των 23 ηλεκτροδίων στην κάθε τομογραφία έλαβε μέρος με τη χρήση μπετονίτη έτσι ώστε η μέθοδος να είναι μη καταστρεπτική, αποτρέποντας έτσι τυχόν φθορές στο τοιχίο (Σχήμα 5.9). Χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις διπόλου-διπόλου και Multiple-Gradient, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ορίστηκαν στα 0.5m. Χαρακτηριστικό της διπόλου-διπόλου είναι η υψηλή διακριτική ικανότητα σε πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντιθέτως, η διάταξη Multiple-Gradient έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση. Οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης γίνανε με το γεωφυσικό όργανο Syscal Pro της εταιρείας Iris Instruments. Ο εξοπλισμός επιπλέον περιλάμβανε αυτόματο πολυπλέκτη 48 θέσεων καθώς και πολύκλινα χάλκινα καλώδια (Σχήμα 5.9).



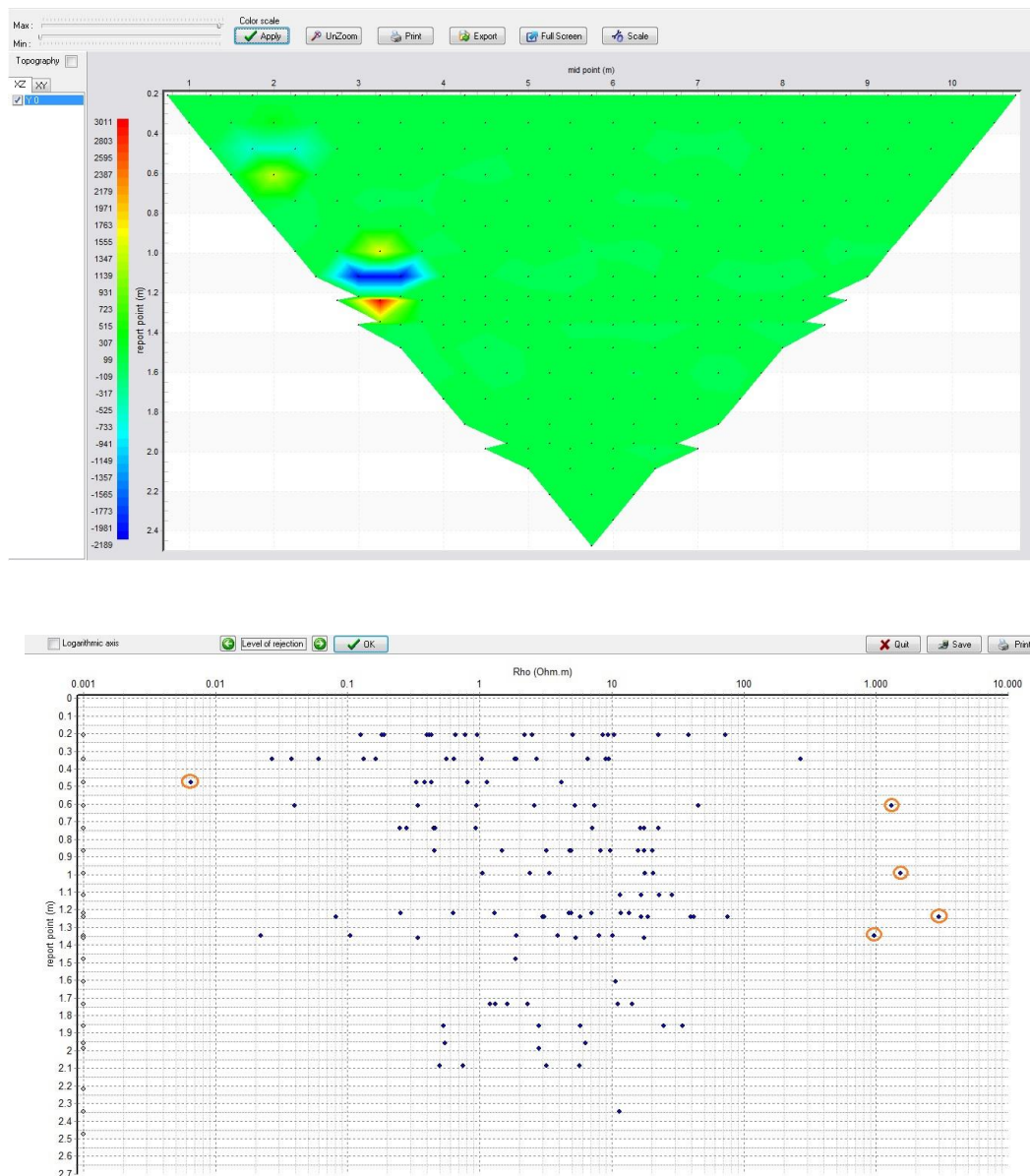
Σχήμα 5.8 Απεικόνιση της επιφανειακής υγρασίας στο τοιχίο της σήραγγας.



Σχήμα 5.9 Αριστερά χρήση ηλεκτροδίων κατά την εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας στο χώρο της σήραγγας, δεξιά στιγμιότυπο από την εκτέλεση των ηλεκτρικών μετρήσεων, κάτω γεωφυσικό όργανο μέτρησης Syscal Pro

5.2.2 Επεξεργασία

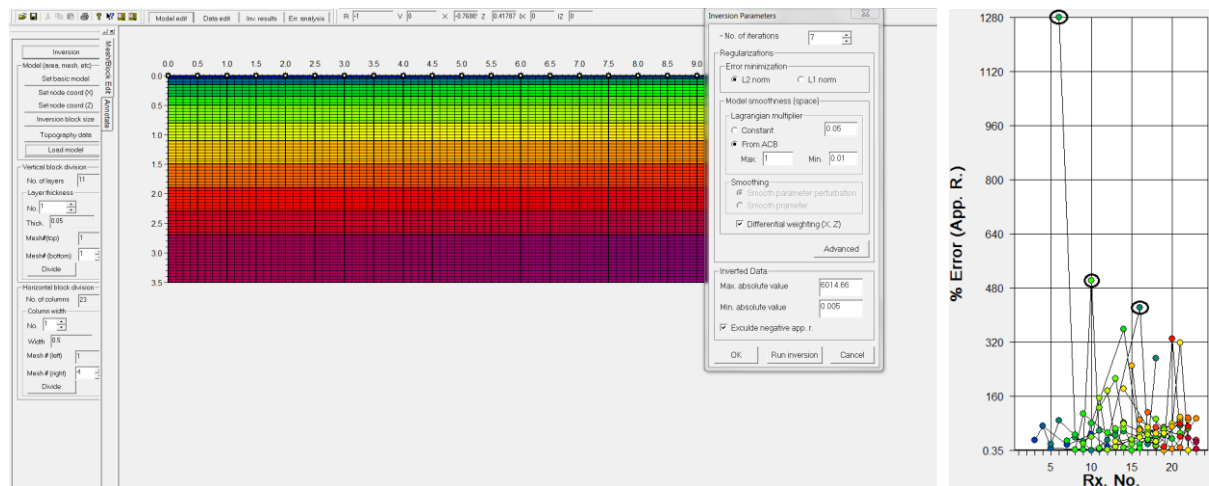
Η επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων έγινε με τη χρήση του λογισμικού Prosys II της εταιρίας IRIS Instruments. Με το παραπάνω λογισμικό γίνεται δυνατή η μεταφορά, το φιλτράρισμα και η εξαγωγή των δεδομένων σε διάφορες μορφές αρχείων, κατάλληλες για λογισμικά αντίστροφης. Τα δεδομένα καταγράφηκαν με τη μορφή ψευδοτόμων ενώ αφαιρέθηκαν οι αρνητικές και οι ακραίες τιμές (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 Πάνω ψευδοτομή των δεδομένων, κάτω απομάκρυνση των ακραίων τιμών (πορτοκαλί κύκλοι) στο Prosys II.

Ακολουθώντας, τα φιλτραρισμένα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό DC_2DPro (Kim, 2010). Στο λογισμικό αυτό είναι δυνατή η μη γραμμική δισδιάστατη αντιστροφή με την μέθοδο του Occam (Constable, 1987) ενώ η επίλυση του ευθέος προβλήματος πραγματοποιείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Για να δημιουργηθεί το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε πρωτίστως η δομή των παραμέτρων (Σχήμα 5.11). Στη συνέχεια μέσω της διαδικασίας της αντιστροφής λήφθηκαν οι πραγματικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε κατ' επανάληψη και κάθε φορά αφαιρούνταν ένας μικρός αριθμός μετρήσεων σύμφωνα με το ποσοστό σφάλματος (RMS) μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων.



Σχήμα 5.11 Λογισμικό DC_2DPro (Kim, 2010), διαγραφή δεδομένων με βάση το % σφάλμα και ορισμός των παραμέτρων αντιστροφής.

5.2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διασκόπηση με ηλεκτρική τομογραφία (**Σχήμα 5.12**). Τα αποτελέσματα αυτά προέρχονται από την επεξεργασία και αντιστροφή των δεδομένων των ηλεκτρικών τομογραφιών. Η διασκόπηση πραγματοποιήθηκε κατά μήκος δύο παράλληλων προφίλ στη δυτική πλευρά της σήραγγας τα οποία απείχαν από το δάπεδο 1.40 m και 1.80 m. Για τη μέτρηση της κάθε τομογραφίας εφαρμόστηκαν οι διατάξεις διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας (multigradient) των οποίων τα αποτελέσματα συμπίπτουν μερικώς. Για την αναπαράσταση των αντιστατικών τιμών χρησιμοποιήθηκε κλίμακα ουράνιου τόξου όπου το μπλε χρώμα αντιστοιχεί σε χαμηλές αντιστάσεις και το μωβ σε υψηλές.

Το μήκος της κάθε τομογραφίας είναι 11.50 m και το βάθος κυμαίνεται ανάλογα με τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε από τα 2.50 m (πολλαπλής βαθμίδας) έως τα 3.50 m (διπόλου-διπόλου). Κατά μήκος της κάθε τομογραφίας έως τα ~0.40 m βάθος χαρτογραφείται αγωγήμη ζώνη με αντιστατικές τιμές από 0.20 Ohm-m έως 8 Ohm-m (πράσινο, μπλε χρώμα). Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω του μεταλλικού οπλισμού παρ' όλο που η περιοχή αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η αγωγιμότητα είναι ιδιαίτερα έντονη από τα 5.00 m έως τα 7.00 m στις τομογραφίες πιθανώς λόγω της επιφανειακής υγρασίας που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο ίδιο τμήμα της διάταξης ηλεκτροδίων. Η περιοχή της υγρασίας βρίσκεται μεταξύ των 27.50 m και 29.50 m της σήραγγας. Οι ηλεκτρικές τομογραφίες αδυνατούν να αναδείξουν το μεταλλικό πλέγμα. Πιθανώς η διακριτική ικανότητα της τομογραφίας να μην επαρκεί για την απεικόνιση των επιμέρους μεταλλικών ράβδων που το αποτελούν.

Με μπλε χρώμα απεικονίζονται αγωγήμες δομές με πολύ χαμηλή αντίσταση που είναι κάτω από 0.2 Ohm-m. Αρκετές από αυτές τις δομές έχουν ενδιάμεση απόσταση ~1 m και βάθος μικρότερο των 0.5 m. Επιπλέον οι τομογραφίες χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλό σφάλμα (**Πίνακας 5.1**) το οποίο πιθανώς οφείλεται στο μεταλλικό πλέγμα που εκτείνεται σχεδόν σε όλη τη σήραγγα. Αναμένοντας αποκλίσεις λόγω του υψηλού σφάλματος και συνδυάζοντας συμπεράσματα από τις τομές γεωραντάρ, το ακάλυπτο μέρος της σήραγγας, τη μεταξύ θέση αρκετών "μπλε" αγωγήμων δομών και την εξαιρετικά χαμηλή αντίσταση τους είναι ορθό να θεωρηθεί το εξής: Οι σχηματισμοί που

απεικονίζονται με μπλε χρώμα αντιστοιχούν στο μεταλλικό οπλισμό και συγκεκριμένα στους μεταλλικούς δοκούς.

	Γραμμή 1 (RMS)	Γραμμή 2 (RMS)
<i>Dipole-Dipole</i>	0.914	1.433
<i>Multigradient</i>	1.190	1.013
<i>Combined-Inversion</i>	0.938	1.050

Πίνακας 5.1 Σφάλματα των γραμμών 1 και 2 για τις αντίστοιχες διατάξεις τους.

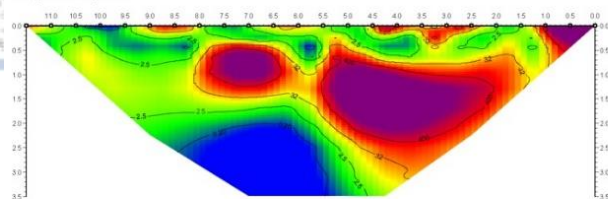
Στις τομογραφίες απεικονίζονται με πράσινο έως κίτρινο χρώμα (2.5- 32 Ohm-m) ζώνες υγρασίας. Το κύριο μέρος τους βρίσκεται σε βάθος 1 m.

Οι αντιστατικές δομές με κόκκινο και μωβ χρώμα είναι κατά πάσα πιθανότητα σχηματισμοί τραβερτίνη και συγκεκριμένα σχετίζονται με την παρουσία “στρωματόμορφου” τραβερτίνη, ο οποίος χαρακτηρίζει το γεωλογικό περιβάλλον της περιοχής. Τέλος, στην τομογραφία της γραμμής 2, με τη χρήση της διάταξης διπόλου-διπόλου παρατηρείται ασυνέχεια και πιθανό ρήγμα το οποίο έχει υποδειχθεί με πλαίσιο.

Έγινε επίσης συνδυαστική αντιστροφή των δεδομένων απ’ τις δυο διατάξεις. Οι τομογραφίες που προέκυψαν παρουσιάζονται στο σχήμα 5.12 κάτω από τον τίτλο “combined-inversion”. Συγκριτικά με τις ξεχωριστές αντιστροφές απαλείφουν τις χαμηλές και υψηλές αντιστάσεις σε μεγάλα βάθη ενώ μειώνεται η διακριτική ικανότητα των εξαιρετικά χαμηλών αντιστάσεων κοντά στην επιφάνεια. Οι ξεχωριστές αντιστροφές κρίθηκαν καταλληλότερες για τη χαρτογράφηση του οπλισμού.

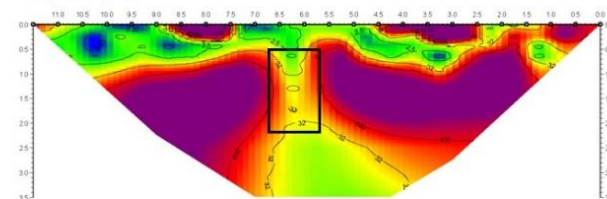
Γραμμή 1

Dipole-Dipole

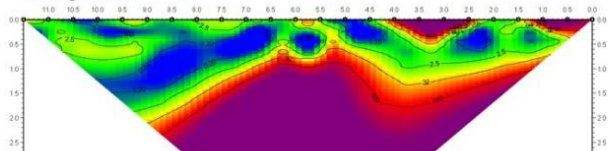


Γραμμή 2

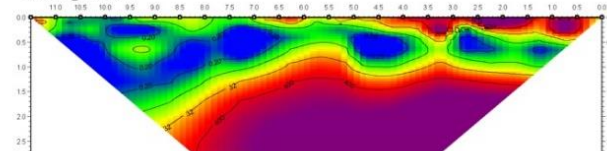
Dipole-Dipole



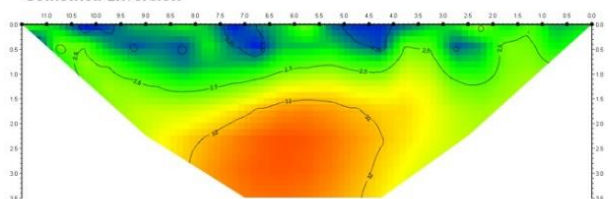
Multigradient



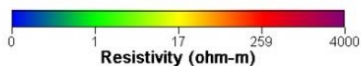
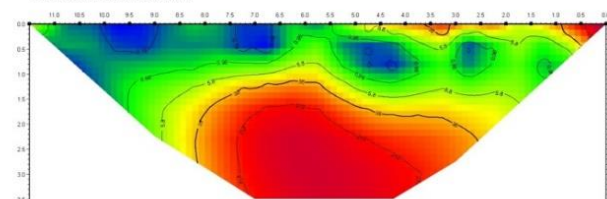
Multigradient



Combined-Inversion



Combined-Inversion



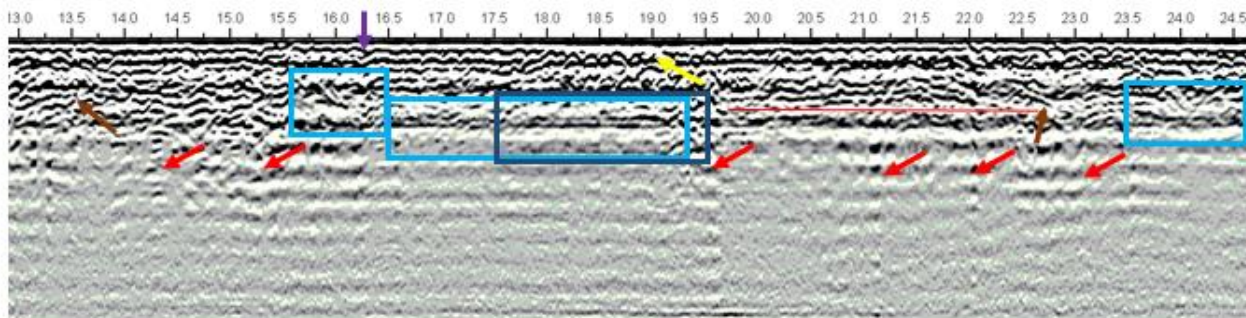
Σχήμα 5.12 Ηλεκτρικές τομογραφίες στην περιοχή της σήραγγας με τη χρήση της διάταξης διπόλου-διπόλου (dipole-dipole), πολλαπλής βαθμίδας (multigradient) καθώς και με τη χρήση συνδυαστικής αντιστροφής των δεδομένων και από τις δυο διατάξεις. Το μαύρο πλαίσιο υποδηλώνει την παρουσία πιθανού ρήγματος.

5.3 Συνδυαστική ερμηνεία

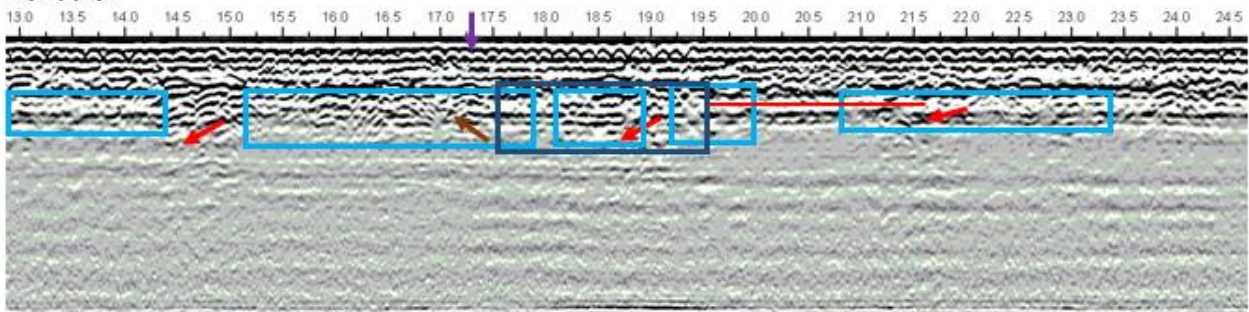
Για την επίτευξη μιας συνδυαστικής ερμηνείας δημιουργήθηκε το **σχήμα 5.13**. Σε αυτό παρουσιάζονται οι τομές που έχουν προκύψει από τις δυο σαρώσεις γεωραντάρ αφού έχουν επεξεργαστεί και μετασχηματιστεί καθώς και οι αντίστοιχες ηλεκτρικές τομογραφίες τους.

Παρατηρείται πως οι τομές μεταξύ των δυο γεωφυσικών μεθόδων έρχονται σε καλή συμφωνία. Στις τομές γεωραντάρ, οι περιοχές όπου υπάρχει ισχυρή καταγραφή σήματος απεικονίζονται στις ηλεκτρικές τομογραφίες ως περιοχές με χαμηλές αντιστάσεις και αναπαρίστανται με μπλε και πράσινο χρώμα. Στις ηλεκτρικές τομογραφίες οι ζώνες χαμηλής αντίστασης βρίσκονται κυρίως σε βάθος 1 m. Στις σαρώσεις γεωραντάρ οι ισχυρές ανακλάσεις βρίσκονται στα πρώτα 0.5 m βάθους και από παρατηρήσεις στο μέτωπο των μετρήσεων ξέρουμε ότι η επαφή τραβερτίνη-οπλισμένου σκυροδέματος βρίσκεται σε βάθος ~35 cm. Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η υγρασία πιθανώς συγκεντρώνεται γύρω από την επαφή σκυροδέματος-τραβερτίνη. Αντιστοίχως, οι περιοχές των τομών γεωραντάρ όπου το σήμα είναι ασθενέστερο απεικονίζονται στις ηλεκτρικές τομογραφίες ως περιοχές υψηλών αντιστάσεων (κόκκινο, μωβ χρώμα). Στις τομές γεωραντάρ και στις τομογραφίες με σκούρο μπλε πλαίσιο έχει σημειωθεί το τμήμα που αντιστοιχεί στην περιοχή επιφανειακής υγρασίας. Η παραπάνω περιοχή έχει παρατηρηθεί στο πεδίο και συμπίπτει με τις ζώνες υγρασίας των τομών γεωραντάρ καθώς και με τις χαμηλές αντιστάσεις (πράσινο χρώμα) στις ηλεκτρικές τομογραφίες. Όπως έχει ήδη συμπεραθεί από τις προσομοιώσεις του *gprMax*, οι συστάδες ανακλάσεων υποδηλώνουν την παρουσία μεταλλικών δοκών. Επιπλέον, οι αγωγίμες περιοχές όπου παρατηρούνται εξαιρετικά χαμηλές αντιστάσεις ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις συστάδες των τομών γεωραντάρ, ενισχύοντας το παραπάνω συμπέρασμα. Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 5.13**) υποδηλώνονται οι συστάδες ανακλάσεων και οι αγωγίμες περιοχές με κόκκινα βέλη.

Γραμμή 1

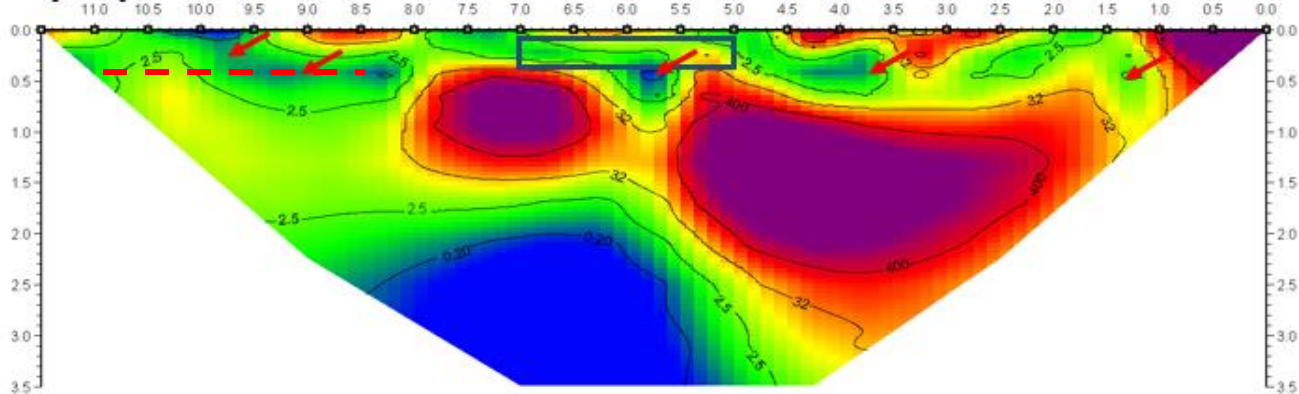


Γραμμή 2

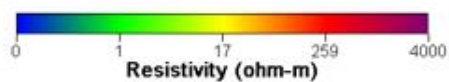
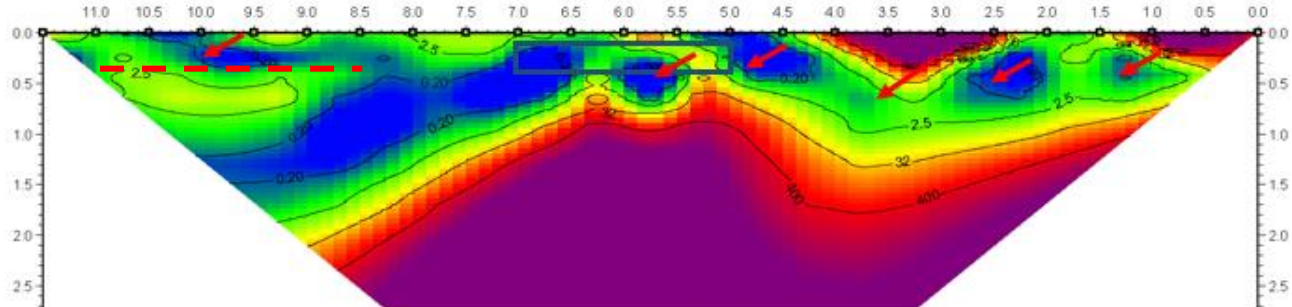


Γραμμή 1

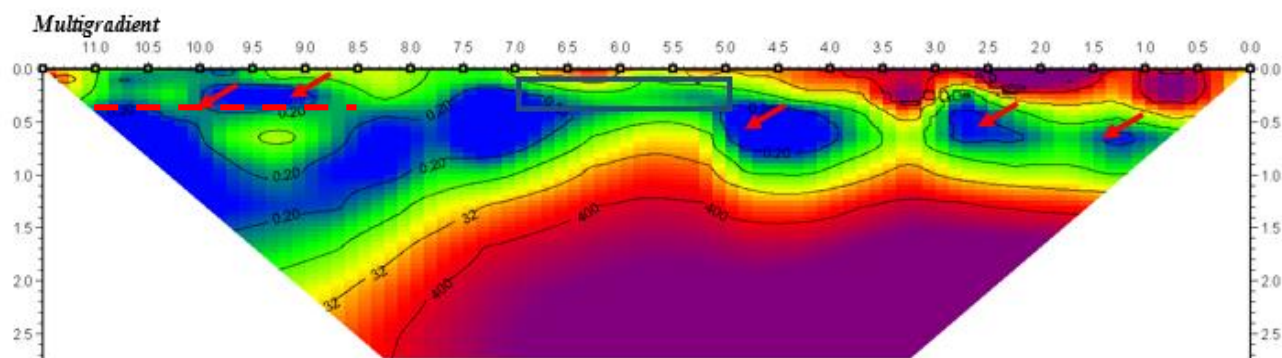
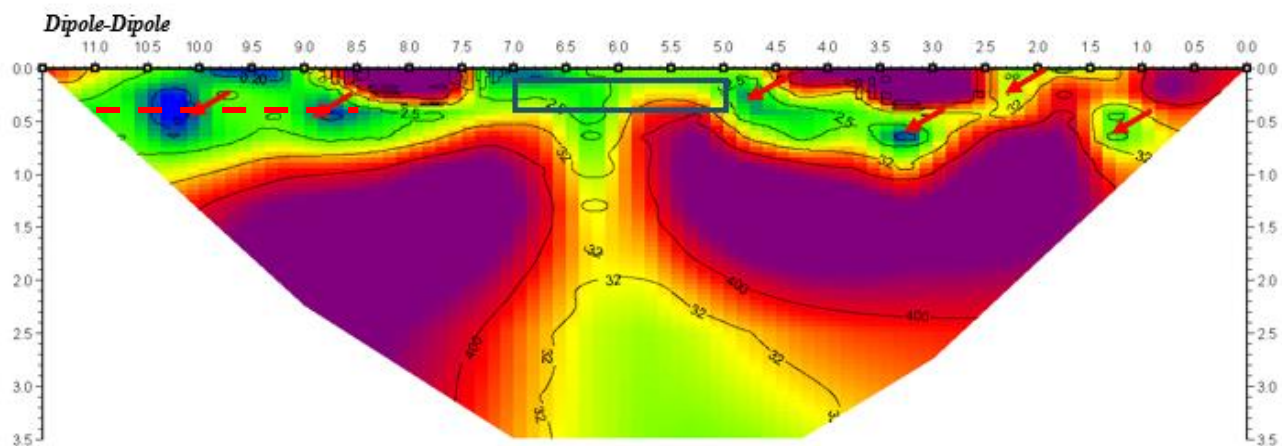
Dipole-Dipole

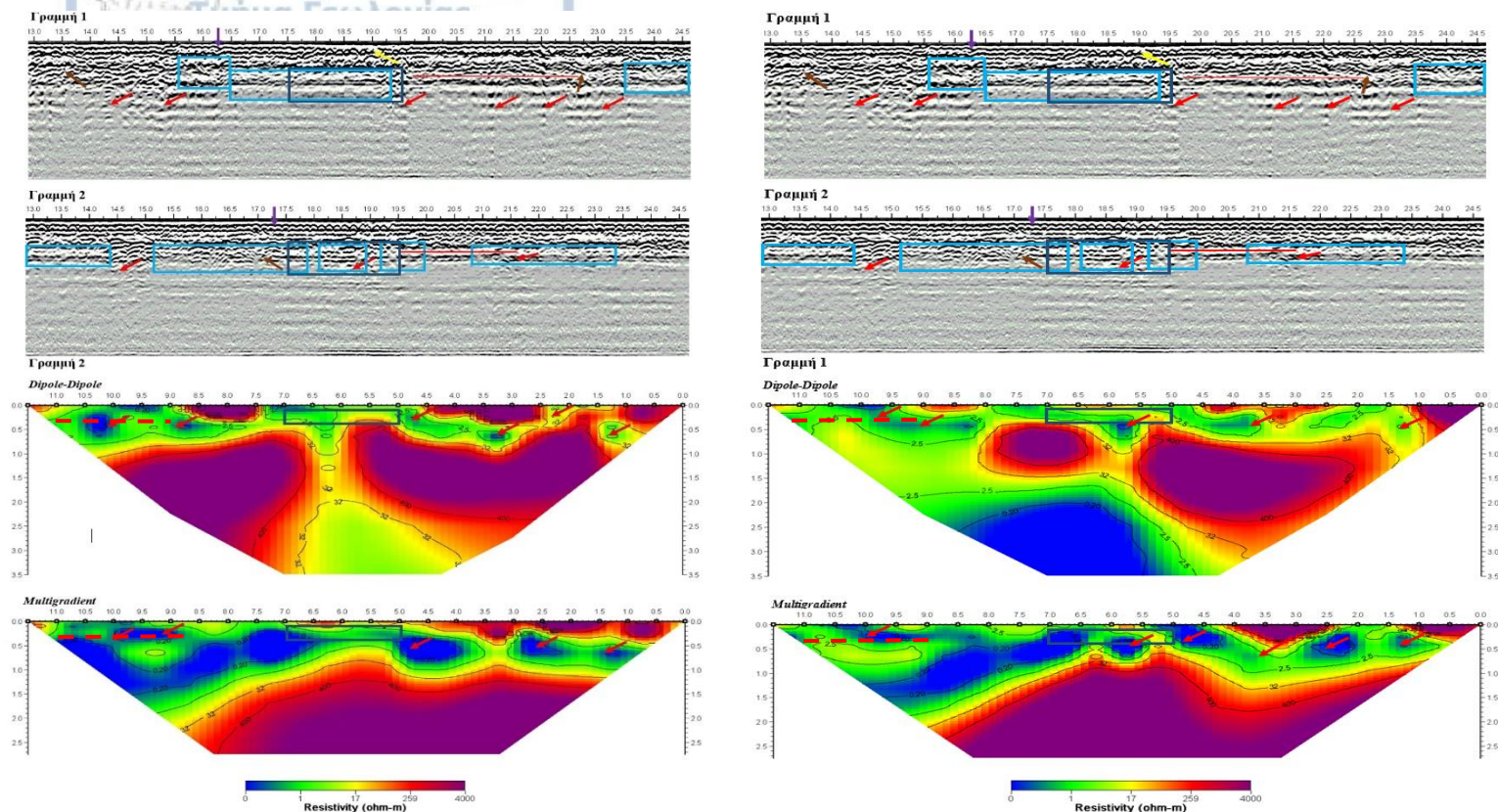


Multigradient



Γραμμή 2





Σχήμα 5.13 Τομές γεωραντάρ των προφίλ 1 και 2 με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές τομογραφίες της διπόλου-διπόλου (dipole-dipole) και της πολλαπλής βαθμίδας (multigradient). Στις τομές γεωραντάρ έχουν υποδειχθεί οι ανακλάσεις των εξής δομών: μεταλλικό πλέγμα (μωβ βέλος), επαφή τοιχίου-τραβερίνη (υπόδειξη με κόκκινη γραμμή), περιοχές υψηλής αγωγιμότητας (μπλε πλαίσιο), ασυνέχειες (καφέ βέλος) και συστάδες [μεταλλικοί δοκοί] (κόκκινο βέλος). Στις ηλεκτρικές τομογραφίες συμβολίζονται με κόκκινα βέλη οι περιοχές με εξαιρετικά χαμηλές αντιστάσεις [μεταλλικοί δοκοί] και με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή το βάθος της επαφής τοιχίου-τραβερίνη. Στις τομές γεωραντάρ καθώς και στις τομογραφίες με σκούρο μπλε πλαίσιο έχει σημειωθεί το τμήμα που αντιστοιχεί στην περιοχή επιφανειακής υγρασίας που έχει παρατηρηθεί στο πεδίο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης διερεύνησε την εφαρμοσιμότητα των παρακάτω γεωφυσικών μεθόδων σε περιβάλλον σήραγγας. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας σε συνδυασμό με τη μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ. Στόχος ήταν η χαρτογράφηση γεωλογικών και τεχνικών δομών της σήραγγας. Η συνδυαστική γεωφυσική διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στο δυτικό τοίχιο της σήραγγας κατάφερε να χαρτογραφήσει τις εξής δομές:

Μεταλλικό πλέγμα

Στα πρώτα εκατοστά του σκυροδέματος χαρτογραφήθηκε οπλισμός τύπου πλέγματος σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις στο πεδίο. Ορισμένα τμήματα του μεταλλικού πλέγματος εμφανίζονται σε μεγαλύτερα βάθη. Οι πολλαπλές ανακλάσεις του πλέγματος δυσκολεύουν τη χαρτογράφηση των βαθύτερων δομών.

Μεταλλικοί δοκοί

Η προσομοίωση έδειξε ότι οι πολλαπλές ανακλάσεις του μεταλλικού πλέγματος αποκρύπτουν μερικώς τις ανακλάσεις των σιδηροδοκών. Χαρτογραφούνται όμως ως συστάδες πολλαπλών ανακλάσεων σε βάθος 0.15 cm ανά 1.00 m. Παρόμοιες συστάδες παρατηρήθηκαν στη χαρτογράφηση των δοκών της προσομοίωσης.

Ορισμένες συστάδες είναι ασθενέστερες πιθανώς λόγω της παρουσίας υγρασίας στο τοίχιο. Στις ηλεκτρικές τομογραφίες παρατηρούνται περιοχές εξαιρετικά χαμηλών αντιστάσεων που ταυτίζονται με τις συστάδες των τομών γεωραντάρ.

Επαφή μεταξύ οπλισμένου σκυροδέματος και τραβερτινικού σχηματισμού

Σε 0.35 m βάθος εμφανίζεται ασθενής γραμμική ανάκλαση με ανεστραμμένη πολικότητα. Το βάθος αυτό συμπίπτει με το πάχος του σκυροδέματος που παρατηρήθηκε στο πεδίο. Τα παραπάνω υποδηλώνουν ότι η ανάκλαση αντιστοιχεί στην επαφή σκυροδέματος και τραβερτινικής βραχώμαζας.

Ζώνες υγρασίας

Στις τομές γεωραντάρ παρατηρήθηκαν περιοχές όπου το σήμα αποσβένει γρηγορότερα. Οι περιοχές αυτές συμφωνούν με τις ηλεκτρικές τομογραφίες όπου απεικονίζονται ως ζώνες χαμηλής αντίστασης.

Ερμηνεύτηκαν ως περιοχές υγρασίας και συμπίπτουν με την επιφανειακή υγρασία που παρατηρήθηκε στο πεδίο.

Συμπίπτουν επίσης με την ανάκλαση της επαφής σκυροδέματος-τραβερτίνη υποδηλώνοντας ότι με την πάροδο του χρόνου η επαφή συγκεντρώνει υγρασία.

Πιθανές ασυνέχειες

Παρατηρήθηκαν με δυσκολία πιθανές ασυνέχειες στον τραβερτινικό σχηματισμό. Η δυσκολία οφείλεται κυρίως στις πολλαπλές ανακλάσεις του οπλισμού.

Εφαρμοσιμότητα

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ χαρτογράφησαν με δυσκολία τις δομές στο περιβάλλον της σήραγγας. Η παρουσία του μεταλλικού οπλισμού τύπου πλέγματος κατά μήκος των τοιχωμάτων της σήραγγας δυσκόλεψε τη χαρτογράφηση των υπόλοιπων δομών. Η υψηλή αγωγιμότητα και ανακλαστικότητα του μεταλλικού οπλισμού είχε ως αποτέλεσμα τη καταγραφή πολλαπλών ανακλάσεων σε όλη την έκταση της όδευσης γεωραντάρ, αποκρύπτοντας μερικώς τις ανακλάσεις των υπόλοιπων δομών. Επίσης οι ηλεκτρικές τομογραφίες χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλά σφάλματα.

Όμως ο συνδυασμός των δύο μεθόδων καλύπτει τις αδυναμίες που έχει κάθε μέθοδος ξεχωριστά στο παραπάνω περιβάλλον. Οι διατάξεις ηλεκτρικής τομογραφίας dipole-dipole και multi-gradient σε συνδυασμό με τη μέθοδο του γεωραντάρ και της

μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ αλληλοσυμπληρώνονται ώστε να δώσουν μία ολοκληρωμένη εικόνα της περιοχής μελέτης.

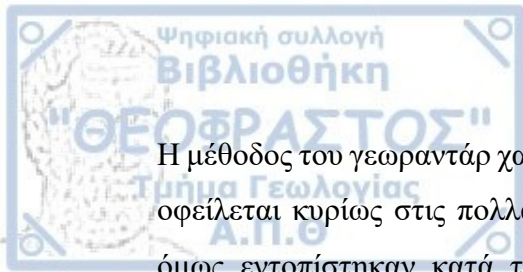
Οι ανακλάσεις του μεταλλικού πλέγματος χαρτογραφούνται από το γεωραντάρ στα πρώτα εκατοστά βάθους του τοιχώματος επιβεβαιώνοντας τις τομές της προσομοίωσης. Μία δομή όπου οι ηλεκτρικές τομογραφίες αδυνατούν να χαρτογραφήσουν.

Οι ανακλάσεις των μεταλλικών δοκών δε χαρτογραφούνται άμεσα από το γεωραντάρ παρά μόνο μέσω της παρουσίας συστάδων ανακλασεων. Από τις τομές της προσομοίωσης έχει συμπεραθεί πως οι συστάδες ανακλάσεων είναι αποτέλεσμα της συμβολής των πολλαπλών ανακλάσεων του μεταλλικού πλέγματος με τις ανακλάσεις των μεταλλικών δοκών. Στη διάταξη dipole-dipole αν και με υψηλό σφάλμα, απεικονίζονται περιοχές εξαιρετικά χαμηλών αντιστάσεων που ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις συστάδες των τομών γεωραντάρ, επιβεβαιώνοντας τα παραπάνω συμπεράσματα.

Σε 0.35 m βάθος εμφανίζεται ασθενής γραμμική ανάκλαση με ανεστραμμένη πολικότητα. Το βάθος αυτό συμπίπτει με το πάχος του σκυροδέματος που παρατηρήθηκε στο πεδίο. Τα παραπάνω υποδηλώνουν ότι η ανάκλαση αντιστοιχεί στην επαφή σκυροδέματος και τραβερτινικής βραχόμαζας.

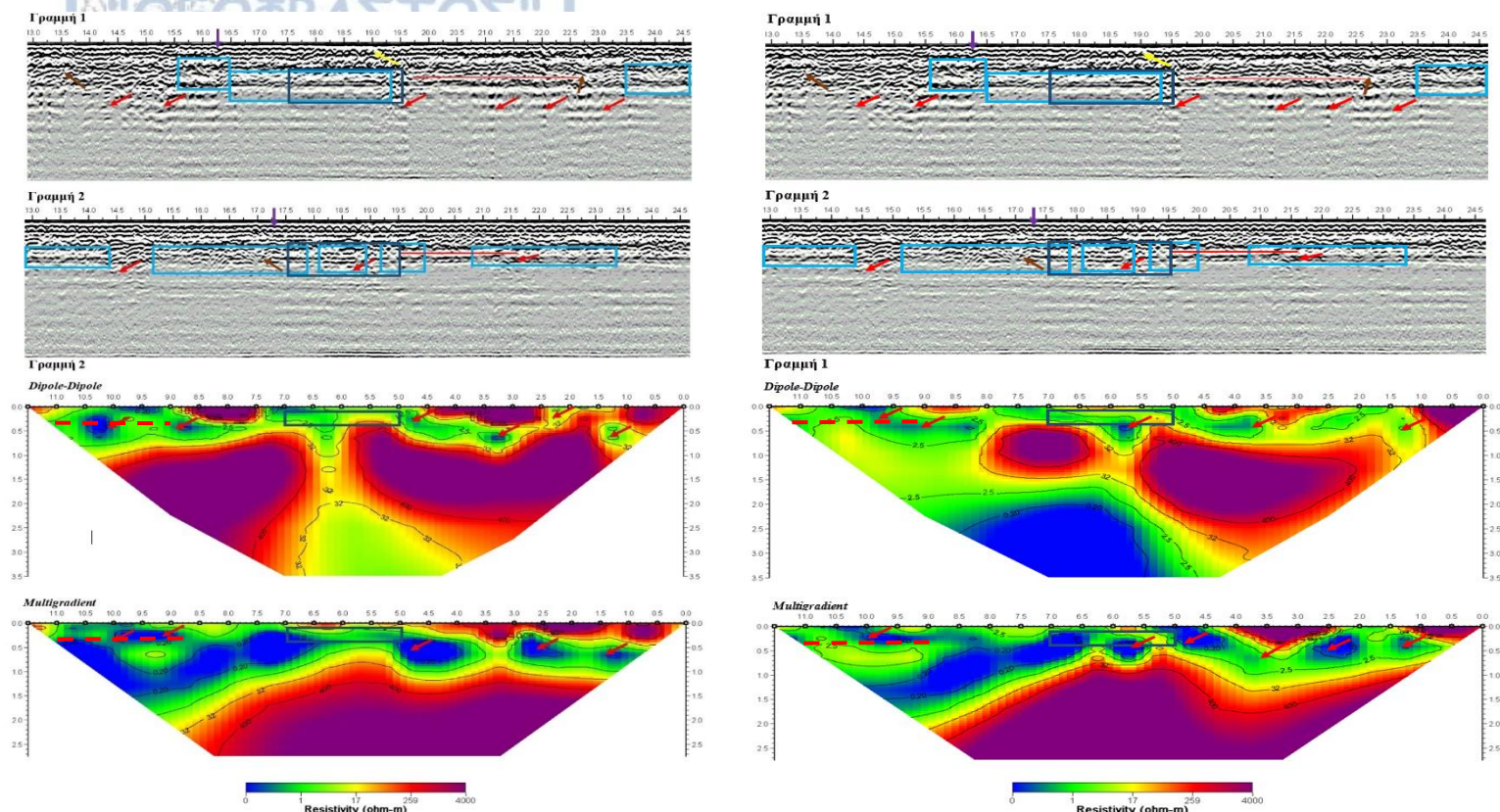
Στις τομές γεωραντάρ παρατηρήθηκαν περιοχές όπου το σήμα αποσβένει γρηγορότερα. Οι περιοχές αυτές συμφωνούν με τις ηλεκτρικές τομογραφίες όπου απεικονίζονται ως ζώνες χαμηλής αντίστασης. Ερμηνεύτηκαν ως περιοχές υγρασίας και συμπίπτουν με την επιφανειακή υγρασία που παρατηρήθηκε στο πεδίο. Εντοπίζονται επίσης σε βάθος που συμπίπτει με την ανάκλαση της επαφής σκυροδέματος-τραβερτίνη υποδηλώνοντας ότι με την πάροδο του χρόνου η επαφή συγκεντρώνει υγρασία.

Η μέθοδος του γεωραντάρ και η διάταξη dipole-dipole αδυνατούν να δώσουν αξιόπιστες πληροφορίες για την τραβερτινική βραχόμαζα. Όμως η διάταξη multi-gradient έχοντας υψηλότερη διακριτική ικανότητα στις κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δίνει μία πιο σαφή οριοθέτηση των βαθύτερων σχηματισμών.



Η μέθοδος του γεωραντάρ χαρτογράφησε με δυσκολία πιθανές ασυνέχειες. Η δυσκολία οφείλεται κυρίως στις πολλαπλές ανακλάσεις του οπλισμού. Παρόμοιες ανακλάσεις όμως εντοπίστηκαν κατά τη μοντελοποίηση ασυνεχειών στα συνθετικά δεδομένα ενισχύοντας το παραπάνω συμπέρασμα.

Όσον αφορά την εφαρμοσιμότητα συμπεραίνεται ότι οι μέθοδοι του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας έχουν προοπτικές αξιοποίησης σε άλλα παρόμοια τεχνικά έργα. Ιδιαίτερα για τη χαρτογράφηση του μεταλλικού οπλισμού. Μπορούν να συνεισφέρουν στη λήψη μελλοντικών αποφάσεων σε σχέση με την κατάσταση των γεωλογικών και τεχνικών δομών μιας σήραγγας.



Σχήμα 6.1 Τομές γεωραντάρ των προφίλ 1 και 2 με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές τομογραφίες της διπόλου-διπόλου (dipole-dipole) και της πολλαπλής βαθμίδας (multigradient). Στις τομές γεωραντάρ έχουν υποδειχθεί οι ανακλάσεις των εξής δομών: μεταλλικό πλέγμα (μωβ βέλος), επαφή τοιχείου-τραβερίνη (υπόδειξη με κόκκινη γραμμή), περιοχές υψηλής αγωγιμότητας (μπλε πλαίσιο), ασυνέχειες (καφέ βέλος) και συστάδες [μεταλλικοί δοκοί] (κόκκινο βέλος). Στις ηλεκτρικές τομογραφίες συμβολίζονται με κόκκινα βέλη οι περιοχές με εξαιρετικά χαμηλές αντιστάσεις [μεταλλικοί δοκοί] και με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή το βάθος της επαφής τοιχείου-τραβερίνη. Στις τομές γεωραντάρ καθώς και στις τομογραφίες με σκούρο μπλε πλαίσιο έχει σημειωθεί το τμήμα που αντιστοιχεί στην περιοχή επιφανειακής υγρασίας που έχει παρατηρηθεί στο πεδίο.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ως μελλοντική έρευνα προτείνεται η συνδυαστική διασκόπηση βασισμένη σε ηλεκτρικές ιδιότητες καθώς και μηχανικές, όπως η ελαστική και η πλαστική συμπεριφορά του μέσου.

Σε ένα περιβάλλον με τόσο έντονες ηλεκτρικές ιδιότητες μια συνδυαστική διασκόπηση των μηχανικών και των ηλεκτρικών ιδιοτήτων μπορεί να αναδείξει περεταίρω εσωτερικές δομές.

- Annan, A.P., 2009.** Electromagnetic principles of ground penetrating radar. *Ground penetrating radar: theory and applications*, 1, pp.1-37.
- Annan, A.P., 2005.** GPR methods for hydrogeological studies. In *Hydrogeophysics* (pp. 185-213). Springer, Dordrecht.
- Balanis, C.A., 1989.** Geometrical theory of diffraction. *Advanced Engineering Electromagnetics*, pp.743-764.
- Bergmann, T., Robertsson, J.O. and Holliger, K., 1998.** Finite-difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics*, 63(3), pp.856-867.
- Bing, Z., Greenhalgh, S.A. and Sinadinovski, C., 1992.** Iterative algorithm for the damped minimum norm, least-squares and constrained problem in seismic tomography. *Exploration Geophysics*, 23(3), pp.497-505.
- Campos, J.R.D.R., Vidal-Torrado, P. and Modolo, A.J., 2019.** Use of Ground Penetrating Radar to Study Spatial Variability and Soil Stratigraphy. *Engenharia Agrícola*, 39(3), pp.358-364.
- Cardarelli, E. and Bernabini, M., 1997.** Determination of parameters of urban waste dumps, two case histories. *J. Appl. Geophys*, 36, pp.167-174.
- Cardimona, S., 2002.** Subsurface investigation using ground penetrating radar. In *Geophysics 2002. The 2nd Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure Federal Highway Administration (FHWA-WRC-02-001)*, Transportation Research Board, California Department of Transportation.
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G., 1987.** Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), pp.289-300.
- Diamanti, N. and Annan, A.P., 2017, March.** Air-launched and ground-coupled GPR data. In *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)* (pp. 1694-1698). IEEE.
- Diamanti, N., 2008.** *An efficient ground penetrating radar finite-difference time-domain subgridding scheme and its application to the non-destructive testing of masonry arch bridges* (Doctoral dissertation, University of Edinburgh).
- Ekinci, Y.L. and Demirci, A., 2008.** A damped least-squares inversion program for the interpretation of Schlumberger sounding curves. *Journal of Applied Sciences*, 8(22), pp.4070-4078.
- Fa, W., 2013.** Simulation for ground penetrating radar (GPR) study of the subsurface

structure of the Moon. *Journal of Applied Geophysics*, 99, pp.98-108.

Faucher, F., Scherzer, O. and Barucq, H., 2020. Eigenvector models for solving the seismic inverse problem for the Helmholtz equation. *Geophysical Journal International*, 221(1), pp.394-414.

Furman, A., Ferré, T.P. and Warrick, A.W., 2003. A sensitivity analysis of electrical resistivity tomography array types using analytical element modeling. *Vadose Zone Journal*, 2(3), pp.416-423.

Giannakis, I., Giannopoulos, A. and Warren, C., 2015. A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 9(1), pp.37-51.

Giannopoulos, A., 2005. Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and building materials*, 19(10), pp.755-762.

Giannopoulos, A., 1997. The investigation of transmission-line matrix and finite-difference time-domain methods for the forward problem of ground penetrating radar. *The University of York*.

Heikkinen, E.J. and Saksa, P.J., 1998, June. Integrating geophysical data into bedrock model in site characterization for nuclear waste disposal. In *60th EAGE Conference and Exhibition* (pp. cp-110). European Association of Geoscientists & Engineers.

Inan, U.S. and Marshall, R.A., 2011. *Numerical electromagnetics: the FDTD method*. Cambridge University Press.

Jazayeri, S., Klotzsche, A. and Kruse, S., 2018. Improving estimates of buried pipe diameter and infilling material from ground-penetrating radar profiles with full-waveform inversion. *Geophysics*, 83(4), pp.H27-H41.

Jol, H.M. ed., 2008. *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier.

Kim J.H., 2010. DC2DPro – User's Manual, KIGAM, KOREA

Kim, J.H., 2004. RADPRO/GPR. User's guide, KIGAM, S. Korea.

Lalagüe, A., 2015. Use of ground penetrating radar for transportation infrastructure maintenance.

Leucci, G., 2008. Ground penetrating radar: the electromagnetic signal attenuation and maximum penetration depth. *Scholarly research exchange*, 2008.

Lin, Z., Vozoff, K., Smith, G.H., Hatherly, P. and Engels, O.G., 1996. Joint application of seismic and electromagnetic methods to coal characterization at West Cliff Colliery, New South Wales. *Exploration Geophysics*, 27(4), pp.205-215.

Lines, L.R. and Treitel, S., 1984. A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical prospecting*, 32(2), pp.159-186.

Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), pp.431-441.

Min, D.J., Shin, J. and Shin, C., 2015. Application of the least-squares inversion

method: Fourier series versus waveform inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 122, pp.62-73.

Monaghan, W. D., Trevits, M. A., & Sapko, M. J., 2005. Evaluation of Mine Seals Using Ground Penetrating Radar. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2005* (pp. 260-273). Society of Exploration Geophysicists.

Monorchio, A., Bretones, A.R., Mittra, R., Manara, G. and Martín, R.G., 2004. A hybrid time-domain technique that combines the finite element, finite difference and method of moment techniques to solve complex electromagnetic problems. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 52(10), pp.2666-2674.

Mur, G., 1981. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations. *IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility*, (4), pp.377-382.

Santarato, G., Abu-Zeid, N. and Chiara, P., 1998. Prospezioni geofisiche in area urbana. *Geologia tecnica & ambientale*, (4), pp.43-52.

Sasaki, Y., 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, 59(12), pp.1839-1848.

Snieder, R. and Trampert, J., 1999. Inverse problems in geophysics. In *Wavefield inversion* (pp. 119-190). Springer, Vienna.

Soulios, G., 1978. Nouvelles données sur la geologie et l'hydrogeologie de la region d'Arnissa-vallee et d'Edessaïos (Macédoine-Grece). *Thèse de specialité, Université de Montpellier, Montpellier*.

Stratton, J.A., 2007. *Electromagnetic theory* (Vol. 33). John Wiley & Sons.

Sudakova, M.S. and Vladov, M.L., 2018. Modern Directions of Application of Ground-Penetrating Radar. *Moscow University Geology Bulletin*, 73(3), pp.219-228.

Travassos, X.L., Avila, S.L., Adriano, R.D.S. and Ida, N., 2018. A review of ground penetrating radar antenna design and optimization. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 17(3), pp.385-402.

Tsourlos, P., 1995. *Modelling, interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data* (Doctoral dissertation, University of York).

Tsourlos, P. and Ogilvy, R., 1999. An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarization data: preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2(2), pp.30-45.

VanDecar, J.C. and Snieder, R., 1994. Obtaining smooth solutions to large, linear, inverse problems. *Geophysics*, 59(5), pp.818-829.

Vargemezis, G.N., Tsourlos, P., Naxakis, V. and Stampolidis, A., 2009, September. Application of Resistivity Tomography to the Study of the Travertine Formation of Waterfalls in Edessa, North Greece. In *Near Surface 2009-15th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (pp. cp-134). European Association of Geoscientists & Engineers.

Ward, S.H., 1988, January. The resistivity and induced polarization methods. In

Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1988 (pp. 109-250). Society of Exploration Geophysicists.

Warren, C., Giannopoulos, A. and Giannakis, I., 2016. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, pp.163-170.

Warren, C., 2009. *Numerical modelling of high-frequency ground-penetrating radar antennas* (Doctoral dissertation, University of Edinburgh).

Yee, K., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 14(3), pp.302-307.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΛΛΕΣ ΠΗΓΕΣ

Αγγελής, Δ., 2017. Γεωφυσικές μετρήσεις τοίχων και θεμελιώσεων μνημείων. *Προ/Μεταπτυχιακές Διατριβές στη Βιβλιοθήκη Θεόφραστος του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ*.

Βαβλιάκης, Ε., 1998. Σχηματισμός - εξέλιξη του σπηλαίου της Έδεσσας και η θετική μετατόπιση του μετώπου των καταρρακτών

Μπλάνα, Μ., 2011. *Τεχνικογεωλογικές παράμετροι κατά τη διάνοιξη της σιδηροδρομικής σήραγγας Πλατάνου (ΧΘ 68+ 086, 70 έως ΧΘ 68+ 387, 00): παρουσίαση γεωλογικής οριζοντιογραφίας και γεωλογικής μηκοτομής* (Doctoral dissertation).

Στρατηγέας, Θ.Ν., 2010. *Μελέτη φόρτισης μόνιμης επένδυσης σιδηροδρόμων διπλού κλάδου* (Master's thesis).

Ι.Γ.Μ.Ε. Γεωλογικός Χάρτης 1:50000 Έδεσσας

<http://www.paraview.org>