



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση Γεωτεχνικών Προβλημάτων



ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΜΥΡΤΩ
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Γ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι αποτέλεσμα δουλειάς που είχε συγκεκριμένες απαιτήσεις και δυσκολίες. Με βοήθησε πολύ όμως, όχι μόνο στη διεύρυνση των επιστημονικών γνώσεων και υποβάθρων που μας έδωσε η σχολή, αλλά κυρίως, στην εμπειρία αντιμετώπισης ενός επιστημονικού προβλήματος, από την αρχή ως το τέλος, αξιοποιώντας μια σειρά από επιστημονικά εργαλεία, της γεωφυσικής και όχι μόνο.

Έμπνευσή μου για να ακολουθήσω το δρόμο της γεωφυσικής ήταν πρώτα και κύρια ο επιβλέπων καθηγητής ο κ. Γιώργος Αποστολόπουλος, τον οποίο και θέλω να ευχαριστήσω, πρώτα από όλα για τη βοήθειά του σε όλη την πορεία μου στο τελευταίο έτος της σχολής που σαν πραγματικός δάσκαλος στάθηκε σε μένα και στους συμφοιτητές μου.

Ευχαριστώ πολύ και τον κ. Γιώργο Αμολοχίτη για την πολύτιμη βοήθειά του σε όλη την πορεία της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμα, τους συμφοιτητές και πλέον φίλους μου, Βλασσοπούλου Αγγελική, Λοΐζο Φωκίων, Μακρή Γιώργο, Μιχαλόπουλο Κωνσταντίνο και Σταθοπούλου Κατερίνα, που ο καθένας βοήθησε στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, ευχαριστώ και ελπίζω να έχουμε την ευκαιρία να συνεργαστούμε ξανά στο μέλλον. Επίσης, τον Λεονταράκη Κωνσταντίνο, Διδάκτωρ Μεταλλειολόγο – Μεταλλουργό, για την πολύτιμη βοήθειά του στη διάρκεια των μετρήσεων. Ιδιαίτερα ευχαριστώ το συμφοιτητή και φίλο Κυριαζόπουλο Κωνσταντίνο, που από την πρώτη μέρα στο πρώτο έτος της σχολής, μέχρι και σήμερα, ήταν στήριγμα σε όλη μου την προσπάθεια.

Επιπλέον, δεν έχω τρόπο να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, που τόσα χρόνια με βοήθησαν να ακολουθήσω τα όνειρά μου και να γίνω ο άνθρωπος που είμαι σήμερα. Ακόμα, δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω τον αδελφό μου, Βασίλη, που αν και μικρός σε ηλικία αποτελεί στήριγμα στα δύσκολα. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους που ήταν και είναι δίπλα μου, και ιδιαίτερα τη φίλη μου Αντριάνα, που με υπομονή με βοήθησε όλα αυτά τα χρόνια.

Παπαδοπούλου Μυρτώ,

Μάρτιος 2015

Περίληψη

«Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση Γεωτεχνικών Προβλημάτων»

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα, στόχος μας ήταν να αποτυπωθεί η στρωματογραφία ώστε να δούμε που στέκεται ο ναός, σε τι βάθος εντοπίζεται το βραχώδες υπόβαθρο και να εντοπιστούν τυχόν τοπικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης. Επιπρόσθετα επιδίωξη της εργασίας ήταν και ο υπολογισμός των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων P και S. Αυτή η πληροφορία θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω έρευνα από Πολιτικούς Μηχανικούς, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ποια θα είναι η αντίδραση του κτιρίου της Μονής σε καταπόνηση από σεισμό. Αρχικά έγινε σχεδιασμός της έρευνας στην περιοχή μελέτης αξιοποιώντας γεωλογικά και ιστορικά στοιχεία, καθώς και πληροφορίες από τη διεθνή βιβλιογραφία, για περιπτώσεις έρευνας σε παρόμοιες συνθήκες. Αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν οι εξής γεωφυσικές μέθοδοι: Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (EMI), Ηλεκτρική Μέθοδος (ERT), Σεισμική Μέθοδος, Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR). Στη συνέχεια, έγινε επεξεργασία των δεδομένων της κάθε μέτρησης χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα: 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. Με βάση την επεξεργασία προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα. Έγινε σαφής αποτύπωση των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής κάτω από τη μονή, σε σχέση με τη συνεκτικότητα, την περατότητα και την κοκκομετρία, εντοπίστηκε το βάθος στο οποίο εκτιμάται ότι βρίσκεται η οροφή του βραχώδους υποβάθρου ενώ παράλληλα, εντοπίστηκαν και ορισμένες τοπικές δομές οι οποίες, εξαιτίας των διαστάσεών τους αλλά και των έντονων μεταβολών που παρουσιάζουν ως προς ορισμένες φυσικές ιδιότητες, σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, εκτιμάται ότι έχουν ανθρωπογενή προέλευση. Πρόκειται για τάφους και για υπόγειους αγωγούς.

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 τεσσάρων 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 στη Μονή Καισαριανής. Παραθέτονται ιστορικά στοιχεία για τη Μονή, 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. Για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, δημιουργούνται χάρτες φαινόμενης αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθη συνολικής διασκόπησης 3 και 6m. Με βάση τους χάρτες αυτούς, προκύπτουν και τα πρώτα συμπεράσματα σε σχέση με το υλικό που υπάρχει στο υπέδαφος της περιοχής μελέτης αλλά και για το αν υπάρχουν τοπικές δομές ή κατασκευές. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα δεδομένα της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, με βάση τα οποία εντοπίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια υπόγειες κατασκευές και 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 απασχολεί το μηχανικό η προσέγγιση ζητημάτων γεωτεχνικής φύσης, ειδικά όταν πρόκειται για κτίρια ιστορικής σημασίας, μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς.

Abstract

“Integrated geophysical investigation in the Monastery of Kaisariani in Athens in the frame of a geotechnical project”

The subject of the present thesis is the application of a geophysical investigation in the Monastery of Kaisariani, in order to solve several geotechnical problems. More specifically, our aim was to identify the stratigraphy of the area in order to determine where the temple stands, which is the depth of the bedrock and the location of possible local, man-made structures.

The calculation of the velocities of seismic waves P and S, was also a purpose of the present thesis. This information will be used for further research by Civil Engineers, in order to determine the response of this particular structure in case of an earthquake. Initially, the geophysical survey in the area was designed, using geological and historical data, as well as, information concerning similar international geophysical applications.

It was decided to conduct four different geophysical methods, Electromagnetic Method (EMI), Electrical Method (ERT), Seismic Method and the Ground-Penetrating Radar Method (GPR). The data of every method were processed using the appropriate computer programs: Surfer of Golden Software, RES2DINV of Geotomo Software, SeisImager and Plotrefa of EG&G GEOMETRICS and REFLEXW of Sandmeier Scientific Software. The interpretation of the geophysical results led us to specific conclusions.

The geological formations of the area were specifically determined, in terms of rigidity, permeability and grain size variation. The depth of the bedrock was also estimated. Furthermore, several local structures were located, which, because of their dimensions and the alterations of certain physical properties related to the surrounding material, are believed to be caused by anthropogenic factors. It is believed that they present graves or other subsurface structures.

The structure of the thesis consists of five chapters:

In the first chapter, the reader is introduced to the subject of applied geophysics generally, as well as the subject of the present thesis.

The second chapter refers to the theoretical principles that were used in order to understand and apply, more efficiently, the four geophysical methods. The basic techniques, instruments and the whole procedure that takes place for every method are presented.

In the third chapter, three case studies of geophysical applications are presented. These cases have general conditions and targets similar to our research.

In the fourth chapter, there is an extensive reference to each and every stage of the geophysical survey in the Monastery of Kaisariani. Historical information about the Monastery is presented along with the description of the geological features of the area. The methods that we decided to apply and the expected results of every method are also presented.

In the next sections, the procedures of the geophysical methods in the survey area, the characteristics of the instruments that were used and finally the methodology of the data processing are described. The processing results, which were used to come to different conclusions, are presented. For the electromagnetic method, maps of apparent conductivity and magnetic susceptibility, for both effective depths of 3 and 6 meters were created. According to these maps, some first information concerning, not only the material of the subsurface, but also the existence of local structures, can be derived.

Next comes the presentation of data from the geoelectrical tomography, based on which, subsurface structures and subsurface stratigraphy horizons were located more accurately, resulting to an estimation of the bedrock depth. These conclusions are followed by the seismic method data, according to which, alterations in the rigidity of the subsoil were recorded, and as a result, the depth of the bedrock was accurately defined. The last method, that is presented, is the GPR method, the conclusions of which were used in order to locate in detail subsurface horizons and structures.

In the fifth and last chapter, an overall evaluation of the research is given along with an estimation of the effectiveness of the methods, in cases where geotechnical issues is in engineers interests, especially when they refer to structures of historical importance.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| Ευχαριστίες | 3 |
| Περίληψη..... | 4 |
| Ευρετήριο Εικόνων | 11 |
| Ευρετήριο Πινάκων..... | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1..... | 16 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 16 |
| 1. Εισαγωγή..... | 17 |
| 1.1. Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας..... | 19 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2..... | 23 |
| ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ..... | 23 |
| 2.1. Ηλεκτρική Μέθοδος..... | 24 |
| 2.1.1. Γενικά..... | 24 |
| 2.1.1.1. Ηλεκτρικές μέθοδοι..... | 24 |
| 2.1.2. Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης..... | 25 |
| 2.1.2.1. Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης..... | 25 |
| 2.1.2.2. Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης..... | 26 |
| 2.1.2.3. Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο..... | 28 |
| 2.1.2.4. Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο..... | 30 |
| 2.1.2.5. Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο..... | 30 |
| 2.1.2.6. Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση..... | 31 |
| 2.1.2.7. Διατάξεις ηλεκτροδίων..... | 31 |
| 2.1.2.8. Εξοπλισμός Υπαίθρου..... | 33 |
| 2.1.3. Οριζόντιες ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις..... | 34 |
| 2.1.4. Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις..... | 35 |
| 2.1.5. Μέθοδος Διδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας..... | 36 |
| 2.1.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ηλεκτρικής Μεθόδου..... | 40 |
| 2.2. Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος..... | 41 |
| 2.2.1. Γενικά..... | 41 |
| 2.2.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα..... | 41 |
| 2.2.3. Μαγνητική Επιδεκτικότητα..... | 42 |
| 2.2.4. Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων - Εφαρμογές της μεθόδου..... | 42 |
| 2.2.4.1. Βάθος διείδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων..... | 44 |
| 2.2.4.2. Συστήματα Μέτρησης Φάσης..... | 44 |
| 2.2.4.5. Ηλεκτρομαγνητικό Όργανο Μέτρησης..... | 46 |
| 2.3 Μέθοδος Γεωραντάρ..... | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.1 Εισαγωγή..... | 49 |
| 2.3.2. Ιστορική αναδρομή του γεωραντάρ | 49 |
| 2.3.3. Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ | 49 |
| 2.3.4. Μετρήσεις στο υπαίθρο..... | 51 |
| 2.3.5. Βάθος και ανάλυση μετρήσεων..... | 52 |
| 2.3.6. Απεικόνιση των δεδομένων των μετρήσεων γεωραντάρ | 53 |
| 2.3.7. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου | 53 |
| 2.4. Σεισμική μέθοδος | 54 |
| 2.4.1. Εισαγωγή..... | 54 |
| 2.4.2. Γενικά..... | 54 |
| 2.4.3. Ελαστικές Σταθερές | 55 |
| 2.4.4. Σεισμικά Κύματα..... | 57 |
| 2.4.5. Ταχύτητες διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων εντός των Διαφόρων Πετρωμάτων .. | 59 |
| 2.4.6. Εξασθένιση της Σεισμικής Ενέργειας | 60 |
| 2.4.7. Εξοπλισμός..... | 60 |
| 2.4.8. Σεισμικές Ακτίνες σε Μέσο με Στρώσεις..... | 62 |
| 2.4.8.1. Ανάκλαση και διάδοση σεισμικών ακτίνων που προσπίπτουν κατακόρυφα | 62 |
| 2.4.8.2. Ανάκλαση και διάθλαση σεισμικών ακτίνων που προσπίπτουν υπό γωνία | 65 |
| 2.4.8.3. Οριακά διαθλώμενα κύματα..... | 65 |
| 2.4.8.4. Περίθλαση | 66 |
| 2.4.9. Σεισμική Ανάκλαση και Σεισμική Διάθλαση..... | 67 |
| 2.4.10. Μέθοδος της σεισμικής διάθλασης | 67 |
| 2.4.10.1.Γενικά..... | 67 |
| 2.4.10.2. Εργασίες υπαίθρου | 68 |
| 2.4.10.3. Πηγές θορύβου | 69 |
| 2.4.10.4. Καταγραφές της εδαφικής κίνησης | 70 |
| 2.4.10.5. Δρομοχρονικές καμπύλες..... | 71 |
| 2.4.10.6. Προσδιορισμός της δομής του υπεδάφους | 72 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3..... | 80 |
| 3. Εφαρμογές της γεωφυσικής σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς..... | 81 |
| 3.1. Ναός Αγίας Σοφίας, Κωνσταντινούπολη | 81 |
| 3.2. Καπνικαρέα, Αθήνα | 83 |
| 3.3. Κάστρο Occhiola, Σικελία, Ιταλία | 90 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4..... | 98 |
| 4. Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής | 99 |
| 4.1. Γενικά..... | 99 |

| | |
|---|------------|
| 4.2. Η Μονή Καισαριανής ως ιστορικό μνημείο..... | 99 |
| 4.3. Γεωλογία της Περιοχής..... | 104 |
| 4.3.1. Γεωλογικά στοιχεία της περιοχής του Υμηττού..... | 104 |
| 4.3.2. Υδρογεωλογικές συνθήκες..... | 108 |
| 4.4. Γεωφυσική Έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα..... | 110 |
| 4.4.1. Εισαγωγή..... | 110 |
| 4.4.2. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος..... | 112 |
| 4.4.2.1. Εισαγωγή..... | 112 |
| 4.4.2.2. Εξοπλισμός..... | 113 |
| 4.4.2.3. Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες..... | 116 |
| 4.4.3. Ηλεκτρική Μέθοδος..... | 120 |
| 4.4.3.1. Εισαγωγή..... | 120 |
| 4.4.3.2. Εξοπλισμός..... | 120 |
| 4.4.3.3. Επεξεργασία μετρήσεων..... | 121 |
| 4.4.3.4. Αποτελέσματα μετρήσεων..... | 124 |
| 4.4.4. Σεισμική Μέθοδος..... | 126 |
| 4.4.4.1. Εισαγωγή..... | 126 |
| 4.4.4.2. Εξοπλισμός..... | 127 |
| 4.4.4.3. Επεξεργασία Μετρήσεων..... | 127 |
| 4.4.4.4. Αποτελέσματα Μετρήσεων..... | 129 |
| 4.4.4.5. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων..... | 139 |
| 4.4.5. Μέθοδος γεωραντάρ (GPR)..... | 140 |
| 4.4.5.1. Εισαγωγή..... | 140 |
| 4.4.5.2. Επεξεργασία των μετρήσεων..... | 141 |
| 4.4.5.3. Τομές Γεωραντάρ..... | 144 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5..... | 147 |
| 5. Συμπεράσματα και σχόλια..... | 148 |
| 5.1. Συμπεράσματα..... | 148 |
| 5.2. Σχόλια..... | 151 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6..... | 152 |
| 6. Βιβλιογραφία..... | 153 |

Ευρετήριο Εικόνων

| | |
|---|----|
| <i>Εικόνα 1.1: Η γεωφυσική ομάδα. Από αριστερά: Φ.Λοΐζος, Γ.Αμολοχίτης (ΕΔΙΠ ΕΜΠ), Γ. Αποστολόπουλος Επικ. Καθηγητής, Μ.Παπαδοπούλου, Κ.Σταθοπούλου και Α.Βλασσοπούλο</i> | 21 |
| <i>Εικόνα 1.2: Λήψη δεδομένων σεισμικής μεθόδου στο ύπαιθρο.</i> | 21 |
| <i>Εικόνα 1.3: Η γεωφυσική ομάδα κατά την εφαρμογή της μεθόδου GPR στη Μονή Καισαριανής.</i> | 22 |
| <i>Εικόνα 1.4: Σειρά γεωφώνων από τη σεισμική μέθοδο στη Μονή Καισαριανής.</i> | 22 |
| <i>Εικόνα 2.1: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου</i> | 26 |
| <i>Εικόνα 2.2: Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο</i> | 29 |
| <i>Εικόνα 2.3: Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο</i> | 30 |
| <i>Εικόνα 2.4: Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο</i> | 31 |
| <i>Εικόνα 2.5: Διατάξεις ηλεκτροδίων</i> | 32 |
| <i>Εικόνα 2.6: Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Vogelsang.1995)</i> | 34 |
| <i>Εικόνα 2.7: Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης Dipole–Dipole (α), Wenner (β) και Schlumberger (γ) (Μαυρομμάτης. 2007)</i> | 35 |
| <i>Εικόνα 2.8: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης. 2004)</i> | 36 |
| <i>Εικόνα 2.9: Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση διδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 1996)</i> | 37 |
| <i>Εικόνα 2.10: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου. (Loke. 1996)</i> .. | 38 |
| <i>Εικόνα 2.11: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με περισσότερα κελιά από τα δεδομένα. (Loke. 1996)</i> | 38 |
| <i>Εικόνα 2.12: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με επιμήκυνση στις άκρες της γραμμής των μετρήσεων. (Loke. 1996)</i> | 39 |
| <i>Εικόνα 2.13: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τις τιμές ευαισθησίας ενός μοντέλου ομογενούς γης. (Loke. 1996)</i> | 39 |
| <i>Εικόνα 2.14: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων</i> | 40 |
| <i>Εικόνα 2.15: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)</i> | 43 |
| <i>Εικόνα 2.16: Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου</i> | 46 |
| <i>Εικόνα 2.17: Αρχή λειτουργίας του Γεωραντάρ (Σπανουδάκης. 2007)</i> | 50 |
| <i>Εικόνα 2.18: α) Το σύστημα του Γεωραντάρ β) Σχηματική τομή του υπεδάφους γ) Απεικόνιση των δεδομένων με τοποθέτηση των ραδιογραμμμάτων (ιχνών) το ένα δίπλα στο άλλο</i> | 51 |
| <i>Εικόνα 2.19: Μέτρο Ελαστικότητας (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/)</i> | 55 |
| <i>Εικόνα 2.20: Μέτρο κυβικής ελαστικότητας</i> | 56 |
| <i>Εικόνα 2.21: Μέτρο Ακαμψίας</i> | 56 |

| | |
|--|------------|
| <i>Εικόνα 2.22: Κύματα S και P (http://www.ucl.ac.uk/)</i> | <i>57</i> |
| <i>Εικόνα 2.23: Κύματα Love και Rayleigh (http://www.ucl.ac.uk/).....</i> | <i>58</i> |
| <i>Εικόνα 2.24: Κατακόρυφα προσπίπτουσα σεισμική ακτίνα (Keary & Brooks).....</i> | <i>63</i> |
| <i>Εικόνα 2.25: Μετωπικά κύματα.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Εικόνα 2.26: Περίθλαση στο άκρο ρωγματομένου στρώματος (Keary & Brooks).....</i> | <i>66</i> |
| <i>Εικόνα 2.27: Διάταξη για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων στην ύπαιθρο (Λούης, 2004)</i> | <i>68</i> |
| <i>Εικόνα 2.28: Σεισμική καταγραφή κοινής πηγής.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Εικόνα 2.29: Δρομοχρονική καμπύλη πρώτων αφίξεων (Thomas M. Boyd, 1999).....</i> | <i>72</i> |
| <i>Εικόνα 2.30: Μοντέλο στρώματος πάνω από ημιχώρο, με οριζόντια διεπιφάνεια (Keary & Brooks).....</i> | <i>73</i> |
| <i>Εικόνα 2.31: Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου δύο στρωμάτων (Keary & Brooks) ...</i> | <i>74</i> |
| <i>Εικόνα 2.32: Μοντέλο δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με οριζόντιες διεπιφάνειες (Keary & Brooks).....</i> | <i>75</i> |
| <i>Εικόνα 2.33: Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου τριών στρωμάτων (Keary & Brooks)</i> | <i>76</i> |
| | |
| <i>Εικόνα 3.1: Οι μετρήσεις με GPR στο επίπεδο του δαπέδου του ναού.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Εικόνα 3.2: Ανακλάσεις R1 και R2 από την κορυφή και τη βάση της δεξαμενής κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα</i> | <i>82</i> |
| <i>Εικόνα 3.3: Κάνναβος μετρήσεων της σεισμικής μεθόδου.....</i> | <i>82</i> |
| <i>Εικόνα 3.6: Η εκκλησία της Καπνικαρέας στη μέση της οδού Ερμού στην Αθήνα.....</i> | <i>84</i> |
| <i>Εικόνα 3.7: α)Οι μετρήσεις ERT μέσα και έξω από την εκκλησία. β)Ηλεκτρόδια μέσα στην εκκλησία.</i> | <i>85</i> |
| <i>Εικόνα 3.8: Γεωηλεκτρικές τομές στο βόρειο τμήμα έξω από την εκκλησία της Καπνικαρέας</i> | <i>86</i> |
| <i>Εικόνα 3.9: Γεωηλεκτρικές τομές μέσα στην εκκλησία της Καπνικαρέας σε διεύθυνση Α-Δ.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Εικόνα 3.10: Συνολικά αποτελέσματα της μεθόδου</i> | <i>88</i> |
| <i>Εικόνα 3.11: Χάρτης όπου φαίνεται η θέση του χωριού Occhiola στην Ιταλία</i> | <i>90</i> |
| <i>Εικόνα 3.12: Η περιοχή μελέτης</i> | <i>91</i> |
| <i>Εικόνα 3.13: 2D-Μοντέλο ειδικών αντιστάσεων.....</i> | <i>91</i> |
| <i>Εικόνα 3.14: 3D-Μοντέλο ειδικών αντιστάσεων.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Εικόνα 3.15: 3D-Μοντέλο ειδικών αντιστάσεων.....</i> | <i>93</i> |
| <i>Εικόνα 3.16: Πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Εικόνα 3.17: Μοντέλο σεισμικών ταχυτήτων</i> | <i>95</i> |
| <i>Εικόνα 3.18: 3D απεικόνιση επιφανειών ίσων σεισμικών ταχυτήτων.....</i> | <i>96</i> |
| | |
| <i>Εικόνα 4. 1: Ο Ναός αφιερωμένος στα Εισόδια της Θεοτόκου</i> | <i>99</i> |
| <i>Εικόνα 4.2: Χειροποίητο σχέδιο της Μονής Καισαριανής το 1745</i> | <i>101</i> |
| <i>Εικόνα 4.3: Το εσωτερικό του ναού.....</i> | <i>102</i> |
| <i>Εικόνα 4.4: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Γεωλογικός χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε., Φύλλο Κορωπί – Πλάκα, 1997-2000).....</i> | <i>107</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Εικόνα 4.5: Κάνναβος μετρήσεων για το σύνολο των γεωφυσικών μεθόδων στη Μονή Καισαριανής.....</i> | <i>111</i> |
| <i>Εικόνα 4.6: Μετρήσεις με το ηλεκτρομαγνητικό όργανό στη Μονή Καισαριανής.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Εικόνα 4.7: Κάνναβος μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου</i> | <i>113</i> |
| <i>Εικόνα 4.8: Το ηλεκτρομαγνητικό όργανο CMD της GF Instruments (CMD, Electromagnetic Conductivity Meter User Manual)</i> | <i>114</i> |
| <i>Εικόνα 4.9: α) Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος</i> | <i>116</i> |
| <i>Εικόνα 4.10: α) Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 6m. β) Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 6m.</i> | <i>118</i> |
| <i>Εικόνα 4.11: α)Κάνναβος μετρήσεων ηλεκτρικής μεθόδου β)Μετρήσεις ηλεκτρικής μεθόδου μέσα στην Εκκλησία.....</i> | <i>120</i> |
| <i>Εικόνα 4.12: Οι γεωηλεκτρικές τομές KES2, KES1 και KES3, επεξεργασμένες με τις επιλογές Standard – Standard(SS), (Robust – Standard(RS), Robust – Robust(RR) και Robust – Standard – Horizontal (RSH) του προγράμματος RES2dinv.....</i> | <i>123</i> |
| <i>Εικόνα 4.13: α)Γεωηλεκτρική τομή KES2 β)Γεωηλεκτρική τομή KES1 γ)Γεωηλεκτρική τομή KES3.....</i> | <i>124</i> |
| <i>Εικόνα 4.14: Κάνναβος μετρήσεων σεισμικής μεθόδου</i> | <i>126</i> |
| <i>Εικόνα 4.15: Το ειδικό μολυβένιο πλακίδιο που χρησιμοποιήθηκε σε περιπτώσεις που δεν υπήρχε στο έδαφος χώμα.</i> | <i>127</i> |
| <i>Εικόνα 4.16: Σεισμόγραμμα 1-12</i> | <i>129</i> |
| <i>Εικόνα 4.17: Σεισμόγραμμα 1-27</i> | <i>130</i> |
| <i>Εικόνα 4.18: Δρομοχρονική καμπύλη για τη σεισμική γραμμή SEIS1.....</i> | <i>131</i> |
| <i>Εικόνα 4.19:Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή SEIS1</i> | <i>132</i> |
| <i>Εικόνα 4.20: Σεισμόγραμμα 2-15</i> | <i>133</i> |
| <i>Εικόνα 4.21: Σεισμόγραμμα 2-37</i> | <i>134</i> |
| <i>Εικόνα 4.22: Δρομοχρονική καμπύλη για τη σεισμική γραμμή SEIS2.....</i> | <i>135</i> |
| <i>Εικόνα 4.23: Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή SEIS2</i> | <i>135</i> |
| <i>Εικόνα 4.24: Σεισμόγραμμα 3-0</i> | <i>136</i> |
| <i>Εικόνα 4.25: Σεισμόγραμμα 3-24</i> | <i>137</i> |
| <i>Εικόνα 4.26: Δρομοχρονική καμπύλη για τη σεισμική γραμμή SEIS3.....</i> | <i>138</i> |
| <i>Εικόνα 4.27: Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή SEIS3</i> | <i>138</i> |
| <i>Εικόνα 4.28: Κάνναβος μετρήσεων μεθόδου GPR.</i> | <i>140</i> |
| <i>Εικόνα 4.29: Μετρήσεις γεωραντάρ μέσα στο ναό.....</i> | <i>141</i> |
| <i>Εικόνα 4.30: Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων της μεθόδου GPR για τις τομές GPR1, GPR3 και GPR8 για την περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκε πομπός και δέκτης 250 MHz και για την περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκε πομπός 250MHz και δέκτης 500MHz.</i> | <i>143</i> |
| <i>Εικόνα 4.31: α)Τομή GPR1 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz β)Τομή GPR1 με συνδυασμό πομπού 250MHz και δέκτη 500MHz.</i> | <i>144</i> |
| <i>Εικόνα 4.32: α)Τομή GPR3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz β)Τομή GPR3 με συνδυασμό πομπού 250MHz και δέκτη 500MHz.</i> | <i>145</i> |

**Εικόνα 4.33: α) Τομή GPR3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz β) Τομή GPR3 με
συνδυασμό πομπού 250MHz και δέκτη 500MHz.146**

Ευρετήριο Πινάκων

| | |
|--|-----------|
| Πίνακας 1: Εφαρμογές Γεωφυσικών Μεθόδων..... | 18 |
| Πίνακας 2: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος Γεώργιος. 2013) | 27 |
| Πίνακας 3: Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων. | 28 |
| Πίνακας 4: Σεισμικές ταχύτητες των P κυμάτων για διάφορα υλικά | 59 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Εισαγωγή

Γεωφυσική είναι η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της φυσικής για να μελετήσει τη γη. Η γεωφυσική είναι εφαρμοσμένη επιστήμη και συνεπώς η γεωφυσική έρευνα έχει στόχο την αξιοποίηση των γεωφυσικών γνώσεων για πρακτικούς σκοπούς. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έρευνα έχει μεγάλη πρακτική σημασία για το μηχανικό, αφού δίνει τη δυνατότητα μελέτης του φλοιού της γης και των επιφανειακών στρωμάτων, εντοπισμού δομών που σχετίζονται με την εμφάνιση κοιτασμάτων, πετρελαίου και φυσικού αερίου, μεταλλευμάτων, πηγών γεωθερμικής ενέργειας κλπ. Ακόμα, η εφαρμογή γεωφυσικών μελετών, δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων της γης, γεγονός μεγάλης σημασίας για το σχεδιασμό της κατασκευής και την παρακολούθηση μεγάλων τεχνικών έργων.

Η γεωφυσική αναλύει φυσικά φαινόμενα, όπως είναι η βαρύτητα, ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, η διάδοση των σεισμικών κυμάτων κλπ, που υπάρχουν ή δημιουργούνται μέσα στη γη, και μελετά τις αντίστοιχες φυσικές ιδιότητες, όπως είναι η πυκνότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

Η γεωφυσική διασκόπηση προλαμβάνει τη λήψη μετρήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, οι οποίες επηρεάζονται από την εσωτερική κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων της γης. Επομένως, για τον εντοπισμό κάποιας τοπικής δομής στο υπέδαφος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες, εκείνα που διαφοροποιούνται σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Οι γεωφυσικές μέθοδοι, λοιπόν, έχουν έναν περιορισμό. Μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο «ανωμαλίες», δηλαδή περιοχές ή στόχους, όπου κάποια φυσική ιδιότητα παρουσιάζει επαρκώς διαφορετική τιμή από τον περιβάλλοντα χώρο.

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 που ακολουθεί.

Πίνακας 1: Εφαρμογές Γεωφυσικών Μεθόδων

| 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 |
| Σεισμική Μέθοδος | <ul style="list-style-type: none">Χρόνοι διαδρομής σεισμικών κυμάτωνΠερίοδοι σεισμικών κυμάτωνΠλάτη σεισμικών κυμάτων | Καθορισμός της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων |
| Ηλεκτρική Μέθοδος | <ul style="list-style-type: none">Ειδική ηλεκτρική αντίσταση της γηςΗλεκτρικά δυναμικά | Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροχωρητικότητα) |
| Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος | Αντίδραση σε ηλεκτρομαγνητική διέγερση | Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή) |
| Ραδιομετρική Μέθοδος | Φυσική ραδιενέργεια | Προσδιορισμός της φυσικής ραδιενέργειας των πετρωμάτων |
| Θερμική Μέθοδος | Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης | Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων |

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 επιδεκτικής 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 ακόρεστο.

- 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.

1.1. Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων. Η Μονή Καισαριανής αποτελεί μνημείο πολιτιστικής κληρονομιάς και η σημασία της παρούσας μελέτης σχετίζεται άμεσα με την ανάγκη προστασίας και διατήρησης τέτοιων μνημείων. Η εφαρμογή γεωφυσικής μελέτης κρίθηκε απαραίτητη, αφού παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής ικανοποιητικών συμπερασμάτων ενώ, ταυτόχρονα, είναι μη καταστροφική μέθοδος.

Πιο συγκεκριμένα, στόχος μας ήταν να αποτυπωθεί η στρωματογραφία ώστε να δούμε που στέκεται ο ναός, σε τι βάθος εντοπίζεται το βραχώδες υπόβαθρο και να εντοπιστούν τυχόν τοπικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης. Επιπρόσθετα επιδίωξη της εργασίας ήταν και ο υπολογισμός των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων P και S. Αυτή η πληροφορία θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω έρευνα από Πολιτικούς Μηχανικούς, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ποια θα είναι η αντίδραση του κτιρίου της Μονής σε καταπόνηση από σεισμό.

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

- Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (EMI)
- 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. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2, με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m, και CMD-4, με βάθος συνολικής

διασκόπησης τα 6 m. Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCALPro. 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 250MHz και πηγή η κεραία 250MHz και δέκτης η κεραία 500MHz.

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 η μονή, 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 περεταίρω έρευνα.



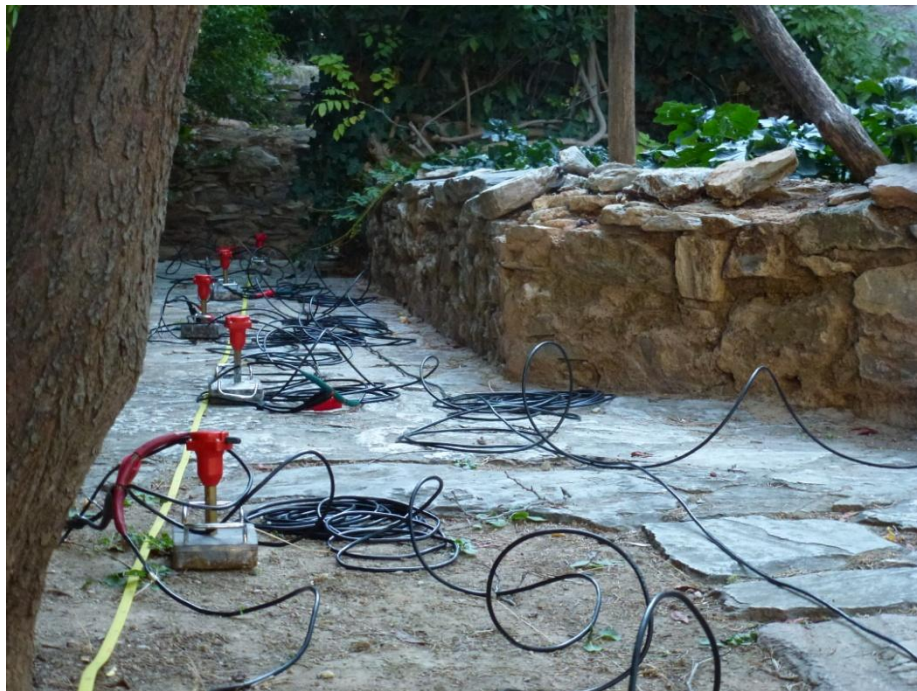
Εικόνα 1.1: Η γεωφυσική ομάδα. Από αριστερά: Φ.Λοΐζος, Γ.Αμολοχίτης (ΕΔΙΠ ΕΜΠ,) Γ. Αποστολόπουλος Αναπλ. Καθηγητής, Μ. Παπαδοπούλου, Κ. Σταθοπούλου και Α. Βλασσοπούλου.



Εικόνα 1.2: Λήψη δεδομένων σεισμικής μεθόδου στο ύπαιθρο.



Εικόνα 1.3: Η γεωφυσική ομάδα κατά την εφαρμογή της μεθόδου GPR στη Μονή Καισαριανής.



Εικόνα 1.4: Σειρά γεωφώνων από τη σεισμική μέθοδο στη Μονή Καισαριανής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Ηλεκτρική Μέθοδος

2.1.1. Γενικά

Η εμφάνιση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης χρονολογείται από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών επιτεύχθηκε ο εντοπισμός φυσικού αερίου στη Ρουμανία το 1923 και αλατούχων δόμων στη Γαλλία το 1926. Η συστηματική εφαρμογή τους ξεκίνησε τη δεκαετία του '70 και αυτό λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γεγονός που βοήθησε τόσο στη συλλογή των δεδομένων όσο και στην επεξεργασία τους.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Παρουσιάζουν ποικιλία τεχνικών έναντι άλλων μεθόδων όπως η βαρυτική, η μαγνητική, η σεισμική και η ηλεκτρομαγνητική. Μετριοούνται συνήθως δυναμικά, ρεύματα (εντάσεις και πυκνότητες) και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται είτε από φυσικές είτε από τεχνητές πηγές. Η κύρια παράμετρος που μετρείται εδώ είναι η ηλεκτρική ειδική αντίσταση ρ , ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ . (Παπαδόπουλος, Ταξιάρχης, 2008)

2.1.1.1. Ηλεκτρικές μέθοδοι

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

Παθητικές Μέθοδοι:

Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self Potential Method). Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία, είτε σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, είτε είναι ηλεκτροκινητικής ή γεωθερμικής προέλευσης. Εφαρμόζεται σε υδρογεωλογικές ή γεωθερμικές έρευνες.

Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric Method). Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη – μέχρι και το μανδύα – μέσα στη γη.

Ενεργητικές Μέθοδοι:

Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method). Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, μέσα στα βάθη διασκόπησης.

Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method). Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν, το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται, παύει να διαβιβάζεται, στο έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγωγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

2.1.2. Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

2.1.2.1. Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης

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

- τον ηλεκτρικό (Ωμικό)
- τον ηλεκτρολυτικό και
- τη διηλεκτρική μετάδοση.

Ο πρώτος τρόπος είναι ο κανονικός και γίνεται με τη ροή ρεύματος σε υλικά που έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι τα μέταλλα. Στον ηλεκτρολυτικό τρόπο το ρεύμα δημιουργείται από τα ιόντα που μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό. 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.

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

Ο υπολογισμός της στηρίζεται στο νόμο του Ohm:

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

όπου V: η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα κυλινδρικής αντίστασης (Volt),

I: η ένταση του ρεύματος που την διαρρέει (Ampere) και

R: η ηλεκτρική της αντίσταση (Ohm).

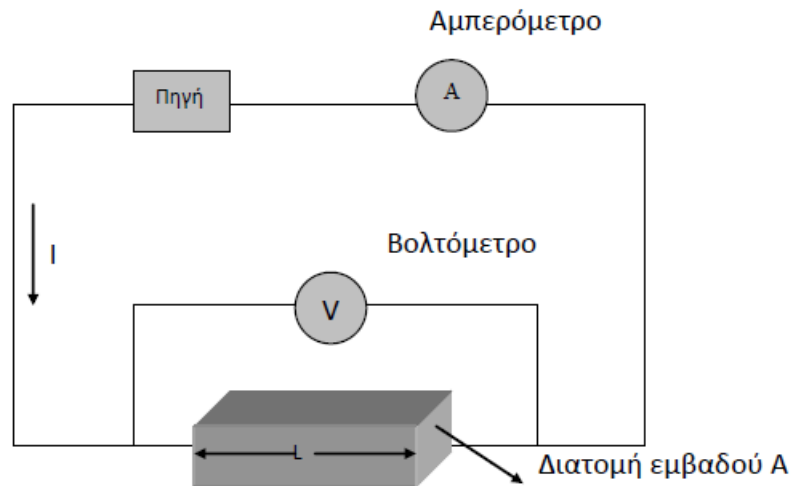
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ υπολογίζεται από την σχέση

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

όπου R: η ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)

A: το εμβαδό της διατομής του κυλίνδρου (m^2), και

L: το μήκος του κυλίνδρου (m)



Εικόνα 2.5: 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 Ohm.m. 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 siemens / m.

2.1.2.2. 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.

Πίνακας 2: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

| ΥΛΙΚΟ | ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.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 | $1 - 1 \cdot 10^3$ |
| Αργίλος | $1 - 1 \cdot 10^2$ |
| Εδαφικό Νερό | 0,5 – 300 |
| Θαλασσινό νερό | 0,2 |

- 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 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι επιδράσεις των διαφόρων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων. Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση αλλά υπάρχουν εξαιρέσεις.

Πίνακας 3: Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων.

| 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 |

- Ηλικία πετρώματος

Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

- 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

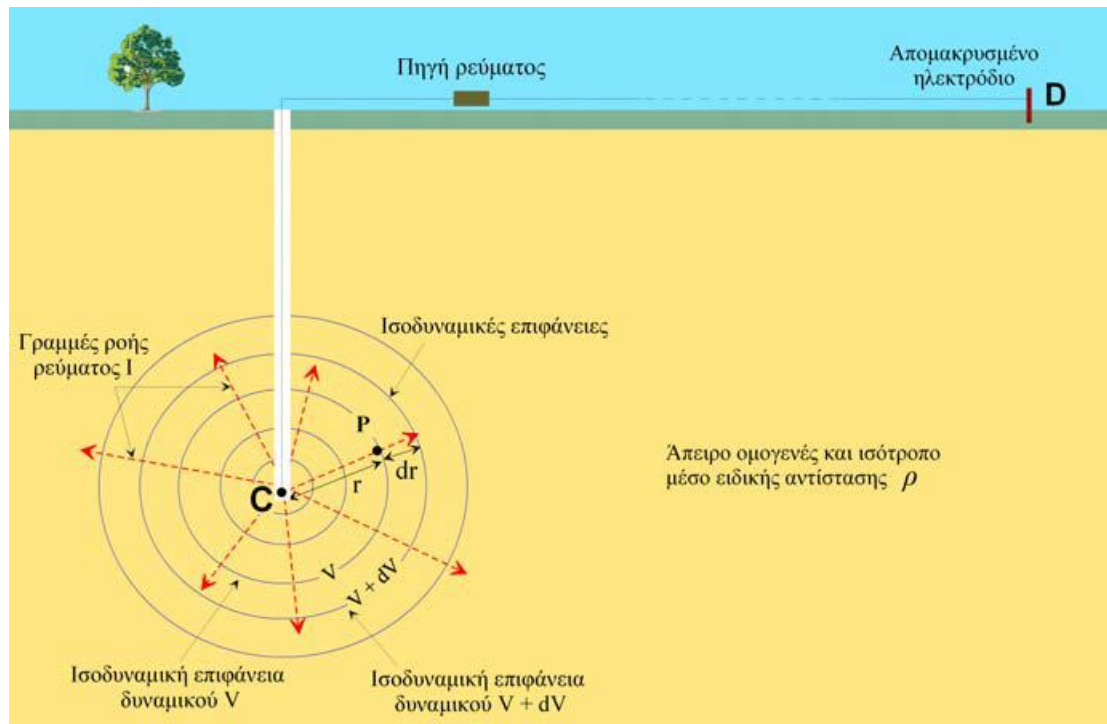
Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Αυτός ο παράγοντας, ωστόσο, έχει τόσο μικρή επίδραση, ώστε να διαδραματίζει αξιοσημείωτο ρόλο μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες.

(Αποστολόπουλος Γεώργιος. 2013)

2.1.2.3. Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

Για να περιγράψουμε τη φύση του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα μέσο που καταλαμβάνει κάποιο όγκο, πρέπει να κινηθούμε πέρα από τις απλές έννοιες του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού από την εμπειρία μας με τα καλώδια, τις αντιστάσεις και τις μπαταρίες. Μέσα στη γη, ή σε οποιοδήποτε τρισδιάστατο σώμα, το ηλεκτρικό ρεύμα δεν περιορίζεται σε μια ροή κατά μήκος μιας μοναδικής διαδρομής όπως συμβαίνει με το καλώδιο. Προσωρινά σε αυτό το στάδιο, θα δεχτούμε ότι η ειδική αντίσταση της γης είναι ενιαία σε όλη τη μάζα της (ομογενής ηλεκτρικά 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 δεύτερου 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.



Εικόνα 2.6: Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

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.

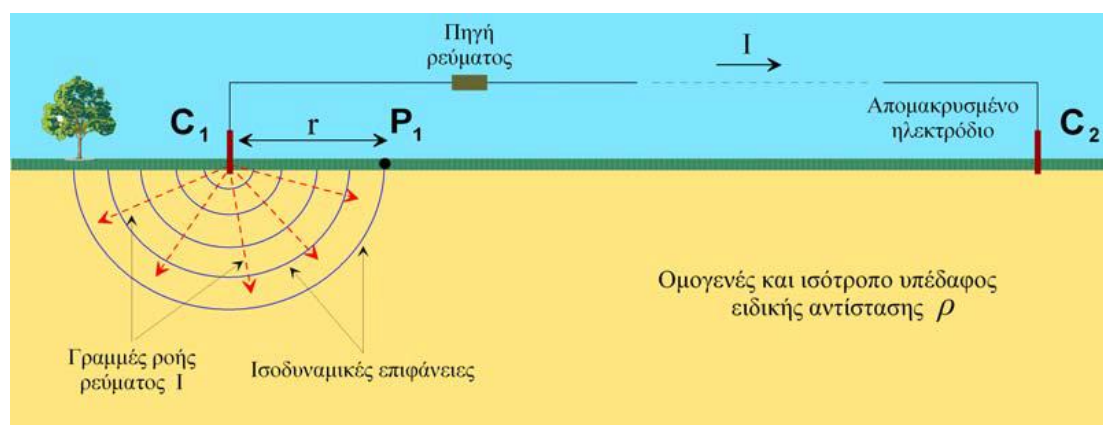
Οι γραμμές αυτές καλούνται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials). Στις τρεις διαστάσεις, οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο. Μερικές ισοδυναμικές γραμμές δείχνονται με μπλε κύκλους.

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. Επομένως, αν τα σημεία βρίσκονται πάνω σε ένα μπλε κύκλο με κέντρο το ηλεκτρόδιο ρεύματος, δεν θα καταγραφεί διαφορά δυναμικού, διότι οι δύο αυτές θέσεις βρίσκονται πάνω στην ίδια ισοδυναμική γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι, αν παίρναμε το βολτόμετρο και ενώναμε τους δύο ακροδέκτες του με

τα δύο αυτά σημεία της γης, θα καταγράφαμε διαφορά δυναμικού ίση με μηδέν. Σε σχέση με το δυναμικό κοντά στο ηλεκτρόδιο, οι διαφορές δυναμικού αυξάνουν καθώς απομακρυνόμαστε από το ηλεκτρόδιο. Αυτό είναι λογικό, εφόσον η μέτρηση που κάνουμε με το βολτόμετρο είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το μέσο επί την ειδική αντίσταση του μέσου, σύμφωνα με το νόμο του Ohm. 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.

2.1.2.4. Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο

Συνθήκες ομογενούς ημιχώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση μικρών διαστάσεων ηλεκτροδίου, C_1 , (σημειακή πηγή ρεύματος) στην επιφάνεια ομογενούς γης (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.

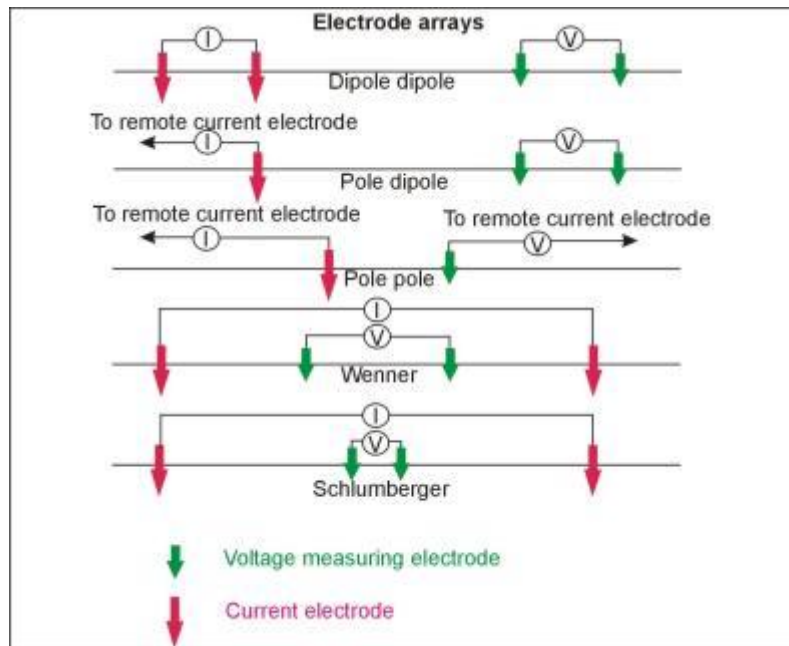


Εικόνα 2.7: Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες.

2.1.2.5. Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο

Στις περιπτώσεις του άπειρου ομογενή χώρου και του ημιάπειρου ομογενή χώρου, τα δυο ηλεκτρόδια C_1 και C_2 , απέχουν μεταξύ τους μεγάλη απόσταση ώστε η επίδραση του ενός στη διαμόρφωση του δυναμικού του άλλου να 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)



Εικόνα 2.9: Διατάξεις ηλεκτροδίων.

Οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων είναι οι εξής:

Διάταξη 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:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * \frac{\pi * (L^2 - l^2)}{2l} \quad (2.3)$$

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

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi * a \quad (2.4)$$

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:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * \pi * n * (n + 1)(n + 2)a \quad (2.5)$$

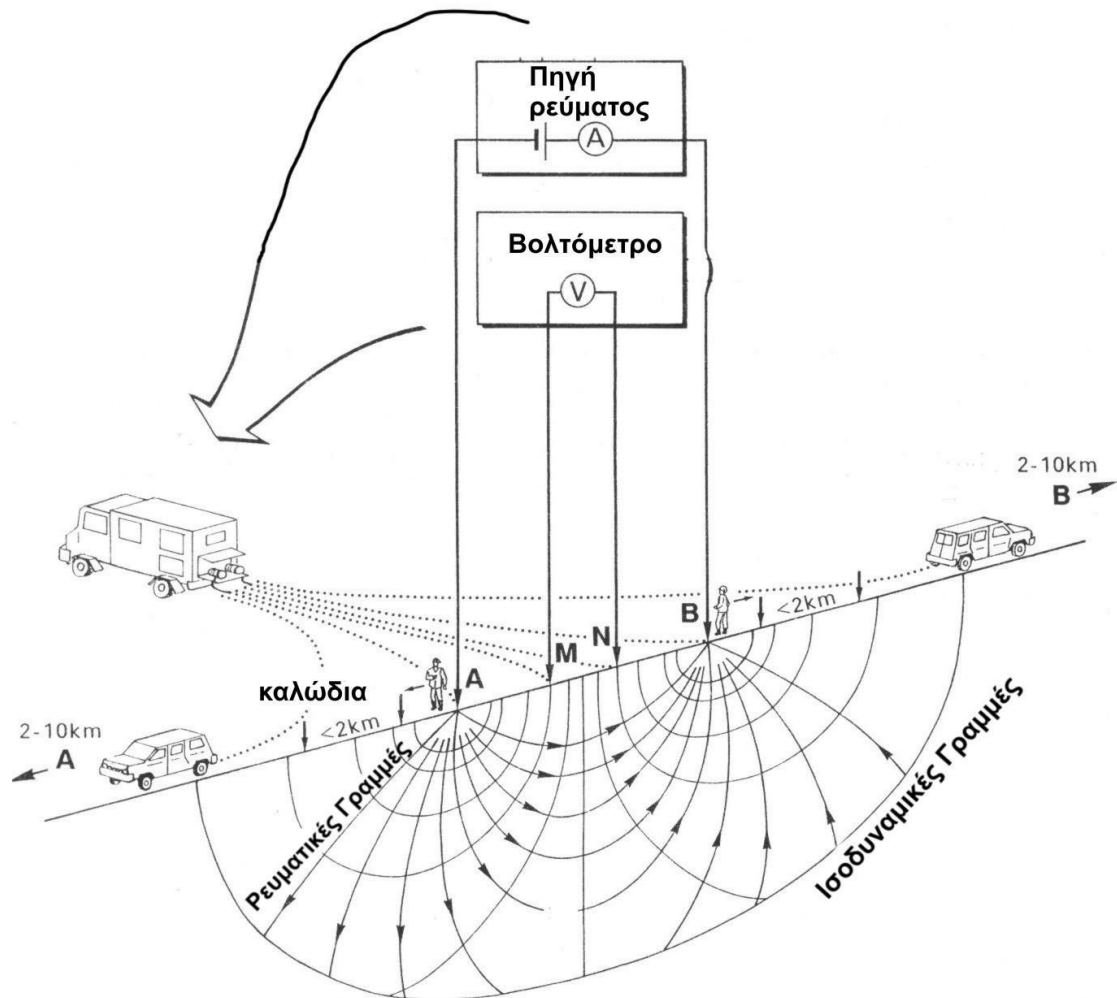
Διάταξη Pole – Pole: Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

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

2.1.2.8. Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να μετρήσουμε τη φαινόμενη ειδική αντίσταση, δηλαδή τα ΔV και I , χρειαζόμαστε:

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. **Όργανο 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 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**

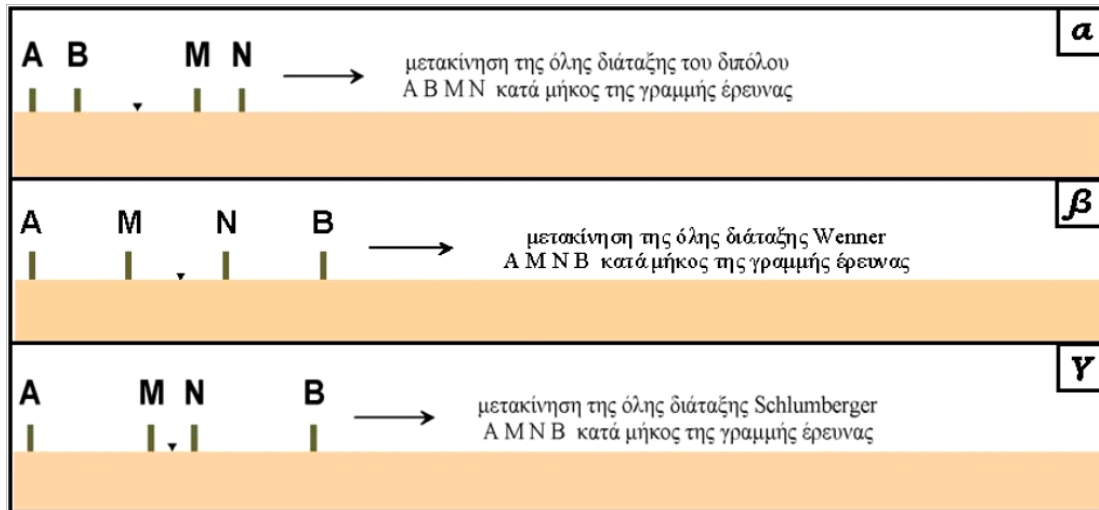


I = Εισερχόμενο Ρεύμα
 U = Διαφορά Δυναμικού
 A, B = Ηλεκτρόδια Ρεύματος
 M, N = Ηλεκτρόδια Δυναμικού

Εικόνα 2.10: Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Vogelsang, 1995)

2.1.3. Οριζόντιες ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις

Αν κρατήσουμε τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού σταθερές μεταξύ τους και μετακινούμε όλη τη διάταξη κατά μήκος μιας γραμμής ή χωρικά σε μια ευρύτερη περιοχή, τότε διασκοπούμε παράπλευρα το χώρο σε ένα περίπου σταθερό μέσο βάθος μέσω της κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που μετρούμε. Η κατανομή αυτή ποιοτικά δίνει τη χωρική κατανομή στο συγκεκριμένο βάθος γεωηλεκτρικών σχηματισμών. Επομένως, χρησιμοποιώντας οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις μας δίνεται η δυνατότητα να σαρώσουμε πλευρικά μια ζώνη συγκεκριμένου πάχους και να μελετήσουμε την πλευρική διαφοροποίηση του υλικού της ζώνης από τη μελέτη της οριζόντιας (πλευρικής) μεταβολής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

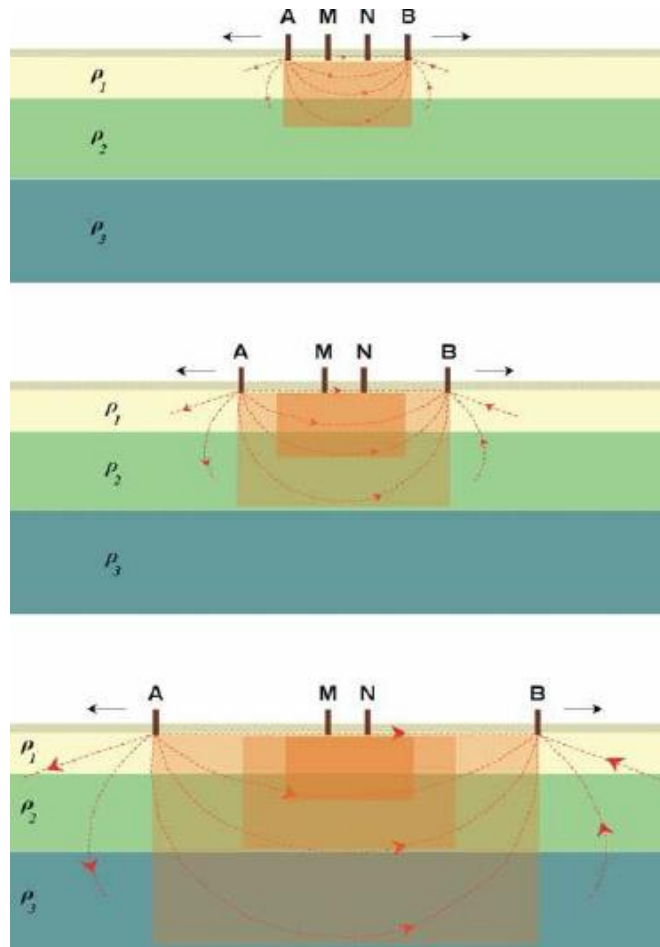


Εικόνα 2.11: Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης Dipole–Dipole (α), Wenner (β) και Schlumberger (γ) (Μαυρομμάτης, 2007)

Τα πειράματα αυτά παρέχουν μετρήσεις της χωρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης για καθορισμένη απόσταση ηλεκτροδίων, τα αποτελέσματα πολλών σειρών μετρήσεων ηλεκτρικής χαρτογράφησης (η οποία ονομάζεται προφίλ ειδικής αντίστασης), χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση χαρτών που παρουσιάζουν καμπύλες ίσων τιμών ειδικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα της έρευνας των οριζόντιων μεταβολών της ειδικής αντίστασης επιδέχονται μόνο ποιοτική ερμηνεία.

2.1.4. Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις

Αν κρατήσουμε το κέντρο της διάταξης ηλεκτροδίων σταθερό και αυξάνουμε την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, τότε διενεργούμε ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή διασκοπούμε το υπέδαφος εις βάθος κάτω από το κέντρο της διάταξης. 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.



Εικόνα 2.12: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2004)

Στις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, δηλαδή, 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 συμμετρικά ως προς αυτό σε μεγαλύτερες διαδοχικά αποστάσεις.

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.

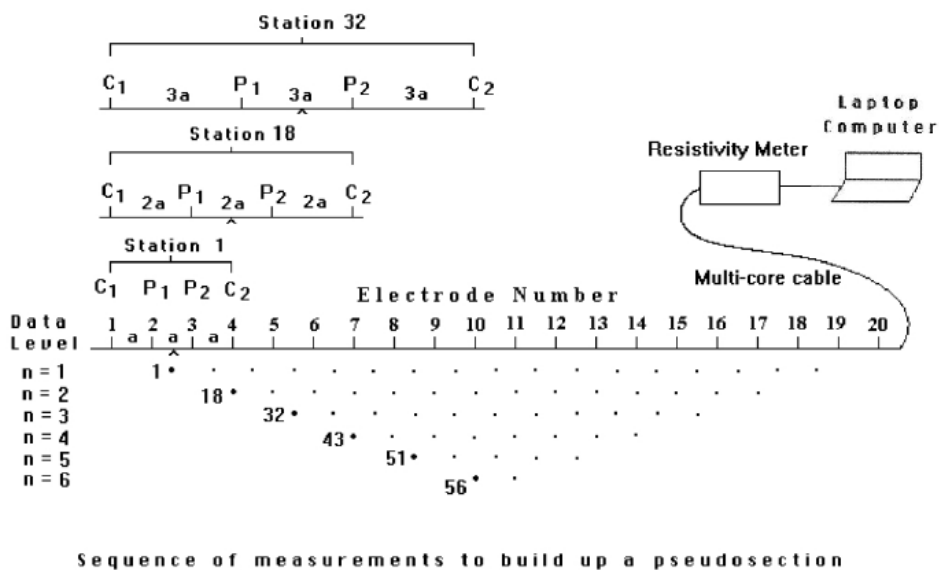
2.1.5. Μέθοδος Διδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να έχουμε σε συγκεκριμένες θέσεις, μεγάλης ακρίβειας διασκοπήσεις, τόσο παράπλευρα, όσο και σε βάθος. Η ηλεκτρική τομογραφία συνίσταται σε πολλές βυθοσκοπήσεις πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται από την επιλογή των διατάξεων που θέλουμε. Όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει

για μια διδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, δηλαδή μια γεωηλεκτρική τομογραφία.

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι αντιμετωπίζει σύνθετες γεωλογικές τομές, αίροντας τη θεώρηση της οριζόντια στρωματομένης γης, προβαίνοντας κατ' αυτό τον τρόπο με ασφάλεια στην ποσοτική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών μετρήσεων. Τα γεωηλεκτρικά τομογράμματα απεικονίζουν τομές βάθους, όπου αποτυπώνονται τόσο οι κατακόρυφες όσο και οι πλευρικές κατανομές της ειδικής αντίστασης των υπεδάφικών σχηματισμών. 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. Η μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, στην αρχαιομετρία. Την υδρογεωλογία κλπ. σε πολλές χώρες.

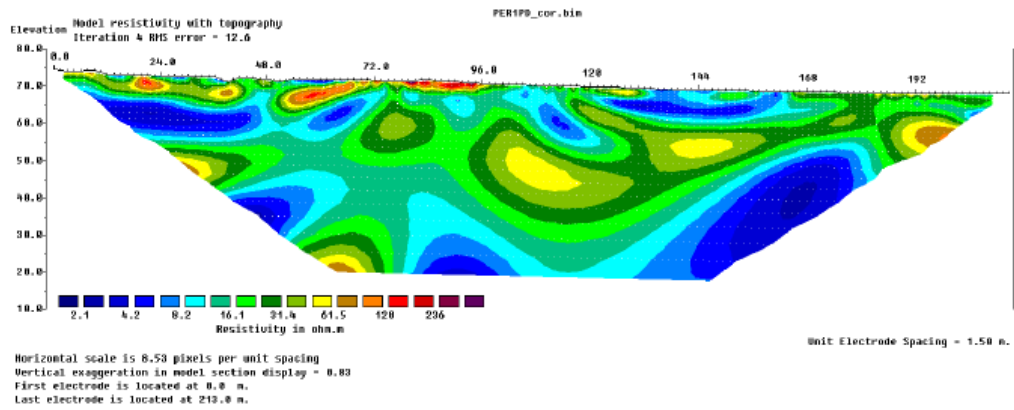
Η διδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους, το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση τυποποιημένων πολύ-ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.



Σχήμα 1.22 Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση οισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 1996)

Εικόνα 2.13: Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση διδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 1996)

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά, απαιτούν με τη σειρά τους αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων.



Εικόνα 2.18: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

2.1.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ηλεκτρικής Μεθόδου

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα και μερικά μειονεκτήματα. Τα κύρια θετικά της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η υψηλή ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, το βάθος των μετρήσεων, η εύκολη επεξεργασία των μετρήσεων. Από την άλλη πλευρά η συγκεκριμένη μέθοδος έχει και μερικά μειονεκτήματα όπως το βάρος του εξοπλισμού, η δυσκολία πραγματοποίησης των μετρήσεων, ο χρόνος πραγματοποίησης των μετρήσεων, καθώς και το κόστος κτίσης του εξοπλισμού.

2.2. Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

2.2.1. Γενικά

Η Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EMI) χρησιμοποιείται για την έρευνα του υπεδάφους, κάνοντας χρήση της απόκρισης του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενη ηλεκτρική ένταση και μαγνητική δύναμη. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Εφαρμόζεται με πολλές παραλλαγές συστημάτων μέτρησης (επίγεια ή από αέρος, χώρος χρόνου ή συχνοτήτων, κλπ.) που έχουν και αντίστοιχες δυνατότητες με πολύ μεγάλη ποικιλία εφαρμογών :

- Μεταλλευτική έρευνα
- Εντοπισμός ρύπανσης υδατικών πόρων
- Εντοπισμός μετώπου υφαλμύρισης
- Γεωλογική χαρτογράφηση, χαρτογράφηση εδαφών, κροκαλών
- Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων (σωληνώσεις, δεξαμενές, τοιχία, κλπ.)
- Αρχαιολογική έρευνα
- Εντοπισμός εγκοίλων (σπήλαια, εγκαταλελειμμένες σήραγγες, κλπ.)

2.2.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα ένα ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό, και μετριέται σε Siemens ή milliSiemens (mS). Ένα Siemens είναι το αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με 1 Ohm. Οι παλαιότερες αναφορές χρησιμοποιούν την ισοδύναμη μονάδα «Mho», η οποία είναι απλά «το Ohm» που συλλαβίζουν προς τα πίσω. Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, και τα στοιχεία αγωγιμότητας δεν είναι συχνά συγκρίσιμα με τις μετρήσεις αντίστασης που λαμβάνονται με τα συστήματα των ηλεκτροδίων.

Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται συνήθως σε μετρήσεις που συλλέγονται με ένα όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε για την αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε στις μετρήσεις που λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) επαγωγής. Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάζουν με τους χάρτες των δεδομένων αντίστασης και μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι μερικές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συνήθως από έναν μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας ενδεχομένως τα όρια ανωμαλίας. Όπως στην αντίσταση, η αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βασισμένες στις αντιθέσεις της επίγεια υγρασίας ή του τύπου υλικού. Τα μικρά κοιλώματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν πολύ αποτελεσματικά.

2.2.3. Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας ενός υλικού να μαγνητιστεί, παρουσία μαγνητικού πεδίου. Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου (κ) ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ), αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις δίνεται σαν αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο. Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία, προερχόμενα από την εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων, έτσι ώστε όλες οι ουσίες αντιδρούν στα κοινά μαγνητικά πεδία, μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει τη μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και των υδροξειδίων στις εντονότερες μαγνητικές μορφές, έτσι το χώμα είναι πολύ πιο μαγνητικό από τα στρώματα του υπεδάφους. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα επί των αρχαιολογικών τόπων να είναι πολύ πιο μαγνητικά από εκείνα στις περιβάλλουσες, μη – πολιτιστικές περιοχές. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους των χωμάτων, και επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας επί των αρχαιολογικών χώρων, και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα να ανιχνευτούν τεχνητά αντικείμενα. (Dalan R.A. 2006)

2.2.4. Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων - Εφαρμογές της μεθόδου

Έχουμε κατ' αρχήν δύο ειδών συστήματα :

- TEM (Time-domain Electromagnetic Measurements) : Μετρήσεις σε συνάρτηση του χρόνου.
- FEM (Frequency – domain Electromagnetic Measurements) : Μετρήσεις σε συνάρτηση της συχνότητας.

Επίσης, έχουμε διαφόρων ειδών συστήματα σε σχέση με την πηγή:

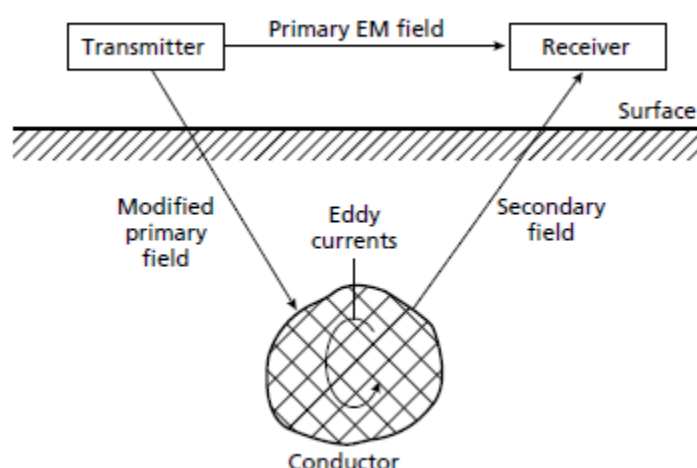
- Παθητικά (χρησιμοποιούνται φυσικά υπεδασικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα – π.χ. Μαγνητοτελλουργικά)
- Ενεργητικά (χρησιμοποιείται πομπός ηλεκτρομαγνητικού σήματος που επάγει ρεύμα στο έδαφος)
- Τοπικού πεδίου όργανα μέτρησης αγωγιμότητας)
- Απομακρυσμένου πεδίου (χρησιμοποιούνται σήματα πολύ χαμηλής συχνότητας που εκπέμπει πομπός για επικοινωνία υποβρυχίων)

Τα επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα διακρίνονται σε :

- Μικρού βρόγχου. Είναι τα περισσότερα συστήματα που δουλεύουν στον χώρο των συχνοτήτων (EM31, EM34, κλπ.) και κάποια στον χώρο του χρόνου. Κυρίως χρησιμοποιούνται σε περιβαλλοντικές εφαρμογές.
- Μεγάλου βρόγχου (5μ με 100μ βρόγχοι). Κυρίως συστήματα στον χώρο του χρόνου που χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα.
- Επιπέδου κύματος (VLF, Μαγνητοτελλουργικά). Χρησιμοποιούνται στη μεταλλευτική έρευνα και στον εντοπισμό βαθέων γεωλογικών δομών.

Οι ηλεκτρομαγνητικές (EM) μέθοδοι έρευνας χρησιμοποιούν την απόκριση του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα αρχικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να παραχθούν με τη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός μικρού πηνίου φτιαγμένου με πολλές περιελίξεις καλωδίου ή μέσω ενός μεγάλου βρόγχου του καλωδίου. Η απόκριση του εδάφους είναι η παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα τελικά πεδία μπορούν να ανιχνευθούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που ρέουν σε ένα πηνίο δέκτη με τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όλοι οι σχηματισμοί με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μερικοί χώροι μεταλλεύματος που περιέχουν τα μεταλλεύματα που είναι μονωτές, μπορούν να παράγουν δευτερογενή πεδία εάν επαρκείς ποσότητες ενός βοηθητικού μεταλλεύματος με μια υψηλή αγωγιμότητα είναι παρούσες. Παραδείγματος χάριν, ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούνται πάνω από συγκεκριμένου σουλφιδίου μεταλλεύματα, οφείλονται στην παρουσία αγωγίμου ορυκτού πυρροτίτη που είναι διεσπαρμένο σε όλο το χώρο του μεταλλεύματος.

Αν υπάρχει λοιπόν αγωγίμο υλικό στο υπέδαφος, με βάση την προηγούμενη συνοπτική θεωρητική ανάλυση, η μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος επάγει εναλλασσόμενα ρεύματα (Eddy Currents) μέσα στον αγωγό. Τα ρεύματα αυτά παράγουν δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται από το πηνίο – δέκτη. Ο δέκτης επίσης ανιχνεύει το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς που διαφέρουν ως προς τη φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από τις σχετικές θέσεις και τους προσανατολισμούς των πηνίων) και το μέγεθος και η σχετική φάση του δευτερογενούς πεδίου μπορούν να υπολογιστούν. Η διαφορά στο τελικό πεδίο από το πρωτογενές δίνει πληροφορία για τη γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού στο υπέδαφος.



Εικόνα 2.19: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Το δευτερογενές πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε συνιστώσες σε φάση και σε εκτός φάσης 90° ως προς το πρωτογενές πεδίο. Η εκτός φάσης συνιστώσα χρησιμοποιώντας

συγκεκριμένες υποθέσεις μπορεί να μετατραπεί σε υπολογιζόμενη φαινόμενη αγωγιμότητα. Η σε φάση συνιστώσα, γενικά μη υπεύθυνη για τις αλλαγές της χωρικής αγωγιμότητας είναι ειδικά υπεύθυνη για τον εντοπισμό υψηλής αγωγιμότητας σωμάτων όπως τα μεταλλικά. Η μετρούμενη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι η μέση αγωγιμότητα ενός ή περισσότερων στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης του οργάνου σε βάθος έρευνας που σχετίζεται με την απόσταση των πηνίων, τη διεύθυνση, τη συχνότητα λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους.

2.2.4.1. Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Το βάθος διείσδυσης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εξαρτάται από τη συχνότητά του και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου μέσω του οποίου διαδίδεται. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται κατά τη διέλευσή τους μέσω του εδάφους, ρο πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Το βάθος της διείσδυσης d μπορεί να οριστεί ως το βάθος στο οποίο το πλάτος του πεδίου A_d μειώνεται κατά έναν παράγοντα e^{-1} (37%) συγκρινόμενο με το πλάτος στην επιφάνεια A_0 .

$$A_d = A_0 e^{-1} \quad (2.7)$$

Στην περίπτωση αυτή

$$d = \frac{503.8}{\sqrt{\sigma f}} \quad (2.8)$$

Όπου το d είναι σε μέτρα, η αγωγιμότητα σ του εδάφους σε $S m^{-1}$ και η συχνότητα f του πεδίου είναι σε Hz.

Το βάθος διείσδυσης αυξάνεται, όσο και η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και η αγωγιμότητα του εδάφους μειώνονται. Συνεπώς, η συχνότητα που χρησιμοποιείται σε μια έρευνα EM μπορεί να καθοριστεί για επιθυμητό βάθος σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο μέσο.

Εμπειρικά, ένα αποτελεσματικό βάθος διείσδυσης z_e μπορεί να καθοριστεί ως το μέγιστο βάθος στο οποίο ένας αγωγός μπορεί να βρεθεί και να παράγει μια αναγνωρίσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία.

$$z_e \approx \frac{100}{\sqrt{\sigma f}} \quad (2.9)$$

Η εξάρτηση του βάθους διείσδυσης από την συχνότητα, τοποθετεί τους περιορισμούς στη μέθοδο EM. Κανονικά, οι πολύ χαμηλές τιμές συχνότητας είναι δύσκολο να παραχθούν και να μετρηθούν και η μέγιστη επιτεύξιμη διείσδυση είναι συνήθως της τάξης των 500m.

2.2.4.2. Συστήματα Μέτρησης Φάσης

Ένα ηλεκτρομαγνητικό σύστημα έρευνας μπορεί να μετρά τις σχέσεις φάσης και πλάτους μεταξύ των πρωτογενών, δευτερογενών και τελικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να παρασταθεί από ένα ημιτονοειδές κύμα με ένα μήκος κύματος 2π (360°). Όταν ένα τέτοιο κύμα καθυστερεί πίσω από άλλο, τα κύματα θεωρούνται ότι είναι εκτός φάσης. Η διαφορά φάσης μπορεί να αντιπροσωπευθεί με γωνία φάσης θ στον γωνιακό διαχωρισμό των κυματομορφών. Οι

σχέσεις φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορούν να αναπαρασταθούν σε ειδικά διανυσματικά διαγράμματα, στα οποία το διανυσματικό μήκος είναι ανάλογο προς το πλάτος του πεδίου και η γωνία που μετριέται αντίθετα προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού από το πρωτογενές διάνυσμα στο δευτερογενές διάνυσμα, αντιπροσωπεύει τη γωνιακή καθυστέρηση φάσης του δευτερογενούς πεδίου πίσω από το πρωτογενές.

Το πρωτογενές πεδίο P ταξιδεύει άμεσα από τον πομπό στο δέκτη επάνω από το έδαφος και δεν υφίσταται καμία τροποποίηση, εκτός από μια μικρή μείωση του πλάτους που προκαλείται με τη γεωμετρική διάδοση. Επίσης, το πρωτογενές πεδίο εισχωρεί στο έδαφος, μειώνεται πολύ το πλάτος του, αλλά παραμένει σε φάση με το επιφανειακό πρωτογενές. Το πρωτογενές πεδίο προκαλεί μια εναλλασσόμενη τάση σε έναν υπεδαφικό αγωγό με την ίδια συχνότητα με πρωτογενές αλλά με μια καθυστέρηση φάσης $\pi/2$ (90° , σύμφωνα με τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής).

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης φ .

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi fL}{r}\right) \quad (2.10)$$

όπου f η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου,
 L η αυτεπαγωγή του αγωγού (η τάση του να αντιτάξει μια αλλαγή στο εφαρμοζόμενο πεδίο) και
 r η αντίσταση του αγωγού.

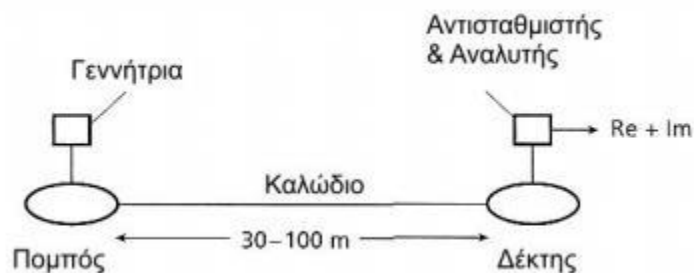
Για έναν καλό αγωγό φ θα πλησιάσει τα $\pi/2$ ενώ για έναν κακό αγωγό φ θα είναι σχεδόν μηδέν.

Η καθαρή επίδραση είναι το δευτερογενές πεδίο S που παράγεται από τον αγωγό καθυστερεί πίσω από το πρωτογενές σε μια γωνία φάσης ($\pi/2 + \varphi$). Το τελικό πεδίο R μπορεί τώρα να βρεθεί.

Η προβολή του S στον οριζόντιο (πρωτογενές πεδίο) άξονα είναι $S\sin\varphi$ και είναι σε γωνία π , εκτός φάσης ως προς το P. Είναι γνωστή ως σε φάση (in-phase) ή πραγματική συνιστώσα του S. Η κάθετη προβολή είναι $S\cos\varphi$, $\pi/2$ εκτός φάσης ως προς το P, και είναι γνωστή ως εκτός φάσης ή φανταστική συνιστώσα.

Τα σύγχρονα όργανα είναι σε θέση να διαχωρίζουν το δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε πραγματική (RC) και φανταστική (Im) συνιστώσα. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία RC/Im , τόσο καλύτερος ο αγωγός. Μερικά συστήματα, κυρίως αερομεταφερόμενα, μετρούν απλά τη γωνία φάσης φ .

Τα κλασικά συστήματα μέτρησης φάσης χρησιμοποιούν κινούμενους πομπούς και δέκτες και αναφέρονται ως διδύμου πηνίου (twin - coil) ή slingram συστήματα. Τα πηνία πομπού και δέκτη είναι διαμέτρου περίπου 1m και μεταφέρονται συνήθως οριζόντια, αν και διαφορετικοί προσανατολισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα πηνία συνδέονται από ένα καλώδιο που φέρνει ένα σήμα αναφοράς και επιτρέπει επίσης την απόσταση των πηνίων να διατηρηθεί σταθερή, συνήθως 30 – 100m. Ο πομπός τροφοδοτείται από μια φορητή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος.



Εικόνα 2.20: Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου

Το σήμα εξόδου από το πηνίο δέκτης περνάει από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο μετράει αρχικά στο «άγονο» έδαφος (χωρίς αγώγιμο σώμα) και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται στο να παράγει μηδενική έξοδο. Με τον τρόπο αυτό, το πρωταρχικό πεδίο αντισταθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποκρίνεται στη συνέχεια μόνο στα δευτερογενή πεδία. Συνεπώς, τέτοιες μέθοδοι EM αποκαλύπτουν την παρουσία σωμάτων ανώμαλης αγωγιμότητας, χωρίς παροχή πληροφορίας για τις απόλυτες τιμές αγωγιμότητας. Στην περιοχή έρευνας, ο αναλυτής χωρίζει το δευτερογενές πεδίο στις πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες που συνήθως παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, του οποίου το μέγεθος αναμεταδίδεται μέσω του διασυνδεδεμένου καλωδίου. Τομές μέτρησης γίνονται γενικά κάθετα στις γεωλογικές ασυνέχειες και οι μετρήσεις αντιστοιχούν στη θέση του μεσαίου σημείου του συστήματος. Το μέγιστο βάθος ανίχνευσης είναι περίπου το μισό της απόστασης πομπού δέκτη.

Οι μετρήσεις υπαίθρου είναι απλή διαδικασία και απαιτεί ένα πλήρωμα μόνο δύο ή τριών χειριστών. Η απόσταση και ο προσανατολισμός των πηνίων είναι κρίσιμα, δεδομένου ότι ένα μικρό ποσοστιαία λάθος στην απόσταση, μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση φάσης. Τα πηνία πρέπει επίσης να κρατηθούν ακριβώς οριζόντια και συνεπίπεδα, δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Η απαραίτητη ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε μεγάλες αποστάσεις και πάνω από ανώμαλη τοπογραφία.

2.2.4.5. Ηλεκτρομαγνητικό Όργανο Μέτρησης

Είναι δυνατό με ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις να βρούμε την αγωγιμότητα του υπεδάφους. Το δευτερογενές EM πεδίο μετράται με ένα κινητό σύστημα πομπού – δέκτη μέσω μιας σύνθετης συνάρτησης της απόστασης μεταξύ των πηνίων s , της συχνότητας λειτουργίας f και της αγωγιμότητας του υπεδάφους σ . Ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν το πηλίκο του s δια του βάρους διείσδυσης d , γνωστό ως «αριθμός επαγωγής», είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα, τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i\omega\sigma s^2}{4} \quad (2.11)$$

όπου, H_s και H_p είναι τα πλάτη του δευτερογενούς και πρωτογενούς EM ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αντίστοιχα, $\omega=2\pi f$, μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,

και η παρουσία του $i = (-1)^{1/2}$, δείχνει ότι μετράται η εκτός φάσης (φανταστική) συνιστώσα.

Έτσι, η αναλογία HS/HP είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του εδάφους σ . Δεδομένου ότι το d εξαρτάται από το γινόμενο $\sigma \cdot f$, εκτίμηση της μέγιστης πιθανής τιμής του σ , μας επιτρέπει την επιλογή του f , έτσι ώστε η ανωτέρω προϋπόθεση για χαμηλό «αριθμό επαγωγής» ικανοποιείται. Το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από το s και είναι ανεξάρτητο από την κατανομή της αγωγιμότητας του υπεδάφους. Μετρήσεις που λαμβάνονται με χαμηλό «αριθμό επαγωγής», δίνουν την φαινόμενη αγωγιμότητα σ_a :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} * \frac{H_s}{H_p} \quad (2.12)$$

Η παραπάνω σχέση επιτρέπει την κατασκευή των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων που παρέχουν άμεση ανάγνωση της αγωγιμότητας εδάφους σε ένα προκαθορισμένο βάθος. Μια τέτοια εφαρμογή του πομπού – δέκτη τοποθετημένων σε έναν βραχίονα 3,7m μεταξύ τους, παρέχοντας ένα σταθερό βάθος διείσδυσης περίπου 6m, είναι το όργανο CMD4. Το όργανο αυτό επιτρέπει την γρήγορη εκτέλεση έρευνας κατά μήκος γραμμών σε βάθος χρήσιμο για τους μηχανικούς και για αρχαιολογικές έρευνες. Όταν ένα μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης απαιτείται, ένα άλλο σύστημα μέτρησης χρησιμοποιείται με τα πηνία πομπού και δέκτη σε μεταβαλλόμενη απόσταση ανάλογα με το βάθος. Μεταβάλλοντας την απόσταση, άρα και το βάθος, διενεργούμε ηλεκτρομαγνητική βυθοσκόπηση.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι :

- Πετρολογία περιοχής
- Παρουσία αργίλων που είναι πολύ αγωγάιμοι
- Υγρασία
- Πορώδες
- Αγωγιμότητα του υπεδαφικού ύδατος
- Στρωματογραφία
- Πρόσκαιρες αλλαγές στην αγωγιμότητα του υπεδάφους, λόγω αλλαγής της υγρασίας, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της θερμοκρασίας
- Πρόσθεση ή αφαίρεση διαλελυμένων ρυπαντών

Η σε φάση συνιστώσα είναι η άλλη μέτρηση του οργάνου. Ορίζεται σαν σχετική ποσότητα σε ppt (part per thousand), μέρος ως προς χίλια, του πρωτογενούς μαγνητικού πεδίου και είναι άμεσα συσχετιζόμενο με την μαγνητική επιδεκτικότητα του μετρούμενου υλικού. Η σε φάση συνιστώσα παρέχει την ένδειξη παρουσίας μεταλλικών αντικειμένων, όπως καλωδίων, αγωγών, πλέγματος από μπετόν, δεξαμενών, κλπ. Έτσι μπορεί κανείς με τη σε φάση συνιστώσα να διακρίνει μεταξύ των τεχνητών κατασκευών από την γεωλογία της περιοχής που αποτυπώνεται από τον χάρτη φαινόμενης αγωγιμότητας.

CMD – EM

Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in – phase μέτρηση, ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με τη διαμόρφωση. Οι τυπικές εφαρμογές του οργάνου είναι :

- Στη γεωτεχνική έρευνα (αξιολόγηση βραχώδους υποβάθρου, αποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων, κλπ)
- Στη γεωλογική χαρτογράφηση περιοχών (αναζήτηση κοιτασμάτων, γεωλογική έρευνα, εντοπισμός σπηλαιωμάτων, κλπ)
- Στη γεωργία (προσδιορισμός ποιότητας εδάφους, διαχείριση νερού και λιπασμάτων)
- Στην αρχαιολογία (εντοπισμός τοιχίων, ιστορική έρευνα σπηλαιωμάτων, εντοπισμός υπόγειων στοών, κλπ)
- Για περιβαλλοντικούς σκοπούς (σε υδρογεωλογικές εφαρμογές, σε σημεία ρύπανσης, για διαχείριση νερού λεκανών)

Το όργανο CMD μπορεί με την κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.

2.3 Μέθοδος Γεωραντάρ

2.3.1 Εισαγωγή

Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar) αποτελεί όργανο γεωφυσικών διασκοπήσεων που και εδώ και μερικά χρόνια χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό υπεδάφινων ανωμαλιών χωρίς να προκαλεί καταστροφή των εδαφών. Η μέθοδος του γεωραντάρ ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές μεθόδους. 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. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων μεταξύ δύο υλικών στο υπέδαφος, τόσο πιο δυνατό είναι το σήμα που ανακλάται και επομένως τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων.

2.3.2. Ιστορική αναδρομή του γεωραντάρ

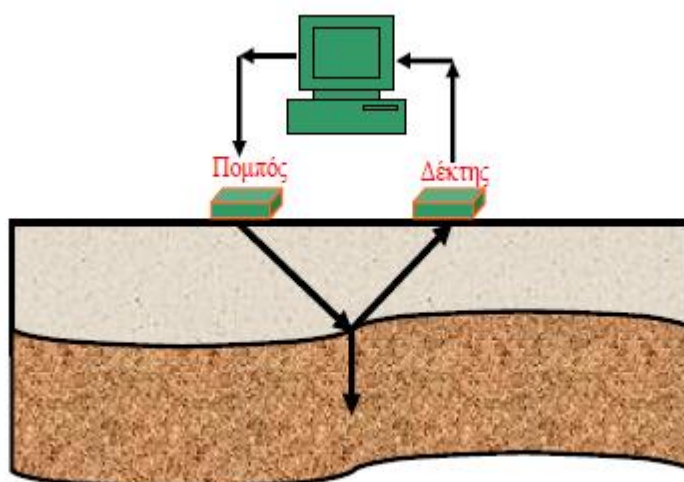
Από τα μέσα της δεκαετίας του '80 το γεωραντάρ έγινε ιδιαίτερα δημοφιλές στις κοινότητες των γεωφυσικών, των γεωλόγων και των αρχαιολόγων. Σε γεωλογικές εφαρμογές χρησιμοποιείται από το 1960 για ραδιοανίχνευση σε παγετώνες. Η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικά (EM) κύματα για τον προσδιορισμό της θέσης θαμμένων αντικειμένων ήταν στη Γερμανία το 1910. Επιπλέον χρήσεις του γεωραντάρ περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του πάχους στρωμάτων πάγου (Annan and Davis 1976), την ανίχνευση ρωγμών σε κοιτάσματα αλατιού (Thierbach 1974) και τη μελέτη κρυσταλλικών πετρωμάτων (Nilson 1983). Οι Moffat και Puskar παρουσίασαν ένα από τα πρώτα και πολλά υποσχόμενα συστήματα GPR το 1976. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε πληθώρα περιπτώσεων όπως τον εντοπισμό ρωγμών σε τούνελ και ορυχεία καθώς και της περιεχόμενης υγρασίας των εδαφών. Επιπλέον συνεισφορά των Moffat και Puskar (1976) αποτέλεσε η ανάπτυξη βασικών αρχών για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το 1982 ο Ulriksen και άλλοι επιστήμονες ανέπτυξαν ακόμα πιο βελτιωμένες μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων του γεωραντάρ. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω βελτίωση των μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων GPR (Smemoe 2000).

2.3.3. Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

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 2.17**). Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Οι κεραίες κινούνται κατά μήκος μιας γραμμής στο έδαφος, δημιουργώντας διδιάστατα 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 (ε₁). Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο στρώμα και ένα μέρος θα ανακλαστεί στην επιφάνεια και θα

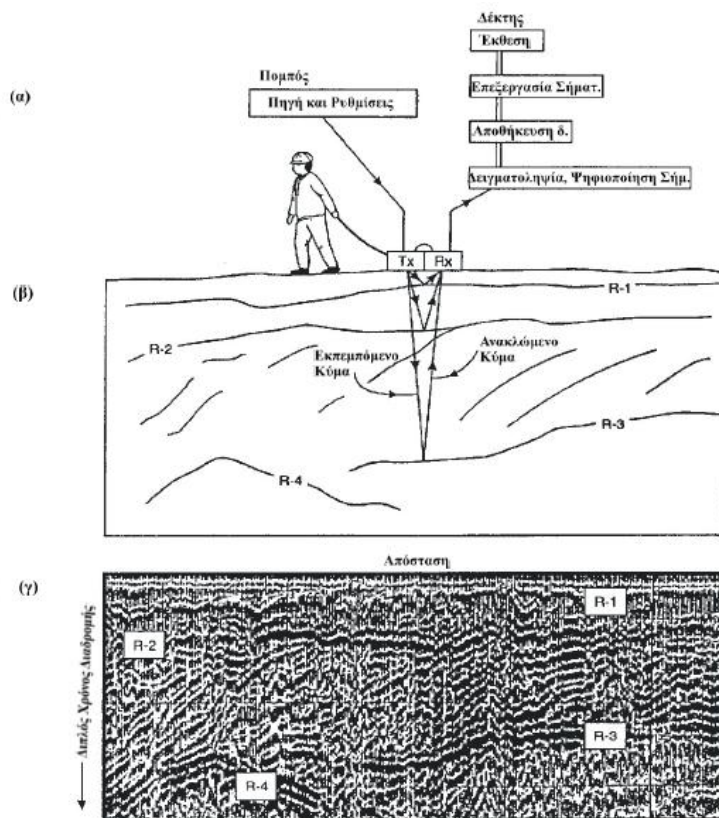
επιστρέψει στην κεραία του δέκτη (Εικόνα 2.18). Το σήμα που φτάνει στην κεραία δέκτη προωθείται στην μονάδα ελέγχου όπου και καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού.



Εικόνα 2.21: Αρχή λειτουργίας του Γεωραντάρ (Σπανουδάκης, 2007)

Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη ανεξαρτήτως της διαδρομής του, ονομάζεται χρόνος διαδρομής. Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νανο-δευτερόλεπτο (ns).

Δυο κατηγορίες κυμάτων καταγράφονται από το δέκτη. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν κύματα που ταξιδεύουν απ' ευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Αυτά τα κύματα, αφενός μεν φτάνουν πρώτα, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη απ' ότι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου δε έχουν μεγάλο πλάτος, αφού δεν υφίστανται εξασθένιση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κύματα που διαδίδονται στο υπέδαφος. Η καταγραφή του πλάτους των κυμάτων σε σχέση με το χρόνο διαδρομής ονομάζεται ίχνος. Όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα, αλλάζει κατεύθυνση δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει πολύ μικρού μεγέθους εμπόδια, τα οποία το αναγκάζουν να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντήχηση συμβαίνει, όταν το κύμα “παγιδευτεί” σε κάποιο γεωλογικό στρώμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κύμα ανακλάται πολλές φορές με συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών ανακλάσεων (Σπανουδάκης 2007)



Εικόνα 2.22: α) Το σύστημα του Γεωραντάρ β) Σχηματική τομή του υπεδάφους γ) Απεικόνιση των δεδομένων με τοποθέτηση των ραδιογραμμμάτων (ιχνών) το ένα δίπλα στο άλλο.

2.3.4. Μετρήσεις στο ύπαιθρο

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης πομπού - δέκτη ανάλογα με το σκοπό της έρευνας. Κύρια διάταξη για τη συλλογή δεδομένων γεωραντάρ είναι αυτή της σταθερής απόστασης πομπού δέκτη (common offset) ή ανάκλασης, όπου πομπός και δέκτης κινούνται κατά μήκος γραμμής μελέτης στην επιφάνεια του εδάφους, διατηρώντας την μεταξύ τους απόσταση σταθερή (Εικόνα 2.18α). Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σταθμών παρατήρησης ονομάζεται ισο-απόσταση ή βήμα διασκόπησης. Όταν τα ίχνη απεικονίζονται το ένα δίπλα στο άλλο, σχηματίζεται η τομή γεωραντάρ (GPR section). Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει κυρίως στην χαρτογράφηση του υπεδάφους. Αν είναι γνωστή η ηλεκτρική διαπερατότητα του υπεδάφους, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό της ταχύτητας χρησιμοποιείται η διάταξη κοινού σημείου βάθους (common depth point - CDP), όπου επιλέγεται στη επιφάνεια του εδάφους κάποιο σταθερό σημείο, εκατέρωθεν του οποίου τοποθετούνται πομπός και δέκτης (Εικόνα 2.18β). Τέλος, αναφέρεται η μέθοδος της τομογραφίας, όπου πομπός και δέκτης τοποθετούνται ξεχωριστά σε κοντινές γεωτρήσεις, εκατέρωθεν τοίχων ή στοών μεταλλείων (Σπανουδάκης 2007).

Στη διάταξη η common – offset συνήθως πομπός και δέκτης βρίσκονται μέσα σε κουτί θωρακισμένο για μέγιστη κατευθυντικότητα προς τα κάτω και αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων.

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν σε μία common – offset διάταξη είναι:

- Η συχνότητα λειτουργίας (operating frequency)
Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα που επιλέγεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση σε βάθος με μείωση όμως στην ανάλυση που επιτυγχάνεται.
- Το χρονικό παράθυρο (time – window)
Εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης και την ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης.
- Η χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval)
Κατά το κριτήριο του Nyquist δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό της περιόδου που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη συχνότητα του μετρούμενου σήματος.
- Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (spatial sampling interval ή station spacing)
Συνδέεται με την κεντρική συχνότητα των κεραιών.
- Η θέση των γραμμών διασκόπησης και η πυκνότητά τους (line location και spacing)
Γενικά οι γραμμές διασκόπησης καθορίζονται έτσι ώστε να περνούν όσο το δυνατό κάθετα στη μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται, και με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός που εκτελούνται οι μετρήσεις.
(Αποστολόπουλος Γεώργιος. 2008)

2.3.5. Βάθος και ανάλυση μετρήσεων

Το μέγιστο βάθος διείσδυσης του γεωραντάρ, εξαρτάται άμεσα από την εξασθένηση 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 50m ή περισσότερα, δίνοντας όμως αποτελέσματα με πολύ χαμηλή ανάλυση. Αντιθέτως, μια κεραία υψηλής συχνότητας, όπως 900MHz, μπορεί να διαπεράσει το πολύ 1m, 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.

2.3.6. 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, φίλτράρισμα, ανάλογα με τη συχνότητα έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση πιθανά βαθύτερων οριζόντων ή στρωμάτων

2.3.7. 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:

1. Μη καταστροφική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος
2. Συνεχής συλλογή στοιχείων
3. Υψηλή ανάλυση
4. Δυσδιάστατη 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.

2.4. Σεισμική μέθοδος

2.4.1. Εισαγωγή

Οι σεισμικές μέθοδοι, όπως κατά κανόνα εφαρμόζονται στη σεισμική έρευνα, θεωρούνται ενεργητικές γεωφυσικές μέθοδοι. Στη σεισμική διασκόπηση, η κίνηση του εδάφους που προκαλείται από κάποια πηγή μετριέται σε διάφορες αποστάσεις από την πηγή. Ο τύπος του σεισμικού πειράματος διαφέρει ανάλογα με ποια άποψη της καταγραφόμενης εδαφικής κίνησης χρησιμοποιούμε στην επακόλουθη ανάλυση.

Οι σεισμικές μέθοδοι είναι οι σημαντικότερες γεωφυσικές τεχνικές, τόσο από την άποψη των δαπανών που τις αφορούν, όσο και από την άποψη του αριθμού των γεωφυσικών που ασχολούνται με αυτές. Η κυριαρχία τους αυτή οφείλεται κυρίως στη μεγάλη τους ακρίβεια και ανάλυση, καθώς και στη διεισδυτικότητά τους.

Η ευρεία χρήση των σεισμικών μεθόδων εντοπίζεται, κυρίως, στην αναζήτηση πετρελαίου, όπου η όρυξη μιας ερευνητικής γεώτρησης σπάνια αποφασίζεται χωρίς τη λήψη σεισμικών δεδομένων. Οι σεισμικές μέθοδοι είναι επίσης πολύ χρήσιμες σε γεωτεχνικές μελέτες, κυρίως για τον προσδιορισμό του βάθους στο οποίο βρίσκεται το βραχώδες υπόβαθρο, κατά τη θεμελίωση μεγάλων τεχνικών έργων. Το γεγονός ότι έχουν βρει μικρή εφαρμογή στην αναζήτηση ορυκτών οφείλεται κυρίως στο ότι οι διεπιφάνειες των διάφορων πετρωμάτων είναι ιδιαίτερα ανώμαλες. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό δομών, όπως υπόγεια κανάλια, όπου μπορεί να βρίσκονται συγκεντρωμένα βαρέα ορυκτά.

Οι σεισμικές μέθοδοι, όπως κατά κανόνα εφαρμόζονται στη σεισμική έρευνα, θεωρούνται ενεργητικές γεωφυσικές μέθοδοι. Στη σεισμική διασκόπηση, η κίνηση του εδάφους που προκαλείται από κάποια πηγή μετριέται σε διάφορες αποστάσεις από την πηγή. Ο τύπος του σεισμικού πειράματος διαφέρει ανάλογα με ποια άποψη της καταγραφόμενης εδαφικής κίνησης χρησιμοποιούμε στην επακόλουθη ανάλυση.

2.4.2. Γενικά

Τα σεισμικά κύματα είναι φορείς που μεταφέρουν πληροφορία για τη δομή του εσωτερικού της γης. Τα κύματα αυτά προκαλούν την ταλάντωση των υλικών σημείων, γεγονός που σημαίνει ότι τα σωματίδια της ύλης απομακρύνονται από τη θέση ισορροπίας τους προσωρινά, κινούμενα μπροστά – πίσω μέχρι να σταματήσουν. Η ικανότητα του υλικού να παραμορφωθεί προσωρινά με το πέρασμα των σεισμικών κυμάτων μπορεί να περιγραφεί από τις ελαστικές ιδιότητές του. Αυτές οι φυσικές ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το διαχωρισμό των διαφορετικών υλικών. Οι ελαστικές σταθερές επιδρούν στις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα από τα υλικά αυτά.

Κυρίως χρησιμοποιούνται ελεγχόμενες σεισμικές πηγές, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες τόσο για τις σεισμικές ταχύτητες, όσο και για τη στρωματογραφία του φλοιού της γης. Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη χαρτογράφηση του υποβάθρου, τα πάχη του φλοιού και τη σεισμική ταχύτητα του ανώτερου μανδύα της γης. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης απεικονίζει καλύτερα και με λεπτομέρεια τη

στρωματογραφική δομή των ιζηματογενών λεκανών και δίδει μια γενική δομή για το βαθύτερο φλοιό της γης. Η σεισμική ταχύτητα για βαθύτερα μέρη της γης υπολογίζεται με τη μελέτη των σεισμικών κυμάτων που προέρχονται από ένα μεγάλο σεισμό.

2.4.3. Ελαστικές Σταθερές

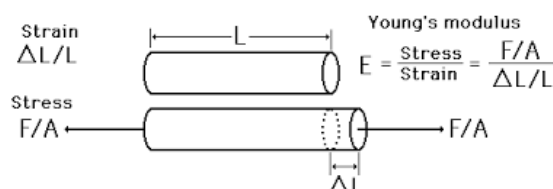
Εάν δημιουργηθούν κύματα με ένα κτύπημα ενός σφυριού σε σκληρό πέτρωμα, τότε τα κύματα αυτά θα οδεύσουν μέσω του πετρώματος ως σωματιδιακές (μοριακές) μετατοπίσεις, με τρόπο ανάλογο με αυτόν που διαδίδονται τα κύματα μέσα στο νερό, ως μετατοπίσεις των υδατικών μορίων. Μετά τη διέλευση της διαταραχής (παραμόρφωσης) τα σωματίδια επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση (εκτός ίσως των σημείων που βρίσκονται ακριβώς στη θέση του κτυπήματος). Με άλλα λόγια, το πέτρωμα έχει υποστεί μια τάση (stress) και έχει αλλάξει μορφή ή σχήμα (strain), το οποίο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση (μορφή ή σχήμα). Αυτή η συμπεριφορά ονομάζεται ελαστική. Ο τρόπος και η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων μέσω των υλικών ελέγχεται από τις ελαστικές ιδιότητές τους. Υλικά τα οποία υπακούουν στο νόμο του Hook είναι ελαστικά και εμφανίζουν γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση και την παραμόρφωση.

- **Μέτρο του Young ή μέτρο διαμήκου 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:

$$E = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l} \quad (2.13)$$

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.



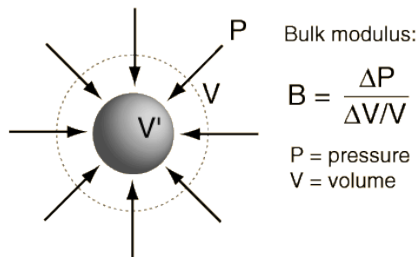
Εικόνα 2.23: Μέτρο Ελαστικότητας (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>)

Το αντίστροφο του E, δηλαδή το 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:

$$k = \frac{F/A}{\Delta V/V} = \frac{F \cdot V}{A \cdot \Delta V} \quad (2.14)$$

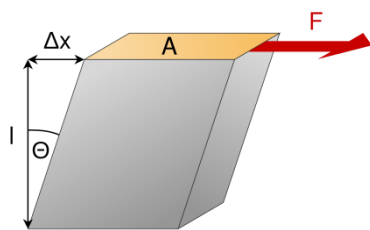


Εικόνα 2.24: Μέτρο κυβικής ελαστικότητας

Το αντίστροφο του k , δηλαδή το $1/k$, ονομάζεται συντελεστής συμπίεστότητας.

- **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.



$$\mu = \frac{F/A}{\tan \theta} \quad (2.15)$$

Εικόνα 2.25: Μέτρο Ακαμψίας

- **Λόγος του Poisson, σ .**

Είναι ένα μέτρο της γεωμετρικής μεταβολής στο σχήμα ενός ελαστικού σώματος. Έτσι π.χ. αν έχουμε ένα κύλινδρο μήκους L και διαμέτρου d και τον υποβάλουμε σε τάση εφελκυσμού παράλληλα προς το l , τότε θα επιμηκυνθεί κατά Δl αλλά την ίδια στιγμή θα επιβραχυνθεί στη διάμετρο κατά Δd . Το αντίθετο θα συμβεί όταν το συμπίεσουμε παράλληλα προς το l , οπότε θα έχουμε επιβράχυνση κατά Δl αλλά και αύξηση κατά Δd .

Και στις δύο περιπτώσεις ο λόγος του Poisson εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (2.16)$$

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 σα συνάρτηση των δύο άλλων. Έτσι έχουμε:

$$k = \frac{E}{3(1-2\sigma)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)} \quad E = \frac{9k\mu}{(3k+\mu)} \quad \sigma = \frac{(3k-2\mu)}{(6k+2\mu)} \quad (2.17)$$

2.4.4. Σεισμικά Κύματα

1. Κύματα χώρου (Body waves)

Είναι τα κύματα τα οποία διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση στο εσωτερικό της γης, τόσο στα επιφανειακά, όσο και στα βαθύτερα στρώματα αυτής. Υπάρχουν δύο είδη κυμάτων χώρου, τα επιμήκη και τα εγκάρσια.

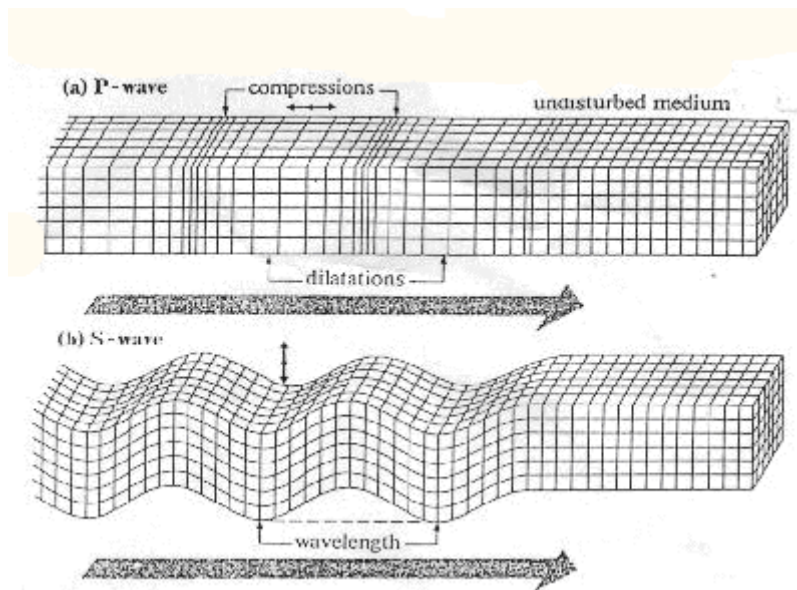
- **Επιμήκη κύματα.**

Είναι κύματα τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή του όγκου ή της πυκνότητας του μέσου διάδοσης. Λέγονται και **P κύματα**, από το λατινικό “prima” που σημαίνει “πρώτα”, επειδή είναι τα πρώτα που φθάνουν και καταγράφονται στους σεισμολογικούς σταθμούς. Διαδίδονται και σε στερεό και σε υγρό μέσο και δεν είναι τόσο καταστρεπτικά όσο τα εγκάρσια κύματα.

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.**

Είναι κύματα τα οποία διαδίδονται με διατμητική μόνο ελαστική παραμόρφωση του μέσου διάδοσης, δηλαδή τα υλικά σημεία πολώνονται σε ορθή γωνία 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. Η ιδιότητα αυτή των εγκαρσίων κυμάτων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο πυρήνας της γης βρίσκεται σε υγρή μορφή. (Βασικές Έννοιες Σεισμολογίας, Κ. Σπυράκος, Ε. Τουτουδάκη)



Εικόνα 2.26: Κύματα S και P (<http://www.ucl.ac.uk/>)

2. Επιφανειακά κύματα

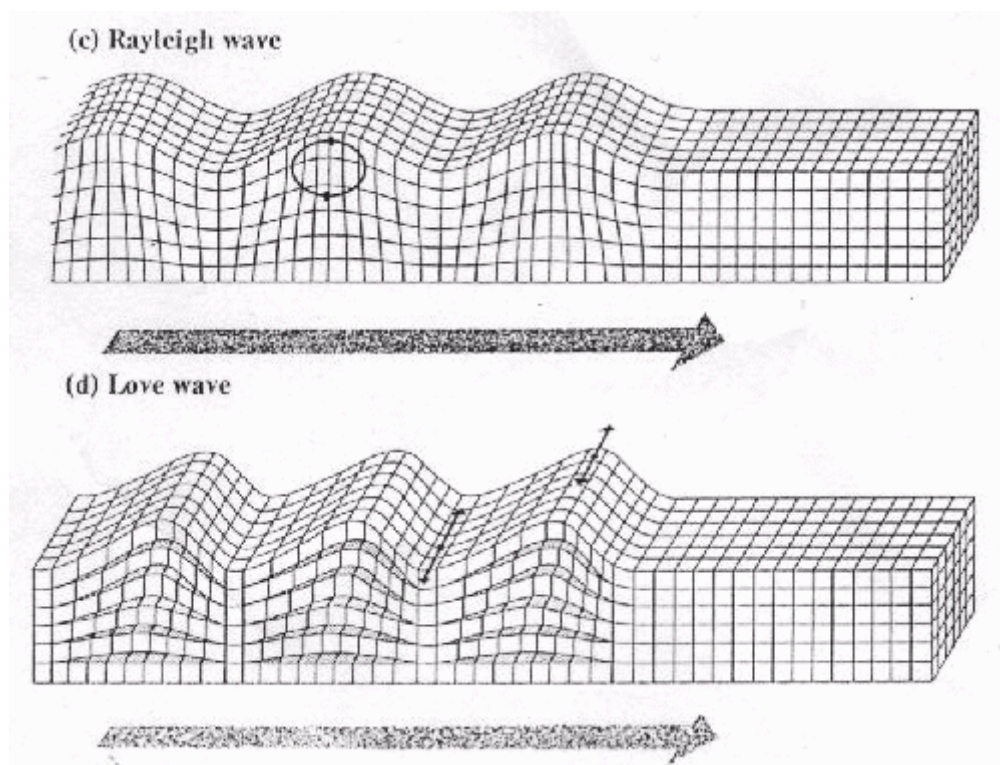
Είναι τα κύματα τα οποία περιορίζονται στην επιφάνεια της γης, τα πλάτη τους δηλαδή είναι μεγάλα κοντά στην επιφάνεια της γης και ελαττώνονται όσο αυξάνεται το βάθος. Λόγω της μικρής τους συχνότητας, του αυξημένου πλάτους και της μεγάλης τους διάρκειας είναι ιδιαίτερος καταστροφικά. Τα κύματα αυτά έχουν 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 ταλάντωσης μειώνεται εκθετικά με το βάθος, λόγω δε μικρότερης ταχύτητας καταγράφονται από τα οριζόντια και κατακόρυφα σεισμόμετρα πάντα τελευταία.

- **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. Επειδή ακριβώς δεν διαθέτουν κατακόρυφη συνιστώσα, αναγράφονται μόνο από τους οριζόντιους σειсмоγράφους. (Βασικές Έννοιες Σεισμολογίας, Κ. Σπυράκος, Ε. Τουτουδάκη)



Εικόνα 2.27: Κύματα Love και Rayleigh (<http://www.ucl.ac.uk/>)

2.4.5. Ταχύτητες διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων εντός των Διαφόρων Πετρωμάτων

Λόγω των διαφορών που παρουσιάζουν ως προς τη σύνθεση, τη δομή, το πορώδες και τα περιεχόμενα σε αυτό ρευστά, τα διάφορα πετρώματα διαφέρουν ως προς τις ελαστικές τους ιδιότητες και τις πυκνότητές τους και κατά συνέπεια χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό τους. Πληροφορίες σχετικές με την ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων είναι απαραίτητες αφενός 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 του 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 πάνω από τα 100MPa).
- Οι σεισμικές ταχύτητες στον ψαμμίτη και στο σχιστόλιθο δείχνουν συστηματική αύξηση με το βάθος και την ηλικία του σχηματισμού λόγω προοδευτικής συμπύκνωσης και συγκόλλησης

Στη μεγάλη σειρά 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.

Πίνακας 4: Σεισμικές ταχύτητες των P κυμάτων για διάφορα υλικά

| Υλικό | V _P (Km/s) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Μη στρωματοωμένα πετρώματα | |
| Άμμος (ξηρή) | 0.2 – 1.0 |
| Άμμος (κορεσμένη) | 1.5 – 2.0 |
| Αργίλος | 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 |
| Άλλα υλικά | |
| Χάλυβας | 6.1 |
| Σίδηρος | 5.8 |
| Αλουμίνιο | 6.6 |
| Σκυρόδεμα | 3.6 |

2.4.6. Εξασθένιση της Σεισμικής Ενέργειας

Καθώς ένας σεισμικός παλμός διαδίδεται η αρχική ενέργεια E , η οποία μεταδίδεται από την πηγή, διανέμεται σε μία σφαίρα με διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα. Εάν η ακτίνα της σφαίρα είναι r η ποσότητα της ενέργειας που περιλαμβάνεται σε μια μοναδιαία περιοχή της είναι $E/4\pi r^2$. Κατά μήκος μιας ακτινικής διαδρομής λοιπόν η ενέργεια της ακτίνας μειώνεται συναρτήσει του r^{-2} , λόγω της επίδρασης της γεωμετρικής διάδοσης της ενέργειας, ενώ το πλάτος του κύματος, το οποίο σε ομογενές υλικό είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της ενέργειας του κύματος, μειώνεται συναρτήσει του αντιστρόφου της ακτίνας.

Μια επιπλέον αιτία απώλειας ενέργειας, κατά μήκος μιας σεισμική 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 α εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας το οποίο χάθηκε, κατά τη μετάδοση του σεισμικού παλμού, σε απόσταση ίση με ένα πλήρες μήκος κύματος λ .

Για το εύρος των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στη σεισμική διασκόπηση, ο συντελεστής απορρόφησης θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητος της συχνότητας. Εάν η ποσότητα απορρόφησης ανά μήκος κύματος είναι σταθερή, είναι προφανές ότι τα κύματα υψηλών συχνοτήτων εξασθενούν ταχύτερα από αυτά που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες συχνότητες, συναρτήσει του χρόνου ή της απόστασης.

2.4.7. Εξοπλισμός

Συγκριτικά με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στη βαρυτομετρική, τη μαγνητική ή ακόμα και στην γεωηλεκτρική διασκόπηση, η πολυπλοκότητα και το μέγεθος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη σεισμική διασκόπηση είναι εντυπωσιακά. Ένα τυπικό σύστημα απόκτησης σεισμικών δεδομένων αποτελείται από τα παρακάτω:

A) 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.

(Λούης, 2004)

B) Σεισμικοί Φωρατές – αποτελούν διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν τις σεισμικές δονήσεις σε ηλεκτρικό σήμα. Οι σεισμικοί φωρατές ξηράς (γεώφωνα) βασίζονται στο ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο, ενώ οι θαλάσσιοι σεισμικοί φωρατές (υδρόφωνα) βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

α) Γεώφωνα

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. (Αποστολόπουλος, 2008)

β) Υδρόφωνα

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. Τα υδρόφωνα ευρίσκονται μέσα σε κατάλληλα σεισμικά καλώδια, τα οποία σύρονται μαζί με συστοιχίες αεροβόλων από κατάλληλα διαμορφωμένα πλοία.

Γ) 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. Αποτελείται όχι μόνο από ένα «μαύρο κουτί» που αποθηκεύει τις πληροφορίες αλλά και από ένα σύνολο πολύπλοκων ηλεκτρικών συνδέσεων με τους σεισμικούς φωρατές και την πηγή και συνήθως μία συσκευή που επιλέγει υποσύνολα για τις καταγραφές των εγκατεστημένων φωρατών.

4) Σεισμικές Πηγές

α) Εκρηκτικά

Συνήθως στη Γεωφυσική χρησιμοποιούνται δύο τύποι: Τρινιτροτολουόλιο και Νιτρικό αμμώνιο. Τα εκρηκτικά συνήθως τοποθετούνται μέσα σε γεωτρήσεις, κάτω από το επιφανειακό στρώμα ή τον υδροφόρο ορίζοντα, για να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος και να αυξηθεί η διάδοση της σεισμικής ενέργειας.

β) Σφυρί και Πίπτον Βάρος

Το σεισμικό σφυρί έχει βάρος 3 ή 5 kg. Στην περίπτωση αυτή ο χειριστής κραδαίνει στο έδαφος. Αντί να χτυπάει απευθείας το έδαφος, είναι πιο σύνηθες, για καλύτερη ζεύξη, να χτυπάει μια μεταλλική πλάκα που βρίσκεται ακουμπισμένη (με καλή επαφή) στο έδαφος. Η σφύρα συνήθως συνδέεται με το σύστημα καταγραφής με καλώδιο. Μία ισχυρότερη σε απόδοση πηγή κρούσης είναι το *πίπτον βάρος* (*dropping weight*) το οποίο αποτελείται από ένα μεταλλικό δίσκο διαμέτρου 60 cm περίπου και βάρους 120 έως 150 kg ο οποίος πέφτει ελεύθερα από ύψος 2m περίπου και κρούει το έδαφος.

γ) Vibroseis

Το σύστημα είναι τοποθετημένο σε κατάλληλο φορτηγό. Το φορτηγό ανυχώνεται στηριζόμενο σε μια μεταλλική πλάκα που εφάπτεται του εδάφους. Χρησιμοποιούνται υδραυλικοί δονητές και η δόνηση μεταφέρεται στην πλάκα.

δ) Αεροβόλα (Airgun)

Αποτελούν τις πιο συνηθισμένες θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Περιέχουν σε θάλαμο αέρα υπό μεγάλη πίεση (10-15 MPa) ο οποίος εκτονώνεται στο νερό και προκαλεί δονήσεις. Υπάρχουν αεροβόλα διαφόρων διαστάσεων ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η παραγωγή κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων και ενεργειών.

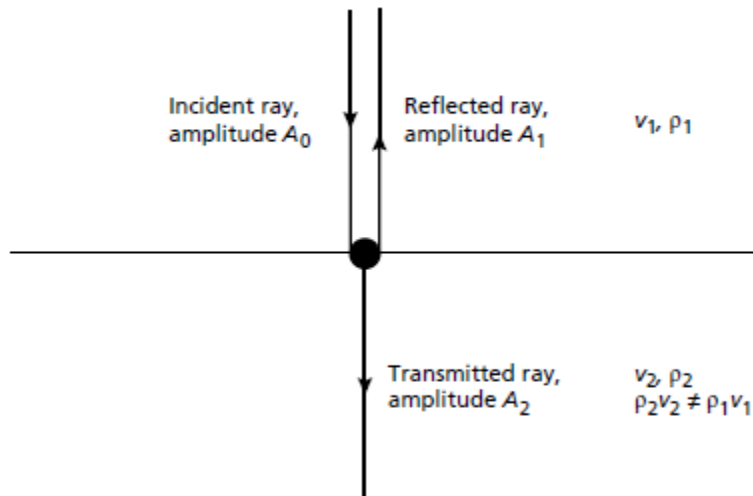
2.4.8. Σεισμικές Ακτίνες σε Μέσο με Στρώσεις

Στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρώσεων πετρωμάτων παρουσιάζεται αλλαγή στην ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η οποία οφείλεται στις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες των στρωμάτων.

Σε μια τέτοια διεπιφάνεια η ενέργεια ενός σεισμικού παλμού διαιρείται σε διερχόμενους και ανακλώμενους σεισμικούς παλμούς. Τα σχετικά πλάτη των παλμών αυτών, σε σχέση με τις ταχύτητες και τις πυκνότητες των δύο στρωμάτων, δίνονται από τις εξισώσεις του Zoeppritz. (Telford et al. 1976)

2.4.8.1. Ανάκλαση και διάδοση σεισμικών ακτίνων που προσπίπτουν κατακόρυφα

Ας θεωρήσουμε ένα P-κύμα, πλάτους A_0 , το οποίο προσπίπτει κατακόρυφα στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρωμάτων, διαφορετικής πυκνότητας, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.



Εικόνα 2.28: Κατακόρυφα προσπίπτουσα σεισμική ακτίνα (Keary & Brooks)

Όπως φαίνεται από την **Εικόνα 2.24**, μια διερχόμενη σεισμική ακτίνα, πλάτους A_2 , κινείται μέσα από τη διεπιφάνεια, με την ίδια διεύθυνση με αυτή της προσπίπτουσας ακτίνας, ενώ μια ανακλώμενη ακτίνα, πλάτους A_1 και αντίθετης διεύθυνσης, επιστρέφει στην επιφάνεια.

Η ολική ενέργεια της διερχόμενης και ανακλώμενης σεισμικής ακτίνας θα πρέπει να ισούται με την ενέργεια της αρχικά προσπίπτουσας ακτίνας. Οι σχετικές αναλογίες της ενέργειας που διέρχεται και αυτής που ανακλάται καθορίζονται από την αντίθεση ακουστικής εμπέδησης (Z) κατά μήκος της διεπιφάνειας. Η ακουστική εμπέδηση ενός πετρώματος είναι το γινόμενο της πυκνότητάς του επί την ταχύτητα των P-κυμάτων που το χαρακτηρίζει. Δηλαδή:

$$Z = \rho * v_P \quad (2.18)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης (R) είναι ο λόγος του πλάτους A_1 της ανακλώμενης ακτίνας προς το πλάτος A_0 της προσπίπτουσας. Δηλαδή:

$$R = \frac{A_1}{A_0} \quad (2.19)$$

Για μια κατακόρυφα προσπίπτουσα ακτίνα, ο συντελεστής R με τη λύση των εξισώσεων του Zoeppritz, γράφεται:

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \Rightarrow R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.20)$$

Όπου:

- ρ_1, ρ_2 : οι πυκνότητες του πρώτου και δεύτερου στρώματος αντίστοιχα,
- v_1, v_2 : οι ταχύτητες των P-κυμάτων πρώτου και δεύτερου στρώματος,
- Z_1, Z_2 : οι ακουστικές εμπεδήσεις πρώτου και δεύτερου στρώματος.

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι: $-1 \leq R \leq +1$

Αρνητικές τιμές για το R συνεπάγονται αλλαγή φάσης κατά π (180°) στην ανακλώμενη ακτίνα.

Ο συντελεστής διάδοσης (Tα) είναι ο λόγος του πλάτους A_2 της διερχόμενης ακτίνας, προς το πλάτος A_0 της προσπίπτουσας. Δηλαδή:

$$T = \frac{A_2}{A_0} \quad (2.21)$$

Για μια κατακόρυφα προσπίπτουσα ακτίνα, ο συντελεστής T με τη λύση των εξισώσεων του Zoerpritz, γράφεται:

$$T = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \Rightarrow T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.22)$$

Οι συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης εκφράζονται μερικές φορές, συναρτήσει της ενέργειας αντί του πλάτους των σεισμικών κυμάτων. Εάν η ένταση της ενέργειας ορίζεται ως η ποσότητα της ενέργειας η οποία διέρχεται από μια μοναδιαία περιοχή, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, σε μοναδιαίο χρόνο, έτσι ώστε I_0 , I_1 και I_2 να είναι οι εντάσεις της προσπίπτουσας, ανακλώμενης και διερχόμενης ενέργειας αντίστοιχα, έχουμε:

$$R' \Rightarrow R' = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad (2.23)$$

$$T' = \frac{I_2}{I_0} \Rightarrow T' = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.24)$$

Όπου:

R' και T' : οι συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης αντίστοιχα εκφρασμένοι συναρτήσει της ενέργειας.

Εάν ο συντελεστής ανάκλασης έχει μηδενική τιμή, όλη η προσπίπτουσα ενέργεια διέρχεται από τη διεπιφάνεια. Αυτή είναι η περίπτωση της μη ύπαρξης διαφοράς των ακουστικών εμπεδήσεων κατά μήκος μιας διεπιφάνειας ($Z_2 = Z_1$), ακόμη και εάν οι τιμές της πυκνότητας και της συχνότητας των P-κυμάτων διαφέρουν στα δύο στρώματα.

Εάν ο συντελεστής ανάκλασης ισούται με -1 ή $+1$, όλη η προσπίπτουσα ενέργεια ανακλάται. Μια καλή προσέγγιση της περίπτωσης αυτής αποτελεί η ελεύθερη επιφάνεια υδάτινου στρώματος ($R \approx -0,9995$).

Οι τιμές του συντελεστή R για διεπιφάνειες μεταξύ διάφορων τύπων πετρωμάτων, σπάνια υπερβαίνουν το $\pm 0,5$ και συνήθως είναι μικρότερες από $\pm 0,2$. Ως εκ τούτου, το σύνολο της σεισμικής ενέργειας η οποία προσπίπτει σε ένα πέτρωμα διαδίδεται, ενώ ένα μικρό ποσοστό αυτής ανακλάται.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ανάκλασης από τις ταχύτητες διάδοσης των Ρ-κυμάτων είναι εφικτός, με τη χρήση της ακόλουθη εμπειρικής σχέσης (Gardner et al. 1974 και Meckel & Nath. 1977):

$$R = 0,625 * \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (2.25)$$

2.4.8.2. Ανάκλαση και διάθλαση σεισμικών ακτίνων που προσπίπτουν υπό γωνία

Όταν ένα Ρ-κύμα προσπίπτει υπό γωνία σε μια διεπιφάνεια, στην οποία παρουσιάζεται αντίθεση ακουστικών εμπεδήσεων, οι ανακλώμενες σεισμικές ακτίνες δημιουργούνται, όπως και στην περίπτωση της κατακόρυφης πρόσπτωσης. Επιπλέον, ένα μέρος της σεισμικής ενέργειας πρόσπτωσης των Ρ-κυμάτων μετατρέπεται σε ανακλώμενα και διερχόμενα S-κύματα, τα οποία πολώνονται σε ένα κάθετο επίπεδο.

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2} \Rightarrow \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.26)$$

Ας σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι αν $v_2 > v_1$, η σεισμική ακτίνα διαθλάται σχηματίζοντας με την κατακόρυφο γωνία, μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης.

Ο νόμος του Snell εφαρμόζεται και στην ανακλώμενη ακτίνα και η εφαρμογή του οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης.

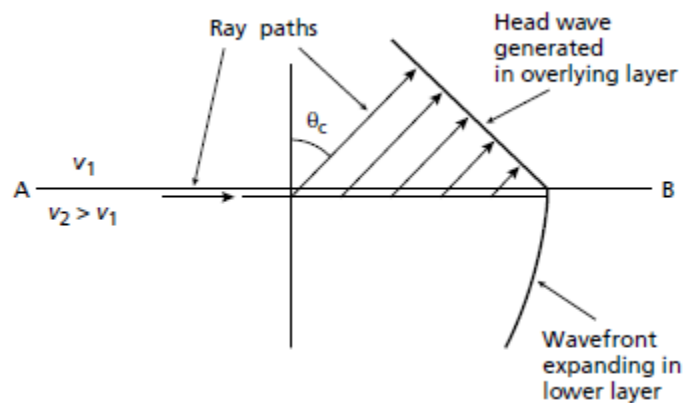
2.4.8.3. Οριακά διαθλώμενα κύματα

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:

$$\frac{\sin\theta_c}{v_1} = \frac{\sin 90^\circ}{v_2} \Rightarrow \sin\theta_c = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (2.27)$$

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.



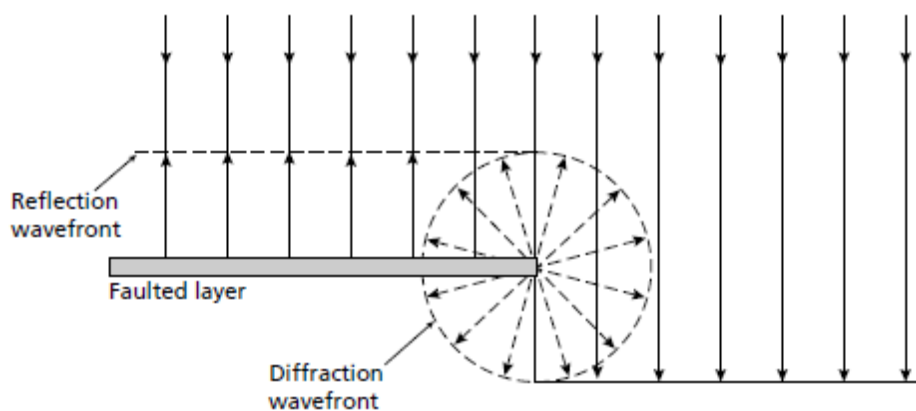
Εικόνα 2.29: Μετωπικά κύματα

2.4.8.4. Περίθλαση

Κατά την προηγούμενη προσέγγιση της ανάκλασης και διάθλασης της σεισμικής ενέργειας σε διεπιφάνειες, οι οποίες παρουσιάζουν αντιθέσεις ακουστικής εμπέδησης, υποτέθηκε 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 ρωγματομένων στρωμάτων καθώς και μικρού μεγέθους, απομονωμένα αντικείμενα, όπως ογκόλιθοι σε ένα κατά τ' άλλα ομογενές στρώμα.

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



Εικόνα 2.30: Περίθλαση στο άκρο ρωγματομένου στρώματος (Keary & Brooks)

2.4.9. Σεισμική Ανάκλαση και Σεισμική Διάθλαση

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

Σεισμική Διάθλαση: κατά την εφαρμογή της μεθόδου σεισμικής διάθλασης οι χρόνοι άφιξης της αρχικής εδαφικής κίνησης, η οποία παράγεται από μία πηγή, καταγράφονται σε διάφορες αποστάσεις, οι επόμενες αφίξεις απορρίπτονται. Κατά συνέπεια, το σύνολο των δεδομένων που λαμβάνονται με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης, αποτελείται από μια σειρά χρόνων συναρτήσεων των αποστάσεων. 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. Οι ταχύτητες αυτές ελέγχονται από ένα σύνολο φυσικών σταθερών, οι οποίες ονομάζονται ελαστικές παράμετροι και είναι χαρακτηριστικές του υλικού.

Σεισμική Ανάκλαση: Κατά την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης, 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. Από την άποψη αυτή, η μελέτη της ανάκλασης είναι μια ιδιαίτερα εξειδικευμένη έκδοση της ηχητικής βυθοσκόπησης, η οποία χρησιμοποιείται από τα υποβρύχια, τα πλοία και τα συστήματα ραντάρ. 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. Οι υπόγειες δομές, μπορεί να είναι πολύπλοκες ως προς το σχήμα τους, αλλά όπως και στην περίπτωση της σεισμικής διάθλασης, ερμηνεύονται σε σχέση με τις ασυνέχειες που χωρίζουν υλικά με διαφορετικές ελαστικές παραμέτρους.

2.4.10. Μέθοδος της σεισμικής διάθλασης

2.4.10.1. Γενικά

Από μία σεισμική πηγή, αναχωρεί ένα σεισμικό κύμα το οποίο καταφθάνει σε γεώφωνο, το τοποθετημένο σε συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια της γης, με τη μορφή τριών διαφορετικού τύπου διακριτών κυμάτων, τα οποία κινούνται ακολουθώντας διαφορετικές διαδρομές. Τα κύματα αυτά είναι:

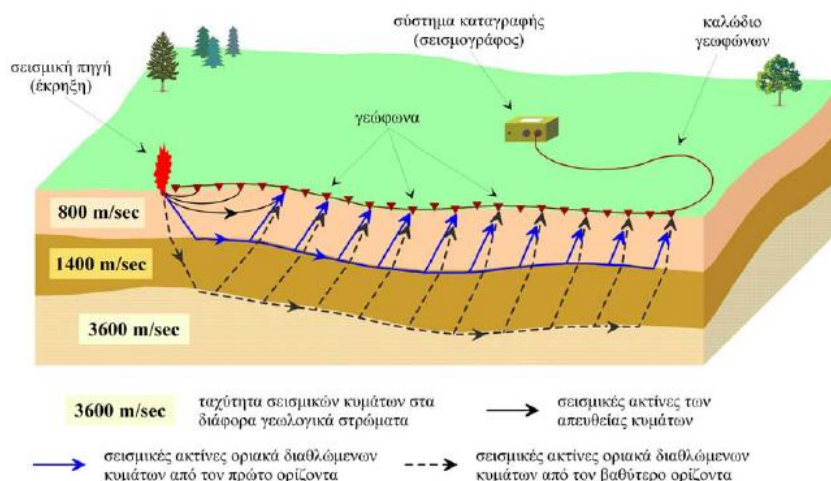
- **Το απευθείας κύμα**, το οποίο διανύει την απόσταση πηγή – γεώφωνο με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος.
- **Το ανακλώμενο κύμα**, το οποίο φθάνει στο γεώφωνο μετά από ανάκλαση στη διεπιφάνεια, κινούμενο με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος.
- **Το οριακά διαθλώμενο κύμα** το οποίο φθάνει στο γεώφωνο, 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.

Όσον αφορά στη χρονική στιγμή άφιξης των προαναφερθέντων κυμάτων, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.27**, είναι η εξής:

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.

2.4.10.2. Εργασίες υπαίθρου

Μια διάταξη, εγκατεστημένη στην ύπαιθρο για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων, παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 2.31: Διάταξη για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων στην ύπαιθρο (Λούης, 2004)

Μια σειρά γεωφώνων, 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 (σειсмоγράφος). 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. Για τη διερεύνηση ρηχών δομών, όπως είναι για παράδειγμα ο εντοπισμός του βραχώδους υποβάθρου, η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων είναι της τάξης των μερικών μέτρων. Αντίθετα, για τη διερεύνηση βαθέων δομών με παγκόσμιο επιστημονικό ενδιαφέρον, όπως είναι για παράδειγμα ο υπολογισμός του βάθους της ασυνέχειας Moho, η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων είναι της τάξης των εκατοντάδων ή ακόμα και χιλιάδων μέτρων.

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 – Johnson 1976), 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.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, εάν το πάχος για παράδειγμα του πρώτου στρώματος είναι πολύ μεγάλο, οπότε ο εντοπισμός του δεύτερου στρώματος καθίσταται δυσχερής, ενδέχεται να πραγματοποιηθούν ακόμα δύο πυροδοτήσεις, έξω από τη γραμμή διασκόπησης. Για την πραγματοποίησή τους, προεκτείνουμε νοητά τη σεισμική γραμμή και προς τα δύο άκρα της, κατά μήκος ίσο περίπου με το μήκος της γραμμής.

2.4.10.3. Πηγές θορύβου

Όπως σε όλες τις γεωφυσικές μεθόδους, έτσι και στις σεισμικές ο θόρυβος μπορεί να αλλοιώσει τις σεισμικές παρατηρήσεις μας. Επειδή, όμως, ελέγχουμε τη σεισμική πηγή, μπορούμε να ελέγξουμε και μερικούς τύπους θορύβου. Αν, για παράδειγμα, ο ήχος εμφανίζεται τυχαία, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την επίδρασή του στις παρατηρήσεις μας καταγράφοντας επαναλήψεις από πηγές στην ίδια θέση και υπολογίζοντας το μέσο όρο των αποτελεσμάτων. 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. Όπως είναι αναμενόμενο, είναι μεγάλη η ποικιλία των πηγών που μπορούν να παράγουν αυτό το θόρυβο. Έτσι, πηγές του μπορεί να είναι η κίνηση οχημάτων, αεροσκαφών, το ανθρώπινο περπάτημα, καθώς και μετεωρολογικά φαινόμενα. Ο αέρας μπορεί να προκαλέσει θόρυβο με διάφορους τρόπους, αυτός όμως που μας ανησυχεί περισσότερο είναι η επίδρασή του στη βλάστηση. Αν η διασκόπηση πραγματοποιείται κοντά σε δέντρα, ο αέρας έχει σαν αποτέλεσμα να κινούνται τα κλαδιά, και η κίνηση αυτή μεταδίδεται μέσω των κορμών των δέντρων στις ρίζες και από εκεί στο έδαφος.

- Ηλεκτρονικός Θόρυβος (Electronic Noise) – Όπως έχουμε ήδη δει, γεώφωνα μετατρέπουν την κίνηση του εδάφους σε ηλεκτρικά σήματα. Τα σήματα αυτά στη συνέχεια μεταδίδονται μέσω του καλωδίου ενώ ταυτόχρονα ενισχύονται και καταγράφονται από το σύστημα καταγραφής. Οτιδήποτε λοιπόν προκαλεί μεταβολές στο ηλεκτρικό σήμα του καλωδίου ή του συστήματος καταγραφής προκαλεί αλλοίωση των δεδομένων. Τέτοιος θόρυβος μπορεί να προκληθεί από διάφορες πηγές. Για παράδειγμα, χαλαρή ή βρώμικη σύνδεση μεταξύ των γεωφώνων και του καλωδίου ή μεταξύ του καλωδίου και του συστήματος καταγραφής μπορεί να προκαλέσει θόρυβο. Επίσης η

υγρασία σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος είναι πηγή θορύβου. Ο άνεμος μπορεί επίσης να προκαλέσει θόρυβο εάν το καλώδιο κρέμεται από θάμνους και κινείται. Το καλώδιο είναι στην πραγματικότητα ένας μακρύς αγωγός. Καθώς κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο της Γης, ηλεκτρικό ρεύμα παράγεται μέσα στο καλώδιο.

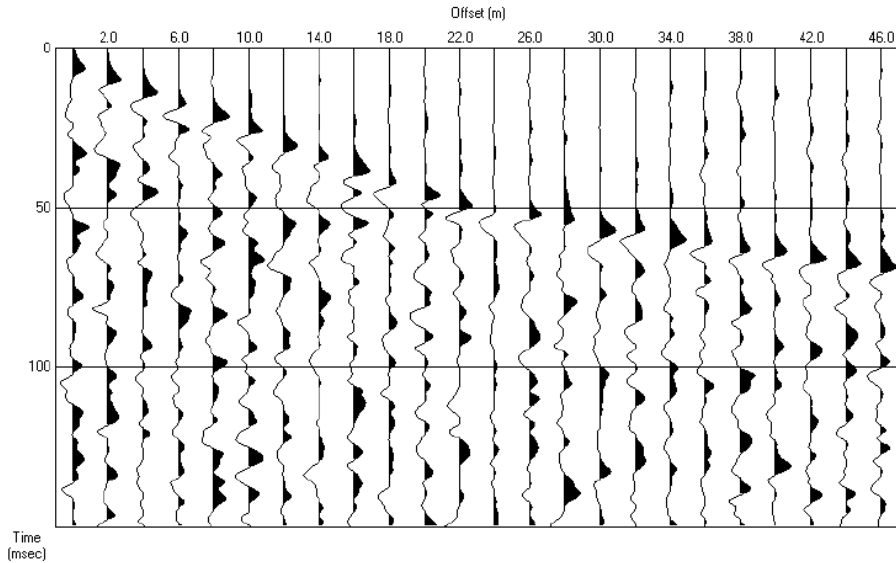
• Γεωλογικός θόρυβος (Geological Noise) – Οποιοδήποτε είδος υπεδάφικου γεωλογικού σχηματισμού που μας είναι δύσκολο να απεικονίσουμε μπορεί να θεωρηθεί πηγή θορύβου. Στη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης υποθέτουμε ότι η γεωλογική δομή μεταβάλλεται πλευρικά μόνο κατά μήκος της ευθείας που συνδέει τα γεώφωνα 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. Όπως με τις παρατηρήσεις της ειδικής αντίστασης, θα ερμηνεύσουμε τις σεισμικές παρατηρήσεις σαν να είχαν προκληθεί από σχετικά απλά γήινα μοντέλα. Αν και τα μοντέλα αυτά μπορούν να είναι πιο πολύπλοκα από αυτά των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης (π.χ. στρώματα με κλίση και στρώματα με ανώμαλη τοπογραφία), για την ερμηνεία των σεισμικών παρατηρήσεων της διάθλασης θα δεχτούμε ότι οι μεταβολές συμβαίνουν μόνο κατά μήκος της γραμμής από την οποία συλλέγουμε τα δεδομένα. (Λούης, 2004)

2.4.10.4. Καταγραφές της εδαφικής κίνησης

Όταν τα σεισμικά κύματα αλληλεπιδρούν με μία 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 μία 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.



Εικόνα 2.32: Σεισμική καταγραφή κοινής πηγής

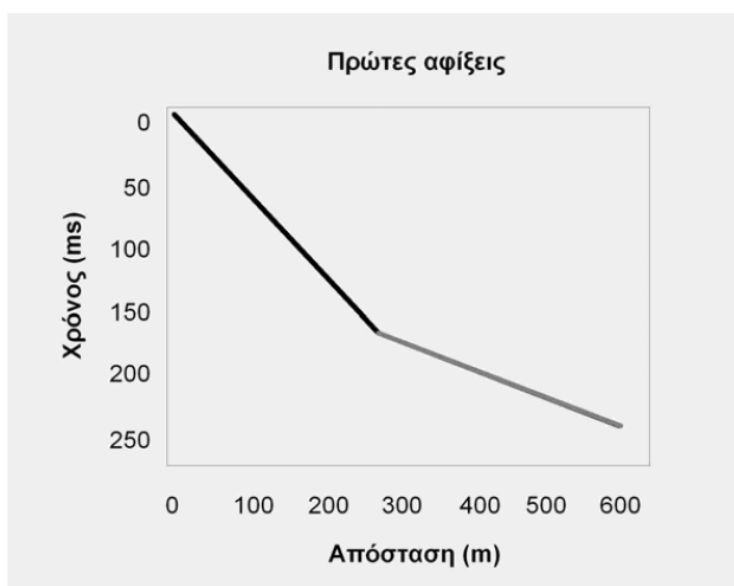
Στην **Εικόνα 2.28** παρουσιάζονται οι καταγραφές 24 γεωφώνων, τοποθετημένων σε σειρά, ανά 2m. Στο διάγραμμα αυτό, ο χρόνος σημειώνεται στον κατακόρυφο άξονα και η απόσταση από την πηγή στον οριζόντιο, ενώ για κάθε κατάλληλη απόσταση πηγής – δέκτη έχει σχεδιαστεί το αντίστοιχο σεισμόγραμμα, το οποίο 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.

2.4.10.5. 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 γεώφωνα 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 διαθλωμένο

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 γεωφώνου 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 .



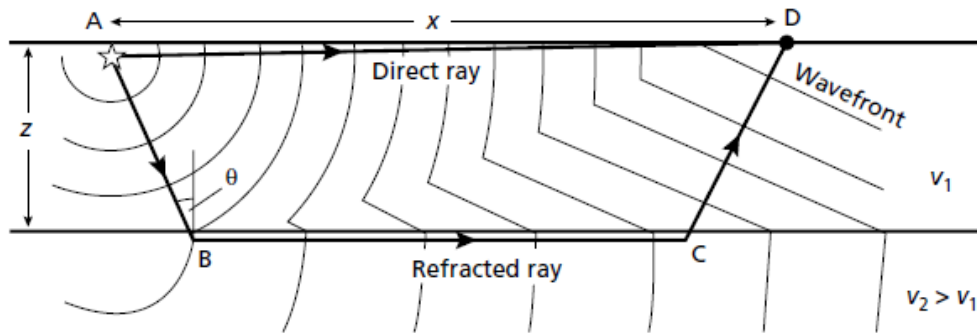
Εικόνα 2.33: Δρομοχρονική καμπύλη πρώτων αφίξεων (Thomas M. Boyd. 1999)

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 σεισογράμμο. Αν, όμως, έχει καταγραφεί οποιουδήποτε 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.

2.4.10.6. Προσδιορισμός της δομής του υπεδάφους

- Περίπτωση δύο στρωμάτων με οριζόντια διεπιφάνεια

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διαδοχικές θέσεις του μετώπου του κύματος, το οποίο προέρχεται από μία σεισμική πηγή που βρίσκεται στο σημείο A. 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. Το απευθείας και το διαθλώμενο κύμα κατευθύνονται προς έναν δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στο σημείο D και απέχει απόσταση x από την πηγή. Οι ταχύτητες των στρωμάτων είναι v_1 και v_2 αντίστοιχα, με $v_2 > v_1$, και η διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων βρίσκεται σε βάθος z .



Εικόνα 2.34: Μοντέλο στρώματος πάνω από ημιχώρο, με οριζόντια διεπιφάνεια (Keary & Brooks)

Το απευθείας κύμα ταξιδεύει οριζόντια κατά μήκος της επιφάνειας του ανώτερου στρώματος, από το A στο D, με ταχύτητα v_1 , ακολουθώντας διαδρομές που σχηματίζουν γωνία θ – ίση με την κρίσιμη – με το κατακόρυφο επίπεδο. Τέλος, το ίδιο κύμα διασχίζει την οριζόντια απόσταση BC, με ταχύτητα v_2 , μεγαλύτερη της v_1 .

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

$$\begin{aligned}
 t &= t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \Rightarrow \\
 t &= \frac{z}{v_1 \cos \theta} + \frac{(x - 2z \tan \theta)}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cos \theta} \Rightarrow \\
 t &= \frac{(x - 2z \tan \theta)}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos \theta} \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$\sin \theta = \frac{v_1}{v_2} \text{ (Νόμος του Snell)} \quad (2.29)$$

και ότι

$$\cos \theta = \sqrt{\left(1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}\right)} \quad (2.30)$$

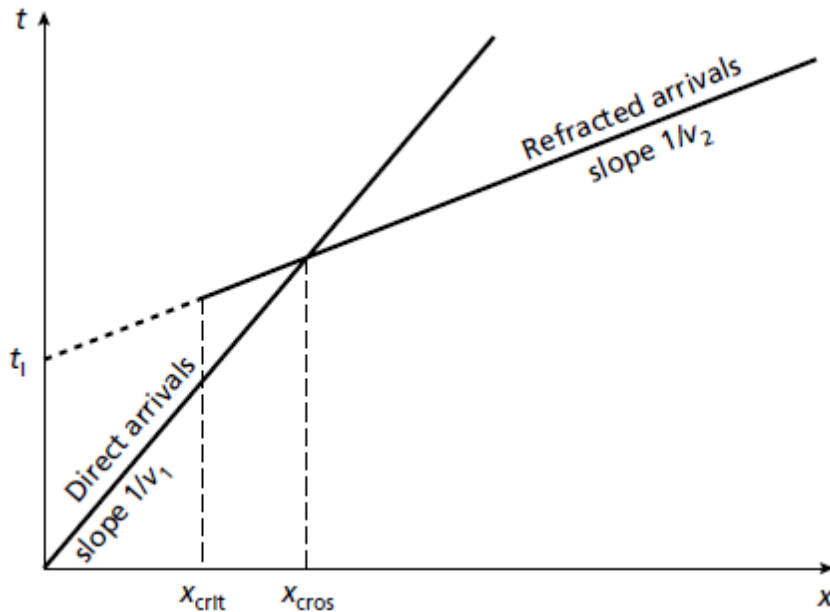
Έχουμε:

$$t = \frac{x \sin \theta}{v_1} + \frac{2z \cos \theta}{v_1} \quad (2.31)$$

ή εναλλακτικά:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \Rightarrow t = \frac{x}{v_2} + t_i \quad (2.32)$$

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 $1/v_2$.



Εικόνα 2.35: Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου δύο στρωμάτων (Keary & Brooks)

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:

$$t_i = \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \quad (2.33)$$

Επιλύοντας αυτή τη σχέση ως προς το βάθος z, έχουμε:

$$z = \frac{t_i v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (2.34)$$

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:

$$\frac{x_{cros}}{v_1} = \frac{x_{cros}}{v_2} + \frac{2z\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \quad (2.35)$$

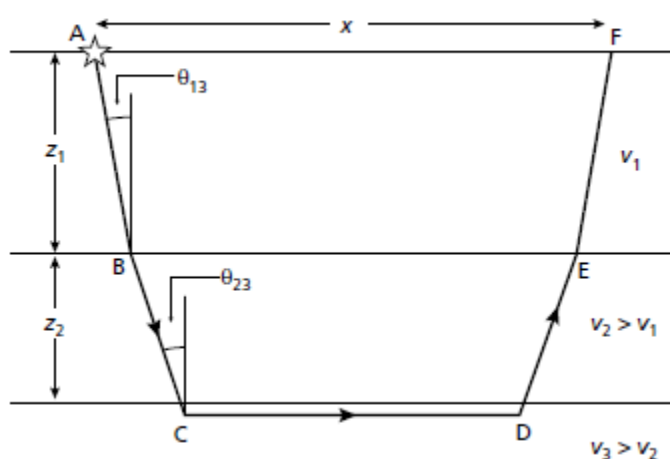
Επιλύοντας ως προς x_{cross} έχουμε:

$$x_{cross} = 2z \sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}} \quad (2.36)$$

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.



Εικόνα 2.36: Μοντέλο δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με οριζόντιες διεπιφάνειες (Keary & Brooks)

Ο χρόνος διαδρομής κατά μήκος της διαθλώμενης ακτίνας ABCDEF δίνεται από τη σχέση:

$$t = \frac{x \sin \theta_1}{v_1} + \frac{2z_1 \cos \theta_1}{v_1} + \frac{2z_2 \cos \theta_2}{v_2} \quad (2.37)$$

όπου:

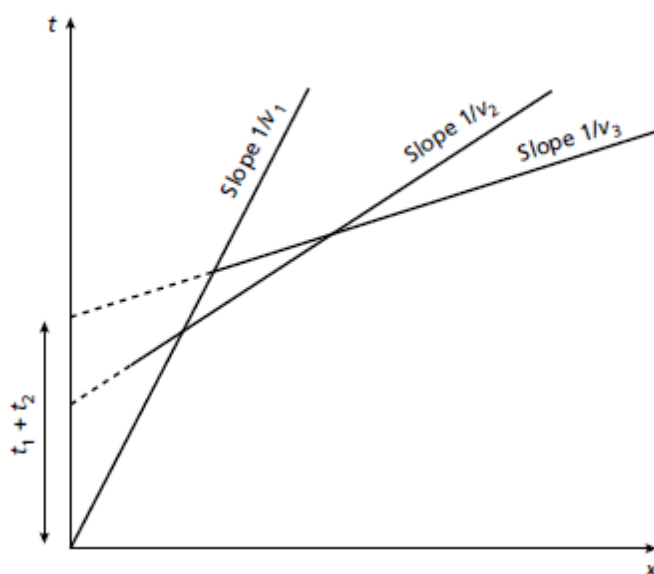
$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{v_1}{v_3} \right) \quad \text{και} \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{v_2}{v_3} \right) \quad (2.38)$$

Επομένως:

$$t = \frac{x \sin \theta_1}{v_1} + t_{i1} + t_{i2} \quad (2.39)$$

όπου t_{i1} είναι ο χρόνος της συνάντησης της δρομοχρονικής καμπύλης των οριακά διαθλώμενων αφίξεων της ανώτερης διεπιφάνειας και t_{i2} η διαφορά μεταξύ του t_{i1} και του

χρόνου συνάντησης της δρομοχρονικής καμπύλης των οριακά διαθλώμενων αφίξεων της κατώτερης διεπιφάνειας.



Εικόνα 2.37: Δρομοχρονική καμπύλη μοντέλου τριών στρωμάτων (Keary & Brooks)

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:

$$t_n = \frac{x \sin \theta_i}{v_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2z_i \cos \theta_i}{v_i} \quad (2.40)$$

όπου:

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{v_i}{v_n} \right) \quad (2.41)$$

Η εξίσωση 2.41 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.

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 A στο E που δίδεται από τη σχέση:

$$t_{AKLE} = \frac{2AA' \cos i_c}{v_1} + \frac{AE}{v_2} \quad (2.42)$$

και το χρόνο διάδοσης από το E στο P που είναι:

$$t_{EP} = \frac{EP}{v_1} \quad (2.43)$$

Από τη γεωμετρία του σχήματος έχουμε:

$$PF = x \sin \omega \quad \text{και} \quad AF = x \cos \omega$$

$$EF = PF \tan i_c = x \sin \omega \tan i_c \quad \text{και} \quad EP = PF / \cos i_c = x \sin \omega / \cos i_c$$

$$AE = AF - EF = x (\cos \omega - \sin \omega \tan i_c) \quad (2.44)$$

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:

$$\begin{aligned} t_d &= \frac{2h_A \cos i_c}{v_1} + \frac{x(\cos \omega - \sin \omega \tan i_c)}{v_2} + \frac{x \sin \omega}{v_1 \cos i_c} \\ &= \frac{2h_A \cos i_c}{v_1} + \frac{x}{v_2} (\sin i_c \cos \omega + \cos i_c \sin \omega) \\ t_d &= \frac{2h_A \cos i_c}{v_1} + \frac{x \sin(i_c + \omega)}{v_2} \end{aligned} \quad (2.45)$$

Η σχέση 2.45 παριστάνει ευθεία με κλίση:

$$\frac{\sin(i_c + \omega)}{v_1} = \frac{\sin(i_c + \omega)}{v_2 \sin i_c} = \frac{1}{v_{2d}} \quad (2.46)$$

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 2.46 έχουμε:

$$\frac{v_{2d}}{v_2} = \frac{\sin i_c}{\sin(i_c + \omega)} < 1 \quad (2.47)$$

Η σχέση 2.47 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:

$$t_u = \frac{2h_B \cos i_c}{v_1} + \frac{x \sin(i_c + \omega)}{v_1} \quad (2.48)$$

και, αντίστοιχα:

$$\frac{v_{2u}}{v_2} = \frac{\sin i_c}{\sin(i_c + \omega)} > 1 \quad (2.49)$$

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

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

$$i_c + \omega = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2d}}\right) \quad (2.50)$$

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

$$i_c - \omega = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2u}}\right) \quad (2.51)$$

Επομένως

$$i_c = \frac{\arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2d}}\right) + \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2u}}\right)}{2} \quad (2.52)$$

$$i_c = \frac{\arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2d}}\right) - \arcsin\left(\frac{v_1}{v_{2u}}\right)}{2} \quad (2.53)$$

και η ταχύτητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v_2 = \frac{v_1}{\sin i_c} \quad (2.54)$$

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

$$h_A = \frac{v_1 t_{1d}}{2 \cos i_c} \quad (2.55)$$

και

$$h_B = \frac{v_1 t_{1u}}{2 \cos i_c} \quad (2.56)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

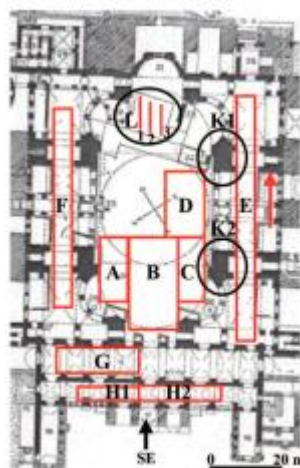
3. Εφαρμογές της γεωφυσικής σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς

3.1. Ναός Αγίας Σοφίας, Κωνσταντινούπολη

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)

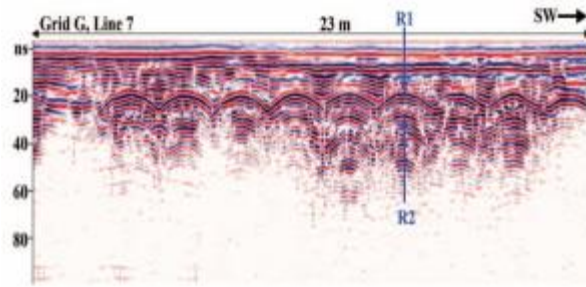
Κατά την έρευνα εφαρμόστηκε η μέθοδος του γεωραντάρ (GPR) χρησιμοποιώντας σύστημα 250 MHz στο δάπεδο στη μεγάλη αίθουσα κάτω από τον τρούλο, στις πλαϊνές αίθουσες και στους εσωτερικούς και εξωτερικούς νάρθηκες της εκκλησίας, κατά μήκος γραμμών σε διαστήματα 25cm με ίχνος διαστήματος 5cm.



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

Παρατηρήθηκαν δύο διακριτές ζώνες σε πολλές από τις τομές του γεωραντάρ. Η ανώτερη ζώνη εκτείνεται σε βάθος 5m και πιθανά οφείλεται στα ερείπια της θεμελίωσης παλαιότερης κατασκευής μαζί με εδαφικό υλικό, ενώ η κατώτερη ζώνη υποδηλώνει το αδιατάρακτο εδαφικό υλικό.

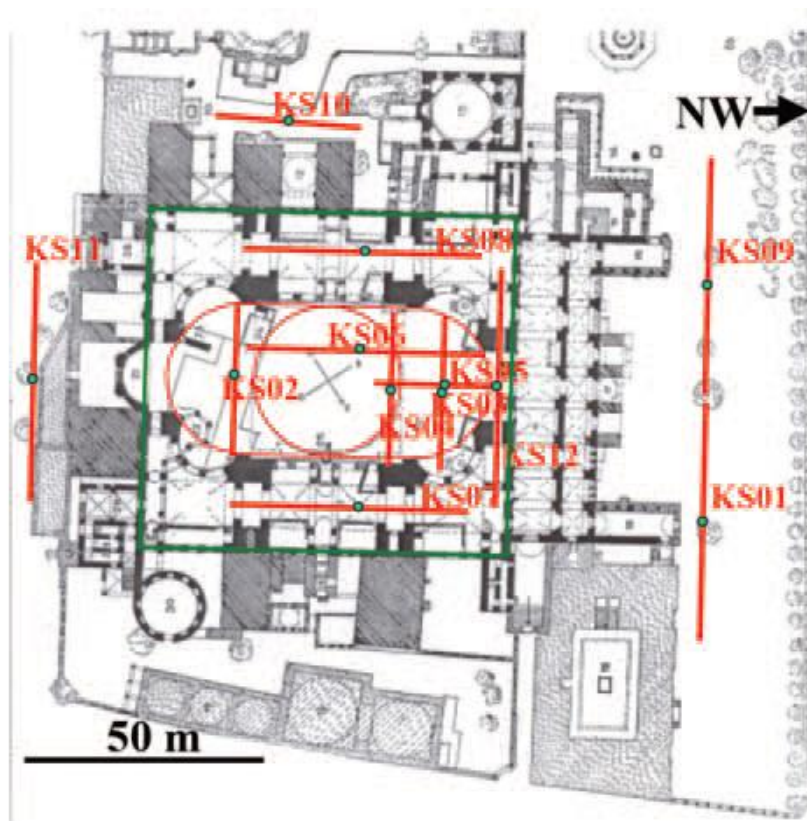
Ακόμα, σκιαγραφήθηκε η γεωμετρία μιας δεξαμενής που είχε ανακαλυφθεί κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα κατά τη διάρκεια προηγούμενων μετρήσεων με GPR (Yilmaz and Eser, 2005). Η δεξαμενή εντοπίζεται περίπου σε βάθος 1m κάτω από την επιφάνεια του δαπέδου του ναού, έχει μήκος περίπου 60m και πλάτος περίπου 5m. Επίσης, 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 500m από την περιοχή της εκκλησίας.



Εικόνα 3.2: Ανακλάσεις R1 και R2 από την κορυφή και τη βάση της δεξαμενής κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα

Σεισμική Μέθοδος

Με τη μέθοδο των σεισμικών υπολογίστηκαν τα μοντέλα ταχυτήτων – βάθους των S και P κυμάτων κάτω από τα θεμέλια του ναού. Σε κάθε μια από τις 11 τοποθεσίες (τομές KS01 – KS11) μέσα στο χώρο των μετρήσεων (Εικόνα 3.3), 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.



Εικόνα 3.3: Κάνναβος μετρήσεων της σεισμικής μεθόδου

Οι ταχύτητες των P-κυμάτων μεταβάλλονται από 1500m/s κοντά στο επίπεδο του δαπέδου έως 3000m/s σε βάθος 10m. Οι ταχύτητες των S-κυμάτων προσεγγίζουν τα

700m/s σε βάθος 6m, 900m/s σε βάθος 12m, και ξεπερνούν τα 1000m/s σε βάθος 18m. Με βάση τις σεισμικές ταχύτητες, αποδεικνύεται ότι η εκκλησία έχει κτιστεί πάνω σε σκληρό βραχώδες υπόβαθρο.

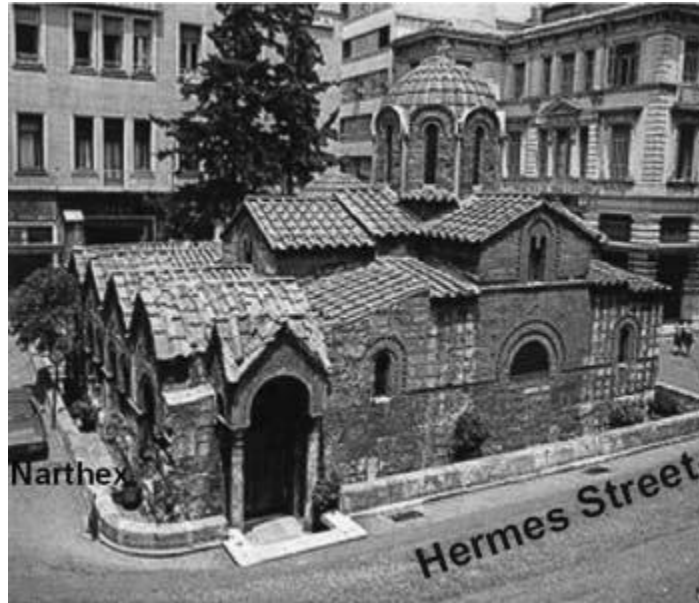
Συμπεράσματα

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 πηγαδιού 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 (0-6m), οι ταχύτητες των S-κυμάτων ήταν μεγαλύτερες από 700m/s, κάτι που δηλώνει ότι η εκκλησία χτίστηκε πάνω από ένα ισχυρό υπόστρωμα.

3.2. Καπνικαρέα, Αθήνα

Η εκκλησία της Καπνικαρέας (**Εικόνα 3.5**) βρίσκεται στο κέντρο της Αθήνας στη μέση ενός πλακόστρωτου δρόμου. Είναι αφιερωμένη στα Εισόδια της Θεοτόκου και έχει ένα μικρό παρεκκλήσι με τρούλο, το οποίο προστέθηκε στο βόρειο τμήμα της Εκκλησίας και είναι αφιερωμένο στην Αγία Βαρβάρα. Ακόμα, προστέθηκε εξωνάρθηκας με πολλές αμφίκλινες στέγες μπροστά από την εκκλησία και το παρεκκλήσι. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η εκκλησία είναι κτισμένη πάνω από τα ερείπια παλαιότερης εκκλησίας την οποία είχε αναγείρει η Ευδοκία. Η αρχική εκκλησία είχε χτιστεί με τη σειρά της (όπως συνηθιζόταν) πάνω στα θεμέλια αρχαίου ελληνικού ναού, αφιερωμένου σε γυναικεία θεότητα, πιθανότατα την Αθηνά ή την Δήμητρα. Στο ναό βρίσκονται ενσωματωμένα οικοδομικά στοιχεία όπως κίονες με ρωμαϊκά κιονόκρανα και εντοιχισμένα γλυπτά και επιγραφές.



Εικόνα 3.4: Η εκκλησία της Καπνικαρέας στη μέση της οδού Ερμού στην Αθήνα

Η εκκλησία κτίστηκε στις αρχές του 11^{ου} αιώνα και πιθανά ονομάστηκε έτσι από τον ιδρυτή της. Ο ναός ανήκει στο σύνθετο τετρακιόνιο, σταυροειδή εγγεγραμμένο τύπο, με τρεις ανίδες στην ανατολική πλευρά και νάρθηκα στη δυτική. Οι εσωτερικοί τοίχοι είναι αγιογραφημένοι από το γνωστό μοντέρνο Έλληνα καλλιτέχνη, Φώτη Κόντογλου. Μετά την ελληνική επανάσταση ενάντια στους Οθωμανούς, η Αθήνα έγινε πρωτεύουσα του νεοσύστατου κράτους και ένα νέο αστικό σχέδιο βρισκόταν υπό εξέταση. Από αυτήν την άποψη, η εκκλησία που βρισκόταν στη μέση της οδού Ερμού ήταν εμπόδιο για το νέο οδικό ιστό της πόλης. Δύο φορές είχε αποφασιστεί το γκρέμισμα της εκκλησίας και το μνημείο σώθηκε μετά από παρέμβαση του Βασιλιά Λουδοβίκου της Βαυαρίας (1834) και του Μητροπολίτη Αθηνών Μισαήλ Α΄ (1863).

Ο ναός σήμερα ανήκει στο Πανεπιστήμιο Αθηνών για την άσκηση των φοιτητών της Θεολογικής του Σχολής.

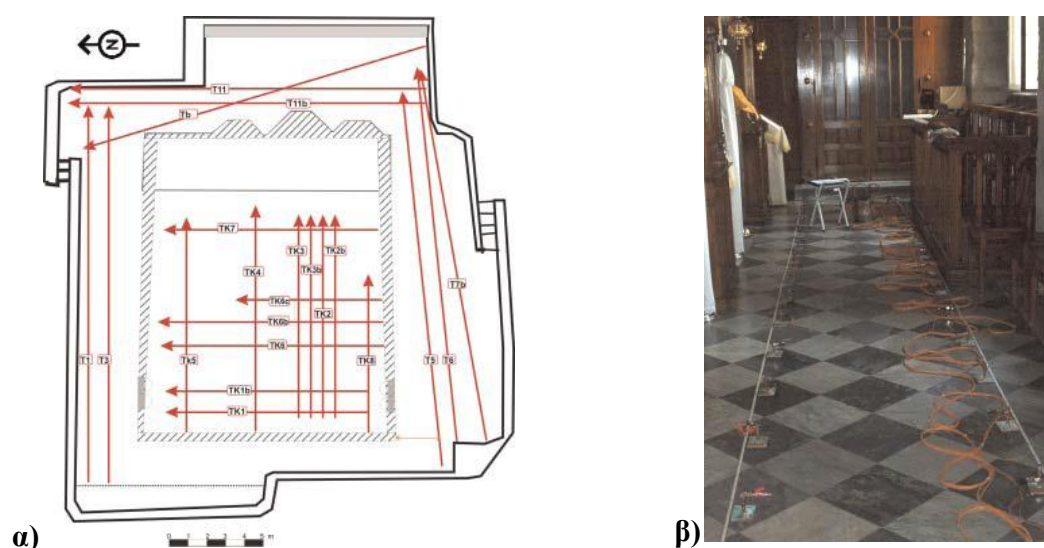
Στο εσωτερικό της εκκλησίας υπάρχει ένα πηγάδι, το οποίο είναι πιθανός μάρτυρας παλαιότερου κτίσματος. Η γραμμή του Μετρό περνά περίπου 17m κάτω από το ναό σε διεύθυνση Α-Δ, δηλαδή κατευθύνεται από το ιερό προς το νάρθηκα. Ήχοι από κοντινές υπόγειες δραστηριότητες ακούγονται στο εσωτερικό του ναού όταν απομακρύνεται το μεταλλικό κάλυμμα του πηγαδιού. Αυτό το γεγονός, μαζί με την υποψία ότι άλλα πηγάδια υπάρχουν κάτω από το δάπεδο του μνημείου, ενίσχυσαν την άποψη ότι ίσως το μνημείο απειλείται από την κατασκευή της σήραγγας του μετρό. Γι' αυτό το λόγο, μαζί με άλλες μελέτες, αποφασίστηκε η διενέργεια γεωφυσικής έρευνας για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαίων τοιχίων που ενδεχομένως υπήρχαν, είτε ως έγκοιλα, είτε πληρωμένα με χαλαρά υλικά ή άργιλο.

Η εφαρμογή της ηλεκτρικής μεθόδου αποφασίστηκε γιατί στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρήθηκε ότι ίσως οι θαμμένες δομές βρίσκονται σε σχετικά μεγάλο βάθος. Αυτό περιορίζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου GPR γιατί τα αργιλώδη εδάφη της Αθήνας θα μπορούσαν να περιορίσουν τη διείδυση των σημάτων ραντάρ σε μεγάλο

βάθος. Και, πράγματι, η εκτίμηση αυτή επιβεβαιώθηκε και από τις λίγες μετρήσεις που έγιναν με το γεωραντάρ.

Για το σχεδιασμό των μετρήσεων της ηλεκτρικής μεθόδου, οι ερευνητές έλαβαν υπόψη τους εξής παράγοντες:

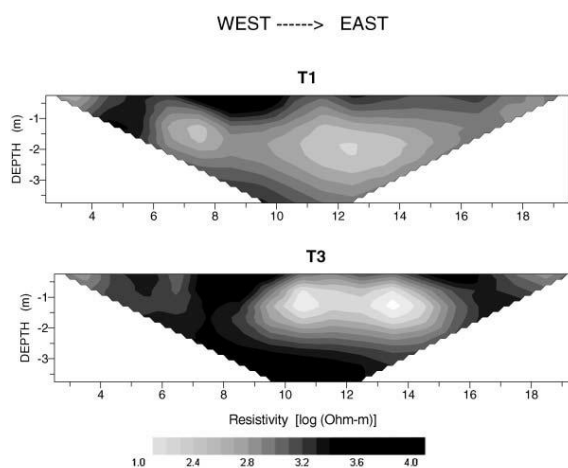
- Κατά πάσα πιθανότητα θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί το στοιχείο των αρχαίων πηγαδιών, όπως υπέδειξαν οι γεωτρήσεις που έγιναν κάτω από το ναό από την Αττικό Μετρό Α.Ε. Το πιθανότερο ήταν, τα πηγάδια που θα εντοπίζονταν κάτω από το ναό να έχουν επένδυση, τοίχους φτιαγμένους από πέτρα ή τούβλο. Ήταν επίσης πολύ πιθανό, τα πηγάδια να έχουν πληρωθεί με χαλαρά υλικά και άργιλο. Γι' αυτό το λόγο, τα πηγάδια είτε κενά είτε πληρωμένα, θα ήταν καλυμμένα από το υλικό της επένδυσης, το οποίο θα εμπόδιζε τον εντοπισμό των αγωγίμων υλικών από την ηλεκτρική μέτρηση.
- Εξαιτίας του σπλισμένου σκυροδέματος που υπάρχει κάτω από την οδό Ερμού, οι μέθοδοι που προτάθηκαν δεν θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε όλο το πλάτος του δρόμου. Γι' αυτό το λόγο, η περιοχή που έγιναν οι μετρήσεις, ήταν αρκετά περιορισμένη. Συνεπώς, ο διαθέσιμος χώρος για την έκταση των γεωφυσικών προφίλ ήταν περιορισμένος και αυτό επηρεάζει το βάθος διεξόδου.
- Οι περιορισμένες διαστάσεις των πιθανών έγκοιλων σε συνδυασμό με τη μικρή έκταση των γεωφυσικών προφίλ θα έκανε πολύ δύσκολο τον εντοπισμό αυτών των έγκοιλων. Γενικά, το μέγιστο βάθος διεξόδου δεν θα μπορούσε σ' αυτή την έρευνα να ξεπεράσει τα 3.5 m.



Εικόνα 3.5: α) Οι μετρήσεις ERT μέσα και έξω από την εκκλησία. β) Ηλεκτρόδια μέσα στην εκκλησία.

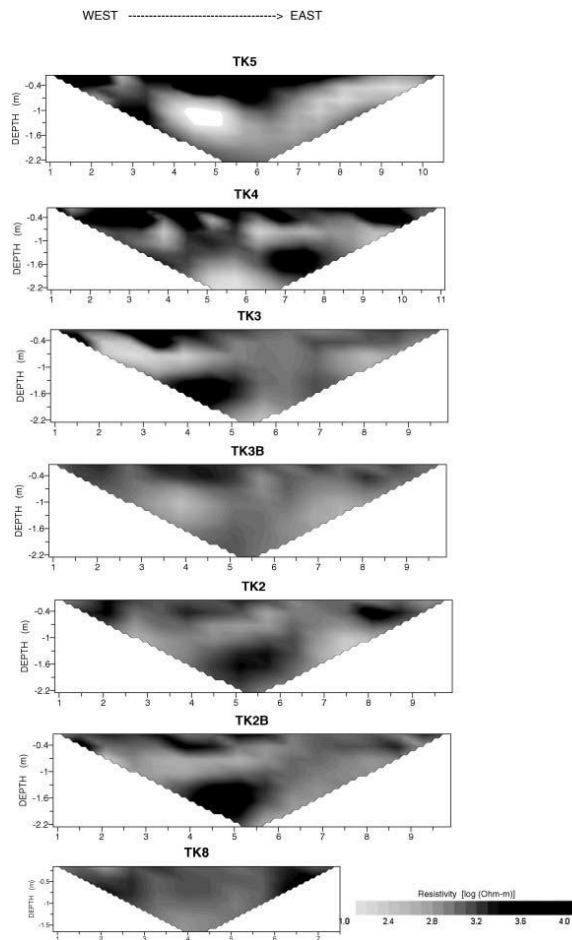
Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Schlumberger γιατί έχει καλό λόγο σήματος προς θόρυβο και επαρκή οριζόντια ανάλυση. Στις περισσότερες τομές χρησιμοποιήθηκαν 21 ηλεκτρόδια. Το συνολικό μήκος των προφίλ των μετρήσεων ήταν 400m. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια «επίπεδης βάσης», τα οποία είναι επί της ουσίας χάλκινα πιάτα με ένα χερούλι, με οποίο μπορούν να εφαρμοστούν στη συνδεσμολογία της μεθόδου. Για καλύτερη αγωγή του ρεύματος, χρησιμοποιήθηκε αγωγιμο τζελ για να κολλήσουν τα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του δαπέδου. Γενικά, η ποιότητα των δεδομένων από τις μετρήσεις μέσα στο ναό είναι καλύτερη από αυτή των εσωτερικών μετρήσεων. Το υλικό κατασκευής του δαπέδου είναι διαφορετικό και πιθανά επηρεάζει το αποτέλεσμα των μετρήσεων.

Η **Εικόνα 3.8** δείχνει τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα προφίλ των μετρήσεων εξωτερικά της εκκλησίας στη βόρεια πλευρά. Όλες οι γραμμές ERT που μετρήθηκαν έξω από την εκκλησία δείχνουν στοιχεία κοντά στην επιφάνεια, που πιθανά αφορούν είτε στις παλαιότερες κατασκευές που υπήρχαν στο σημείο ή το σύγχρονο σύστημα αποχέτευσης.



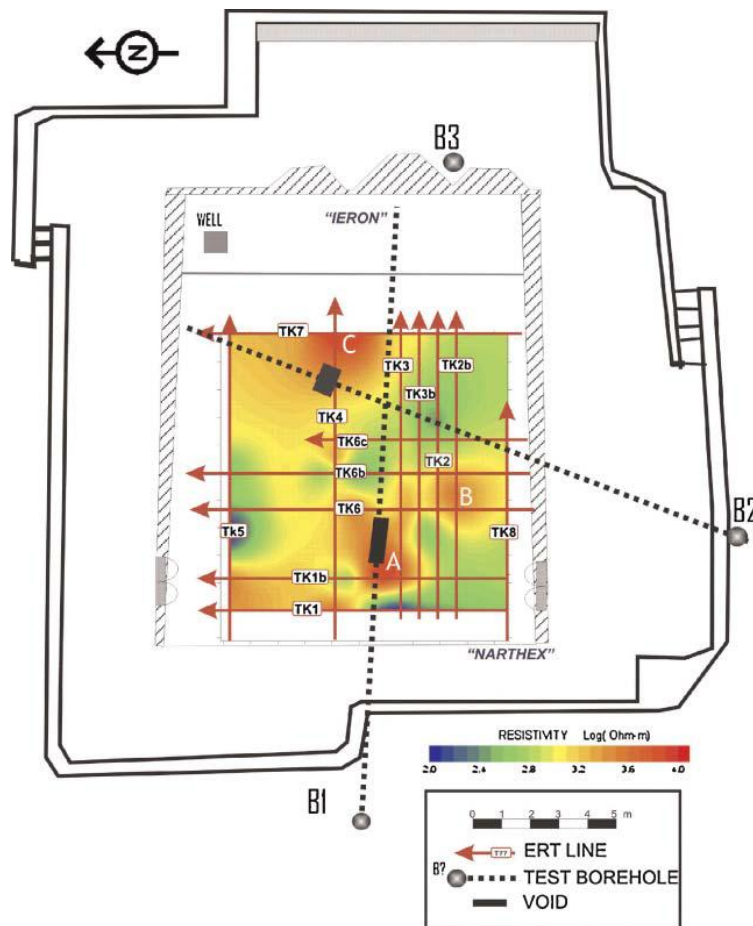
Εικόνα 3.6: Γεωηλεκτρικές τομές στο βόρειο τμήμα έξω από την εκκλησία της Καπνικαρέας

Στην **Εικόνα 3.9** φαίνεται η μεταβολή της αντίστασης από τα ηλεκτρικά προφίλ μέσα στην εκκλησία, σε διεύθυνση Α-Δ. Είναι φανερό ότι κοντά στην επιφάνεια, μέχρι 1m βάθος, υπάρχουν στοιχεία με μεγάλη αντίσταση. Αυτά τα στοιχεία είναι μικρά και πιθανά αφορούν ό,τι έχει απομείνει από παλαιότερες θεμελιώσεις. Οι τομές στο κέντρο της εκκλησίας (TK3, TK3B, TK2, TK3B) δείχνουν ένα στοιχείο υψηλής αντίστασης ανάμεσα στα 4-6m των προφίλ. Η κορυφή αυτού του στοιχείου είναι σε βάθος 1.2m. Η ανωμαλία πιθανά αποδεικνύει την ύπαρξη κενού ή κάποιας άλλης δομής. Στο ίδιο συμπέρασμα μπορούμε να καταλήξουμε στο μήκος 7-8m της τομής TK4. Παρόμοια στοιχεία υψηλής αντίστασης, κοντά στην επιφάνεια, φάνηκαν και στα προφίλ των μετρήσεων με διεύθυνση Β-Ν.



Εικόνα 3.7: Γεωηλεκτρικές τομές μέσα στην εκκλησία της Καπνικαρέας σε διεύθυνση A-A

Συνολικά τα αποτελέσματα για την περιοχή μέσα στην εκκλησία, όπως και οι τοποθεσία του πηγαδιού μέσα στην εκκλησία στη βορειοανατολική γωνία φαίνονται στην **Εικόνα 3.10**. Ακόμα, οι τοποθεσίες και οι κατευθύνσεις των γεωτρήσεων της Αττικό Μετρό ΑΕ είναι σημειωμένες με τις διακεκομμένες γραμμές. Η ανωμαλία A φαίνεται να εκτείνεται μεταξύ 1-2m βάθος και το μήκος της είναι περίπου 2m. Η ανωμαλία B έχει προκληθεί από στοιχείο με έκταση περίπου 2m και επίσης βρίσκεται σε βάθος 1-2m. Το στοιχείο που προκαλεί την ανωμαλία C έχει έκταση τουλάχιστον 3m κατά μήκος του προφίλ TK3 και βρίσκεται μεταξύ 1 και 2m βάθος.



Εικόνα 3.8: Συνολικά αποτελέσματα της μεθόδου

Οι περιοχές υψηλής αντίστασης δεν αντανακλούν υποχρεωτικά την ύπαρξη κενών. Υπάρχουν μεταβολές στις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπεδάφους που μπορεί να έχουν φυσικά αίτια ή να έχουν προκληθεί από άλλες ανθρώπινες παρεμβάσεις, όπως για παράδειγμα, θεμελιώσεις από προϋπάρχουσες κατασκευές.

Σύμφωνα με ιστορικές αναφορές, μεγάλος αριθμός από πηγάδια και δεξαμενές που αποτελούσαν για πολλά χρόνια το σύστημα ύδρευσης της Αθήνας, υπάρχουν εγκαταλειμμένα σε ολόκληρη την πόλη. Οι κορυφές των πηγαδιών είναι θαμμένες και τα πηγάδια περικλείονται από άργιλο κοντά στην επιφάνεια, και σε μεγαλύτερα βάθη, από τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, ο οποίος έχει χαμηλή υδροπερατότητα. Και στις δύο περιπτώσεις, τα πηγάδια περικλείονται από υλικά με σχετικά χαμηλές αντιστάσεις. Όσον αφορά τη μελέτη στην Καπνικαρέα, το πηγάδι στην βορειοανατολική γωνία της εκκλησίας έχει πλάτος 5m και βάθος 12m. Το επίπεδο του υδροφόρου βρίσκεται σε βάθος 4m από το δάπεδο του ναού. Είναι πολύ πιθανό, παρόμοιες κατασκευές να είναι θαμμένες σε κοντινή απόσταση, κάτι που απορρέει από τη μεγάλη πυκνότητα θαμμένων πηγαδιών που έχουν βρεθεί με ανασκαφές σε όλη την Αθήνα.

Τα αποτελέσματα της αντίστασης συσχετίστηκαν με τα δεδομένα τριών γεωτρήσεων. Γενικά, τα lithολογικά δεδομένα των γεωτρήσεων έδειξαν ένα στρώμα υλικών πλήρωσης που αποτελείται από άργιλο και αρχαία συντρίμια μέχρι το βάθος των 4m. Το στρώμα αυτό ακολουθείται από ένα σχηματισμό, που είναι γνωστός ως Αθηναϊκός Σχιστόλιθος.

Οι γεωτρήσεις B1 και B2 που φαίνονται στην **Εικόνα 3.10** απέδειξαν την ύπαρξη κενών. Το κενό κάτω από την ανωμαλία A βρέθηκε σε βάθος 10m και το άλλο που βρίσκεται περίπου στο κέντρο του ναού υπολογίζεται σε βάθος 15,5m. Βέβαια, το βάθος της έρευνας ERT είναι πολύ μικρότερο από την τοποθεσία των παραπάνω έγκοιλων. Παρ' όλα αυτά, η χωρική σύμπτωση της ανωμαλίας A με το κενό και το γεγονός ότι τα αρχαία πηγάδια ήταν κάθετα, υποδηλώνει ότι πιθανά η κορυφή του πηγαδιού προκαλεί την ανωμαλία. Επιπλέον γεωτρήσεις μπορούν στο μέλλον να αποδείξουν την αλήθεια αυτή την εκδοχή όπως και την πηγή των ανωμαλιών B και C.

Τέλος, η εκσκαφή της σήραγγας του μετρό δεν δημιούργησε κάποιο σημαντικό πρόβλημα. Οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στην εκκλησία ήταν εντός των ορίων του σχεδιασμού και η ευαίσθητη κατασκευή δεν έχει επηρεαστεί.

3.3. Κάστρο Occhiola, Σικελία, Ιταλία

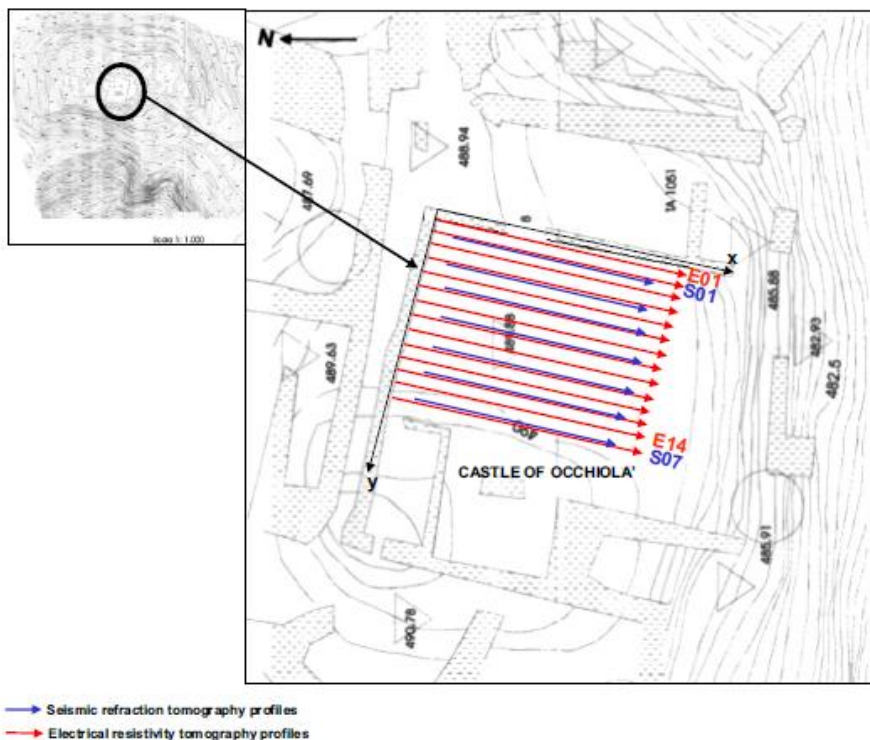
Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε στα συντρίμια του κάστρου του Occhiola στη Σικελία, ενός μεσαιωνικού χωριού που βρίσκεται στο βορειο-δυτικό τμήμα ενός λόφου, που ονομάζεται “Terravecchia”, σε υψόμετρο 491m. Το 1963, το χωριό Occhiola υπέστη σοβαρές καταστροφές από ισχυρούς σεισμούς. Το πρώτο γεγονός, στις 9 Ιανουαρίου, τρόμαξε τον πληθυσμό και προκάλεσε ισχυρή καταστροφή. Το χωριό όμως καταστράφηκε ολοκληρωτικά από τον πιο ισχυρό σεισμό που έγινε δύο μέρες μετά, στις 11 Ιανουαρίου. Κτίρια που είχαν αποδυναμωθεί από τον πρώτο σεισμό, κατεδαφίστηκαν ολοκληρωτικά. Ο μισός πληθυσμός πέθανε εγκλωβισμένος στα συντρίμια. Ο πρίγκιπας Carlo Maria Branciforte di Butera ξαναέχτισε την πόλη, με το όνομα Grammichele, σε μια περιοχή που απέχει λίγα χιλιόμετρα από την παλιά πόλη.



Εικόνα 3.9: Χάρτης όπου φαίνεται η θέση του χωριού Occhiola στην Ιταλία

Για τον εντοπισμό των λεπτομερειών του κάστρου, όπως για παράδειγμα τοιχία ή κενοί χώροι, οργανώθηκε εκτενής έρευνα πεδίου.

Η Γεωφυσική έρευνα στην περιοχή έγινε το 2004, σε μία περιοχή διαστάσεων 23x13m μέσα στο κάστρο (**Εικόνα 3.11**). Χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας (ERT) και της τομογραφίας Σεισμικής Διάθλασης, με στόχο να αποτυπωθούν αρχαιολογικές κατασκευές (όπως τοιχία και κενοί χώροι). Είναι γνωστό ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών της ηλεκτρικής αντίστασης και της λιθολογίας, με αποτέλεσμα να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την αναγνώριση θαμμένων αρχαιολογικών ευρημάτων. Από την άλλη μεριά, οι μεταβολές της σεισμικής ταχύτητας δίνουν πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ευρημάτων. Οι δύο γεωφυσικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται με συνδυαστικό τρόπο που συμβάλλει καλύτερα στην ερμηνεία και στην αξιολόγηση τα σημασίας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της κάθε ξεχωριστής μεθόδου.



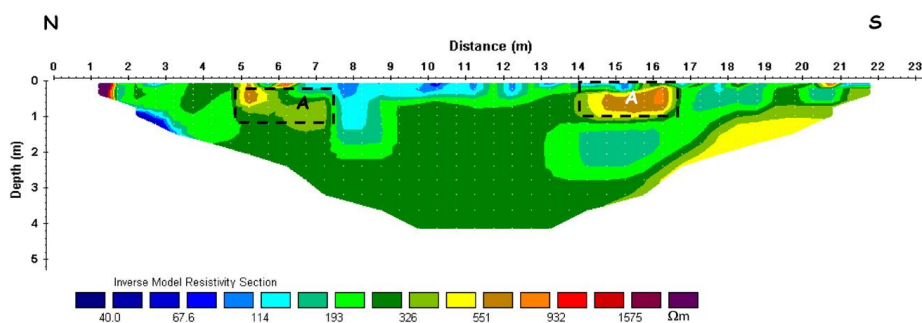
Εικόνα 3.10: Η περιοχή μελέτης

Τα ηλεκτρικά και σεισμικά δεδομένα παρουσιάζονται σε τρεις διαστάσεις, χρησιμοποιώντας τις επιφάνειες ίσων αντιστάσεων και ίσων ταχυτήτων, αντίστοιχα. Αυτό μας παρέχει τη δυνατότητα να καθορίσουμε αποτελεσματικά την τοποθεσία των ανωμαλιών που παρουσιάζονται στις ξεχωριστές τομές των δύο μεθόδων.

Τα δεδομένα των γεωφυσικών μετρήσεων συσχετίστηκαν και ερμηνεύτηκαν με τα διαθέσιμα ιστορικά και αρχαιολογικά δεδομένα.

Γεωηλεκτρική τομογραφία

Οι μετρήσεις ERT έγιναν κατά μήκος 14 παράλληλων προφίλ με διεύθυνση κατά προσέγγιση B-N (Εικόνα 3.11). Συνήθως, για αυτό τον τύπο δεδομένων, αρχικά γίνεται μια σειρά 2D αντιστροφών. Η 3D αντιστροφή στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε σετ συνδυασμένων δεδομένων με τα δεδομένα από όλες τις τομές της μεθόδου.

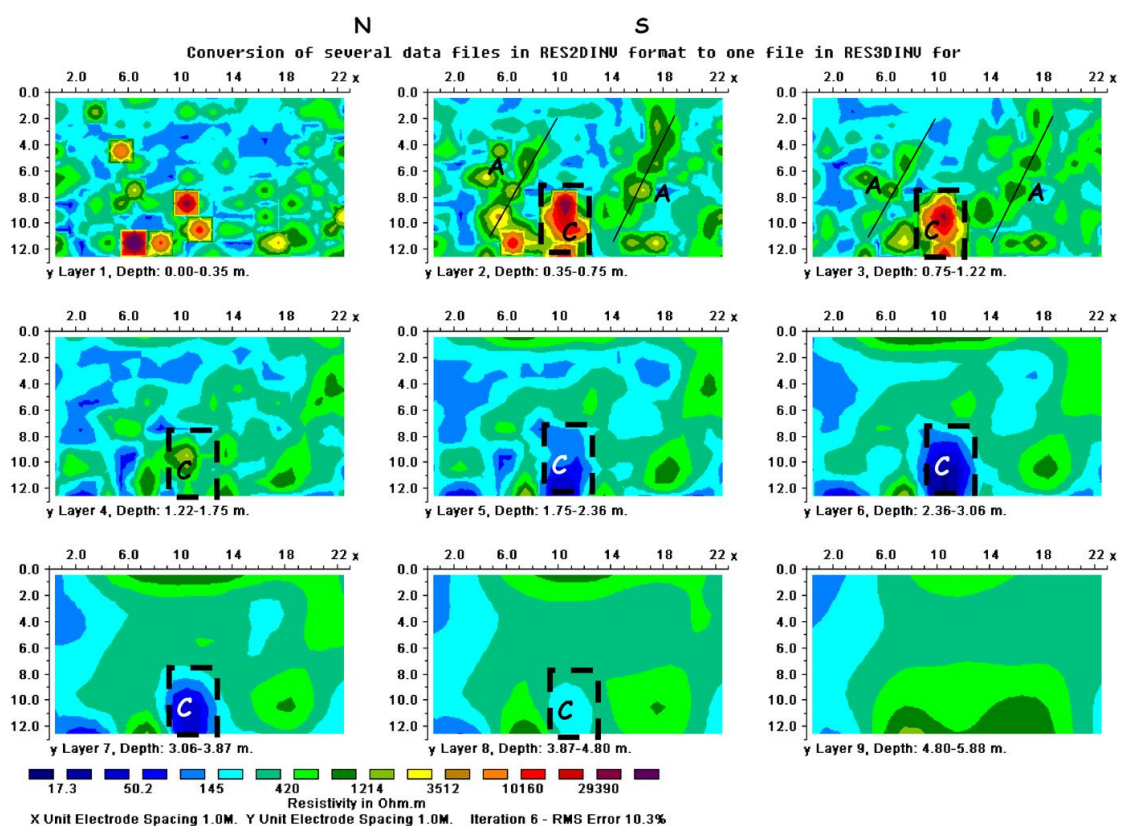


Εικόνα 3.11: 2D-Μοντέλο ειδικών αντιστάσεων.

Η απόσταση μεταξύ των προφίλ ήταν 1m και συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια σε απόσταση 1m. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος dipole-dipole, η οποία επιλέχθηκε γιατί, όπως είναι γνωστό, είναι πολύ ευαίσθητη σε οριζόντιες μεταβολές της αντίστασης, και κατά συνέπεια, είναι κατάλληλη για την απεικόνιση κάθετων δομών.

Η επιλογή robust στην αντιστροφή χρησιμοποιήθηκε για να αποκτηθεί μια εικόνα της κατανομής της πραγματικής αντίστασης, σε συνάρτηση του βάθους. Με την επιλογή robust, ελαχιστοποιούνται οι απόλυτες μεταβολές στις τιμές της αντίστασης του μοντέλου. Για τη δημιουργία των 2D μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2din.

Η **Εικόνα 3.12** αντιπροσωπεύει την αντιστροφή του μοντέλου της τομής E08. Όπως είναι εμφανές, η επιλογή robust δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι ανωμαλίες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, που έχουν σημειωθεί με A, μπορούν να συσχετιστούν με ερείπια αρχαίων τοιχείων.

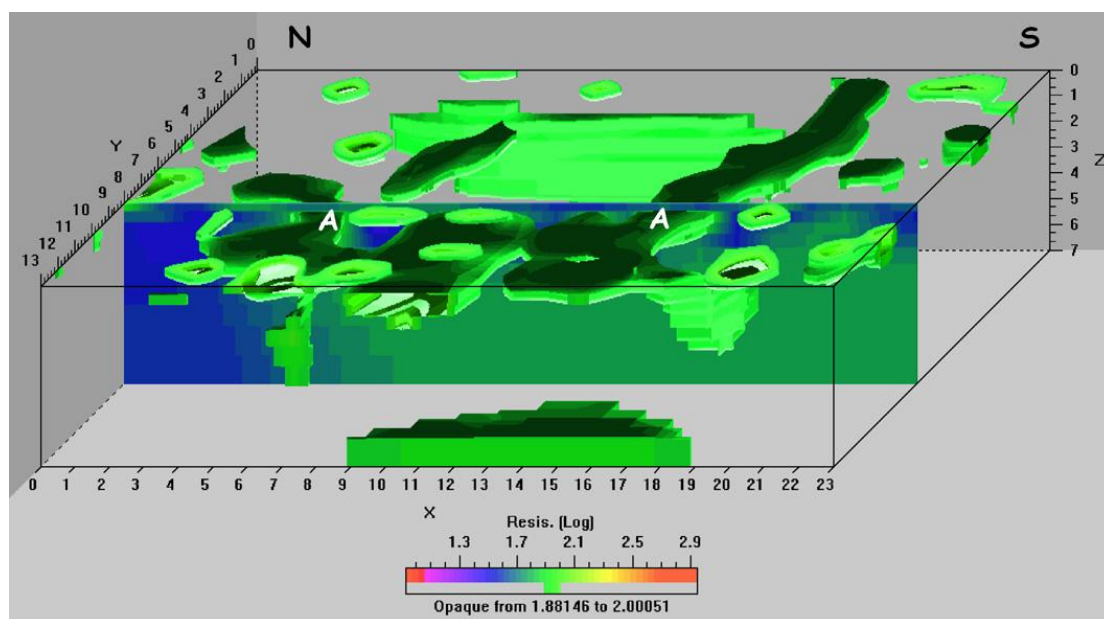


Εικόνα 3.12: 3D-Μοντέλο ειδικών αντιστάσεων. Οι ανωμαλίες υψηλών αντιστάσεων (A) πιθανά υποδεικνύουν στοιχεία αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Αφού όλες οι τομές των μετρήσεων ήταν παράλληλα σε απόσταση 1m η μία από την άλλη, ήταν ξεκάθαρο ότι μπορούν να συνδυαστούν όλες οι εικόνες 2D ώστε να δημιουργηθούν στρώματα ηλεκτρικής αντίστασης για διάφορα βάθη. Για την αυτόματη αντιστροφή των δεδομένων φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης και την απόδοσή τους σε ένα 3D μοντέλο αντιστάσεων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res3din. Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή “smoothness-constrained robust”. Οι ψευδο-3D εικόνες φαίνονται στην **Εικόνα 3.13**. Το στρώμα 1 στην **Εικόνα 3.13** αφορά μια μεγαλύτερη

περιοχή με υψηλές μεταβολές στην αντίσταση, που συμβαίνουν σε μικρές αποστάσεις. Αντίθετα, το στρώμα 2, που εκτείνεται σε βάθος 0,35 – 0,75m, απεικονίζει πιο ομαλές πλευρικές μεταβολές στις τιμές της αντίστασης. Εξαιτίας του σχήματος και της έντονης μεταβολής, η ανωμαλία A, η οποία είναι εμφανής και στο στρώμα 3, μπορεί να σχετίζεται με ανθρωπογενή δραστηριότητα (τοιχία).

Μια ενδιαφέρουσα ανώμαλη ζώνη, σημειωμένη με C, είναι παρούσα στα στρώματα από 2 έως 8. Αυτή η ανώμαλη ζώνη παρουσιάζει υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης στα στρώματα 2, 3, και 4, ενώ στα στρώματα 5,6 και 7 παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές. Εξαιτίας του σχήματος, των διαστάσεων και των τιμών της αντίστασης, η ανωμαλία c θα μπορούσε να αφορά κάποιο πηγάδι, το οποίο είναι κενό τα πρώτα 2m και γεμάτο με νερό στα βάθη κάτω από τα 2m.



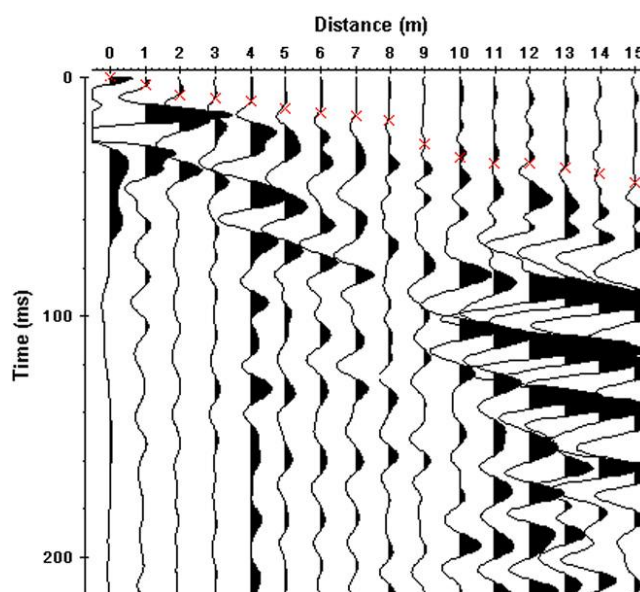
Εικόνα 3.13: 3D-Μοντέλο ειδικών αντιστάσεων. Οι ανωμαλίες υψηλών αντιστάσεων (A) πιθανά υποδεικνύουν στοιχεία αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Οι 3D εικόνες της ηλεκτρικής αντίστασης, μπορούν εύκολα να αποτυπωθούν με τρισδιάστατο σχεδιασμό των επιφανειών ίσων αντιστάσεων (**Εικόνα 3.14**). Η ανωμαλία A είναι εδώ πιο εμφανής. Αυτό το είδος αποτύπωσης, δίνει τη δυνατότητα πιο έντονης εμφάνισης των ανωμαλιών που παρατηρήθηκαν στις **Εικόνες 3.12** και **3.13**. Αυτές, εξαιτίας της έντονης μεταβολής, του σχήματος και των διαστάσεών τους, μπορούν να συνδεθούν με θαμμένα ανθρωπογενή ερείπια.

Σεισμική Διάθλαση

Τα σεισμικά δεδομένα συγκεντρώθηκαν σε μια ορθογωνική περιοχή, διαστάσεων 15x12m, κατά μήκος τομών που απείχαν 2m η μία από την άλλη, με διεύθυνση (κατά προσέγγιση) B-N, χρησιμοποιώντας 16 γεώφωνα. Σαν πηγή ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε βαριοπούλα που χτυπούσε πάνω σε ένα μεταλλικό πλακίδιο. Για την ερμηνεία των δεδομένων διάθλασης, επιλέχθηκαν πέντε χτυπήματα πάνω στη σεισμική γραμμή: ένα στη μέση, δύο στα άκρα της γραμμής και δύο στα γεώφωνα 4 και 12, αντίστοιχα. Για την

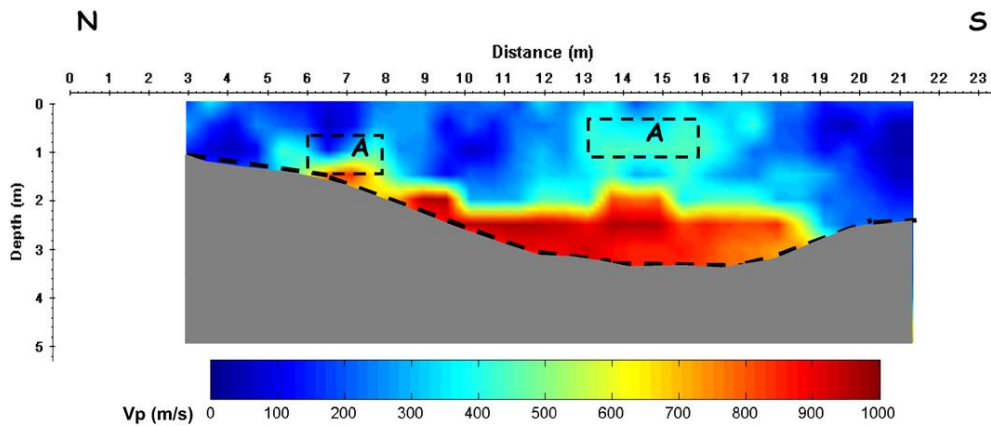
επεξεργασία και την ερμηνεία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Reflexw 3.0 της Sandmeier.



Εικόνα 3.14: Πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων

Το πρώτο βήμα της επεξεργασίας των δεδομένων σεισμικής διάθλασης περιλαμβάνει τη μέτρηση των χρόνων πρώτης άφιξης των σεισμικών κυμάτων, σε σχέση με τις αποστάσεις πομπού – δέκτη, κατά μήκος της σεισμικής γραμμής. Η επιλογή των πρώτων αφίξεων έγινε χειροκίνητα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (**Εικόνα 3.15**). Για τον καθορισμό της διδιάστατης διασποράς της ταχύτητας, οι χρόνοι άφιξης για κάθε πηγή και για κάθε γεώφωνο πρέπει να συνδυάζονται. Συνεπώς, υπολογίζεται ένα αρχικό μοντέλο ταχυτήτων. Σ' αυτήν την περίπτωση, το αρχικό μοντέλο υπολογίζεται από τα αποτελέσματα της απλής ερμηνείας των δεδομένων διάθλασης.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής των σεισμικών δεδομένων παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.16**. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε από την τομογραφία σεισμικής διάθλασης, παρουσιάζει τη μεταβολή της ταχύτητας V_p στο υπέδαφος.

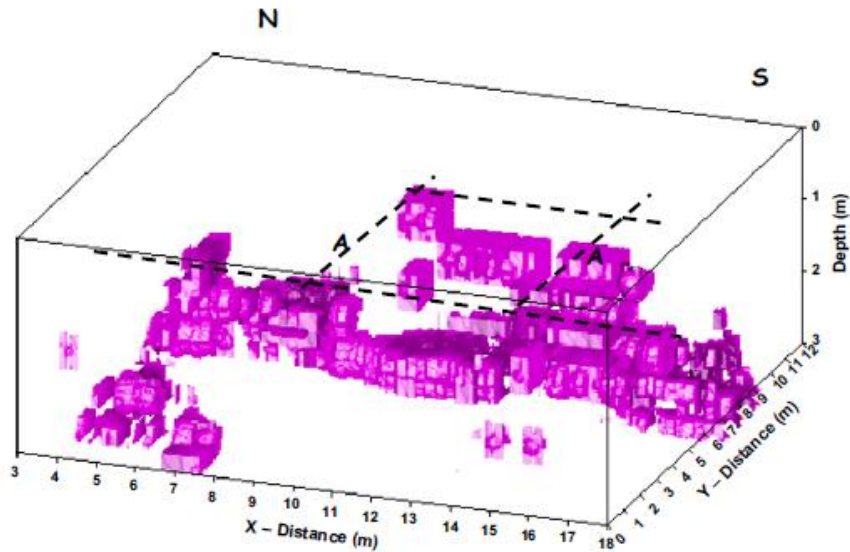


Εικόνα 3.15: Μοντέλο σεισμικών ταχυτήτων

Τα αποτελέσματα της μεθόδου δείχνουν ότι το υπέδαφος για μικρά βάθη, μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές ζώνες.

- Η πρώτη (μεταξύ 0 και 2m βάθος), όπου εντοπίστηκαν οι χαμηλότερες σεισμικές ταχύτητες V_p (μεταξύ 200 και 400m/s), αντιστοιχεί σε μία περιοχή όπου τα προφίλ ERT δείχνουν χαμηλές τιμές αντίστασης. Αυτές οι τιμές ταχυτήτων τυπικά αντιστοιχούν σε διαβρωμένες φάσεις του υποβάθρου.
- Η δεύτερη (βάθος πάνω από 2.5m), που χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες σεισμικές ταχύτητες V_p (μεταξύ 700 και 900m/s), αντιστοιχεί στην περιοχή όπου τα προφίλ ERT δείχνουν τις υψηλότερες τιμές αντίστασης.

Η αύξηση της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων μπορεί να οφείλεται σε περισσότερο συνεκτικό υλικό. Η **Εικόνα 3.16** δείχνει δύο σχετικά υψηλών σεισμικών ταχυτήτων (500-600m/s) ανωμαλίες, σημειωμένες με A (μεταξύ 0 και 2m βάθος) μέσα στο υλικό χαμηλότερων σεισμικών ταχυτήτων. Αυτές οι ανωμαλίες ενδεχομένως αντιστοιχούν σε συντρίμια τοιχίων.



Εικόνα 3.16: 3D απεικόνιση επιφανειών ίσων σεισμικών ταχυτήτων.

Αφού όλες οι τομές των μετρήσεων ήταν παράλληλα σε απόσταση 2m η μία από την άλλη, ήταν ξεκάθαρο ότι μπορούν να συνδυαστούν όλες οι εικόνες 2D ώστε να δημιουργηθούν στρώματα σεισμικών ταχυτήτων για διάφορα βάθη. Οι 3D εικόνες της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων, μπορούν εύκολα να αποτυπωθούν με τρισδιάστατο σχεδιασμό των επιφανειών ίσων σεισμικών ταχυτήτων. Η ανωμαλία A είναι εδώ πιο εμφανής. Αυτό το είδος αποτύπωσης, δίνει τη δυνατότητα πιο έντονης εμφάνισης των ανωμαλιών. Αυτές, εξαιτίας της έντονης μεταβολής, του σχήματος και των διαστάσεών τους, μπορούν να συνδεθούν με θαμμένα ανθρωπογενή ερείπια.

Συμπεράσματα

Οι ηλεκτρικές έρευνες αποτύπωσαν αρκετά αποτελεσματικά το υπέδαφος στην περιοχή μελέτης, αφού οι επιφάνειες ίσης αντίστασης, δίνουν τη δυνατότητα χωρικού εντοπισμού ανωμαλιών που συνδέονται με θαμμένα αρχαιολογικά ερείπια. Καθώς και τη δυνατότητα ευκολότερης σύνδεσης με άλλες μεθοδολογίες. Η μέθοδος σεισμικής διάθλασης συσχετίζεται καλά με τη γεωηλεκτρική τομογραφία. Στην **Εικόνα 3.12** παρουσιάζονται δύο ανωμαλίες υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης, σημειωμένες με A, μέσα σε υλικό χαμηλότερων αντιστάσεων. Αντίστοιχα, στην **Εικόνα 3.16** παρουσιάζονται δύο σχετικά υψηλότερης σεισμικής ταχύτητας ανωμαλίες, σημειωμένες με A, μέσα σε υλικό χαμηλότερων σεισμικών ταχυτήτων.

Η συνδυασμένη ερμηνεία της σεισμικής διάθλασης και της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, δίνει τη δυνατότητα περιορισμού οποιασδήποτε ασάφειας. Πράγματι, σχετικά υψηλών αντιστάσεων και υψηλών σεισμικών ταχυτήτων ανωμαλίες, μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη πιο συνεκτικού υλικού. Οι σχετικά χαμηλότερες τιμές της V_p μπορεί να οφείλονται στην κακή κατάσταση όσον αφορά στη συντήρηση των τοιχιών (π.χ. ύπαρξη ρωγματώσεων με αέρα). Αυτό επιβεβαιώνεται από τις υψηλές τιμές αντίστασης που

εντοπίστηκαν στις ίδιου τύπου ανωμαλίες. Επομένως, οι προαναφερθείσες ανωμαλίες μπορεί να συνδέονται με θαμμένα ανθρωπογενή ερείπια (τοιχία).

Με την εφαρμογή των δεδομένων στην ίδια κλίμακα, τα αποτελέσματα παράγουν λογικές συσχετίσεις και ερμηνείες. Ο συνδυασμός των ταχυτήτων των Ρ-κυμάτων και των δεδομένων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στο υπέδαφος, περιορίζει τις ασάφειες στην ερμηνεία και δίνει τη δυνατότητα χωρικού προσδιορισμού των πιθανών αρχαιολογικών ευρημάτων στα πρώτα μέτρα του υπεδάφους.

Η προτεινόμενη μέθοδος της 3D αποτύπωσης επιβεβαιώνει την ερμηνεία των 2D οριζόντιων τομών και δίνει τη δυνατότητα καλύτερης αναγνώρισης των αρχαιολογικών στοιχείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής

4.1. Γενικά

Σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν να εξεταστεί που είναι κτισμένη η Μονή, αν δηλαδή βρίσκεται πάνω σε συνεκτικό υλικό ή στο βραχώδες υπόβαθρο, και να γίνει αποτύπωση της στρωματογραφίας.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε τις εξής μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης:

- Κλασική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (EMI)
- Ηλεκτρική Μέθοδος, με την τεχνική της τομογραφίας (ERT)
- Γεωραντάρ (GPR)
- Σεισμική μέθοδος

4.2. Η Μονή Καισαριανής ως ιστορικό μνημείο

Η Μονή Καισαριανής βρίσκεται στην Αττική, στην περιοχή του Υμηττού, στην πεδιάδα σχεδόν στο μέσο του μήκους της δυτικής πλαγιάς. Παλιά, το τοπίο ήταν δεντρόφυτο γεμάτο ελιές, ενώ κοντά στη Μονή ανάβλυζε πηγή με άφθονο και παγωμένο νερό. Η πηγή αυτή είναι μάλλον η από τους αρχαίους Έλληνες και Ρωμαίους ποιητές αποκαλούμενη «Καλλία».



Εικόνα 4. 1: Ο Ναός αφιερωμένος στα Εισόδια της Θεοτόκου

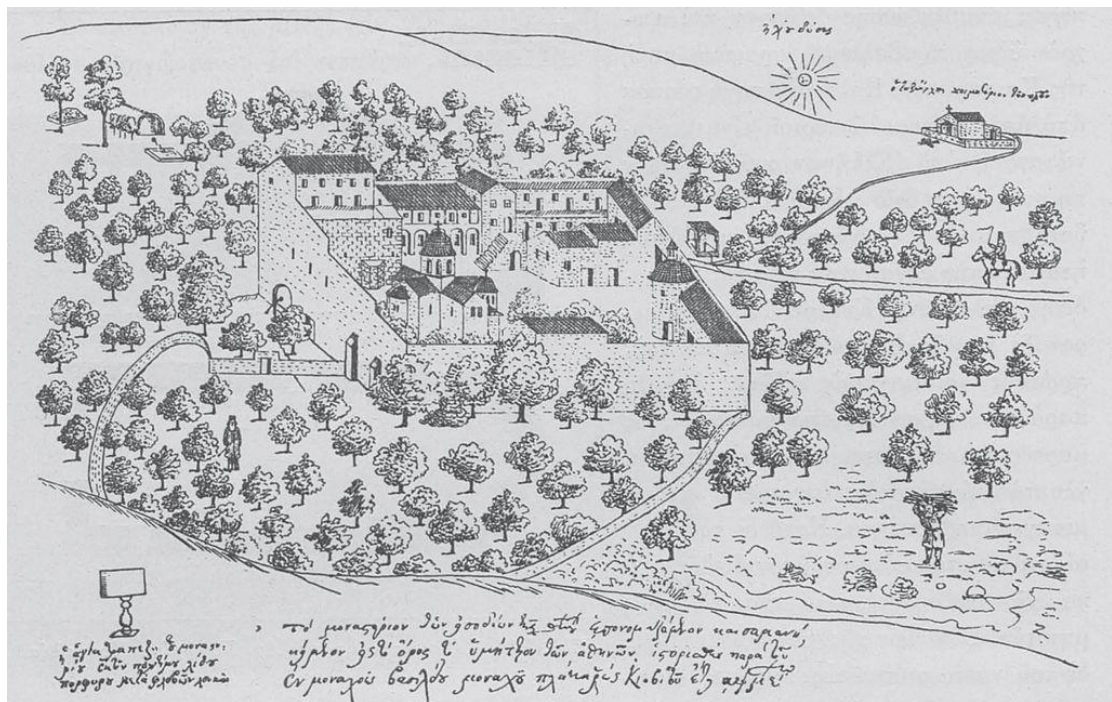
Λίγο πιο πάνω από το σημείο αυτό, η τοποθεσία στην αρχαιότητα ήταν αφιερωμένη στην Αφροδίτη και ονομαζόταν «Κυλλού Πήρα», σήμερα κοινώς «Καλλοπούλα». Στους πρώτους χριστιανικούς αιώνες ιδρύθηκε χριστιανικός ναός κοντά στην πηγή, του οποίου τα δομικά υλικά αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν στα μεταγενέστερα γύρω κτίρια. Ο σημερινός ναός χτίστηκε τον 11^ο αιώνα και είναι αφιερωμένος στα Εισόδια της Θεοτόκου. Γύρω από το ναό αυτό, αναπτύχθηκε η περιοχή, η οποία σήμερα ονομάζεται Καισαριανή.

Για πρώτη φορά η Καισαριανή αναφέρεται σε επιστολή του μητροπολίτη Αθηνών Μιχαήλ Ακομινάτου στις αρχές του 13^{ου} αιώνα. Αναφορικά με την προέλευση της ονομασίας του μοναστηριού υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές. Σύμφωνα με μία εκδοχή, η αυτοκράτειρα Ειρήνη, η οποία φέρεται ως γεννηθείσα στην Αθήνα, αφού δηλητηρίασε το σύζυγό της, Λέοντα Δ', ακρωτηρίασε και δολοφόνησε με φρικτούς τρόπους στρατιωτικούς και τους έξι γιούς του Κωνσταντίνου Ε' και τύφλωσε το μονογενή γιό της και συμβασιλέα Κωνσταντίνο ΣΤ'. Δύο αδέρφια από διαφορετική μητέρα του Κωνσταντίνου, τα εξόρισε σε ένα μοναστήρι του Υμηττού. Κι επειδή οι κρατούμενοι είχαν τον τίτλο του Καίσαρα, από τότε το μοναστήρι πήρε το όνομα Καισαριανή. Με βάση άλλους, το μοναστήρι πήρε την ονομασία του από την εικόνα της Θεοτόκου που μεταφέρθηκε από την Καισάρεια ή από κάποιον Καίσαρα, που ανακαίνισε την εκκλησία κατά τη βυζαντινή περίοδο ή από τη Συριανή, κόρη του βασιλιά της Ελευσίνας Κελεού, καθώς λέγεται ότι στην περιοχή υπήρχε ναός που τελούνταν μυστήρια, όπως τα Ελευσίνια, τα οποία ονομάζονταν Σαισάρια. Υπάρχει, τέλος, και η εκδοχή της παραφοράς του ονόματος. Σύμφωνα με αυτή, ο λαός που έκανε τον περίπατό του εκεί (σεργιανούσε), ονόμασε και την περιοχή σεργιάνι (περίπατος) και η ονομασία αυτή μεταβλήθηκε σε Σεργιανή, Συριανή και Καισαριανή.

Η Μονή Καισαριανής στις πηγές αναφέρεται ακόμα ως Κυριανή ή Σάνκτα Συργιανή. Το πρώτο χριστιανικό κέντρο είχε ιδρυθεί νοτιότερα, στο λόφο του «Κοιμητηρίου των Πατέρων» όπου σώζονται τα ερείπια παλαιοχριστιανικής βασιλικής και ναού μεταβατικού τύπου 10^{ου} αιώνα. Την περίοδο της φραγκοκρατίας χτίστηκε εκεί ο ναός του Αγίου Μάρκου ή Φραγκομονάστηρο και το 17^ο αιώνα ο ναός των Ταξιαρχών.

Η Μονή Καισαριανής υπήρξε για πολλά χρόνια, οικονομικά εύρωστη και διέθετε αξιόλογη βιβλιοθήκη. Αποτέλεσε σημαντικό κέντρο φιλοσοφίας, όπου δίδαξαν σημαίνοντες φιλόσοφοι και λόγιοι της εποχής (Γεώργιος Πλήθων Γεμιστός κ.ά.). Το 1833 σταμάτησε τη λειτουργία της με διάταγμα της Αντιβασιλείας του Όθωνα, όπως και σχεδόν όλα τα μοναστήρια του Υμηττού.

Το μοναστηριακό συγκρότημα περιβάλλεται από υψηλό περίβολο, με δύο πύλες, ανατολικά και δυτικά. Έξω από την ανατολική πύλη υπάρχει η πηγή του Κριού ή Κοτς Μπασί, ονομασία που οφείλεται στην αρχαϊκή υδρορροή, που αποδίδει κεφάλι κριού. Από τη βυζαντινή περίοδο διατηρούνται το καθολικό, δηλαδή ο κυρίως ναός, και ο λουτρόνας που ανάγονται στα τέλη του 11^{ου} - αρχές 12^{ου} αιώνα.



Εικόνα 4.2: Χειροποίητο σχέδιο της Μονής Καισαριανής το 1745

Το καθολικό, αφιερωμένο στα Εισόδια της Θεοτόκου, ανήκει στον αρχιτεκτονικό τύπο του σταυροειδούς, εγγεγραμμένου ναού και φέρει τοιχογραφίες του 18^{ου} αιώνα. Οι τοιχογραφίες στο εσωτερικό του ναού έχουν ως πρότυπο την κρητική ζωγραφική και τη ζωγραφική του Αγίου Όρους. Η τοιχοποιία έχει κατασκευασθεί κατά το πλινθοπερίκλειστο σύστημα, ο τρούλος είναι οκτάπλευρος, με ευθύγραμμο οδοντωτό γείσο, ενώ το παράθυρο του Ιερού Βήματος κοσμείται με περίτεχνο πλίνθινο τύμπανο. Η βόρεια πλευρά διαμορφώνεται με πλαστικότητα, καθώς προβάλλονται εξωτερικά οι τοίχοι της βόρειας κεραίας και φέρουν τόξο από καλά λαξευμένο πωρόλιθο.

Ο νάρθηκας στεγάζεται με χαμηλό τρούλο στο κέντρο και καμάρες εκατέρωθεν. Προστέθηκε δυτικά του ναού το 17^ο αι., καθώς και το μονόχωρο θολοσκεπές παρεκκλήσι του Αγίου Αντωνίου στα νότια. Η αρχική αγιογράφηση έχει χαθεί. Η παλαιότερη σωζόμενη τοιχογραφία, μορφή Θεοτόκου Δεομένης 14ου αιώνα, βρίσκεται στο νότιο τοίχο του καθολικού, εξωτερικά, και περιλαμβάνεται σήμερα στο παρεκκλήσιο του Αγίου Αντωνίου. Ακολουθείται το καθιερωμένο κατά τους βυζαντινούς χρόνους εικονογραφικό πρόγραμμα. Ο νάρθηκας, σύμφωνα με την επιγραφή πάνω από τη θύρα εισόδου, αγιογραφήθηκε το 1682 από τον Πελοποννήσιο Ιωάννη Ύπατο, με δαπάνη του ευγενούς και λογιωτάτου Μπενιζέλου, γιου του Ιωάννη. Ο Ιωάννης Ύπατος είναι λαϊκός ζωγράφος και χαρακτηρίζεται από έντονη αφηγηματικότητα αλλά και κλασική αντίληψη της οργάνωσης των σκηνών στο χώρο. Στην ίδια περίοδο εντάσσεται η αγιογράφηση του παρεκκλησίου του Αγίου Αντωνίου.



Εικόνα 4.3: Το εσωτερικό του ναού

Δυτικά του καθολικού βρίσκεται το συγκρότημα της τράπεζας, μεταβυζαντινών χρόνων, που έχει ανεγερθεί στα ερείπια της βυζαντινής. Πρόκειται για ένα αυτοτελές επίμηκες κτίριο, που χωρίζεται σε τρεις επιμέρους χώρους. Η τράπεζα, χώρος εστίασης των μοναχών, είναι ορθογώνιας κάτοψης, θολοσκεπής, με τυφλά αψιδώματα στους μακρούς τοίχους. Στη βόρεια στενή πλευρά της διαμορφώνεται μικρή κόγχη, όπου και η θέση του ηγουμένου. Ακολουθεί ο προθάλαμος, που χρησίμευε και ως οσοφυλάκιο για την αποθήκευση τροφίμων, και η εστία, το μαγειρείο, που καλύπτεται με σφαιρικό θόλο, από το κέντρο του οποίου υψώνεται η καπνοδόχος..

Ο λουτρόνας της μονής, σύγχρονος με το καθολικό, αποτελεί ένα από τα ελάχιστα δείγματα μοναστηριακών λουτρώνων που σώζονται στον ελλαδικό χώρο. Στεγάζεται στο κέντρο με χαμηλό οκταγωνικό τρούλο και η τοιχοποιία του, κατά το πλινθοπερίκλειστο σύστημα, είναι όμοια με του καθολικού. Η κατασκευή του ακολουθεί τον αρχιτεκτονικό τύπο των λουτρών, που τελειοποιήθηκε τη ρωμαϊκή εποχή και συνεχίστηκε αργότερα και στους οθωμανικούς χρόνους. Το κτίριο έχει τριμερή διάταξη. Δυτικά βρίσκεται το διαμέρισμα για το ψυχρό λουτρό (frigidarium), στο κέντρο για το χλιαρό λουτρό (tepidarium) και ανατολικά το διαμέρισμα για το θερμό λουτρό (caldarium). Η θέρμανση του νερού και του χώρου επιτυγχανόταν με το σύστημα της υπόκαυσης. Κατά τη μεταβυζαντινή περίοδο, το περίοπτο κτίριο του λουτρόνα ενσωματώθηκε σε ένα διώροφο κτιριακό συγκρότημα, που εκτεινόταν μέχρι τον οχυρωματικό περίβολο. Στο νοτιοανατολικό τμήμα του υψωνόταν όροφος με κελιά, όπως δηλώνεται στο σχέδιο του Ρώσου μοναχού Β. Barskij (1745) και επιβεβαιώθηκε από την ανασκαφική έρευνα. Το

κτίριο του λουτρώνα κατασχώθηκε και στη θέση του εγκαταστάθηκε ελαιοτριβείο. Κατά τις εργασίες αποκατάστασης, τη δεκαετία του 1950, αποκαλύφθηκε το μεγαλύτερο τμήμα του κτιρίου του λουτρώνα.

Κατά μήκος της νότιας πλευράς του περιβόλου αναπτύσσεται η κύρια διώροφη πτέρυγα των κελιών, μεταβυζαντινών χρόνων, στην οποία παρεμβάλλεται τριώροφος πύργος, γνωστός ως «των Μπενιζέλων». Τα κελιά είναι μικρά καμαροσκεπή δωμάτια, με θύρα, παράθυρο και μικρή κόγχη-εικονοστάσιο. Από ανασκαφική έρευνα διαπιστώθηκε ότι θεμελιώνεται στα ερείπια βυζαντινών κελιών. Από τη διώροφη ερειπωμένη δυτική πτέρυγα, στο ισόγειο φιλοξενείται το φυλάκιο και το εκδοτήριο εισιτηρίων του αρχαιολογικού χώρου.

4.3. Γεωλογία της Περιοχής

4.3.1. Γεωλογικά στοιχεία της περιοχής του Υμηττού

Η στρωματογραφική διάρθρωση της περιοχής, στην οποία έλαβαν χώρα οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, παρουσιάζοντας τους σχηματισμούς από τους νεότερους προς τους παλαιότερους, έχει ως εξής:

➤ Τεταρτογενές σύστημα

- Ολόκαινο: σχηματισμοί στο πεδινό, εφαιπτόμενο τμήμα του Υμηττού, οι οποίοι έχουν πάχος λίγα μέτρα και αποτελούνται από ερυθρές αργίλους, κροκάλες και άμμο.
- Πλειστόκαινο: διακρίνεται στον ανώτερο και τον κατώτερο ορίζοντα. Ο πρώτος αποτελείται από ερυθρές αργίλους και λατύπες, μικρού μεγέθους και βαθμού συνεκτικότητας. Όσον αφορά στον κατώτερο ορίζοντα, αυτός παρουσιάζει ασυμφωνία στο υπόβαθρό του, το οποίο, σε ορισμένες θέσεις ανήκει στο Μεταμορφωμένο σύστημα, ενώ σε άλλες στο Νεογενές. Πρόκειται ουσιαστικά, για ένα λατυποκροκαλοπαγές, ιδιαίτερα συνεκτικό, το οποίο αποτελείται από μεγάλες λατύπες και κροκάλες του Κατώτερου Μαρμάρου και του Δολομίτη. Λόγω του μεγέθους και του βαθμού αποστρογγύλωσής τους, πιστεύεται ότι αυτές αποτελούν αποθέσεις χειμάρρων. Το πάχος του ορίζοντα αυτού συνήθως κυμαίνεται από 10 έως 15m, παρόλο σε ορισμένα σημεία, δύναται να ξεπερνάει τα 25m.

➤ Τριτογενές σύστημα

Αποτελείται μόνο από νεογενείς αποθέσεις. Διακρίνονται σε:

- Θαλάσσιους και παράκτιους σχηματισμούς του Ανώτερου Πλειόκαινου (ψαμμούχες μάργες, ψαμμίτες, κροκαλολατυποπαγή και άστρωτοι κλαστικοί τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι).
- Λιμναίους σχηματισμούς του κατώτερου Πλειόκαινου – ανώτερου Μειόκαινου (ψαμμίτες, μάργες, πηλίτες και κροκαλοπαγή).

➤ Επωθημένο κάλυμμα (Αλλόχθονη Ενότητα)

Πρόκειται για ένα σύστημα τεκτονικού καλύμματος εξ επωθήσεως, επάνω στο Αυτόχθονο σύστημα. Περιλαμβάνει στρώματα του Ιουρασικού και Κρητιδικού, με τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο να υπέρκειται στον Κατώτερο Ασβεστόλιθο. Στο Επωθημένο κάλυμμα διακρίνονται οι εξής λιθολογικές ενότητες:

➤ Στρώματα Αλεποβουνίου:

Ανθρακικά πετρώματα, ηλικίας Τουρωνίου έως Σενωνίου. Το συνολικό πάχος των στρωμάτων αυτών είναι περίπου 100m. Τα ανώτερα στρώματα, πάχους περίπου 85m, αποτελούνται από ποικιλόχρωμους κρυπτοκρυσταλλικούς, κοκκώδεις έως χονδροκοκκώδεις ασβεστόλιθους. Συνήθως, είναι μεσοστρωματώδεις, παχυστρωματώδεις έως και άστρωτοι. Παρουσιάζουν έντονη τεκτονική καταπόνηση (συνήθως διαρρηξίσεις) και καρστικοποίηση. Τα κατώτερα

μέλη, πάχους περίπου 15M, αποτελούνται από λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και λεπτομερείς έως μικρολατυποπαγείς σκληρές και σχιστοποιημένες ασβεστόμαργες.

➤ Φυλλιτικό σύστημα

Αποτελείται κυρίως από φυλλίτες έως μοσχοβιτικούς σχιστόλιθους, με παρεμβολές πλακωδών κρυσταλλικών ασβεστολιθων, καθώς και αγγεριτωμένους έως ερυθρούς χαλαζίτες. Χαρακτηρίζεται δε από τη συχνή συνύπαρξη μαζών πρασινιτών και πράσινου τάλκη. Το πάχος του Φυλλιτικού συστήματος πιστεύεται ότι ξεπερνά τα 100m.

➤ Μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής (Αυτόχθονη Ενότητα)

Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύστημα, το οποίο αποτελείται από επάλληλα και σε συμφωνίας στρώματα μαρμάρων και σχιστολίθων. Κατά περιοχές, επικρατεί το ένα ή το άλλο μέρος του συστήματος, ενώ η μετάβαση είναι συνήθως βαθμιαία. Έτσι, συναντώνται παχύτερα ή λεπτότερα στρώματα από σχιστόλιθος ή σιπολίνες μέσα στα μάρμαρα, καθώς και στρώματα μαρμάρων μέσα στους σχιστόλιθους. Οι δολομίτες που συνυπάρχουν δεν χαρακτηρίζουν κάποιο συγκεκριμένο ορίζοντα εφόσον, όπως και τα δολομιτικά μάρμαρα, βρίσκονται σε όλες τις βαθμίδες των μαρμάρων και των σχιστόλιθων. Η αδυναμία αυτή, της σαφούς διάκρισης των μαρμάρων και των σχιστόλιθων σε αυτοτελή στρωματογραφικά συστήματα, έχει επισημανθεί από πολλούς ερευνητές, οι οποίοι αναφέρουν ότι δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ Ανώτερου και Κατώτερου Μαρμάρου, αλλά πρόκειται για τον ίδιο σχηματισμό στον οποίο παρεμβάλλονται κατά θέσεις, σχιστολιθικοί ορίζοντες, με διαφορετικά πάχη. Στο Μεταμορφωμένο σύστημα της Αττικής διακρίνονται, από πάνω προς τα κάτω, οι εξής λιθολογικές ενότητες:

• Ανώτερο Μάρμαρο

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι το τεφρόλευκο, κυανό έως τεφρό χρώμα του, η λεπτοπλακώδης δομή του και η καρστικοποίησή του. Δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανεξάρτητος σχηματισμός, υπερκείμενος του σχιστόλιθου, αφού σε ορισμένα σημεία του, περικλείει λεπτά στρώματα σχιστόλιθου, ενώ σε άλλα μικρά τμήματά του εισχωρούν στον υποκείμενο σχιστόλιθο. Ωστόσο, σε ορισμένες θέσεις δίνει την εντύπωση αυτοτελούς σχηματισμού λόγω του μεγάλου πάχους του (περίπου 250m). Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να υπέρκειται απευθείας του Κατώτερου Μαρμάρου ενώ σε άλλες, έχει παρατηρηθεί μια πλευρική μετάβαση από τους ασβεστόλιθους, οι οποίοι περιλαμβάνονται, τόσο από το Lepsius, όσο και από νεότερους ερευνητές, στο Ανώτερο Μάρμαρο.

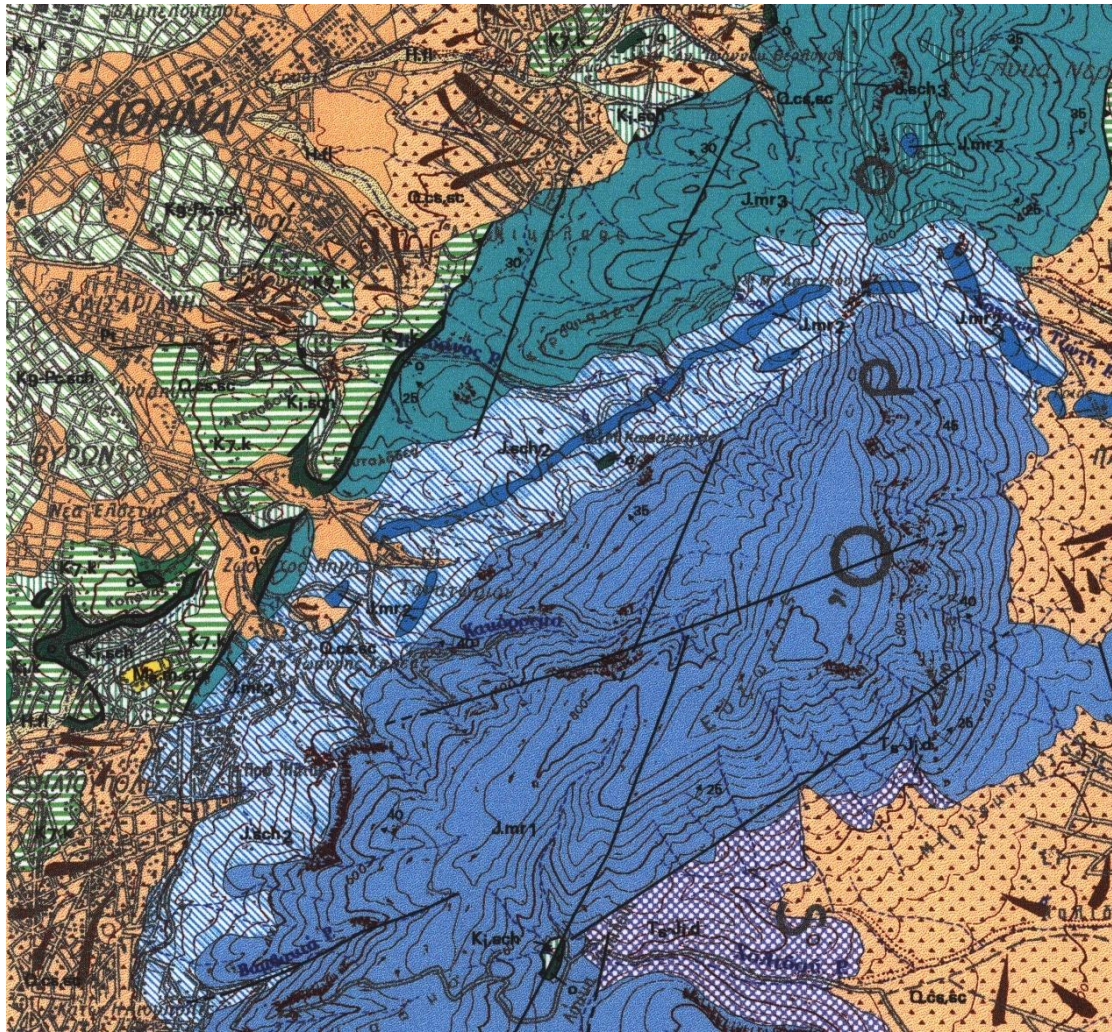
• Σχιστόλιθος Καισαριανής

Παρεμβάλλεται μεταξύ του Ανώτερου και του Κατώτερου Μαρμάρου. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν εξαπλώνεται σε όλη την έκταση, ώστε να διακόπτει πλήρως την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ Ανώτερου και Κατώτερου Μαρμάρου, αλλά ότι πρόκειται για στρωματογραφικές αποσφηνώσεις σχιστολιθικών τεμαχίων. Αποτελείται από τεφρούς έως μαύρους, στιλπνούς,

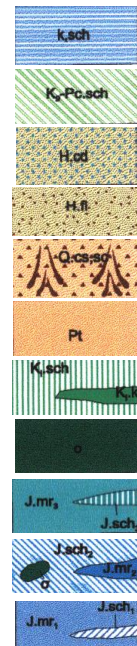
μαρμαρυγιακούς, ασβεστιτικούς, γραφιτικούς και χλωριτικούς σχιστόλιθους, ενώ μπορεί να περιέχει και σώματα σχιστοποιημένων και εξαλλοιωμένων σερπεντινιτών, καθώς και φυλλίτες, συχνά πλούσιους σε ασβεστίτη. Μέσα στο σχιστόλιθο, παρεμβάλλονται και λεπτές στρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων, καθώς και φακοί από χαλαζία ή ασβεστίτη. Όλη η σειρά είναι έντονα πτυχωμένη και παρουσιάζει πολλά θλιπτικά και διατμητικά ρήγματα. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται από 50 έως 350m. αξίζει δε να σημειωθεί ότι αρκετοί ερευνητές δέχονται την ύπαρξη ενός οριζοντα μαρμάρου, μεταβαλλόμενου πάχους, τον οποίο θεωρούν ως ανεξάρτητο στρωματογραφικό οριζοντα και τον χαρακτηρίζουν ως Ενδιάμεσο Μάρμαρο. Το Ενδιάμεσο Μάρμαρο χωρίζει το Σχιστόλιθο Καισαριανής σε δύο ορίζοντες.

- Κατώτερο Μάρμαρο

Είναι λευκό, ροδόχρουν ή κυανότεφρο. Αποτελείται κυρίως από μεσοκρυσταλλικά έως χονδροκρυσταλλικά μεσοστρωματώδη, παχυστρωματώδη έως και άστρωτα μάρμαρα, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν την προς τα άνω στρωματογραφική εξέλιξη του Δολομιτικού Μαρμάρου Πιρναρής, έστω και αν οι δύο ανθρακικές σεορές βρίσκονται, τοπικά, σε στρωματογραφική ασυμφωνία. Η παχυστρωματώδης έως άστρωτη πρωτογενής δομή, σε συνδυασμό με την τεκτονική καταπόνηση, ευνοεί την καρστικοποίηση του πετρώματος, η οποία παρουσιάζεται έντονη κατά θέσεις. Το πάχος του Κατώτερου Μαρμάρου εκτιμάται ότι φτάνει τα 500m.



- Ασβεστόλιθοι.....
- Αθηναϊκοί σχιστόλιθοι και στρώματα μετάβασης.....
- Σύγχρονοι παράκτιοι σχηματισμοί.....
- Αποθέσεις στις κοίτες των χειμάρρων.....
- Παλαιοί και νέοι κώνοι κορρημάτων και πλευρικά κορρήματα.....
- Καστανόχρωμες χερσαίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις.....
- “Σχιστόλιθοι”.....
- Οφιόλιθοι.....
- “Ανώτερο Μάρμαρο”.....
- “Σχιστόλιθοι Καισαριανής”.....
- “Κατώτερο Μάρμαρο”.....



Εικόνα 4.4: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Γεωλογικός χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε., Φύλλο Κορωπί – Πλάκα. 1997-2000)

4.3.2. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η υδρογεωλογική συμπεριφορά των επιμέρους σχηματισμών, οι οποίοι απαντώνται στην υπό εξέταση περιοχή.

➤ Τεταρτογενές σύστημα

Η περατότητα των ολοκαινικών σχηματισμών, καθώς και του ανώτερου ορίζοντα των πλειστοκαινικών σχηματισμών, είναι μεγάλη. Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου πάχους τους στις παρυφές του Υμηττού, δεν σχηματίζεται υδροφόρος ορίζοντας. Αντίθετα, στις πεδινές περιοχές, όπου ο πλειστοκαινικός ορίζοντας παρουσιάζει μεγαλύτερο πάχος, σχηματίζεται ενιαίος υδροφόρος ορίζοντας με τους υποκείμενους σχηματισμούς του κατώτερου πλειστοκαινικού ορίζοντα και των νεογενών.

➤ Τριτογενές σύστημα

Οι υδροφόροι ορίζοντες είναι περιορισμένοι σε σχέση με αυτούς των τεταρτογενών. Οι ψαμμίτες, τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι αποτελούν τα υδροφόρα στρώματα. Από αυτά, οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή συμπεριφέρονται περισσότερο ως μικροδιαπερατοί σχηματισμοί, ενώ οι ασβεστόλιθοι –λόγω καρστικοποίησης- ως μακροδιαπερατοί.

➤ Επωθημένο κάλυμμα

Αποτελείται από δύο λιθολογικά συστήματα, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά. Το ανώτερο ασβεστολιθικό (Ασβεστόλιθοι Αλεποβουνίου), το οποίο είναι υδροπερατό και κατώτερο φυλλιτικό, το οποίο είναι υδροστεγανό. Κάθε ένα από αυτά έχει πάχος περίπου 100m. Στην πράξη ωστόσο, οι ανωκρητιδικοί επωθημένοι ασβεστόλιθοι εμφανίζουν ασήμαντη υδροφορία, λόγω περιορισμένης εξάπλωσης, ενώ οι σχιστόλιθοι, φυλλίτες και τα σύνοδα πετρώματα παρουσιάζουν υδροφορία στον αποσαθρωμένο μανδύα τους, αλλά και τοπικά, σε μεγαλύτερα βάθη (τοπική υδροφορία).

➤ Μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής

• Ανώτερο Μάρμαρο

Το ανώτερο μάρμαρο, σύμφωνα με τον Σ. Λέκκα (1992), δεν αποτελεί ανεξάρτητο υδροφόρο ορίζοντα αλλά βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με το Κατώτερο Μάρμαρο. Η διαπίστωση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι, εάν ο σχιστόλιθος Καισαριανής ήταν υπόβαθρο του Ανώτερου Μαρμάρου, θα παρουσιάζονταν πηγές υπερχείλισης, εφόσον μέχρι πρότινος δεν είχαν γίνει στο σχηματισμό από υδρομαστευτικά έργα. Παρουσιάζουν υψηλή υδροπερατότητα και μεγάλο συντελεστή κατείδυσης.

• Σχιστόλιθος Καισαριανής

Ο Σχιστόλιθος της Καισαριανής εμφανίζει φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα στον αποσαθρωμένο και εξαλλοιωμένο μανδύα του. Έτσι, σε ορισμένες θέσεις εμφανίζονται πηγές επαφής μικρής παροχής. Παρότι η πετρογραφική του σύνθεση (μεταμορφωμένοι σχιστόλιθοι διαφόρων ειδών και σχιστοποιημένα σώματα σερπεντινιτών) τον καθιστά πρακτικά υδροστεγανό, τα πολλά διατμητικά και

θλιπτικά ρήγματα, καθώς και οι αποσφηνώσεις, δημιουργούν πιθανότατα συνθήκες υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ των Ανώτερων και Κατώτερων Μαρμάρων, μέσω του «πακέτου» των Σχιστόλιθων.

- Κατώτερο Μάρμαρο

Πρόκειται για μικροδιαπερατό σχηματισμό, του οποίου η υψηλή υδροπερατότητα οφείλεται στην έντονη καρστικοποίηση και τον τεκτονισμό. Χαρακτηρίζεται από μεγάλο συντελεστή κετείσδυσης. Μέσα σε αυτόν, σχηματίζεται ένας καρστικός υδροφόρος ορίζοντας, του οποίου η στάθμη στη δυτική πλευρά του Υμηττού (περιοχή ενδιαφέροντος) βρίσκεται αρκετά ψηλά και δεν παρουσιάζει άμεση υδραυλική σύνδεση με τη θάλασσα.

4.4. Γεωφυσική Έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα

4.4.1. Εισαγωγή

Η πρώτη γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ηλεκτρομαγνητική. Στόχος μας ήταν να αποτυπωθεί η στρωματογραφία, χωρικά σε δύο βάθη (3m και 6m), μέσω της κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας, αλλά και οι πιθανές τοπικές δομές που υπάρχουν κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι οποίες θα μπορούσαν να ξεχωρίσουν εξαιτίας των διαφορετικών τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Σε συνδυασμό με την inphase συνιστώσα, η οποία μας δίνει τις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας, μπορούμε να εξακριβώσουμε αν τοπικές ανωμαλίες οφείλονται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα (παρουσία μεταλλικών υλικών).

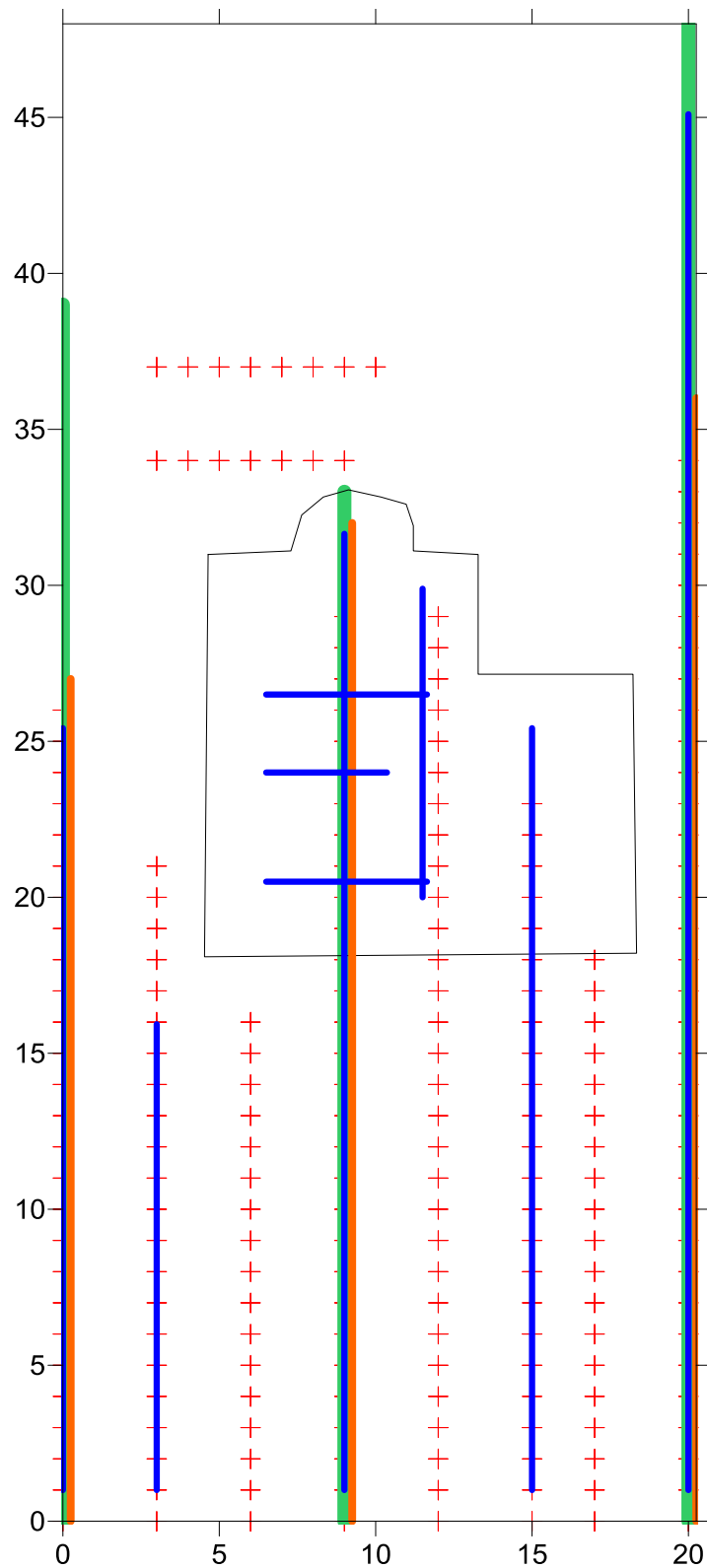
Στόχος της δεύτερης γεωφυσικής μεθόδου, της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, ήταν η απεικόνιση του υπεδάφους σε διδιάστατες γεωηλεκτρικές τομές με τους εντοπιζόμενους σχηματισμούς, έτσι ώστε, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου να μπορούμε να αποκτήσουμε εικόνα για το πως εκτείνονται στο χώρο.

Με τις δύο αυτές μεθόδους είναι εφικτό να εντοπίσουμε τις διαφοροποιήσεις που υπάρχουν σε σχέση με την κοκκομετρία, τη συνεκτικότητα και την περατότητα των υλικών του υπεδάφους.

Στη συνέχεια, στις ίδιες θέσεις των γεωηλεκτρικών τομών έγιναν και οι σεισμικές μετρήσεις με στόχο, αξιοποιώντας τις προκύπτουσες διδιάστατες τομές, να προσδιορίσουμε τους υπόγειους ορίζοντες όσον αφορά στη συνεκτικότητα, να ξεχωρίσουμε δηλαδή τα χαλαρά υλικά ή τις αποσαθρωμένες φάσεις του βραχώδους υποβάθρου από το υγιές πέτρωμα. Ακόμα, η μέθοδος των σεισμικών μας έδωσε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων P και S. Αυτή η πληροφορία θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω έρευνα από Πολιτικούς Μηχανικούς, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ποια θα είναι η αντίδραση του κτιρίου της Μονής σε καταπόνηση από σεισμό. Η 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 κατά μήκος των τομών των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων, με σκοπό τον εντοπισμό κυρίως ανθρωπογενών πεπερασμένων δομών, τοιχιών, τάφων σωληνώσεων, κλπ. Στο πλαίσιο της ευρύτερης έρευνας στον χώρο, του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, αυτό παρέχει τρεις τομές με σκοπό την πιο ευρεία παρουσίαση της γεωφυσικής έρευνας στην διπλωματική αυτή.

Οι μετρήσεις όλων των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στη γεωφυσική έρευνα αποτυπώνονται στην **Εικόνα 4.5**. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι μετρήσεις της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, με πορτοκαλί οι μετρήσεις της ηλεκτρικής μεθόδου. Με πράσινο χρώμα σημειώνονται οι μετρήσεις της σεισμικής μεθόδου και με μπλε οι μετρήσεις της μεθόδου γεωραντάρ.



Εικόνα 4.5: Κάνναβος μετρήσεων για το σύνολο των γεωφυσικών μεθόδων στη Μονή Καισαριανής. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι μετρήσεις της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, με πορτοκαλί οι μετρήσεις της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης ενώ οι πράσινες και οι μπλε τομές αφορούν αντίστοιχα τη σεισμική μέθοδο και τη μέθοδο του γεωραντάρ.

4.4.2. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

4.4.2.1. Εισαγωγή

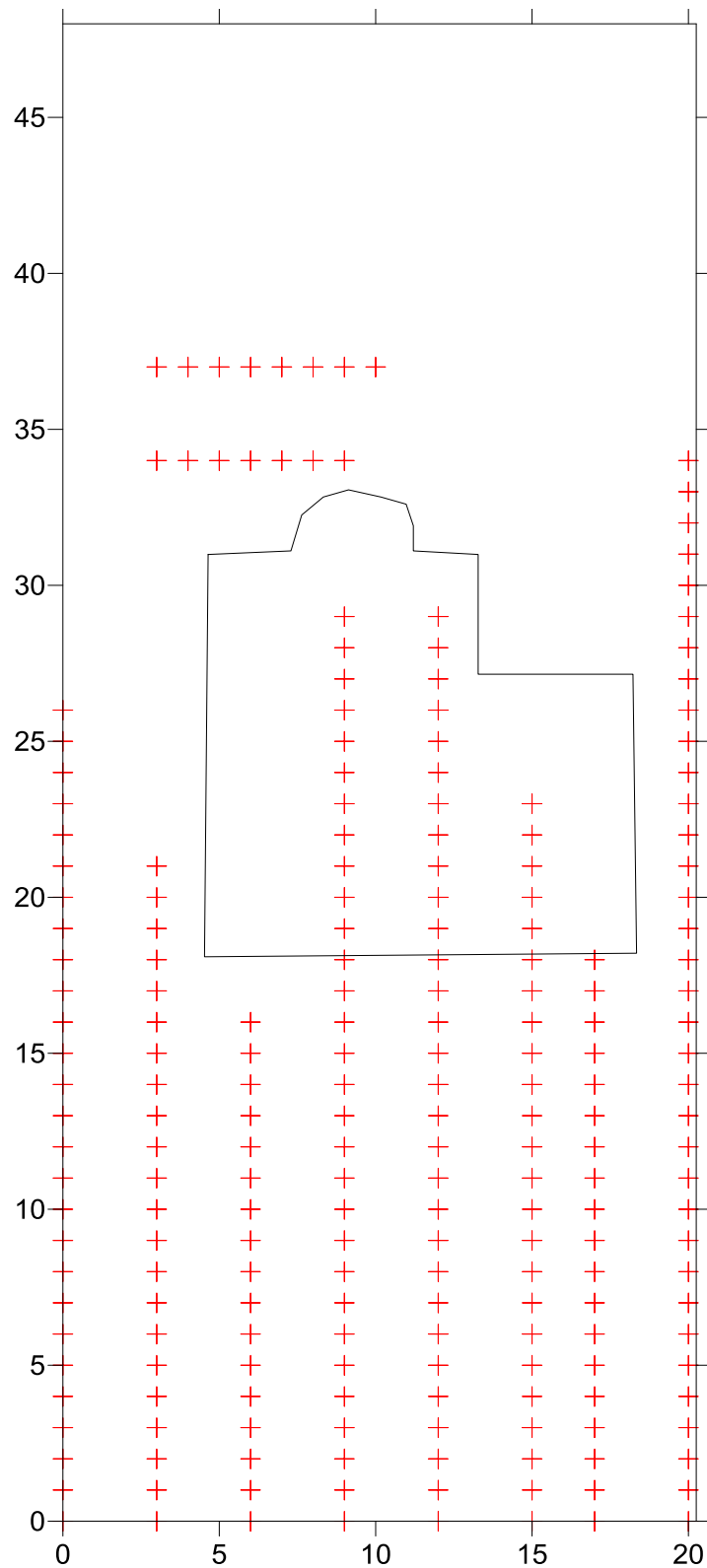
Για τη μέθοδο των ηλεκτρομαγνητικών, σχηματίσαμε κάρναβο μετρήσεων στην περιοχή μελέτης ως εξής: Διατάξαμε τις γραμμές των μετρήσεων με τέτοιο τρόπο ώστε οι γραμμές να είναι παράλληλες στην τοπογραφία της περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαν να εντοπιστούν ανωμαλίες και μεταβολές που δεν οφείλονται στην τοπογραφία. Επίσης, η διάταξη που χρησιμοποιήσαμε συνέβαλλε και στον περιορισμό του θορύβου από τα κτίρια που υπάρχουν στο χώρο των μετρήσεων.



Εικόνα 4.6: Μετρήσεις με το ηλεκτρομαγνητικό όργανό στη Μονή Καισαριανής

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαμορφώσεις του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μετρήσεων, μία για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m και μία για βάθος συνολικής διασκόπησης 6m. Και στις δύο περιπτώσεις οι μετρήσεις έγιναν στο χώρο μπροστά από το ναό και το παρεκκλήσι, μέσα στο ναό και πίσω από το ναό. Με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο για βάθος διασκόπησης 6m έγιναν ορισμένες επιπλέον μετρήσεις μέσα στο παρεκκλήσι.

Οι μετρήσεις και με τα δύο όργανα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου έγιναν με βήμα 1m και φαίνονται στην **Εικόνα 4.7**.



Εικόνα 4.7: Κάνναβος μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

4.4.2.2. Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με δύο διαμορφώσεις, τη CMD-2 με βάθος συνολικής διασκόπησης 3m και τη CMD-4, με βάθος συνολικής διασκόπησης 6m.



Εικόνα 4.8: Το ηλεκτρομαγνητικό όργανο CMD της GF Instruments (CMD, Electromagnetic Conductivity Meter User Manual)

- Το όργανο αποτελείται από μια μονάδα ελέγχου και ένα σύστημα πομπού – δέκτη. Κάποια χαρακτηριστικά του οργάνου από τα στοιχεία του κατασκευαστή είναι τα εξής (CMD, Electromagnetic Conductivity Meter User Manual):

Μονάδα Ελέγχου

- Η Μονάδα ελέγχου Attachable CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη.
- Χρησιμοποιούνται πέντε τρόποι μέτρησης:
 - Χειροκίνητη μέτρηση: Ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πιέζοντας το πλήκτρο. Η θέση του σημείου ενημερώνεται αυτόματα στο προκαθορισμένο δίκτυο ή μπορεί να εισαχθεί απευθείας. Κάθε σημείο μπορεί να μετρηθεί και πάλι ή να παραλειφθεί και να ολοκληρωθεί με ένα σχόλιο.
 - Συνεχής μέτρηση: Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Οι θέσεις για το προφίλ καθορίζεται από τα σήματα μήκους με συνεχή συνυπολογισμό των θέσεων των μεμονωμένων μετρήσεων.
 - Χειροκίνητη μέτρηση GPS: Ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πατώντας το πλήκτρο. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
 - Συνεχής μέτρηση GPS: Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
 - Λειτουργία αναζήτησης - τα δεδομένα μετρώνται συνεχώς, αλλά δεν σώζονται.

Στη γεωφυσική μας έρευνα χρησιμοποιήσαμε τη χειροκίνητη μέτρηση.

- Άμεση υποστήριξη του δέκτη GPS. Γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το υψόμετρο εμφανίζονται και αποθηκεύονται αυτόματα.
- Εύκολη μεταφορά δεδομένων σε USB.
- Χρόνος μέτρησης: 0,1 - 20 s.
- Μνήμη δεδομένων (128 MB):
 - max. 64 αρχεία.
 - max. 4.8 εκατομμύρια σημεία μετρήσεων.
- Οθόνη LCD 320 x 240, με λευκό φωτισμό.
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -10 ° C έως +50 ° C.
- Διαστάσεις: 270 x 90 (145) x 60 mm.
- Βάρος: 0,7 kg (με Li-Ion μπαταρία).

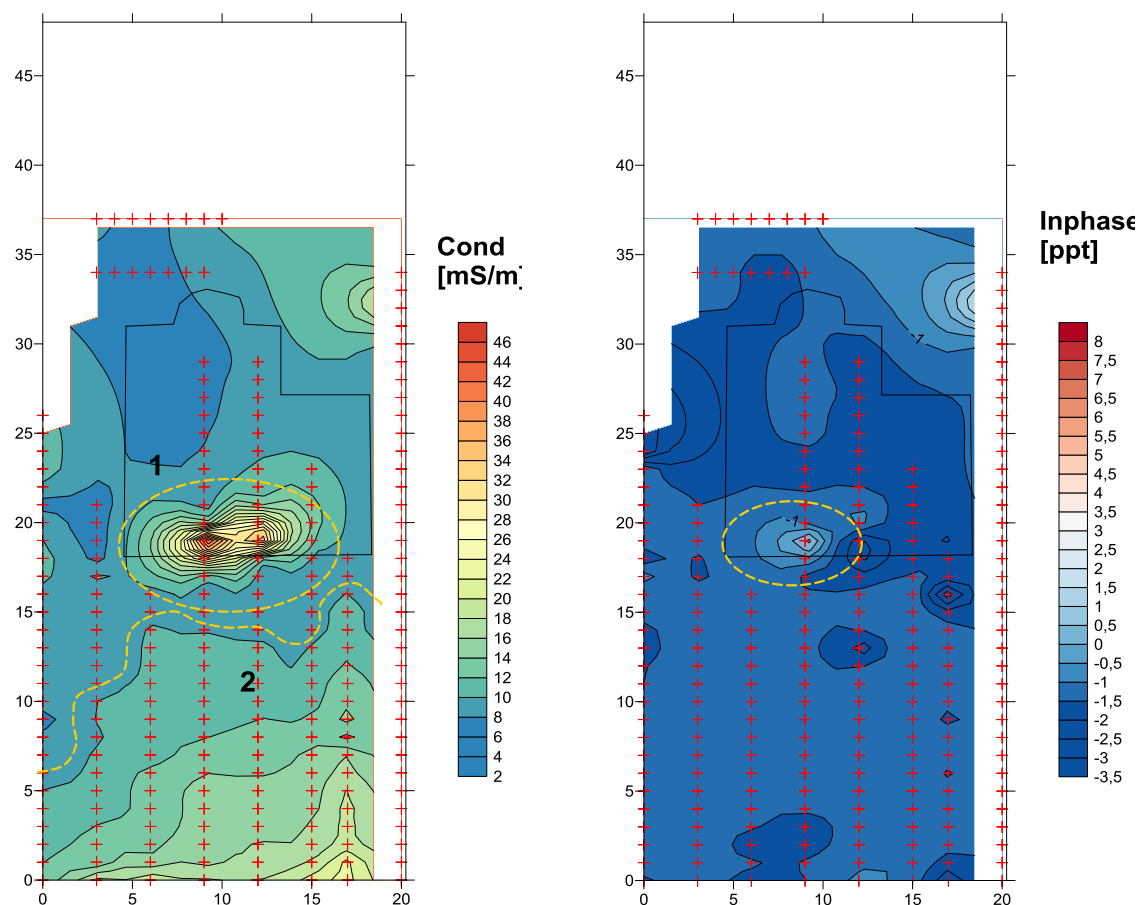
•
 Σύστημα πομπού δέκτη

- Μεγέθη που μετρώνται:
 - Ηλεκτρική Αγωγιμότητα
 - Μαγνητική Επιδεκτικότητα
- Ακρίβεια μέτρησης: $\pm 4\%$ σε 50 mS / m.
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 10 Hz.
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -10 ° C έως +50 ° C. (Με τη βοήθεια των οργάνων που αναφέρθηκαν παραπάνω πάρθηκαν μετρήσεις με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 και 6 m. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα ονομάζονται medium και high αντίστοιχα.

Τέλος, τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Surfer της Goldensoftware και φαίνονται παρακάτω.

4.4.2.3. Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες

Διαμόρφωση CMD-2 (Βάθος συνολικής διασκόπησης 3m)



Εικόνα 4.9: α) Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m. β) Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

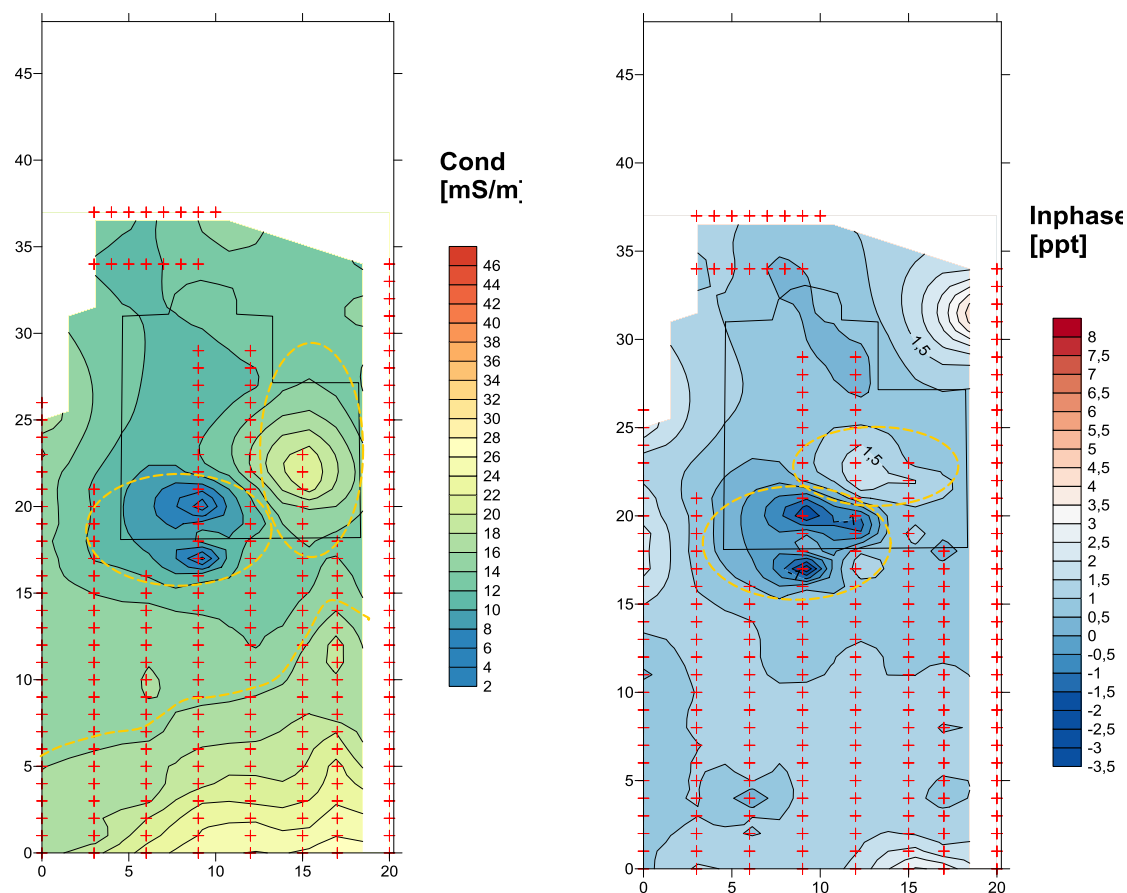
Για τους χάρτες που αποτυπώνουν την κατανομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα :

- Στην **Εικόνα 4.9α** παρατηρούμε έντονη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην **περιοχή 1**, με μεγαλύτερες τιμές αγωγιμότητας σε σχέση με το γύρω χώρο. Το σημείο αυτό βρίσκεται λίγο μετά την είσοδο της εκκλησίας. Η μεταβολή αυτή είναι εξαιρετικά έντονη, κάτι που δεν μπορεί να συμβεί στη φύση. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι σ' εκείνο το σημείο υπάρχει κάτι που οφείλεται σε ανθρωπογενή αίτια, κάποιο έγκοιλο πληρωμένο με χαλαρό υλικό ή με μεταλλικό υλικό.
- Στην ίδια εικόνα είναι ευδιάκριτη μια περιοχή σχετικά υψηλότερων ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, η **περιοχή 2**. Η μεταβολή των αγωγιμοτήτων γίνεται με ομαλό τρόπο και πιθανά μας δίνει μια εικόνα του υποβάθρου. Πιθανά εκεί καταλήγουν

τα πιο λεπτόκοκκα υλικά, τα χαλαρά ιζήματα, ενώ στην άνω περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού χάρτη, που οι αγωγιμότητες είναι χαμηλότερες, φαίνεται ότι ο ναός είναι κτισμένος σε αδρομερές υλικό ή σε συνεκτικό χώρο.

- Στην **Εικόνα 4.9β**, παρατηρούμε μια περιοχή με σχετικά υψηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας λίγο μετά την είσοδο στο ναό (**περιοχή 3**), η οποία επιβεβαιώνει την ύπαρξη κάποιας μεταλλικής δομής με ανθρωπογενή προέλευση.

Διαμόρφωση CMD-4 (Βάθος συνολικής διασκόπησης 6m)



Εικόνα 4.10: α) Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 6m. β) Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 6m.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Για τους χάρτες που αποτυπώνουν την κατανομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 6m, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα :

- Στην **Εικόνα 4.10α**, παρατηρούμε επίσης μια περιοχή σχετικά υψηλότερων αγωγιμοτήτων, όπου η μεταβολή της αγωγιμότητας γίνεται με ομαλό τρόπο, την **περιοχή 6**. Επιβεβαιώνεται το πέρας των χαλαρών σε σχέση με τα αδρομερή υλικά πάνω από τα οποία είναι κτισμένος ο ναός.
- Στην **Εικόνα 4.10α**, υπάρχει ακόμα μια περιοχή σχετικά υψηλότερης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (**περιοχή 5**), που βρίσκεται κάτω από το παρεκκλήσι, στο επίπεδο του ιερού. Και αυτή η μεταβολή είναι έντονη και δε μπορεί να οφείλεται στη φύση. Πρόκειται πιθανά για μεταλλική κατασκευή. Δεν παρατηρούμε αντίστοιχη

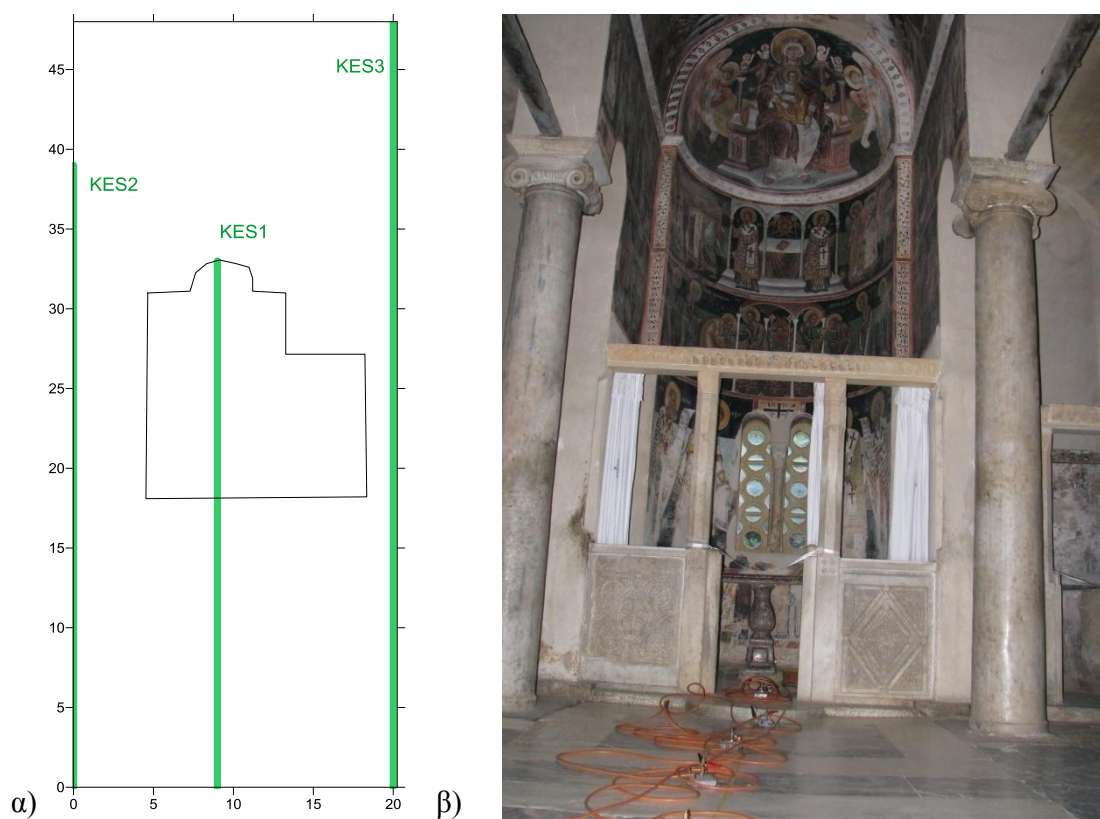
μεταβολή στην **Εικόνα 4.9α**. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν έγιναν μετρήσεις για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m μέσα στο παρεκκλήσι, επομένως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ακριβώς τι θα έδινε ο αντίστοιχος χάρτης για το σημείο αυτό κάτω από το παρεκκλήσι.

- Στην ίδια εικόνα, η **περιοχή 4** είναι μια περιοχή χαμηλής αγωγιμότητας σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, που πιθανά αποτυπώνει κάποια συνεκτική δομή ή κενό χώρο.
- Στην **Εικόνα 4.10β**, παρατηρούμε μια περιοχή με σχετικά υψηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας (**περιοχή 7**), η οποία επιβεβαιώνει την ύπαρξη κάποιας μεταλλικής δομής με ανθρωπογενή προέλευση.
- Η **περιοχή 8**, που είναι περιοχή με σχετικά χαμηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας, παρουσιάζει κάποια συνεκτική δομή ή κενό χώρο.

4.4.3. Ηλεκτρική Μέθοδος

4.4.3.1. Εισαγωγή

Η δεύτερη μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης ήταν η ηλεκτρική. Πραγματοποιήθηκαν τρεις τομές (KES2, KES1 και KES3), σε διεύθυνση Α-Δ, δηλαδή παράλληλα με το ναό (Εικόνα 4.11). Η απόσταση των ηλεκτροδίων για τις τομές KES2 και KES1 ήταν 1m και για την KES3 1.5m. Στη μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις pole – dipole και Shlumberger. Τα αποτελέσματα της διάταξης pole- dipole, ήταν καλύτερα, επομένως αυτά επεξεργαστήκαμε και αυτά θα παρουσιαστούν. Επίσης, σε κάθε τομή έγιναν και οι δύο τρόποι ανάπτυξης της μεθόδου pole - dipole, δηλαδή forward και reverse, ανάλογα με το αν το ηλεκτρόδιο ρεύματος προπορεύεται ή έπεται του διπόλου δυναμικού.



Εικόνα 4.11: α)Κάνναβος μετρήσεων ηλεκτρικής μεθόδου β)Μετρήσεις ηλεκτρικής μεθόδου μέσα στην Εκκλησία

4.4.3.2. Εξοπλισμός

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών ειδικής αντίστασης είναι το SYSCALPro.

Πρόκειται για έναν 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 1000V –250 W – 2.5A. Έχει τη δυνατότητα αυτόματου injection ranging και έχει την επιλογή αλλαγής των ηλεκτροδίων. Είναι ένα νέο σύστημα

σχεδιασμένο για υψηλή ανάλυση στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης και IP. Περιλαμβάνει αρκετές επιλογές δίνοντας τη δυνατότητα εργασίας σε κάθε είδους συνθήκες και πεδία. Δηλαδή έχει την προοπτική για εξερεύνηση υπογείων νερών, για γεωτεχνικές μελέτες των πολιτικών μηχανικών ή για διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές.

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 12V του αυτοκινήτου μπορεί να συνδέεται με το τμήμα πομπού
- Παντός καιρού
- Θήκη που δεν καταστρέφεται, δεν φθείρεται
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 έως +70 ° C
- Διαστάσεις (SYSCAL Pro Switch-48): 31 x 23 x 36 cm.
- Βάρος (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg (IRIS INSTRUMENTS: SYSCAL Pro. Manual Guide)

4.4.3.3. Επεξεργασία μετρήσεων

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία λήψης των μετρήσεων στην ύπαιθρο, τότε έγινε η ανάλυση και η επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομών.

Για την ερμηνεία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2dinv (Loke and Barker,1996). Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας.

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, αρχικά επιλέξαμε την ρύθμιση «use model refinement» διότι το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μετρήσεις περισσότερες από αυτές που του εισάγονται. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να δημιουργηθούν μετρήσεις και με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων. Έτσι, το τελικό μοντέλο μας θα έχει απόσταση ηλεκτροδίων 0,5m και θα μπορεί να διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος

Επιλέξαμε για την δημιουργία του μοντέλου κατά την αντιστροφή των μετρήσεων (inversion) να ελεγχθούν 4 εναλλακτικές διαδικασίες ερμηνείας:

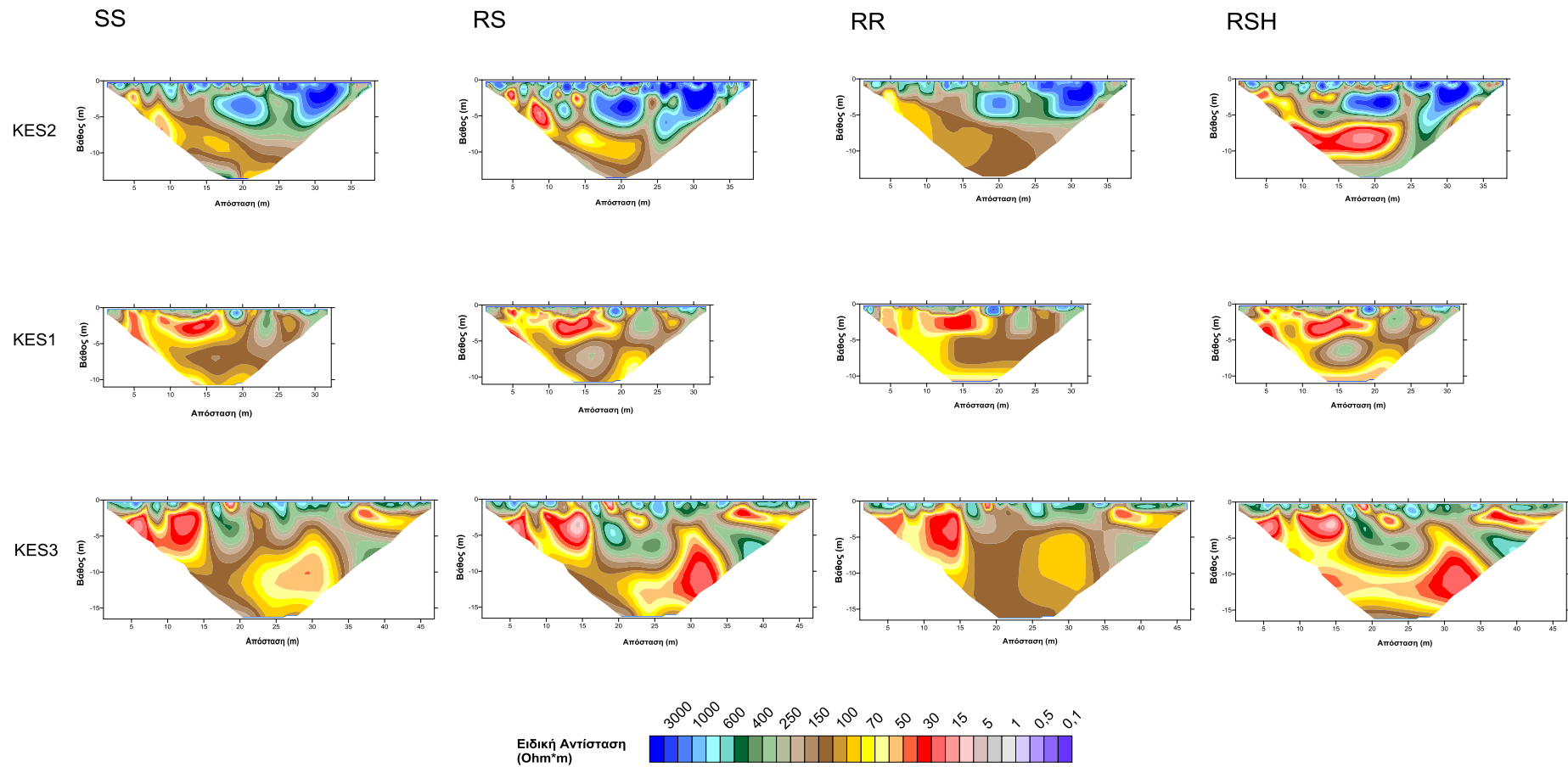
- **Standard – Standard** : Με αυτή την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται ελεύθερα.
- **Robust – Standard** : Με αυτή την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις.
- **Robust – Robust** : Με αυτή την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε

απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις.

- **Robust – Robust Horizontal:** Με αυτή την επιλογή, «ωθούμε» το πρόγραμμα να θεωρεί ότι τα στρώματα είναι σχετικά οριζόντια και να δίνεται έμφαση στην κάθετη μεταβολή της ειδικής αντίστασης (όταν ενδιαφερόμαστε για στρωματογραφία παρά για τον εντοπισμό πεπερασμένων δομών).

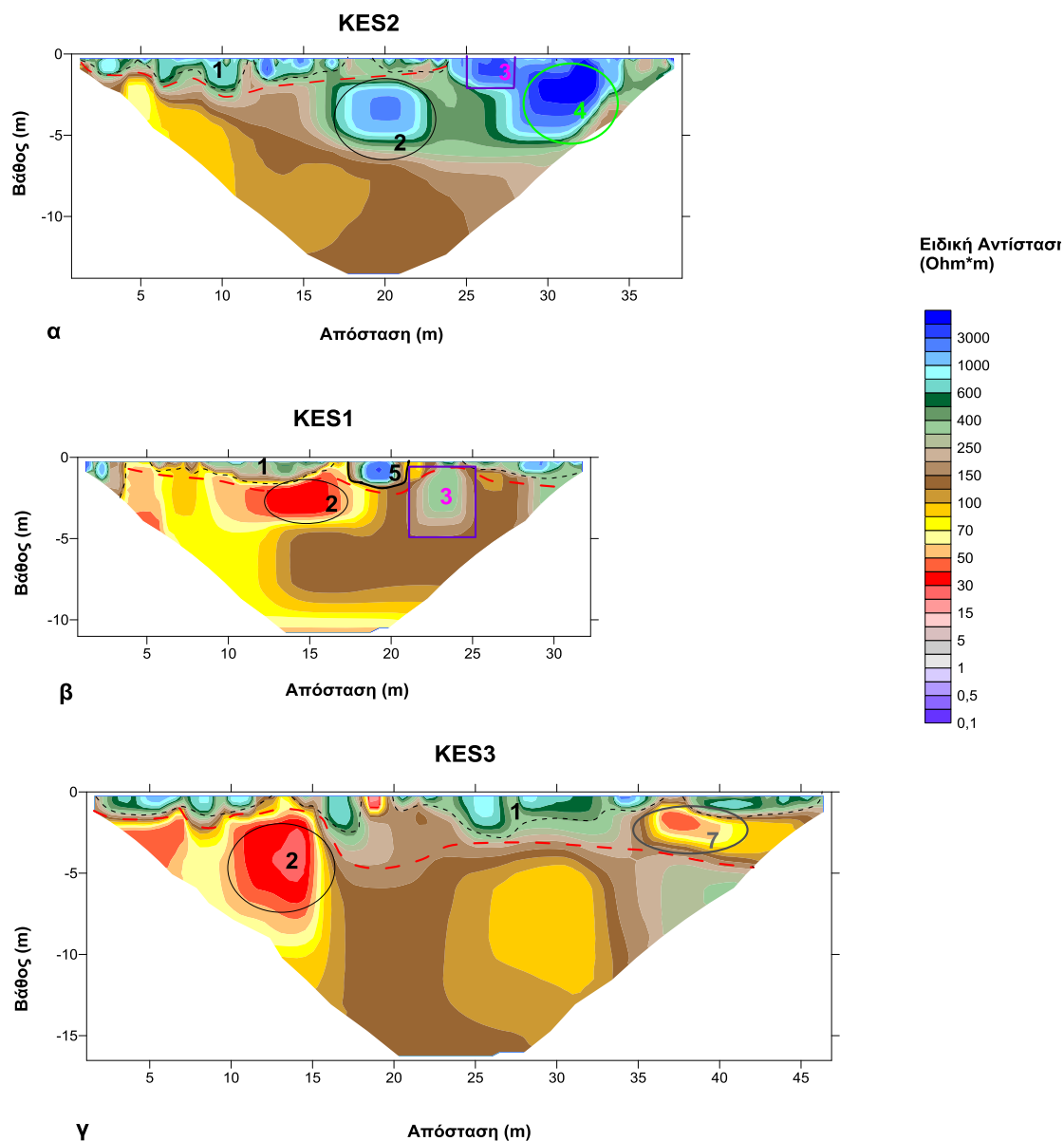
Συνολικά τα αποτελέσματα των τριών γεωηλεκτρικών τομών για τις τέσσερις διαφορετικές διαδικασίες ερμηνείας (Standard – Standard(SS), Robust – Standard(RS), Robust – Robust(RR) και Robust – Standard – Horizontal(RSH)) δίνονται στην **Εικόνα 4.12**.

Από την αξιολόγηση των τομών της **Εικόνας 4.12**, καταλήγουμε στις τομές που προκύπτουν από την επιλογή Robust-Robust τις οποίες θα τις ερμηνεύσουμε ως προς τους σχηματισμούς που εντόπισαν.



Εικόνα 4.12: Οι γεωηλεκτρικές τομές KES2, KES1 και KES3, επεξεργασμένες με τις επιλογές Standard – Standard(SS), (Robust – Standard(RS), Robust – Robust(RR) και Robust – Standard – Horizontal (RSH) του προγράμματος RES2dinv.

4.4.3.4. Αποτελέσματα μετρήσεων



Εικόνα 4.13: α) Γεωηλεκτρική τομή ΚΕS2 β) Γεωηλεκτρική τομή ΚΕS1 γ) Γεωηλεκτρική τομή ΚΕS3.

Σχόλια – Αποτελέσματα

Και στις τρεις εικόνες, η περιοχή κάτω από την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή είναι περιοχή σχετικά υψηλότερων ειδικών αντιστάσεων, είναι δηλαδή περιοχή αδρόκοκκων υλικών, πάνω από τα οποία είναι χτισμένος και ο ναός. Είναι το όριο κάτω από το οποίο, σε βάθος δηλαδή 2-3m, ξεκινάει ο Σχιστόλιθος. Πάνω από το Σχιστόλιθο, στα πρώτα 1-2m, έχει σημειωθεί η **περιοχή 1**, σχετικά χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων, η οποία δηλώνει ανθρωπογενή δραστηριότητα, πιθανά τοπικές εκσκαφές, κάποιες μικρές κατασκευές.

Ακόμα, και στις τρεις εικόνες έχει σημειωθεί η **περιοχή 2**. Πρόκειται για περιοχή που εκτείνεται σε βάθος 3 -5m και έχει πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης στην περιοχή κάτω από την τομή KES2 και εκτείνεται και στην περιοχή κάτω από τις τομές KES1 και KES, με χαμηλότερες όμως ειδικές αντιστάσεις, σε σχέση με το γύρω χώρο. Πιθανά απεικονίζει κενό χώρο, ίσως κάποιο υπόγειο, που από κάποιο σημείο και μετά είναι πληρωμένος με χαλαρά υλικά.

Η **περιοχή 3** στις **Εικόνες 4.13α** και **4.13β**, είναι περιοχή πολύ υψηλών ειδικών αντιστάσεων και η μεταβολή σε σχέση με το γύρω χώρο είναι εξαιρετικά έντονη, κάτι που δε μπορεί να εμφανιστεί στη φύση, έχει ανθρωπογενή προέλευση. Πράγματι, οι υπεύθυνοι της Μονής μας ενημέρωσαν ότι υπάρχει σε εκείνο το σημείο υπόγειος αγωγός, ο οποίος διασχίζει και το χώρο κάτω από την εκκλησία. Από τις μετρήσεις φαίνεται ότι ο αγωγός έχει διαστάσεις περίπου 2x2m και η οροφή του κάτω από την Εκκλησία, βρίσκεται σε βάθος περίπου 2m.

Και στην **περιοχή 4** στην **Εικόνα 4.13α** οι ειδικές αντιστάσεις είναι πολύ υψηλές. Ενδεχομένως πρόκειται για κάποια υπόγεια κατασκευή.

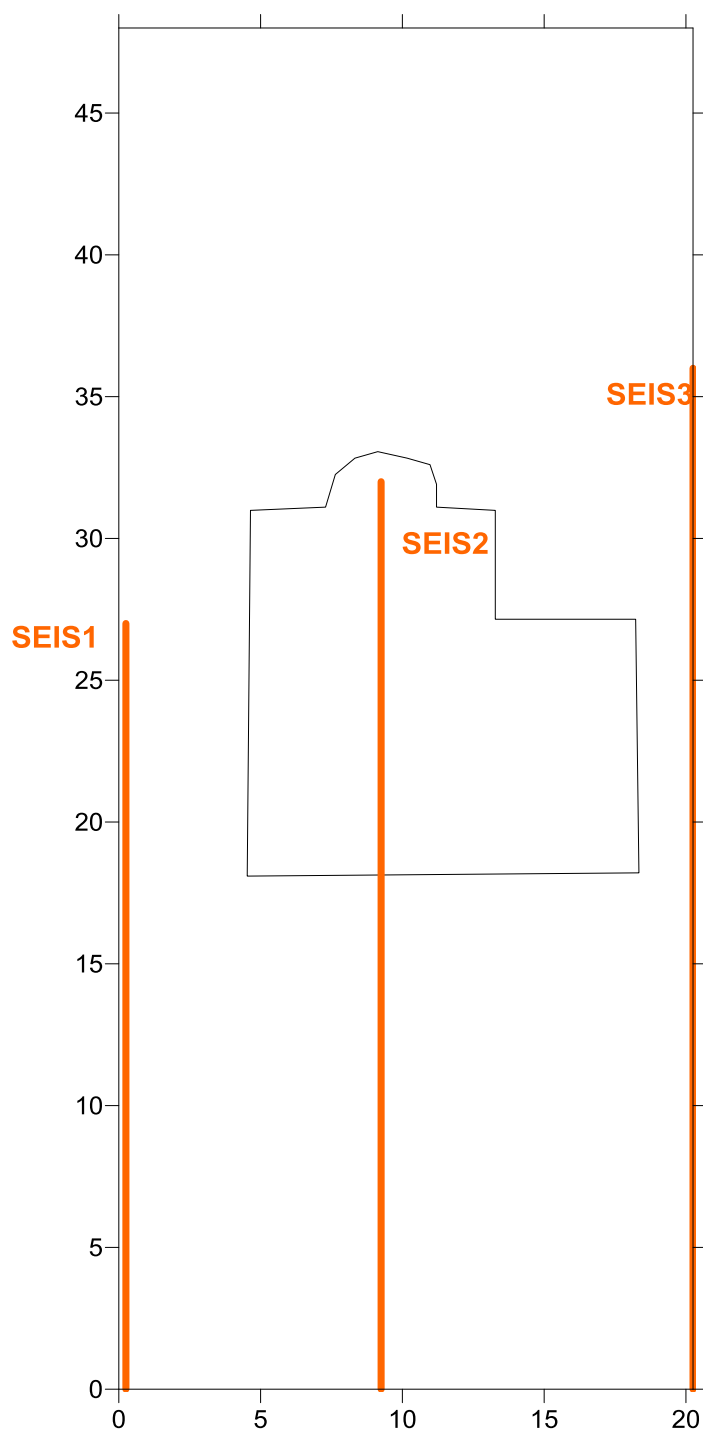
Στην **Εικόνα 4.13α**, έχει σημειωθεί η **περιοχή 5** που πρόκειται για χώρο με υψηλές αντιστάσεις, πολύ κοντά στην επιφάνεια της Εκκλησίας. Η μεταβολή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι πολύ έντονη και δεν μπορεί παρά να οφείλεται σε ανθρωπογενή παρέμβαση. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα της επεξεργασίας της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, ότι δηλαδή σ' αυτό το σημείο κάτω από την είσοδο του ναού υπάρχει κάποια κατασκευή, πιθανά τάφος.

Η **περιοχή 7** της **Εικόνας 4.13γ** βρίσκεται σε βάθος 2 – 5 m και έχει χαμηλές αντιστάσεις σε σχέση με το γύρω χώρο και πρόκειται για κάποια περιοχή με χαλαρά υλικά.

4.4.4. Σεισμική Μέθοδος

4.4.4.1. Εισαγωγή

Και για τη σεισμική μέθοδο, οι τομές που πραγματοποιήθηκαν ήταν τρεις (SEIS1, SEIS2 και SEIS3). Και οι τρεις είχαν διεύθυνση Α – Δ, δηλαδή, παράλληλη στο ναό. Οι μετρήσεις της σεισμικής μεθόδου φαίνονται στην **Εικόνα 4.14**. Η SEIS2 είχε μήκος 27.5m, η SEIS1, 31.5m και η SEIS3 είχε μήκος 36m. Η απόσταση των ηλεκτροδίων και στις τρεις τομές ήταν 1.5m.



Εικόνα 4.14: Κάνναβος μετρήσεων σεισμικής μεθόδου

4.4.4.2. Εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή της σεισμικής μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε ο σειсмоγράφος DAQlink III της Seismic Source. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν γεωφώνα, τα οποία όπως αναφέρθηκε είναι συσκευές οι οποίες μετρούν τη διαμήκη ή την εγκάρσια κίνηση του εδάφους, η οποία παράγεται από μία σεισμική πηγή, και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία καταγράφονται από μία ξεχωριστή συσκευή. Στις περιπτώσεις όπου δεν υπήρχε στο έδαφος χώμα αλλά μάρμαρο, αλλά και στο εσωτερικό του ναού, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά μολυβένια πλακίδια, όπως και στη μέθοδο των ηλεκτρικών. Έγινε και εδώ χρήση του ειδικού αγώγιμου τζελ, για καλύτερη επαφή των πλακιδίων με την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 4.15: Το ειδικό μολυβένιο πλακίδιο που χρησιμοποιήθηκε σε περιπτώσεις που δεν υπήρχε στο έδαφος χώμα.

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. Ως βάση κρούσης της σεισμικής σφύρας, χρησιμοποιήθηκε ειδική μεταλλική πλάκα.

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

4.4.4.3. Επεξεργασία Μετρήσεων

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

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

Επιλογή πρώτων αφίξεων

Κατά το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων των μετρήσεων της μεθόδου, στόχος ήταν να γίνει επιλογή των πρώτων αφίξεων, να καθοριστούν δηλαδή οι χρονικές στιγμές άφιξης των πρώτων σεισμικών κυμάτων σε κάθε γεώφωνο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SeisImager της EG&G GEOMETRICS.

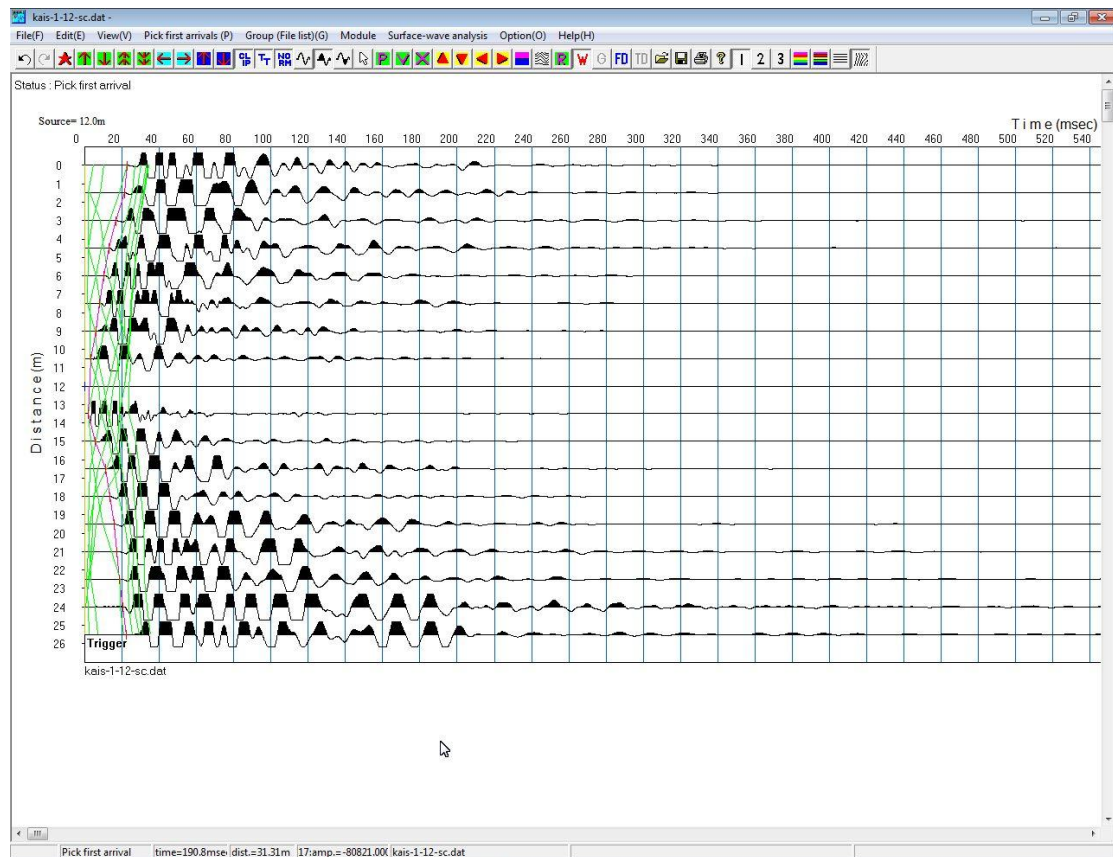
Δημιουργία δρομοχρονικών καμπύλων

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των πρώτων αφίξεων, κατασκευάστηκαν οι δρομοχρονικές καμπύλες, δηλαδή τα διαγράμματα των σεισμικών αφίξεων σαν συνάρτηση της απόστασης των γεωφώνων από τη σεισμική πηγή. Στο διάγραμμα αυτό εντοπίζονται τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα από κάθε διεπιφάνεια με τη βοήθεια του λογισμικού PlotRefa της EG&G GEOMETRICS και αντιστοιχούνται σε εδαφικά στρώματα.

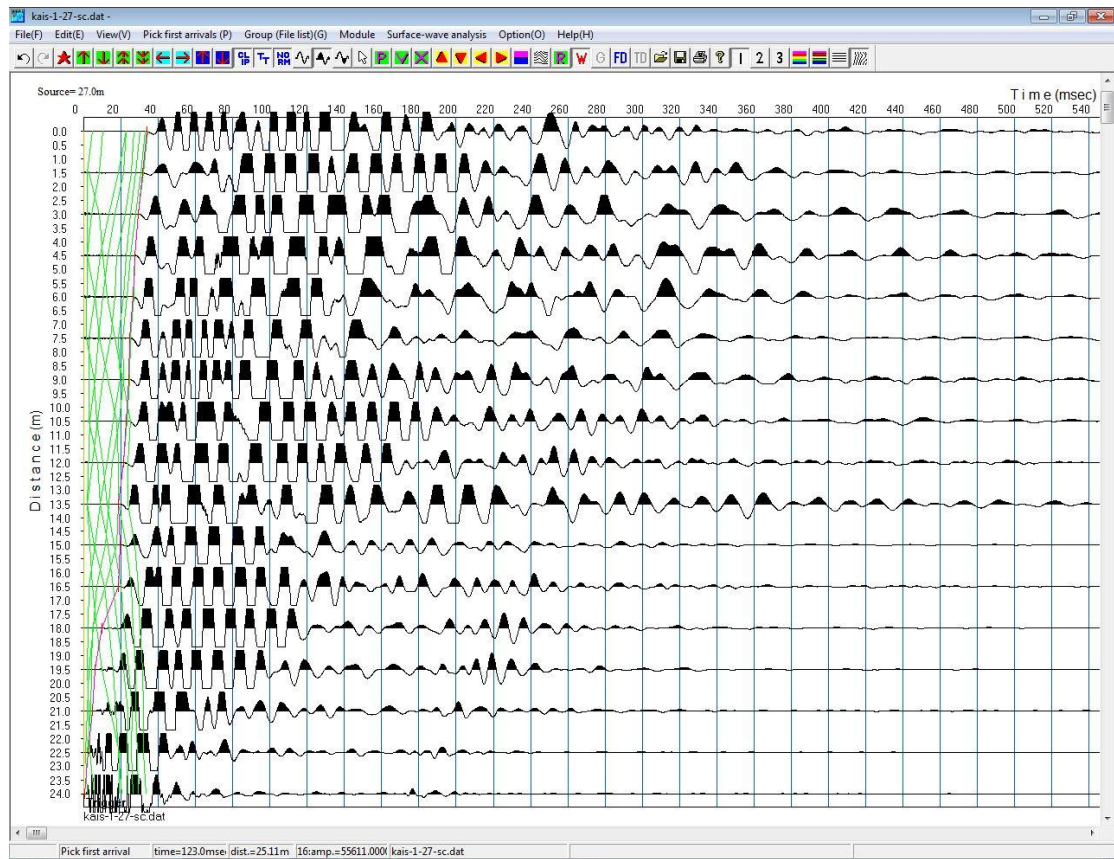
Προσδιορισμός των μοντέλων του υπεδάφους και υπολογισμός σεισμικών ταχυτήτων

Με χρήση του λογισμικού SeisImager προκύπτουν τα μοντέλα βάθους 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.

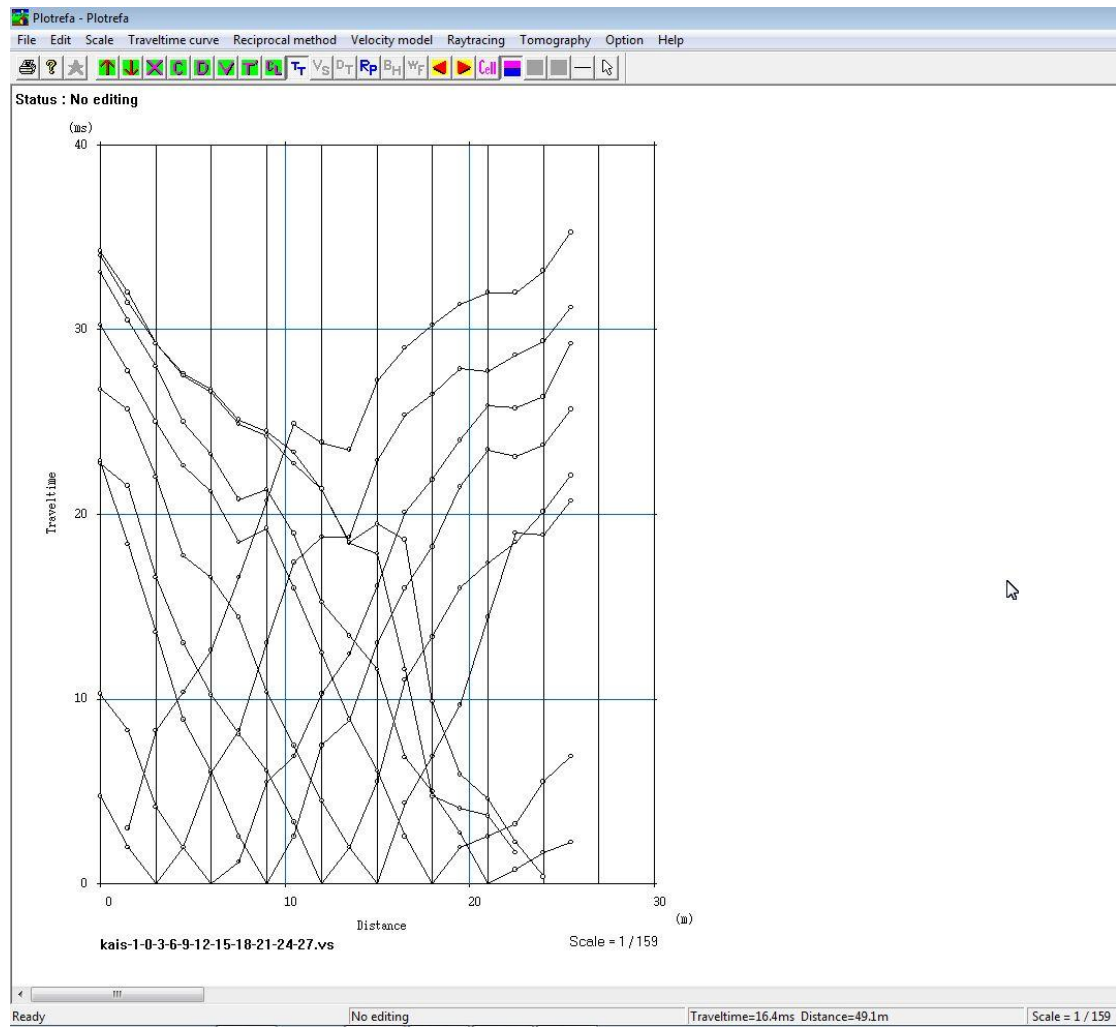
4.4.4. Αποτελέσματα Μετρήσεων Σεισμική γραμμή SEIS1



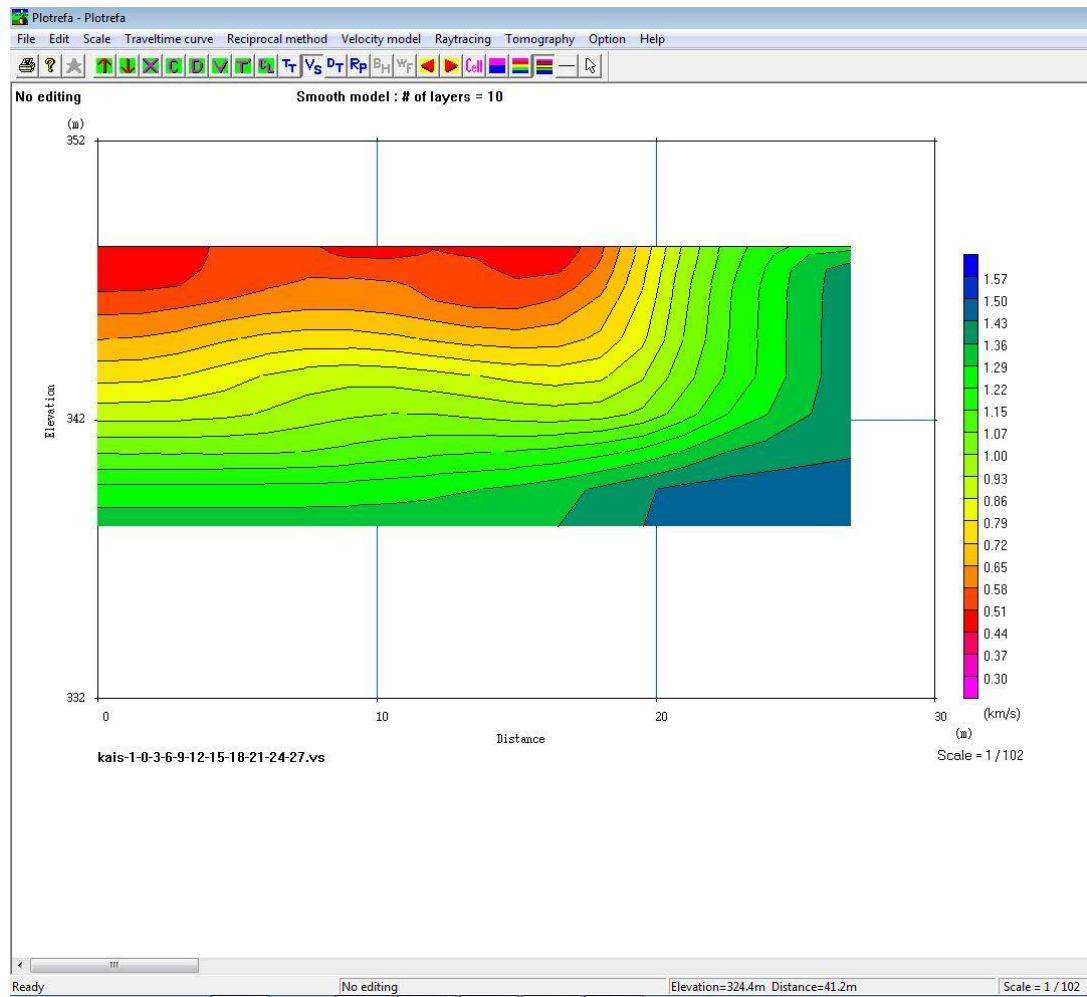
Εικόνα 4.16: Σεισμόγραμμα 1-12. Με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 12 της γραμμής SEIS1.



Εικόνα 4.17: Σεισμόγραμμα 1-27. Με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 27 της γραμμής SEIS1

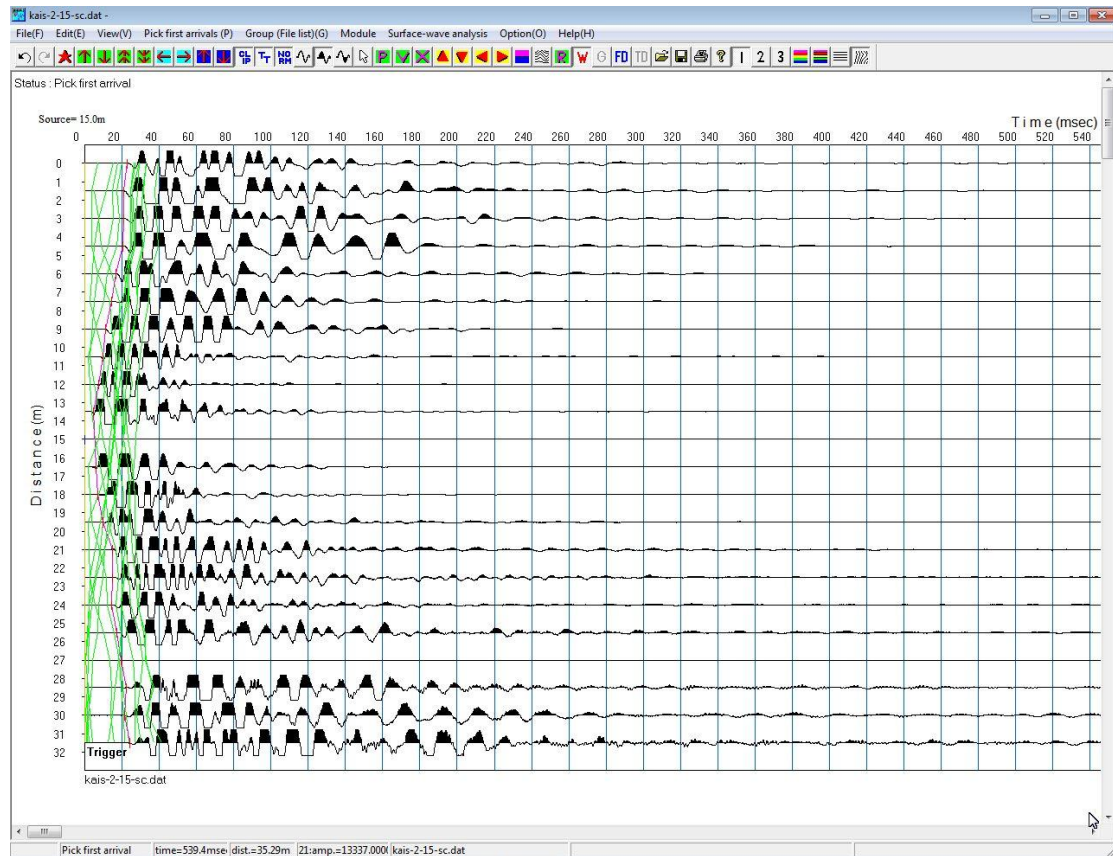


Εικόνα 4.18: Δρομοχρονική καμπύλη για τη σεισμική γραμμή SEIS1

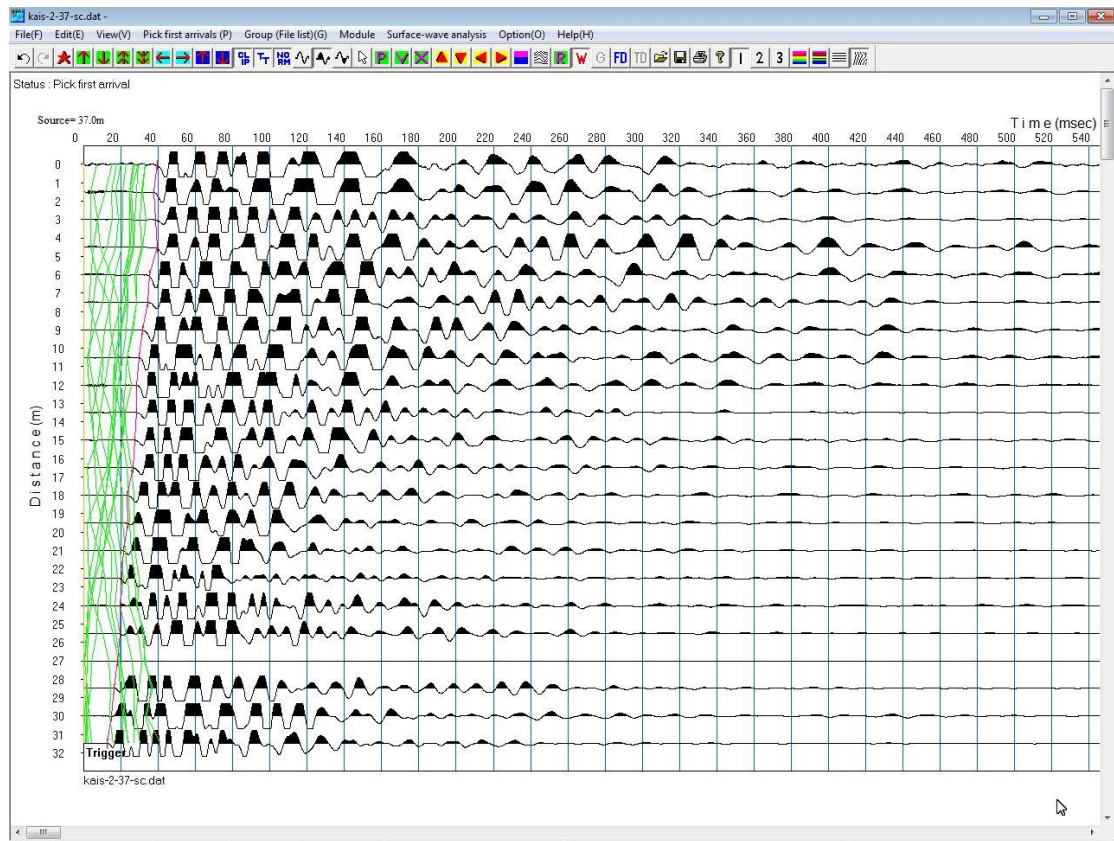


Εικόνα 4.19: Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή SEIS1

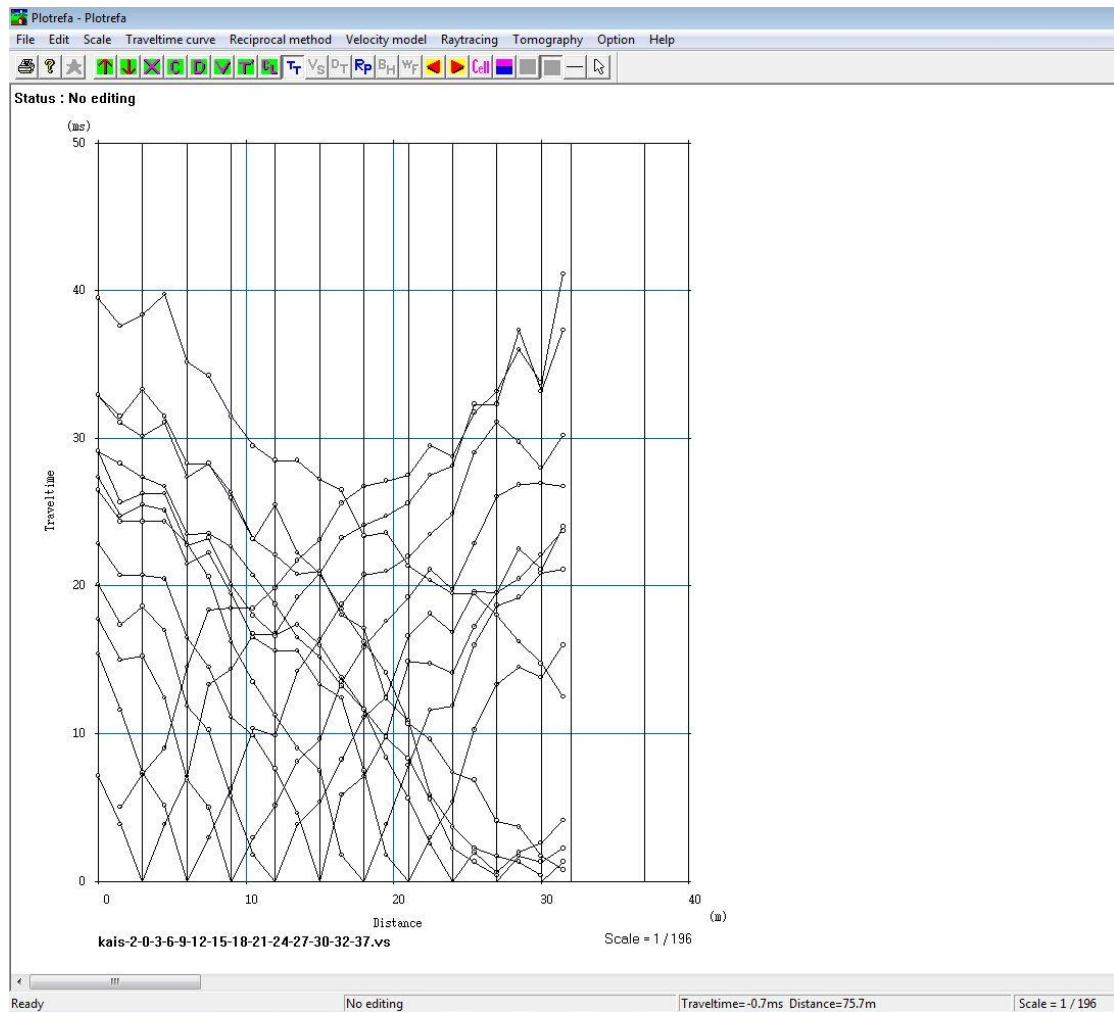
Σεισμική γραμμή SEIS2



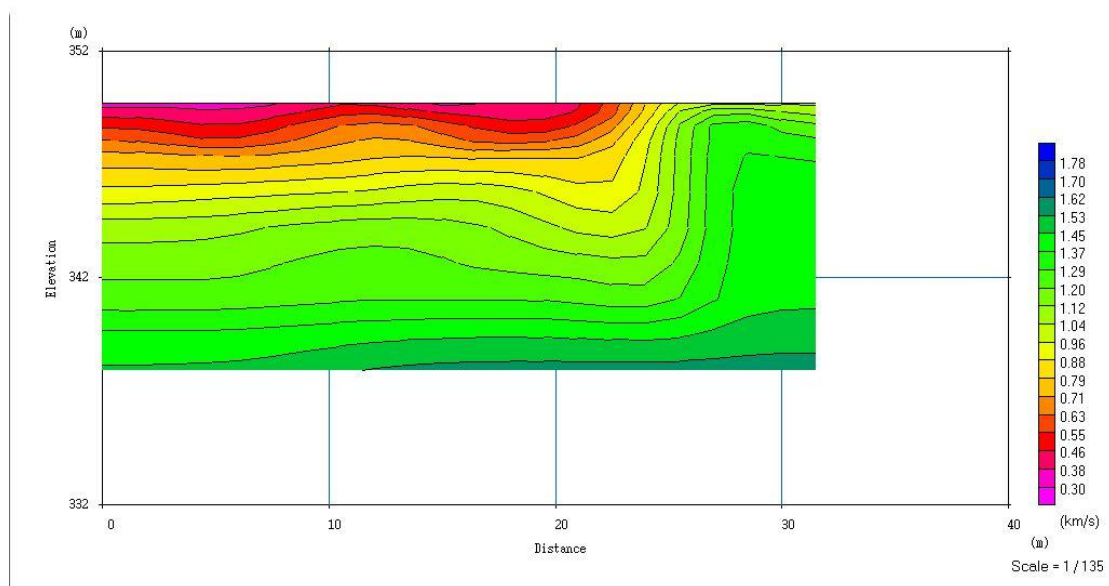
Εικόνα 4.20: Σεισμόγραμμα 2-15. Με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 15 της γραμμής SEIS2



Εικόνα 4.21: Σεισμόγραμμα 2-37. Με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 37 της γραμμής SEIS2

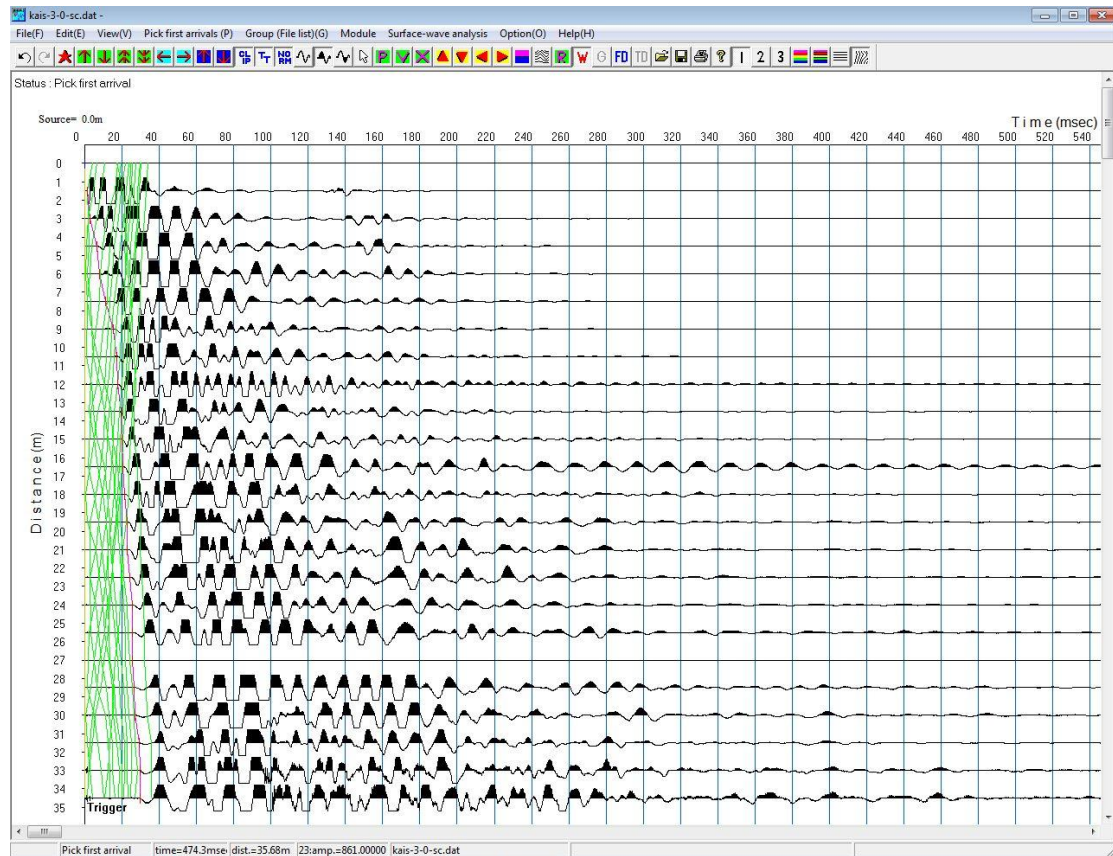


Εικόνα 4.22: Δρομοχρονική καμπύλη για τη σεισμική γραμμή SEIS2

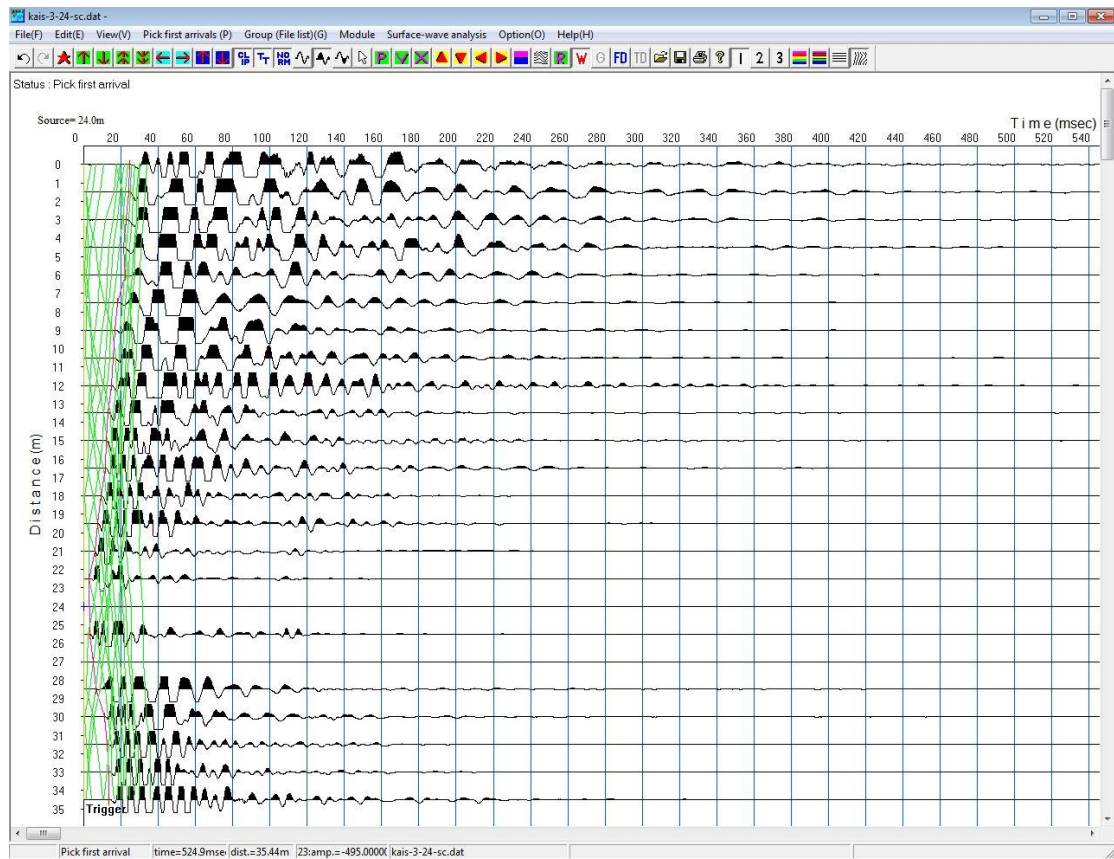


Εικόνα 4.23: Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή SEIS2

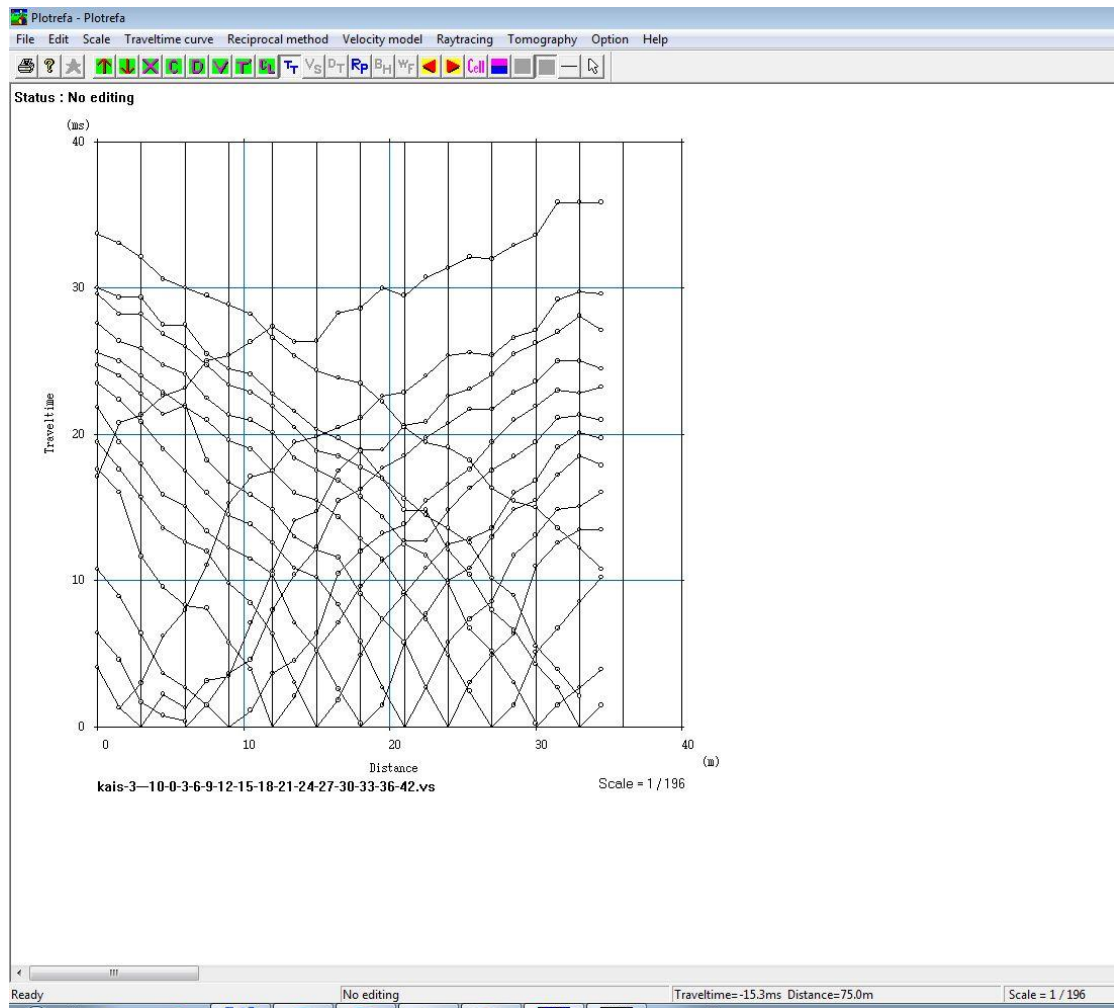
Σεισμική γραμμή SEIS3



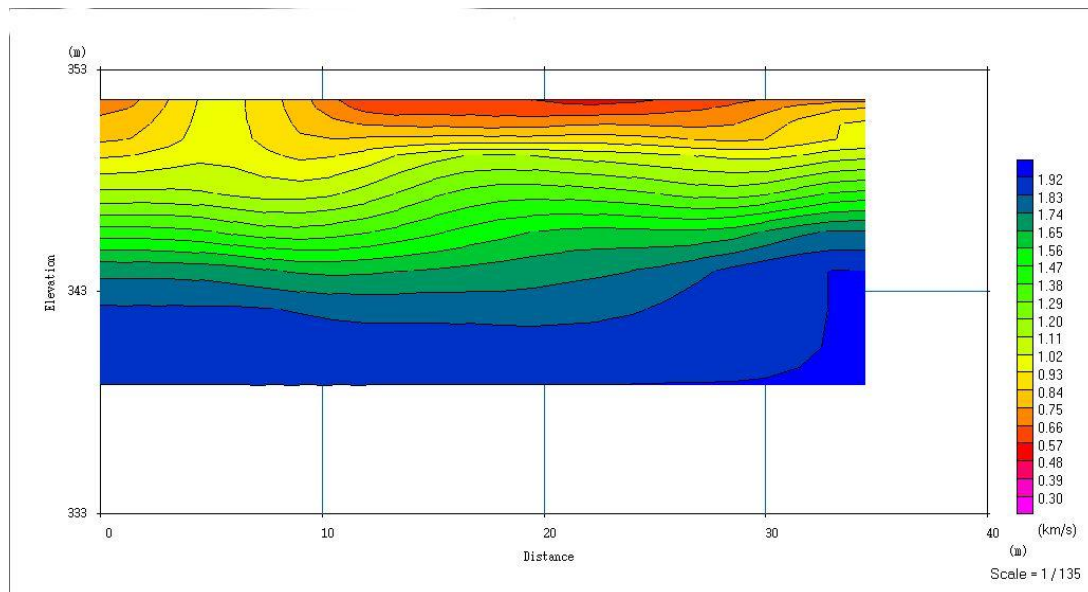
Εικόνα 4.24: Σεισμόγραμμα 3-0. Με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 0 της γραμμής SEIS3



Εικόνα 4.25: Σεισμόγραμμα 3-24. Με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 24 της γραμμής SEIS3



Εικόνα 4.26: Δρομοχρονική καμπύλη για τη σεισμική γραμμή SEIS3



Εικόνα 4.27: Μοντέλο του υπεδάφους για τη σεισμική γραμμή SEIS3

4.4.4.5. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Και για τις τρεις 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 βραχώδους υποβάθρου εντοπίζεται σε βάθος περίπου 2m και για τις τρεις τομές.

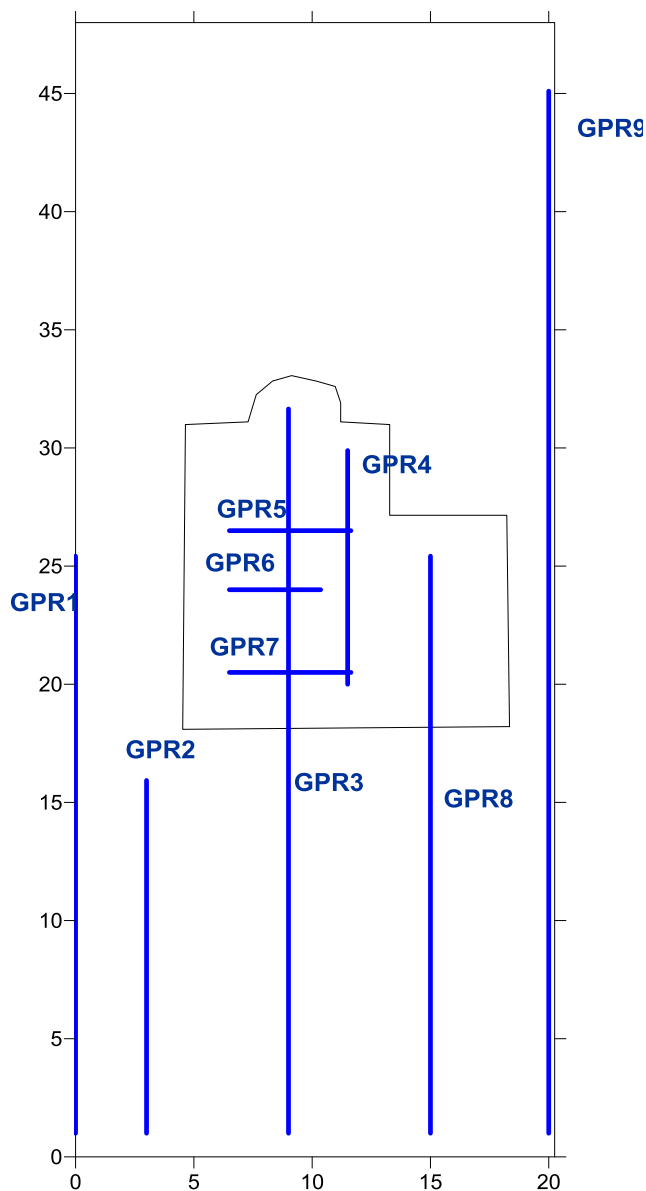
Στην **Εικόνα 4.19** παρουσιάζεται μια παράπλευρη ανομοιογένεια στο μοντέλο των σεισμικών ταχυτήτων στα ανατολικά (δεξιά της εικόνας) η οποία οφείλεται στην υπόγεια κατασκευή που έχει εντοπιστεί σε εκείνο το σημείο με τη μέθοδο των ηλεκτρικών.

Στην **Εικόνα 4.27** γίνεται σαφής αποτύπωση του αδιατάρακτου μητρικού πετρώματος, που φαίνεται να ξεκινά σε βάθος 10m από την επιφάνεια του εδάφους.

4.4.5. Μέθοδος γεωραντάρ (GPR)

4.4.5.1. Εισαγωγή

Η τελευταία μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης ήταν η μέθοδος του γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR). Συνολικά έγιναν 9 τομές, οι 6 με διεύθυνση Α-Δ ενώ έγιναν και 3 με διεύθυνση Β-Ν, μέσα στο ναό (Εικόνα 4.28).



Εικόνα 4.28: Κάνναβος μετρήσεων μεθόδου GPR.

Χρησιμοποιήσαμε δύο θωρακισμένες αντένες τα MALA Geoscience, με τις εξής διατάξεις:

- Πηγή και δέκτης η κεραία με 250 MHz
- Πηγή και δέκτης η κεραία με 500 MHz
- Πηγή η κεραία με 250 MHz και δέκτης η κεραία με 500 MHz

Η τρίτη διάταξη έδωσε πιο λεπτομερή και ευδιάκριτη αποτύπωση, κάτι που θα φανεί και στα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν.



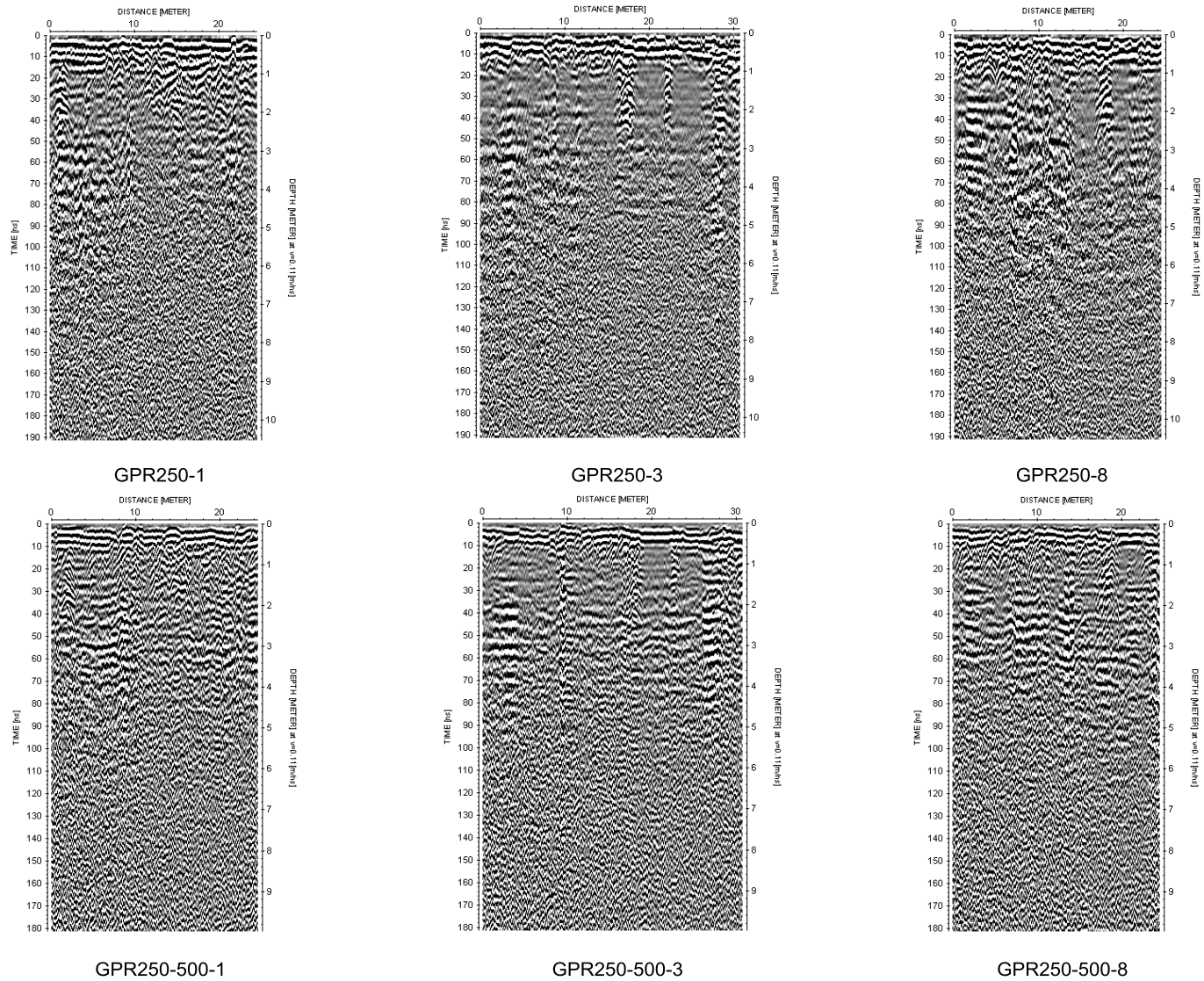
Εικόνα 4.29: Μετρήσεις γεωραντάρ μέσα στο ναό

4.4.5.2. Επεξεργασία των μετρήσεων

Μετά από τη λήψη των δεδομένων, έγινε επεξεργασία τους από τον επιβλέποντα καθηγητή, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα REFLEXW της Sandmeier Scientific Software. Τα στάδια της επεξεργασίας ήταν τα εξής:

1. Subtract – mean (dewow)
2. Move start – time
3. Manual gain (y)
4. Background removal
5. Band – pass frequency

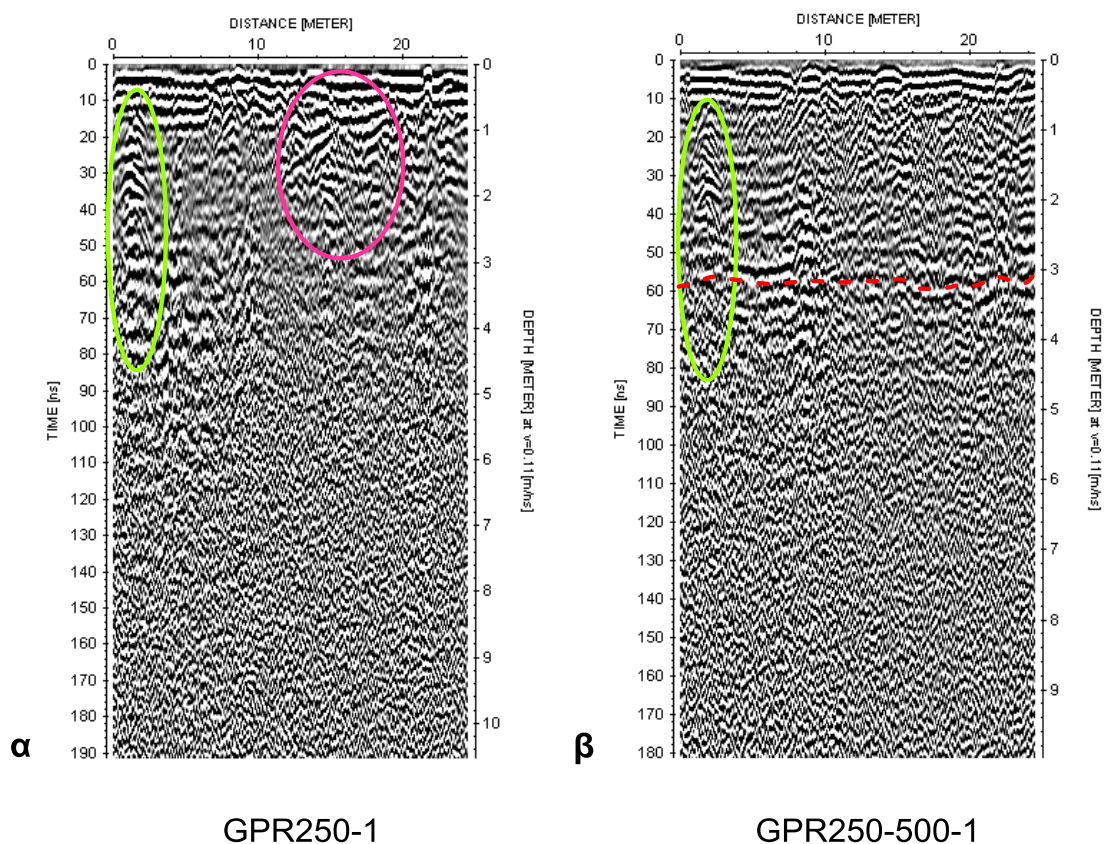
Μετά το πέρας της επεξεργασίας, οι εικόνες των μοντέλων επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer ώστε να εντοπιστούν ενδεχόμενες ανωμαλίες ή στρωματογραφία. Παρουσιάζονται (**Εικόνα 4.30**) τα αποτελέσματα της επεξεργασίας για τις τομές GPR1, GPR3 και GPR8 για τις μετρήσεις με πηγή και δέκτη 250MHz και για την περίπτωση με πηγή 250MHz και δέκτη 500MHz.



Εικόνα 4.30: Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων της μεθόδου GPR για τις τομές GPR1, GPR3 και GPR8 για την περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκε πομπός και δέκτης 250 MHz και για την περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκε πομπός 250MHz και δέκτης 500MHz.

4.4.5.3. Τομές Γεωραντάρ

- Τομή GPR1



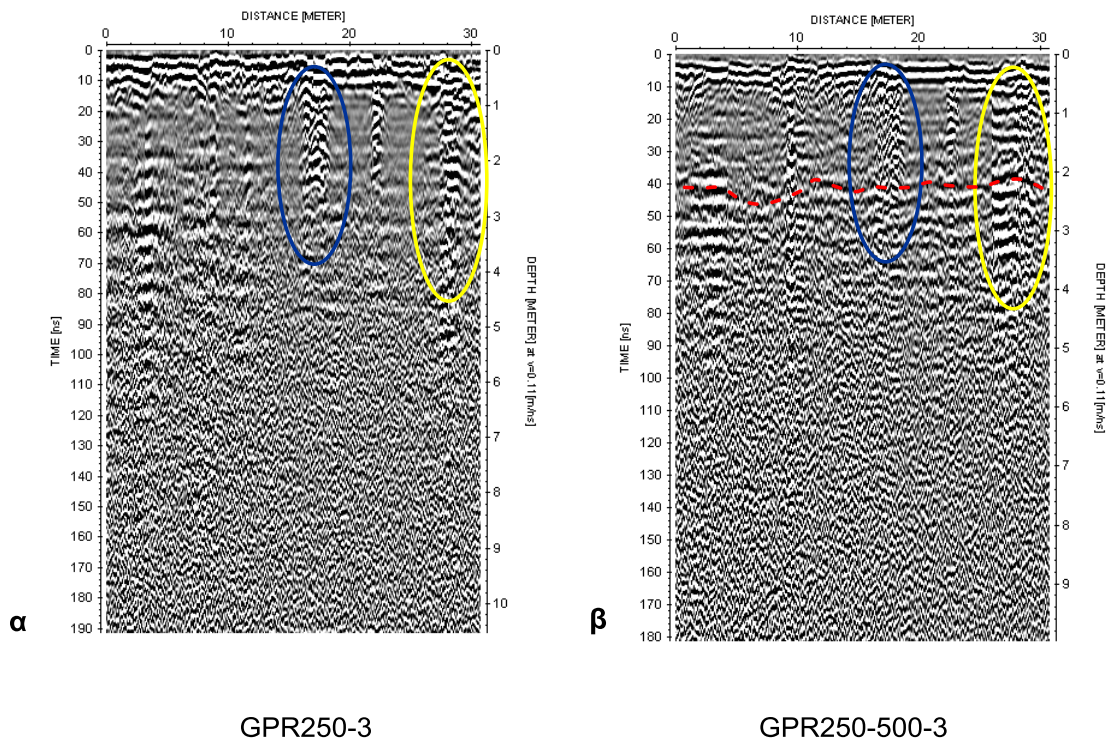
Εικόνα 4.31: α) Τομή GPR1 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz β) Τομή GPR1 με συνδυασμό πομπού 250MHz και δέκτη 500MHz.

Στο δυτικό τμήμα της τομής (αριστερά και στην **Εικόνα 4.31α** και **β**) παρατηρούμε πολλαπλές ανακλάσεις, σημειωμένες με πράσινο χρώμα, οι οποίες δεν μπορεί παρά να οφείλονται σε κάποια μεταλλική δομή.

Στην **Εικόνα 4.31α** έχει σημειωθεί με ροζ χρώμα μια περιοχή όπου επίσης φαίνεται κάποια μεταβολή σε σχέση με το γύρω χώρο, η οποία είχε εντοπιστεί και με την ηλεκτρική μέθοδο. Πιθανά πρόκειται για κάποιο χώρο απόθεσης.

Στην **Εικόνα 4.31β**, εντοπίζεται ένας οριζόντιος σε βάθος περίπου 3m, ο οποίος αποτελεί και την οροφή του υποβάθρου.

- Τομή GPR3



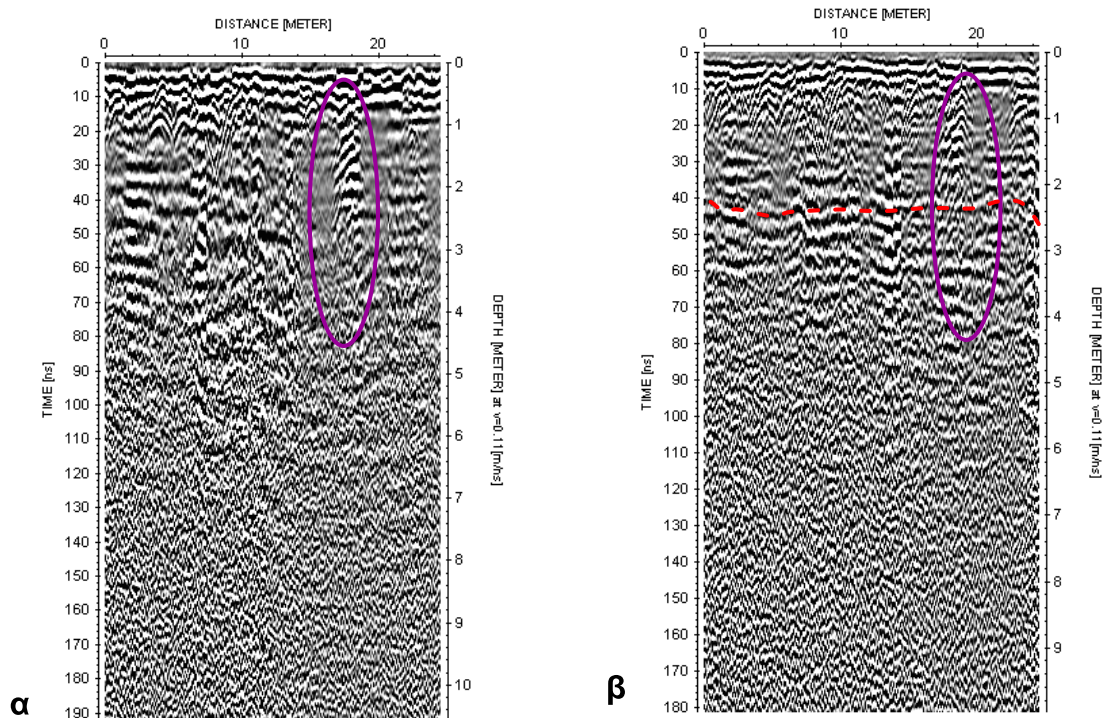
Εικόνα 4.32: α)Τομή GPR3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz β)Τομή GPR3 με συνδυασμό πομπού 250MHz και δέκτη 500MHz.

Η τομή GP3 περνά κάτω από την εκκλησία. Στην **Εικόνα 4.32α** και **β** έχει σημειωθεί με μπλε χρώμα μια περιοχή σε απόσταση 15-20m από την αρχή των μετρήσεων, όπου πιθανά υπάρχει κάποια μεταλλική δομή, πολύ κοντά στην επιφάνεια. Πρόκειται για τον τάφο που εντοπίστηκε με την ηλεκτρομαγνητική και την ηλεκτρική μέθοδο.

Επίσης, και στις δύο εικόνες έχει σημειωθεί με κίτρινο χρώμα σε απόσταση 28m από την αρχή των μετρήσεων, το υπόγειο που επίσης είχε εντοπιστεί με τις προηγούμενες μεθόδους.

Ο ορίζοντας του υποβάθρου εντοπίζεται στην **Εικόνα 4.32β** σε βάθος 2m.

- Τομή GPR8



GPR250-8

GPR250-500-8

Εικόνα 4.33: α)Τομή GPR3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz β)Τομή GPR3 με συνδυασμό πομπού 250MHz και δέκτη 500MHz.

Και στο χώρο κάτω από το παρεκκλήσι (ανατολικό τμήμα της τομής GPR8) εντοπίζεται κάποιο μεταλλικό αντικείμενο, σε απόσταση 18-20m από την αρχή της μέτρησης, που έχει σημειωθεί με μωβ χρώμα στην **Εικόνα 4.33α** και **β**. Και αυτή η ένδειξη επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, και πρόκειται και εδώ πιθανά για κάποιο τάφο.

Ο ορίζοντας του υποβάθρου εντοπίζεται στην **Εικόνα 4.33β** σε βάθος περίπου 2m.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Συμπεράσματα και σχόλια

5.1. Συμπεράσματα

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αποτύπωση των σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή της Μονής Καισαριανής, ο εντοπισμός διάφορων δομών και ο υπολογισμός των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων.

Αρχικά έπρεπε να γίνει μελέτη της γεωλογίας της περιοχής και ιστορικών στοιχείων που σχετίζονται με την ιστορία της Μονής Καισαριανής. Στη συνέχεια έπρεπε να γίνει σχεδιασμός της έρευνας και επιλογή των καταλληλότερων μεθόδων με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής αλλά και το πρόβλημα που έπρεπε να επιλύσουμε. Ανατρέξαμε στη διεθνή βιβλιογραφία για να βρούμε παρόμοιες περιπτώσεις γεωφυσικής έρευνας. Στην εργασία παρουσιάζονται τρεις τέτοιες περιπτώσεις (case studies).

Στην εκκλησία της Αγ. Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη έγινε γεωφυσική έρευνα στα πλαίσια προγράμματος ανακατασκευής της. Η έρευνα είχε στόχο να εξεταστεί η θεμελίωση του κτιρίου και να εντοπιστούν ερείπια από παλαιότερες κατασκευές. Αποφασίστηκε εφαρμογή της μεθόδου GPR και της σεισμικής μεθόδου. Για τη μέθοδο του Γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε σύστημα πομπού – δέκτη 250MHz και τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπέδειξαν τα όρια του βραχώδους υποβάθρου ενώ, παράλληλα αποτυπώθηκαν και υπόγειες κατασκευές. Με τη σεισμική μέθοδο, αξιοποιώντας τις τιμές των σεισμικών ταχυτήτων, αποδείχθηκε ότι η εκκλησία είναι χτισμένη πάνω στο σκληρό, βραχώδες υπόβαθρο.

Στην εκκλησία της Καπνικαρέας στην Αθήνα χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρική μέθοδος υπήρχε η εκτίμηση ότι οι ζητούμενοι στόχοι βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Γι' αυτό το λόγο, αλλά και γιατί οι ερευνητές εκτιμούσαν ότι η ύπαρξη αργιλώδους υλικού στο έδαφος ήταν πιθανή, η χρήση Γεωραντάρ αποφεύχθηκε. Για τη γεωηλεκτρική μέθοδο, έγινε χρήση μεταλλικού πλακιδίου που εφαρμόστηκε στο δάπεδο με ειδικό αγωγίμο τζελ, αντικαθιστώντας τα ηλεκτρόδια όπου ήταν απαραίτητο, κάτι που έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα συμπεράσματα της μεθόδου ήταν ικανοποιητικά και σε συνδυασμό με ορισμένες προϋπάρχουσες γεωτρήσεις αλλά και κάποια ιστορικά δεδομένα, οι ερευνητές είχαν αποτελέσματα.

Στο χωριό Occhiola της Σικελίας, έγινε συνδυασμός των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής μεθόδου με τα αποτελέσματα της σεισμικής μεθόδου, ο οποίος, σύμφωνα με τους ερευνητές, βοήθησε πολύ στη σαφή ερμηνεία των εκάστοτε ανωμαλιών του υπεδάφους. Έγινε 3D απεικόνιση των εκάστοτε μετρούμενων τιμών και για τις δύο μεθόδους, κάτι που, σύμφωνα με τους ερευνητές, βοήθησε πολύ στο χωρικό προσδιορισμό των υπαρχόντων αρχαίων ερειπίων.

Διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή της σεισμικής, της ηλεκτρικής και της μεθόδου GPR, μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με το πρόβλημα που είχαμε να αντιμετωπίσουμε, ενώ, αποφασίστηκε να γίνει εφαρμογή και της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου. Συνολικά, από την εφαρμογή των τεσσάρων μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο αποτυπώθηκε η κατανομή των τιμών της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας στην περιοχή κάτω από τη Μονή. Στο χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m εντοπίστηκε μια περιοχή σχετικά υψηλότερων ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, η οποία αποτυπώνει περιοχή χαλαρών υλικών, κάτι που επιβεβαιώθηκε και από το χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 6m. Δίνεται έτσι μια εικόνα του υποβάθρου και υποδεικνύεται ότι η μονή είναι χτισμένη πάνω σε συνεκτικό χώρο ή αδρομερές υλικό. Και στους δύο χάρτες για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m εντοπίστηκε περιοχή ακριβώς κάτω από την είσοδο του ναού με μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας. Το γεγονός ότι η μεταβολή αυτή είναι απότομη μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για μεταλλικό αντικείμενο, πιθανά τάφο, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω από κενό χώρο ή κάποια συνεκτική δομή. Αντίστοιχη υπόγεια κατασκευή υπάρχει και κάτω από το παρεκκλήσι.

Το γεγονός ότι ο ναός είναι χτισμένος πάνω σε αδρόκοκκα υλικά επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής μεθόδου. Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, επομένως, μας έδωσε τη δυνατότητα ακριβούς απεικόνισης της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης. Έτσι, και από στις τρεις γεωηλεκτρικές τομές που παρουσιάστηκαν στην εργασία, διακρίνεται ορίζοντας σε βάθος περίπου 2-3m, κάτω από τον οποίο οι ειδικές αντιστάσεις είναι μεγαλύτερες, αφορούν δηλαδή, αδρομερή υλικά. Επιπλέον, η ηλεκτρική μέθοδος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αποτύπωση με λεπτομέρεια στόχων που βρίσκονται στο υπεδάφος. Έτσι, επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη της υπόγειας δομής ανθρωπογενούς προέλευσης (τάφος) κάτω από την εκκλησία, που είχε εντοπιστεί και με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, ενώ εντοπίστηκαν και άλλες υπόγειες κατασκευές. Ακόμα, υπολογίστηκε με μεγάλη ακρίβεια η γεωμετρία ενός υπόγειου αγωγού, που περνά κάτω από την εκκλησία, για την ύπαρξη του οποίου μας είχαν ενημερώσει οι υπεύθυνοι της μονής.

Φάνηκε, λοιπόν, ότι τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής και της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου ήταν σύμφωνα, κάτι που επιβεβαιώνει την επιτυχία και των δύο μεθόδων, και μας έδωσαν τη δυνατότητα να εντοπίσουμε διαφοροποιήσεις του υπεδάφους σε σχέση με την περατότητα και την κοκκομετρία. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις ηλεκτρικές τομές ήταν πιο ακριβή και ο συνδυασμός τους με τα δεδομένα των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων μας επέτρεψαν να εκτιμήσουμε πως οι υπόγειοι ορίζοντες εκτείνονται στο χώρο.

Η επόμενη μέθοδος ήταν η σεισμική και τα αποτελέσματά της μας έδωσαν σαφή εικόνα για την κατάσταση του υπεδάφους σε σχέση με τη συνεκτικότητα και φάνηκε ότι οι τιμές των σεισμικών ταχυτήτων αυξάνουν με το βάθος. Επιβεβαιώθηκε η προηγούμενη εκτίμηση ότι το βραχώδες υπόβαθρο ξεκινά σε βάθος περίπου 2m, ενώ φάνηκε ότι σε βάθος 10m ξεκινά το αδιατάρακτο μητρικό πέτρωμα. Βεβαίως, φάνηκε ότι ορισμένες υπόγειες κατασκευές μπορεί να επηρεάσουν τα συμπεράσματα της μεθόδου, καθώς παρατηρήθηκαν ορισμένες έντονες παράπλευρες ανομοιογένειες. Η εικόνα όμως που είχαμε αποκτήσει από τις προηγούμενες μεθόδους ξεκαθάρισε την αιτία αυτών των ανομοιογενειών, χωρίς να δημιουργηθεί δυσκολία στις εκτιμήσεις μας. Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι και τα συμπεράσματα από τη σεισμική μέθοδο ήρθαν σε

συμφωνία με την προηγούμενη μελέτη και ενίσχυσαν την βεβαιότητα των εκτιμήσεών μας.

Τελευταία μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν αυτή του Γεωραντάρ, τα αποτελέσματα της οποίας επεξεργάστηκε ο επιβλέπων καθηγητής και με σκοπό την πιο ευρεία και ολοκληρωμένη παρουσίαση της γεωφυσικής έρευνας, παρουσιάστηκαν στη διπλωματική αυτή εργασία, τρεις από τις τομές που έγιναν. Η μέθοδος μας έδωσε τη δυνατότητα επί τόπου να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη τοπικών ανωμαλιών ενώ και εδώ με σαφήνεια εντοπίστηκε το βάθος (2-3m) του ορίζοντα που αποτελεί το βραχώδες υπόβαθρο.

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, όπου δεν γινόταν διαφορετικά, όπου δηλαδή αντί για χώμα υπήρχε μάρμαρο ή στο εσωτερικό του ναού. Η χρήση των ειδικών αυτών πλακιδίων φάνηκε, δηλαδή, δεν επηρέασε την αποτελεσματικότητα των μετρήσεων.

Συμπεράσματα μπορούμε να βγάλουμε και για την καταλληλότητα των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στις μεθόδους. Για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτή του CMD-2 για βάθος συνολικής διασκόπησης 3 m και CMD-4 για βάθος συνολικής διασκόπησης 6 m. Για την ηλεκτρική μέθοδο η διάταξη των ηλεκτροδίων Pole – Dipole έδωσε καλύτερα αποτελέσματα. Για το γεωραντάρ η διάταξη με πηγή την κεραία με 250MHz και δέκτη την κεραία με 500 MHz ήταν πιο αποτελεσματική όσον αφορά τη λεπτομέρεια κυρίως των αποτελεσμάτων απ' ότι η διάταξη όπου πηγή και δέκτης ήταν η κεραία 250MHz.

Ο σχεδιασμός των μεθόδων ήταν ο καταλληλότερος. Οι κάρναβοι των μετρήσεων σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι τομές να είναι παράλληλες στην τοπογραφία της περιοχής, με διεύθυνση δηλαδή Α-Δ. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαν να εντοπιστούν ανωμαλίες και μεταβολές που δεν οφείλονται στην τοπογραφία. Επίσης, η διάταξη που χρησιμοποιήσαμε συνέβαλλε και στον περιορισμό του θορύβου από τα κτίρια που υπάρχουν στο χώρο των μετρήσεων, κάτι που θα δημιουργούσε πρόβλημα κυρίως στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο.

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, με την οποία όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις, έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Για ορισμένες ανωμαλίες που εντοπίστηκαν στον χώρο χρειάστηκε να έρθουμε σε επαφή με τους υπεύθυνους της μονής ώστε να εξακριβώσουμε που ακριβώς οφείλονται, και πράγματι, μας ενημέρωσαν για την ύπαρξη υπόγειου αγωγού. Επιβεβαιώθηκε η ανάγκη καλής μελέτης, από όλες της απόψεις, του περιβάλλοντος, της γεωλογίας, της ιστορίας και οποιασδήποτε προηγούμενης μελέτης που αφορούν το χώρο στον οποίο γίνεται η έρευνα.

5.2. Σχόλια

Με βάση τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας σε σχέση με τους στόχους που θέλαμε να επιτύχουμε, αλλά και την εφαρμογή των μεθόδων και τη διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων προκύπτουν ορισμένα σχόλια.

Το ζήτημα της διατήρησης κτιρίων και χώρων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για χώρους με ιστορική σημασία, είναι ένα από τα σημαντικά προβλήματα που καλείται να λύσει ο μηχανικός. Η επιτυχία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε αποδεικνύει τη δυνατότητα των γεωφυσικών μεθόδων στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων γεωτεχνικής φύσης, σαν αυτοτελή μέθοδο αλλά και σαν κομμάτι ευρύτερης μελέτης. Άλλωστε, σε αρκετές περιπτώσεις έρευνας, η εφαρμογή μη καταστροφικών μεθόδων, όπως αυτή της γεωφυσικής, είναι απαραίτητη. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι κατάλληλη, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ανάλογες περιπτώσεις.

Η εφαρμογή των τεσσάρων 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 ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, είναι μια σχετικά σύντομη και ταυτόχρονα οικονομική μέθοδος με την οποία μπορούμε να εξάγουμε κάποια πρώτα συμπεράσματα σε σχέση με τη φύση του υλικού των σχηματισμών του υπεδάφους και τον τρόπο που αυτά εκτείνονται στο χώρο. Πολύ σημαντική είναι η συμβολή της μεθόδου και στον εντοπισμό τοπικών μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας, υποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη αντικειμένων (αγωγών, υπόγειων κατασκευών, έγκοιλων, καλωδίων κλπ) για τα οποία πιθανά να μην έχουμε γνώση.

Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας όπως και η σεισμική μέθοδος, είναι πιο επίπονες και ακριβές μέθοδοι, όμως έχουν ασύγκριτα πλεονεκτήματα από άποψη λεπτομέρειας. Επίσης, μας δίνουν τη δυνατότητα απεικόνισης των εντοπιζόμενων γεωλογικών σχηματισμών σε μεγαλύτερα βάθη. Συνδυάζοντας αυτή την ακριβέστερη εκτίμηση, με τα ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα, μπορούμε να εκτιμήσουμε την έκταση των σχηματισμών στο χώρο. Τέλος, 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 τεσσάρων αυτών μεθόδων, με τη συγκεκριμένη σειρά, μπορεί να είναι αποτελεσματική σε παρόμοιες μελέτες.

Πιθανά, τριδιάστατη αποτύπωση των δεδομένων των μεθόδων να βοηθούσε περισσότερο στην κατανόηση στο χώρο, των ευρημάτων και των σχηματισμών στα οποία αναφέρθηκε η εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Βιβλιογραφία

Αποστολόπουλος, Γεώργιος. 2013. Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Βερβερέλης, Ε. 2011. Εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στον Αστικό Ιστό, για τον Εντοπισμό Στρωματογραφίας και Πεπερασμένων Δομών, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καραλής, Π. 2011. Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Ενταφιασμένων Αρχαιοτήτων στην Περιοχή Κερατέας Αττικής, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κατσαρογιάννης, Σ. 2012. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και πεπερασμένων δομών σε περιοχή της Νήσου Μήλου, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κατσικάτσος Γ., Μέττος Α., Βιδάκης Μ. & Δούνας Α. 1986. Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας κλίμακα 1:50000 – φύλλο Αθήνα – Ελευσίς, ΙΓΜΕ, Αθήνα.

Κουμαντάκης Ι. 1996. Έρευνα Υδρογεωλογικών Συνθηκών και Καθεστώτος Εκμετάλλευσης Υπογείων Νερών Λεκανοπεδίου Αθηνών – Α' Φάση, Τεύχος 1996 Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Λεονταράκης, Κ. 2011. «Γεωφυσικές Διασκοπήσεις Εντός Γεωτρήσεων και Σηράγγων», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Λούης, Ι. 2003. Εισαγωγή στη Γεωφυσική Έρευνα – Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης, Σημειώσεις Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα.

Μαυρομάτης, Δ. 2007. Συνδυασμός Στρωματογραφικών Δεδομένων και Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών για τον εντοπισμό του Προολοκαινικού Υποβάθρου στην περιοχή Πειραιά – Νέου Φαλήρου, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ορλάνδος Αναστάσιος. 1923. Μεσαιωνικά μνημεία της πεδιάδας των Αθηνών και των κλιτύων του Υμηττού – Πεντελικού, Πάρνηθος και Αιγάλεω.

Παπαδέας Γ. 2003 Γεωλογικός Χάρτης Αττικής κλίμακας 1:50000 – Επεξηγηματική μελέτη, ΙΓΜΕ, Αθήνα.

Παπαδόπουλος, Ταξιάρχης. 2008. Εισαγωγή στη Γεωφυσική, εκδόσεις Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Πολυχρονοπούλου, Κ. (2005) «Αποτύπωση των Στρωμάτων του Υπεδάφους με τις Μεθόδους της Σεισμικής Διάθλασης και της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ταταρης Α., Κούνης Γ. 1969. Η γεωλογική ενότητα των προνεογενών – μεσοζωικών σχηματισμών της Αττικής, Βοιωτίας, Λοκρίδος και ΒΑ Πελοποννήσου, Δελτίο Ε.Γ.Ε., Τόμος VII, Τεύχος 2, σελ. 137-154, Αθήνα.

Τρικαλλινός Ι. 1958 Συμβολή εις την έρευναν της τεκτονικής δομής της Ελλάδος. Περί της παρουσίας Κιθαιρώνος λιθανθρακοφόρων στρωμάτων και τόφφων, τα οποία κείνται ασυμφώνως επί του κρυσταλλοσχιστώδους, Πρακτικά Ακαδημίας Αθηνών, τόμος 65, σελ 96-102, Αθήνα.

CMD. 2013 Electromagnetic Conductivity Meter User Manual

Dalan, R. A. 2006. Magnetic Susceptibility. In Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective, edited by J. K. Johnson, pp. 161-203. University of Alabama Press, Tuscaloosa.

Geonics Instruments for Engineers, Geophysicists, Geologists, Military, Archaeologist, Agriculture, and Farming, <http://geonicsrental.com/>

IRIS INSTRUMENTS, 2003: SYSCAL Pro. Manual Guide

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002. An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd Editorial Offices.

Lepsius Richard .1983. Geologie von Attika, Zeitschr. F. prakt, Geol., 4m 196 S., Karte 1:25000, Berlin.

Leucci G., Greco F., De Giorgi L., Mauceri R. 2007. Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiola (Sicily, Italy). Journal of archaeological Science.

Loke M. H. 2001. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.

Loke M. H. 2002. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Marinos G. & Petrascheck W. 1956. ΛΑΥΡΙΟΝ, Ι.Γ.Ε.Υ. Γεωλογικά και Γεωφυσικά μελέται, τόμος IV, τεύχος 1, σελ 247.

RES2DINV, 2D Resistivity and IP Inversion. 1995 – 2001, Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Version 3.4, Geotomo Software, Malaysia.

Sindowski K. H. 1948. Der geologische bau von Attika, Ann. Geol. De Pays Hell., v. 2, pp. 163-218, Athenes.

Tsokas G.N., Tsourlos P.I., Vargomezis G., Novack M. 2007. Non-destructive Electrical Resistivity Tomography for Indoor Investigation: the Case of Kapnikarea Church in Athens. Archaeological Propection.

Yilmaz Oz. 2013. Geophysical investigations of historic buildings – A case study of the Great Church of St. Sophia. The Leading Edge

