



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Γεωφυσική Έρευνα
στο Βυζαντινό Ναό Αγίου Νικολάου
στο Πλατάνι Αχαΐας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της
ΠΑΣΧΑΛΙΑΣ Γ. ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Γεώργιος Αποστολόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2015



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
Τομέας Μεταλλευτικής

Γεωφυσική Έρευνα
στο Βυζαντινό Ναό Αγίου Νικολάου
στο Πλατάνι Αχαΐας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΠΑΣΧΑΛΙΑΣ Γ. ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Γεώργιος Αποστολόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή : .

.....
Γεώργιος Αποστολόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Λουπασάκης
Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Νομικός
Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2015



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
Τομέας Μεταλλευτικής

Copyright ©–All rights reserved Πασχαλία Παυλοπούλου, 2015.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην πτυχιακή εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πασχαλία Παυλοπούλου

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Βυζαντινό Ναό Αγίου Νικολάου στο Πλατάνι Αχαΐας. Σκοπός της εκπονηθείσας μελέτης ήταν η αποτύπωση της στρωματογραφίας της περιοχής, ώστε να γίνει γνωστό το που εδράζει ο ναός, καθώς και η καταγραφή τυχόν τοπικών δομών ανθρωπογενούς προέλευσης. Απώτερη επιδίωξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Ε.Μ.Π. ήταν με αυτή την έρευνα να συμβάλει στη προσπάθεια συντήρησης και προστασίας του μνημείου από σεισμικές καταπονήσεις.

Αρχικά, έγινε ο σχεδιασμός της γεωφυσικής έρευνας λαμβάνοντας υπόψη γεωλογικά και ιστορικά στοιχεία, καθώς και πληροφορίες από την ελληνική και ξένη βιβλιογραφία, για αντίστοιχες περιπτώσεις μελετών.

Αφού σχεδιάστηκε η γεωφυσική έρευνα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στον Ναό με τις ακόλουθες γεωφυσικές μεθόδους: Ηλεκτρική Μέθοδος ERT

Σεισμική Μέθοδος

Μέθοδος Γεωραντάρ GPR

Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία των δεδομένων της κάθε μέτρησης χρησιμοποιώντας κατάλληλα λογισμικά που διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της σχολής. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήσαμε ήταν το Surfer της Golden Software, το RES2DINV της Geotomo Software, το SeisImager και το PlotRefa της EG & G GEOMETRICS και το REFLEXW της Sandmeier Scientific Software.

Μετά την εκτενή επεξεργασία και ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων έγινε μια γενικότερη στρωματογραφική αποτύπωση της περιοχής κάτω από το ναό, με κριτήριο ορισμένες φυσικές ιδιότητες των σχηματισμών, όπως η κοκχομετρία και η συνεκτικότητα. Εντοπίστηκε επιπλέον το βάθος στο οποίο εκτιμάται η οροφή του γεωλογικού υποβάθρου, ενώ παράλληλα σημειώθηκαν ορισμένες τοπικές δομές. Αυτές οι τοπικές δομές εκτιμάται ότι έχουν ανθρωπογενή προέλευση και σχετίζονται με τοπικές εκσκαφές και τη κατασκευή του ναού.

Λέξεις Κλειδιά

Γεωφυσικές μέθοδοι εγγύς επιφανείας, Ηλεκτρική Μέθοδος ERT, Σεισμική Μέθοδος, Γεωραντάρ GPR, Ναός Αγίου Νικολάου Πλατάνι Αχαΐας, προστασία βυζαντινών μνημείων

Abstract

The subject of the present thesis is the geophysical survey that was carried out in the Byzantine church of Agios Nikolaos in Platani Achaia in Greece. The purpose of this study was to identify the stratigraphy of the region, in order to determine on what geological formations is the temple grounded and the location of any local underground man-made structures. Ultimate purpose of the Laboratory of Applied Geophysics of N.T.U.A. was to contribute, through this study, to the restoration and protection of the building from seismic strains.

We initially designed the geophysical research taking into account the geological and historical data, as well as the information from Greek and foreign bibliography from similar case studies.

After designing the geophysical survey, measurements were performed in the area of the church with the following geophysical methods:

Electrical Resistivity Tomography ERT

Seismic Method

Ground Penetrating Radar GPR

Then the processing of the data was done using suitable software, provided by the Laboratory of Applied Geophysics in the School of Mining Engineering at N.T.U.A. The programs that we used were : the Surfer of Golden Software, the RES2DINV of Geotomo Software, the SeisImager and the PlotRefa of EG & g GEOMETRICS and the REFLEXW of Sandmeier Scientific Software.

After processing and interpreting the geophysical data, there was generated a general stratigraphic mapping of the area under the temple, in terms of physical properties of the formations, such as the granulometry and consistency. We also identified the depth of the bedrock roof and some local structures (abnormalities). These local structures are estimated to have man-made origin and are related to local excavations and construction of the temple.

Keywords

Near surface geophysical methods, Electrical Resistivity Tomography Method, Seismic Method, Ground Penetrating Radar, Agios Nikolaos Platani Achaia, protection of Byzantine monuments

στον αδερφό μου Γεράσιμο

Ευχαριστίες

Ο αδερφός, η οικογένεια και οι φίλοι μου είναι τα ουσιαστικά στηρίγματά μου, τους ευγνωμονώ όσο κανέναν και τους οφείλω τα πάντα.

Η πρώτη επαφή μου με τη γεωφυσική ξεκίνησε στα πλαίσια της γενικότερης ενασχόλησής μου με τον ενεργειακό τομέα και τελικώς η παρούσα γεωφυσική έρευνα έγινε το θέμα της διπλωματικής εργασίας μου.

Η επιλογή μου όμως αυτή να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο και με αυτή την απαιτητική επιστήμη, την οποία επιστήμη αρχικά φοβόμουν, δεν ήταν τυχαία. Καταλύτης σε αυτή την επιλογή μου ήταν ο επιβλέπων καθηγητής της εργασίας μου, ο κύριος Γεώργιος Αποστολόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής του Ε.Μ.Π Με έκανε να ζηλέψω τη δουλειά του, με έκανε να μάθω γεωφυσική. με εμπιστεύτηκε όσο λίγοι και με καθοδήγησε στο τελευταίο έτος σπουδών μου, γιαυτό και τον ευχαριστώ από καρδιάς.

Καθοριστικότερη ήταν επίσης η συμβολή του κύριου Γεωργίου Αμολοχίτη γεωφυσικού και μέλους Ε.Ε.ΔΙ.Π. του τομέα Μεταλλευτικής, του οποίου οι συμβουλές και οι παρατηρήσεις με βοήθησαν τόσο στο μάθημα της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής όσο και στη διπλωματική εργασία μου.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω το συμφοιτητή μου Παναγιώτη Κουτρούλη για την πολύτιμη συνεργασία και βοήθειά του κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Ευχαριστώ επίσης τους γεωλόγους-γεωπιστήμονες Παύλο Δάφνη και Σωτήρη Σμπόρα για την αξιότιμη προσφορά τους σε γεωλογικά στοιχεία και για τις συμβουλές τους.

Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες στο κύριο Κωνσταντίνο Λουπασάκη Επίκουρου Καθηγητή του τομέα Γεωλογικών Επιστημών για την παροχή αρχείου Γεωλογικών Χαρτών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους καθηγητές και φοιτητές της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων Μεταλλουργών, οι οποίοι μου έδωσαν ευκαιρίες, με τίμησαν με τη βοήθειά τους και διευκόλυναν την προσπάθειά μου να γίνω μηχανικός.

Σας ευχαριστώ
Πασχαλία Παυλοπούλου

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	vii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	4
1.2 Οργάνωση του τόμου	5
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	9
2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος	9
2.1.1 Γενικά	9
2.1.2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	10
2.1.2.1 Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης	11
2.1.2.2 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο	13
2.1.2.3 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο	14
2.1.2.4 Δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο	15
2.1.2.5 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση	15
2.1.2.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων	15
2.1.2.7 Εξοπλισμός Υπαίθρου	17
2.1.3 Γεωλεκτρικές Διασκοπήσεις	19
2.1.3.1 Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις	19
2.1.3.2 Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις	19
2.1.4 Γεωηλεκτρική Τομογραφία	20
2.2 Σεισμική Μέθοδος	23
2.2.1 Εισαγωγή	23
2.2.2 Γενικά	23
2.2.3 Ελαστικές Σταθερές	23
2.2.4 Ελαστικά Κύματα	25
2.2.5 Ταχύτητες διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων εντός των Διαφόρων Πετρωμάτων	26

2.2.6	Εξασθένιση της Σεισμικής Ενέργειας	27
2.2.7	Εξοπλισμός	28
2.2.8	Καταμερισμός Ενέργειας	29
2.2.8.1	Οριακά διαθλώμενα κύματα	30
2.2.8.2	Περίθλαση	30
2.2.9	Σεισμική Ανάκλαση και Σεισμική Διάθλαση	31
2.2.10	Μέθοδος της Σεισμικής Διάθλασης	31
2.2.10.1	Γενικά	32
2.2.10.2	Εργασίες υπαίθρου	32
2.2.10.3	Πηγές θορύβου	33
2.2.10.4	Καταγραφές της εδαφικής κίνησης	34
2.2.10.5	Δρομοχρονικές καμπύλες	35
2.2.10.6	Προσδιορισμός της δομής του υπεδάφους	38
2.3	Γεωραντάρ	43
2.3.1	Εισαγωγή	43
2.3.2	Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ	44
2.3.3	Μετρήσεις στο ύπαιθρο	45
2.3.4	Βάθος και ανάλυση μετρήσεων	46
2.3.5	Απεικόνιση των δεδομένων των μετρήσεων γεωραντάρ	46
2.3.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου	47
3	Γεωφυσικές μελέτες σε παρόμοιες περιπτώσεις	49
3.1	Βυζαντινός Ναός Αγίας Σοφίας [30], Κωνσταντινούπολη, Τουρκία	49
3.2	Πύργος Φρουρίου (Fire Tower) στο Σόπρον Ουγγαρίας [23]	52
3.3	Γεωφυσικές Έρευνες – Μελέτες Περιπτώσεων από την Ελλάδα [31]	55
4	Γεωφυσική Έρευνα στον Άγιο Νικόλαο Αχαΐας	59
4.1	Γενικά	59
4.2	Ειδικότερα στοιχεία για το μνημείο	59
4.3	Γεωλογική Θεώρηση της Εξεταζόμενης Περιοχής	62
4.4	Μετρήσεις Υπαίθρου και η Ερμηνεία τους	67
4.4.1	Ηλεκτρική Μέθοδος	69
4.4.1.1	Εξοπλισμός	69
4.4.1.2	Ψηφιακή Επεξεργασία των Μετρήσεων	71
4.4.1.3	Αποτελέσματα μετρήσεων	72
4.4.1.4	Ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομών	74
4.4.1.4.1	Rio-res1	74
4.4.1.4.2	Rio-res2	78
4.4.2	Σεισμική Μέθοδος	81
4.4.2.1	Εξοπλισμός	82

4.4.2.2	Επεξεργασία των δεδομένων και τα αποτελέσματα αυτής	83
4.4.2.2.1	Επιλογή πρώτων αφίξεων	83
4.4.2.2.2	Δημιουργία δρομοχρονικών καμπύλων	86
4.4.2.2.3	Μοντέλα του υπεδάφους και υπολογισμός σεισμικών ταχυτήτων	87
4.4.3	Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR - Ground Penetrating Radar)	89
4.4.3.1	Επεξεργασία μετρήσεων	90
4.4.3.2	Επεξεργασμένα μοντέλα GPR	91
4.4.3.3	Ερμηνεία και σχολιασμός των μοντέλων GPR	93
5	Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα	97
5.1	Συμπεράσματα	97
5.2	Σχόλια	99

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Σχεδιασμός Γεωφυσικής Έρευνας	7
2.1	Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου	11
2.2	Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο [6](Λούης 2004)	14
2.3	Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο [6](Λούης 2004)	14
2.4	Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο [6](Λούης 2004)	15
2.5	Διατάξεις ηλεκτροδίων [8](Μαυρομάτης 2007)	16
2.6	Συνήθεις διατάξεις ηλεκτροδίων	17
2.7	7 Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος [13](Αποστολόπουλος 2013)	18
2.8	Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης (α) Dipole–Dipole , (β) Wenner και (γ) Schlumberger [8](Μαυρομάτης 2007)	19
2.9	Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης [6](Λούης 2004)	20
2.10	Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση διδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής [27]	21
2.11	Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου [27] (Loke 1996)	22
2.12	Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων [27](Loke 1996)	22
2.13	Μέτρο Ελαστικότητας	23
2.14	Μέτρο Κυβικής Ελαστικότητας [13](Αποστολόπουλος 2013)	24
2.15	Μέτρο Ακαμψίας	24
2.16	Λόγος Poisson	25
2.17	Κύματα S και P	26
2.18	Κύματα Love και Rayleigh	27
2.19	Ο νόμος του Snell στις σεισμικές μεθόδους	29
2.20	Μετωπικά Κύματα [13](Αποστολόπουλος 2013)	30
2.21	Πείθλαση στο άκρο ρωγματομένου στρώματος [13]	31
2.22	Διάταξη για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων στην ύπαιθρο [6](Λούης 2004) .	32
2.23	Σεισμική καταγραφή κοινής πηγής [13](Αποστολόπουλος 2013)	34
2.24	Δρομοχρονική καμπύλη πρώτων αφίξεων [35](Βοψδ 1999)	35

2.25	Συνοπτικά η σεισμική μέθοδος	37
2.26	Μοντέλο στρώματος πάνω από ημιχώρο, με οριζόντια διεπιφάνεια [24]	38
2.27	Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου δύο στρωμάτων [24]	39
2.28	Μοντέλο δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με οριζόντιες διεπιφάνειες [24]	40
2.29	Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου τριών στρωμάτων [24]	40
2.30	Κεκλιμένη Ασουνέχεια [13]	41
2.31	Αρχή λειτουργίας του Γεωραντάρ	44
2.32	Diagram showing (a) the antenna geometry for a common-offset (CO) ground-penetrating radar reflection survey and (b) the antenna geometry for a common mid-point (CMP) survey used to derive the average subsurface radar propagation velocity. In both, Tx and Rx indicate the locations of the transmitting and receiving antennas, respectively [19] (Buursink1999)	46
3.1	Οι μετρήσεις με GPR στο επίπεδο του δαπέδου του ναού	50
3.2	Μια σχεδόν επίπεδη ανάκλαση R1 παρατηρείται σε πολλές τομές GPR, κάτι που πιθανόν σχετίζεται με το λίθινο δάπεδο της προγενέστερης κατασκευής	50
3.3	Αυτοτελής (unmigrated) τομή GPR σε τμήμα του κτηρίου στο G κάρναβο (βλπ. Εικόνα 3.1) . Ανακλάσεις R1 και R2 από την κορυφή και τη βάση της δεξαμενής κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα	51
3.4	Κάρναβος μετρήσεων της σεισμικής μεθόδου	52
3.5	Τα προς μελέτη τμήματα του πύργου. Η εμπρόσθια είσοδος φαίνεται αριστερά και η δεξιά πλάγια όψη της εμφανίζεται δεξιά	53
3.6	Το προφίλ του GPR δίνεται στα αριστερά. Το σύμβολο X αναφέρεται στα σημείατσιμεντένεσης και ο αριθμός 90 υποδεικνύει τα λίτρατσιμέντου που εισήχθησαν μικρές κόκκινες βούλες επισημαίνουν τα όρια της μέτρησης, η οποία υποδεικνύεται με κόκκινο βέλος στη δεξιά φωτογραφία. 9 μικροί μπλε κύκλοι απεικονίζουν τα σημεία της δοκιμαστικήςτσιμεντένεσης.	54
3.7	Τομές GPR του εσωτερικού τοίχου (τόξο της μπροστινής πύλης) από 1.2 m βάθος	54
3.8	Προφίλ 3 στο πάνω μέρος είναι οι ανακλάσεις πριν την επέμβαση. Στο κάτω μέρος εμφανίζεται η ίδια τομή μετά από εισχώρηση 150 lτσιμέντου	55
3.9	(a) Χάρτης βάθους ($z = 0.6$ m) που εξάγεται από το 3D ανεστραμμένο μοντέλο αντίστασης, όπου τα θερμά χρώματα εκφράζουν υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (εύρος 10 - 1000 Ohm-m). (b) Χάρτης GPR . (c) Ολοκληρωμένη διαγραμματική ερμηνεία των τιμών υψηλής αντίστασης και μεγάλου πλάτους ανωμαλιών GPR. (d) Ανεσκαμμένη αρχαιολογική δομή σχετιζόμενη με την ανωμαλία T10 στο βόρειο τμήμα. (e) Τάφρος αποστράγγισης σχετιζόμενη με την ανωμαλία T1.	56
3.10	(a) Έρευνα Γεωραντάρ για την εκτίμηση του πάχους του Ευπαλίνειου Υδραγωγείου στη Σάμο. (b) Δείγμα επεξεργασμένων δεδομένων GPR όπου η κόκκινη γραμμή επισημαίνει την ανάκλαση μεταξύ της επένδυσης και του υλικού επίχωσης. 57	

3.11 (a) Διάταξη Γεωφυσικού καννάβου, γραμμές ERT και τομές Σεισμικές Δια- άθλασης, Ίστρον, Κρήτη . (b) Τομές βάθους κατανομής ταχύτητας διάδοσης για βάθη 10 m και 50 m	58
3.12 (a) Δορυφορική εικόνα του Google Earth στον αρχαιολογικό χώρο της Α- πτέρας (ανατολική Κρήτη) (b) Τμήμα GPR παρουσιάζει δύο κύριες ανακλάσεις στα 10 και 14 m. (c) Το σχήμα και το μέγεθος ανωμαλίας αποδίδεται σε μια δεξαμενή με διάμετρο 4 m.	58
4.1 Πλατάκι Αχαΐας, Ναός Αγίου Νικολάου	60
4.2 Ναός Αγίου Νικολάου, Κατόψεις, Αποτύπωση με ένδειξη των οικοδομικών φάσεων [12]	60
4.3 Ναός Αγίου Νικολάου, Τομές, Αποτύπωση με ένδειξη των οικοδομικών φάσε- ων (βλ. Εικ.4.2): Α. Τομή ΑΑ, Β. Τομή ΒΒ, Γ. Τομή ΓΓ, Δ. Τομή ΔΔ, [12]	61
4.4 Ναός Αγίου Νικολάου. Όψεις. Αναπαράσταση : Α. Ανατολική όψη, Β. Δυτική όψη, Γ. Νότια όψη, Δ. Βόρεια όψη, [12]	62
4.5 Στίγμα οικοπέδου, Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, Γεω-Ευρετήριο	63
4.6 Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδος, Φύλλο Ναύπακτος, ΙΓΜΕ χαρ- τογράφηση 1966-67 . Κόκκινο βέλος επισημαίνει την περιοχή έρευνας.	64
4.7 Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης. ([10] Παγώνας 2009)	65
4.8 Γεωλογικό χάρτης της περιοχής μελέτης όπου διακρίνονται οι ρηξιγενείς ζώνες και η κατανομή των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων ([26] Kontopoulos & Zelilidis 1997)	66
4.9 Ρήγματα της περιοχής του Κορινθιακού Κόλπου ([20] Doutsos et al. 1988)	66
4.10 Χάρτης ενεργών ρηγμάτων ([21] Doutsos & Poulimenos 1992 , [5] Δούτσος 2000)	67
4.11 Κάνναβος μετρήσεων για το σύνολο των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στο Ναό Αγίου Νικολάου, Πλατάκι Αχαΐας. απεικόνιση με Surfer	68
4.12 Δορυφορική Απεικόνιση της Γεωφυσικής Έρευνας, Google Earth 2015	69
4.13 Φωτογραφία άποψη προς Βορρά, Rio-res1, Μετρήσεις Ηλεκτρικής Μεθόδου, Μάιος 2015	70
4.14 Φωτογραφία διάταξης μετρητή <i>SYSCAL Pro</i> και ηλεκτρικής πηγής. Μάιος 2015	70
4.15 Γεωηλεκτρική Τομογραφία Rio-res1, με τις 2 διατάξεις ηλεκτροδίων και τις 3 διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων	72
4.16 Γεωηλεκτρική Τομογραφία Rio-res2, με τις 2 διατάξεις ηλεκτροδίων και τις 3 διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων	73
4.17 Γεωηλεκτρική Τομή Rio-res1 σε διάταξη Schlumberger	74
4.18 Γεωηλεκτρική Τομή Rio-res1 σε διάταξη Dipole-Dipole RRH	75
4.19 Αρχική ερμηνεία Schlumberger, Dipole-Dipole	76
4.20 Εναλλαγή των ερμηνειών	76

4.21 Γεωηλεκτρική Τομή Rio-res2 σε διάταξη Schlumberger	78
4.22 Γεωηλεκτρική Τομή Rio-res2 σε διάταξη Dipole-Dipole	79
4.23 Τελική ερμηνεία Rio-res2 Schlumberger RRH	79
4.24 Δορυφορική Απεικόνιση των ERT τομών και των περιοχών τοπικής ανωμαλίας 1,2,3,4,5	80
4.25 Σεισμικές Μετρήσεις Rio-Seis3, διακρίνεται η συστοιχία γεωφώνων και η σει- σμική πηγή – σφύρα με πλακίδιο κρούσης.	81
4.26 Περιπτώσεις γεωφώνων	82
4.27 Διάταξη Σειсмоγράφου - Φορητού υπολογιστή -Ηλεκτρικής πηγής	83
4.28 Σειсмоγράμματα για τη Rio-Seis1	84
4.29 Σειсмоγράμματα για τη Rio-Seis3	85
4.30 Δρομοχρονικές καμπύλες για τη σεισμική γραμμή Rio-Seis1	86
4.31 Δρομοχρονικές καμπύλες για τη σεισμική γραμμή Rio-Seis3	87
4.32 Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή Rio-Seis1	88
4.33 Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή Ριο-Σεισ3	88
4.34 Λήψη μετρήσεων με γεωραντάρ (GPR1)	89
4.35 Δορυφορική αποτύπωση των τομών GPR με εμφανή τη διεύθυνσή τους	90
4.36 Επεξεργασμένα μοντέλα της μεθόδου GPR για τις τομές GPR1, GPR2 για κεραία-πομπό 100 MHz και κεραία-πομπό 250 MHz	91
4.37 Επεξεργασμένα μοντέλα της μεθόδου GPR για τις τομές GPR3 και GPR4 για κεραία-πομπό 100 MHz και κεραία-πομπό 250 MHz	92
4.38 Σχολιασμός της GPR1	93
4.39 Σχολιασμός της GPR2	94
4.40 Σχολιασμός της GPR3	95
4.41 Σχολιασμός της GPR4	96

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα	3
2.1	Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα [13](Αποστολόπουλος 2013)	12
2.2	Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων	13
1	Σεισμικές ταχύτητες των P κυμάτων για διάφορα υλικά	101

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η Γεωφυσική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων του εσωτερικού της Γης, στηριζόμενη στις βασικές αρχές της Φυσικής Επιστήμης. Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική μελετά τις φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών μιας περιοχής, με σκοπό την αποτύπωσή τους και τον ακριβή εντοπισμό υπεδάφικών δομών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Η γεωφυσική διασκόπηση περιλαμβάνει τη λήψη μετρήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, οι οποίες μετρήσεις επηρεάζονται από την εσωτερική κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων της γης. Έτσι, ο εντοπισμός κάποιας τοπικής δομής στο υπέδαφος εξαρτάται από εκείνα τα χαρακτηριστικά, δηλαδή τις φυσικές ιδιότητες, που διαφοροποιούνται σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Οι γεωφυσικές μέθοδοι περιορίζονται από το γεγονός ότι μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο « ανωμαλίες », δηλαδή περιοχές ή στόχους, στους οποίους κάποια φυσική ιδιότητα παρουσιάζει επαρκώς διαφορετική τιμή από τον περιβάλλοντα χώρο. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την επίλυση του εκάστοτε γεωφυσικού προβλήματος εξαρτάται, κυρίως, από τους εξής παράγοντες:

- Τη φύση του σχηματισμού τον οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε, καθώς και του περιβάλλοντός του.
Με βάση τη λογική αυτή, συνήθως επιλέγεται η μέθοδος η οποία βασίζεται στη φυσική εκείνη ιδιότητα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση τιμών, μεταξύ « στόχου » και περιβαλλόντων πετρωμάτων. Έτσι για παράδειγμα, η μαγνητική μέθοδος είναι η πλέον κατάλληλη για τον εντοπισμό ενός μαγνητίτη, λόγω της μεγάλης μαγνητικής επιδεκτικότητας που τον χαρακτηρίζει. Αντίστοιχα, σε έρευνες για τον εντοπισμό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, κατάλληλες είναι οι ηλεκτρικές ή σεισμικές μέθοδοι, αφού ένα πέτρωμα, όταν είναι κορεσμένο, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σεισμικής ταχύτητας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε σχέση με το αντίστοιχο αχώρεστο.
- Το στάδιο της έρευνας στο οποίο βρισκόμαστε.
Η από αέρος γεωφυσική διασκόπηση χρησιμοποιείται, συνήθως, κατά τα προκαταρκτικά στάδια μιας έρευνας, αφού η αναγνώριση με αυτόν τον τρόπο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα – δεδομένου ότι στο στάδιο αυτό δεν απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια- και λαμβάνοντας υπόψη το τεράστιο μέγεθος των εκτάσεων που πρέπει να καλυφθούν, με τον ταχύτερο

και πιο οικονομικό τρόπο. Σε ένα επόμενο στάδιο, η διασκόπηση θα πραγματοποιηθεί μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος, με γεωφυσικές μεθόδους μεγαλύτερης ακρίβειας

Για την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας στα συμπεράσματα της έρευνας, συνηθίζεται η εφαρμογή περισσότερων από μία γεωφυσικών μεθόδων, με βάση τα παραπάνω κριτήρια.

Το αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας ήταν αρχικά ο εντοπισμός υπόγειων μεταλλοφόρων κοιτασμάτων. Καθώς τα χρόνια πέρασαν και η τεχνολογική ανάπτυξη ήταν ραγδαία, τα αντικείμενα της γεωφυσικής διευρύνθηκαν. Τώρα η επιστήμη της γεωφυσικής ασχολείται με τον ευρύτερο τομέα των υποδομών, την εύρεση θεμελίωσης κτισμάτων, έγκαιλων, αρχαιολογικών θαμμένων στόχων, βαθιούς δόμους, στους οποίους πιθανά να υπάρχουν υδρογονάνθρακες κ.ά. Με τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η γεωφυσική επιστήμη έχει εισέλθει σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, κάνοντάς την απαραίτητη σχεδόν για κάθε είδους έργου που πραγματοποιείται. Υπάρχει μεγάλο εύρος γεωφυσικών μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διασκόπηση του υπεδάφους. Οι σημαντικότερες μέθοδοι, καθώς και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλεύεται η κάθε μία, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΣΤΟΧΟΣ
Βαρυτική Μέθοδος	Ένταση πεδίου βαρύτητας	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων
Μαγνητική Μέθοδος	Ένταση γεωμαγνητικού πεδίου	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της παραμένουσας μαγνήτισης
Ηλεκτρική Μέθοδος	- Ειδική ηλεκτρική αντίσταση της γης - Ηλεκτρικά δυναμικά	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροχωριτικότητα)
Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	Αντίδραση σε ηλεκτρομαγνητική διέγερση	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή)
Σεισμική Μέθοδος	- Χρόνοι διαδρομής σεισμικών κυμάτων - Περίοδοι σεισμικών κυμάτων - Πλάτη σεισμικών κυμάτων	Καθορισμός της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων
Ραδιομετρική Μέθοδος	Φυσική ραδιενέργεια	Προσδιορισμός της φυσικής ραδιενέργειας των πετρωμάτων Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων
Θερμική Μέθοδος	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας στο Ναό Αγίου Νικολάου στο Πλατάκι Αχαΐας. Η εκκλησία του Αγίου Νικολάου στο χωριό Πλατάκι του δήμου Ρίου, αποτελεί μεσοβυζαντινό μνημείο πολιτισμικής κληρονομιάς και η συγκεκριμένη μελέτη σχετίζεται άμεσα με την ανάγκη προστασίας και διατήρησης τέτοιων μνημείων. Η εφαρμογή της γεωφυσικής έρευνας κρίθηκε απαραίτητη, με αφορμή το ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο «ΚΡΗΠΣ-ΑΣΠΙΔΑ: Αναβάθμιση Υποδομών για την Αντισεισμική Προστασία της Χώρας και Ενίσχυση της Παροχής Υπηρεσιών μέσω Δράσεων Αριστείας» υπό την αιγίδα του Αστεροσκοπείου Αθηνών, καθώς παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής ικανοποιητικών συμπερασμάτων, ενώ ταυτόχρονα, είναι μη καταστροφική μέθοδος.

Στόχος μας ήταν ο εντοπισμός τυχόν τοπικών δομών και η αποτύπωση της στρωματογραφίας του χώρου, ώστε να δούμε που στέκεται ο ναός και σε τι βάθος βρίσκεται το βραχώδες υπόβαθρο. Επιπρόσθετη επιδίωξη της εργασίας αυτής ήταν και ο υπολογισμός των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων P και S. Η προαναφερόμενη πληροφορία θα αξιοποιηθεί από επιτελείο Πολιτικών Μηχανικών, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ποια θα είναι η αντίδραση του κτιρίου του Ναού σε καταπόνηση από σεισμό.

Η ομάδα πραγματοποίησης των μετρήσεων της συγκεκριμένης έρευνας αποτελούνταν από μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, και εξωτερικούς συνεργάτες. Πιο συγκεκριμένα, υπεύθυνος έρευνας ήταν ο Δρ. Γ. Αποστολόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τομέα Μεταλλευτικής, και τα υπόλοιπα μέλη ήταν ο Δρ. Γ. Αμολοχίτης, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Μεταλλευτικής, ο Π. Κουτρούλης τελειόφοιτος φοιτητής της Σχολής Μηχ.Μεταλλείων-Μεταλλουργών και εμένα τη Πασχαλία Παυλοπούλου, τελειόφοιτη σπουδάστρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.

Με βάση τη φύση του προβλήματος, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν οι εξής γεωφυσικές μέθοδοι:

- Ηλεκτρική Μέθοδος (ERT)
- Σεισμική Μέθοδος
- Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR)

Για την κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν τα κατάλληλα όργανα που παρείχε το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του ΕΜΠ. Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCAL-Pro . Για τη σεισμική μέθοδο χρησιμοποιήθηκε ο σειсмоγράφος DAQlink III της Seismic Source . Τέλος, για τις μετρήσεις της μεθόδου GPR χρησιμοποιήθηκαν δύο θωρακισμένες κεραίες της MALA Geoscience , με τις εξής διατάξεις :

- πηγή και δέκτης η κεραία με συχνότητα 250 MHz
- πηγή και δέκτης η κεραία με συχνότητα 100 MHz

Στη συνέχεια επεξεργαστήκαμε τα δεδομένα από τις μετρήσεις της κάθε μεθόδου, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα: το Surfer της Golden Software, το RES2DINV της Geotomo Software, SeisImager και το PlotRefa της EG & G GEOMETRICS και το REFLEXW της Sandmeier Scientific Software.

Με την επεξεργασία των δεδομένων βγήκαν ορισμένα συμπεράσματα σε σχέση με το υπέδαφος, που στέκεται δηλαδή ο ναός, αν υπάρχουν τοπικές ανωμαλίες και κατασκευές, σε τι βάθος εντοπίζεται και πως εκτείνεται το βραχώδες υπόβαθρο, ενώ μας δόθηκε και η δυνατότητα υπολογισμού των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων P και S, οι οποίες και θα αξιοποιηθούν για περαιτέρω έρευνα.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η δομή της διπλωματικής εργασίας, αποτελείται από πέντε κεφάλαια, τα οποία περιλαμβάνουν τα εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται εισαγωγή στο αντικείμενο της γεωφυσικής όσον αφορά τις εφαρμογές που αφορούν το μηχανικό γενικά, αλλά και στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

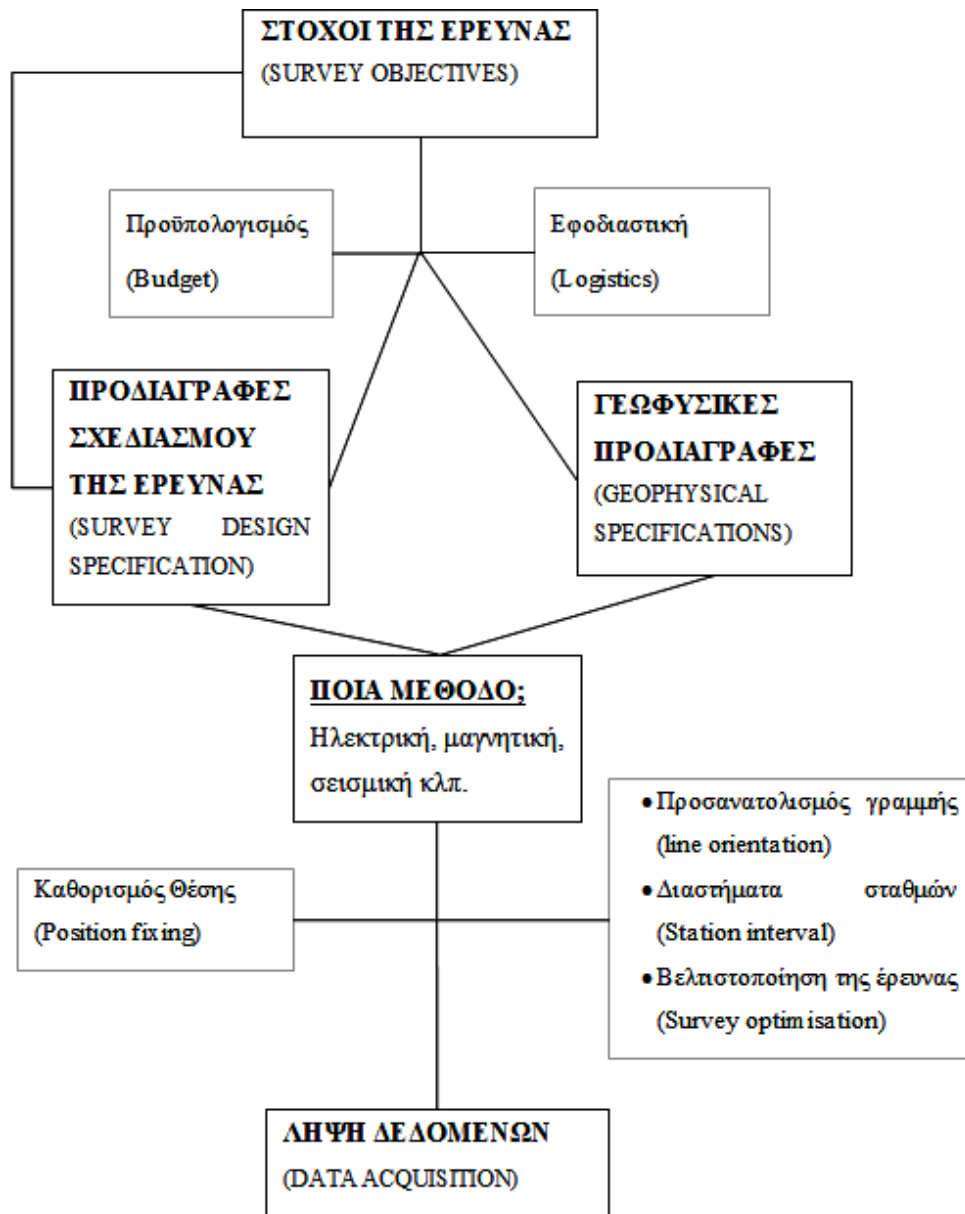
Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο αξιοποιήθηκε για την καλύτερη κατανόηση και εφαρμογή των τριών γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν. Γίνεται αναφορά στις βασικές τεχνικές, την οργανολογία και τις διαφορετικές διατάξεις που εφαρμόζονται στην κάθε μέθοδο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναφέρονται τρία παραδείγματα γεωφυσικής έρευνας, από τη διεθνή βιβλιογραφία, που ανταποκρίνονται σε παρόμοιες συνθήκες με αυτές που έπρεπε να αντιμετωπίσουμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής αναφορά σε όλα τα στάδια της γεωφυσικής έρευνας στο Βυζαντινό Ναό του Αγίου Νικολάου. Παραθέτονται ιστορικά στοιχεία για το Ναό, γίνεται περιγραφή της γεωλογίας της ευρύτερης περιοχής και παρουσιάζονται οι μέθοδοι στην εφαρμογή των οποίων καταλήξαμε, καθώς και το είδος των συμπερασμάτων που περιμένουμε από κάθε μέθοδο. Στις επόμενες ενότητες, αναφέρονται αναλυτικά για την κάθε μέθοδο, τα όργανα και οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας, με βάση τα οποία βγαίνουν συμπεράσματα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα δεδομένα της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, με βάση τα οποία εντοπίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι υπόγειοι ορίζοντες της στρωματογραφίας, γίνεται δηλαδή εκτίμηση του βάθους στο οποίο εντοπίζεται το βραχώδες υπόβαθρο. Ακολουθούν τα δεδομένα της σεισμικής μεθόδου, με βάση τα οποία γίνεται σαφής καταγραφή των μεταβολών στο υπέδαφος με βάση τη συνεκτικότητα των υλικών, εντοπίζοντας έτσι με μεγάλη ακρίβεια το βραχώδες υπόβαθρο. Τελευταία παρουσιάζεται η μέθοδος του γεωραντάρ, με την οποία εντοπίστηκαν σε βάθος υπόγειοι ορίζοντες αλλά και με μεγάλη ακρίβεια, οι υπόγειες κατασκευές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μια γενική αποτίμηση συνολικά της έρευνας και εκτιμάται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου για περιπτώσεις που απασχολούν το μηχανικό η προσέγγι-

γηση ζητημάτων γεωτεχνικής φύσης, ειδικά όταν πρόκειται για κτίρια ιστορικής σημασίας και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς.



Σχήμα 1.1: Σχεδιασμός Γεωφυσικής Έρευνας

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος

2.1.1 Γενικά

Η ομάδα των ηλεκτρικών γεωφυσικών τεχνικών αντιπροσωπεύει ορισμένα από τα παλαιότερα μέσα εξεύρεσης του εσωτερικού της Γης.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς, ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Αντικείμενό τους είναι οι μετρήσεις διαφοράς δυναμικού, ρευμάτων (εντάσεις και πυκνότητες) και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, που παράγονται είτε από φυσικές είτε από τεχνητές πηγές. Σκοπός αυτών των μεθόδων είναι η ανίχνευση οριζόντιων και κατακόρυφων διαφοροποιήσεων των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Οι κύριες παράμετροι που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ή το αντίστροφό της, η ηλεκτρική ειδική αντίσταση), το φυσικό ηλεκτρικό δυναμικό, η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική επιδεκτικότητα (ως έμμεσος παράγοντας).

Διακρίσεις Ηλεκτρικών Μεθόδων

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διακρίνονται σε παθητικές και ενεργητικές μεθόδους ανάλογα με την χρησιμοποίηση φυσικών ή τεχνητών πεδίων.

Παθητικές Μέθοδοι:

- Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self Potential Method)
- Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric Method)

Ενεργητικές Μέθοδοι:

- Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method)
- Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method IP)
- Ηλεκτρομαγνητισμός (Electromagnetic)

2.1.2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί στα πετρώματα με τρεις τρόπους:

1. *Ηλεκτρονικά (Ωμικά)*

Ο πρώτος τρόπος γίνεται με τη ροή ρεύματος σε υλικά που έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι τα μέταλλα.

2. *Ηλεκτρολυτικά*

Στον ηλεκτρολυτικό τρόπο το ρεύμα δημιουργείται από τα ιόντα που μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό.

3. *Διηλεκτρικά*

Η διηλεκτρική μετάδοση λαμβάνει χώρα σε μικρής αγωγιμότητας υλικά και μονωτές, οι οποίοι έχουν πολύ λίγους ελεύθερους μεταφορείς ή κανέναν. Κάτω από την επίδραση ενός εξωτερικού μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια μετατοπίζονται ελαφρώς σχετικά με τον πυρήνα τους. Αυτός ο ελαφρά σχετικός διαχωρισμός αρνητικών και θετικών φορτίων είναι γνωστός ως διηλεκτρική πόλωση του υλικού. Ιοντική και μοριακή πόλωση μπορεί να εμφανισθεί σε υλικά με ιοντικούς και μοριακούς δεσμούς. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η διηλεκτρική μετάδοση είναι το αποτέλεσμα της αλλαγής της ηλεκτρονικής, ιοντικής ή μοριακής πόλωσης που προκαλείται από το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Το 1827 ο Georg Ohm, όρισε μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει ένα συμμάτινο καλώδιο και της διαφοράς δυναμικού (τάσης που απαιτείται) για να δημιουργηθεί το ρεύμα.

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

Ο Ohm διατύπωσε επομένως ότι, η ένταση του ρεύματος I , είναι ανάλογη της τάσης ΔV , για μια κατηγορία υλικών (τα ωμικά υλικά). Η σταθερά αναλογίας R , καλείται ωμική αντίσταση (resistance) του υλικού και έχει ως μονάδα μέτρησης τη διαφορά δυναμικού (Volt) ανά ένταση ρεύματος (Ampere), δηλαδή το Ω (Ohm).

Η χρήση των μετρήσεων της ωμική αντίστασης παρουσιάζει πρόβλημα καθώς αυτή δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό, αλλά και από τη γεωμετρία του καλωδίου.

Η γεωμετρικά ανεξάρτητη ποσότητα που χρησιμοποιούμε ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αντίσταση (resistivity) και συμβολίζεται με ρ .

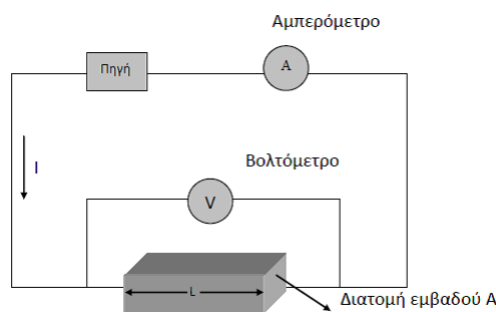
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που χρησιμοποιείται στις μεθόδους ηλεκτρικής διασκόπησης.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.2)$$

όπου

R: η ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)
A : το εμβαδό της διατομής του κυλίνδρου (m^2)
L: το μήκος του κυλίνδρου (m)



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων S.I. είναι το Ωm . Το αντίστροφο μέγεθος, $\sigma = \frac{1}{\rho}$ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα S.I., το $\frac{Siemens}{m}$.

2.1.2.1 Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων και των ορυκτών είναι:

- Είδος του πετρώματος
Όπως φαίνεται και από τον πίνακα που ακολουθεί, κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Σε γενικές γραμμές, πάντως, τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή, τις χαμηλότερες, λόγω του – συνήθως – υψηλού περιεχομένου τους σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες, όμως, τάσεις αλληλεπικάλυψης.
- Δομή και πορώδες
Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.
- Περιεκτικότητα σε άλατα
Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.
- Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών
Στον Πίνακα 2.2, παρουσιάζονται οι επιδράσεις των διαφόρων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων. Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση αλλά υπάρχουν εξαιρέσεις.
- Ηλικία πετρώματος
Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ($\Omega \cdot m$)
Αέρας	∞
Μαρμαρυγίας	$9 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \cdot 10^{10} - 2 \cdot 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \cdot 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	$3 \cdot 10^{-1}$
Γαληνίτης	$2 \cdot 10^{-3}$
Γάββρος	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$
Συμπαγής Γρανίτης	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^6$
Αποσαθρωμένος Γρανίτης	$1 - 1 \cdot 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \cdot 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \cdot 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \cdot 10^8$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \cdot 10^3$
Δολομίτης	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \cdot 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \cdot 10^2$
Εδαφικό Νερό	0,5 – 300
Θαλασσινό νερό	0,2

Πίνακας 2.1: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα [13](Αποστολόπουλος 2013)

- **Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών**
Λόγω τις αυξημένης αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών, η ύπαρξή τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλών τιμών επιφανειακής ειδικής αντίστασης.
- **Βαθμός κορεσμού**
Όσο ο βαθμός κορεσμού ενός πετρώματος αυξάνεται, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται.
- **Θερμοκρασία**
Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Αυτός ο παράγοντας, ωστόσο, έχει τόσο μικρή επίδραση, ώστε να διαδραματίζει αξιοσημείωτο ρόλο μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες. [13](Αποστολόπουλος 2013)

Στην γεωφυσική έρευνα έχουμε διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη και όχι μόνο σε συμπαγές καλώδιο. Οπότε είναι γεγονός ότι η ροή ρεύματος μέσα σε ένα τρισδιάστατο

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αργιλική εξαλλοίωση	Ελάττωση
Διάλυση	Ελάττωση
Ρηγμάτωση	Ελάττωση
Εισροή θαλασσινού νερού	Ελάττωση
Διάτμηση	Ελάττωση
Αποσάθρωση	Ελάττωση
Σκλήρυνση	Αύξηση
Ιζηματοποίηση	Αύξηση
Απολίθωση	Αύξηση
Μεταμόρφωση	Αύξηση ή Ελάττωση

Πίνακας 2.2: Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων

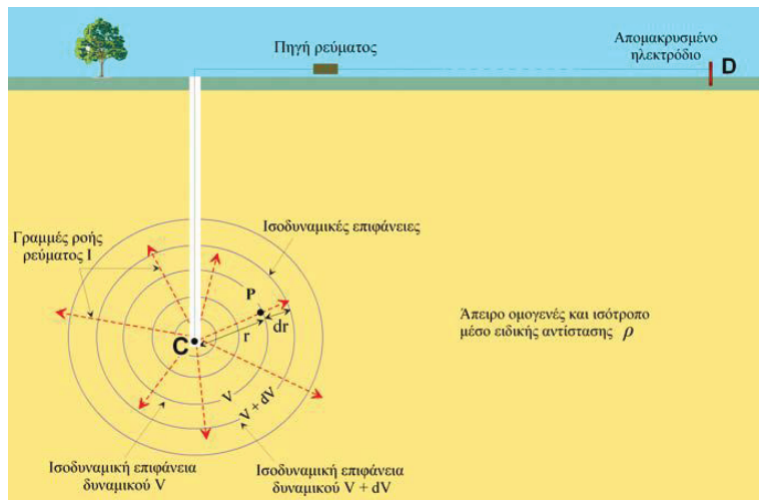
σώμα παρουσιάζει κάποιες διαφορές σε σχέση με τη ροή μέσω ενός γραμμικού αγωγού. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε η θεωρία της ροής ρεύματος στο χώρο.

2.1.2.2 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

Με βάση αυτή τη θεωρία έχουμε σαν χώρο μελέτης το έδαφος της γης, όμως το θεωρούμε ότι είναι ένα άπειρο, ομοιογενές και ισότροπο μέσο. Με την παραπάνω λογική η ειδική του αντίσταση είναι ίδια και σταθερή σε ολόκληρη τη μάζα του (ηλεκτρικά ομογενής γη). Συνθήκες άπειρου ομογενούς χώρου δημιουργούμε στην πράξη με την τοποθέτηση ηλεκτροδίου μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά μέσα σε ομογενές και ισότροπο έδαφος (Εικόνα 2.2). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος (συσσωρευτής) και το κύκλωμα κλείνει μέσω δευτέρου ηλεκτροδίου D, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I , σημειακής πηγής C, που βρίσκεται μέσα σε άπειρο ομογενές και ισότροπο μέσο είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τα έξω.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το ρεύμα (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) ρέει από το ηλεκτρόδιο C ακτινικά κατά μήκος ευθειών γραμμών. Αν μπορούσαμε με ένα βολτόμετρο να υπολογίσουμε την διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) που προκαλεί η ειδική αντίσταση του μέσου σε μια απόσταση πολύ μακριά από το ηλεκτρόδιο ρεύματος σε διάφορες θέσεις του μέσου, θα βρίσκαμε ότι η πτώση τάσης είναι σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών οι οποίες έχουν κέντρο το ηλεκτρόδιο.

Οι γραμμές αυτές καλούνται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials). Στις τρεις διαστάσεις, οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο.



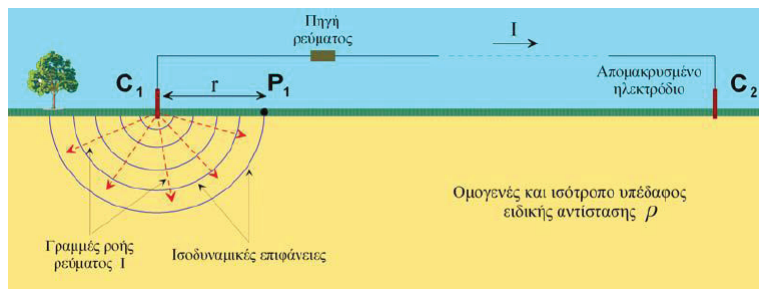
Σχήμα 2.2: Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο [6](Λούης 2004)

Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων του μέσου μπορούν να υπολογιστούν απλά αφαιρώντας τα δυναμικά των δύο ισοδυναμικών γραμμών που διέρχονται αντίστοιχα από τα δύο σημεία.

Καθώς απομακρυνόμαστε από τα ηλεκτρόδια, το ρεύμα ταξιδεύει μέσα από μεγαλύτερη ποσότητα μέσου. Η ειδική αντίσταση αυξάνει με την αύξηση της διαδρομής, επομένως αυξάνει και η τάση.

2.1.2.3 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

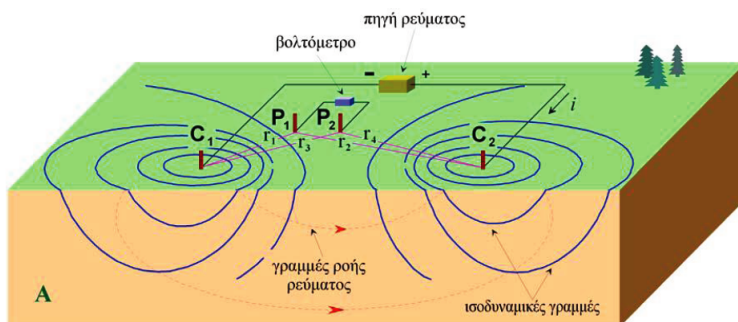
Συνθήκες ομογενούς ημιάπειρου ομογενή χώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση μικρών διαστάσεων ηλεκτροδίου, C_1 , (σημειακή πηγή ρεύματος) στην επιφάνεια ομογενούς μέσου (Εικόνα 2.3). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C_2 , το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I , της σημειακής πηγής, C_1 , είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο. Ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) και σχηματίζουν ομόκεντρα ημισφαίρια, με κέντρο το ηλεκτρόδιο C_1 .



Σχήμα 2.3: Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο [6](Λούης 2004)

2.1.2.4 Δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο

Στις περιπτώσεις του άπειρου ομογενή χώρου και του ημιάπειρου ομογενή χώρου, η αλληλεπίδραση των ηλεκτροδίων στη διαμόρφωση του δυναμικού τους είναι αμελητέα. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος είναι πεπερασμένη, το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας επηρεάζεται από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (Εικόνα 2.4)



Σχήμα 2.4: Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο [6](Λούης2004)

Άρα το δυναμικό σε τυχαίο σημείο P1 θα ισούται με το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V1, λόγω της σημειακής πηγής C1, και του δυναμικού V2, λόγω της πηγής C2. Ακόμα, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια (οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές του σχήματος.)

2.1.2.5 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

Όταν όμως το μέσο είναι ανομοιογενές, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται *φαινόμενη ειδική αντίσταση*.

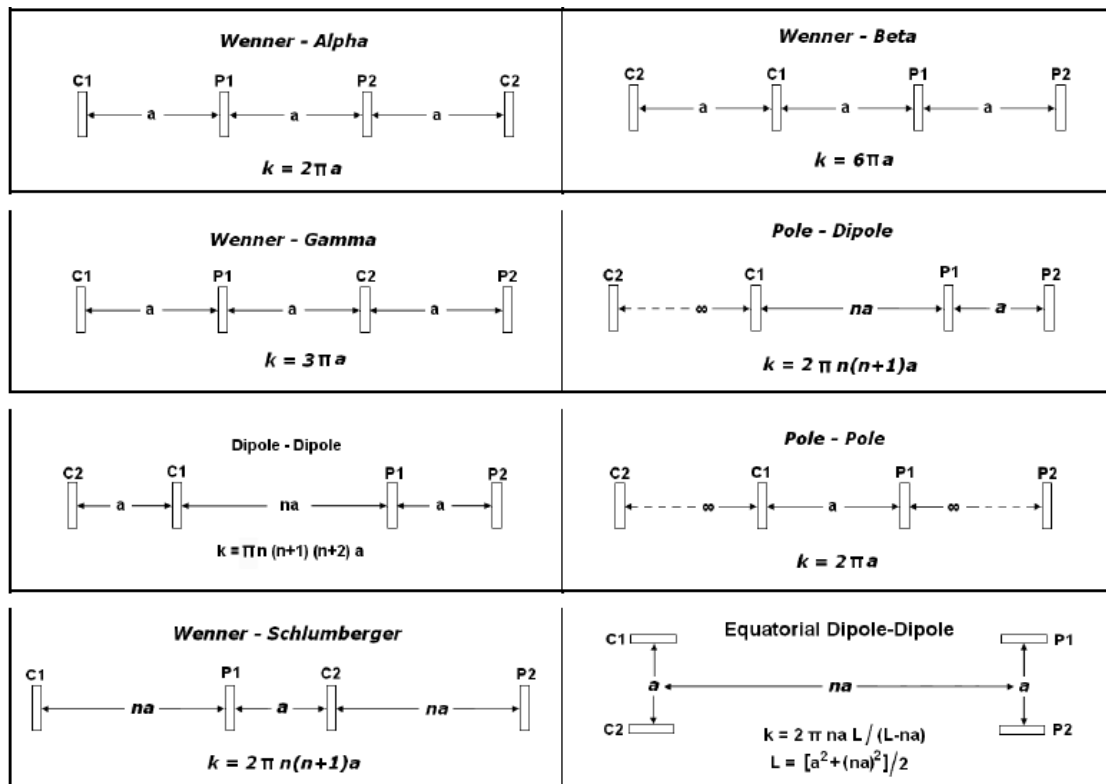
Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε ($\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$) για κάθε θέση και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική, ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διάφορων μερών του υπεδάφους. Μεταβάλλεται, όμως, συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγωγίμων ή μη ανομοιογενών.

Λόγω των διαφορετικών τιμών που λαμβάνονται στην ύπαιθρο για να προσδιοριστούν οι τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασης των σχηματισμών του υπεδάφους, απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία και ερμηνεία των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η επεξεργασία αυτή γίνεται με τη μέθοδο της αντιστροφής, της οποίας η εκτενής ανάλυση θα παραληφθεί για λόγους συντομίας.

2.1.2.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Σε κάθε γεωφυσική μέτρηση, τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού και οι μεταξύ τους αποστάσεις διατάσσονται στο έδαφος με συγκεκριμένο τρόπο, ανάλογα με τις αντίστοιχες

φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις.



Σχήμα 2.5: Διατάξεις ηλεκτροδίων [8](Μαυρομάτης 2007)

Οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων είναι οι εξής:

Διάταξη Schlumberger (Wenner – Schlumberger)

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις L και l αντίστοιχα. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{\pi \cdot (L^2 - l^2)}{2l} \quad (2.3)$$

Διάταξη Wenner (Wenner Alpha, Beta and Gamma)

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a και η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \cdot a \quad (2.4)$$

Διάταξη Dipole-Dipole

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση a , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης a (na). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \pi \cdot n \cdot (n+1)(n+2)a \quad (2.5)$$

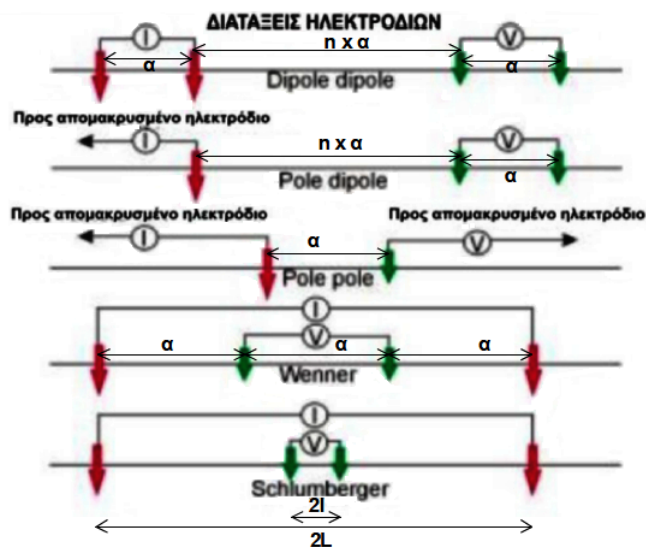
Διάταξη Pole – Pole

Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

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

Διάταξη Pole–Dipole

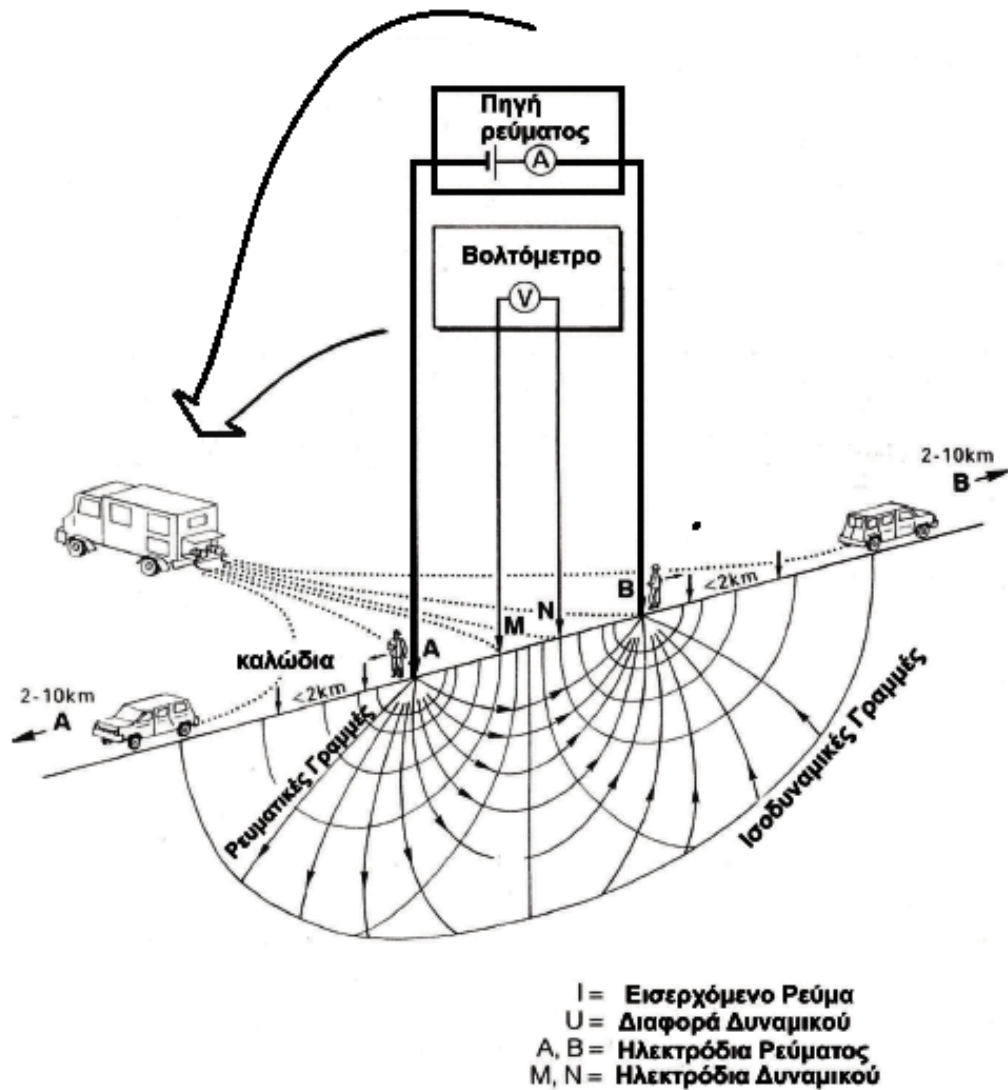
Το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος C2 τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι a , ενώ η απόσταση του ηλεκτροδίου ρεύματος από το ηλεκτρόδιο δυναμικού P1 είναι na . Χρησιμοποιείται κυρίως για Τομογραφία και Βυθοσκόπηση.



Σχήμα 2.6: Συνήθεις διατάξεις ηλεκτροδίων

2.1.2.7 Εξοπλισμός Υπαίθρου

1. Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο Μέχρι 1 Ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές, ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες.
2. Βολτόμετρο υψηλής αντίστασης εισόδου ($> 10M\Omega$) για ακρίβειες από μV έως V . Τα ανωτέρω βρίσκονται συνήθως σε ένα όργανο μέτρησης, το οποίο επιπρόσθετα περιέχει ένα σύστημα αντιστάθμισης ώστε το βολτόμετρο να συνδέεται μαζί του να αφαιρεί φυσικά δυναμικά.
3. Επιλογής της Χρησιμοποιούμενης Διάταξης Πρόκειται για ένα όργανο, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του γεωφυσικού οργάνου και των καλωδίων ρεύματος και δυναμικού, έχοντας ως αποστολή τη διανομή του σήματος εξόδου (ρεύματος) στα κατάλληλα, κάθε φορά, ηλεκτρόδια ρεύματος και τον καθορισμό των ηλεκτροδίων δυναμικού



Σχήμα 2.7: 7 Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος [13] (Αποστολόπουλος 2013)

από τα οποία λαμβάνεται η κάθε μέτρηση. Με τον τρόπο αυτό, το όργανο ελέγχει, κάθε φορά, εάν η πραγματοποιούμενη μέθοδος είναι Schlumberger ή Dipole – Dipole.

4. **Όργανο Ρύθμισης της Απόστασης των Ηλεκτροδίων Δυναμικού** Μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης παρεμβάλλεται ένας ακόμα διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικών για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.

5. **Καλώδια σε καρούλια**

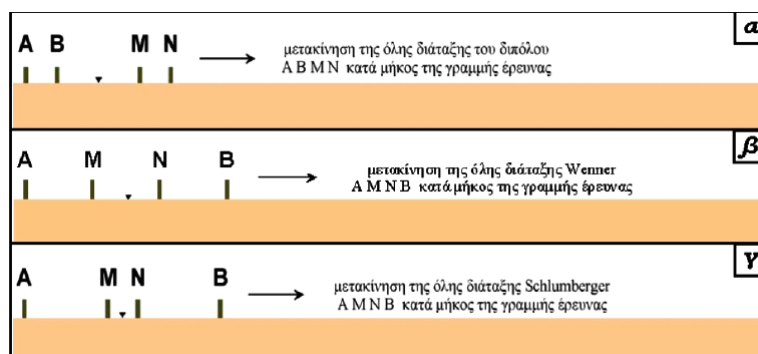
6. **Ηλεκτρόδια**

2.1.3 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις

Ο στόχος των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων είναι η περιγραφή της δομής του υπεδάφους. Έτσι, με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια και μελετώντας την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος, επιτυγχάνεται η περιγραφή της δομής του υπεδάφους. Ανάλογα με τον τρόπο που προσεγγίζεται ο προσδιορισμός της γεωλογικής δομής του υπεδάφους, οι γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την ηλεκτρική χαρτογράφηση και την ηλεκτρική βυθοσκόπηση.

2.1.3.1 Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις

Στις οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις (Resistivity Profiling), η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως π.χ. μεταπτώσεις.



Σχήμα 2.8: Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης (α) Dipole–Dipole, (β) Wenner και (γ) Schlumberger [8] (Μαυρομάτης 2007)

Σειρά μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Οι τιμές αυτές, κατά μήκος αρκετών παράλληλων γραμμών, τοποθετούνται σε χάρτη φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιώντας κάποια υπολογιστικά προγράμματα για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. (Εικόνα 2.8)

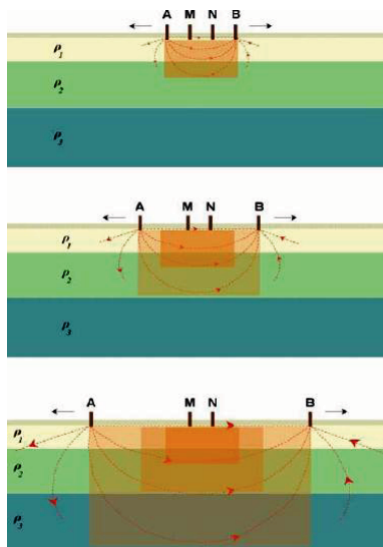
Τα αποτελέσματα της έρευνας των οριζόντιων μεταβολών της ειδικής αντίστασης επιδέχονται μόνο ποιοτική ερμηνεία. Η ποιοτική ερμηνεία αποκτά μεγαλύτερη αξία αν συνδυαστεί με πληροφορίες που προέρχονται από βαθμονόμηση γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων με στοιχεία γεωτρήσεων που συνυπάρχουν στην περιοχή.

2.1.3.2 Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις

Στις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (Vertical Electrical Soundings - VES), μπορούμε να βρούμε την εναλλαγή των στρωμάτων με το βάθος, κάτω από ένα σημείο που είναι το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων, « ανοίγοντας » τα ηλεκτρόδια ρεύματος συμμετρικά ως προς το κέντρο σε μεγαλύτερες διαδοχικά αποστάσεις. (Εικόνα 2.9)

Η μεταβολή των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δίνει μια πρώτη εικόνα των

μεταβολών των ειδικών αντιστάσεων των διάφορων στρωμάτων εις βάθος. Αντικείμενο της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης είναι η δημιουργία του γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους (υπολογισμός πάχους και ειδικής αντίστασης του κάθε στρώματος) από τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στις διάφορες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος



Σχήμα 2.9: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης[6](Λούης 2004)

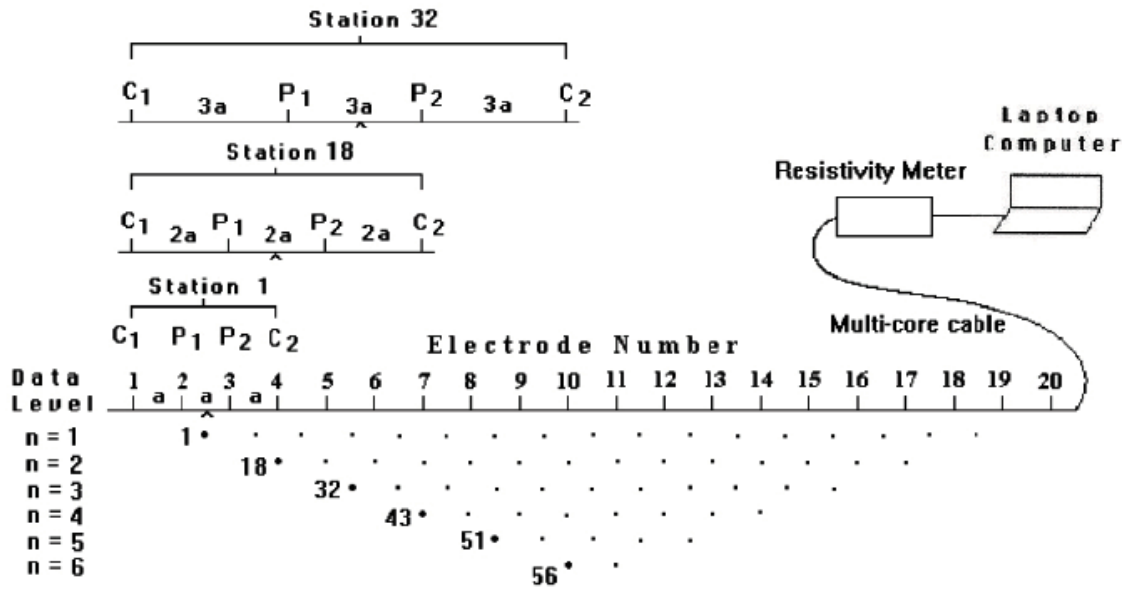
Συνήθως όταν θέλουμε να διασκοπήσουμε εις βάθος με την ηλεκτρική βυθοσκόπηση χρησιμοποιούμε την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Μετακινούμε συμμετρικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις τα ηλεκτρόδια ρεύματος κρατώντας σταθερά τα ηλεκτρόδια δυναμικού, έως ότου οι τιμές διαφοράς δυναμικού γίνουν πολύ μικρές, οπότε μεταφέρουμε και τα ηλεκτρόδια δυναμικού συμμετρικά ως προς το κέντρο σε μεγαλύτερη απόσταση και συνεχίζουμε να αυξάνουμε τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος.

2.1.4 Γεωηλεκτρική Τομογραφία

Τη Γεωηλεκτρική Τομογραφία τη χρησιμοποιούμε όταν θέλουμε να έχουμε σε συγκεκριμένες θέσεις μεγάλης ακρίβειας διασκοπήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο πλευρικά όσο και σε βάθος. Η ηλεκτρική τομογραφία συνιστάται από πολλές βυθοσκοπήσεις πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται με την επιλογή των διατάξεων.

Όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μια δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, δηλαδή μια **γεωηλεκτρική τομογραφία**. Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. (Εικόνα 2.10) Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους, το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση τυποποιημένων πολύ-ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.

Η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, από αυτά τα συστήματα, απαιτεί αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντίστρο-



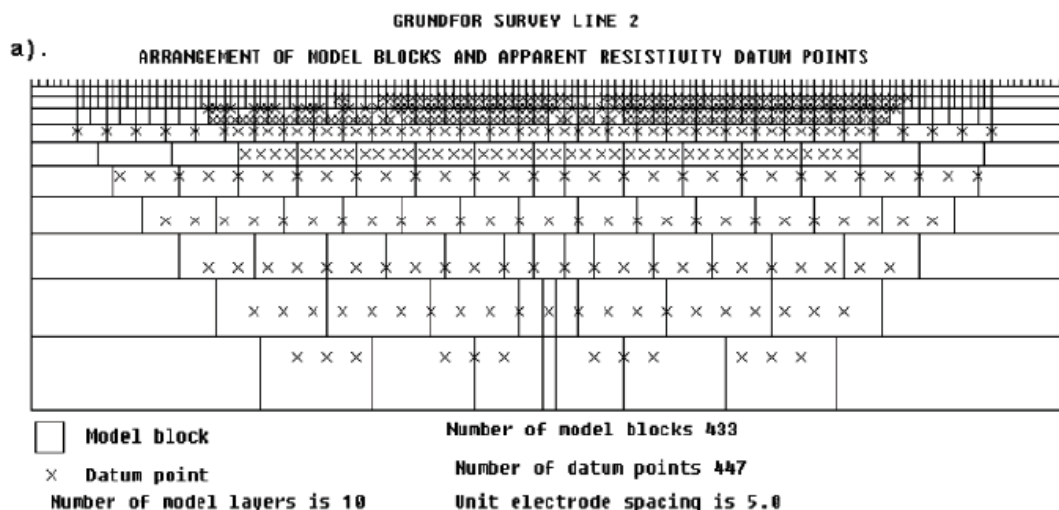
Sequence of measurements to build up a pseudosection

Σχήμα 2.10: Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής [27]

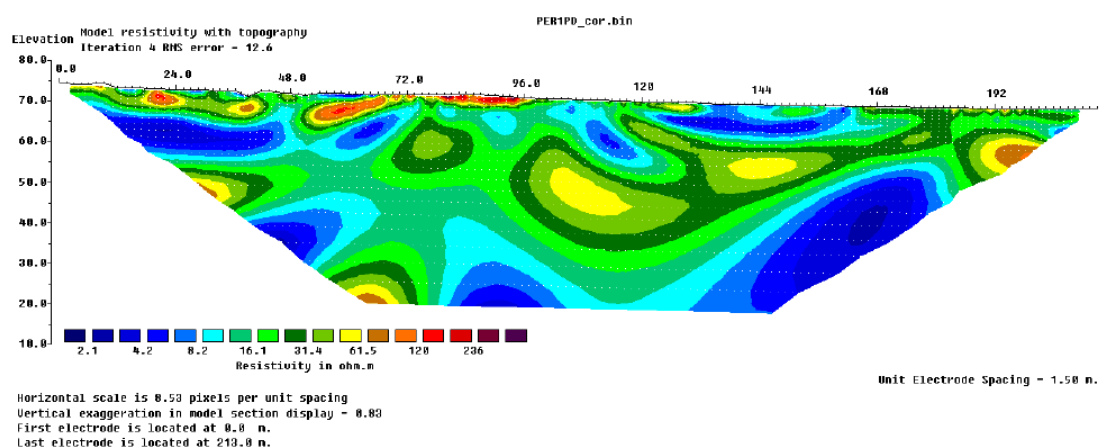
της δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτή την ανάγκη. Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος. (Εικόνα 2.11)

Οι ειδικές ηλεκτρικές τους αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου. (Εικόνα 2.12)

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι αντιμετωπίζει σύνθετες γεωλογικές τομές, και μας βοηθά να ξεπεράσουμε τη σύμβαση της οριζόντια στρωματωμένης Γης που κάναμε στην αρχή. Καταλήγουμε κατ' αυτό τον τρόπο με ασφάλεια στην ποσοτική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών μετρήσεων.



Σχήμα 2.11: Διάρθρωση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου [27] (Loke 1996)



Σχήμα 2.12: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων [27](Loke 1996)

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην κατεύθυνση αυτοματοποίησης της λήψης γεωφυσικών δεδομένων και της αντιστροφής τους αύξησε δραστικά την εφαρμοσιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας.

2.2 Σεισμική Μέθοδος

2.2.1 Εισαγωγή

Οι σεισμικές μέθοδοι, όπως έχουμε προαναφέρει, κατατάσσονται στις ενεργητικές γεωφυσικές μεθόδους. Στη σεισμική διασκόπηση, η κίνηση του εδάφους που προκαλείται από μια πηγή μετρείται σε διάφορες αποστάσεις από την πηγή. Ο τύπος του σεισμικού πειράματος διαφέρει ανάλογα με ποια άποψη της καταγεγραμμένης εδαφικής κίνησης χρησιμοποιούμε στην επακόλουθη ανάλυση.

2.2.2 Γενικά

Τα κύματα προκαλούν την ταλάντωση των υλικών σημείων, γεγονός που σημαίνει ότι τα σωματίδια της ύλης απομακρύνονται από τη θέση ισορροπίας τους προσωρινά έως ότου σταματήσουν. Η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται προσωρινά με το πέρασμα των σεισμικών κυμάτων μπορεί να περιγραφεί από τις ελαστικές ιδιότητές του. Αυτές οι φυσικές ιδιότητες χρησιμοποιούνται στις σεισμικές μεθόδους για το εντοπισμό των διαφορετικών υλικών. Με άλλα λόγια, ανιχνεύουμε διαφοροποιήσεις στις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και τις συσχετίζουμε με διαφοροποιήσεις στις ελαστικές σταθερές των μέσων διάδοσης και από εκεί βγάζουμε ορισμένα συμπεράσματα για τα υλικά αυτά.

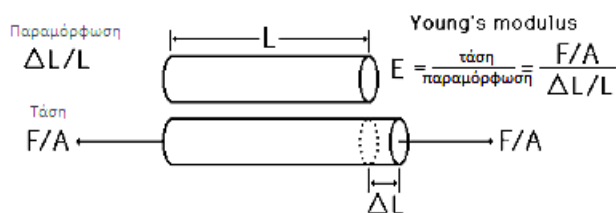
Στις γεωφυσικές μελέτες χρησιμοποιούνται ελεγχόμενες σεισμικές πηγές, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες τόσο για τις σεισμικές ταχύτητες, όσο και για τη στρωματογραφία του φλοιού της γης.

2.2.3 Ελαστικές Σταθερές

Μέτρο του Young ή μέτρο διαμήκους ελαστικότητας E Είναι το μέτρο του λόγου της τάσης προς την παραμόρφωση στην περίπτωση της απλής τάσης συμπίεσης ή εφελκυσμού και δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l} \quad (2.7)$$

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του E για ένα σώμα, τόσο μικρότερη είναι η παραμόρφωση που υφίσταται το σώμα από μια ορισμένη τάση συμπίεσης ή εφελκυσμού. Δηλαδή το μέτρο του Young μας δίνει το μέτρο αντίστασης στις παραμορφώσεις του σώματος.

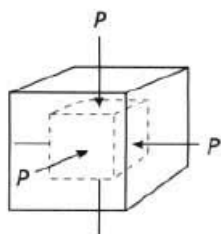


Σχήμα 2.13: Μέτρο Ελαστικότητας

Το αντίστροφο του E , δηλαδή το $\frac{1}{E}$, ονομάζεται συντελεστής ελαστικότητας.

Μέτρο κυβικής ελαστικότητας, k (Bulk modulus) Είναι το μέτρο του λόγου τάσης προς την παραμόρφωση, στην περίπτωση απλής υδροστατικής πίεσης P , που έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή του όγκου και δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{F/A}{\Delta V/V} = \frac{F \cdot V}{A \cdot \Delta V} \quad (2.8)$$



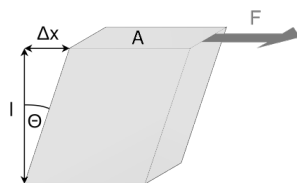
$$k = \frac{\text{volume stress } P}{\text{volume strain } \Delta v/v}$$

Σχήμα 2.14: Μέτρο Κυβικής Ελαστικότητας [13](Αποστολόπουλος 2013)

Μέτρο Ακαμψίας ή Διατμητικής Ελαστικότητας, μ (Rigidity ή Shear modulus)

Είναι το μέτρο του λόγου τάσης προς την παραμόρφωση, στην περίπτωση της απλής εφαπτομενικής τάσης (shear) που έχει σαν αποτέλεσμα να παραμορφωθεί το σώμα χωρίς όμως να αλλάξει ο όγκος του.

$$\mu = \frac{F/A}{\tan \theta} \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.15: Μέτρο Ακαμψίας

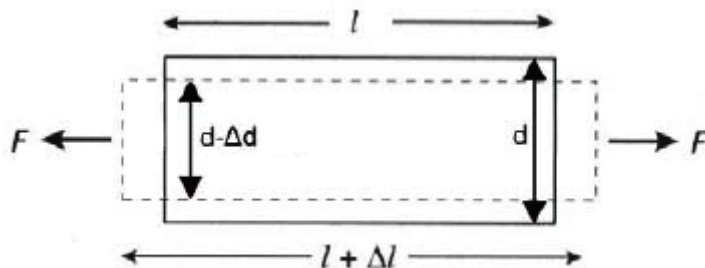
Λόγος του Poisson, σ Είναι ένα μέτρο της γεωμετρικής μεταβολής ενός ελαστικού σώματος, το οποίο υποβάλλουμε είτε σε εφελκυσμό είτε σε συμπίεση. Και στις δύο περιπτώσεις ο λόγος του Poisson εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (2.10)$$

Ο λόγος του Poisson δεν μπορεί ποτέ να ξεπεράσει την τιμή 0,5. Για τα περισσότερα πετρώματα το σ είναι περίπου 0,25. Οι τιμές κυμαίνονται από 0,05 για πολύ σκληρά μέχρι 0,45 για πολύ μαλακά – χαλαρά υλικά. Από τις τέσσερις ελαστικές σταθερές E , k , μ και σ , δύο μόνο είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να εκφραστούν σαν συνάρτηση των δύο άλλων. Έτσι έχουμε:

$$k = \frac{E}{3(1-2\sigma)}, \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}, E = \frac{9k\mu}{3k+\mu}, \sigma = \frac{3k-2\mu}{6k+2\mu} \quad (2.11)$$

[13] (Αποστολόπουλος 2013)



Σχήμα 2.16: Λόγος Poisson

2.2.4 Ελαστικά Κύματα

Κύματα χώρου (Body waves)

Η σεισμολογία ασχολείται με δύο είδη κυμάτων χώρου, τα επιμήκη και τα εγκάρσια.

- Επιμήκη κύματα

Είναι κύματα τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή του όγκου ή της πυκνότητας του μέσου διάδοσης. Λέγονται και P κύματα, από το λατινικό “primae” που σημαίνει « πρώτα », επειδή είναι τα πρώτα που φθάνουν και καταγράφονται στους σεισμολογικούς σταθμούς.

Λέγονται επίσης και κύματα συμπίεσης, γιατί δημιουργούν διαδοχικές συμπίεσεις και αραιώσεις στα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης, παράλληλες προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

- Εγκάρσια κύματα

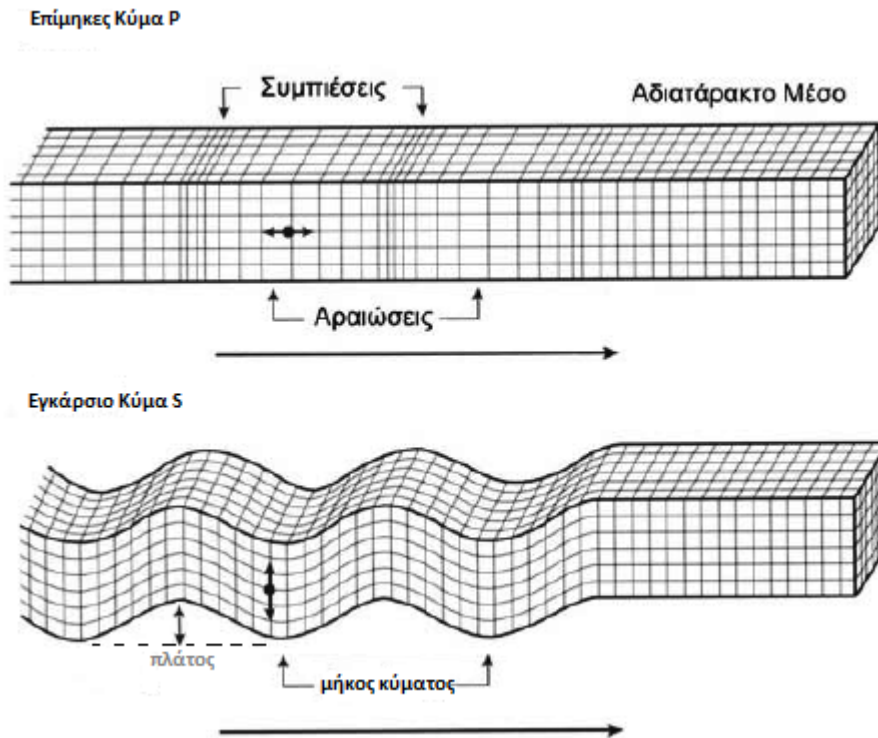
Στα εγκάρσια κύματα, η κίνηση των μορίων είναι κάθετη ως προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, Λέγονται και S κύματα, από το λατινικό “secundae” που σημαίνει « δεύτερα », γιατί φθάνουν μετά τα P στους σταθμούς καταγραφής. Δεδομένου ότι τα υγρά δεν επιδέχονται διατμητικές τάσεις, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται σε υγρό μέσο, σε ρευστοποιημένο δε μέσο το πλάτος τους μειώνεται σημαντικά.

Επιφανειακά κύματα

Διαδίδονται κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας του ελαστικού μέσου. Είναι τα κύματα τα οποία περιορίζονται στην επιφάνεια της γης, τα πλάτη τους δηλαδή είναι μεγάλα κοντά στην επιφάνεια της γης και ελαττώνονται όσο αυξάνεται το βάθος. Τα κύματα αυτά έχουν την μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από όλα τα είδη σεισμικών κυμάτων και διακρίνονται σε δύο τύπους, στα κύματα Rayleigh και τα Love.

- Κύματα Rayleigh

Κατά την διάδοση των κυμάτων αυτών τα υλικά σημεία του μέσου μετάδοσης διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές των οποίων οι μεγάλοι άξονες είναι κατακόρυφοι προς την διεύθυνση μετάδοσης του κύματος, οι δε μικροί παράλληλοι προς αυτήν. Το πλάτος ταλάντωσής τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος.



Σχήμα 2.17: Κύματα S και P

- Κύματα Love

Για την δημιουργία τους είναι απαραίτητη η ύπαρξη στρώματος ορισμένου πάχους πάνω σε ημιχώρο. Κατά την διάδοσή τους τα υλικά σημεία του μέσου κινούνται με οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης, πρόκειται δηλαδή για κύματα οριζοντίως πολωμένα.

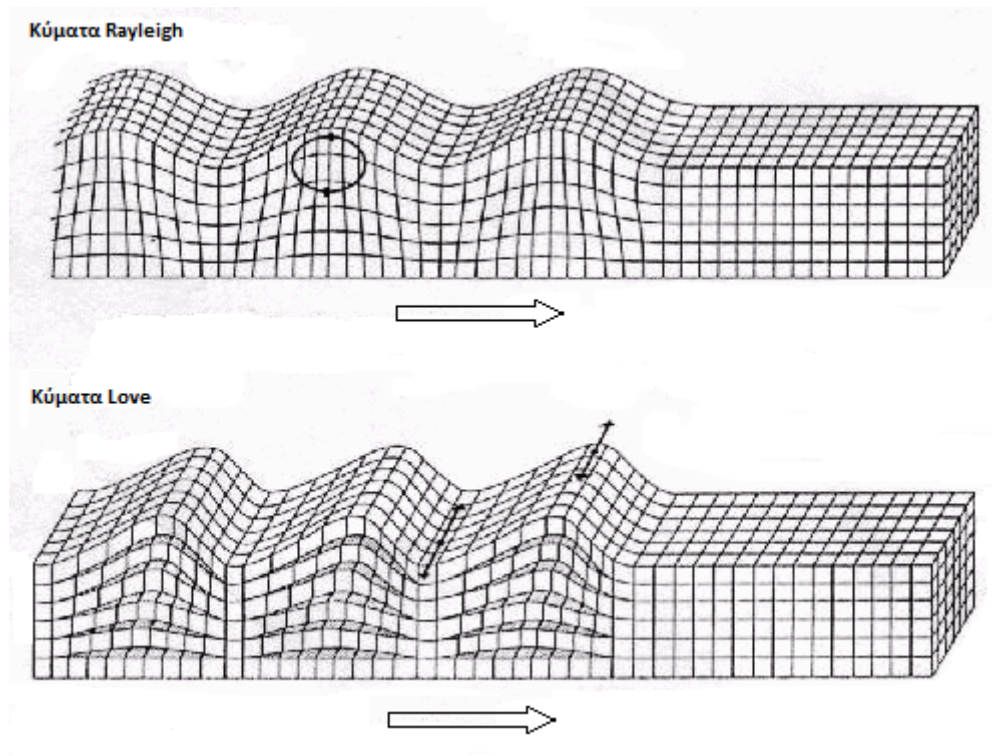
2.2.5 Ταχύτητες διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων εντός των Διαφόρων Πετρωμάτων

Πληροφορίες σχετικές με την ταχύτητα διάδοσης των P και S κυμάτων στα στρώματα του υπεδάφους είναι πολύ σημαντικές, γιατί αφενός είναι αναγκαίες για τη μετατροπή των χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων σε βάθη και αφετέρου γιατί παρέχουν μια ένδειξη της λιθολογίας του πετρώματος ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, της φύσης των ρευστών που περιέχονται στους πόρους του.

Οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων εντός διαφόρων πετρωμάτων μπορεί να μετρηθούν επί τόπου, με μετρήσεις στην ύπαιθρο, ή να υπολογιστούν στο εργαστήριο, με τη χρήση κατάλληλα προετοιμασμένων δειγμάτων πετρώματος.

Μελέτες πάνω στις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στα πετρώματα οδηγούν στους εξής εμπειρικούς κανόνες:

- Η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων P αυξάνει με την πίεση (δραστικά για τιμές πίεσης



Σχήμα 2.18: Κύματα Love και Rayleigh

> 100MPa).

- Οι σεισμικές ταχύτητες στον ψαμίτη και στο σχιστόλιθο αυξάνουν προοδευτικά με το βάθος και την ηλικία του σχηματισμού λόγω συμπύκνωσης και συγκόλλησης.
- Στη μεγάλη κατηγορία των ιζηματογενών πετρωμάτων η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων P σχετίζεται με την πυκνότητα. Έτσι η πυκνότητα σχηματισμών σε μεγάλο βάθος είναι δυνατόν να υπολογιστεί μέσω των ταχυτήτων που ευρίσκονται με σεισμικές μεθόδους.

Για εκτενή αναφορά σε σεισμικές ταχύτητες διαφόρων υλικών βλπ. Παράρτημα 1

2.2.6 Εξασθένιση της Σεισμικής Ενέργειας

Ο σεισμικός παλμός μεταδίδεται σφαιρικά στο έδαφος, με διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα (και αρχική ενέργεια E). Η ποσότητα της ενέργειας που περιλαμβάνεται σε μια μοναδιαία περιοχή της σφαίρας είναι $\frac{E}{4\pi r^2}$, όπου r η ακτίνα. Κατά μήκος μιας ακτινικής διαδρομής λοιπόν η ενέργεια της ακτίνας μειώνεται συναρτήσει του r^{-2} , λόγω της επίδρασης της γεωμετρικής διάδοσης της ενέργειας. Το πλάτος του κύματος, το οποίο σε ομογενές υλικό είναι ανάλογο της \sqrt{E} του κύματος, μειώνεται συναρτήσει του $\frac{1}{r}$. Μια επιπλέον αιτία απώλειας ενέργειας, κατά μήκος μιας σεισμικής ακτίνας, οφείλεται στην ατελή ελαστικότητα του εδάφους, όσον αφορά στην απόκρισή του στη διέλευση σεισμικών κυμάτων. Η ελαστική ενέργεια απορροφάται

βαθμιαία από το μέσο, λόγω εσωτερικών απωλειών τριβής, γεγονός το οποίο οδηγεί τελικά στην πλήρη εξαφάνισή της. Ο συντελεστής απορρόφησης a εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας το οποίο χάθηκε, κατά τη μετάδοση του σεισμικού παλμού, σε απόσταση ίση με ένα πλήρες μήκος κύματος λ .

2.2.7 Εξοπλισμός

Ένα τυπικό σύστημα απόκτησης σεισμικών δεδομένων αποτελείται από τα παρακάτω:

1. Σεισμική πηγή (Seismic Source)

Πρόκειται για συσκευές που διοχετεύουν σεισμική ενέργεια στο έδαφος. Μπορεί να διαφέρουν πολύ σε μέγεθος και πολυπλοκότητα. Όλες όμως έχουν τα εξής κοινά χαρακτηριστικά:

- Πρέπει να είναι επαναληπτικές. Αυτό σημαίνει ότι η φύση της ενέργειας που διοχετεύεται στο έδαφος (η ποσότητα και το χρονικό διάστημα διάδοσης), δεν πρέπει να αλλάζει καθώς η πηγή χρησιμοποιείται σε διαφορετικές θέσεις.
- Ο χρόνος διοχέτευσης της σεισμικής ενέργειας στο έδαφος πρέπει να είναι ελεγχόμενος. Πρέπει να είμαστε σε θέση να ορίσουμε ακριβώς τη στιγμή που η πηγή διοχέτευσε την ενέργεια στο έδαφος. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορούμε να ελέγχουμε το χρόνο διοχέτευσης. Σε άλλες, απλά σημειώνουμε το χρόνο που η πηγή διοχέτευσε την ενέργεια.

[6] (Λούης, 2004)

2. Σεισμικοί Φωρατές

Αποτελούν διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν τις σεισμικές δονήσεις σε ηλεκτρικό σήμα, (γεώφωνα, υδρόφωνα).

- Γεώφωνα (\rightarrow ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο)
Αποτελούνται από ένα κινούμενο πηνίο και ένα μόνιμο μαγνήτη, στερεωμένο στο στέλεχος του οργάνου. Μόλις τα σεισμικά κύματα φτάσουν στο γεώφωνο, προκαλείται μια σχετική κίνηση του πηνίου ως προς το μαγνήτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα του πηνίου που είναι ανάλογη της ταχύτητας κίνησης του εδάφους.
[13] (Αποστολόπουλος, 2013)
- Υδρόφωνα (\rightarrow πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο)
Οι διατάξεις αυτές χρησιμεύουν για την ανίχνευση των κυμάτων πίεσης που προκαλούν οι θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Οι μεταβολές πίεσης διαβιβάζονται μέσω του κελύφους του οργάνου επάνω σε λεπτά φύλλα χαλαζία, αναπτύσσοντας έτσι πιεζοηλεκτρικές τάσεις που είναι ανάλογες των μεταβολών πίεσης. Επομένως τα υδρόφωνα μετρούν επιταχύνσεις παρά ταχύτητες.

3. Σύστημα Καταγραφής (Recording System)

Το σύστημα αυτό αποθηκεύει την κίνηση που καταγράφουν ένας αριθμός φωρατών. Ο

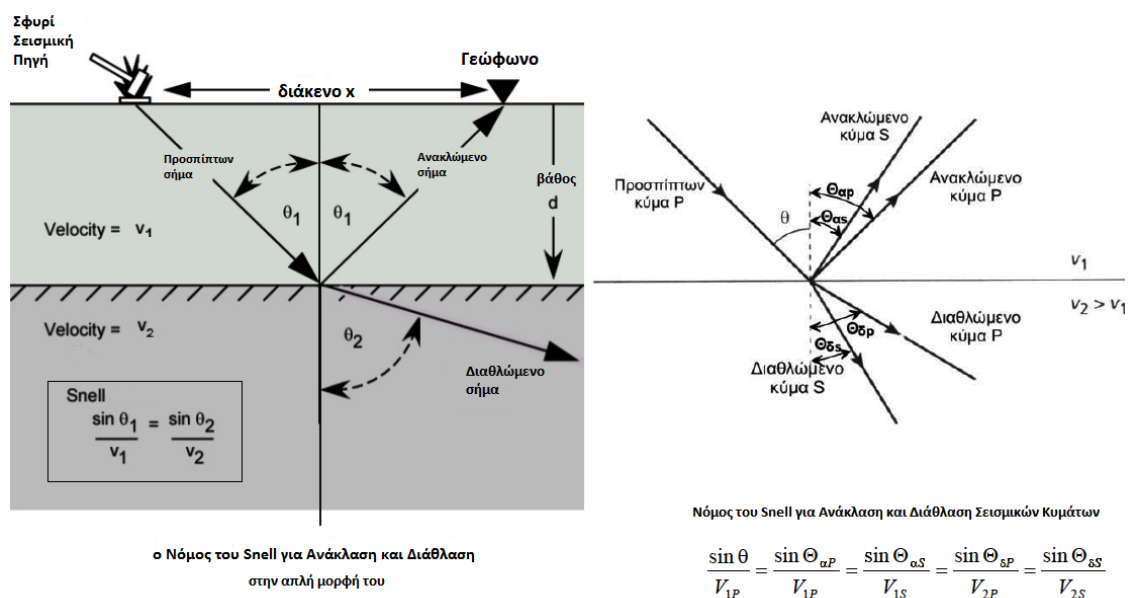
αριθμός αυτός μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος. Εκτός από την καταγραφή και αποθήκευση της κίνησης, το σύστημα πρέπει επίσης να ελέγχει το συγχρονισμό της πηγής.

4. Σεισμικές Πηγές

- Εκρηκτικά (*TNT* Τρινιτροτολουόλιο ή Νιτρικό αμμώνιο $(NH_4)(NO_3)$)
- Σφυρί και Πίπτον Βάρος
- Vibroseis
- Αεροβόλα (Airgun)

2.2.8 Καταμερισμός Ενέργειας

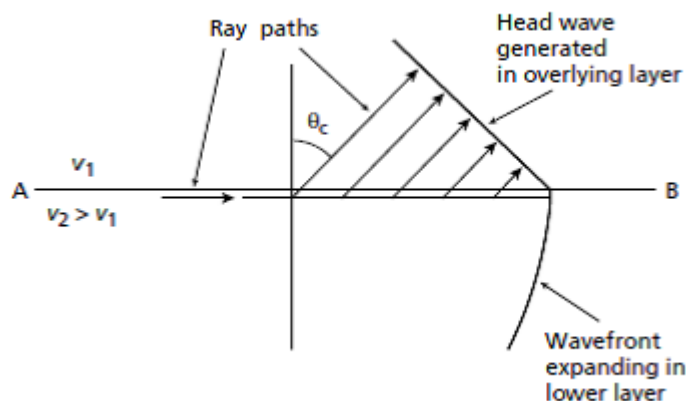
Θεωρώντας γνωστούς τους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (Huygens, Fermat, Snell κλπ) τους εφαρμόσουμε και στα σεισμικά κύματα, μόνο που η ανάλυση των σεισμικών κυμάτων είναι μια σύνθετη διαδικασία.



Σχήμα 2.19: Ο νόμος του Snell στις σεισμικές μεθόδους

Πρέπει να αναφερθεί ότι P και S κύματα όταν προσπέσουν σε μια ασυνέχεια όχι μόνο θα ανακλαστούν και διαθλαστούν, αλλά θα παράγουν και άλλα P και S κύματα. Επειδή το ολικό ποσό της ενέργειας πρέπει να παραμένει σταθερό μεταξύ του προσπίπτοντος και των ανακλώμενων και διαθλώμενων, τα πλάτη των κυμάτων θα είναι μειωμένα σχετικά με το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος.

Για ένα δεδομένο πλάτος προσπίπτοντος P κύματος, είναι δυνατό να υπολογιστούν τα πλάτη των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων, χρησιμοποιώντας εξισώσεις που έχει αναπτύξει ο Zoeppritz (1919). Αυτές οι εξισώσεις παρέχουν λύσεις για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης. Ουσιαστικά, υπεισέρχονται τέσσερις εξισώσεις με τέσσερις αγνώστους (πλάτη). Δεν είναι



Σχήμα 2.20: Μετωπικά Κύματα [13](Αποστολόπουλος 2013)

σκόπιμο να αναφερθεί εδώ η ανάλυση όλων των εξισώσεων Zoeppritz, αλλά είναι προσιτές σε αρκετά εγχειρίδια π.χ. [34] Telford et.al (1990)

2.2.8.1 Οριακά διαθλώμενα κύματα

Όταν η σεισμική ταχύτητα ενός στρώματος είναι μεγαλύτερη από αυτή του υπερκείμενου, υπάρχει μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, η οποία είναι γνωστή ως οριακή γωνία θ_c , για την οποία η γωνία διάθλασης είναι ίση με 90° . Το γεγονός αυτό δημιουργεί μια διαθλώμενη ακτίνα, η οποία κινείται κατά μήκος της διεπιφάνειας με τη μεγαλύτερη ταχύτητα v_2 . Για οποιαδήποτε μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης συμβαίνει πλήρης εσωτερική ανάκλαση της ενέργειας πρόσπτωσης.

Η οριακή γωνία θ_c δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\sin(\theta_c)}{v_1} = \frac{\sin(90^\circ)}{v_2} \Rightarrow \sin(\theta_c) = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (2.12)$$

Το πέρασμα της ακτίνας, η οποία έχει υποστεί οριακή διάθλαση στην κορυφή του υποκείμενου στρώματος, προκαλεί μια διαταραχή στο ανώτερο στρώμα, η οποία κινείται με ταχύτητα v_2 , δηλαδή μεγαλύτερη από τη σεισμική ταχύτητα v_1 του ανώτερου στρώματος. Η διαταραχή αυτή, η οποία ονομάζεται οριακά διαθλώμενο ή μετωπικό κύμα, διέρχεται υπό γωνία διαμέσου του ανώτερου στρώματος προς την επιφάνεια, επιστρέφοντας τη σεισμική ενέργεια σε αυτήν.

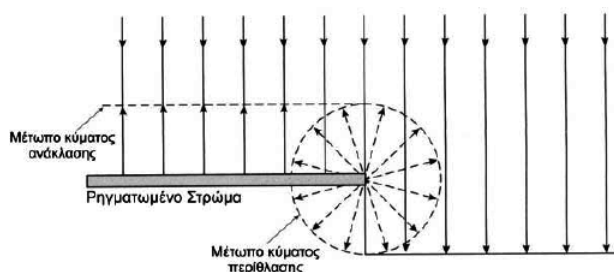
2.2.8.2 Περίθλαση

Κατά την προηγούμενη προσέγγιση της ανάκλασης και διάθλασης της σεισμικής ενέργειας σε διεπιφάνειες, οι οποίες παρουσιάζουν αντιθέσεις ακουστικής εμπέδησης, θεωρήθηκε ότι οι διεπιφάνειες αυτές ήταν ασυνεχείς και χαρακτηρίζονταν από μικρή καμπυλότητα.

Σε απότομες ασυνέχειες διεπιφανειών, ή σχηματισμούς, των οποίων η ακτίνα καμπυλότητας είναι μικρότερη από το μήκος κύματος των κυμάτων πρόσπτωσης, οι νόμοι της ανάκλασης και διάθλασης δεν είναι πλέον έγκυροι, τέτοια φαινόμενα προκαλούν μια ακτινική διασπορά

της προσπίπτουσας σεισμικής ενέργειας, γνωστή και ως περίθλαση. Συνήθεις πηγές περίθλασης στο έδαφος είναι τα άκρα των ρωγματωμένων στρωμάτων καθώς και μικρού μεγέθους, απομονωμένα αντικείμενα, όπως ογκόλιθοι σε ένα κατά τα άλλα ομογενές στρώμα.

Φάσεις περίθλασης συχνά παρατηρούνται σε σεισμικές καταγραφές και μερικές φορές είναι πραγματικά δύσκολο να διαχωριστούν από τις ανακλώμενες και διαθλώμενες φάσεις.



Σχήμα 2.21: Περίθλαση στο άκρο ρωγματωμένου στρώματος [13]

2.2.9 Σεισμική Ανάκλαση και Σεισμική Διάθλαση

Υπάρχουν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δύο βασικές τεχνικές σεισμικής διασκόπησης του υπεδάφους. Αυτές είναι:

Σεισμική Διάθλαση:

Στη σεισμική διάθλαση στηριζόμαστε στους χρόνους άφιξης της αρχικής εδαφικής κίνησης που παράγεται από την πηγή μας, του οποίους καταγράφουμε σε διάφορες αποστάσεις. Οι επόμενες αφίξεις απορρίπτονται. Τα δεδομένα που λαμβάνουμε τελικά αποτελούν μια σειρά διαγραμμάτων (χρόνος συναρτήσει απόστασης).

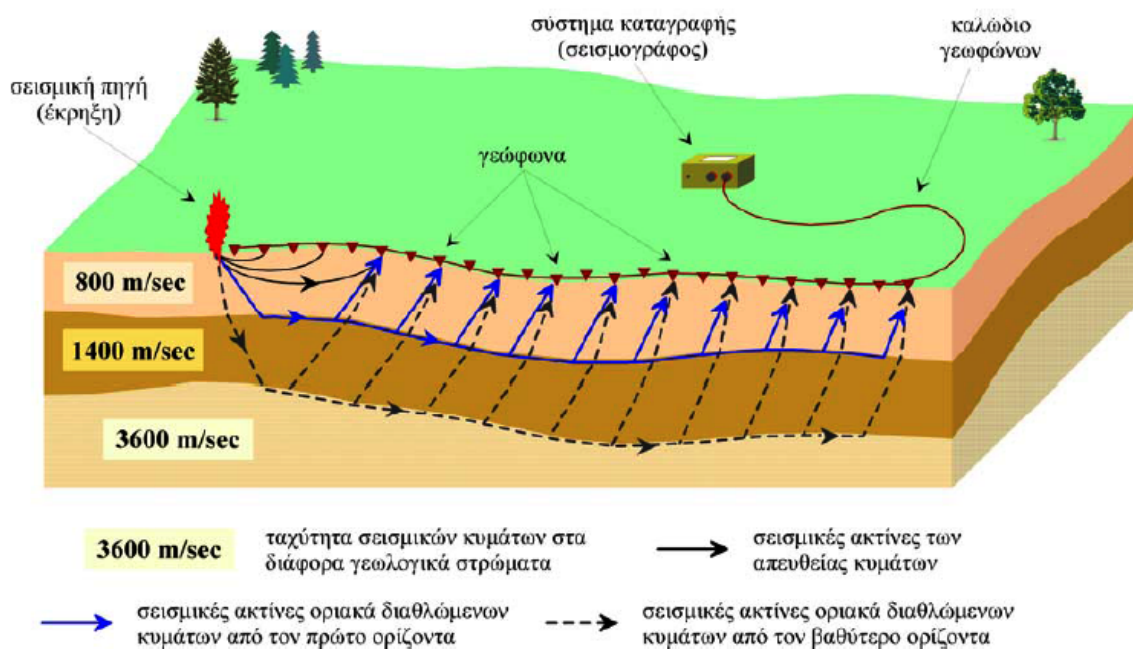
Οι χρόνοι αυτοί, στη συνέχεια, ερμηνεύονται σε σχέση με το βάθος των υπόγειων επιφανειών ασυνέχειας, καθώς και τις ταχύτητες με τις οποίες η κίνηση ταξιδεύει μέσα σε κάθε στρώμα.

Σεισμική Ανάκλαση:

Εδώ η ανάλυση εστιάζεται στην ενέργεια που καταφθάνει μετά την αρχική εδαφική κίνηση. Ειδικότερα, η ανάλυση επικεντρώνεται στην εδαφική κίνηση, η οποία δημιουργείται από σεισμικά κύματα που έχουν ανακλαστεί από τις υπόγειες επιφάνειες ασυνέχειας. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης, εκτός από τους χρόνους άφιξης, χρησιμοποιεί επίσης, το μέγεθος και το σχήμα της εδαφικής κίνησης, προκειμένου να δώσει πληροφορίες για το υπέδαφος.

2.2.10 Μέθοδος της Σεισμικής Διάθλασης

Βάσει των αναγκών της γεωφυσικής μελέτης που έγινε στο Βυζαντινό Ναό Αγίου Νικολάου στο Πλατάκι Αχαΐας, θα κάνουμε εκτενή αναφορά μόνο στις μεθόδους σεισμικής διάθλασης.



Σχήμα 2.22: Διάταξη για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων στην ύπαιθρο [6] (Λούης 2004)

2.2.10.1 Γενικά

Τα κύματα που στέλνουμε από την πηγή είναι:

- Το απευθείας κύμα, το οποίο διανύει την απόσταση πηγή – γεωφώνο με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος.
- Το ανακλώμενο κύμα, το οποίο φτάνει στο γεωφώνο μετά από ανάκλαση στη διεπιφάνεια, κινούμενο με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος.
- Το οριακά διαθλώμενο κύμα το οποίο φτάνει στο γεωφώνο, διανύοντας ένα τμήμα της διαδρομής του (κατερχόμενος και ανερχόμενος κλάδος) με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος και το υπόλοιπο (οριζόντιος κλάδος) με την ταχύτητα του υποκείμενου στρώματος.

Το ανακλώμενο κύμα φτάνει πάντοτε μετά την απευθείας άφιξη, σε οποιαδήποτε απόσταση από την πηγή και, κατά συνέπεια, δεν μπορεί ποτέ να είναι πρώτη άφιξη. Σε μικρές αποστάσεις από την πηγή, το απευθείας διαδιδόμενο κύμα προηγείται του οριακά διαθλώμενου κύματος. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, το οριακά διαθλώμενο κύμα μπορεί να προηγηθεί του απευθείας κύματος και να φτάσει πρώτο στο δέκτη.

2.2.10.2 Εργασίες υπαίθρου

Μια διάταξη, εγκατεστημένη στην ύπαιθρο για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.22

Μια σειρά γεώφωνα, τοποθετημένα σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις, είναι συνδεδεμένα με κοινό πολύκλωνο καλώδιο, το καλώδιο γεωφώνων, το οποίο μεταφέρει την πληροφορία που λαμβάνει ο κάθε δέκτης στο σύστημα καταγραφής (σειсмоγράφο). Για την παραγωγή σεισμικών κυμάτων διεγείρεται μια σεισμική πηγή. Η διέγερση αυτή πραγματοποιείται, συνήθως, στα άκρα της γραμμής του αναπτύγματος των γεωφώνων, καθώς και σε άλλες επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος του αναπτύγματος.

Η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων και κατά συνέπεια το συνολικό μήκος του αναπτύγματος ποικίλλει, ανάλογα με το είδος του προς επίλυση προβλήματος.

Όσον αφορά στην τοποθέτηση των πηγών με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται και ο προσδιορισμός της κλίσης τυχόν κεκλιμένων στρωμάτων, χρησιμοποιείται συνδυασμός των εξής μεθόδων:

Της **συμβατικής μεθόδου** (Conventional reversed profile with end shots), η οποία περιλαμβάνει πυροδότηση της πηγής και στα δύο άκρα της γραμμής του αναπτύγματος των γεωφώνων, ενώ καταγράφονται οι σεισμικές αφίξεις κατά μήκος της γραμμής και από τις δύο πυροδοτήσεις.

Της **μεθόδου διαίρεσης** του αναπτύγματος (Split-profile method), η οποία περιλαμβάνει την καταγραφή προς τα έξω και προς τις δύο κατευθύνσεις, από ένα κεντρικό σημείο πυροδότησης.

Αυτό που προκύπτει είναι η πραγματοποίηση τριών πυροδοτήσεων κατά μήκος της σεισμικής γραμμής (μία σε κάθε άκρο και μία στο κέντρο). Με την κεντρική πυροδότηση επιδιώκεται ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα στο πρώτο επιφανειακό στρώμα, ενώ με τη συμβατική μέθοδο ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα στο επόμενο ή στα επόμενα στρώματα.

2.2.10.3 Πηγές θορύβου

Όπως σε όλες τις γεωφυσικές μεθόδους, έτσι και στις σεισμικές ο θόρυβος μπορεί να αλλοιώσει τις σεισμικές παρατηρήσεις μας. Ο σεισμικός θόρυβος διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την πηγή προέλευσής του.

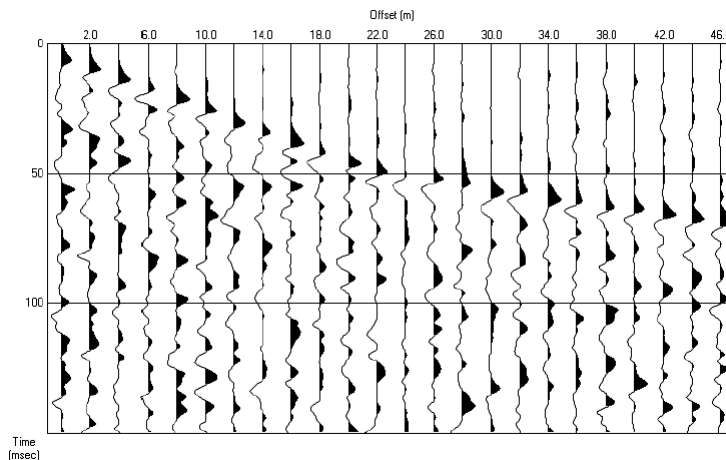
- Μη Ελεγχόμενη Εδαφική Κίνηση (Uncontrolled Ground Motion) – Πρόκειται για τον πιο προφανή τύπο θορύβου. Οτιδήποτε προκαλεί την κίνηση του εδάφους, εκτός από τη δική μας πηγή παράγει θόρυβο.
- Ηλεκτρονικός Θόρυβος (Electronic Noise) – Όπως έχουμε ήδη δει, γεώφωνα μετατρέπουν την κίνηση του εδάφους σε ηλεκτρικά σήματα. Οτιδήποτε λοιπόν προκαλεί μεταβολές στο ηλεκτρικό σήμα του καλωδίου ή του συστήματος καταγραφής προκαλεί αλλοίωση των δεδομένων.
- Γεωλογικός θόρυβος (Geological Noise) – Οποιοδήποτε είδος υπεδάφικου γεωλογικού σχηματισμού που μας είναι δύσκολο να απεικονίσουμε μπορεί να θεωρηθεί πηγή θορύβου. Στη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης υποθέτουμε ότι η γεωλογική δομή μεταβάλλεται πλευρικά μόνο κατά μήκος της ευθείας που συνδέει τα γεώφωνα με την πηγή. Εάν όμως

η δομή της Γης μεταβάλλεται σημαντικά πέρα από την ευθεία μας (δεξιά και αριστερά της για παράδειγμα), τότε είναι πιθανό να ερμηνεύσουμε λανθασμένα τις καταγραφές που προέρχονται από την πλευρική δομή ως δομή κάτω από τα γεώφωνα.

2.2.10.4 Καταγραφές της εδαφικής κίνησης

Όταν τα σεισμικά κύματα αλληλεπιδρούν με μια επιφάνεια ασυνέχειας του υπεδάφους, ένα μέρος της ενέργειας διαβιβάζεται μέσω της ασυμφωνίας, ένα μέρος ανακλάται από την επιφάνεια ασυμφωνίας, και αν οι ταχύτητες των μέσων που χωρίζει η ασυμφωνία απεικονίζουν μια αύξηση στην ταχύτητα του διαδιδόμενου κύματος, ένα μέρος της ενέργειας διαβιβάζεται κατά μήκος της επιφάνειας ασυμφωνίας με μορφή οριακά διαθλώμενων κυμάτων.

Η εδαφική κίνηση, η οποία προκαλείται από τα σεισμικά κύματα καταγράφεται από τα γεώφωνα. Η καταγραφή αυτή της εδαφικής κίνησης παρουσιάζεται με τη μορφή διαγραμμάτων, στα οποία απεικονίζεται το ιστορικό της εδαφικής κίνησης σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Τα διαγράμματα αυτά, τα οποία ονομάζονται σειсмоγράμματα, είναι διαγράμματα του πλάτους της εδαφικής κίνησης συναρτήσει του χρόνου. Ωστόσο, επειδή η γνώση του ιστορικού της εδαφικής κίνησης σε κάποια συγκεκριμένη θέση δεν είναι από μόνη της αρκετή για να επιτρέψει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή του υπεδάφους, η εδαφική κίνηση καταγράφεται σε πολλούς δέκτες και, κατά συνέπεια, απεικονίζεται ως συνάρτηση του χρόνου και της απόστασης από την πηγή.



Σχήμα 2.23: Σεισμική καταγραφή κοινής πηγής [13] (Αποστολόπουλος 2013)

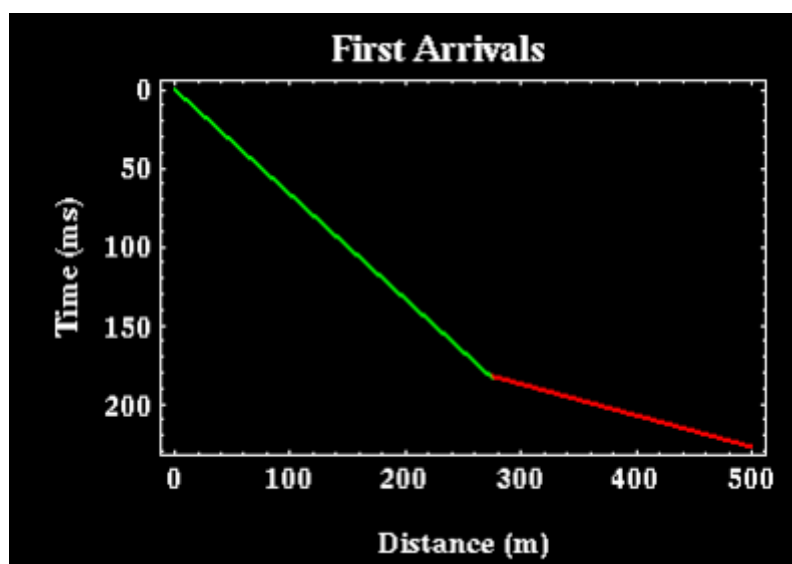
Στο Σχήμα 2.23 παρουσιάζονται οι καταγραφές 24 γεωφώνων, τοποθετημένων σε σειρά, ανά 2 m. Στο διάγραμμα αυτό, ο χρόνος σημειώνεται στον κατακόρυφο άξονα και η απόσταση από την πηγή στον οριζόντιο, ενώ για κάθε κατάλληλη απόσταση πηγής – δέκτη έχει σχεδιαστεί το αντίστοιχο σειсмоγράμματα, το οποίο ονομάζεται σεισμικό ίχνος (seismic trace). Τα διαγράμματα αυτού του τύπου συνήθως καλούνται σεισμικές πηγής κοινής πηγής (common shot seismic records) και το βασικότερο πλεονέκτημα, το οποίο παρουσιάζουν, είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα παρατήρησης της μεταβολής του χρόνου διαδρομής, καθώς μεταβάλλεται η απόσταση. Η μεταβολή αυτή του χρόνου συναρτήσει της απόστασης αναφέρεται

στη βιβλιογραφία ως χρονική απόκλιση (moveout), ενώ από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι αφίξεις με μεγάλες χρονικές αποκλίσεις παρουσιάζουν σαφώς μεγαλύτερη κλίση από αυτές με μικρότερες.

2.2.10.5 Δρομοχρονικές καμπύλες

Δρομοχρονικές καμπύλες ή καμπύλες Χρόνων Διαδρομής (Time – Travel Curves) καλούνται τα διαγράμματα των χρόνων άφιξης των διαφόρων κυμάτων που καταγράφονται συναρτήσει της απόστασης από την πηγή.

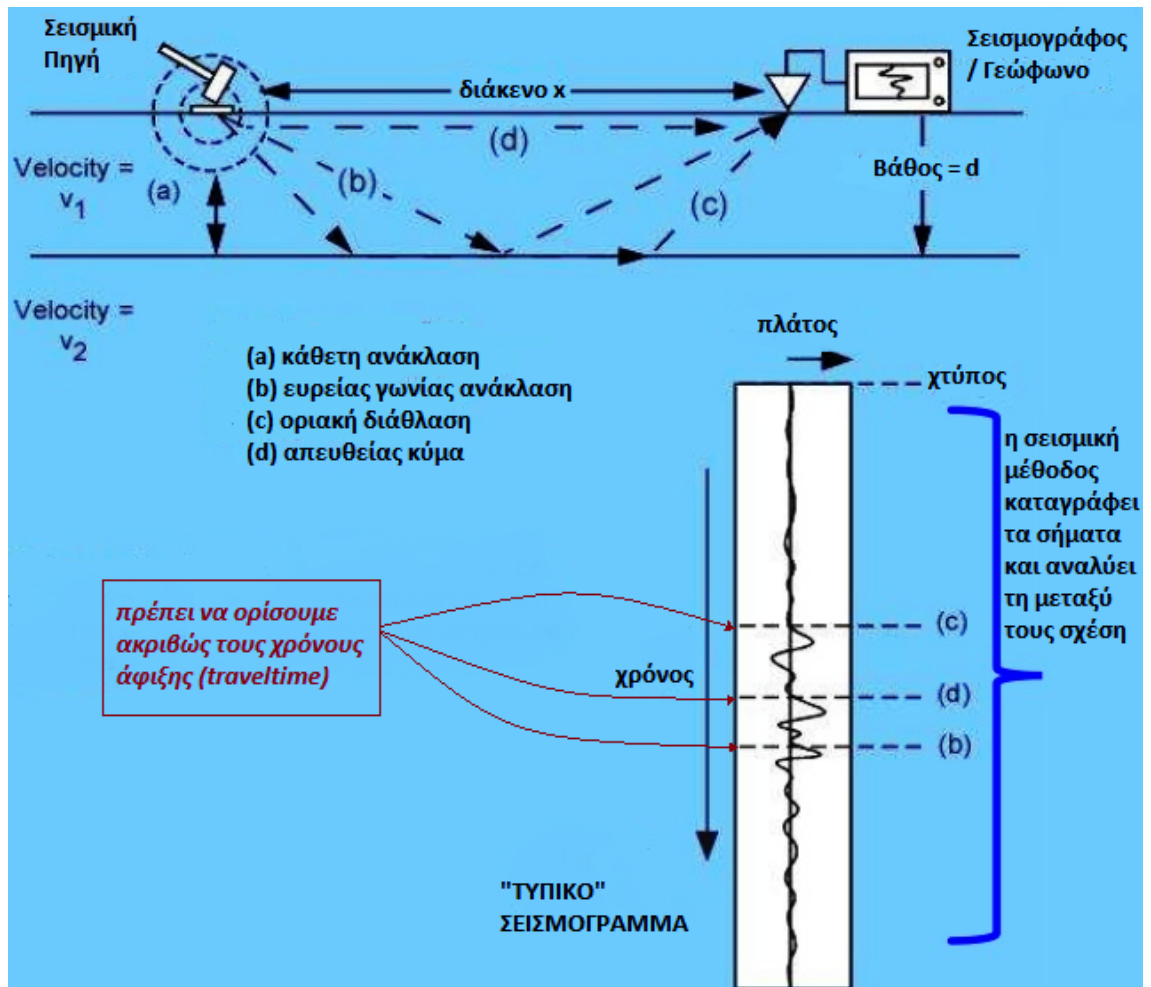
Η χάραξη των δρομοχρονικών καμπύλων των σεισμικών αφίξεων (P-κύματα) σαν συνάρτηση της απόστασης των σταθμών (γεώφωνα) από τη σεισμική πηγή είναι ο κύριος στόχος μας στη σεισμική μέθοδο της διάθλασης. Επομένως, αν και καταγράφουμε ολόκληρο το ιστορικό χρονικό της εδαφικής κίνησης σε έναν αριθμό σταθμών, στη μέθοδο της διάθλασης, το μόνο πράγμα που μας ενδιαφέρει να πάρουμε από τις καταγραφές αυτές είναι ο χρόνος διαδρομής της πρώτης άφιξης του σεισμικού κύματος που καταγράφεται σε κάθε γεώφωνο. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η πρώτη άφιξη σε ένα γεώφωνο σχετίζεται με το απευθείας κύμα όταν η απόσταση του γεώφωνου από τη σεισμική πηγή παραμένει μικρότερη της απόστασης x_c , η οποία είναι πολύ σημαντική και ονομάζεται κρίσιμη απόσταση. Από το ίδιο παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η πρώτη άφιξη σε ένα γεώφωνο θα σχετίζεται με το οριακά διαθλώμενο κύμα όταν η απόσταση του από τη πηγή παραμένει μεγαλύτερη της οριακής απόστασης x_c . Από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ακόμα ότι για καμία απόσταση γεώφωνου από τη πηγή η πρώτη άφιξη θα μπορούσε να σχετίζεται με ανακλώμενο κύμα, όταν η απόσταση του γεωφώνου από την πηγή είναι μεγαλύτερη από x_c .



Σχήμα 2.24: Δρομοχρονική καμπύλη πρώτων αφίξεων [35](Βοψδ 1999)

Για να περάσουμε από τα σειсмоγράμματα στις δρομοχρονικές καμπύλες των πρώτων αφίξεων, πρέπει να καθορίσουμε τη χρονική στιγμή στην οποία ξεκινά η εδαφική κίνηση σε κάθε σειсмоγράμμα. Αν, όμως, έχει καταγραφεί οποιοδήποτε είδους θόρυβος πριν το χρόνο

της πρώτης άφιξης, τότε μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να επιλέξουμε τον χρόνο αυτό. Στη πράξη, η επιλογή του χρόνου άφιξης των πρώτων κυμάτων θεωρείται πιο πολύ ως διαδικασία ερμηνείας παρά ως διαδικασία συλλογής δεδομένων. βλπ. Σχήμα 2.25

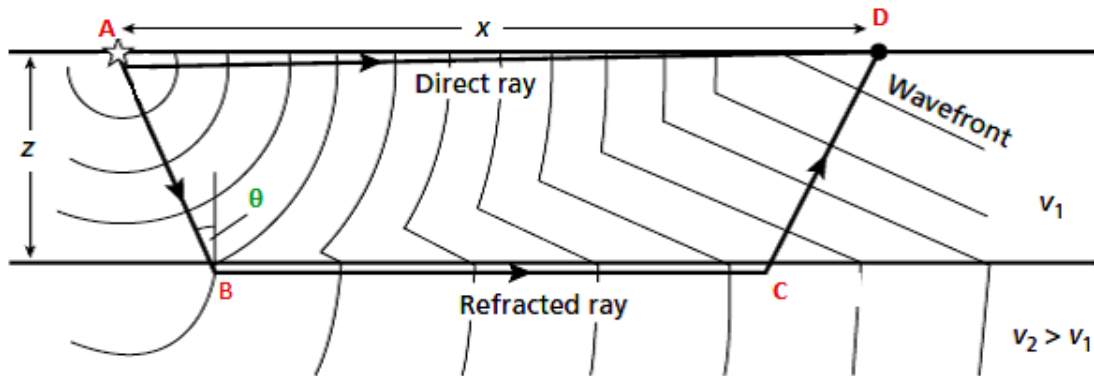


Σχήμα 2.25: Συνοπτικά η σεισμική μέθοδος

2.2.10.6 Προσδιορισμός της δομής του υπεδάφους

- Περίπτωση δύο στρωμάτων με οριζόντια διεπιφάνεια

Στο Σχήμα 2.26 παρουσιάζονται οι διαδοχικές θέσεις του μετώπου του κύματος. Οι θέσεις αυτές σχετίζονται με την άμεση κίνηση της σεισμικής ενέργειας μέσω του ανώτερου στρώματος, καθώς και την κίνηση της οριακά διαθλώμενης ενέργειας στο υποκείμενο στρώμα.



Σχήμα 2.26: Μοντέλο στρώματος πάνω από ημιχώρο, με οριζόντια διεπιφάνεια [24]

Ο συνολικός χρόνος διαδρομής, κατά μήκος της οριακά διαθλώμενης σεισμικής ακτίνας ABCD, δίνεται από τη σχέση:

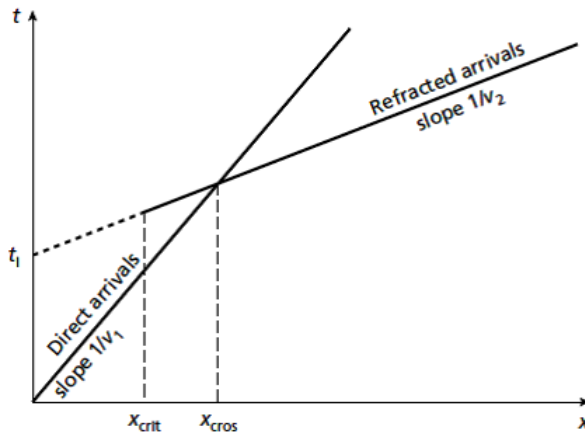
$$\begin{aligned}
 t &= t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \Rightarrow \\
 t &= \frac{z}{v_1 \cos \theta} + \frac{x - 2z \tan \theta}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos \theta} \Rightarrow \\
 \left. \begin{aligned}
 &t = \frac{x - 2z \cdot \tan \theta}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos \theta} \\
 \text{Νόμος Snell} \quad &\sin \theta = \frac{v_1}{v_2} \\
 \text{και} \quad &\cos \theta = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow t = \frac{x \sin \theta}{v_1} + \frac{2z \cos \theta}{v_1}
 \end{aligned}$$

εναλλακτικά

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2}$$

$$\text{ή} \quad t = \frac{x}{v_2} + t_i \tag{2.13}$$

Όπου, εάν σχεδιάσουμε το διάγραμμα του χρόνου (t) συναρτήσει της απόστασης (x), t_i είναι η απόσταση που ορίζει στον άξονα των χρόνων η προς τα πίσω προέκταση του κλάδου της δρομοχρονικής καμπύλης, ο οποίος έχει κλίση $\frac{1}{v_2}$.



Σχήμα 2.27: Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου δύο στρωμάτων [24]

Ο χρόνος t_i είναι γνωστός ως χρόνος συνάντησης και εκφράζει το χρόνο στον οποίο θα παρατηρηθεί η διαθλώμενη άφιξη, σε απόσταση μηδέν μέτρων από την πηγή. Ο χρόνος t_i δίνεται από τη σχέση:

$$t_i = \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \quad (2.14)$$

ή αλλιώς

$$z = \frac{t_i v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (2.15)$$

Έτσι, με την ανάλυση των δρομοχρονικών καμπύλων των απευθείας και διαθλώμενων αφίξεων, μπορούν να ληφθούν οι ταχύτητες v_1 και v_2 , οι οποίες ισούνται με το αντίστροφο της κλίσης των δρομοχρονικών καμπύλων, ενώ από το χρόνο συνάντησης t_i μπορεί να προσδιοριστεί το βάθος της διεπιφάνειας z .

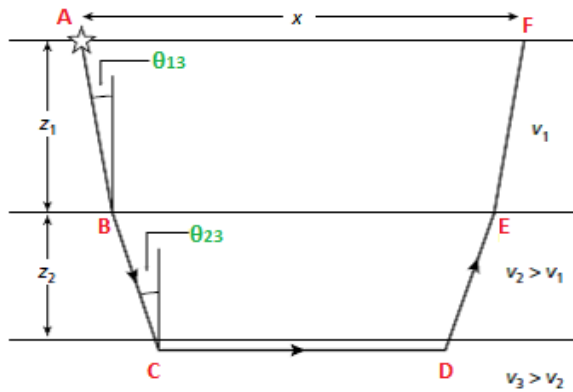
Στην κρίσιμη απόσταση οι χρόνοι διαδρομής του απευθείας και διαθλώμενου κύματος είναι ίσοι. Δηλαδή:

$$\frac{x_{cros}}{v_1} = \frac{x_{cros}}{v_2} + \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \Rightarrow x_{cros} = 2z\sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}} \quad (2.16)$$

Από την εξίσωση αυτή καθίσταται προφανές ότι η κρίσιμη απόσταση είναι πάντα μεγαλύτερη από το διπλάσιο του βάθους της διεπιφάνειας.

- Περίπτωση τριών στρωμάτων με οριζόντιες διεπιφάνειες

Η γεωμετρία της σεισμικής ακτίνας, στην περίπτωση της οριακής διάθλασης στη δεύτερη διεπιφάνεια, παρουσιάζεται στο σχήμα.. οι σεισμικές ταχύτητες των τριών στρωμάτων είναι v_1 , v_2 ($> v_1$), και v_3 (v_2). Η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στην πρώτη διεπιφάνεια είναι θ_1 ενώ στη δεύτερη θ_2 (κρίσιμη γωνία). Τα πάχη των στρωμάτων 1 και 2 είναι z_1 και z_2 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.28: Μοντέλο δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με οριζόντιες διεπιφάνειες [24]

Ο χρόνος διαδρομής κατά μήκος της διαθλώμενης ακτίνας ABCDEF δίνεται από τη Σχέση 2.17

$$t = \frac{x \sin \theta_1}{v_1} + \frac{2z_1 \cos \theta_1}{v_1} + \frac{2z_2 \cos \theta_2}{v_2} \quad (2.17)$$

αντικαθιστούμε

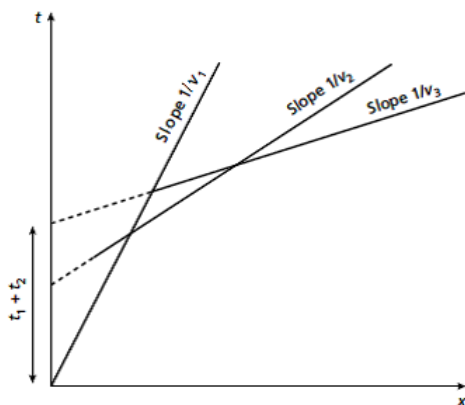
$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{v_1}{v_3}\right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{v_2}{v_3}\right)$$

$$\Rightarrow t = \frac{x \sin \theta_1}{v_1} + t_{i_1} + t_{i_2} \quad (2.18)$$

όπου t_{i_1} είναι ο χρόνος της συνάντησης της δρομοχρονικής καμπύλης των οριακά διαθλώμενων αφίξεων της ανώτερης διεπιφάνειας

και t_{i_2} η διαφορά μεταξύ του t_{i_1} και του χρόνου συνάντησης της δρομοχρονικής καμπύλης των οριακά διαθλώμενων αφίξεων της κατώτερης διεπιφάνειας.



Σχήμα 2.29: Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου τριών στρωμάτων [24]

Η ερμηνεία των δρομοχρονικών καμπύλων, στην περίπτωση των τριών στρωμάτων, πραγματοποιείται μέσω της αρχικής ερμηνείας των δύο πρώτων στρωμάτων. Αφού έχουν

προσδιοριστεί τα z_1 και v_2 στη συνέχεια υπολογίζονται τα z_2 και v_1 .

- **Περίπτωση πολλών στρωμάτων με οριζόντιες διεπιφάνειες**

Γενικά, ο χρόνος διαδρομής t_n ενός κύματος, οριακά διαθλώμενου στην ανώτερη επιφάνεια n -οστού στρώματος, δίνεται από τη Σχέση 2.19

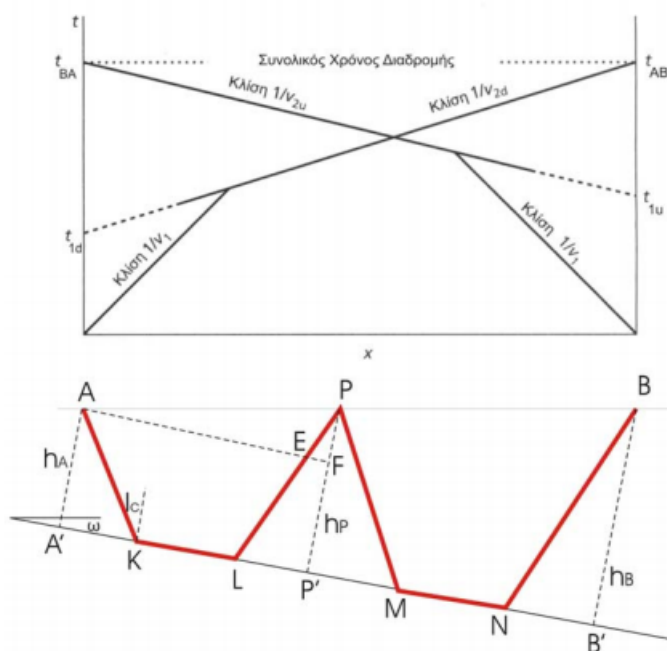
$$t_n = \frac{x \sin \theta_i}{v_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2z_i \cos \theta_i}{v_i} \quad (2.19)$$

όπου: $\theta_i = \sin^{-1} \frac{v_i}{v_n}$

Η Εξίσωση 2.19 μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαδοχικά προκειμένου να υπολογισθούν τα πάχη μιας σειράς οριζόντιων στρωμάτων, τα οποία αναπαρίστανται μέσω δρομοχρονικών καμπύλων διαθλώμενων αφίξεων.

- **Περίπτωση κεκλιμένης ασυνέχειας**

Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη περίπτωση, δεδομένου ότι οι διάφορες γεωλογικές ασυνέχειες σπάνια είναι παράλληλες η μία με την άλλη.



Σχήμα 2.30: Κεκλιμένη Ασυνέχεια [13]

Ας υποθέσουμε την περίπτωση δύο στρωμάτων, με την επιφάνεια της ασυνέχειας να κατέρχεται προς το μέρος των γεωφώνων. Από το σημείο, που αντιστοιχεί στη θέση της σεισμικής πηγής, φέρουμε παράλληλη γραμμή προς τη σεισμική ασυνέχεια. Τότε, ο κλάδος AKLE αντιστοιχεί σε περίπτωση δύο οριζόντιων στρωμάτων, επομένως για να υπολογίσουμε τον ολικό χρόνο διαδρομής του εκπεμπόμενου από τη σεισμική πηγή κύματος προς το σεισμικό φωρατή P, αρκεί να προσθέσουμε στους χρόνους διαδρομής

από το Α στο Ε που δίδεται από τη σχέση:

$$2.13 \Rightarrow t_{AKLE} = \frac{2AA' \cos i_c}{v_1} + \frac{AE}{v_2}$$

και το χρόνο διάδοσης από το Ε στο Ρ που είναι: $t_{EP} = \frac{EP}{v_1}$

Από τη γεωμετρία του Σχήματος 2.30 έχουμε

$$\left. \begin{array}{l} EP = \frac{PF}{\cos i_c} \\ PF = x \sin \omega \\ AF = x \cos \omega \\ EF = PF \tan i_c = x \sin \omega \tan i_c \end{array} \right\} \Rightarrow AE = AF - EF = x(\cos \omega - \sin \omega \tan i_c)$$

$$EP = \frac{x \sin \omega}{\cos i_c}$$

Έτσι, τελικά, ο χρόνος t_{AKLP} , που λέγεται και “χρόνος για προς τα κάτω κλίση” (Down Dip) και που συμβολίζεται με t_d δίνεται από τη σχέση και που δίνεται από τη σχέση:

$$t_d = \frac{2h_A \cos i_c}{v_1} + \frac{x \sin(i_c + \omega)}{v_1} \quad (2.20)$$

Η Σχέση 2.20 παριστάνει ευθεία με κλίση:

$$\frac{\sin(i_c + \omega)}{v_1} = \frac{\sin(i_c + \omega)}{v_2 \sin i_c} = \frac{1}{v_{2d}} \quad (2.21)$$

Είναι φανερό ότι η κλίση που υπολογίζεται από την ανωτέρω εξίσωση δεν αντιστοιχεί στην πραγματική ταχύτητα του δεύτερου στρώματος, γι' αυτό και καλείται **φαινόμενη ταχύτητα**.

Από τη Σχέση 2.21 έχουμε:

$$\frac{v_{2d}}{v_2} = \frac{\sin i_c}{\sin(i_c + \omega)} < 1 \quad (2.22)$$

Η Σχέση 2.22 δείχνει ότι για την περίπτωση που η ασυνέχεια κλίνει προς τη μία μεριά των σεισμικών φωρατών (προς τα κάτω), η μετρούμενη φαινόμενη ταχύτητα είναι πάντοτε μικρότερη της πραγματικής και όσο πιο μεγάλη είναι η κλίση της ασυνέχειας, τόσο πιο μικρή γίνεται η φαινόμενη ταχύτητα.

Για την περίπτωση που η ασυνέχεια κλίνει προς τη μεριά της σεισμικής πηγής, ο “χρόνος για κλίση προς τα πάνω” (Up Dip), που συμβολίζεται με t_u δίνεται από τη σχέση:

$$t_u = \frac{2h_B \cos i_c}{v_1} + \frac{x \sin(i_c - \omega)}{v_1} \quad (2.23)$$

ενώ η αντίστοιχη της 2.22 γίνεται:

$$\frac{v_{2u}}{v_2} = \frac{\sin i_c}{\sin(i_c + \omega)} > 1 \quad (2.24)$$

που σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η μετρούμενη φαινόμενη ταχύτητα είναι πάντοτε μεγαλύτερη της πραγματικής και ότι όσο μεγαλώνει η κλίση της ασυνέχειας, τόσο μεγαλώνει η φαινόμενη ταχύτητα.

Υπολογισμός τα κλίσης και των πραγματικών ταχυτήτων

Από τις Σχέσεις 2.22 και 2.24 βρίσκουμε:

$$\sin(i_c + \omega) = \frac{v_1}{v_{2d}} \Rightarrow i_c + \omega = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2d}}\right)$$

$$\sin(i_c - \omega) = \frac{v_1}{v_{2u}} \Rightarrow i_c - \omega = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2u}}\right)$$

Επομένως

$$i_c = \frac{\arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2d}}\right) + \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2u}}\right)}{2}$$

$$\omega = \frac{\arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2d}}\right) - \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2u}}\right)}{2}$$

και η ταχύτητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v_2 = \frac{v_1}{\sin i_c}$$

Τα βάρη κάθετα στην υπό κλίση ασυνέχεια h_A και h_B δίνονται από τις σχέσεις:

$$h_A = \frac{v_1 t_{1d}}{2 \cos i_c}, \quad h_B = \frac{v_1 t_{1u}}{2 \cos i_c}$$

2.3 Γεωραντάρ

2.3.1 Εισαγωγή

Το γεωραντάρ (Ground-Penetrating Radar - GPR) είναι μια τεχνική απεικόνισης του υποδάφους σε υψηλή ανάλυση. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετά κοινά σημεία με τη σεισμική μέθοδο, συμπεριλαμβάνεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους καθώς ελέγχει τις ηλεκτρικές ιδιότητες σε υψηλές συχνότητες. Το GPR είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος, και επομένως μπορεί να εφαρμοστεί στις αστικές και ευαίσθητες περιοχές. Έχει πολλές γεωλογικές εφαρμογές, όπως η απεικόνιση ρηχών δομών σε υψηλή ανάλυση και χαρτογράφηση του υδροφόρου ορίζοντα. Έχει επίσης διάφορες μη γεωλογικές εφαρμογές όπως π.χ. στην αρχαιολογία, για την τοποθεσία θαμμένων τοίχων ή κοιλοτήτων.

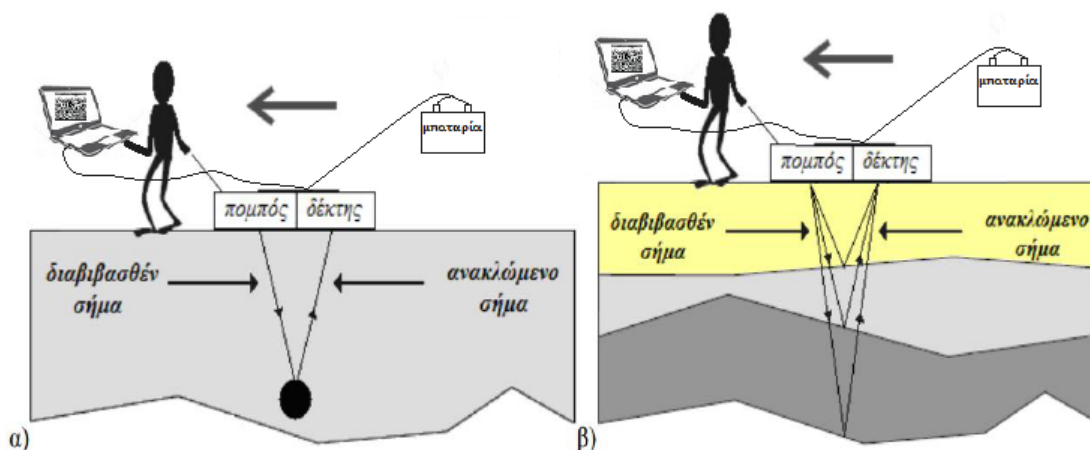
[24] (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2013)

2.3.2 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Το γεωραντάρ αποτελείται από μία κεραία που λειτουργεί σαν πομπός, ο οποίος εκπέμπει έναν μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Ο παλμός αυτός ανακλάται από αντικείμενα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, και κατόπιν λαμβάνεται από κεραία δέκτη.

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται με επιτυχία στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνότητας από 1 έως 2000 MHz. Ένα τυπικό σύστημα γεωραντάρ αποτελείται από μία κονσόλα ή μονάδα ελέγχου, τον υπολογιστή, τις κεραίες διαφόρων συχνοτήτων και την μπαταρία (Εικόνα 2.31). Οι κεραίες κινούνται κατά μήκος μιας γραμμής στο έδαφος, δημιουργώντας δισδιάστατα προφίλ ανακλάσεων.

Η κεραία πομπός μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ραδιοκύμα), το οποίο μπορεί να διεισδύσει δια του υπεδάφους στο στόχο. Ο παλμός θα ταξιδεύσει στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες (ϵr). Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο στρώμα και ένα μέρος θα ανακλαστεί στην επιφάνεια και θα επιστρέψει στην κεραία του δέκτη (Εικόνα 2.31). Το σήμα που φτάνει στην κεραία δέκτη προωθείται στην μονάδα ελέγχου όπου και καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής (σε νανο - δευτερόλεπτα ns) και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού. Δυο κατηγορίες κυμάτων καταγράφονται από το δέκτη.



Σχήμα 2.31: Αρχή λειτουργίας του Γεωραντάρ

1. Τα κύματα που ταξιδεύουν απευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Αυτά τα κύματα, αφενός μεν φτάνουν πρώτα, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη από ότι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου δε έχουν μεγάλο πλάτος, αφού δεν υφίστανται εξασθένιση.
2. Τα κύματα που διαδίδονται στο υπέδαφος. Η καταγραφή του πλάτους των κυμάτων σε σχέση με το χρόνο διαδρομής ονομάζεται ίχνος. Όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα, αλλάζει κατεύθυνση δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει πολύ μικρού μεγέθους εμπόδια, τα οποία

το αναγκάζουν να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντήχηση συμβαίνει, όταν το κύμα “ παγιδευτεί ” σε κάποιο γεωλογικό στρώμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κύμα ανακλάται πολλές φορές με συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών ανακλάσεων.

[7] (Σπανουδάκης 2007)

Η κύρια σχέση που περιγράφει τον μηχανισμό ανίχνευσης του ραντάρ, είναι η εξίσωση του ραντάρ [29](Skolnik1981) & [25](Kingsley1992) , η οποία περιγράφεται ως:

$$P_r = \frac{P_t G_r G_t \sigma^2 \lambda^2 L_s}{(4\pi)^3 R^4}$$

όπου, P_r και P_t είναι η ενέργεια που λαμβάνει ο δέκτης του ραντάρ και που εκπέμπει ο πομπός αντίστοιχα (Watt), G_r και G_t είναι η ενίσχυση (gain) των κεραιών του δέκτη και του πομπού αντίστοιχα, σ είναι ένα μέτρο του μεγέθους του στόχου που μπορεί να διακριθεί από το ραντάρ και ονομάζεται radar cross section, (RCS) (m^2), λ είναι το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού (m), L_s είναι ένας παράγοντας ο οποίος αντιπροσωπεύει τις μέσες απώλειες του συστήματος και R είναι η απόσταση από τον στόχο (m). Η ενίσχυση της κεραίας είναι ένα μέτρο της αυξανόμενης ενέργειας η οποία εκπέμπεται προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση, συγκρινόμενη με την ενέργεια την οποία θα εξέπεμπε μια ιστροπική κεραία.

[29] (Σκολνικ 1981)

Ο παράγοντας ο οποίος σχετίζεται με την ικανότητα του GPR να ανιχνεύσει μια ασυνέχεια σε κάποιο βάθος, είναι η απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος όταν αυτό διαδίδεται σε κάποιο στρώμα. Η τροποποιημένη εξίσωση του ραντάρ για την περίπτωση του GPR γίνεται [33](Smith 1984)

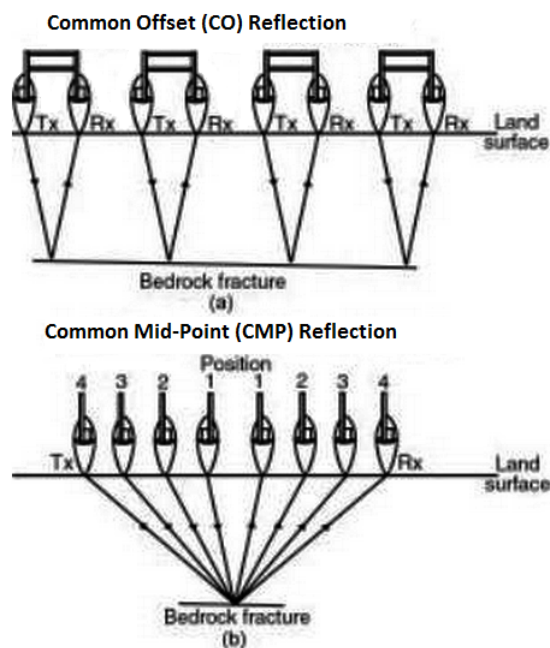
$$P_r = \frac{P_t G_r G_t \sigma^2 \lambda^2 L_s e^{-a4R}}{(4\pi)^3 R^4}$$

όπου a η σταθερά απόσβεσης (Nepers/m)

2.3.3 Μετρήσεις στο ύπαιθρο

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης πομπού - δέκτη ανάλογα με το σκοπό της έρευνας.

1. Ανακλαστικό προφίλ (Common Offset), όπου ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή μικρή απόσταση μεταξύ τους, και μετακινούνται κατά μήκος μιας γραμμής διασκόπησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε αντένες ίδιας συχνότητας είτε αντένες διαφορετικής συχνότητας (είναι πιθανό να ληφθούν με αυτό τον τρόπο καλύτερα αποτελέσματα).
2. Μέθοδος κοινού σημείου (Common – Midpoint), όπου ο πομπός και ο δέκτης απομακρύνονται από ένα συγκεκριμένο κεντρικό σημείο, ή το ένα στέκεται σταθερό και το άλλο απομακρύνεται από το πρώτο. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος.



Σχήμα 2.32: Diagram showing (a) the antenna geometry for a common-offset (CO) ground-penetrating radar reflection survey and (b) the antenna geometry for a common mid-point (CMP) survey used to derive the average subsurface radar propagation velocity. In both, Tx and Rx indicate the locations of the transmitting and receiving antennas, respectively [19] (Bursink1999)

2.3.4 Βάθος και ανάλυση μετρήσεων

Το μέγιστο βάθος διείσδυσης του γεωραντάρ, εξαρτάται άμεσα από την εξασθένιση και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των σχηματισμών στους οποίους διαδίδεται. Όταν η αγωγιμότητα των σχηματισμών είναι μεγάλη, το βάθος διείσδυσης είναι μικρό. Το βάθος του στόχου μελετάται πάντα σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διακριτική τους ικανότητα.

Ένας άλλος παράγοντας που έχει επιπτώσεις στο βάθος και στην ανάλυση είναι η συχνότητα. Μια πολύ χαμηλής συχνότητας κεραία, όπως 50MHz, μπορεί να διαπεράσει 50 m ή περισσότερα, δίνοντας όμως αποτελέσματα με πολύ χαμηλή ανάλυση. Αντιθέτως, μια κεραία υψηλής συχνότητας, όπως 900 MHz, μπορεί να διαπεράσει το πολύ 1 m, αλλά είναι σε θέση να παρέχει πολύ μεγάλη ανάλυση, εντοπίζοντας πολύ μικρά στοιχεία της τάξης των μερικών εκατοστών. Οπότε, η διεισδυτικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της ανάλυσης.

2.3.5 Απεικόνιση των δεδομένων των μετρήσεων γεωραντάρ

Η απεικόνιση των δεδομένων του γεωραντάρ είναι αυτή του πλάτους των σημάτων ως προς το χρόνο. Η ανίχνευση προϋποθέτει ότι το σήμα επιστροφής από το στόχο είναι μεγαλύτερου πλάτους από τα άλλα σήματα θορύβου.

Τα ραδιογράμματα αποκτώνται στο ύπαιθρο. Χρειάζονται ενίσχυση με το χρόνο, φιλτράρισμα, ανάλογα με τη συχνότητα έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση πιθανά βαθύτερων οριζόντων ή στρωμάτων

2.3.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Ο συνδυασμός υψηλής ανάλυσης και μεγάλης ταχύτητας στη συλλογή στοιχείων καθιστούν αυτή τη μέθοδο σαν μια από τις πιο κατάλληλες γεωφυσικές μεθόδους για την επίλυση ρηχών γεωτεχνικών προβλημάτων. Μετά τη συλλογή των στοιχείων γίνεται ψηφιακή επεξεργασία του σήματος (χωροθέτηση, αποσυνέλιξη), καθώς και απεικόνιση των δεδομένων του γεωραντάρ. Συνοπτικά κάποιες βασικές πληροφορίες και σημαντικά πλεονεκτήματα του γεωραντάρ είναι:

- Μη καταστροφική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος
- Συνεχής συλλογή στοιχείων
- Υψηλή ανάλυση
- Δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση

Η εφαρμογή της μεθόδου έχει ορισμένους περιορισμούς. Η χρήση του γεωραντάρ δεν ενδείκνυται σε περιοχές όπου υπάρχουν εγκατεστημένοι μεταδότες ραδιοκυμάτων, σε περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές στο υπέδαφος ή στην επιφάνεια, και σε περιοχές με υψηλή υγρασία και βρόχινες συνθήκες. Επιπλέον, για να μπορεί να υπάρξει μετρήσιμη ανάκλαση, πρέπει οι διαφορές στις ηλεκτρικές ιδιότητες ανάμεσα στο στόχο και στο μέσο διάδοσης να είναι σημαντικές.

Κεφάλαιο 3

Γεωφυσικές μελέτες σε παρόμοιες περιπτώσεις

3.1 Βυζαντινός Ναός Αγίας Σοφίας [30], Κωνσταντινούπολη, Τουρκία

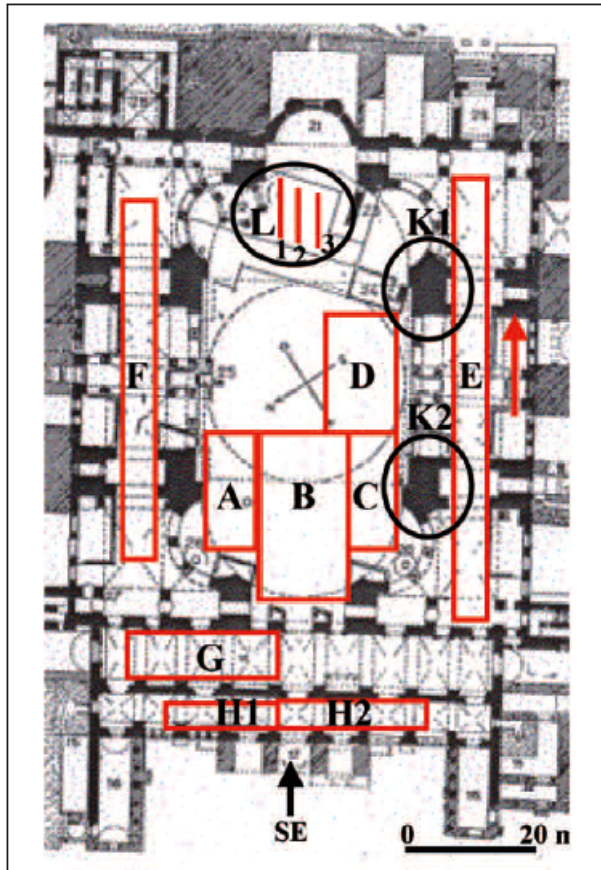
Σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν η εξέταση της θεμελίωσης του σημερινού κτιρίου, στα πλαίσια προγράμματος ανακατασκευής του το 2010. Κτισμένη μεταξύ 532 και 537 μ.Χ. από το Βυζαντινό αυτοκράτορα Ιουστινιανό, η εκκλησία της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη έχει εντυπωσιακή κατασκευή, ενώ ο τρούλος της δεν έχει ξεπεραστεί σε μέγεθος και ύψος από καμιά άλλη εκκλησία στον κόσμο. Στο σεισμό το 550 μ.Χ. τμήμα του τρούλου κατέρρευσε, αλλά γρήγορα επισκευάστηκε στην αρχική του μορφή. Το σημερινό κτίριο είναι η τρίτη σε σειρά κατασκευή στο ίδιο σημείο. Οι δύο προηγούμενες κατασκευές καταστράφηκαν από πυρκαγιά και αναταραχές.

Γεωραντάρ GPR

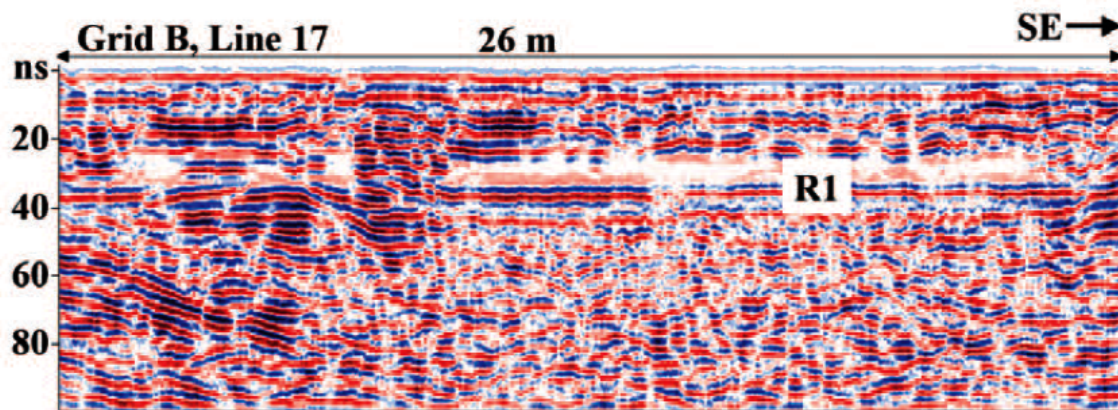
Κατά την έρευνα εφαρμόστηκε η μέθοδος γεωραντάρ (GPR) χρησιμοποιώντας σύστημα 250 MHz στο δάπεδο στη μεγάλη αίθουσα κάτω από τον τρούλο, στις πλαϊνές αίθουσες και στους εσωτερικούς και εξωτερικούς νάρθηκες της εκκλησίας, κατά μήκος γραμμών σε διαστήματα 25 cm με ίχνος διαστήματος 5 cm.

Η πρόσβαση στο χώρο ήταν περιορισμένη, γι' αυτό και η έρευνα διεξήχθη σε ορθογώνια κομμάτια διαφόρων τμημάτων του κτηρίου βλπ. Εικόνα 3.1 Παρατηρήθηκαν δύο διακριτές ζώνες σε πολλές από τις τομές του γεωραντάρ. Η ανώτερη ζώνη εκτείνεται σε βάθος 5 m και πιθανά οφείλεται στα ερείπια της θεμελίωσης παλαιότερης κατασκευής μαζί με εδαφικό υλικό βλπ. (Εικόνα 3.2) , ενώ η κατώτερη ζώνη υποδηλώνει το αδιατάρακτο εδαφικό υλικό.

Ακόμα, σκιαγραφήθηκε η γεωμετρία μιας δεξαμενής που είχε ανακαλυφθεί κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα κατά τη διάρκεια προηγούμενων μετρήσεων με GPR (Yilmaz and Eser, 2005). Η δεξαμενή εντοπίζεται περίπου σε βάθος 1 m κάτω από την επιφάνεια του δαπέδου του ναού, έχει μήκος περίπου 60 m και πλάτος περίπου 5 m. Επίσης,



Σχήμα 3.1: Οι μετρήσεις με GPR στο επίπεδο του δαπέδου του ναού

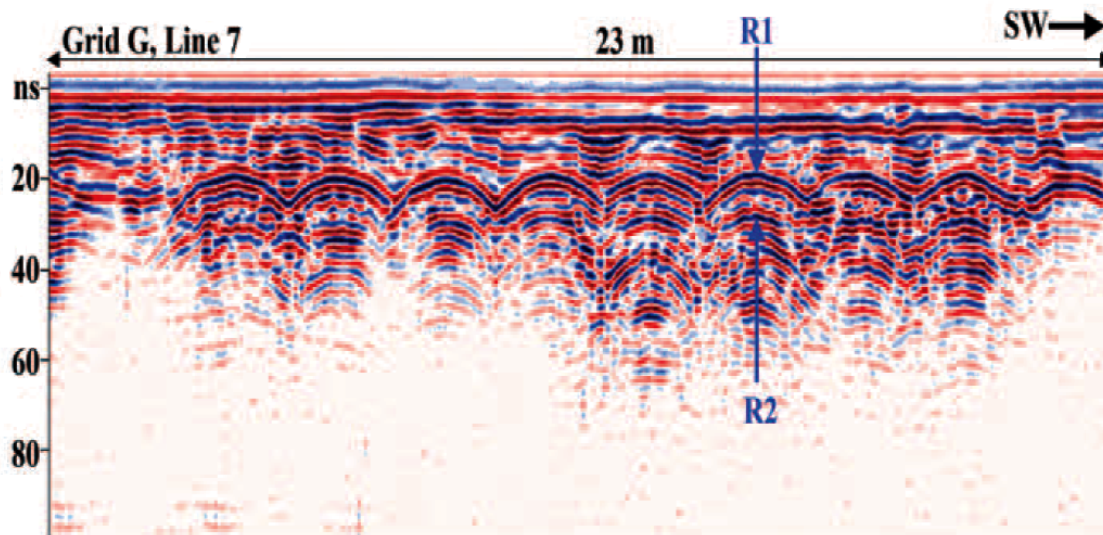


Σχήμα 3.2: Μια σχεδόν επίπεδη ανάκλαση R1 παρατηρείται σε πολλές τομές GPR, κάτι που πιθανόν σχετίζεται με το λίθινο δάπεδο της προγενέστερης κατασκευής

ανακαλύφθηκε από τους ερευνητές ένας σωλήνας που προσεγγίζει τη δεξαμενή. Η δεξαμενή πιθανά συνδέεται μέσω αυτού του σωλήνα στη Μεγάλη Δεξαμενή της βυζαντινής περιόδου που απέχει περίπου 500 m από την περιοχή της εκκλησίας.

Σεισμική Μέθοδος

Με τη μέθοδο των σεισμικών υπολογίστηκαν τα μοντέλα ταχυτήτων – βάθους των S και



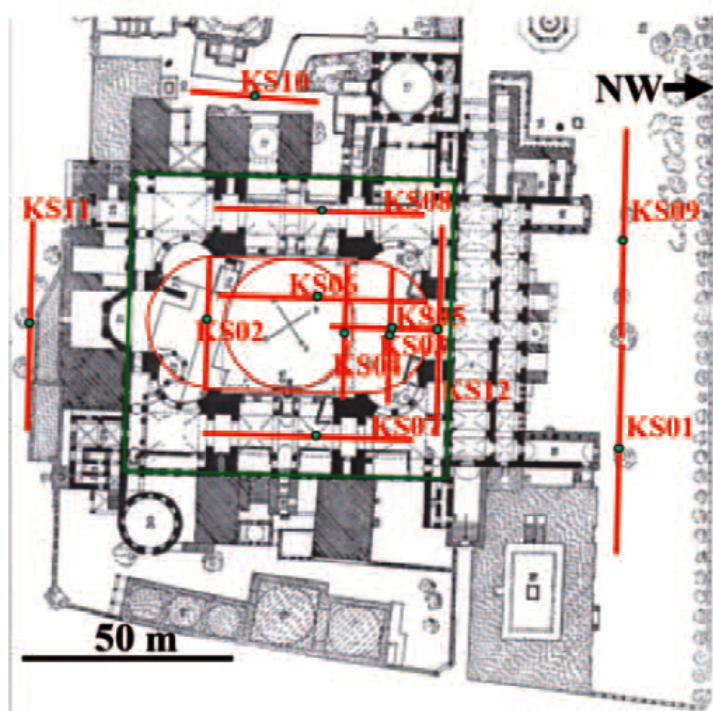
Σχήμα 3.3: Αυτοτελής (unmigrated) τομή GPR σε τμήμα του κτηρίου στο G κάναβο (βλπ. Εικόνα 3.1) . Ανακλάσεις R1 και R2 από την κορυφή και τη βάση της δεξαμενής κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα

P κυμάτων κάτω από τα θεμέλια του ναού. Σε κάθε μια από τις 11 τοποθεσίες (τομές KS01 – KS11) μέσα στο χώρο των μετρήσεων (Εικόνα 3.4), τοποθετήθηκαν τα γεώφωνα σε αναπτύγματα. Χρησιμοποιήθηκε χειροκίνητο σφυρί και μια πλάκα αλουμινίου με ένα μικρό πλαστικό μαξιλάρι, για την αποφυγή καταστροφής των μαρμάρων του δαπέδου και εφαρμόστηκαν τρεις καταγραφές της κρούσης σε αναφορά με την τοποθεσία της πηγής, στις άκρες του αναπτύγματος και στο κέντρο του αναπτύγματος.

Οι ταχύτητες των P - κυμάτων μεταβάλλονται από 1500 m/s κοντά στο επίπεδο του δαπέδου έως 3000 m/s σε βάθος 10 m. Οι ταχύτητες των S - κυμάτων προσεγγίζουν τα 700 m/s σε βάθος 6 m, 900 m/s σε βάθος 12 m, και ξεπερνούν τα 1000 m/s σε βάθος 18 m. Με βάση τις σεισμικές ταχύτητες, αποδεικνύεται ότι η εκκλησία έχει κτιστεί πάνω σε σκληρό βραχώδες υπόβαθρο.

Συμπεράσματα

Από την έρευνα με GPR στην εκκλησία της Αγ. Σοφίας, εντοπίστηκε η γεωμετρία των ερειπίων της θεμελίωσης της προηγούμενης κατασκευής που υπήρχε στο ίδιο σημείο, μαζί με εδαφικό υλικό, που ήταν γνωστό ότι υπήρχαν στην περιοχή από την ιστορία κατασκευής του σημερινού κτιρίου. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η γεωμετρία του ηγασίου που ανακαλύφθηκε κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα, από προηγούμενη έρευνα με GPR. Από τη σεισμική μελέτη, υπολογίστηκαν οι ταχύτητες των P και S - κυμάτων κάτω από τα θεμέλια της εκκλησίας. Εκτός από τα πρώτα μέτρα βάθους (0-6 m), οι ταχύτητες των S - κυμάτων ήταν μεγαλύτερες από 700 m/s, κάτι που δηλώνει ότι η εκκλησία χτίστηκε πάνω από ένα ισχυρό υπόστρωμα.



Σχήμα 3.4: Κάνναβος μετρήσεων της σεισμικής μεθόδου

3.2 Πύργος Φρουρίου (Fire Tower) στο Σόπρον Ουγγαρίας [23]

Ένα από τα αρχαιότερα (12ος αιώνας μ.Χ.), πολιτισμικής κληρονομιάς κτίσματα της Ουγγαρίας είναι ο Fire Tower που βρίσκεται στη βόρεια πλευρά της πόλης Sopron στην Ουγγαρία.

Χτισμένος πάνω σε ερείπια του ρωμαϊκού τοίχους της πόλης, απέκτησε τη σημερινή του μορφή μετά από πυρκαγιά το 1676. Τα θεμέλια του πύργου υπέστην καθίζηση, και το κτήριο έγειρε κατά 4 cm προς το δημαρχείο. Χρειάστηκε ανακαίνιση και ενίσχυση της κατασκευής και διεξήχθησαν τσιμεντενέσεις στο έδαφος (στη θεμελίωση) και στα τέσσερα βασικά τοιχεία του κτηρίου καθώς και η προσθήκη οπλισμού, όπου κρίθηκε απαραίτητο.

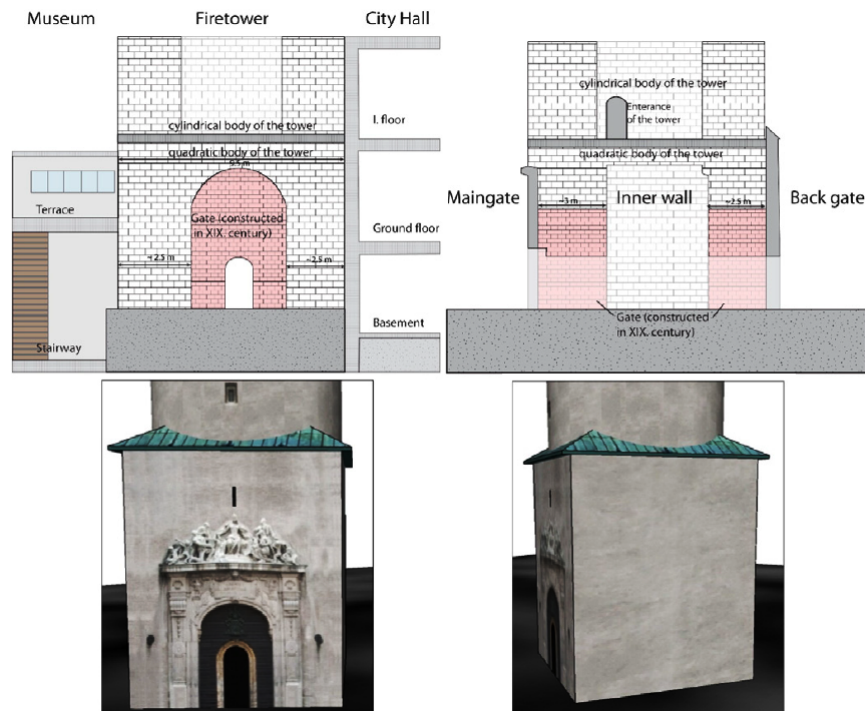
Για την εξυπηρέτηση του έργου ξεκίνησε το 2011 επιτόχια γεωφυσική μελέτη με τη μέθοδο των Γεωραντάρ GPR, με 2 συστήματα διατάξεων 400 MHz και 900 MHz της εταιρείας GSSI, τύπος SIR 3000. Τα διαστήματα μεταξύ των προφίλ ήταν 0.5 m για 400 MHz και 0.25 m για 900 MHz.

Σκοπός ήταν να εντοπιστούν και να καταμετρηθούν κενά και ρωγμές στους τοίχους, καθώς και να υποδειχθούν τα σημεία εκείνα που χρειαζόνταν τσιμεντένεση.

Το κτήριο αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους, ασβεστολιθικούς ψαμμίτες και ηφαιστειογενή πετρώματα. Η συγκόλληση ήταν πολύ χαμηλής ποιότητας και υπήρχε μεγάλη ποσότητα αέρα μεταξύ των οικοδομικών υλικών.

Δοκιμαστικές τσιμεντενέσεις και μετρήσεις GPR

Πριν την έναυση των διεργασιών αποκατάστασης, έπρεπε πρώτα να γνωρίζουμε πως ρέει το τσιμέντο μέσα στους τοίχους καθώς και να εκτιμηθεί ο καταμερισμός του τσιμέντου



Σχήμα 3.5: Τα προς μελέτη τμήματα του πύργου. Η εμπρόσθια είσοδος φαίνεται αριστερά και η δεξιά πλάγια όψη της εμφανίζεται δεξιά

μετά την εισχώρησή του, ο απαιτούμενος χρόνος της, η οργάνωση και η επιτυχία της διαδικασίας τσιμεντένωσης καθώς και η απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου. Έτσι έγιναν 9 γεωτρήσεις σε ορισμένα σημεία της οπίσθιας εισόδου

Μετά τις δοκιμαστικές τσιμεντένσεις (Εικόνα 3.6) το πλάτος των ανακλάσεων εξασθενεί στις περιοχές που ενισχύθηκαν με τσιμέντο και η διαφορά τους με τα ανέγγιχτα τμήματα είναι εμφανής στα ραδιογράμματα.

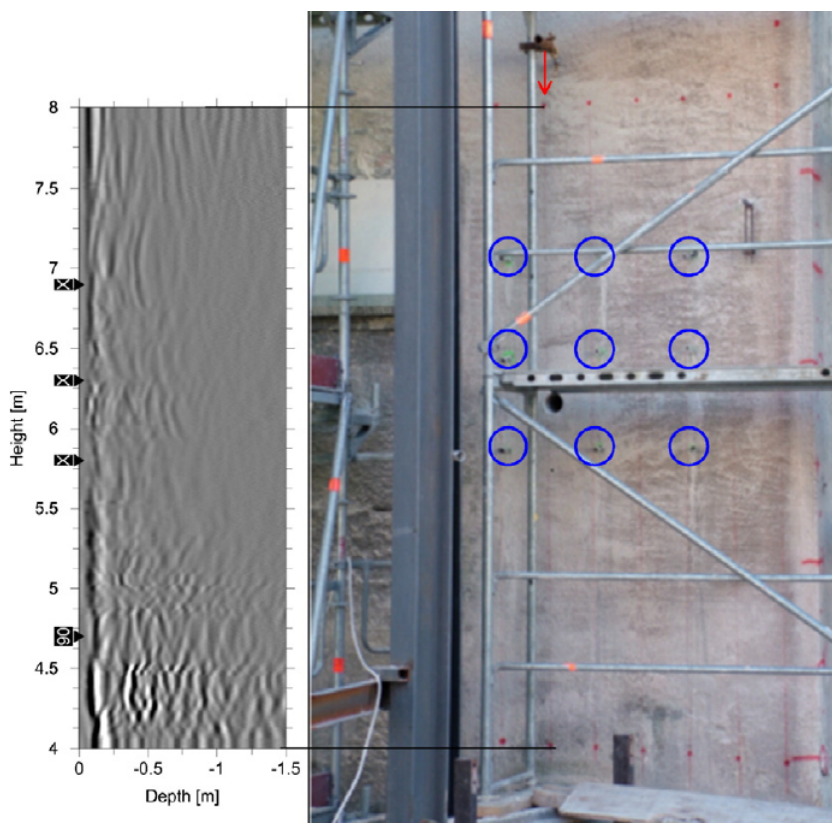
Μετρήσεις GPR πριν την επέμβαση

Το πρώτο μέρος της έρευνας πραγματοποιήθηκε πριν την εισχώρηση τσιμέντου στους τοίχους και οι μετρήσεις των Γεωραντάρ διήρκεσαν 2 ημέρες. Σε αυτό το στάδιο εντοπίστηκαν κοιλότητες και ανομοιογενείς μπαλώματα στους τοίχους. Ενώ αντιμετωπίστηκαν και ορισμένα ενοχλητικά φαινόμενα, ανακλώμενα σήματα από σκαλωσιές, τρύπες, αντικείμενα στο τοίχο, καλώδια και διαχωριστικά.

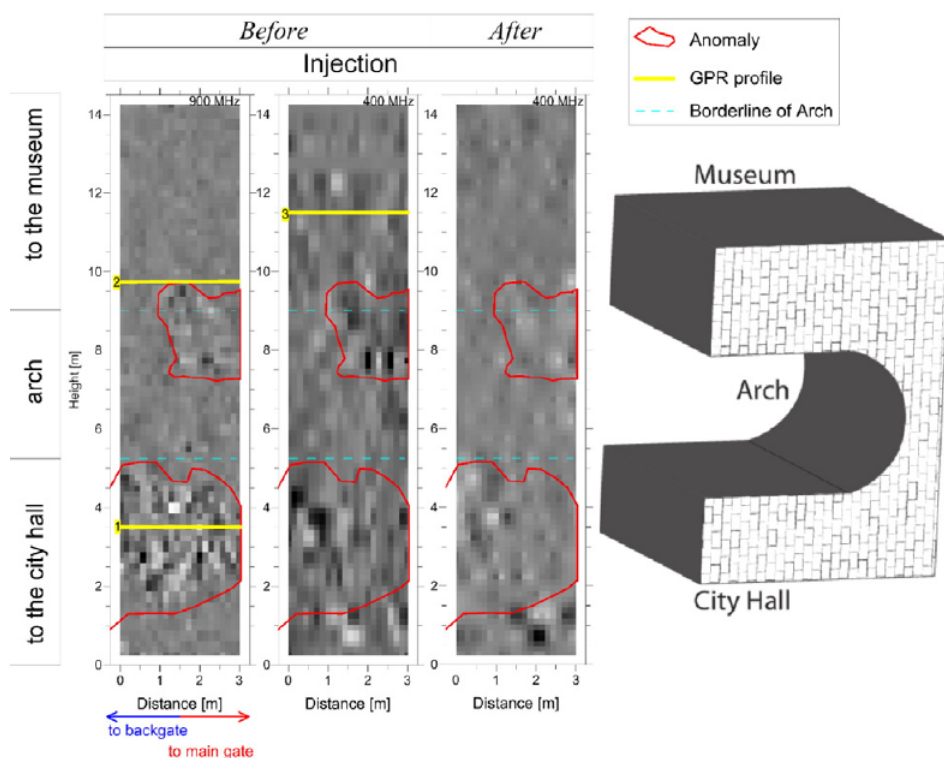
Μετρήσεις GPR μετά τις τσιμεντένσεις

2 μήνες μετά τις τσιμεντένσεις επαναμετρήθηκαν τα τμήματα του πύργου, η καταγραφή διήρκεσε 3 ημέρες. Για την ενίσχυση της ποιότητας των δεδομένων, εφαρμόστηκαν εξ αρχής φίλτρα γραμμικής και οριζόντιας αύξησης. Μετά από αρκετές δοκιμές και λεπτομερείς ερμηνείες παρατηρήθηκε ότι η κεραία των 400 MHz έδωσε καλύτερα αποτελέσματα ως προς την αποτύπωση της κατάστασης των τοίχων.

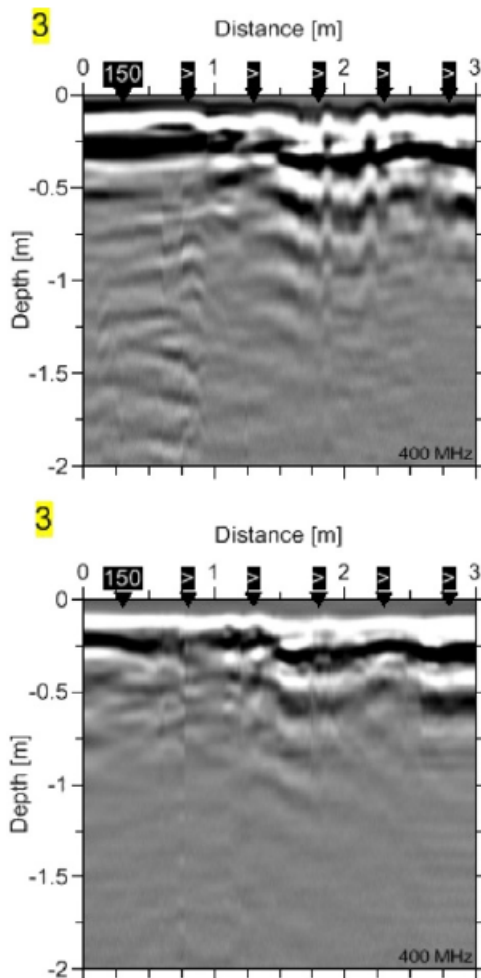
Στην Εικόνα 3.8 φαίνεται ότι μετά τη τσιμεντένωση, η ανακλάσεις γίνονται πιο ομοιο-



Σχήμα 3.6: Το προφίλ του GPR δίνεται στα αριστερά. Το σύμβολο X αναφέρεται στα σημεία τιμεντένεσης και ο αριθμός 90 υποδεικνύει τα λίτρα τσιμέντου που εισήχθησαν μικρές κόκκινες βούλες επισημαίνουν τα όρια της μέτρησης, η οποία υποδεικνύεται με κόκκινο βέλος στη δεξιά φωτογραφία. 9 μικροί μπλε κύκλοι απεικονίζουν τα σημεία της δοκιμαστικής τιμεντένεσης.



Σχήμα 3.7: Τομές GPR του εσωτερικού τοίχου (τόξο της μπροστινής πύλης) από 1.2 m βάθος



Σχήμα 3.8: Προφίλ 3 στο πάνω μέρος είναι οι ανακλάσεις πριν την επέμβαση. Στο κάτω μέρος εμφανίζεται η ίδια τομή μετά από εισχώρηση 150 l τσιμέντου

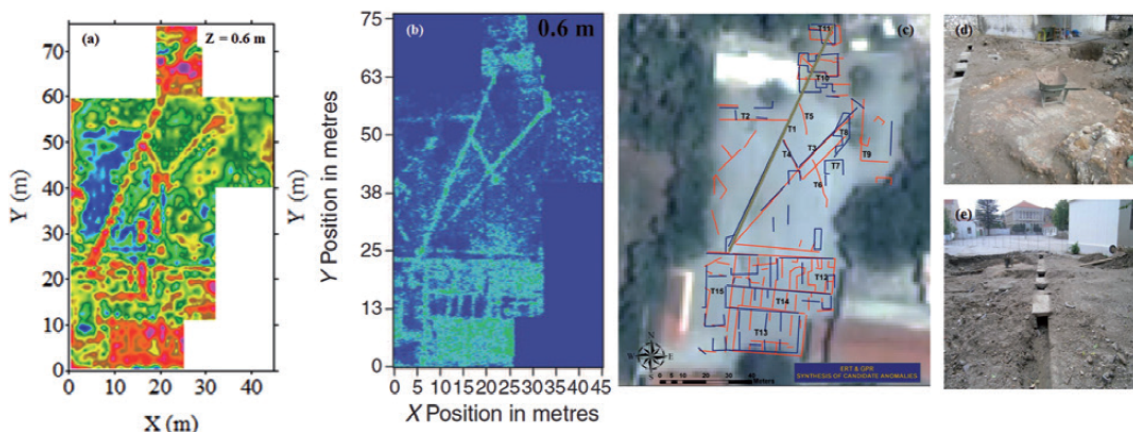
γενείς, καθώς συσχετίζονται με πιο συμπαγές μέσο. Από τη σύγκριση των δύο ραδιογραμμμάτων παρατηρούμε ότι το υλικό πλήρωσης έρευσε από την αριστερή πλευρά και γέμισε περισσότερα κενά προς τη δεξιά πλευρά.

3.3 Γεωφυσικές Έρευνες – Μελέτες Περιπτώσεων από την Ελλάδα [31]

Αρχαιολογική Γεωφυσική σε Αστικό Περιβάλλον

Στα πλαίσια ανακαίνισης κεντρικής πλατείας ($2000m^2$) του Ρεθύμνου στη Κρήτη, περατώθηκε υψηλής ανάλυσης 3D ERT και GPR μελέτη.

Τα δεδομένα της ERT μεθόδου συλλέχθηκαν μέσω πολλαπλών παράλληλων προφίλ με 1 m απόσταση μεταξύ τους. Οι μεταλλικοί πάσσαλοι εφαρμόστηκαν σε μικρές οπές πάνω σε ασφάλτο (με διάκενο 1 m), οι οποίες ανοίχτηκαν με τρυπάνι. Ένα 3D μοντέλο ηλεκτρικής αντίστασης ανακατασκευάστηκε από την αναστροφή (inversion) των προφίλ της ERT μεθόδου. Για τη λήψη δεδομένων Γεωραντάρ, χρησιμοποιήθηκε κεραία 250 MHz με διάστημα μέτρησης 0,5 m. Τα δεδομένα των GIP βελτιώθηκαν ως προς το σήμα, μέσω των φίλτρων (AGC Dewow και DC Shift, trace-to-trace averaging).

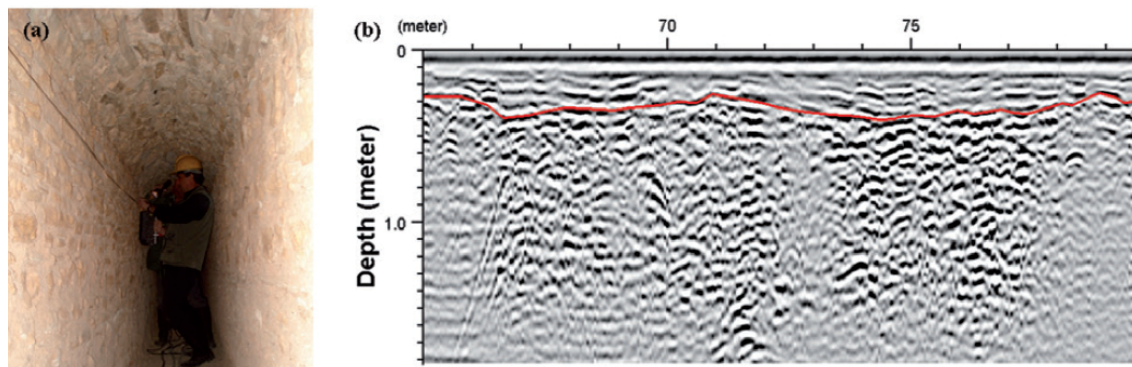


Σχήμα 3.9: (a) Χάρτης βάθους ($z = 0.6 \text{ m}$) που εξάγεται από το 3D ανεστραμμένο μοντέλο αντίστασης, όπου τα θερμά χρώματα εκφράζουν υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (εύρος 10 - 1000 Ohm-m). (b) Χάρτης GPR. (c) Ολοκληρωμένη διαγραμματική ερμηνεία των τιμών υψηλής αντίστασης και μεγάλους πλάτους ανωμαλιών GPR. (d) Ανεσκαμμένη αρχαιολογική δομή σχετιζόμενη με την ανωμαλία T10 στο βόρειο τμήμα. (e) Τάφρος αποστράγγισης σχετιζόμενη με την ανωμαλία T1.

Η συνδυασμένη ερμηνεία των οριζόντιων βυθοσκοπήσεων που εξήχθησαν από τα 3D ERT και τα GPR μοντέλα περιγράφουν προς το νότιο τμήμα ένα ορθογώνιο συγκρότημα δωματίων με εσωτερικά διαμερίσματα που σχετίζονται με εγκαταστάσεις της Μονής Αυγουστινιανών Μοναχών, η οποία εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα του χώρου. Μεταγενέστερες ανασκαφικές εργασίες στα βόρεια των εξεταζόμενων περιοχών, επαλήθευσαν τα γεωφυσικά αποτελέσματα, όσον αφορά τις αρχαιολογικές δομές και ένα μεταγενέστερο τάφρο αποστράγγισης υδάτων που διατρέχει διαγώνια την πλατεία.

Απεικόνιση της κατάστασης διατηρητέων – διατηρήσιμων μνημείων

Οι γεωφυσικές έρευνες σε όρθια μνημεία περιλαμβάνουν μη συμβατικές διαδικασίες με συγκεκριμένες προκλήσεις που προκύπτουν κυρίως από την ανάγκη της εξαγωγής πληροφορίας χωρίς να διαταραχθεί το ίδιο το μνημείο. Το Γεωραντάρ είναι η πιο προφανής μέθοδος για να ανταποκριθεί σε αυτές τις ειδικές απαιτήσεις. Επιτυχής εφαρμογή της τεχνικής αυτής έχει αναφερθεί από Tsokas et al. (2007), Papadopoulos και Sarris (2011) και Tsokas et al. (2013) για τη διερεύνηση των Ναών του Πρωτάτου στο Άγιον Όρος, του Αγίου Ανδρέα στο Λουτράκι και του Χαμζά Μπέη μνημείο στη Θεσσαλονίκη. Το GPR απέφερε επιτυχή αποτελέσματα κατά την εκτίμηση του πάχους της αρχαίας επένδυσης του Ευπαλίνειου ορύγματος στη Σάμο. Ο χειριστής σύροντας την κεραία 800 MHz με μετρήσεις ανά 5 cm κατά μήκος συγκεκριμένου προφίλ, εμφανίζεται στην Εικόνα 3.10. Στα δεδομένα εφαρμόστηκαν τα φίλτρα (dewow, χωρικό και χρονικό φιλτράρισμα ζώνης διέλευσης και διόρθωση normal move-out). Η ανάκλαση ερμηνεύεται ως προερχόμενη από την οπίσθια πλευρά της επένδυσης και επισημαίνεται με κόκκινη γραμμή.

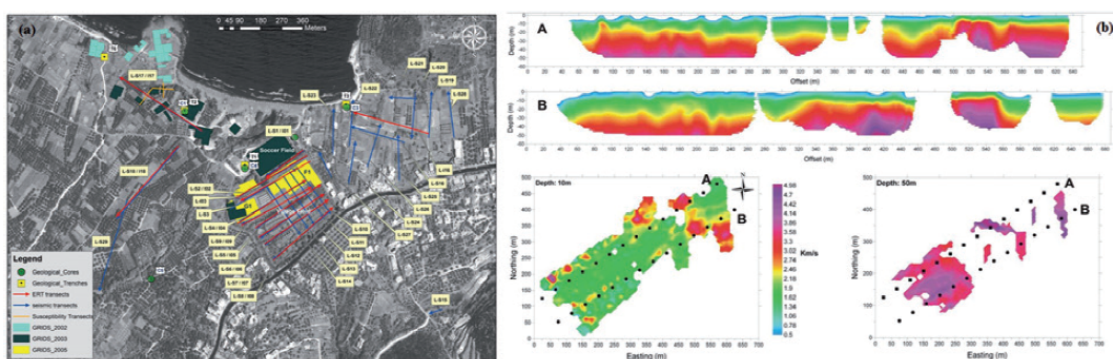


Σχήμα 3.10: (a) Έρευνα Γεωραντάρ για την εκτίμηση του πάχους του Ευπαλίνειου Υδραγωγείου στη Σάμο. (b) Δείγμα επεξεργασμένων δεδομένων GPR όπου η κόκκινη γραμμή επισημαίνει την ανάκλαση μεταξύ της επένδυσης και του υλικού επίχωσης.

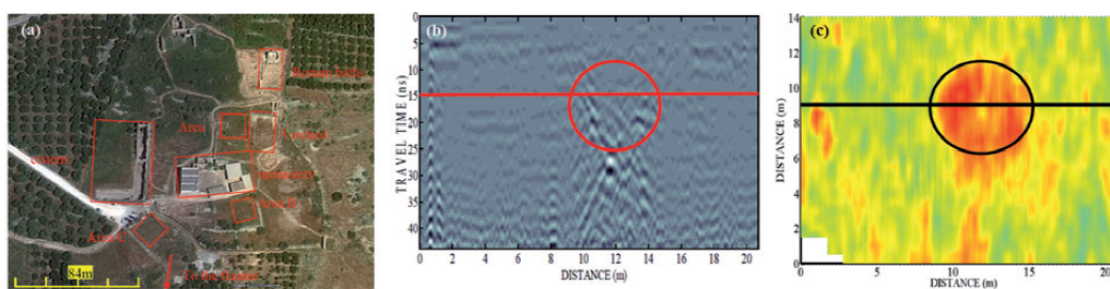
Γεωαρχαιολογικές Εφαρμογές Η εικόνα 3.11 παρουσιάζει ένα παράδειγμα από μια παράκτια περιοχή στο Ίστρον στην Ανατολική Κρήτη, όπου πυκνός κάναβος μετρήσεων σεισμικής διάθλασης κάλυψε έκταση πολύ κοντά στην ακτή $800m \cdot 400m$. Η σεισμική πηγή αποτελείται από μια βαριοπούλα η οποία με το χτύπημά της πάνω σε μεταλλική πλάκα δημιουργούσε σεισμικό παλμό. Για της περισσότερες γραμμές μέτρησης, εφαρμόστηκαν 7 χτυπήματα, 3 στη μέση, 2 στα άκρα των γραμμών και δύο πολύ μακριά από τα γεώφωνα. Τα σήματα καταγράφηκαν από γεώφωνα τα οποία διατεταγμένα κατά μήκος προφίλ διάθλασης με απόσταση 10 μ μεταξύ τους. Οι πρώτες αφίξεις καταγράφηκαν και ένας 3Δ σεισμικός αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για την αντιστροφή των χρόνων ταξιδιού. Το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής έδειξε ότι οι δελταϊκές προσχώσεις (άμμος, χαλίκι, ιλύς, οργανική ιλύς, άργιλος) εμφανίζονται με μέση ταχύτητα 0.5 km/s. Ενώ κορεσμένες αποθέσεις με μορφή βαθμίδων, έχουν καταχωρηθεί με ταχύτητα 1,3 – 2 km/s. Ένα στρώμα που αποτελείται από ψαμίτη και ιλυόλιθο και κροκαλοπαγή καταγράφηκε με ταχύτητες 2,0 – 2,7 km/s. Ο αποσαθρωμένος ασβεστόλιθος και τα συνεκτικά κροκαλοπαγή αναπαριστώνται με ταχύτητες που κυμαίνονται 2,7 – 3,6 km/s, ενώ ο συνεκτικός ασβεστόλιθος βρίσκεται περίπου 25-30 m κάτω από την επιφάνεια.

Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Η εφαρμοσμένη γεωφυσική συνεισέφερε ουσιαστικά την τελευταία δεκαετία σε έργα αρχαιολογικού και αστικού ενδιαφέροντος. Όλες οι σχεδόν όλες οι μέθοδοι έχουν το περιθώριο να προσφέρουν στην αυξανόμενη ανάγκη για προστασία και συντήρηση των πολιτισμικών μνημείων.



Σχήμα 3.11: (a) Διάταξη Γεωφυσικού καννάβου, γραμμές ERT και τομές Σεισμικές Διάθλασης, Ίστρον, Κρήτη . (b) Τομές βάθους κατανομής ταχύτητας διάδοσης για βάθη 10 m και 50 m



Σχήμα 3.12: (a) Δορυφορική εικόνα του Google Earth στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας (ανατολική Κρήτη) (b) Τμήμα GPR παρουσιάζει δύο κύριες ανακλάσεις στα 10 και 14 m. (c) Το σχήμα και το μέγεθος ανωμαλίας αποδίδεται σε μια δεξαμενή με διάμετρο 4 m.

Κεφάλαιο 4

Γεωφυσική Έρευνα στον Άγιο Νικόλαο Αχαΐας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στη γεωφυσική μελέτη που εκπονήθηκε παράλληλα με το πρόγραμμα του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου Αθηνών «Αναβάθμιση Υποδομών για την Αντισεισμική Προστασία της Χώρας και Ενίσχυση της Παροχής Υπηρεσιών μέσω Δράσεων Αριστείας».

4.1 Γενικά

Σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν να εξεταστεί που είναι κτισμένος ο Ναός, αν δηλαδή βρίσκεται πάνω σε συνεκτικό υλικό ή στο βραχώδες υπόβαθρο, να γίνει αποτύπωση της στρωματογραφίας και να εξεταστεί η συνοχή των κατασκευαστικών υλικών του κτηρίου.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε τις εξής μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης:

- Ηλεκτρική μέθοδος, με τη τεχνική της τομογραφίας (ERT)
- Γεωραντάρ (GPR)
- Σεισμική μέθοδος

4.2 Ειδικότερα στοιχεία για το μνημείο

Ο ναός του Αγίου Νικολάου είναι κτισμένος στους βόρειους πρόποδες του Παναχαϊκού όρους, στη δεξιά όχθη του χειμάρρου Ξυλοκέρα. Επιπλέον αποτελεί μια από τις ελάχιστα σωζόμενες βυζαντινές εκκλησίες της βορειοδυτικής Πελοποννήσου ([12] Μαμαλούκος, 2011). Αναφέρεται σε Βενετική απογραφή της εκκλησιαστικής περιουσίας στο τέλος του 17^{ου} αιώνα ως «παλαιομονάστηρο». Το μνημείο μελετήθηκε από τον καθ. Π. Βοτοκόπουλο, ο οποίος το χρονολόγησε στις αρχές του 12^{ου} αιώνα και το ενέταξε στα πλαίσια της εξέλιξης της Ελλαδικής Σχολής.

Ο ναός του Αγίου Νικολάου είναι μια μετρίου μεγέθους, για τα δεδομένα της μεσοβυζαντινής ναοδομίας, εκκλησία. Οι μέγιστες διαστάσεις του είναι 11.70 · 8.50m. Αποτελείται από



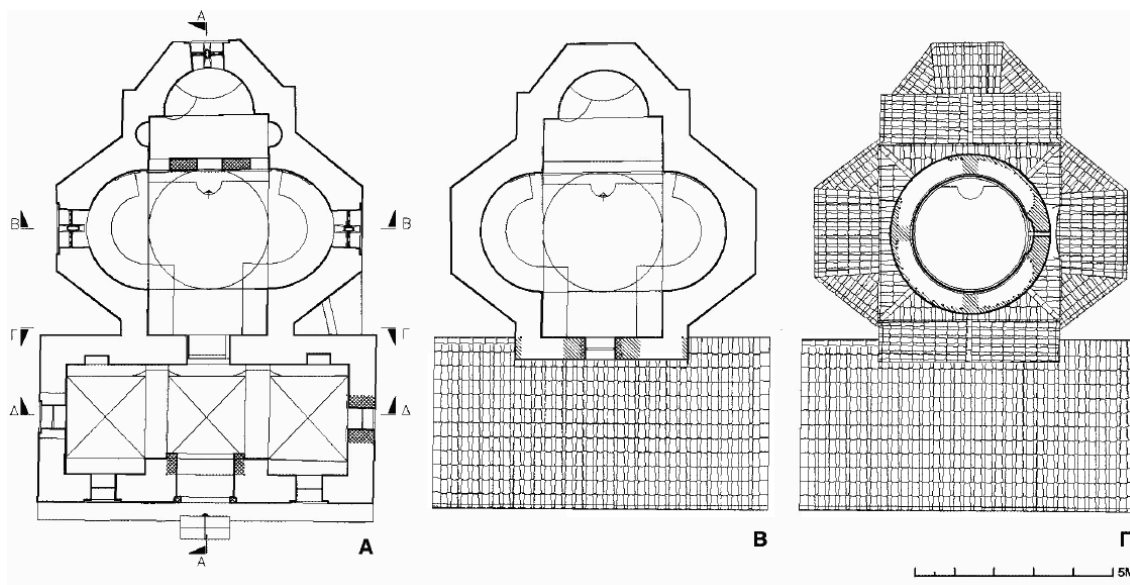
(α') Άποψη από τα Νοτιοανατολικά (Ιούνιος 2015)



(β') Άποψη από τα Δυτικά (Μάιος 2015)

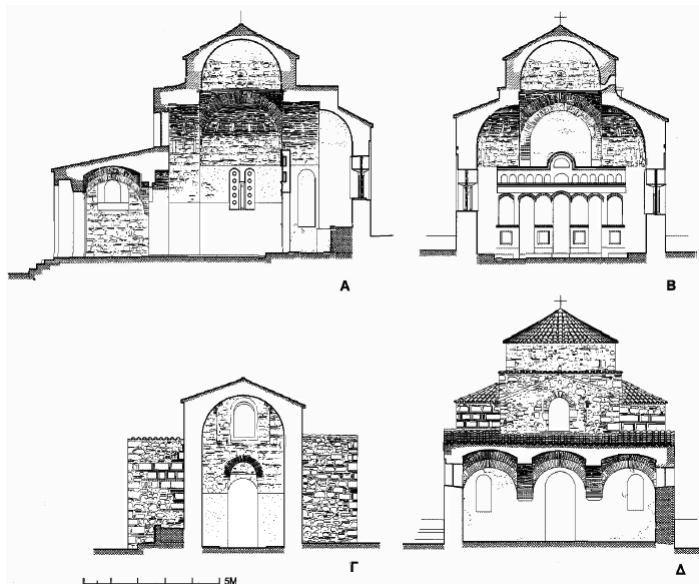
Σχήμα 4.1: Πλατάνι Αχαΐας, Ναός Αγίου Νικολάου

κυρίως ναό και ελαφρώς πλατύτερο νάρθηκα, που είναι σύγχρονος με το ναό, όπως φαίνεται από την τοιχοποιία τους που δένει και είναι όμοια. Ο κυρίως ναός αποτελείται από ορθογώνιο πυρήνα, εσωτερικών διαστάσεων $5.50 \cdot 3m$, στη βόρεια και νότια πλευρά του οποίου εξέχουν δύο ευρύχωρες κόγχες χορδής $3m$. Στον ανατολικό τοίχο του ναού ανοίγεται η κόγχη του άγιου βήματος, με διαστάσεις λίγο μικρότερες από τις άλλες δύο. Οι τρεις κόγχες είναι εσωτερικά ημικυκλικές και εξωτερικά τρίπλευρες, όπως κατά κανόνα συμβαίνει στην Ελλαδική Σχολή, στην οποία ανήκει το μνημείο. Δίλοβο παράθυρο ανοίγεται σε κάθε μία από τις τρεις κόγχες του κυρίως ναού.



Σχήμα 4.2: Ναός Αγίου Νικολάου, Κατόψεις, Αποτύπωση με ένδειξη των οικοδομικών φάσεων [12]

Ο τρούλος εδράζεται σε κυβικό βάθρο, το οποίο υψώνεται στο κέντρο του ναού. Τα υπόλοιπα τμήματα του πυρήνα του ναού (προς ανατολή και προς δύση) καλύπτονται με δίρριχτες στέγες. Οι τρεις κόγχες καλύπτονται με τριμερείς στέγες που έχουν τη μορφή μισής εξάεδρης πυραμίδας. Ο νάρθηκας καλύπτεται σήμερα με χαμηλή μονόριχτη προς δυσμάς στέγη. Όλες οι παραπάνω στέγες του ναού είναι επιστρωμένες με παλαιά, χειροποίητα κεραμίδια «βυζαντινού τύπου». ([12] Μαμαλούκος, 2011)



Σχήμα 4.3: Ναός Αγίου Νικολάου, Τομές, Αποτύπωση με ένδειξη των οικοδομικών φάσεων (βλ. Εικ.4.2): Α. Τομή ΑΑ, Β. Τομή ΒΒ, Γ. Τομή ΓΓ, Δ. Τομή ΔΔ, [12]

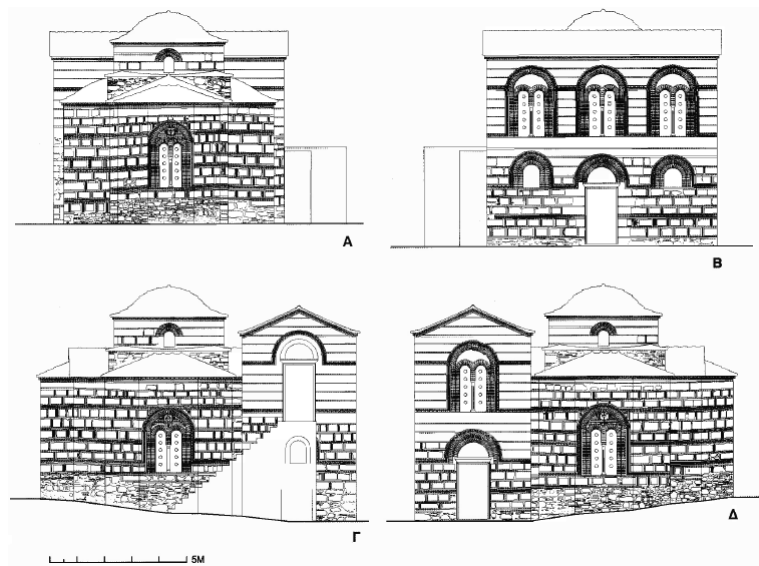
Η είσοδος στο ναό γίνεται από θύρα, με τοξωτό λίθινο πλαίσιο, ανοιγμένη στον άξονα του δυτικού τοίχου. Επάνω από την είσοδο υπάρχει τυφλό αψίδωμα, το κάτω τμήμα του οποίου είναι κατεστραμμένο. Εκατέρωθεν της εισόδου, ψηλά, ανοίγονται τα δύο από τα τέσσερα πλατιά μονόβολα παράθυρα που φωτίζουν το εσωτερικό του νάρθηκα. Το ανώτερο τμήμα του πλαισίου τους είναι κατεστραμμένο. Γεγονός που υποδηλώνει ότι υπήρχε επιπλέον όροφος στο αρχικό κτίριο. Ο Άγιος Νικόλαος σύμφωνα με την παρατήρηση του καθηγητή Βοκοτόπουλου «έχει υποστεί αρκετά σημαντικές επισκευές», οι σχετικά πρόσφατες είναι με μεγάλη ακρίβεια γνωστές ενώ οι παλαιότερες χρονολογούνται, σχεδιάζονται (Εικόνα 4.4) και δημοσιεύονται λεπτομερώς από τον Σ. Μαμαλούκο.

Μία ακόμη θύρα, η οποία είναι φραγμένη σήμερα, ανοιγόταν στον άξονα του νότιου τοίχου και φαίνεται στην αναπαράσταση (Εικόνα 4.4).

Αρχικά ο νάρθηκας του ναού του Αγίου Νικολάου έφερε όροφο, ο οποίος επικοινωνούσε οπτικά με τον κυρίως ναό, κατά το σύνηθες, μέσω του τρίλοβου παραθύρου που ανοιγόταν στον ανατολικό τοίχο ([12] Μαμαλούκος, 2011).

Οι περιπτώσεις βυζαντινών εκκλησιών οι οποίες, επάνω από τον νάρθηκά τους, διαθέτουν όροφο θεωρούνται σύνηθες φαινόμενο. Ο όροφος αυτός αναφέρεται στις πηγές ως «Κατηχούμενον» ή «Κατηχουμενείον». Ενώ οι περισσότεροι από τους ναούς που διέθεταν χώρους σε όροφο, ήταν καθολικά μοναστηριών.

Ο ναός του Αγ. Νικολάου αποτελούσε επομένως «καθολικό» ενός μοναστηριού. Με τον όρο «καθολικό» εννοείται ο κεντρικός ναός μιας Μονής, στον οποίο μαζεύονται κατά την



Σχήμα 4.4: Ναός Αγίου Νικολάου. Όψεις. Αναπαράσταση : Α. Ανατολική όψη, Β. Δυτική όψη, Γ. Νότια όψη, Δ. Βόρεια όψη, [12]

τέλεση των ακολουθιών όλοι οι μοναχοί και συνήθως είναι αφιερωμένο στον ίδιο Άγιο ή Εορτή της Εκκλησίας, στην οποία είναι αφιερωμένο το μοναστήρι και είναι ο πιο μεγάλος ναός του κάθε μοναστηριού.

4.3 Γεωλογική Θεώρηση της Εξεταζόμενης Περιοχής

Γενικά

Η εξεταζόμενη περιοχή εντοπίζεται στο χωριό Πλατάνι, του δήμου Ρίου, στο βόρειο τμήμα του Νομού Αχαΐας, στη ΒΔ Πελοπόννησο. Ο Ναός του Αγίου Νικολάου βρίσκεται σε υψόμετρο 190 m, απόσταση από τη θάλασσα 2.7 km και συντεταγμένες:

Γεωγραφικές συντεταγμένες κατά WGS84	Ορθογώνιες συντεταγμένες κατά ΕΓΣΑ87
$\phi = 38^{\circ}17'45.55''$	$x = 309681.24$
$\lambda = 21^{\circ}49'31.27''$	$y = 4242605.76$

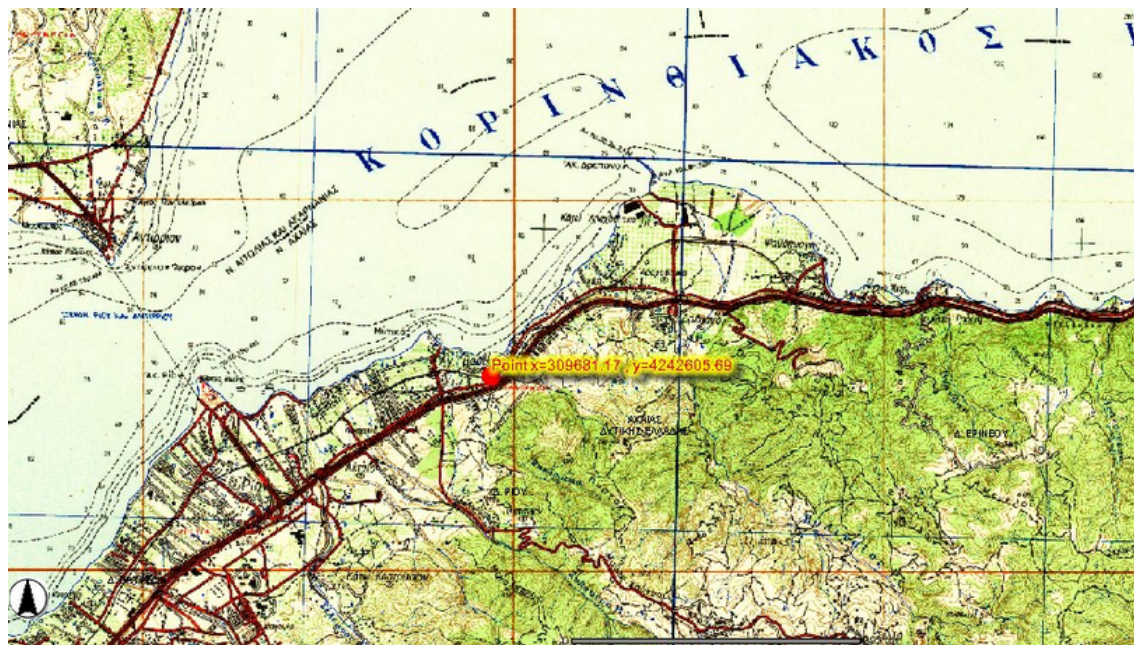
Ο Ναός είναι χτισμένος πολύ κοντά στην ευρεία κοίτη του δυτικού κλάδου του χειμάρρου Ξυλοκέρα. βλπ. Χάρτης 4.5

Γεωμορφολογία

Για την κατανόηση της γεωλογικής δομής μιας περιοχής διακρίνουμε συνήθως 2 ενότητες:

- ενότητα σχηματισμών υποβάθρου
- ενότητα σχηματισμών επικαλύμματος

Στο Νομό Αχαΐας οι σχηματισμοί του υποβάθρου είναι παλαιότεροι, αλπικής γένεσης (ζώνη Ωλονού – Πίνδου) και οι σχηματισμοί του επικαλύμματος είναι νεότεροι (Πλειο-Τεταρτογενείς αποθέσεις).



Σχήμα 4.5: Στίγμα οικοπέδου, Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, Γεω-Ευρετήριο

Στα πλαίσια της κλίμακας του έργου, θα επικεντρωθούμε στο Πλειο-Τεταρτογενές επικάλυμμα και θα το θεωρήσουμε ως γεωλογικό υπόβαθρο του μνημείου.

Η περιοχή του Αγ. Νικολάου ανήκει στην ημιορεινή ζώνη της λεκάνης του χειμάρρου Ξυλοκέρα και το μορφολογικό της ανάγλυφο είναι λοφώδες.

Το γεωλογικό υπόβαθρο του Ναού

- αποτελείται από κυανές Μάργες και αμμούχες Αργίλους Πλειοκαινικής – Πλειστοκαινικής ηλικίας
- με παρεμβολές χαλαρού ψηφιδωπαγούς-κροκαλοπαγούς (τοπική συγκόλληση)
- το πάχος του σχηματισμού είναι ~ 300 m
- τα ανώτερα τμήματα του σχηματισμού είναι αποσαθρωμένα.

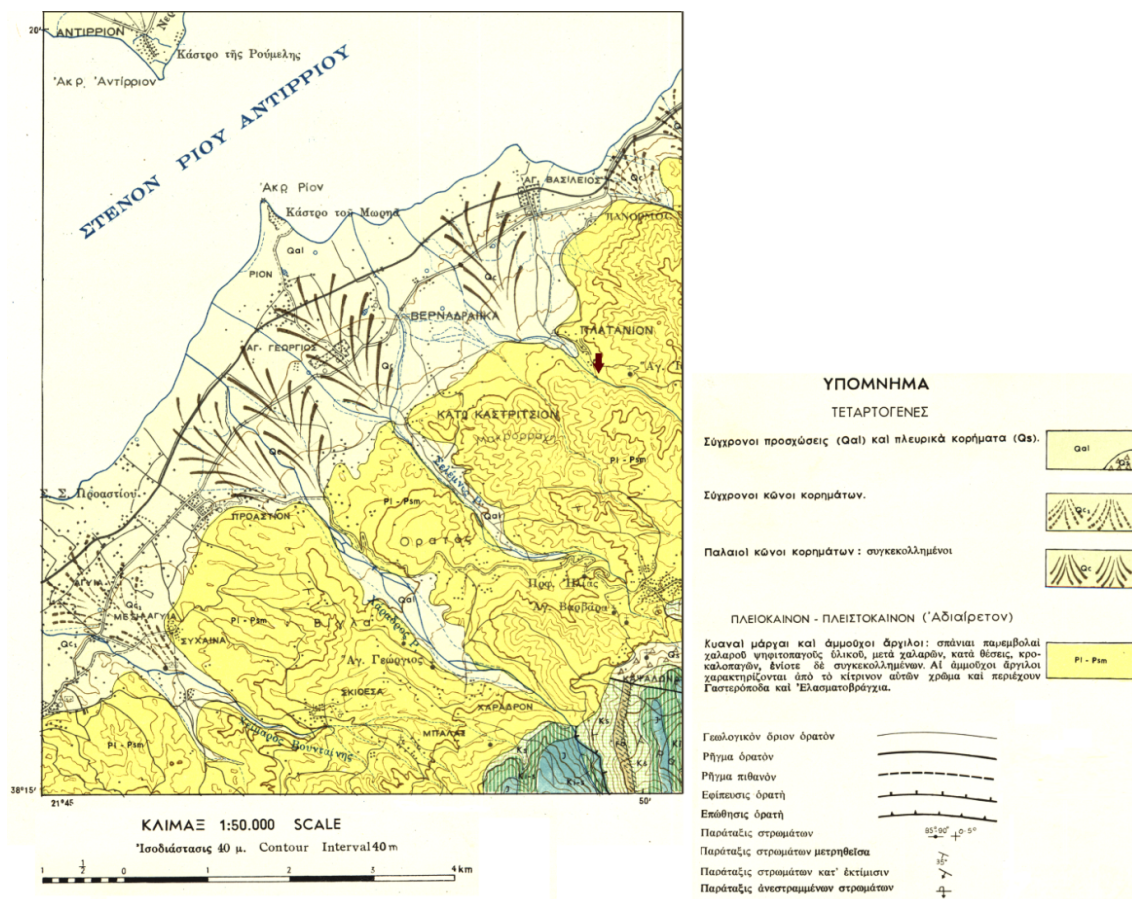
Στο Πλατάκι Αχαΐας συναντώνται στην επιφάνεια, πρόσφατα αλλουβιακά ριπίδια και τοπικά κορηματικά υλικά με διάσπαρτα χαλίγια και κροκάλες. Το γεωλογικό υπόβαθρο του τόπου χαρακτηρίζεται από χαμηλή διαπερατότητα, επομένως η κυκλοφορία του νερού αναμένεται στο ανώτερο αποσαθρωμένο τμήμα του σχηματισμού.

Η κυκλοφορία και η ανάπτυξη των εποχιακών ή μόνιμων Υδροφόρων Οριζόντων, βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία με το χείμαρρο Ξυλοκέρα, και αναμένεται στα υλικά του ριπίδιου.

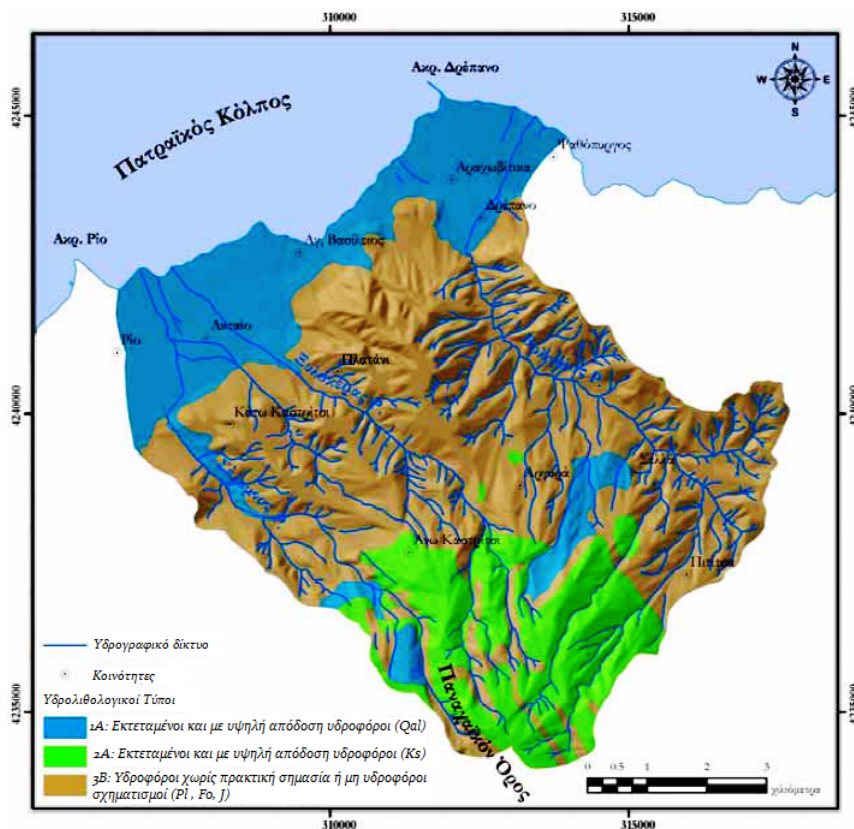
Ποτάμιο Σύστημα Ξυλοκέρα

Ο Ξυλοκέρας, ένα από τα 4 ποτάμια του δήμου Ρίου, κατά τους ([32] Alexander & Seger 2009) και ([17] Zelilidis 1998), ανήκει στο σύστημα συνεχούς ροής, όπου η ροή δεν άλλαξε από τη στιγμή της δημιουργίας του. Το ανώτερο τμήμα του διατρέχει Προ-Νεογενές υπόβαθρο και Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα, και το κατώτερο τμήμα του διατρέχει Ολοκαινικές αποθέσεις.

Σύμφωνα με τους ([26] Kontopoulos & Zelilidis 1997) ο Ξυλοκέρας κινείται μέσα σε



Σχήμα 4.6: Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδος, Φύλλο Ναύπακτος, ΙΓΜΕ χαρτογράφηση 1966-67 . Κόκκινο βέλος επισημαίνει την περιοχή έρευνας.



Σχήμα 4.7: Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης. ([10] Παγώνας 2009)

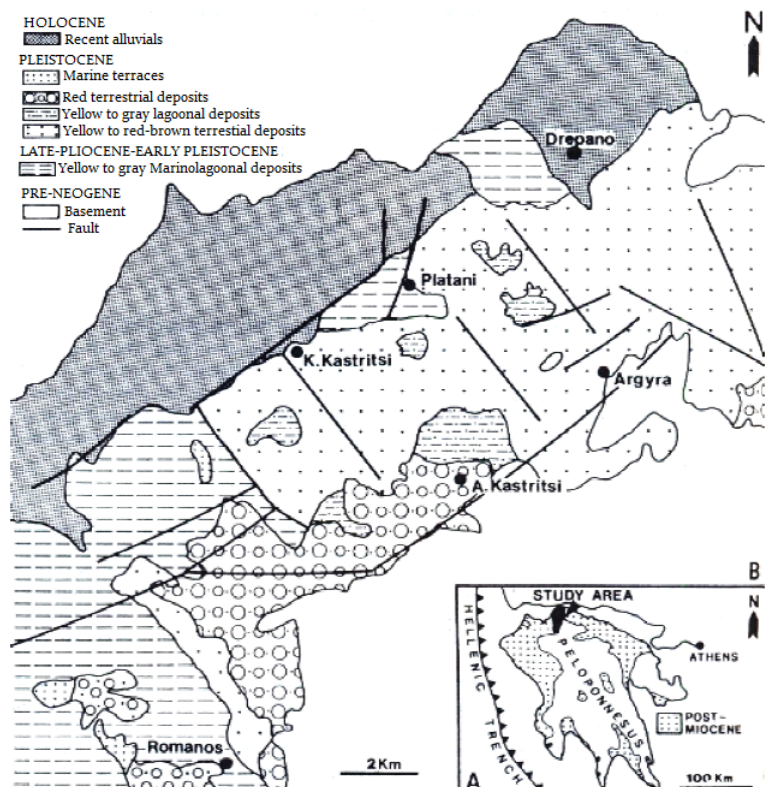
ρηξιγενείς ζώνες μετασχηματισμού. Στο ανώτερο τμήμα του ποταμού αναπτύσσονται τα Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα, ο ρυθμός ανύψωσης φτάνει τα $0,6 \text{ cm/year}$ και για αυτό το λόγο υπάρχουν έντονα ανάγλυφα.

Το 2009 σημειώθηκε κατολίσθηση στη περιοχή Πλατανίου, μέσα σε μια τέτοια ρηξιγενή ζώνη μετασχηματισμού, καθώς η περιοχή βρίσκεται μεταξύ ανώτερου και κατώτερου τμήματος του Ξυλοκέρα ποταμού. Ο μεγάλος ρυθμός αύξησης στο ανώτερο τμήμα της λεκάνης απορροής, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ρηξιγενούς ζώνης μετασχηματισμού, προκαλεί έντονα κατολισθητικά φαινόμενα (αντίστοιχες περιοχές Σελλών, Αργυρών, Άνω Καστρισίου).

Δύο κύρια κανονικά ρήγματα ΒΑ/κής διεύθυνσης ελέγχουν την εξέλιξη του κατώτερου τμήματος. Τα ρήγματα αυτά τοποθετούνται, το ένα μπροστά από την παράκτια ζώνη και μέσα στη θάλασσα και το άλλο στην περιοχή όπου αλλάζει το ανάγλυφο της περιοχής (Κάτω Καστρίτσι, Πλατάνι)

Τεκτονική

Οι [20] Doutsos et al . 1998 απέδειξαν ότι οι τάφοι του Κορινθιακού και του Πατραϊκού δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια διαστολής στη περιθωριακή λεκάνη του Αιγαίου άξου. Η τάφος Ρίου-Αντιρρίου συνδέει τις παραπάνω τάφρους σαν ζώνη μετασχηματισμού (transfer zone). Η συνολική αυτή εξέλιξη λαμβάνει χώρα με τη δημιουργία δύο συστημάτων ρηγμάτων τα οποία παρουσιάζουν ορθογώνιο σχέδιο (fault pattern) επιφανειακής εξάπλωσης μεταξύ τους. Αναλυτικότερα έχουμε:



Σχήμα 4.8: Γεωλογικό χάρτης της περιοχής μελέτης όπου διακρίνονται οι ρηξιγενείς ζώνες και η κατανομή των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων ([26] Kontopoulos & Zelilidis 1997)

- ένα κύριο ΔΒΔ/κής διεύθυνσης σύστημα κανονικών ρηγμάτων και ΒΒΑ/κών ρηγμάτων μετασχηματισμού (διαστολή λεκάνης Αιγίου)
- ένα δευτερεύον σύστημα ΑΒΑ/κών κανονικών ρηγμάτων και ΒΒΔ/κών ρηγμάτων μετασχηματισμού (ανύψωση περιοχής όπισθεν του Ελληνικού τόξου)

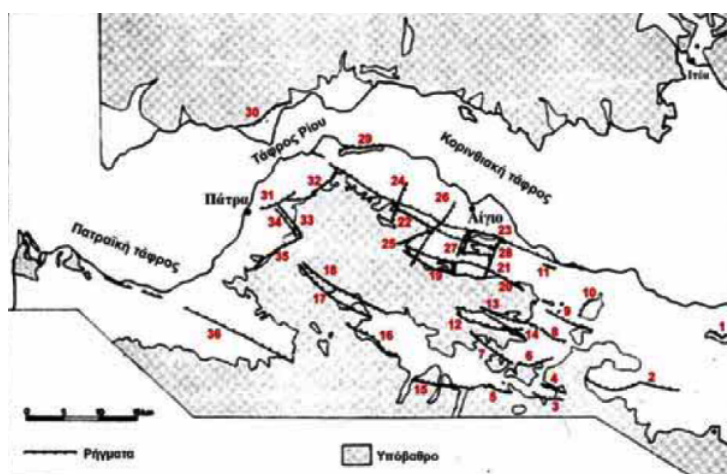


Σχήμα 4.9: Ρήγματα της περιοχής του Κορινθιακού Κόλπου ([20] Doutsos et al. 1988)

Σεισμοτεκτονική

Η ρηξιγενής τεκτονική της περιοχής μελέτης είναι ιδιαίτερα ενεργή μέχρι σήμερα, γι' αυτό και είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη σεισμικότητα σε αυτή. Στην Εικόνα 4.10 αριθμούνται τα ενεργά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής έρευνας, η οποία λόγω της αυξημένης σεισμικότητας,

κατατάσσεται στην ζώνη II σεισμικής επικινδυνότητας με τιμές εδαφικών επιταχύνσεων 0.24 g.



Σχήμα 4.10: Χάρτης ενεργών ρηγμάτων ([21] Doutsos & Poulimenos 1992, [5] Δούτσος 2000)

Παρατηρήσεις

Με βάση το ότι:

- οι μάργες είναι υλικά που κατατάσσονται στην κατηγορία των σκληρών εδαφών – μαλακών βράχων χαμηλής μέχρι εξαιρετικά χαμηλής αντοχής
- οι άργιλοι του σχηματισμού είναι αμμούχοι
- ο σχηματισμός έχει άμεση επικοινωνία με γειτονικό χείμαρρο
- η παρουσία νερού σε αμμώδεις στρώσεις αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την ευστάθεια πρανών και υπόγειων εκσκαφών
- ο μανδύας αποσάθρωσης και τα κορηματικά υλικά είναι ασταθή
- η περιοχή γειτονεύει με ρηξιγενή ζώνη μετασχηματισμού
- και υπάρχει αυξημένη σεισμική επικινδυνότητα

συμπεραίνουμε ότι οι υπεδαφικές συνθήκες του μνημείου δεν ευνοούν τη κατασκευή.

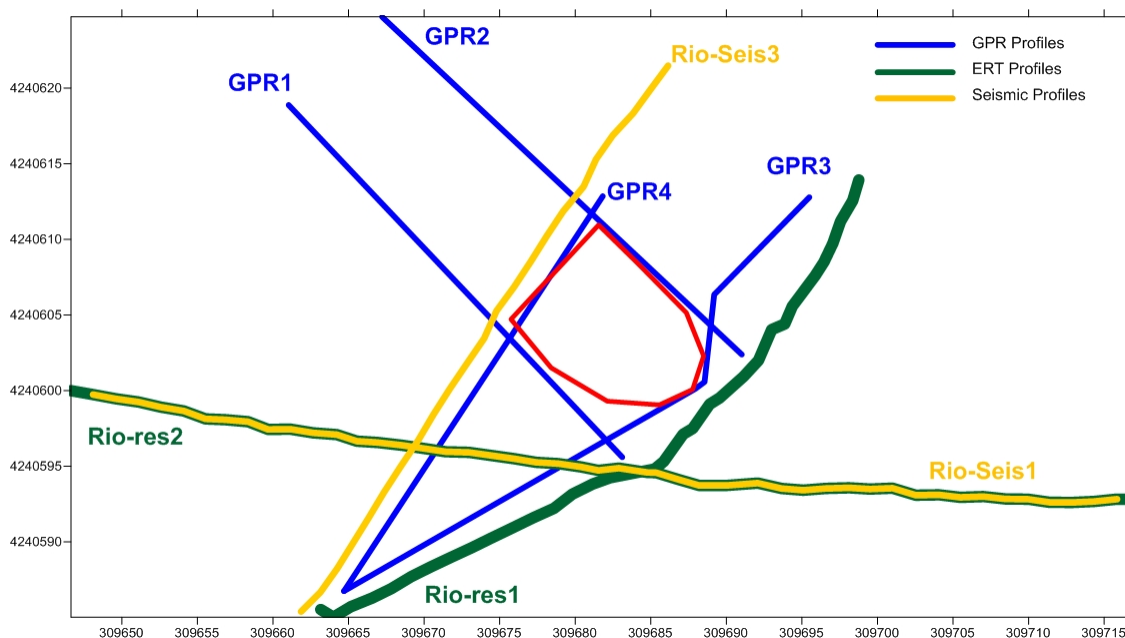
4.4 Μετρήσεις Υπαίθρου και η Ερμηνεία τους

Η πρώτη γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η γεωηλεκτρική τομογραφία και είχε σκοπό την απεικόνιση του υπεδάφους σε διαστάσεις γεωηλεκτρικές τομές. Αυτές οι γεωηλεκτρικές τομές μας βοήθησαν να αποκτήσαμε μια πρώτη εικόνα για το πώς εκτείνονται στο χώρο οι εντοπισμένοι σχηματισμοί.

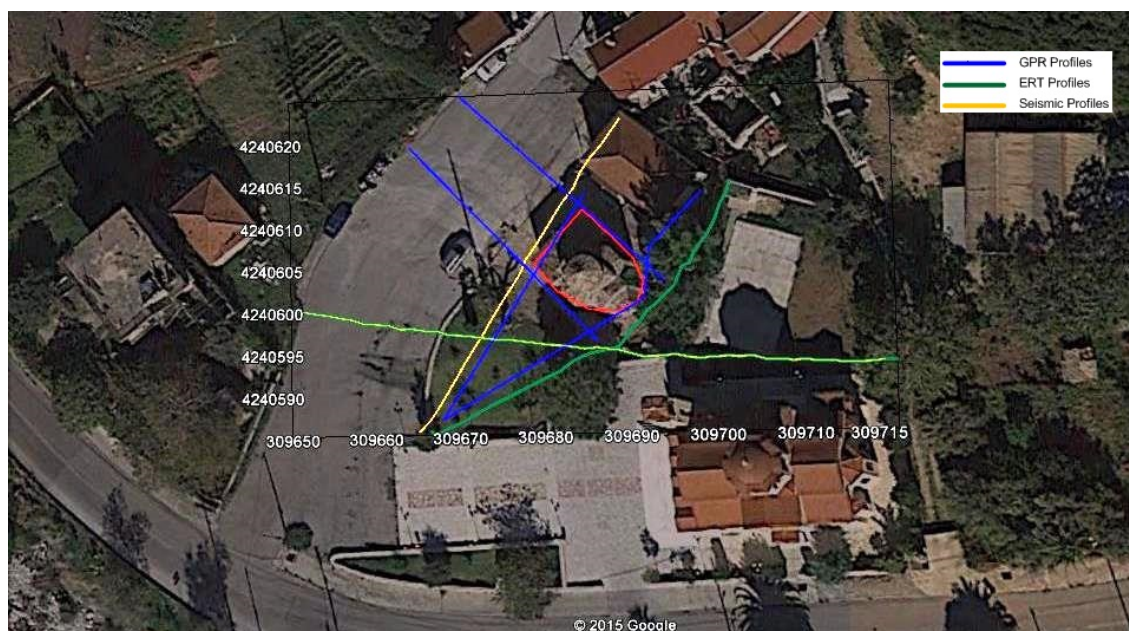
Στη συνέχεια έγιναν οι σεισμικές μετρήσεις, όπου αξιοποιώντας ταυτόχρονα και τις πρόκυπτουσες δισδιάστατες γεωηλεκτρικές τομές, προσπαθήσαμε να προσδιορίσουμε τους υπόγειους ορίζοντες, να βγάλουμε συμπεράσματα αναφορικά με τη συνεκτικότητα, να ξεχωρίσουμε δηλαδή τα χαλαρά εδαφικά υλικά από το γεωλογικό υπόβαθρο. Ακόμα, η μέθοδος των σεισμικών μας έδωσε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων P και S. Πληροφορία η οποία θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω έρευνα των Σεισμολόγων, για τη δημιουργία σεισμικών μοντέλων, έτσι ώστε να προσδιοριστεί από τους Πολιτικούς Μηχανικούς ποια θα είναι η αντίδραση του κτηρίου σε καταπόνηση από σεισμό. Οι ταχύτητες των P-κυμάτων υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης. Για τα S-κύματα απαιτείται ανάλυση επιφανειακών κυμάτων, η οποία υπερβαίνει τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, έγιναν μετρήσεις γεωραντάρ, με σκοπό τον εντοπισμό κυρίως ανθρωπογενών πεπερασμένων δομών, τοιχίων, σωληνώσεων, θεμελίωσης κλπ. Στο πλαίσιο της ευρύτερης έρευνας στη κατασκευή εφαρμόστηκαν μετρήσεις γεωραντάρ και σε ορισμένα δομικά στοιχεία του ναού (τείχη και οροφή).

Οι μετρήσεις όλων των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στη γεωφυσική έρευνα αποτυπώνονται στις Εικόνες 4.11 και 4.12. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται κάτοψη του ναού, με πράσινο χρώμα σημειώνονται οι μετρήσεις της σεισμικής μεθόδου και με μπλε οι μετρήσεις της μεθόδου γεωραντάρ.



Σχήμα 4.11: Κάνναβος μετρήσεων για το σύνολο των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στο Ναό Αγίου Νικολάου, Πλατάκι Αχαΐας. απεικόνιση με Surfer



Σχήμα 4.12: Δορυφορική Απεικόνιση της Γεωφυσικής Έρευνας, Google Earth 2015

4.4.1 Ηλεκτρική Μέθοδος

Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης ήταν η ηλεκτρική. Πραγματοποιήθηκαν δύο τομές (Rio-res1, Rio-res2), σε διεύθυνση BA-NΔ και A-Δ αντίστοιχα, δηλαδή τεμνόμενες μεταξύ τους (βλπ. Εικόνα 4.11 και 4.12). Η απόσταση των ηλεκτροδίων για τις τομές Rio-res1 και Rio-res2 ήταν 1.5 m . Στη Rio-res1 είχαμε μήκος τομής ~ 50m. Στη Rio-res2 είχαμε μήκος τομής ~ 72 m. Για κάθε γεωηλεκτρική τομή, χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις ηλεκτροδίων Dipole-Dipole και Schlumberger.

4.4.1.1 Εξοπλισμός

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών ειδικής αντίστασης είναι το *SYSCALPro*. Πρόκειται για διάταξη με ένα διαβιβαστή ρεύματος, ο οποίος στέλνει ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και στη συνέχεια μετράει την τάση που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Ο μετρητής *SYSCALPro* αποτελείται από 10 ταυτόχρονα κανάλια λήψης δεδομένων, είναι 1000 V – 250 W – 2.5 A. Έχει τη δυνατότητα αυτόματου injection ranging και έχει την επιλογή αλλαγής των ηλεκτροδίων.

Γενικά Χαρακτηριστικά του μηχανήματος:

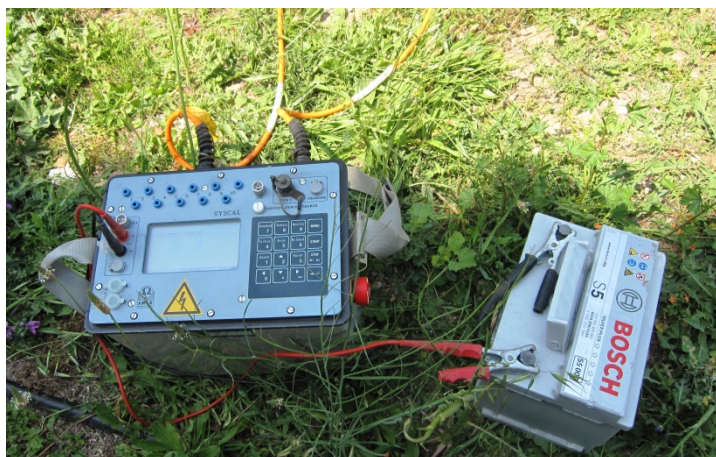
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως 4000 ηλεκτρόδια
- Μνήμη flash Δεδομένων: πάνω από 21 000 αναγνώσεις
- Τροφοδοσία: δύο εσωτερικές επαναφορτιζόμενες 12V, 7.2 A μπαταρίες, προαιρετική εξωτερική μπαταρία 12 V του αυτοκινήτου μπορεί να συνδέεται με το τμήμα πομπού
- Παντός καιρού



Σχήμα 4.13: Φωτογραφία άποψη προς Βορρά, Riores1, Μετρήσεις Ηλεκτρικής Μεθόδου, Μάιος 2015

- Θήκη που δεν καταστρέφεται, δεν φθίρεται
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 έως +70 °C
- Διαστάσεις (SYSCAL Pro Switch-48): 31 × 23 × 36 cm
- Βάρος (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg

([3] IRIS INSTRUMENTS: *SYSCAL Pro*.Manual Guide)



Σχήμα 4.14: Φωτογραφία διάταξης μετρητή *SYSCAL Pro* και ηλεκτρικής πηγής. Μάιος 2015

4.4.1.2 Ψηφιακή Επεξεργασία των Μετρήσεων

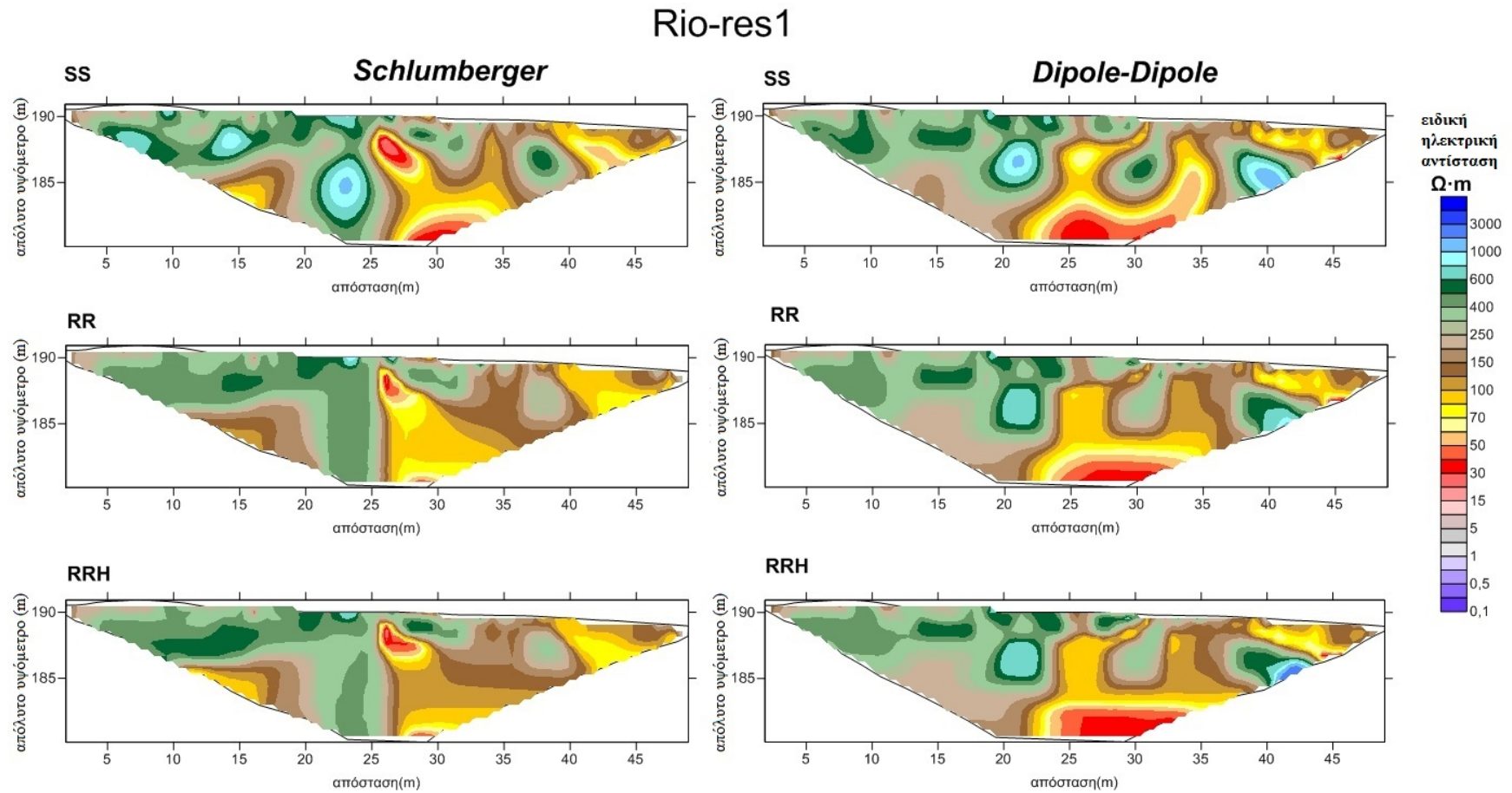
Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία λήψης των μετρήσεων στην ύπαιθρο, τότε ακολούθησε η ανάλυση και η επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομών. Για τη στατιστική διαχείριση, την επεξεργασία και ερμηνεία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res2DInv [27] (Loke & Barker, 1996). Το πρόγραμμα Res2DInv μας δίνει τη δυνατότητα να απεικονίσουμε το γεωηλεκτρικό μοντέλο βάσει της διακύμανσης της ειδικής ηλεκτρικής σε κάθε τομή, με μεθόδους παλινδρόμησης. Η παραπάνω διαδικασία, δηλαδή το να ξεκινήσουμε από τις γεωφυσικές μετρήσεις και να καταλήξουμε σε γεωλογική απεικόνιση (στην ουσία γεωηλεκτρικό μοντέλο) με αλληπάλληλες παλινδρομήσεις, ονομάζεται μέθοδος της αντιστροφής (inversion). Η ονομασία «αντιστροφή» έγκειται στο ότι δεν έχουμε ως αρχική παραδοχή τη γεωλογία (κανονικά), αλλά λειτουργούμε «ανάστροφα». Για τη μέθοδο της αντιστροφής (inversion), αρχικά επιλέξαμε τη Διακριτοποίηση Μοντέλου (Model Discretization) και από εκεί τη τελειοποίηση του μοντέλου (use model refinement), προβλέποντας έτσι μετρήσεις σε σημεία που δεν υπάρχει πληροφορία.

Επιλέξαμε για τη σχεδίαση του μοντέλου κατά την αντιστροφή (inversion) να ακολουθηθούν 3 διαδικασίες:

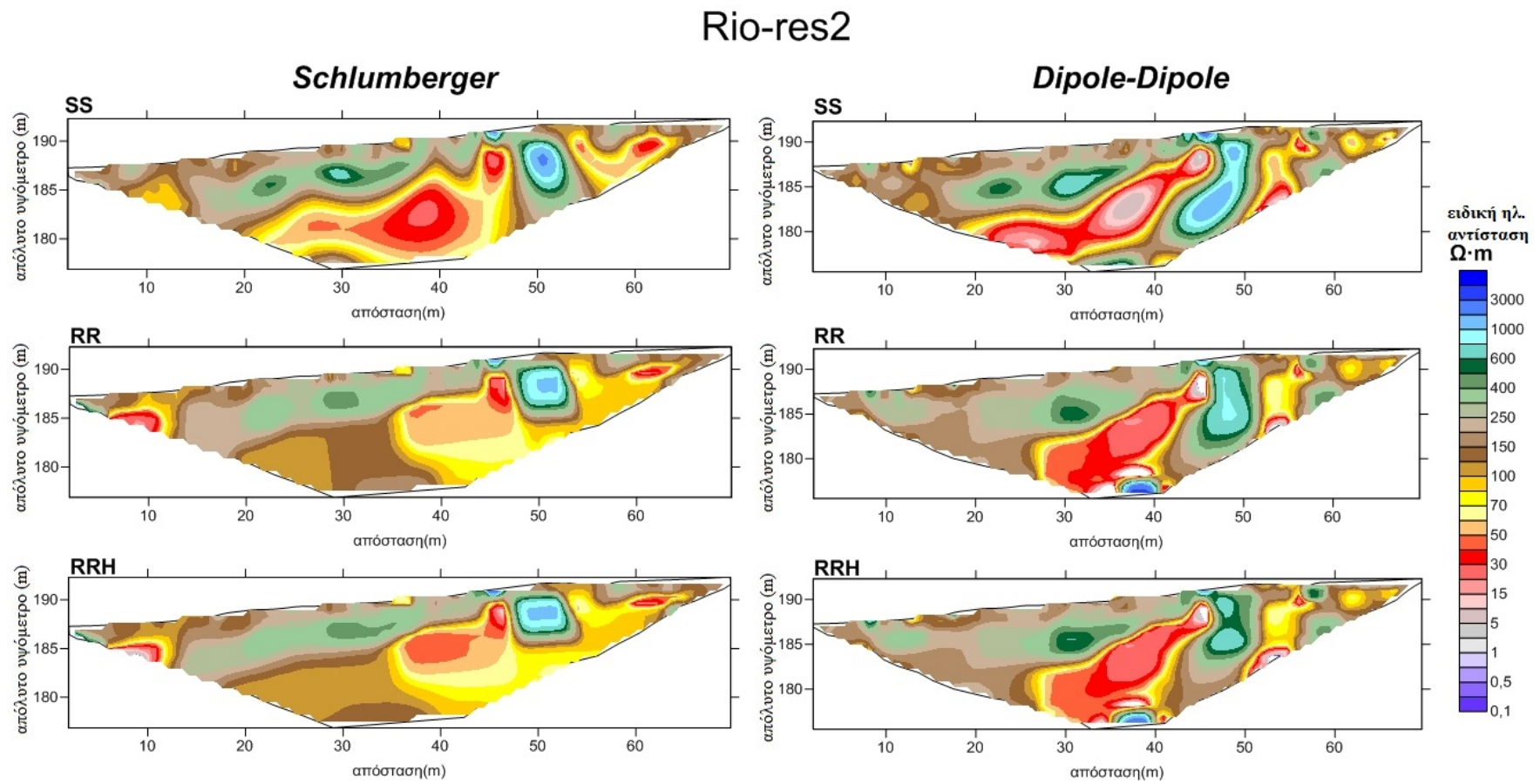
1. **Standard – Standard (SS)** Έγιναν τουλάχιστον 9 απλές παλινδρομήσεις με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (least squares). Με τον όρο απλή παλινδρόμηση αναφερόμαστε στο ότι **δεν** βάλουμε περιορισμούς (constraints) στη μεταβολή των γεωηλεκτρικών παραμέτρων.
2. **Robust – Robust (RR)** Έγιναν τουλάχιστον 9 παλινδρομήσεις με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, μόνο που σε αυτή τη διαδικασία οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και στη παρουσία «θορύβου»..
3. **Robust – Robust – Horizontal (RRH)** Μετά από τις 2 παραπάνω ερμηνείες SS και RR μπορούμε να ρυθμίσουμε την αντιστροφή ώστε να απορρίπτεται μετρήσεις οι οποίες είναι αντίθετες με αυτό που αναμένουμε βάσει της γεωλογίας της περιοχής. Με άλλα λόγια μπορούμε να κάνουμε σίγαση (Damping) του θορύβου στις μετρήσεις. Στην RRH θεωρούμε ότι τα στρώματα είναι σχετικά οριζόντια και δίνεται έμφαση στη κάθετη μεταβολή της ειδικής αντίστασης (όταν ενδιαφερόμαστε περισσότερο για τη στρωματογραφία και λιγότερο για τον εντοπισμό πεπερασμένων δομών).

Από την αξιολόγηση των τομών που προκύπτουν (Εικόνα 4.15 και 4.16,) καταλήγουμε στην ανάλυση των τομών με ρύθμιση (RRH) Robust-Robust-Horizontal για διατάξεις Schlumberger και Dipole-Dipole. Αυτές τις τομές θα ερμηνεύσουμε για να ορίσουμε τη στρωματογραφία και τυχόν τοπικές δομές. Βάσει του αρχικού μας στόχου να αποτυπώσουμε την οριζόντια στρωματογραφία, θα δώσουμε μεγαλύτερη έμφαση στη διάταξη της Schlumberger RRH.

4.4.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων



Σχήμα 4.15: Γεωηλεκτρική Τομογραφία Rio-res1, με τις 2 διατάξεις ηλεκτροδίων και τις 3 διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων

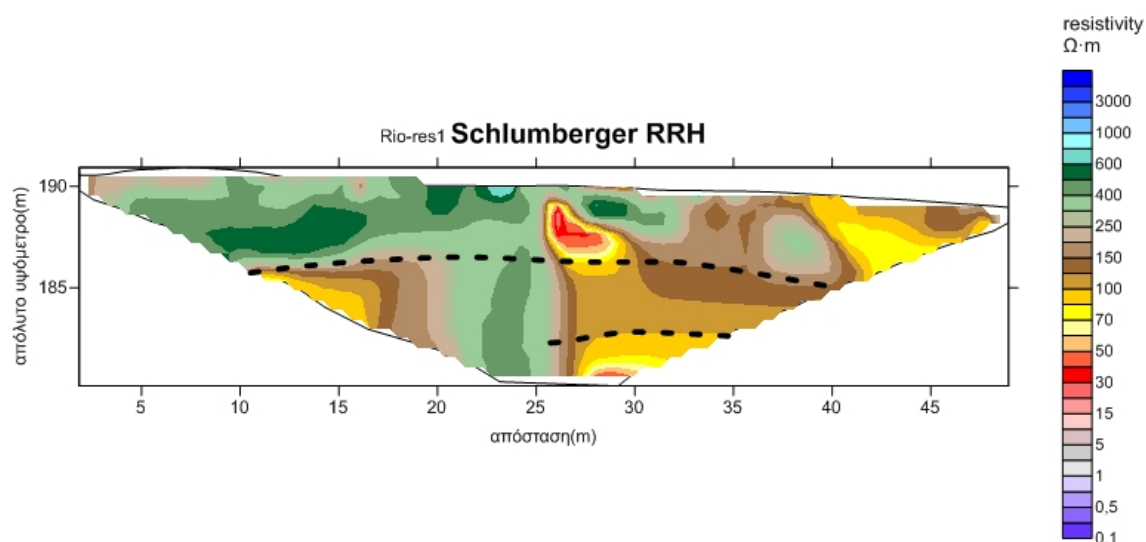


Σχήμα 4.16: Γεωηλεκτρική Τομογραφία Rio-res2, με τις 2 διατάξεις ηλεκτροδίων και τις 3 διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων

4.4.1.4 Ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομών

4.4.1.4.1 Rio-res1

Όπως φαίνεται από τη τομή με διάταξη Schlumberger RRH (Εικόνα 4.17), στην περιοχή της έρευνας ορίζονται τρία σχεδόν οριζόντια στρώματα. Οι διακεκομμένες γραμμές τονίζουν τα όρια των στρωμάτων αυτών.

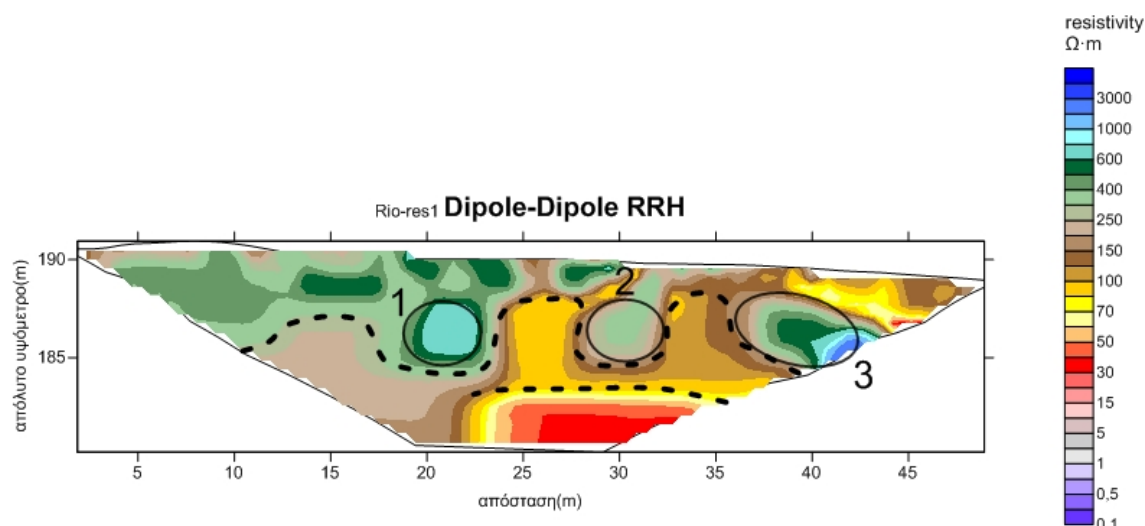


Σχήμα 4.17: Γεωηλεκτρική Τομή Rio-res1 σε διάταξη Schlumberger

Στο κατώτερο στρώμα παρατηρούνται χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αναφερόμαστε δηλαδή σε περιοχή λεπτόκοκκων και μη συνεκτικών υλικών. Η κατώτερη διακεκομμένη γραμμή είναι το όριο κάτω από το οποίο (δηλαδή σε βάθος $\sim 5m$) εντοπίζεται το Πλειοκαινικό – Πλειστοκαινικό Υπόβαθρο Μαργών και Αργίλων.

Επάνω από τις Μάργες και τις Αμμούχους Αργίλους εμφανίζεται ένα ενδιάμεσο στρώμα με σχετικά μέσες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, το οποίο πιθανώς αποτελεί μια ενδιάμεση ζώνη μετάβασης από τη Μαργαϊκή-Αργιλική φάση προς την επιφάνεια. Σε αυτή τη ζώνη αναμένουμε επίσης παλαιούς και νέους κώνους κορημάτων.

Ο χώρος που ορίζεται από την άνω διακεκομμένη γραμμή του ενδιάμεσου στρώματος μέχρι την επιφάνεια υποδηλώνει σύγχρονες αποθέσεις του χειμάρρου, ανθρώπινη δραστηριότητα, τοπικές εκσκαφές και κατασκευές.



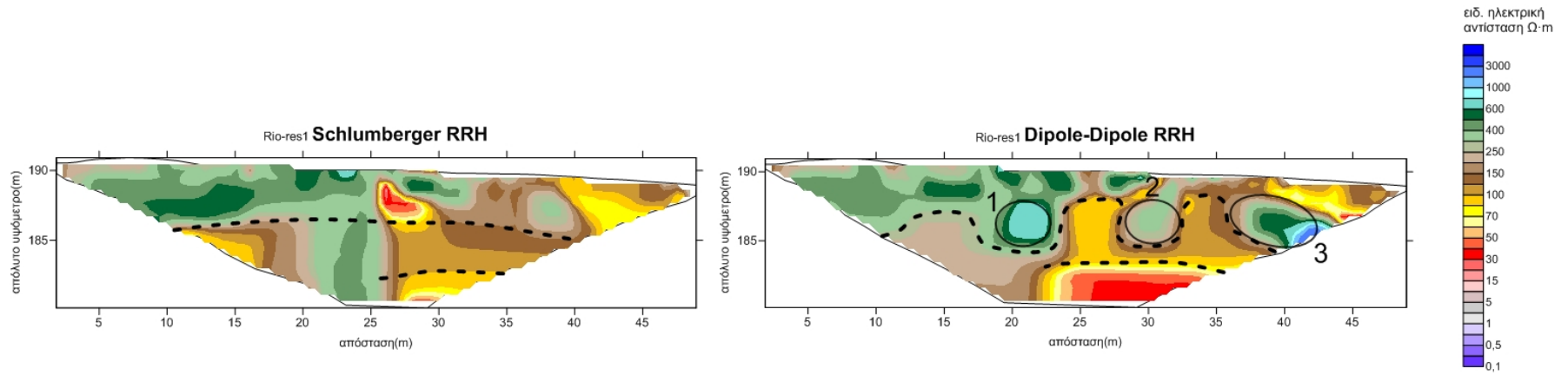
Σχήμα 4.18: Γεωηλεκτρική Τομή Rio-res1 σε διάταξη Dipole-Dipole RRH

Κατά την ερμηνεία της γεωηλεκτρικής τομής με διάταξη Dipole-Dipole, παρατηρούμε ότι είναι λιγότερο ευκρινής η διάκριση των τριών στρωμάτων, έτσι όπως αυτή αποτυπώνεται στη Schlumberger. Αυτό ήταν κάτι που αναμέναμε καθώς η Dipole-Dipole εμφανίζει κυρίως τοπικές δομές (ανωμαλίες) και η Schlumberger αντίστοιχα στρωματογραφία.

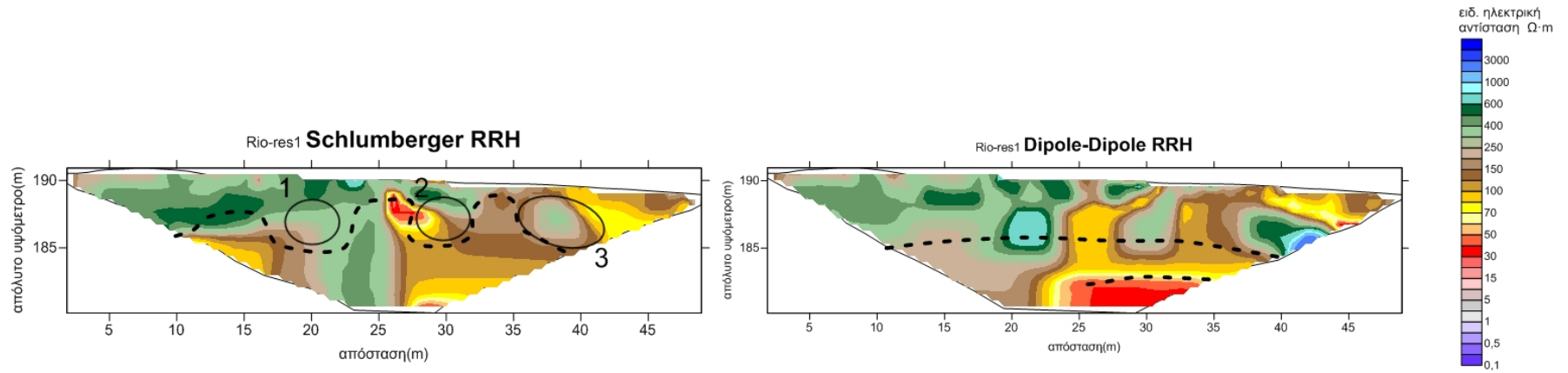
Στη τομή της Dipole-Dipole (Εικόνα 4.18) έχουν σημειωθεί περιοχές τοπικών ανωμαλιών οι οποίες ερμηνεύονται ως εξής:

- Η **Περιοχή 1** με πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης εκτείνεται σε βάθος $\sim 2 - 3m$. Απεικονίζει χώρο έργων ανθρωπογενούς προέλευσης.
- Η **Περιοχή 2** με σχετικά υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχετίζεται με ανθρώπινες επεμβάσεις.
- Η **Περιοχή 3** με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ορίζει πιθανότατα αγωγό καθώς σε πολύ κοντινή απόσταση βρίσκονταν τουαλέτες και βρύσες.

Με σκοπό τη «συσχέτιση» των δυο παραπάνω διατάξεων (Schlumberger και Dipole-Dipole), ακολουθεί γραφική σύγκριση των παρατηρούμενων στρωματογραφικών ορίων και των τοπικών ανωμαλιών. Ενώ τελικά καταλήγουμε στο πιθανότερο μοντέλο, το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με τη γεωμορφολογία της περιοχής.



Σχήμα 4.19: Αρχική ερμηνεία Schlumberger, Dipole-Dipole



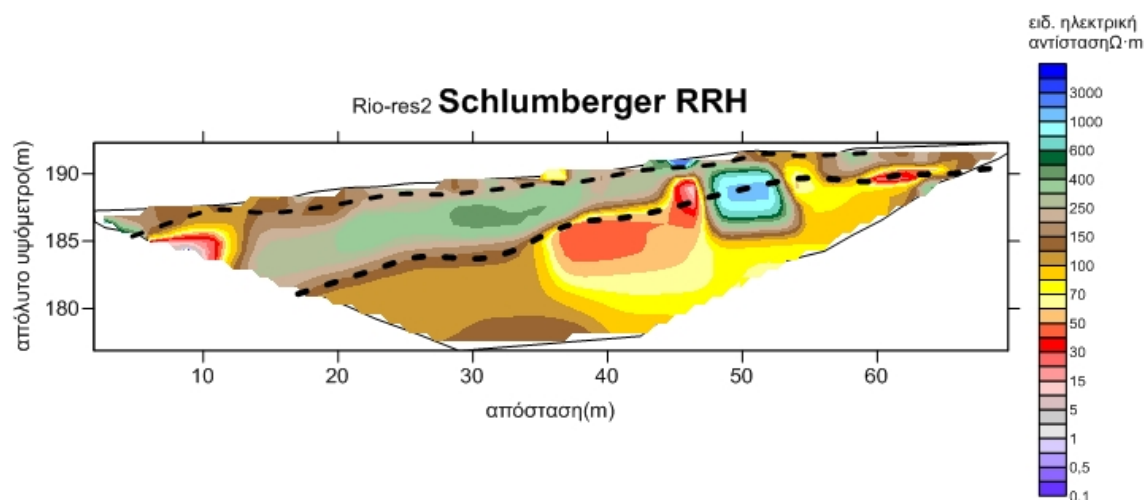
Σχήμα 4.20: Εναλλαγή των ερμηνειών

Η Εικόνα 4.20 αποτυπώνει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε διάταξης. Στη Schlumberger έχουμε μια πολύ καλή αποτύπωση των στρωμάτων, όμως οι τοπικές ανωμαλίες δεν είναι ευδιάκριτες. Μάλιστα στην περίπτωση μας (**Περιοχή 1**) μια τοπική ανωμαλία αλλοιώνει την εικόνα (κατακόρυφη περιοχή με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης).

Στη Dipole-Dipole είναι εμφανής η αδυναμία της να αποτυπώσει τα στρωματογραφικά όρια με τρόπο που να συμφωνεί με τη γεωμορφολογία της περιοχής (αναμένουμε οριζόντια στρωματογραφία).

Τελικά αποδεχόμαστε τα στρωματογραφικά όρια που αποτυπώνονται από την Schlumberger και τις τοπικές δομές που επισημαίνει η Dipole-Dipole.

4.4.1.4.2 Rio-res2



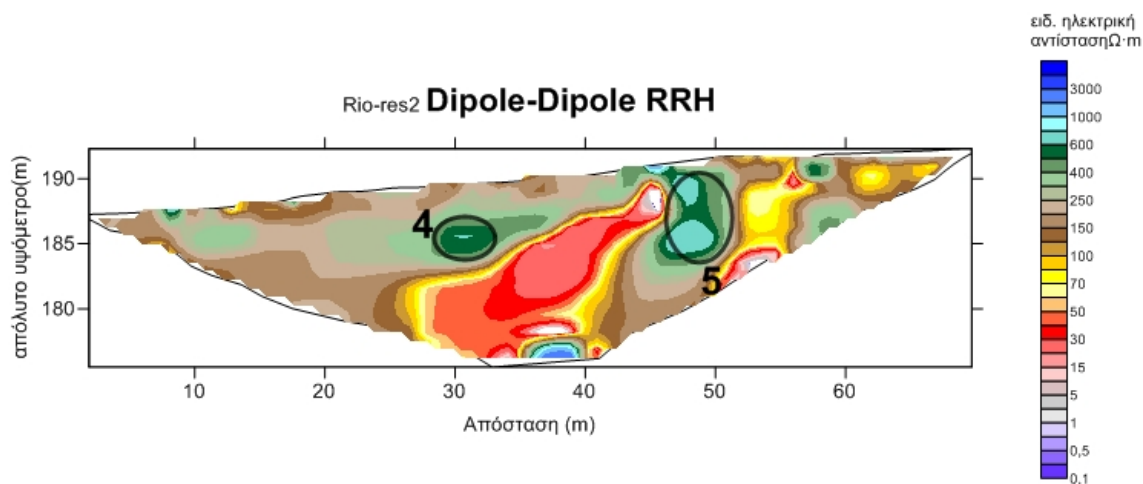
Σχήμα 4.21: Γεωηλεκτική Τομή Rio-res2 σε διάταξη Schlumberger

Στην ερμηνεία της Rio-res2 Schlumberger RRH (Εικόνα 4.21) αποτυπώνονται τα τρία στρώματα καθώς και η κλίση αυτών.

Το κατώτερο στρώμα αντιστοιχεί στο Πλειοκαινικό – Πλειστοκαινικό Υπόβαθρο Μαργών και Αργίλων (βάθος 5-7m).

Επάνω από τις Μάργες και τις Αμμούχους Αργίλους εμφανίζεται ένα ενδιάμεσο στρώμα με σχετικά μέσες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, το οποίο πιθανότατα αποτελείται από παλαιότερους κώνους κορημάτων και τη ενδιάμεση μεταβατική φάση του Μαργαϊκού-Αργιλικού Υποβάθρου.

Τέλος το επιφανειακό στρώμα σχετίζεται με σύγχρονες αποθέσεις, ανθρώπινη δραστηριότητα, τοπικές εκσκαφές και κατασκευές.



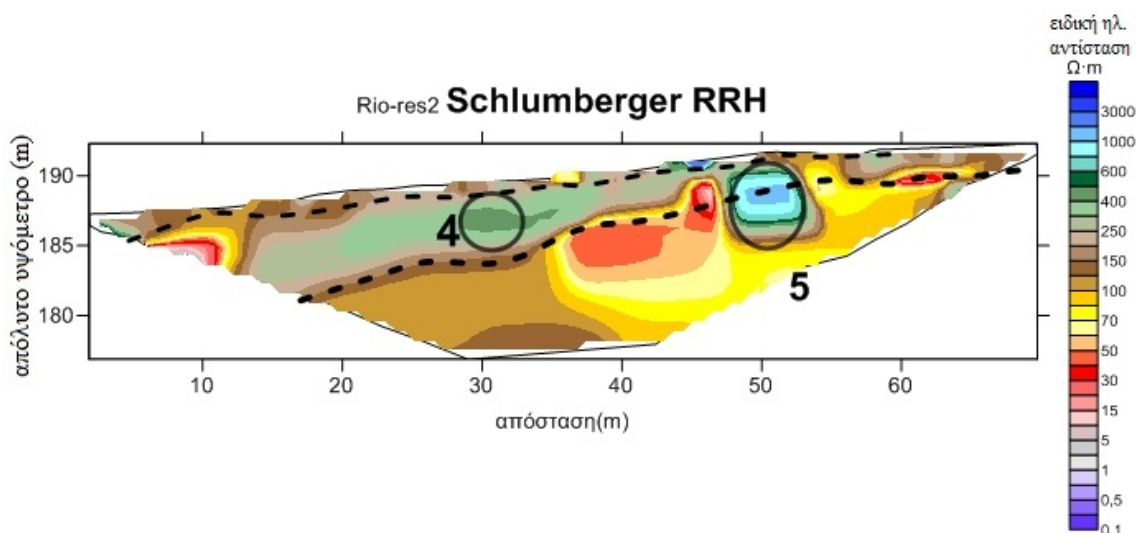
Σχήμα 4.22: Γεωηλεκτική Τομή Rio-res2 σε διάταξη Dipole-Dipole

Στην Rio-res2 Dipole-Dipole RRH (Εικόνα 4.22) αποτυπώνονται δύο τοπικές δομές.

Η **Περιοχή 4** με πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης εκτείνεται σε βάθος $\sim 2m$. Απεικονίζει χώρο έργων ανθρωπογενούς προέλευσης.

Η **Περιοχή 5** με πολύ υψηλές ως προς το γύρω χώρο εκτείνεται σε βάθος $\sim 5 - 6m$ και εντοπίζεται κάτω από μικρό γηπεδάκι καλαθοσφαίρισης επικαλυμμένο με τσιμέντο. Σχετίζεται με ανθρωπογενή κατασκευή και πιθανότατα αναφέρεται σε υπόγεια εκσκαφή ή αγωγό σχετικό με την εκκλησία Αγίας Παρασκευής που βρίσκεται πολύ κοντά.

Στην περίπτωση της Rio-res2 οι τοπικές ανωμαλίες είναι εμφανές και στη διάταξη της Schlumberger. (βλπ. Εικόνα 4.23)



Σχήμα 4.23: Τελική ερμηνεία Rio-res2 Schlumberger RRH



Σχήμα 4.24: Δορυφορική Απεικόνιση των ERT τομών και των περιοχών τοπικής ανωμαλίας 1,2,3,4,5

4.4.2 Σεισμική Μέθοδος

Η δεύτερη μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης ήταν η σεισμική. Πραγματοποιήθηκαν δύο τομές (Rio-Seis1, Rio-Seis3), σε διεύθυνση Α-Δ και Ν-Β αντίστοιχα, δηλαδή τεμνόμενες γραμμές (βλπ. Εικόνα 4.12 και 4.11).

Η ενδιαμέση απόσταση των γεωφώνων για την τομή Rio-Seis1 ήταν 3m και για την τομή Rio-Seis3 ήταν 2m.

Για την Rio-Seis1 στέλναμε σήμα (χτύπημα) ανά γεώφωνο (δηλαδή ανά 3m).

Για την Rio-Seis3 στέλναμε σήμα (χτύπημα) ανά 2 γεώφωνα (δηλαδή ανά 4m)

Στη Rio-Seis1 το μήκος τομής ήταν ~ 72m.

Στη Rio-res3 το μήκος τομής ήταν ~ 44m.

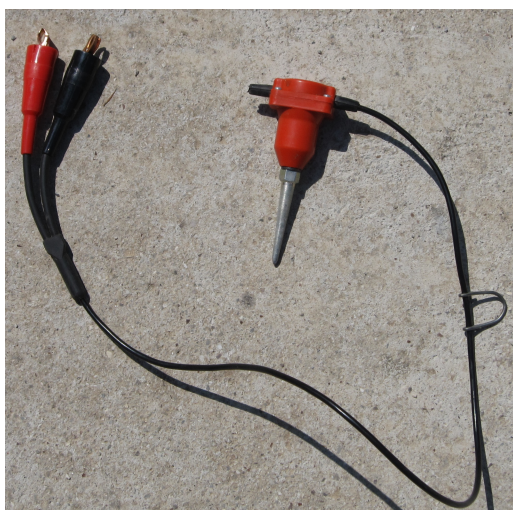


Σχήμα 4.25: Σεισμικές Μετρήσεις Rio-Seis3, διακρίνεται η συστοιχία γεωφώνων και η σεισμική πηγή – σφύρα με πλακίδιο χρούσης.

4.4.2.1 Εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή της σεισμικής μεθόδου έγινε χρήση σεισμικής σφύρας, η οποία διοχετεύει τη σεισμική ενέργεια στο έδαφος. Όπως όλες οι σεισμικές πηγές, είναι επαναληπτική, ενώ παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου του χρόνου διοχέτευσης της σεισμικής ενέργειας στο έδαφος. Στη σφύρα εφαρμόζεται αισθητήρας κίνησης για να γνωρίζουμε τον ακριβή χρόνο κρούσης, ενώ ο χτύπος (σεισμικό κύμα) γίνεται κάθε φορά δίπλα σε γεώφωνο ώστε να γνωρίζουμε την τιμή (μέγεθος) του κύματος που παράγουμε. Ως βάση κρούσης της σεισμικής σφύρας, χρησιμοποιήθηκε ειδική μεταλλική πλάκα, η οποία στο κάτω μέρος της έχει επίστρωση από καουτσούκ για καλύτερη επαφή με το έδαφος (βλπ. Εικόνα 4-25).

Για την καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο σειсмоγράφος DAQlink III της Seismic Source. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν γεώφωνα, τα οποία όπως αναφέρθηκε μετρούν τη διαμήκη ή την εγκάρσια κίνηση του εδάφους, η οποία παράγεται από μία σεισμική πηγή, μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία καταγράφονται από το σειсмоγράφο. Ο σειсмоγράφος συνδέεται με κατάλληλο λογισμικό του φορητού υπολογιστή και τελικά οι μετρήσεις αποκτούν τη μορφή τιμών-δεδομένων. Στις περιπτώσεις όπου συναντήσαμε λιθόστρωτο δάπεδο, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά μολυβένια πλακίδια, όπως και στη μέθοδο των ηλεκτρικών.

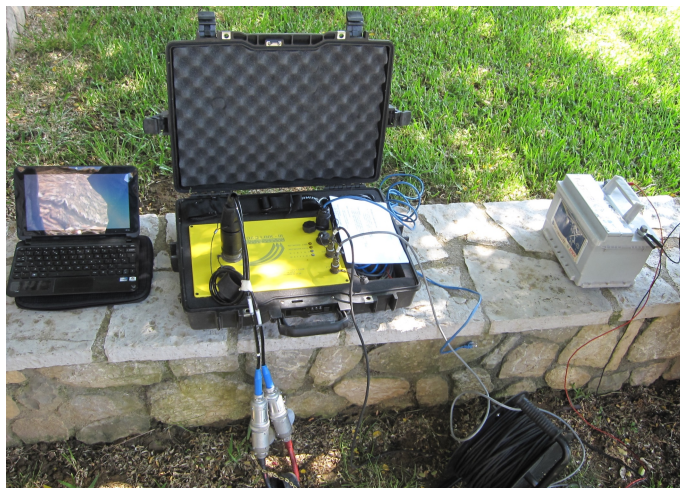


(α') Γεώφωνο



(β') Γεώφωνο στερεωμένο σε μολυβένιο πλακίδιο

Σχήμα 4.26: Περιπτώσεις γεωφώνων



Σχήμα 4.27: Διάταξη Σεισμογράφου - Φορητού υπολογιστή - Ηλεκτρικής πηγής

Η σύνδεση της σεισμικής πηγής και των γεωφώνων με το σύστημα καταγραφής έγινε με χρήση ειδικών καλωδίων.

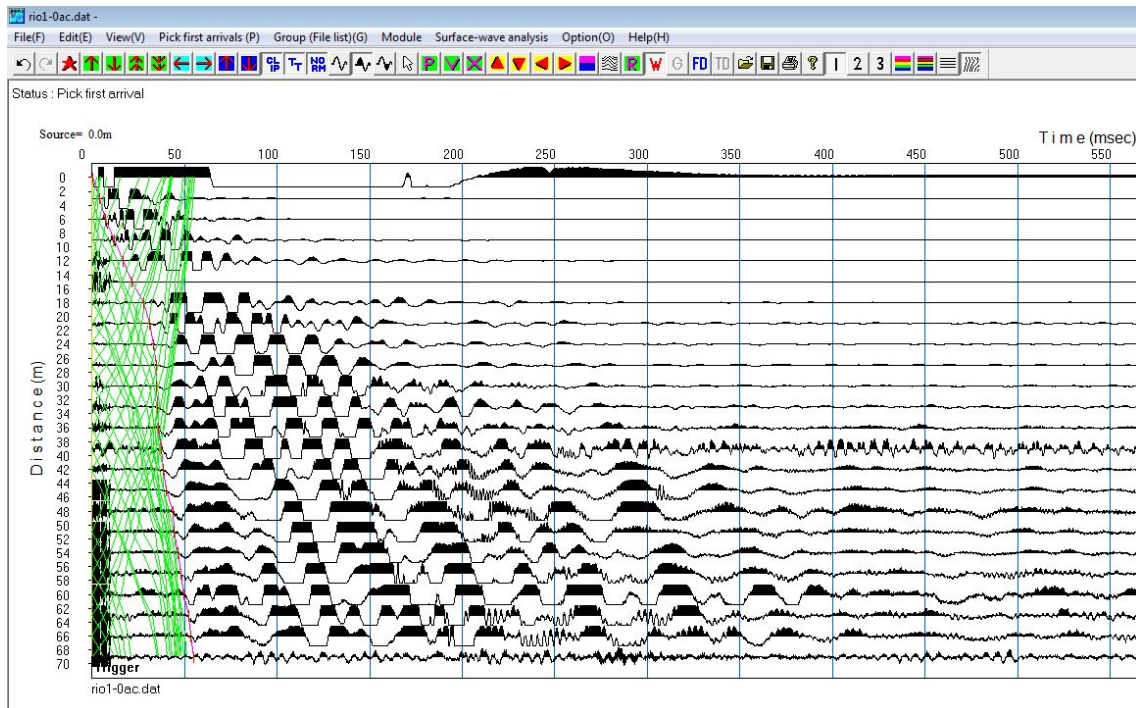
4.4.2.2 Επεξεργασία των δεδομένων και τα αποτελέσματα αυτής

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επεξεργασία των δεδομένων σεισμικής διάθλασης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

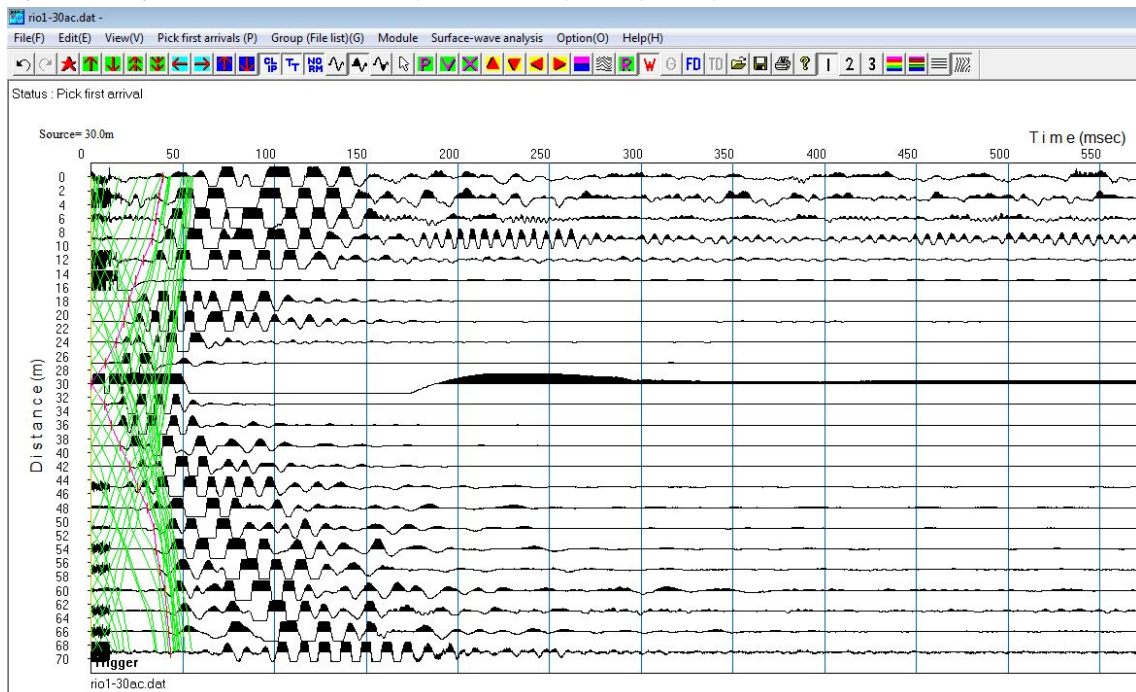
- Επιλογή των πρώτων αφίξεων (first break picking)
- Δημιουργία δρομοχρονικών καμπύλων
- Προσδιορισμός των μοντέλων του υπεδάφους (σεισμικές τομές) και των σεισμικών ταχυτήτων.

4.4.2.2.1 Επιλογή πρώτων αφίξεων

Κατά το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων σεισμικής διάθλασης, γίνεται επιλογή των πρώτων αφίξεων (first break picking), καθορίζονται δηλαδή οι χρονικές στιγμές άφιξης των πρώτων σεισμικών κυμάτων σε κάθε γεώφωνο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε χτύπημα που εφαρμόσαμε. Για τη παραπάνω επεξεργασία χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό SeisImager της EG& G GEOMETRICS.

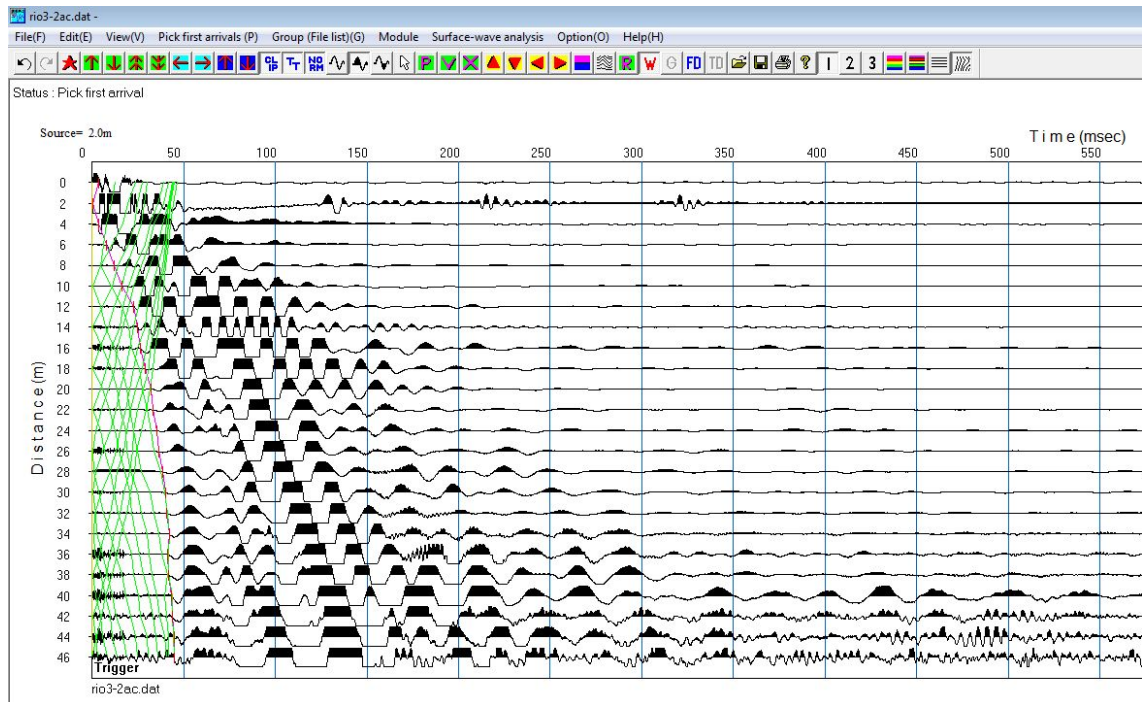


(α') Σεισμόγραμμα 1-0. Η ροζ γραμμή αποτυπώνει τους χρόνους πρώτης άφιξης όταν η σεισμική πηγή (χτύπημα) εφαρμόζεται στο γεώφωνο 0 της Rio-Seis1. Οι πράσινες γραμμές αντιστοιχούν σε πρώτες αφίξεις γεωφώνων από όλα τα χτυπήματα κατά μήκος της τομής.

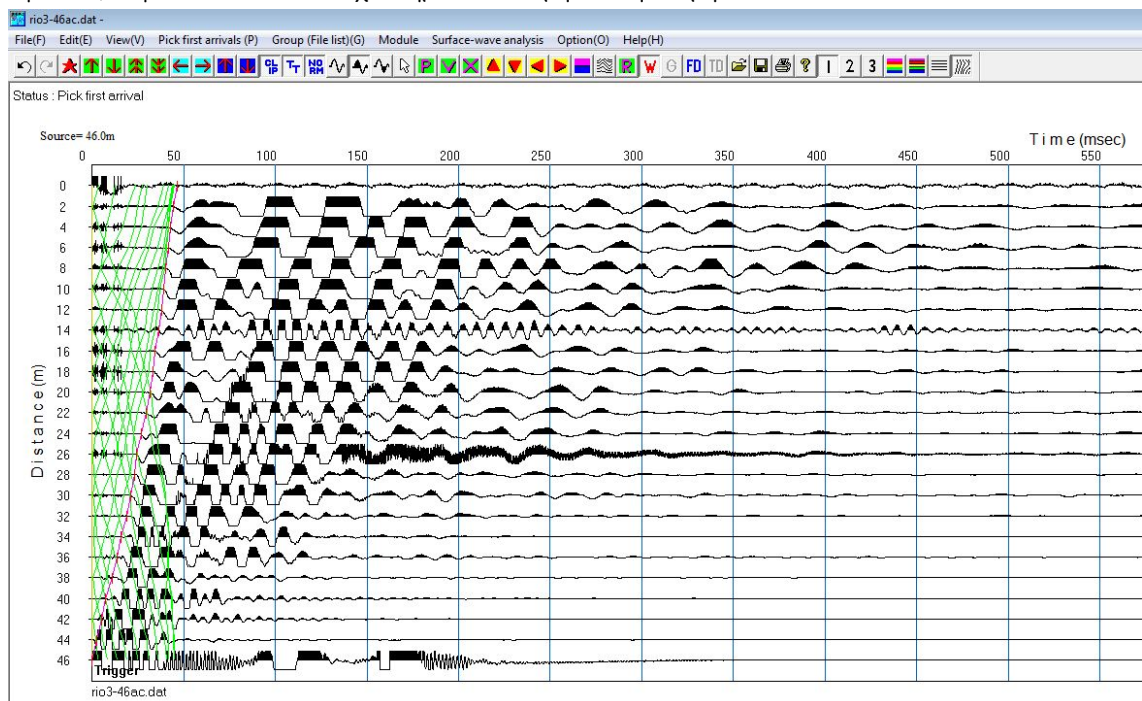


(β') Σεισμόγραμμα 1-30. Η ροζ γραμμή αποτυπώνει τους χρόνους πρώτης άφιξης όταν η σεισμική πηγή (χτύπημα) εφαρμόζεται στο γεώφωνο 30 της Rio-Seis1. Οι πράσινες γραμμές αντιστοιχούν σε πρώτες αφίξεις γεωφώνων από όλα τα χτυπήματα κατά μήκος της τομής.

Σχήμα 4.28: Σεισμογράμματα για τη Rio-Seis1



(α') Σεισμόγραμμα 3-2. Η ροζ γραμμή αποτυπώνει τους χρόνους πρώτης άφιξης όταν η σεισμική πηγή (χτύπημα) εφαρμόζεται στο γεώφωνο 2 της Rio-Seis3. Οι πράσινες γραμμές αντιστοιχούν σε πρώτες αφίξεις γεωφώνων από όλα τα χτυπήματα κατά μήκος της τομής.



(β') Σεισμόγραμμα 3-46. Η ροζ γραμμή αποτυπώνει τους χρόνους πρώτης άφιξης όταν η σεισμική πηγή (χτύπημα) εφαρμόζεται στο γεώφωνο 46 της Rio-Seis3. Οι πράσινες γραμμές αντιστοιχούν σε πρώτες αφίξεις γεωφώνων από όλα τα χτυπήματα κατά μήκος της τομής.

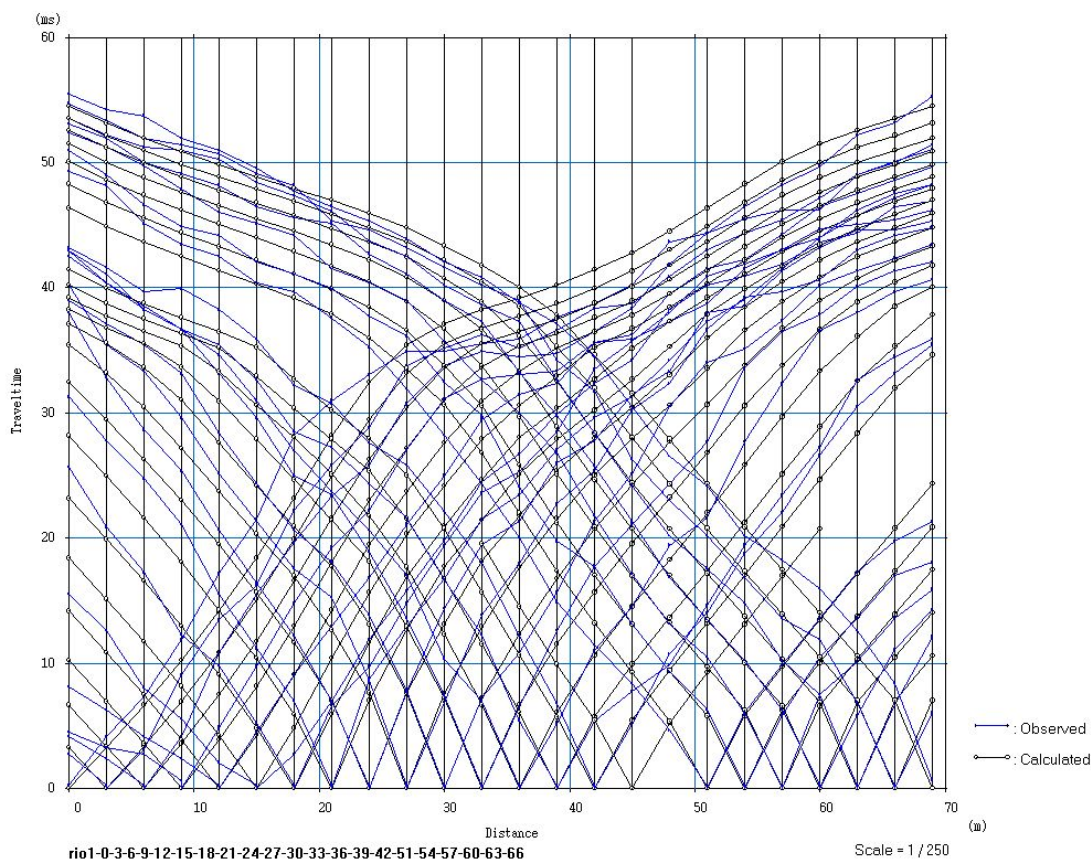
Σχήμα 4.29: Σεισμιογράμματα για τη Rio-Seis3

4.4.2.2 Δημιουργία δρομοχρονικών καμπύλων

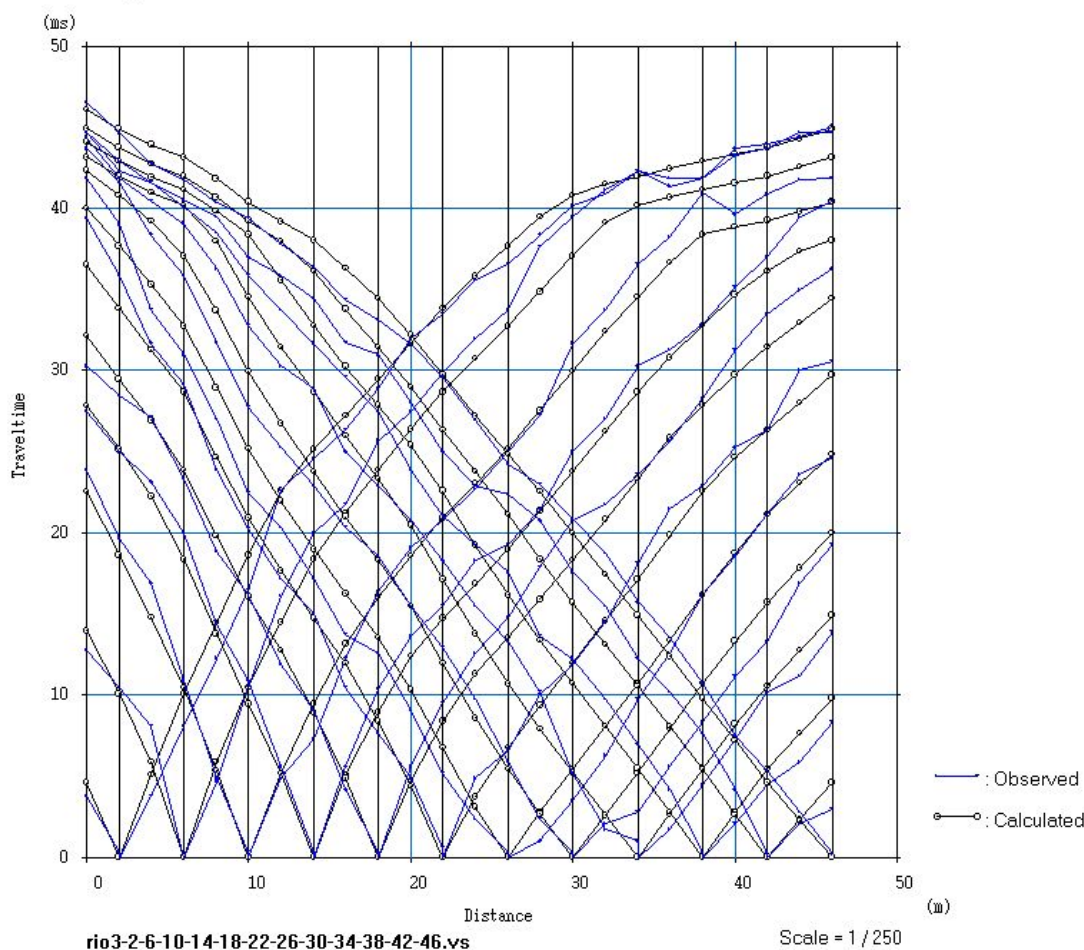
Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των πρώτων αφίξεων, κατασκευάστηκαν οι δρομοχρονικές καμπύλες για κάθε τομή. Μια δρομοχρονική καμπύλη αποτελεί στην ουσία ένα διάγραμμα των πρώτων σεισμικών αφίξεων, με τετμημένη την απόσταση των γεωφώνων από τη σεισμική πηγή και τεταγμένη το χρόνο.

Σε γράφημα (Εικόνα 4.30, 4.31) συγκεντρώνονται οι δρομοχρονικές καμπύλες για κάθε μέτρηση και στη συνέχεια διορθώνονται τα σημεία όπου παρουσιάζουν λάθη (bad data edit out).

Ακολούθως με χρήση του λογισμικού PlotRefa της EG& G GEOMETRICS, εντοπίζονται τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα (αλλαγή της κλίσης της καμπύλης) από κάθε διεπιφάνεια και αντιστοιχούνται σε εδαφικά στρώματα με μεθόδους αντιστροφής (time term inversion → tomographic inversion → ray trasing)



Σχήμα 4.30: Δρομοχρονικές καμπύλες για τη σεισμική γραμμή Rio-Seis1



Σχήμα 4.31: Δρομοχρονικές καμπύλες για τη σεισμική γραμμή Rio-Seis3

4.4.2.2.3 Μοντέλα του υπεδάφους και υπολογισμός σεισμικών ταχυτήτων
 Με χρήση του λογισμικού SeisImager προκύπτουν τα μοντέλα βάρθους για κάθε σεισμική γραμμή, όπου υπολογίζεται η ταχύτητα κάθε στρώματος του εδαφικού μοντέλου που προκύπτει και παράλληλα προσδιορίζεται το βάθος στο οποίο υπάρχει αλλαγή των γεωλογικών σχηματισμών στο υπέδαφος.

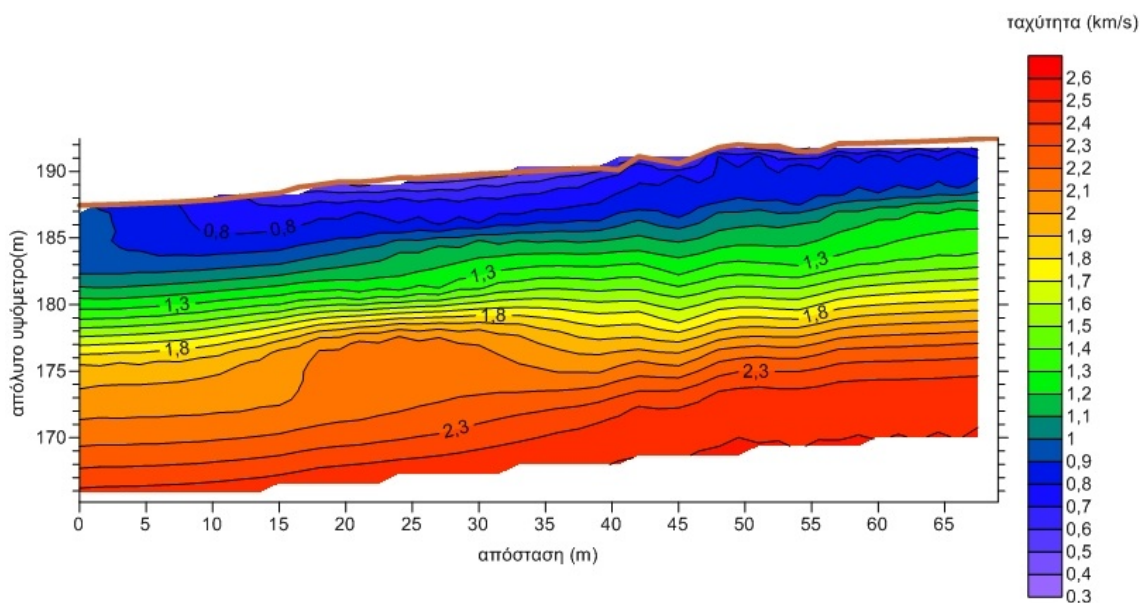
Όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.32 και 4.33, και για τις δυο τομές δίνεται μια σαφής εικόνα του εδάφους στην περιοχή κάτω από το ναό, όσον αφορά τη συνεκτικότητα. Παρατηρείται ότι, όσο το βάθος μεγαλώνει, η τιμή των σεισμικών ταχυτήτων αυξάνεται, προσεγγίζουμε δηλαδή το αδιατάρακτο μητρικό πέτρωμα. Η αρχή του γεωλογικού υποβάθρου εντοπίζεται σε βάθος περίπου 7m και για τις δύο τομές.

Αποτυπώνεται επίσης μια ενδιάμεση μεταβατική φάση του Πλειοκαινικού-Πλειστοκαινικού Υποβάθρου, την οποία εντοπίσαμε και με την ηλεκτρική μέθοδο. Η ζώνη αυτή έχει ενδιάμεσες τιμές ταχύτητας διάδοσης του σεισμικού κύματος (πράσινη και κίτρινη απόχρωση) και το άνω όριο της ζώνης βρίσκεται στα 183m απόλυτο υψόμετρο.

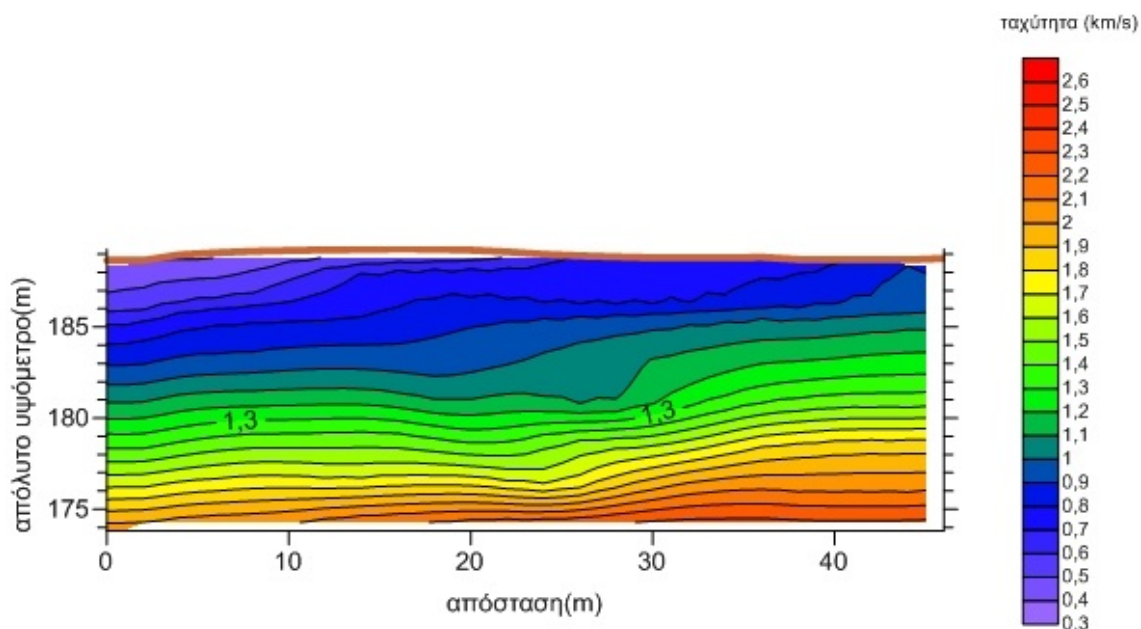
Το επιφανειακό στρώμα σημειώνεται με μπλε απόχρωση και καθώς αποτελείται από χαλαρά

υλικά χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές ταχύτητας διάδοσης του σεισμικού κύματος.

Στην τομή Rio-Seis1 (Εικόνα 4.32) τα στρώματα εμφανίζονται υπό κλίση, όπως ακριβώς αναμέναμε βάσει της γεωμορφολογίας και της γεωηλεκτρικής τομής Rio-tes2. Ενώ στο μοντέλο εμφανίζεται μια απότομη ανύψωση (απόσταση 20m) η οποία πιθανότατα οφείλεται στη τοπική δομή (**Περιοχή 4**) που είχαμε εντοπίσει από την ηλεκτρική μέθοδο.



Σχήμα 4.32: Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή Rio-Seis1



Σχήμα 4.33: Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή Ριο-Σεισ3

4.4.3 Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR - Ground Penetrating Radar)

Η τελευταία μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης ήταν η μέθοδος του γεωραντάρ (GPR). Συνολικά έγιναν 4 τομές (GPR1, GPR2, GPR3, GPR4) οι οποίες 'πλασίωσαν' περιμετρικά το ναό (βλπ. Εικόνα 4.11 και 4.12). Χρησιμοποιήσαμε 2 κεραίες θωρακισμένες της MALA Geoscience με τις εξής διατάξεις:

1. Πηγή και δέκτης η κεραία με 250 MHz
2. Πηγή και δέκτης η κεραία με 100 MHz



Σχήμα 4.34: Λήψη μετρήσεων με γεωραντάρ (GPR1)

4.4.3.1 Επεξεργασία μετρήσεων

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων ήταν το REFLEXW της Sandmeier Scientific Software. Έγινε η εξής επεξεργασία κατά τα βήματα:

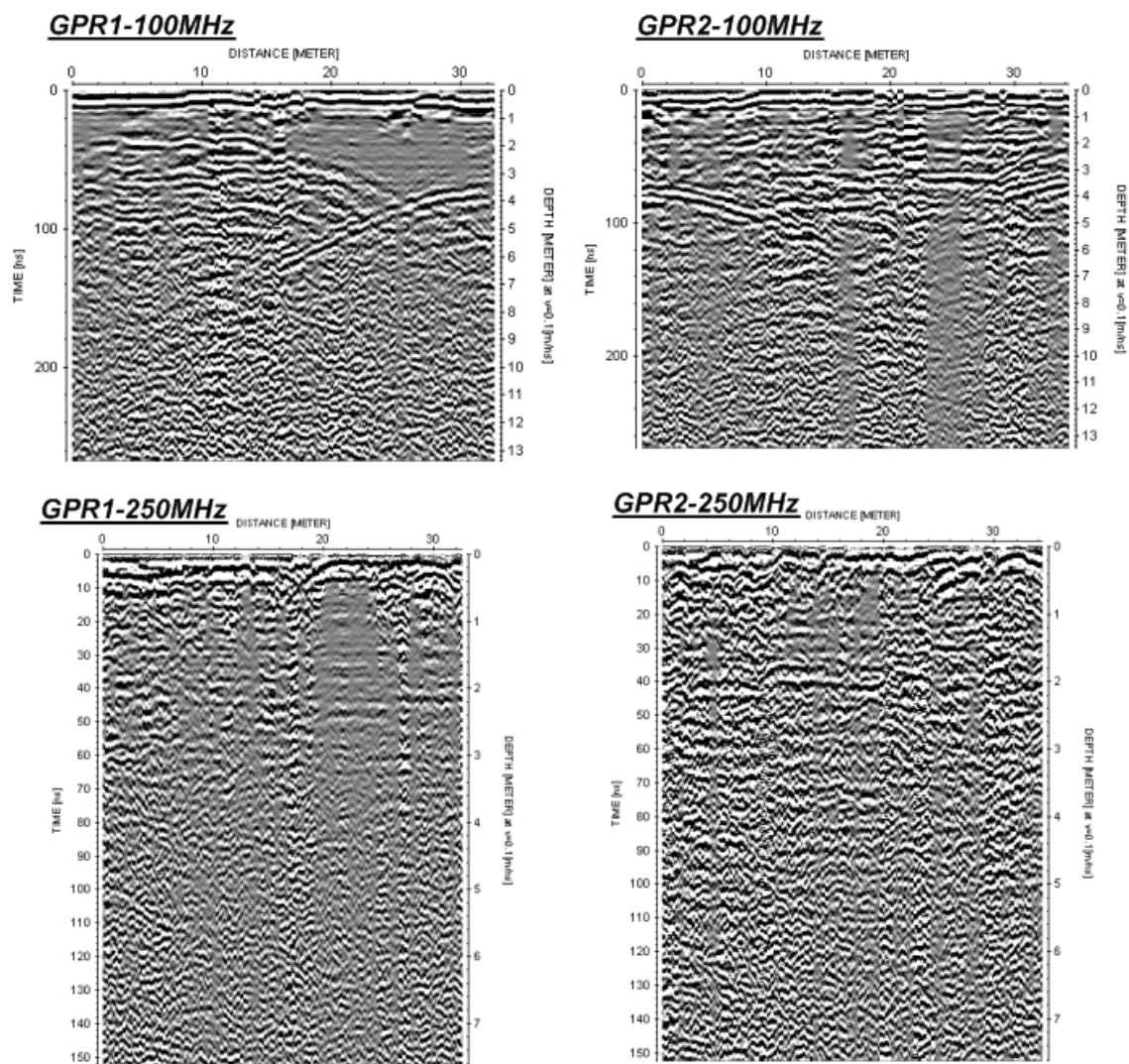
- subtract - mean (dewow),
- correct max phase,
- move start-time,
- manual gain (y),
- background removal,
- bandpass Butterworth (50-200 MHz για διάταξη 100 MHz, 150-450 MHz για διάταξη 250 MHz)
- spectral whitening (50-200 MHz για διάταξη 100 MHz, 150-450 MHz για διάταξη 250 MHz)
- migration

Μετά το πέρας της επεξεργασίας (βλπ. Εικόνα 4.36, 4.37), οι εικόνες των μοντέλων επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer ώστε να εντοπιστούν η στρωματογραφία και τυχόν τοπικές ανωμαλίες.

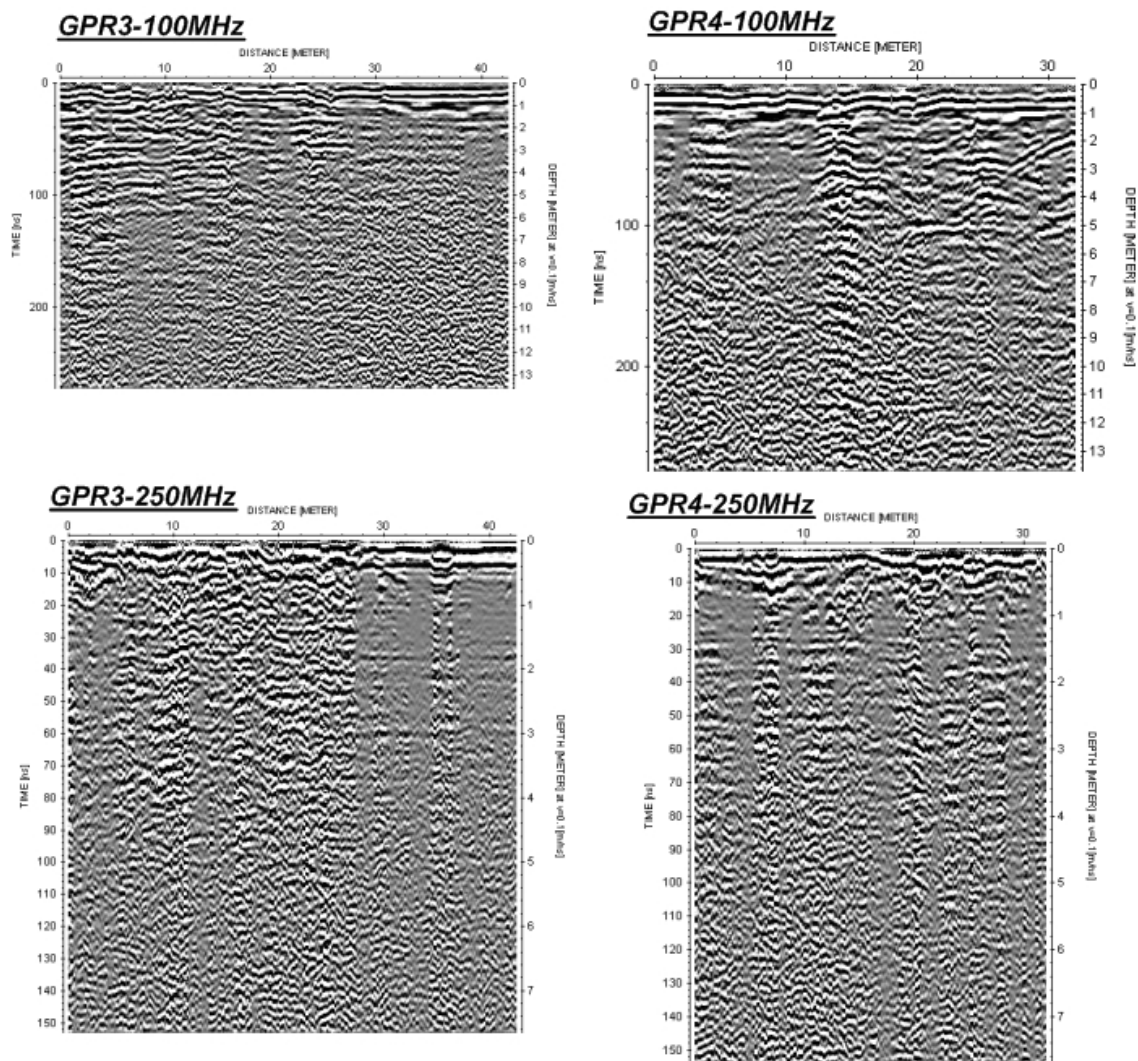


Σχήμα 4.35: Δορυφορική αποτύπωση των τομών GPR με εμφανή τη διεύθυνσή τους

4.4.3.2 Επεξεργασμένα μοντέλα GPR



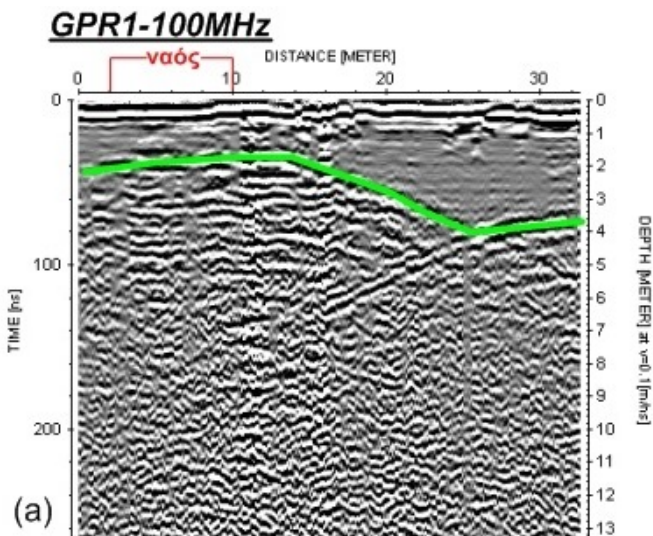
Σχήμα 4.36: Επεξεργασμένα μοντέλα της μεθόδου GPR για τις τομές GPR1, GPR2 για κεραία-πομπό 100 MHz και κεραία-πομπό 250 MHz



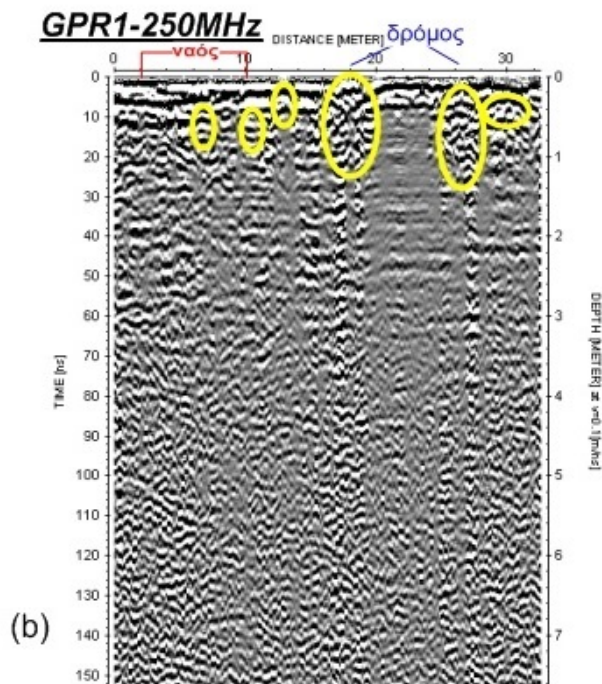
Σχήμα 4.37: Επεξεργασμένα μοντέλα της μεθόδου GPR για τις τομές GPR3 και GPR4 για κεραία-πομπό 100 MHz και κεραία-πομπό 250 MHz

4.4.3.3 Ερμηνεία και σχολιασμός των μοντέλων GPR

Στην Εικόνα 4.38(a) αποτυπώνεται με πράσινο χρώμα ο ορίζοντας της ενδιάμεσης μεταβατικής ζώνης, ο οποίος σε εκείνη τη διεύθυνση κάτω από το ναό βρίσκεται σε βάθος $\sim 3m$. Παρατηρούμε επίσης ότι ο ναός βρίσκεται ακριβώς στο σημείο αλλαγής κλίσης του στρώματος. Το GPR δεν μπορεί να απεικονίσει το Μαργαϊκό-Αργιλικό υπόβαθρο, λόγω του ότι τα αργιλικά υλικά απορροφούν το σήμα.

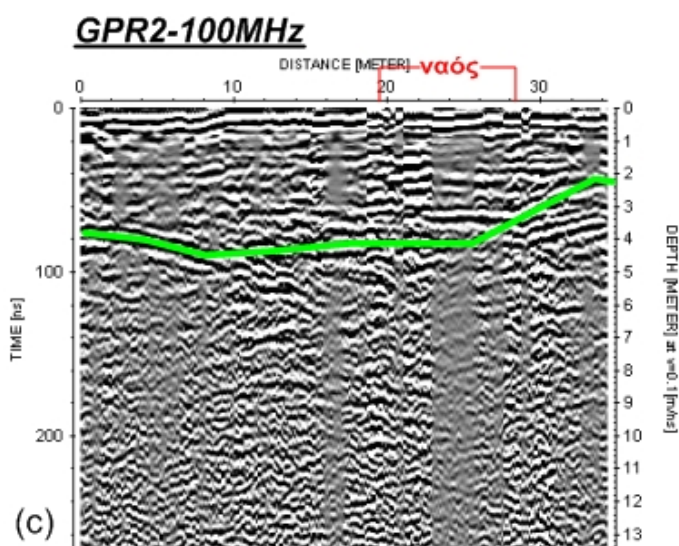


Στην Εικόνα 4.38(b) οι τρεις πολλαπλές ανακλάσεις (αριστερά) κάτω από το ναό σχετίζονται πιθανότητα με μεταλλικούς πασσάλους για τη στήριξη του κτηρίου. Οι πολλαπλές ανακλάσεις (δεξιά) σχετίζονται με σύγχρονες κατασκευές.

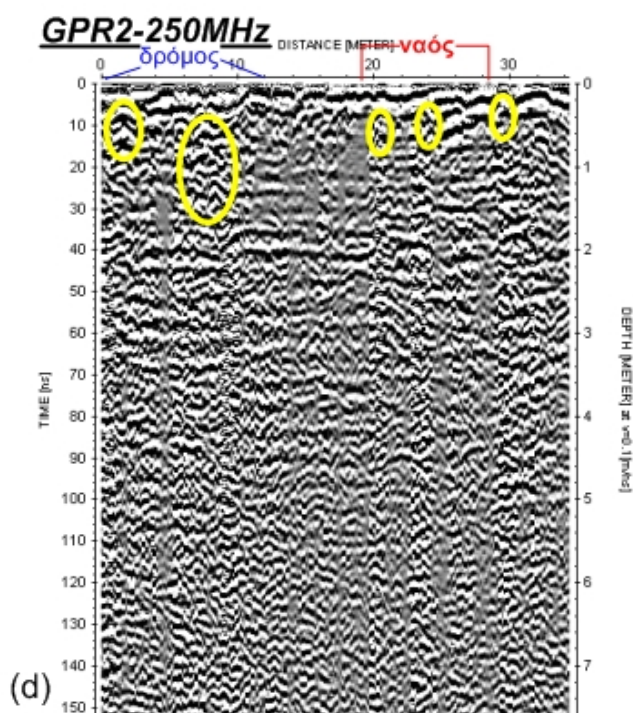


Σχήμα 4.38: Σχολιασμός της GPR1

Στην Εικόνα 4.39(c) αποτυπώνεται με πράσινο χρώμα ο ορίζοντας της ενδιάμεσης μεταβατικής ζώνης, ο οποίος κάτω από το ναό σε εκείνη τη διεύθυνση βρίσκεται σε βάθος $\sim 4m$.

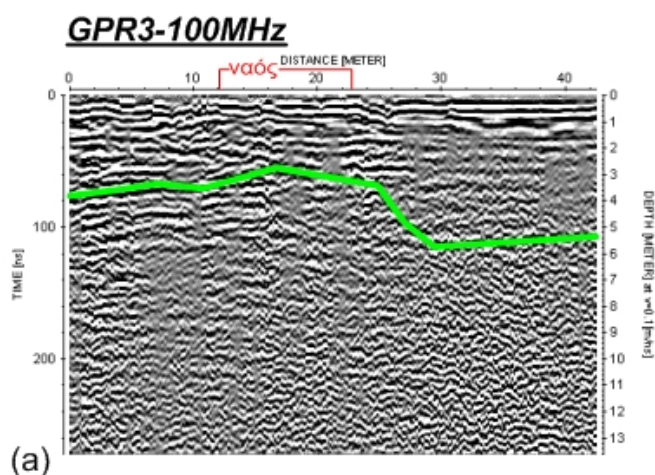


Στην Εικόνα 4.39(d) παρατηρούμε ότι οι πολλαπλές ανακλάσεις, της οποίες ανακλάσεις συσχετίσαμε με πασσάλους, κάτω από το ναό επαναλαμβάνονται και μάλιστα είναι σε συμμετρία με αυτούς της GPR1

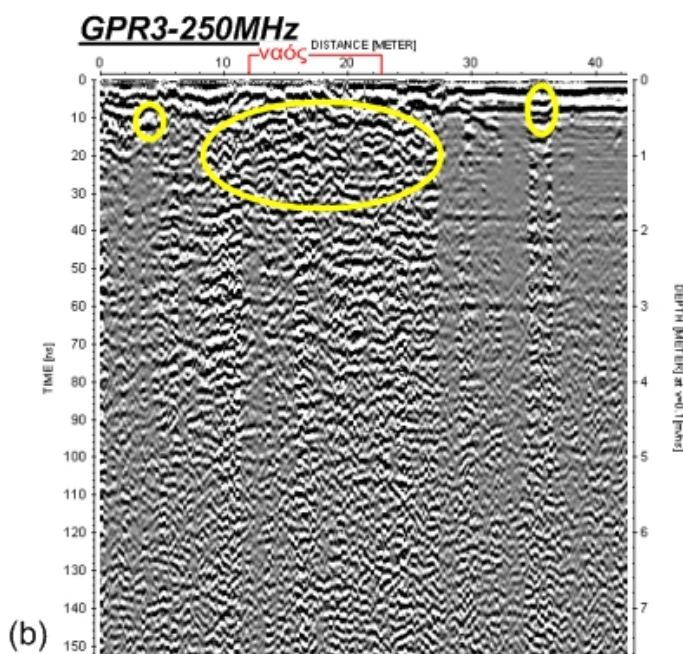


Σχήμα 4.39: Σχολιασμός της GPR2

Στην Εικόνα 4.40(a) αποτυπώνεται με πράσινο χρώμα ο ορίζοντας της ενδιάμεσης μεταβατικής ζώνης, ο οποίος κάτω από το ναό σε εκείνη τη διεύθυνση βρίσκεται σε βάθος $\sim 4m$.

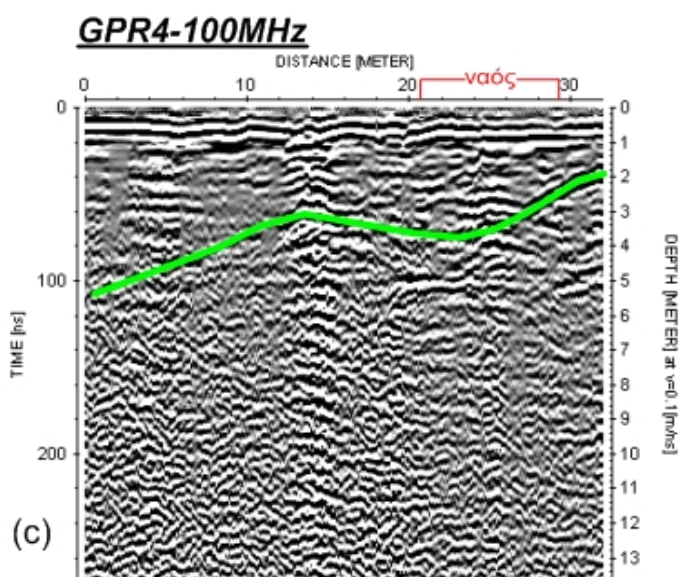


Στην Εικόνα 4.40(b) πολλαπλές ανακλάσεις (αριστερά) σχετίζονται με εξωτερική βρύση και τουαλέτες. Τις ανακλάσεις (κέντρο) κοντά στο ναό συσχετίσαμε με το κτήριο.

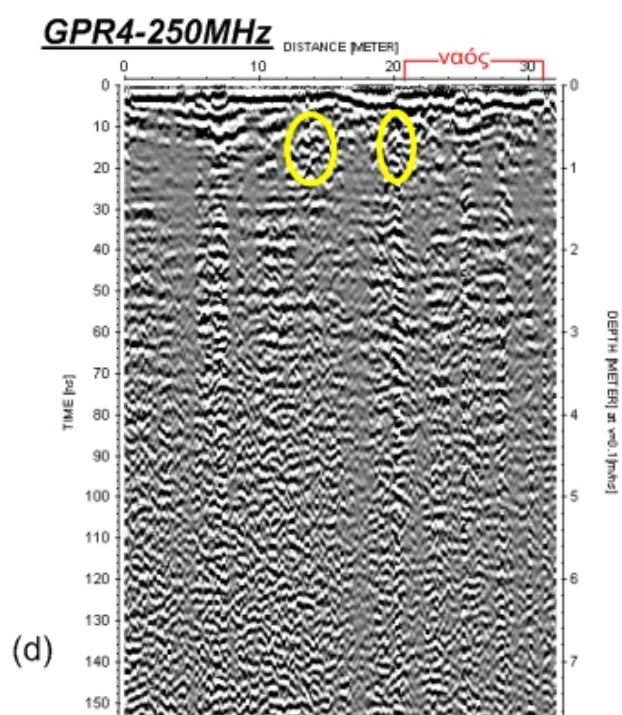


Σχήμα 4.40: Σχολιασμός της GPR3

Στην Εικόνα 4.41(c) αποτυπώνεται με πράσινο χρώμα ο ορίζοντας της ενδιάμεσης μεταβατικής ζώνης, ο οποίος κάτω από το ναό σε εκείνη τη διεύθυνση αλλάζει κλίση.



Στην Εικόνα 4.41(d) οι πολλαπλές ανακλάσεις (αριστερά) σχετίζονται με υπαίθρια μεταλλική κατασκευή. Οι πολλαπλές ανακλάσεις (δεξιά) κάτω από το ναό αποτελούν πάσσαλο όπως και στις προηγούμενες τομές.



Σχήμα 4.41: Σχολιασμός της GPR4

Κεφάλαιο 5

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αποτύπωση των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή του Αγίου Νικολάου στο Πλατάκι Αχαΐας, ο εντοπισμός τοπικών υπεδαφικών δομών και ο υπολογισμός των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων.

Τα στάδια που έπρεπε να ακολουθήσουμε, σε προκαταρκτική φάση, για την πραγματοποίηση της γεωφυσικής έρευνας ήταν τα εξής:

- Γεωλογική μελέτη με σαφείς πληροφορίες για τη γεωμορφολογία της περιοχής
- Συλλογή ιστορικών και τεχνικών στοιχείων σχετικά με το κτήριο
- Σχεδιασμός της έρευνας και επιλογή των καταλληλότερων μεθόδων, με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τόπου αλλά και τα ερωτήματα που έπρεπε να απαντήσουμε

Συμβουλευτήκαμε τη διεθνή βιβλιογραφία και ανατρέξαμε σε παρόμοιες περιπτώσεις γεωφυσικής έρευνας. Μελετήσαμε εκτενώς τα επιστημονικά άρθρα στα οποία δημοσιεύτηκαν οι γεωφυσικές μελέτες:

- στο Βυζαντινό Ναό της Αγίας Σοφίας στη Κωνσταντινούπολη,
- στον Πύργο του Σόπρον στην Ουγγαρία,
- σε πλατεία του Ρεθύμνου Κρήτης,
- στο Ευπαλίνειο Όρυγμα της Σάμου,
- στην παράκτια περιοχή Ίστρον της Ανατολικής Κρήτης

Οι παραπάνω μελέτες περιπτώσεων (case studies) αναλύονται εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας.

Διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή της ηλεκτρικής, της σεισμικής και της μεθόδου γεωραντάρ, μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι πραγματώσαμε μετρήσεις πεδίου στο

Πλατάκι Αχαΐας οι οποίες αποτελούνταν από: 2 γεωηλεκτρικές τομές, 2 σεισμικές τομές και 4 τομές GPR.

Μετά από την εφαρμογή των προαναφερόμενων γεωφυσικών διασκοπήσεων, μπορούμε να εξάγουμε συνολικά τα εξής συμπεράσματα:

Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας παρήγαγε την ακριβή απεικόνιση της στρωματογραφίας και μας βοήθησε να εξάγουμε συμπεράσματα για τη λιθολογία της περιοχής μελέτης. Στις δύο γεωηλεκτρικές τομές που παρουσιάστηκαν, διακρίνονται τρία στρώματα υψηλών (αδρομερή υλικά), ενδιάμεσων (μεταβατική ζώνη) και χαμηλών (αργιλικό υπόβαθρο) ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Ενώ έγιναν εμφανή τα πάχη και η κλίση των στρωμάτων αυτών. Επιπλέον η ηλεκτρική μέθοδος αποδείχθηκε αποτελεσματική και στην λεπτομερή αποτύπωση στόχων (τοπικών δομών) που βρίσκονται στο έδαφος.

Τα αποτελέσματα της σεισμικής μεθόδου μας έδωσαν σαφή εικόνα της συνεκτικότητας του υπεδάφους και της διακύμανσης της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Επιβεβαιώθηκαν οι προηγούμενες εκτιμήσεις από την ηλεκτρική μέθοδο, αναφορικά με τη διάκριση των στρωμάτων, τα πάχη τους και την κλίση τους. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι ο ναός εδράζεται σε περιοχή όπου το γεωλογικό υπόβαθρο εντοπίζεται σε βάθος $\sim 6 - 7m$.

Φάνηκε, λοιπόν, ότι τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής και της σεισμικής μεθόδου ήταν σύμφωνα, κάτι που επιβεβαιώνει την επιτυχία και των δύο μεθόδων. Οι δύο αυτές μέθοδοι μας έδωσαν τη δυνατότητα να εντοπίσουμε διαφοροποιήσεις του υπεδάφους σε σχέση με την λιθολογία (ηλεκτρικά) και την συνεκτικότητα (σεισμικά). Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις ηλεκτρικές τομές με διάταξη Schlumberger ήταν πιο ακριβή και ο συνδυασμός τους με τα δεδομένα των σεισμικών μετρήσεων μας επέτρεψαν να εκτιμήσουμε πως οι υπόγειοι ορίζοντες εκτείνονται στο χώρο.

Στη συνέχεια διεξαγάγαμε τέσσερις τομές GPR περιμετρικά του ναού με κύριο σκοπό τη καταγραφή των τοπικών ανωμαλιών που εντοπίζονται γύρω από το ναό. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι πληροφορίες από τις GPR τομές, σχετικά με τις τεχνικές επεμβάσεις (τοπικές ανωμαλίες) που διαπιστώθηκαν και είχαν πιθανό σκοπό τη βελτίωση της έδρασης του ναού. Εντοπίστηκε επιπλέον με σαφήνεια το βάθος ($\sim 2 - 3m$) του ορίζοντα του ενδιάμεσου μεταβατικού στρώματος.

Όσον αφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, επιβεβαιώθηκε η επιτυχία αντικατάστασης των ηλεκτροδίων της ηλεκτρικής μεθόδου και των γεωφώνων της σεισμικής με τα ειδικά μολυβένια πλακίδια, εκεί όπου δεν γινόταν διαφορετικά, στα σημεία δηλαδή που αντί για χώμα υπήρχε πλακόστρωτο. Η χρήση των ειδικών αυτών πλακιδίων, δηλαδή, δεν επηρέασε την αποτελεσματικότητα των μετρήσεων.

Για την ηλεκτρική μέθοδο η διάταξη των ηλεκτροδίων Schlumberger έδωσε καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη στρωματογραφία. Για το γεωραντάρ η διάταξη με πηγή-κεραία 100 MHz αποτύπωσε με μεγαλύτερη ακρίβεια τον ορίζοντα του στρώματος και την αλλαγή κλίσης του, ενώ η διάταξη με πηγή-κεραία 250 MHz ήταν πιο αποτελεσματική όσον αφορά τη απεικόνιση των πολλαπλών ανακλάσεων.

Ο σχεδιασμός των μεθόδων ήταν ο καταλληλότερος. Οι κάθναβοι των μετρήσεων σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι τομές να τέμνονται μεταξύ τους και έτσι μπορέσαμε να

συσχετίσουμε αποτελέσματα διαφορετικών τομών και διαφορετικών μεθόδων.

Η επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις της κάθε μεθόδου, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα: το Surfer της Golden Software, το RES2DINV της Geotomo Software, SeisImager και το PlotRefa της EG & G GEOMETRICS και το REFLEXW της Sandmeier Scientific Software. Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής μεθόδου με το πρόγραμμα RES2DINV, η διαδικασία ερμηνείας Robust-Robust-Horizontal έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Με αυτή τη ρύθμιση οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης κατά την κατακόρυφο και στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις.

5.2 Σχόλια

Αναλογιζόμενοι τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας και σχετίζοντάς τα με τους στόχους που θέλαμε να επιτύχουμε, τις μεθόδους που ακολουθήσαμε και τη διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων, προκύπτουν τα εξής σχόλια:

Η προστασία μνημειακών χώρων και κτηρίων, ιστορικής και πολιτισμικής σημασίας, αποτελεί πρόκληση για το χώρο της μηχανικής. Είναι μάλιστα κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα του έργου η συνεργασία και η συμβολή επιστημόνων και μηχανικών από διάφορους κλάδους.

Η επιτυχία της γεωφυσικής μεθόδου, όσον αφορά τη γενικότερη στρωματογραφική αποτύπωση και τον ειδικότερο εντοπισμό του «που εδράζεται ο ναός», αποδεικνύει τη δυνατότητα των γεωφυσικών μεθόδων στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, σαν αυτοτελή μέθοδο αλλά και σαν κομμάτι ευρύτερης μελέτης.

Η εφαρμογή των τριών μεθόδων διασκόπησης του υπεδάφους, η σειρά με την οποία έγιναν και η επεξεργασία των δεδομένων η οποία έγινε, συνίσταται σε ανάλογες μελέτες. Είναι απαραίτητη η εφαρμογή πάνω από μιας μεθόδου για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Στη δική μας περίπτωση φάνηκε ότι για όλες τις περιπτώσεις, η μία μέθοδος επιβεβαιώνει και συμπληρώνει την άλλη.

Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας όπως και η σεισμική μέθοδος, είναι επίπονες και ακριβές μέθοδοι, όμως έχουν ασύγκριτα πλεονεκτήματα από άποψη λεπτομέρειας. Επίσης, μας δίνουν τη δυνατότητα απεικόνισης των εντοπιζόμενων γεωλογικών σχηματισμών σε μεγάλη βάθος. Συνδυάζοντας αυτή την ακριβέστερη εκτίμηση, με τα δεδομένα των γεωραντάρ, μπορούμε να εκτιμήσουμε την έκταση των σχηματισμών στο χώρο. Το γεωραντάρ μπορεί να δώσει πληροφορίες για τους υπόγειους ορίζοντες, μια δυνατότητα όμως που μπορεί να είναι περιορισμένη σε βάθος, σε συνθήκες, για παράδειγμα, αργιλικών εδαφών. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής σε τέτοιου είδους έρευνες, είναι η δυνατότητα εντοπισμού υπόγειων στόχων με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Με βάση τα παραπάνω, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή των τριών αυτών μεθόδων, με τη συγκεκριμένη σειρά, μπορεί να είναι αποτελεσματική σε παρόμοιες μελέτες εδάφους.

Τέλος προτείνουμε τη διεξαγωγή επιπλέον γεωφυσικών ερευνών με ευρύτερη κάλυψη της περιοχής του Πλατανίου, η οποία θα μπορέσει να αποτυπώσει τη πιθανή αναβαθμίδα πάνω στην οποία βρίσκεται ο οικισμός.

Παράρτημα

Υλικό	V_p (Km/s)
Μη στρωματωμένα πετρώματα	
Άμμος (ξηρή)	0.2 – 1.0
Άμμος (χορεσμένη)	1.5 – 2.0
Άργιλος	1.0 – 2.5
Μόνιμο στρώμα πάγου	3.5 – 4.0
Ιζηματογενή πετρώματα	
Ψαμμίτες	2.0 – 6.0
Τεταρτογενής Ψαμμίτης	2.0 – 2.5
Ανθρακούχος Ψαμμίτης	4.0 – 4.5
Κάμβριος Χαλαζίτης	5.5 – 6.0
Ασβεστόλιθοι	2.0 – 6.0
Κρητιδικός Ασβεστόλιθος	2.0 – 2.5
Βιοκλαστικός Ασβεστόλιθος	3.0 – 4.0
Ανθρακούχος Ασβεστόλιθος	5.0 – 5.5
Δολομίτες	2.5 – 6.5
Ορυκτό Άλας	4.5 – 5.0
Ανυδρίτης	4.5 – 6.5
Γύψος	2.0 – 3.5
Πυριγενή / Μεταμορφωμένα πετρώματα	
Γρανίτης	5.5 – 6.0
Γάββρος	6.5 – 7.0
Υπερμαφικά πετρώματα	7.5 – 8.5
Σερπεντινίτης	5.5 – 6.5
Ρευστά πόρων	
Αέρας	0.3
Νερό	1.4 – 1.5
Πάγος	3.4
Πετρέλαιο	1.3 – 1.4

Πίνακας 1: Σεισμικές ταχύτητες των P κυμάτων για διάφορα υλικά

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Σπυράκος· Ε. Τουτουδάκη. Βασικές Έννοιες Σεισμολογίας. Ακαδημαϊκές Σημειώσεις, Σχολή Πολ. Μηχ. Ε.Μ.Π.
- [2] Ευάγγελος Βερβερέλης – Βατσάλια. Εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στον Αστικό Ιστό, για τον Εντοπισμό Στρωματογραφίας και Πεπερασμένων Δομών, 2011. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
- [3] IRIS INSTRUMENTS, 2003: SYSCAL Pro. Manual Guide.
- [4] RES2DINV, 2D Resistivity and IP Inversion. 1995 – 2001, Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Version 3.4, Geotomo Software, Malaysia.
- [5] Θεόδωρος Δούτσος. *Γεωλογία: αρχές και εφαρμογές*. Leader Books, 2000.
- [6] Ιωάννης Λούης. *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική*. Ε.Κ.Π.Α., 2004.
- [7] Νικόλαος Σπανουδάκης. *Συμβολή των Μεθόδων Ταξινόμησης δεδομένων Γεωραντάρ στην Επίλυση Περιβαλλοντικών Προβλημάτων*. ΠηΔ τησεις, Πολυτεχνείο Κρήτης- Σχολή Μηχ. Ορυκτών Πόρων, 2007.
- [8] Δ. Μαυρομαμάτης. Συνδυασμός Στρωματογραφικών Δεδομένων και Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών για τον εντοπισμό του Προολοκαϊνικού Υποβάθρου στην περιοχή Πειραιά – Νέου Φαλήρου, 2007. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
- [9] Ταξιάρχης Παπαδόπουλος. Εισαγωγή στη Γεωφυσική, 2008.
- [10] Μιχάλης Παγώνας. Γεωλογία και Διαχείριση των Σύγχρονων Αποθέσεων και των Υδατικών Πόρων στους Χειμάρρους της ΒΔ/κής Πελοποννήσου, 2009.
- [11] Παντελής Σούπιος. Τεχνολογίες Εντόπισμού Υδατικών Πόρων, 2011.
- [12] Σταύρος Μαμαλούκος. Ναός αγίου Νικολάου Στο Πλατάκι Αχαΐας. Συμπληρωματικά Στοιχεία. *Deltion of the Christian Archaeological Society*, 49:33–46, 2011.
- [13] Γεώργιος Αποστολόπουλος. *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Ε.Μ.Π., 2013.
- [14] Φωκίων Λούζος. Γεωφυσική Έρευνα Στο Ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο, 2014. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.

- [15] Κωνσταντίνος Μιχαλόπουλος. Γεωφυσική Έρευνα στο Θησείο, 2015. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
- [16] Μυρτώ Παπαδοπούλου. Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση Γεωτεχνικών Προβλημάτων, 2015. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
- [17] Abraham Zelilidis. Xerias river evolution in relation to the geological background of the Corinth basin and its flooding in 12/1/1997. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας Τόμος XXXII, Νο1, 277-286*, 1998.
- [18] Antonios Giannopoulos. The investigation of transmission-line matrix and finite-difference time-domain methods for the forward problem of ground probing radar., 1998. PhD Thesis.
- [19] Buursink, ML and Lane, JW. Characterizing fractures in a bedrock outcrop using ground-penetrating radar at Mirror Lake, Grafton country, New Hampshire. *USGS, Branch of Geophysical Application and support*, 1999.
- [20] Doutsos, Theodor and Kontopoulos, Nikolaos and Poulimenos, Georgios. The Corinth-Patras rift as the initial stage of continental fragmentation behind an active island arc (Greece). *Basin Research*, 1(3):177–190, 1988.
- [21] Doutsos, Theodor and Poulimenos, Georgios. Geometry and kinematics of active faults and their seismotectonic significance in the western Corinth-Patras rift (Greece). *Journal of Structural Geology*, 14(6):689–699, 1992.
- [22] Gardner, GHF and Gardner, LW and Gregory, AR. Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39(6):770–780, 1974.
- [23] Kanli, Ali Ismet and Taller, Gabor and Nagy, Peter and Tildy, Peter and Pronay, Zsolt and Toros, Endre. GPR survey for reinforcement of historical heritage construction at fire tower of Sopron. *Journal of Applied Geophysics*, 112:79–90, 2015.
- [24] Kearey, Philip and Brooks, Michael and Hill, Ian. *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons, 2013.
- [25] Kingsley, Simon and Quegan, Shaun. Understanding radar systems. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 94:11775, 1992.
- [26] Kontopoulos, N and Zelilidis, A. Depositional environments of the coarse-grained lower Pleistocene deposits in the Rio-Antirio basin, Greece. In *Proc. Int. Symposium on Engineering Geology and the Environment, IAEG, Athens*, ολ. 1, 1997.
- [27] Loke, Meng Heng and Barker, RD. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, 44(1):131–152, 1996.

-
- [28] Meckel Jr, LD and Nath, AK. Geologic considerations for stratigraphic modeling and interpretation. *Seismic stratigraphy: AAPG Memoir*, 26:417–438, 1977.
- [29] M.I. Skolnic. *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill, 1981.
- [30] Oz Yilmaz. Geophysical Investigations on Hisrotic Buildings-A case study of the Great Church of St. Sophia. *The Leading EDGE*, 2013.
- [31] Papadopoulos, Nikos and Tsokas, Gregory and Sarris, Apostolos and Tsourlos, Panagiotis and Vargemezis, George. Ground based archaeological prospection: Case studies from Greece. *first break*, 32(8):73–80, 2014.
- [32] Seger, M and Alexander, J. Distribution of Plio-Pleistocene and Modern Coarse-Grained Deltas South of the Gulf of Corinth, Greece. *Tectonic Controls and Signatures in Sedimentary Successions (Special Publication 20 of the IAS)*, 40:37, 2009.
- [33] Smith, Glenn S. Directive properties of antennas for transmission into a material half-space. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 32(3):232–246, 1984.
- [34] Telford, William Murray and Geldart, Lloyd P and Sheriff, Robert E. *Applied geophysics*, ολυμε 1. Cambridge university press, 1990.
- [35] Thomas M. Boyd. Introduction of Geophysical Exploration. 1999 S.E.G.

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - - Ακρωνύμια

βλπ	βλέπε
κ.λπ.	και λοιπά
κ.ο.κ	και ούτω καθεξής
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ERT	Electrical Resistivity Tomography
GPR	Ground Penetrating Radar
VES	Vertical Electrical Soundings

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Απόδοση

πίπτον βάρος
ανάκλαση
διάθλαση
νόμος
πλάτος προσπίπτοντος κύματος
πλάτος ανακλώμενου κύματος
πλάτος εκπεμπόμενου κύματος
μέτωπο κύματος ανάκλασης
ρηγματωμένο στρώμα
μέτωπο κύματος περίθλασης
σταθερή απόσταση πομπού-δέκτη
και άλλοι
αναστροφή
διακριτοποίηση μοντέλου
τελειοποίηση μοντέλου
περιορισμός
ζώνη μετασχηματισμού
επιλογή πρώτων αφίξεων
αφαίρεση «κακών» δεδομένων
ορθογώνιο σχέδιο

Ξενόγλωσσος όρος

drooping weight
Reflection
Refraction
law
incident ray amplitude
reflected ray amplitude
transmitted ray amplitude
reflection wavefront
faulted layer
diffraction wavefront
common offset
et.al. (et alii)
inversion
model discretization
model refinement
constraint
transfer zone
first break picking
bad data edit out
fault pattern

