



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΝΑΟ ΤΟΥ  
ΗΦΑΙΣΤΟΥ ΣΤΟ ΘΗΣΕΙΟ**



**ΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**  
**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΡ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ**  
**ΑΘΗΝΑ, 2015**



*Η επιστήμη είναι δεδομένα. Ακριβώς όπως τα σπίτια χτίζονται με τούβλα, έτσι και η επιστήμη χτίζεται με δεδομένα. Αλλά όπως ένας σωρός τούβλα δεν κάνει ένα σπίτι, έτσι και μια συλλογή δεδομένων δεν είναι απαραίτητα επιστήμη.*

*Ανρί Πουανκαρέ, 1854-1912, Γάλλος μαθηματικός*

## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Γιώργο Αποστολόπουλο για την αμέριστη στήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε τόσο στο κομμάτι της συγγραφής όσο και στην διαδικασία λήψης μετρήσεων πεδίου. Εύχομαι μέσα από την άψογη δουλειά του στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Ε.Μ.Π. , να συνεχίσει να αποτελεί πηγή έμπνευσης για τους φοιτητές που θέλουν να ασχοληθούν με την Γεωφυσική όπως αποτέλεσε και για εμένα.

Επίσης, πολύτιμη και ουσιαστική ήταν η βοήθεια του κυρίου Γεώργιου Αμολοχίτη, γεωφυσικού και μέλους Ε.Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Μεταλλευτικής, στον οποίο χρωστώ ένα μεγάλο ευχαριστώ για την συμμετοχή του στις μετρήσεις πεδίου και για τις εύστοχες παρατηρήσεις και συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω την εφορία αρχαιοτήτων Αθηνών που έδωσε την άδεια για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις στον χώρο και για την συνολική της βοήθεια στην υποστήριξη της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα, ευχαριστώ ιδιαίτερα τους φίλους και συμφοιτητές μου Γιώργο Μακρή και Βασίλη Μακρή με τους οποίους μοιραστήκαμε την κοινή μας πορεία στην σχολή από το πρώτο έτος, για την συμμετοχή τους στην διεξαγωγή των μετρήσεων καθώς και όλα τα παιδιά του Εργαστηρίου Γεωφυσικής που συνέβαλλαν σε αυτές .

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Βασίλη και Αριστέα καθώς και τον αδερφό μου Φώτη των οποίων η στήριξη ήταν ανεκτίμητη από την αρχή έως το πέρας των σπουδών μου.

*Κωνσταντίνος Μιχαλόπουλος*

*Αθήνα, 2015*

## **Περίληψη**

### **«Γεωφυσική έρευνα στο Ναό του Ηφαίστου στο Θησείο»**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το υπέδαφος του Ναού του Ηφαίστου στο Θησείο με γεωφυσικές μεθόδους. Ο σκοπός της έρευνας είναι ο εντοπισμός της στρωματογραφίας, της λιθολογίας, κοκκομετρίας, της συνεκτικότητας των στρωμάτων και αν υπάρχουν τοπικές δομές (έγκοιλα, ανθρωπογενείς κατασκευές, κλπ.), που παρουσιάζουν διαφορετικές γεωφυσικές ιδιότητες (ειδική αντίσταση ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, σεισμικές ταχύτητες). Αρχικά, έγινε σχεδιασμός της γεωφυσικής έρευνας με βάση τα ήδη γνωστά γεωλογικά και αρχαιολογικά στοιχεία της περιοχής. Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δύο περιοχές: α) βόρεια του Ναού με την εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου (EMI) με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών τοπικών δομών (ανθρωπογενών κατασκευών) και β), γύρω από τον Ναό με την εφαρμογή κατά σειρά των μεθόδων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) και της Σεισμικής τομογραφίας (μέθοδος σεισμικής διάθλασης). Τα δεδομένα που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτών των μη καταστρεπτικών γεωφυσικών μεθόδων, μετά από επεξεργασία και ερμηνεία στο Εργαστήριο κατέληξαν σε γεωφυσικά μοντέλα του υπεδάφους.

Στην πρώτη περιοχή βορείως του Ναού αποτυπώθηκε η ευρύτερη γεωλογική δομή του υπεδάφους με βάση την κατανομή της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες σε συνολικό βάθος 3μ. Επίσης διαπιστώθηκε ότι το υπάρχον πηγάδι είναι πληρωμένο με αργιλικό υλικό, χωρίς να φαίνεται να υπάρχει συνέχεια του μέσω αγωγού προς κάποια κατεύθυνση.

Στην περιοχή του Ναού στη συνέχεια, έγινε σαφής αποτύπωση των γεωλογικών σχηματισμών σε σχέση με την συνεκτικότητα, την περατότητα, την στρωματογραφία και την κοκκομετρία, ενώ παράλληλα εντοπίστηκε το βάθος στο οποίο εκτιμάται ότι βρίσκεται η οροφή του συνεκτικού βραχώδους υποβάθρου καθώς και αποτυπώθηκε με σαφήνεια η αυτόχθονη φάση του Αθηναϊκού Σχιστολίθου επάνω στην οποία οικοδομήθηκε ο Ναός. Η γεωλογική αυτή φάση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον μηχανικό σε ότι αφορά την συνεκτικότητα, την κοκκομετρία καθώς και την υδροπερατότητα των πετρωμάτων και αποτελείται από ασβεστολίθους διαφορετικών τύπων μέσα στο σχιστόλιθο. Η διαφοροποίηση μεταξύ των χαλαρών επιφανειακών ιζημάτων και του βραχώδους υποβάθρου έγινε μέσω της σεισμικής μεθόδου ενώ στο βραχώδες υπόβαθρο η διαφοροποίηση μεταξύ ασβεστολίθων και σχιστολίθου έγινε μέσω της γεωηλεκτρικής τομογραφίας.

Τελικά ο Ναός του Ηφαίστου εδράζεται σχεδόν άμεσα στο βραχώδες υπόβαθρο το οποίο έχει αμυδρή κλίση από Νότο προς Βορρά.

Τα πέντε κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας, περιλαμβάνουν τα εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται γενικά στοιχεία για την εφαρμογή της γεωφυσικής έρευνας.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στο θεωρητικό υπόβαθρο των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) την γεωηλεκτρική τομογραφία (ERT) και τη μέθοδο σεισμικής διάθλασης. Ακόμη αναφέρονται τα όργανα που

χρησιμοποιήθηκαν και στις τρεις μεθόδους, περιγράφονται οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται και ο τρόπος επεξεργασίας των στοιχείων, για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται σε εφαρμογές (CaseStudies) των συγκεκριμένων μεθόδων σε παραπλήσιες με το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας έρευνες ανά τον κόσμο σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Μια πρώτη αναφορά γίνεται σε εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής και ηλεκτρικής τομογραφίας στο κάστρο Occhiola στην Ιταλία για τον προσδιορισμό του υπεδάφους και των αρχαιολογικών δομών. Η δεύτερη εφαρμογή αναφέρεται στην εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας και του GPR στον ναό της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη, για να εξεταστεί η θεμελίωση της. Η τρίτη εφαρμογή αναφέρεται στον προσδιορισμό της σύστασης του υπεδάφους ενός χωμάτινου φράγματος στην Cittavecchia (Ιταλία) με τις μεθόδους της σεισμικής και ηλεκτρικής τομογραφίας. Η τέταρτη και τελευταία εφαρμογή αναφέρεται στην εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή του παλατιού του Habib Sakakini στην Αίγυπτο προκειμένου να προσδιοριστούν με ακρίβεια τα εδαφικά στρώματα επάνω στα οποία είναι κτισμένο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται κατ' αρχάς αναφορά στην ιστορία και γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Ναού του Ηφαίστου στο Θησείο. Παρουσιάζονται επίσης οι περιοχές έρευνας, τα όργανα, οι μέθοδοι και οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε περιοχή έρευνας ξεχωριστά. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων που ελήφθησαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η γεωφυσική έρευνα καθώς και σχόλια και παρατηρήσεις για την εφαρμογή της σε αρχαιολογικούς χώρους. .

**Λέξεις κλειδιά:** γεωφυσικές μέθοδοι, ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, ηλεκτρική μέθοδος, σεισμική μέθοδος, Ναός του Ηφαίστου, Θησείο, αρχαιολογία, Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

## **Abstract**

"Geophysical research in the Temple of Hephaestus in Thission"

The subject of this thesis is the use of geophysical methods to detect the subsoil of the Temple of Hephaestus in Thission, Athens, to provide useful information to the engineers for the protection of the monument from the earthquake activity.. The purpose of the survey is to identify the stratigraphy, the lithology - grain size- consistency of the layers and if there are local structures (cavities, man-made structures, etc), all showing different geophysical properties (resistivity or electrical conductivity, seismic velocities). Initially the planning of the geophysical research was based on already known geological and archeological evidence of the area. The geophysical survey was conducted in two regions: a) an area northern to the Temple with the implementation of electromagnetic methods (EMI) to identify possible local structures (man-made structures) and b) the area around the Temples with the consecutive application of the geoelectrical tomography (ERT) and seismic tomography (seismic refraction) methods. The data derived from the application of these non-destructive geophysical methods, led to the geophysical models of the subsoil, after processing and interpretation in the Laboratory. In the first region northern to the Temple, the broader geological structure of the subsurface was imprinted based on the distribution of conductivity and magnetic susceptibility to electromagnetic maps to a total depth of 3m. Also it was found that the existing well is filled with clay material, without appearing to have follow-through pipeline to some direction. Subsequently a clear mapping of the geological formations in relation to consistency, permeability, stratigraphy and grain size took place in the Temples surroundings, while the depth to the bedrock was detected. Also the various phases of the Athenian Shale (alterations of schist and limestone) were clearly detected, on which the Temple was built. These particular geological phases are of great interest for the engineers in terms of consistency, the granulometry and permeability of the rock. The diversification between loose surface sediment and bedrock was made through the seismic method whereas in the bedrock the differentiation between limestone and schist was done through geoelectrical tomography (ERT). Ultimately the Temple of Hephaestus sits almost directly on bedrock which has a slight slope from south to north.

The five chapters of this thesis include the following:

In the first chapter general information on the application of geophysical research are presented.

The second chapter deals with the theoretical background of the geophysical methods used, namely the electromagnetic method (EMI), the geoelectric tomography (ERT) and seismic refraction method. Furthermore the instruments used in all three methods are listed. The provisions used and method of processing data in order to reach to conclusions are also described.

The third chapter refers to the presentation of case studies with the application of geophysical methods in monuments of cultural heritage around the world in geotechnical/archaeological projects. The first case study refers to the implementation of the seismic and electrical resistivity tomography methods in Castle Occhiola, in Italy, in order to determine the subsoil and archeological structures. The second relates to the application of the seismic tomography and the GPR method at the Temple of Agia Sophia in Constantinople in order to examine its foundations.

The third relates to the identification of the subsoil of an embankment dam Cittavecchia (Italy) with the methods of seismic and electrical resistivity tomography. The fourth and last application refers to the implementation of the electrical resistivity tomography method in the palace area of Habib Sakakini in Egypt in order to accurately determine the soil layers upon which it is built.

In the fourth chapter the history and geology of the region of the Temple of Hephaestus in Thission are presented. The survey areas, the instruments, methods and devices used for each survey area separately are also presented. The results of processing and analysis of the measurements are also shown .

The fifth chapter presents the final conclusions drawn by the geophysical survey along with the comments and observations on the implementation in archeological sites.

**Keywords:** geophysical methods, electromagnetic method, electrical method, seismic survey, Temple of Hephaestus Thission, archeology, Athenian Slate





**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>12</b>
<b>2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>18</b>
2.1.Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος.....	18
2.1.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα .....	18
2.1.3 Μεθοδολογία Μετρήσεων αγωγιμότητας.....	19
2.1.4. Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων - Εφαρμογές της μεθόδου .....	21
2.1.5 Εφαρμογές της μεθόδου. ....	23
2.1.6 Επαγωγή.....	25
2.1.7 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	27
2.1.8. Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.....	28
2.1.9. Συστήματα Μέτρησης Φάσης.....	28
2.1.10. Ηλεκτρομαγνητικό Όργανο Μέτρησης.....	30
2.1.11. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις αγωγιμότητας .....	32
2.1.12. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας .....	32
2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ .....	34
2.2.1. Γενικά .....	34
2.2.2. Ηλεκτρικές μέθοδοι.....	34
2.2.3. Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης .....	35
2.2.3.1 Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης .....	36
2.2.3.2. Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο .....	39
2.2.3.3. Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο .....	41
2.2.3.4 Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο .....	41
2.2.3.5. Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση .....	42
2.2.3.6. Διατάξεις ηλεκτροδίων .....	42
2.2.3.7 Εξοπλισμός Υπαίθρου .....	44
2.2.4. Οριζόντιες ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις .....	45
2.2.5. Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις .....	45
2.2.6. Μέθοδος Διάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας .....	47
2.2.7. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ηλεκτρικής Μεθόδου.....	50
2.3.ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	51
2.3.1. Εισαγωγή.....	51
2.3.2. Γενικά .....	51
2.3.3. Ελαστικές Σταθερές.....	52
2.3.4. Σεισμικά Κύματα.....	54
2.3.5. Ταχύτητες διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων εντός των Διαφόρων Πετρωμάτων .....	56
2.3.6. Εξασθένιση της Σεισμικής Ενέργειας.....	58
2.3.7. Εξοπλισμός.....	58
2.3.8. Σεισμικές Ακτίνες σε Μέσο με Στρώσεις .....	60
2.3.8.1. Ανάκλαση και διάδοση σεισμικών ακτίνων που προσπίπτουν κατακόρυφα.....	60
2.3.8.2. Ανάκλαση και διάθλαση σεισμικών ακτίνων που προσπίπτουν υπό γωνία .....	62
2.3.8.3. Οριακά διαθλώμενα κύματα .....	63

2.3.8.4. Περίθλαση.....	64
2.3.9. Σεισμική Ανάκλαση και Σεισμική Διάθλαση.....	65
2.3.10. Μέθοδος της σεισμικής διάθλασης.....	65
2.3.10.2. Εργασίες υπαίθρου .....	66
2.3.10.3. Πηγές θορύβου .....	67
2.3.10.4. Καταγραφές της εδαφικής κίνησης .....	68
2.3.10.5. Δρομοχρονικές καμπύλες.....	69
2.3.10.6. Προσδιορισμός της δομής του υπεδάφους.....	70
<b>3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΣΕ ΜΝΗΜΕΙΑ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ.....</b>	<b>78</b>
3.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ ΣΤΟ ΚΑΣΤΡΟ ΟΥΣΣΙΟΛΑ. ....	78
3.1.1. Γεωφυσική Έρευνα .....	79
3.1.2. Γεωηλεκτρική Τομογραφία.....	79
3.1.3. Τομογραφία της σεισμικής διάθλασης.....	81
3.1.4. Συμπεράσματα .....	83
3.2. ΝΑΟΣ ΑΓΙΑΣ ΣΟΦΙΑΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥΠΟΛΗ.....	85
3.2.1. Μέθοδος Γεωραντάρ.....	85
3.2.2. Σεισμική μέθοδος.....	86
3.2.3. Συμπεράσματα .....	87
3.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΧΩΜΑΤΙΝΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ, ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	88
3.3.1. Γεωηλεκτρική τομογραφία.....	89
3.3.2. Σεισμικά.....	90
3.3.3. Συμπεράσματα .....	91
3.4 Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ERT ΣΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΩΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ .ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΠΑΛΑΤΙ ΤΟΥ ΗΑΒΙΒΣΑΚΑΚΙΝΙ. ....	92
3.4.1. Πεδίο εργασιών .....	92
3.4.2. Το Παλάτι El-Sakakini.....	92
3.4.3. Περίληψη της μεθόδου γεωηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) , και της διάταξης των ηλεκτροδίων.....	92
3.4.4. Έρευνα πεδίου ,επεξεργασία δεδομένων και μοντελοποίηση .....	93
3.4.5. Συμπεράσματα .....	94
<b>4. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ: ΘΗΣΕΙΟ, ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΗΦΑΙΣΤΟΥ.....</b>	<b>97</b>
4.1 Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΗΦΑΙΣΤΟΥ (ΘΗΣΕΙΟ).....	97
4.2. ΑΝΑΣΚΑΦΕΣ ΚΑΙ ΑΡΧΑΙΑ ΑΓΟΡΑ.....	99
4.3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	102
4.3.1. Γεωλογία ευρύτερης περιοχής λεκανοπεδίου Αττικής.....	102
4.3.2. Γεωλογία Ναού Ηφαίστου στο Θησείο.....	107
4.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΝΑΟ ΤΟΥ ΗΦΑΙΣΤΟΥ ΣΤΟ ΘΗΣΕΙΟ .....	110
4.4.1. Γενικά .....	110

4.5. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ. ....	114
4.5.1. Γεωφυσική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή του Ναού του Ηφαίστου .....	114
4.5.1.2. Εξοπλισμός.....	114
4.5.1.3. Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες .....	117
4.5.2. Γεωφυσική έρευνα γύρω από τον Ναό του Ηφαίστου. ....	119
4.5.2.1. Ηλεκτρική Μέθοδος .....	119
4.5.2.2. Εξοπλισμός.....	119
4.5.2.3. Επεξεργασία μετρήσεων.....	120
4.5.2.4. Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου.....	121
4.5.2.5. Συνδυαστικά Σχόλια για την Ηλεκτρική μέθοδο .....	132
<b>4.5.2.6. Σεισμική Μέθοδος</b> .....	133
4.5.2.7. Εξοπλισμός.....	133
4.5.2.8. Αποτελέσματα Σεισμικών Μετρήσεων .....	136
<b>4.5.2.9. Ερμηνεία αποτελεσμάτων</b> .....	140
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ</b> .....	<b>142</b>
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	142
5.2 ΣΧΟΛΙΑ.....	144
<b>6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>146</b>



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## 1. Εισαγωγή

### Αντικείμενο και σημασία της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Η Γεωφυσική είναι η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της Φυσικής για να μελετήσει τη Γη. Με την πλατιά αυτή έννοια, η Γεωφυσική μελετάει τις φυσικές ιδιότητες της Γης από το κέντρο της μέχρι και την εξωτερική ατμόσφαιρα, δηλαδή. Περιλαμβάνει την μελέτη της «στερεάς» Γης, της θάλασσας, της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. Έχει επικρατήσει όμως διεθνώς, η Γεωφυσική να ταυτίζεται σχεδόν με τη Φυσική της «στερεάς» Γης, δηλαδή την Φυσική του εσωτερικού της Γης, ενώ για τις άλλες επιστήμες χρησιμοποιούνται ειδικά ονόματα όπως Ωκεανογραφία, Μετεωρολογία, Φυσική της Ατμόσφαιρας κ.λ.π. Από άποψη μεθόδων έρευνας η Γεωφυσική ανήκει στους εφαρμοσμένους κλάδους της Φυσικής, ενώ από άποψη αντικειμένου αποτελεί κλάδο των Γεωεπιστημών όπου ανήκουν η Γεωδαισία, η Γεωλογία, η Γεωχημεία και η Γεωγραφία.

Όπως η επιστήμη της Φυσικής χωρίζεται σε επιμέρους κλάδους, ανάλογα με τα φαινόμενα που μελετάει έτσι και η Γεωφυσική, ή με την στενότερη έννοια του όρου, η Φυσική της «στερεάς» Γης χωρίζεται στους παρακάτω κλάδους:

1. Σεισμολογίας, που μελετά τους σεισμούς και τη δομή του εσωτερικού της γης με τη χρήση των σεισμικών κυμάτων.
2. Γεωδυναμικής, που μελετά τις κινήσεις των μεγάλων επιφανειακών τμημάτων της στερεάς Γης.
3. Βαρυτομετρίας, που μελετά το πεδίο βαρύτητας της Γης.
4. Γεωμαγνητισμού, που μελετά το μαγνητικό πεδίο της Γης.
5. Γεωηλεκτρισμού, που μελετά τις ηλεκτρικές ιδιότητες της Γης.
6. Γεωθερμίας, που μελετά την θερμική κατάσταση του εσωτερικού της Γης.
7. Γεωχρονολογίας, που μελετά της μεθόδους προσδιορισμού της ηλικίας των πετρωμάτων της Γης.
8. Κοσμολογίας, που μελετά τις θεωρίες προέλευσης της Γης.

Η ορθή επιλογή και εφαρμογή μιας γεωφυσικής μεθόδου, βασίζεται στη διαφοροποίηση κάποιας ιδιότητας των πετρωμάτων, από τη μέτρηση των τιμών της οποίας προσδιορίζεται η δομή του υπεδάφους. Τέτοιες ιδιότητες, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη φύση και τη δομή των υπεδάφικών σχηματισμών, είναι η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ελαστικότητα και σε μικρότερο βαθμό η θερμική αγωγιμότητα και η ραδιενέργεια. Ο εντοπισμός μετρήσιμων διαφοροποιήσεων στις παραπάνω ιδιότητες των πετρωμάτων, η κατάλληλη ερμηνεία τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων,

αποτελούν το βασικό σκοπό μιας γεωφυσικής έρευνας. Όμως πρέπει να γίνει γνωστό ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο «ανωμαλίες», δηλαδή σημεία στα οποία

κάποια φυσική ιδιότητα παρουσιάζει επαρκώς διαφορετική τιμή από τα περιβάλλοντα. Αυτό αποτελεί έναν παγκόσμιο περιορισμό, σύμφωνα με τον οποίο δεν μπορούμε να διακρίνουμε οτιδήποτε το ομογενές στη φύση. Μπορούμε μόνο να ξεχωρίσουμε κάτι το οποίο παρουσιάζει κάποιας μορφής χωρική ή και χρονική διαφοροποίηση.

Για να έχουμε τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα πρέπει να κάνουμε σωστή επιλογή γεωφυσικής μεθόδου. Η επιλογή αυτή θα εξαρτάται από το μέγεθος της υφιστάμενης αντίθεσης των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων της περιοχής έρευνας. Για κάθε μέθοδο υπάρχει μια «λειτουργική» φυσική ιδιότητα, στην οποία η μέθοδος είναι ευαίσθητη και, ως εκ τούτου, χρησιμεύει για τον προσδιορισμό των υπεδαφικών «ανωμαλιών». Οι σημαντικότερες μέθοδοι, καθώς και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλεύεται η κάθε μία, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

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

	σεισμικώνκυμάτων - Πλάτη σεισμικώνκυμάτων	
Ραδιομετρική Μέθοδος	Φυσική ραδιενέργεια	Προσδιορισμός της φυσικής; ραδιενέργειας των πετρωμάτων
Θερμική Μέθοδος	Ροή θερμότητας από τοεσωτερικό της γης	Προσδιορισμός της θερμοκρασίαςτων πετρωμάτων

Οι σεισμικές μέθοδοι διακρίνονται κυρίως στις μεθόδους ανάκλασης και διάθλασης. Οι σεισμικές μέθοδοι είναι οι πιο ακριβείς μέθοδοι καθορισμού της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Οι βαρυτικές μέθοδοι έχουν σαν άμεσο στόχο τον προσδιορισμό της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων. Οι μαγνητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό μαγνητισμένων πετρωμάτων. Οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι καθορίζουν την γεωηλεκτρική δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού. Σε ειδικές περιπτώσεις πραγματοποιούνται μετρήσεις της φυσικής ραδιενέργειας (ραδιομετρική μέθοδος) ή της θερμοκρασίας (θερμική μέθοδος).

Κατά την πρώτη περίοδο ανάπτυξης της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, οι σχετικές έρευνες διεξάγονταν κυρίως για τον εντοπισμό υπόγειων μεταλλοφόρων κοιτασμάτων, στη συνέχεια όμως επεκτάθηκαν και στην αναζήτηση πετρελαίου, ενώ αργότερα στράφηκαν προς την κατεύθυνση αντιμετώπισης ποικίλης φύσεως προβλήματα γεωλογικής σύνθεσης και δομής του υπεδάφους.

Η γεωφυσική έρευνα, αν και δίνει μια πολλή καλή εκτίμηση της εικόνας της περιοχής μελέτης, εντούτοις δεν μπορεί να δώσει μοναδικές και μονοσήμαντες λύσεις για μια δεδομένη κατάσταση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί γεωλογικών σχηματισμών θα είχαν ως αποτέλεσμα την ίδια τιμή παρατηρούμενης μέτρησης. Επίσης, αν συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι κάθε έρευνα πεδίου εμπεριέχει ένα ποσοστό πειραματικού σφάλματος και ότι η λήψη των μετρήσεων είναι επιλεκτική (κατά την κρίση του ερευνητή), γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα της έρευνας θα είναι προσεγγιστικά και όχι με μεγάλη ακρίβεια.

Για αυτό το λόγο σε μια γεωφυσική έρευνα για να έχουμε μεγαλύτερη επιτυχία στην ακρίβεια μπορούμε να εφαρμόσουμε περισσότερες από μια γεωφυσικές μεθόδους. Ακόμα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν συχνά συγκρίνονται με αυτά ερευνητικών γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή μελέτης.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ή συνδυασμού μεθόδων, για την αντιμετώπιση του εκάστοτε γεωφυσικού προβλήματος εξαρτάται από δυο παράγοντες. Πρώτα από τη φύση του σχηματισμού, τον οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε, καθώς και του περιβάλλοντος του. Με βάση τη λογική αυτή 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 κοιτάσματος μαγνητίτη, λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης μαγνητικής επιδεκτικότητας που τον χαρακτηρίζει. Αντίστοιχα, σε έρευνες για τον εντοπισμό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, κατάλληλες είναι οι ηλεκτρικές ή οι σεισμικές μέθοδοι, αφού ένα πέτρωμα όταν είναι κορεσμένο παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σεισμικής ταχύτητας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε σχέση με το αντίστοιχο ακόρεστο.

Δεύτερον, εξαρτάται από το στάδιο της έρευνας στο οποίο βρισκόμαστε. Η από αέρος γεωφυσική διασκόπηση χρησιμοποιείται κατά τα προκαταρκτικά στάδια μιας έρευνας, αφού η αναγνώριση με αυτόν τον τρόπο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, δεδομένου ότι κατά αυτό το στάδιο 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.

Από την άλλη, παρά τους περιορισμούς που προκύπτουν λόγω της φύσης της, η γεωφυσική έρευνα είναι ένα εργαλείο γρήγορης και αξιόπιστης διασκόπησης του υπεδάφους, με σχετικά μικρό οικονομικό κόστος. Για αυτό καταλαμβάνει θέση-κλειδί σε ερευνητικά προγράμματα γεωλογικής, γεωτεχνικής και μεταλλευτικής φύσης.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα βασικά πεδία εφαρμογών της γεωφυσικής έρευνας, και οι καταλληλότερες μέθοδοι για κάθε εφαρμογή. Οι μέθοδοι εντός παρενθέσεως χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά ως προς τις υπόλοιπες.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΜΕΘΟΔΟΣ/ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ
Έρευνα για τον εντοπισμό ορυκτών καυσίμων (παγίδες πετρελαίου και φυσικού αερίου, κοιτάσματα λιγνίτη)	· Σεισμική · Βαρυτική · Μαγνητική · (Ηλεκτρομαγνητική)
Έρευνα για τον εντοπισμό μεταλλοφόρων κοιτασμάτων	· Μαγνητική · Ηλεκτρομαγνητική · Ηλεκτρική · Ραδιομετρική
Έρευνα για τον εντοπισμό αποθέσεων αδρανών υλικών (αμμοχάλικα)	· Σεισμική · (Ηλεκτρική) · (Βαρυτική)
Έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων οριζόντων	· Ηλεκτρική · Σεισμική · (Βαρυτική) · (Γεωραντάρ)
Έρευνα για τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων	· Θερμική · Ηλεκτρική · Ηλεκτρομαγνητική
Έρευνα για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους σε χώρους κατασκευής μεγάλων τεχνικών έργων (εργοτάξια)	· Ηλεκτρική · Σεισμική · Γεωραντάρ · (Βαρυτική) · (Μαγνητική)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

## 2.Θεωρητικό μέρος

### 2.1.Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

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 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.)

#### 2.1.2. 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 μοιάσουν 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 επίγειας υγρασίας ή του τύπου υλικού. Τα μικρά κοιλάματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλάματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν πολύ αποτελεσματικά.

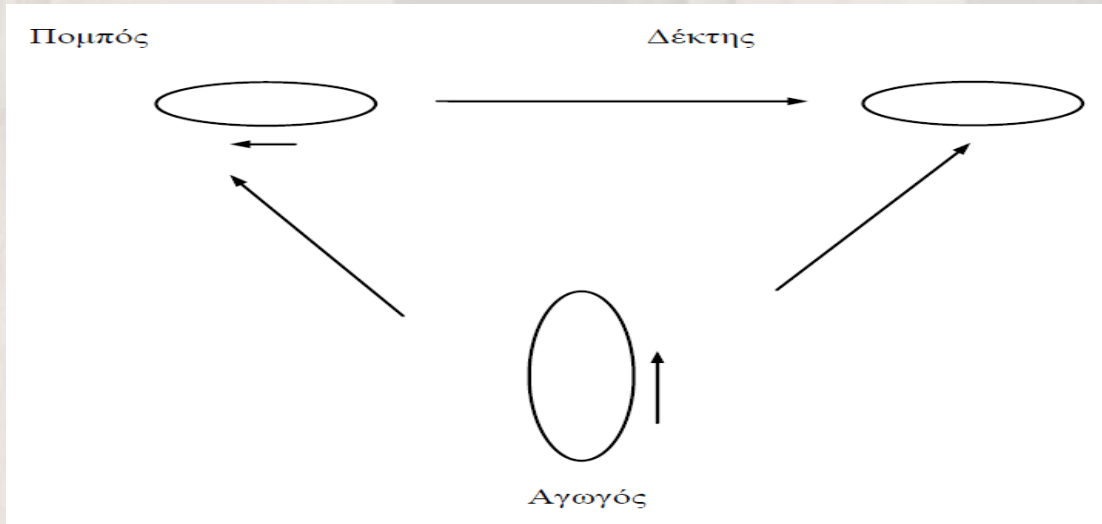


**Εικόνα 2.1:** Ενδεικτικά μηχανήματα Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου. Στο αριστερό μέρος είναι το EM-31, και στο δεξί μέρος είναι το EM-38 (<http://geonicsrental.com/>).

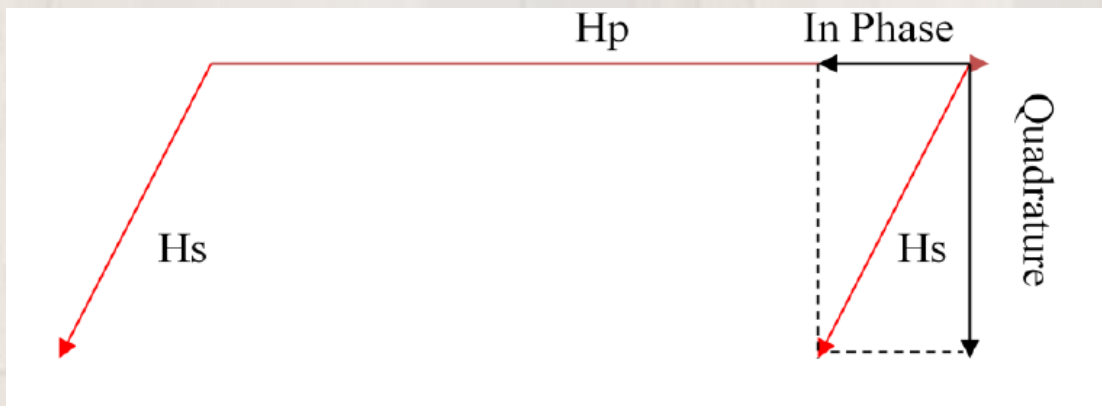
### 2.1.3 Μεθοδολογία Μετρήσεων αγωγιμότητας

Η μέθοδος της «EMI» που μετράει την αγωγιμότητα είναι αρκετά πιο σύνθετη από την αντίσταση, έτσι μόνο οι θεμελιώδεις αρχές εξηγούνται εδώ. Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσω μιας σπείρας ή ενός βρόχου, ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δημιουργείται. Εάν αυτό το πεδίο είναι αρκετά κοντά σε αντικείμενα που είναι κάπως αγωγίμα, τότε το πεδίο θα αναγκάσει τα ρεύματα να ρέουν σε αυτά. Ακριβώς όπως το ηλεκτρικό ρεύμα στη σπείρα δημιούργησε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έτσι και τα ρεύματα στα αντικείμενα θα δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτή η διαδικασία καλείται επαγωγή. Στις αρχαιολογικές έρευνες, τα δεδομένα αγωγιμότητας της «EMI» συλλέγονται συνήθως με δύο πηνία, μια συσκευή εκπομπής σημάτων, ο πομπός και έναν δέκτη σημάτων, με πολλές εναλλακτικές διαμορφώσεις, συμπεριλαμβανομένης της «Slingram», τον οριζόντιο βρόχο, την κινούμενη συσκευή πομπού-δέκτη, το διπλό πηνίο κινούμενης πηγής, και το μετρητή εδάφους-αγωγιμότητας. Ο πομπός δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποκαλούμενο αρχικό πεδίο που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις, και κυρίως προς το έδαφος. Εάν το έδαφος είναι αγωγίμο, ή περιέχει δομές που είναι

αγώγιμες, τα ρεύματα θα ρέουν σε αυτό. Αυτά τα δημιουργημένα ρεύματα, αποκαλούμενα «eddy currents» (επειδή διαμορφώνονται όπως οι στρόβιλοι στην κοίτη ενός ποταμού), θα δημιουργήσουν στη συνέχεια έναν δευτερεύον πεδίο. Τα δευτερεύοντα και αρχικά πεδία μετριούνται από το πηνίο του δέκτη.



Εικόνα 2.2: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής (Μαυρομματής, 2007).



Εικόνα 2.3: Γεωμετρική διατύπωση Inphase και Quadrature (Ευστρατία, 2013)  
Ο λόγος των πλατών του πρωτεύοντος  $H_p$  και του δευτερεύοντος  $H_s$  H/M πεδίων μετριέται απ' ευθείας από την H/M συσκευή.

Η αγωγιμότητα προσεγγίζεται με τη σύγκριση του δευτερεύοντος με το αρχικό πεδίο, και τη μέτρηση της καθυστέρησης φάσης. Η φάση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις σχετικές χρονικές θέσεις δύο σημάτων. Εάν δύο κύματα είναι σε φάση, είναι σύγχρονα. Εάν είναι εκτός φάσης, υπάρχει κάποια καθυστέρηση μεταξύ τους. Υπάρχει ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα που παίρνει για τη διαδικασία επαγωγής να εμφανιστεί και το δευτερεύον πεδίο να παραληφθεί. Όσο υψηλότερη η επίγεια αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση του δευτερεύοντος πεδίου. Αυτή η καθυστέρηση μετριέται με μαθηματική σχέση

που αναλύει το λαμβανόμενο σήμα σε δύο μέρη: in-phase και out-of-phase. Το «in-phase» πρέπει να είναι σε φάση με τον πομπό (αρχικό πεδίο), ενώ το «out-of-phase»(Quadrature) καθυστερεί με γωνία 90 μοιρών.(**Εικόνα 2.3**).

Αν η απόσταση των πομπού και δέκτη ισούται με  $s$ ,  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα,  $I_m$  είναι το φανταστικό μέρος της έντασης του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου και  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό η φαινόμενη ειδική αγωγιμότητα του υπεδάφους ισούται με:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} * \frac{I_m(H_s)}{p} \quad (2.1)$$

#### 2.1.4. 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 υπεδάφια 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 :

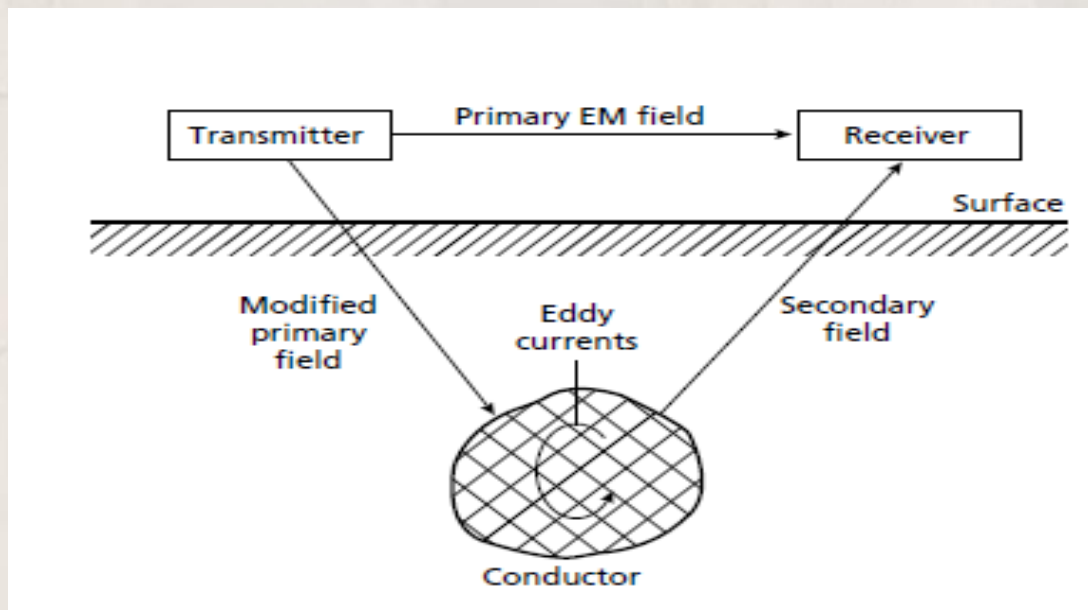
Μικρού βρόγχου. Είναι τα περισσότερα συστήματα που δουλεύουν στον χώρο των συχνοτήτων (EM31, EM34, κλπ.) και κάποια στον χώρο του χρόνου. Κυρίως χρησιμοποιούνται σε περιβαλλοντικές εφαρμογές.

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.



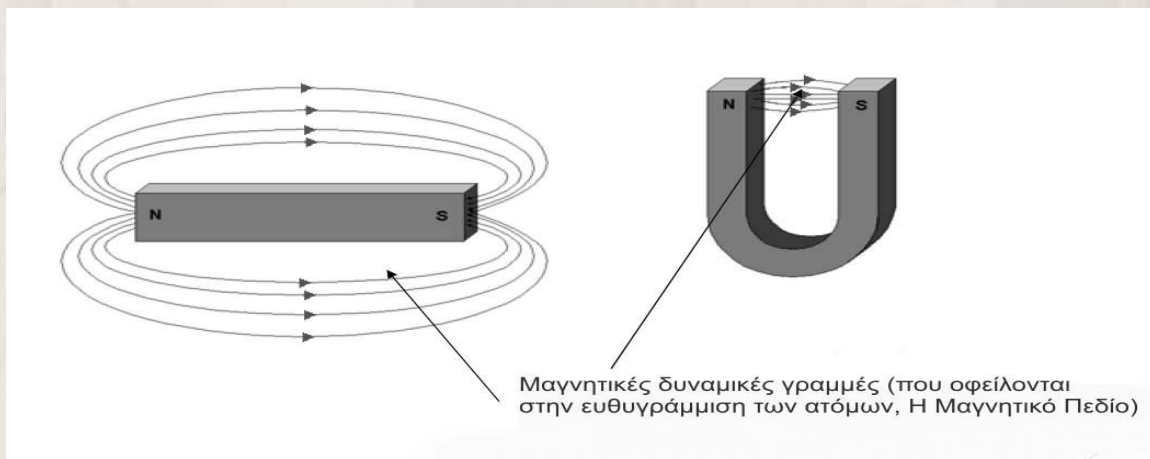
Σχήμα 2.1: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)



Το δευτερογενές πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε συνιστώσες σε φάση και σε εκτός φάσης  $90^\circ$  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.

### 2.1.5 Εφαρμογές της μεθόδου.

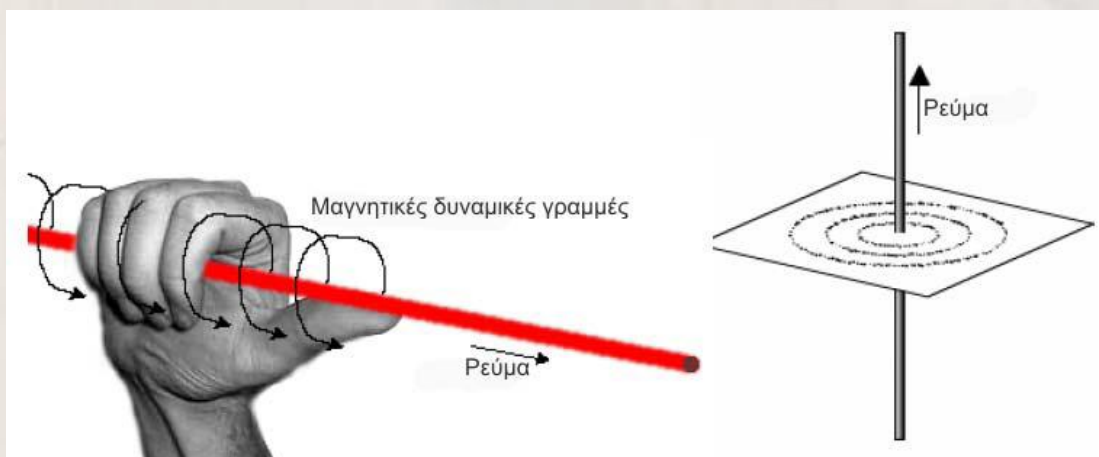
Η παρουσία ενός μαγνήτη δημιουργεί γύρω από αυτό ένα μαγνητικό πεδίο όπου οι δυναμικές γραμμές φαίνονται στο **σχήμα 2.2** :



Σχήμα

2.2: Μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

Ο Hans Oersted ανακάλυψε το 1820 ότι η μαγνητική πυξίδα εκτρέπεται από την θέση ισορροπίας της αν πλησιάσει ένα καλώδιο το οποίο διαρρέεται από ρεύμα.

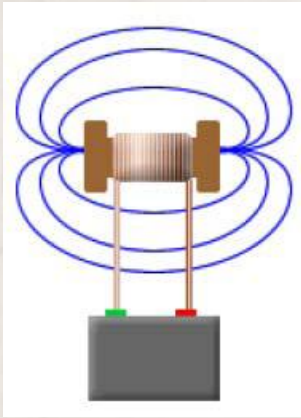


Σχήμα 2.3 : Κανόνας δεξιού χεριού

Οποιοδήποτε καλώδιο που ρέει ηλεκτρικό ρεύμα περιβάλλεται από ένα αόρατο δυναμικό πεδίο που λέγεται μαγνητικό πεδίο (Εικόνα 2.3 ) Το φαινόμενο περιγράφεται από τον νόμο του

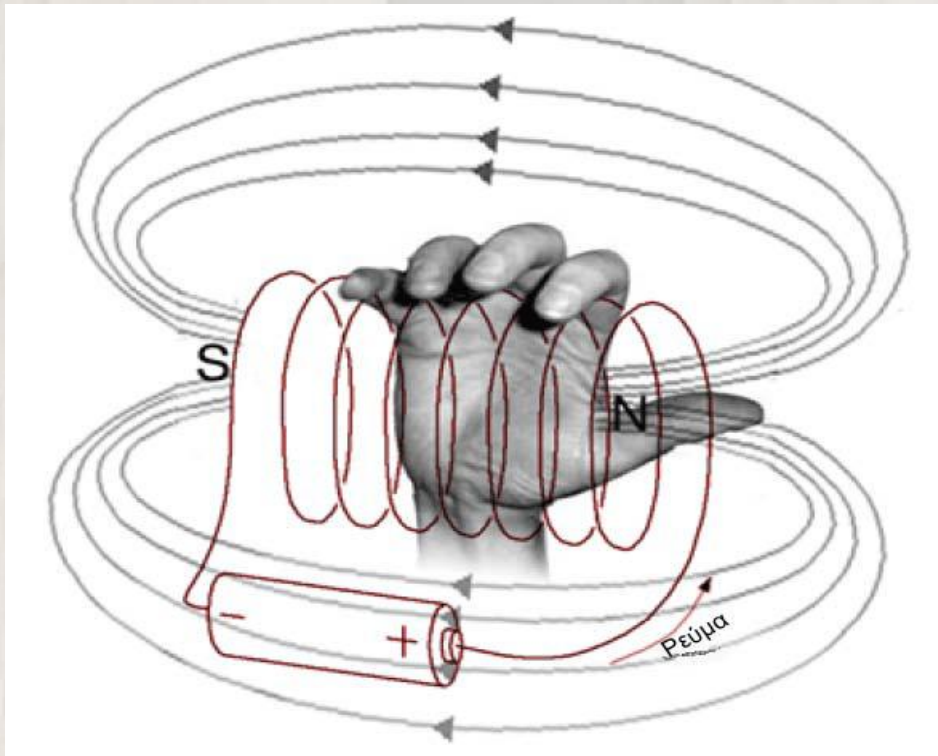
$$\text{Ampere: } \Delta H = \frac{I dl \times r_0}{2\pi r^2}$$

Ως όρος ηλεκτρομαγνητισμός ορίζεται ως η δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου από ρεύμα που ρέει μέσα σε έναν αγωγό. Αν περιστρέψουμε έναν αγωγό που ρέει ρεύμα σε ένα πυρήνα από υλικό που μπορεί να μαγνητιστεί, όπως σίδηρο, τότε σχηματίζουμε έναν ηλεκτρομαγνήτη . Το μαγνητικό πεδίο συγκεντρώνεται μέσα στον πυρήνα. Αυτή η διάταξη λέγεται σωληνοειδής. Οσο περισσότερες περιελίξεις έχουμε τόσο ισχυρότερο ηλεκτρομαγνήτη έχουμε με ισχυρότερες μαγνητικές δυναμικές γραμμές.



Εικόνα 2.4: Ηλεκτρομαγνήτης

Η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου σε πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα ευρίσκεται χρησιμοποιώντας το δεξί μας χέρι όπου τα δάκτυλα δείχνουν την διεύθυνση ροής του ρεύματος και ο αντίχειρας δείχνει τον Βόρειο Μαγνητικό Πόλο (εικόνα 2.5). Όλες οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές περνούν από το κέντρο του υλικού του πηνίου ανεξάρτητα πόσο εκτείνονται έξω από το σύρμα του πηνίου.

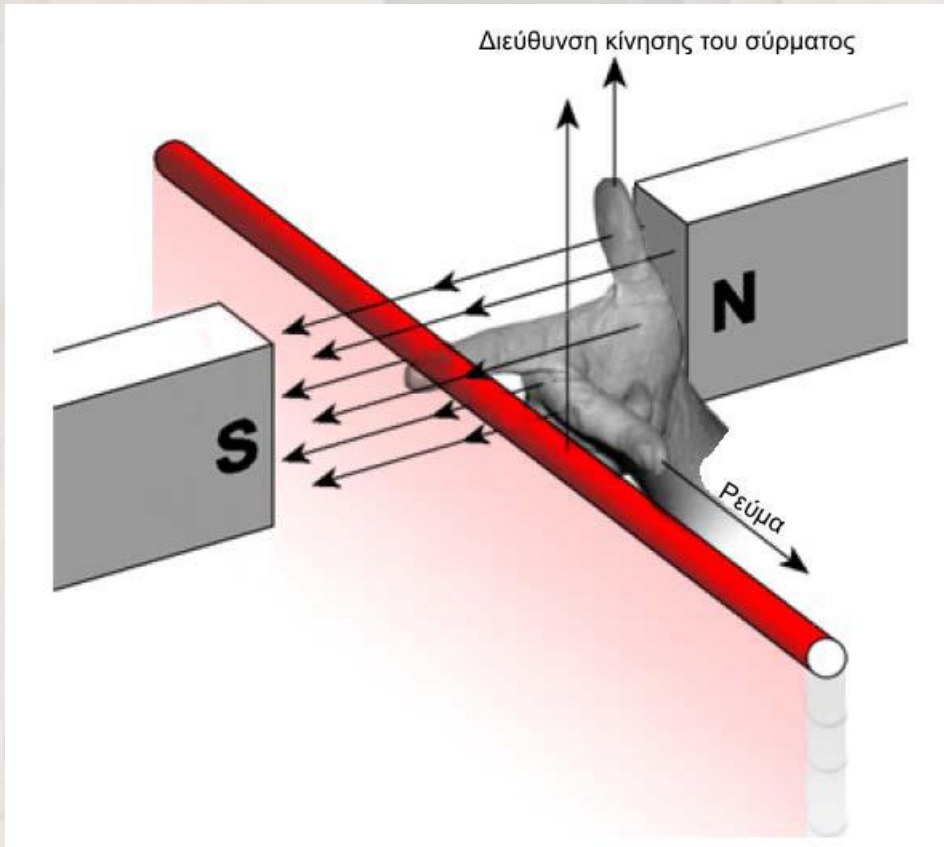


Εικόνα 2.5: Ροή ρεύματος.

Το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα αποτελείται από ομόκεντρες δυναμικές γραμμές που εξασθενεί όσο απομακρύνεται από τον αγωγό. Αν έχουμε ισχυρότερο ρεύμα τότε ενισχύεται και το πεδίο με την ένταση του μαγνητικού πεδίου να είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος.

### 2.1.6 Επαγωγή

Παρατηρήσαμε ότι η ροή ρεύματος σε ένα αγωγό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτόν. Αν μετακινήσουμε ένα σύρμα/αγωγό μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε δημιουργείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στο σύρμα. Αυτό περιγράφεται με τον Νόμο του Faraday και συμβαίνει γιατί οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές εφαρμόζουν μία δύναμη στα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στον αγωγό και τα ωθούν να κινηθούν. Όσο πιο γρήγορα μετακινούμε το σύρμα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγουμε. Η διεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος καθορίζεται από την διεύθυνση των μαγνητικών δυναμικών γραμμών και από την διεύθυνση που μετακινείται ο αγωγός στο πεδίο. Το δεξί χέρι όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.6** μας δίνει την διεύθυνση ροής του ρεύματος σε σχέση με την διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών (Βορράς προς Νότο) και την διεύθυνση κίνησης του σύρματος.



**Εικόνα 2.6 :** Διεύθυνση κίνησης του σύρματος.

Αν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει ένα σύρμα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται απλώνεται και μαζεύει λόγω της σταθερής αλλαγής του ρεύματος στο σύρμα. Αυτή η αυξομείωση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να επάγει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα άλλο σύρμα που βρίσκεται κοντά στο πρώτο. Το ρεύμα στο δεύτερο σύρμα είναι επίσης εναλλασσόμενο και φαίνεται όμοιο με το ρεύμα του πρώτου σύρματος.

### 2.1.7 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.

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 βρόχου 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 pyrrhotite που είναι διασπαρμένο 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 και το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς που διαφέρουν ως προς την φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από τις σχετικές θέσεις και 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 την γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού στο υπέδαφος.

Το δευτερογενές πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε συνιστώσες σε φάση και σε εκτός φάσης  $90^\circ$  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, την διεύθυνση, την συχνότητα λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους. (Ιωάννης Φ.Λούης, 2004)

### 2.1.8. 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, το 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  $A_0$ .

$$A_d = A_0 e^{-1} \quad (2.2)$$

Στην περίπτωση αυτή

$$d = \frac{503.8}{\sqrt{\sigma f}} \quad (2.3)$$

Όπου το  $d$  είναι σε μέτρα, η αγωγιμότητα  $\sigma$  του εδάφους σε  $\text{Sm}^{-1}$  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.

$$z_e \approx \frac{100}{\sqrt{\sigma f}} \quad (2.4)$$

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 επιτευξίμη διείσδυση είναι συνήθως της τάξης των 500m.

### 2.1.9. 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  $2\pi$  ( $360^\circ$ ). Όταν ένα τέτοιο κύμα καθυστερεί πίσω από άλλο, τα κύματα θεωρούνται ότι είναι εκτός φάσης. Η διαφορά φάσης μπορεί να αντιπροσωπευθεί με γωνία φάσης  $\theta$  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  $\pi/2$  ( $90^\circ$ , σύμφωνα με τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής).

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης  $\varphi$ .

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi fL}{r}\right) \quad (2.5)$$

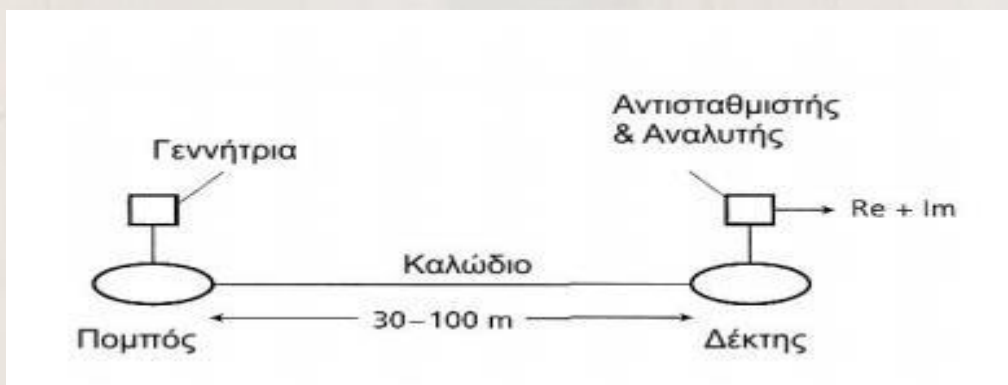
Όπου  $f$  η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου,  $L$  η αυτεπαγωγή του αγωγού (η τάση του να αντιτάξει μια αλλαγή στο εφαρμοζόμενο πεδίο) και  $r$  η αντίσταση του αγωγού. Για έναν καλό αγωγό  $\varphi$  θα πλησιάσει τα  $\pi/2$  ενώ για έναν κακό αγωγό  $\varphi$  θα είναι σχεδόν μηδέν.

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  $\pi$ , 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  $\varphi$ .

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 2.7: 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 ποσοστιαίο 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.

### 2.1.10. 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  $\sigma$ . Ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν το πηλίκο του  $s$  δια του βάθους διείσδυσης  $d$ , γνωστό ως «αριθμός επαγωγής», είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα, τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i\omega\sigma s^2}{4} \quad (2.6)$$

Όπου,  $H_s$  και  $H_p$  είναι τα πλάτη του δευτερογενούς και πρωτογενούς EM ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αντίστοιχα,  $\omega=2\pi f$ ,  $\mu_0$  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  $H_s/H_p$  είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του εδάφους. Δεδομένου ότι το  $d$  εξαρτάται από το γινόμενο  $s^2$ , εκτίμηση της μέγιστης πιθανής τιμής του  $\sigma$ , 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  $\sigma_a$ :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} * \frac{H_s}{H_p} \quad (2.7)$$



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.

### **2.1.11. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις αγωγιμότητας**

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς επίσης και μειονεκτήματα στην έρευνα αγωγιμότητας. Έναντι της ειδικής αντίστασης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν γρηγορότερα επειδή δεν υπάρχει καμία ανάγκη να παρεμβληθούν ηλεκτρόδια στο έδαφος ή να ξαναγίνουν περιστασιακά οι μακρινοί έλεγχοι. Επίσης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν στις περιοχές με πολύ ξηρό ή σκληρό έδαφος, όπου τα ηλεκτρόδια είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν, ή το ρεύμα δεν θα ρεύσει λόγω της έλλειψης υγρασίας. Οι πολύ ξερές συνθήκες επιφάνειας δεν είναι απαραίτητως μια ένδειξη ότι το έδαφος κάτω από την επιφάνεια είναι πάρα πολύ ξηρό για να παρέχει μια αρκετή αντίθεση, συχνά επαρκής υγρασία βρίσκεται μόνο μερικά εκατοστόμετρα κάτω από τα ηλεκτρόδια. Τα όργανα της «EMI» μπορούν επίσης να «πακεταριστούν» και να μεταφερθούν ευκολότερα εξ αιτίας του μικρότερου μεγέθους τους. Τα μειονεκτήματα των ερευνών αγωγιμότητας περιλαμβάνουν την ευαισθησία του EM38 στην ηλεκτρική παρέμβαση (π.χ., φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια) και τα συντρίμια μετάλλων.

### **2.1.12. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας**

Οι μαγνητικές έρευνες, μαγνητικής επιδεκτικότητας δεν χρησιμοποιούνται πολύ στην αρχαιολογία, τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ένας λόγος είναι η πολυπλοκότητα της οργάνωσης των μηχανισμών, και τα όρια της διείσδυσης σε βάθος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η τρέχουσα έλλειψη σταθερών και βελτιωμένων οργάνων. Το EM38 είναι ευρέως διαθέσιμο, αλλά είναι επιρρεπές στην κλίση και τα στοιχεία μερικές φορές είναι δύσκολο και χρονοβόρο να επεξεργαστούν. Βέβαια, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στην μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Το γεγονός ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα που μετριέται με την «EMI» είναι μια ενεργή μέθοδος σημαίνει ότι δεν περιορίζεται στην κατεύθυνση και τη δύναμη

του γήινου μαγνητικού πεδίου (σε αντιδιαστολή με τη μαγνητομετρία), έτσι μπορεί να εντοπίσει τα στοιχεία ανεξάρτητα από τη γεωμετρία. Μερικές έρευνες έχουν δείξει ότι με τη μαγνητική επιδεκτικότητα μπορούν να ανιχνευτούν κάτω από την επιφάνεια πολιτιστικά στοιχεία που δεν ανιχνεύονται με τη μαγνητομετρία. Το Geonics EM38 είναι πιθανώς το καλύτερο για τη γρήγορη κάλυψη περιοχής και την καλή διείσδυση βάθους για τις αρχαιολογικές εφαρμογές. (Ernenwein E. G., 2009)

## 2.2. Ηλεκτρική Μέθοδος

### 2.2.1. 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 υπεδάφικης 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  $\rho$ , ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$ . (Παπαδόπουλος, Ταξιάρχης, 2008)

### 2.2.2. 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 (SelfPotentialMethod). 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 (MagnetotelluricMethod). 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 (ResistivityMethod). 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 (InducedPolarizationMethod). 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 αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.(Ιωάννης Φ.Λούης, 2004)

### **2.2.3. Μέθοδος της Ειδικής 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  $\rho$ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που χρησιμοποιείται στις μεθόδους ηλεκτρικής διασκόπησης.

Ο υπολογισμός της στηρίζεται στο νόμο του Ohm:

$$V=IR \quad (2.8)$$

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

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

όπου  $R$ : η ηλεκτρική της αντίσταση (Ohm).

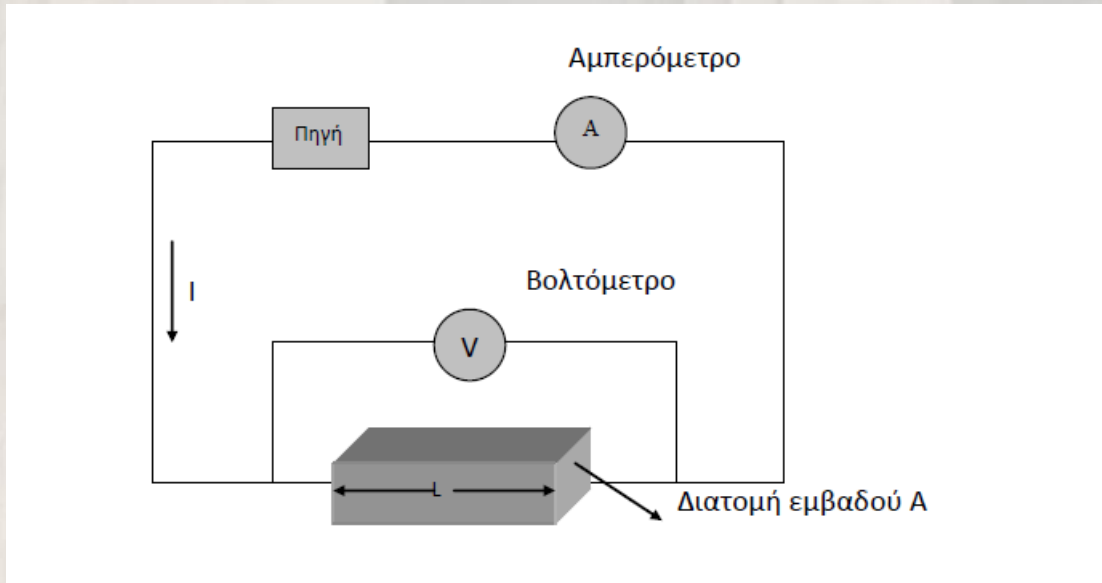
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  υπολογίζεται από την σχέση

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.9)$$

όπου  $R$ : η ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)

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

όπου  $L$ : το μήκος του κυλίνδρου (m)



**Εικόνα 2.8:** Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (Ιωάννης Φ. Λούης, 2004)

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.

### 2.2.3.1 Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης

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

Είδος του πετρώματος

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα που ακολουθεί, κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Σε γενικές γραμμές, πάντως, τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή, τις χαμηλότερες, λόγω του – συνήθως – υψηλού περιεχομένου τους σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες, όμως, τάσεις αλληλεπικάλυψης.

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)
Αέρας	$\infty$
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

**Πίνακας 2.1:** Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος, 2013)

### 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.

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

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

### 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.

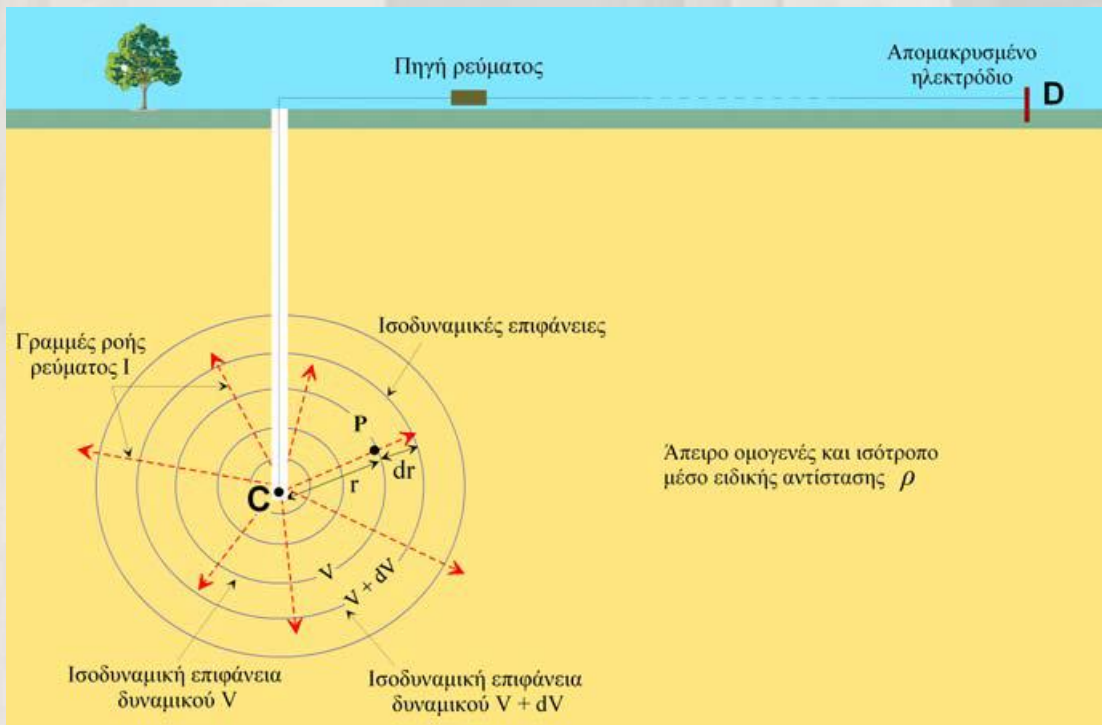
Θερμοκρασία

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, 2013)

### **2.2.3.2. 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 2.9**). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος (συσσωρευτής) και το κύκλωμα κλείνει μέσω δευτέρου ηλεκτροδίου D, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I, σημειακής πηγής C, που βρίσκεται μέσα σε άπειρο ομογενές και ισότροπο μέσο είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τα έξω.



**Εικόνα 2.9:** Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

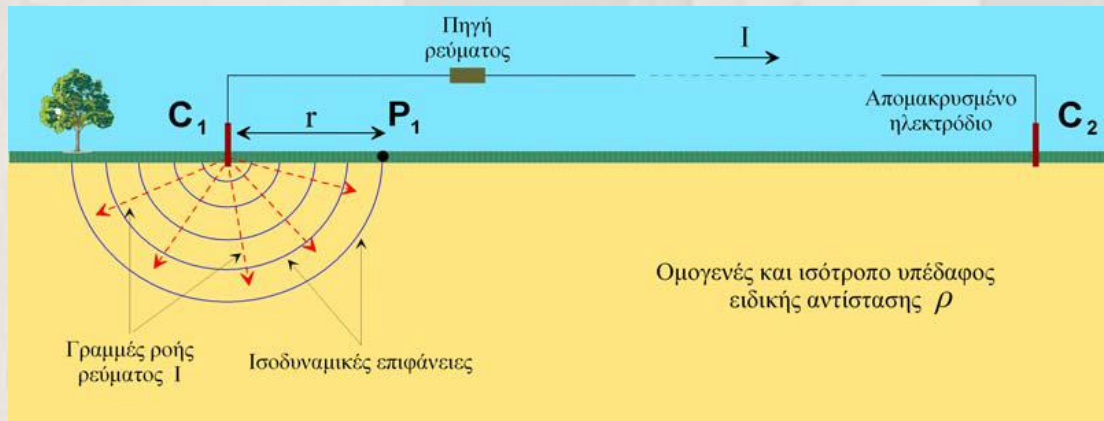
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το ρεύμα (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) ρέει από το ηλεκτρόδιο C ακτινικά κατά μήκος ευθειών γραμμών. Αν μπορούσαμε με ένα βολτόμετρο να υπολογίσουμε την διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) που προκαλεί η ειδική αντίσταση του μέσου σε μια απόσταση πολύ μακριά από το ηλεκτρόδιο 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. (Ιωάννης Φ.Λούης, 2004)

### 2.2.3.3. 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 2.10). 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.

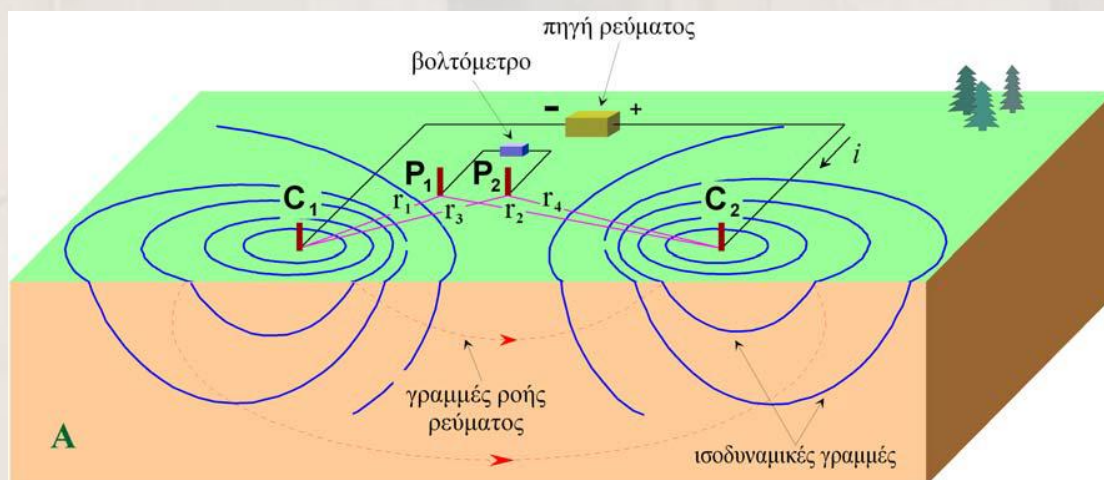


Εικόνα 2.10: Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες. (Βερβερέλης Ε., 2011)

### 2.2.3.4 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  $C_2$ , απείχαν 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 2.11)



Εικόνα 2.11: Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο

Άρα το δυναμικό σε τυχαίο σημείο  $P_1$  θα ισούται με το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού  $V_1$ , λόγω της σημειακής πηγής  $C_1$ , και του δυναμικού  $V_2$ , λόγω της πηγής  $C_2$ . Ακόμα, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια (οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές του σχήματος..)

### 2.2.3.5. Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

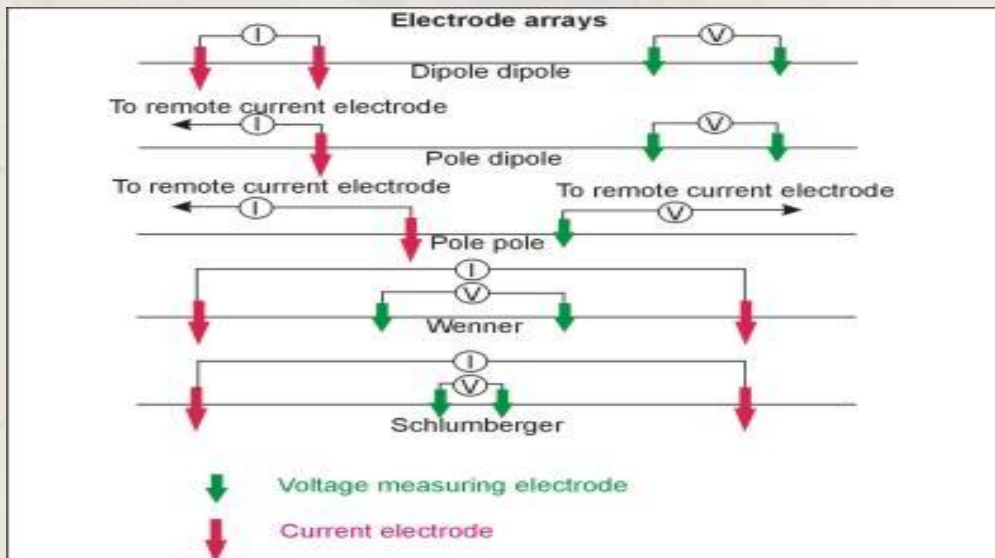
Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

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

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε για κάθε θέση ή/και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική, ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διάφορων μερών του υπεδάφους. Μεταβάλλεται, όμως, συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγώγιμων ή μη ανομοιογενών.

### 2.2.3.6. Διατάξεις ηλεκτροδίων

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



Εικόνα 2.12: 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:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * \frac{\pi * (L^2 - l^2)}{2l} \quad (2.10)$$

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

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi * a \quad (2.11)$$

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:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * \pi * n * (n + 1)(n + 2)a \quad (2.12)$$

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:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi * a \quad (2.13)$$

### 2.2.3.7 Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να μετρήσουμε τη φαινόμενη ειδική αντίσταση, δηλαδή τα  $\Delta V$  και  $I$ , χρειαζόμαστε:

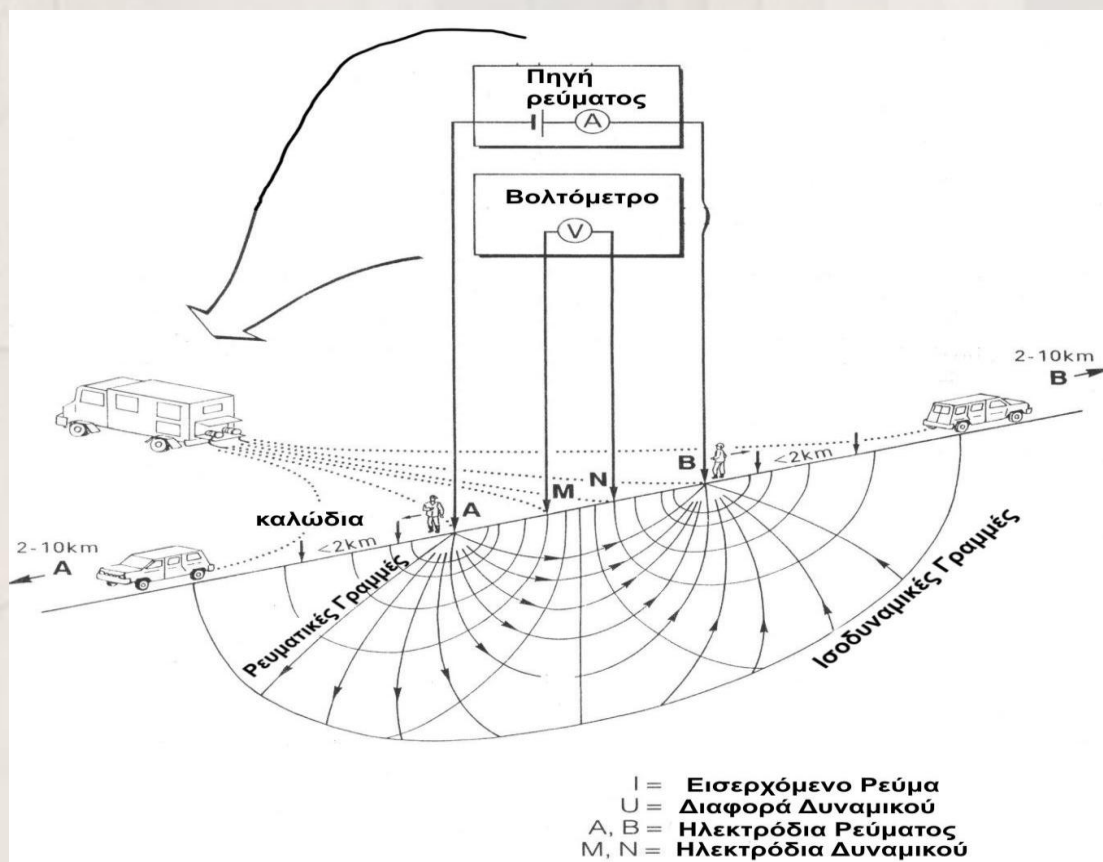
Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο. Μέχρι 1 Ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές, ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες.

Βολτόμετρο υψηλής αντίστασης εισόδου ( $>10M\Omega$ ) για ακρίβειες από  $\mu V$  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.

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.

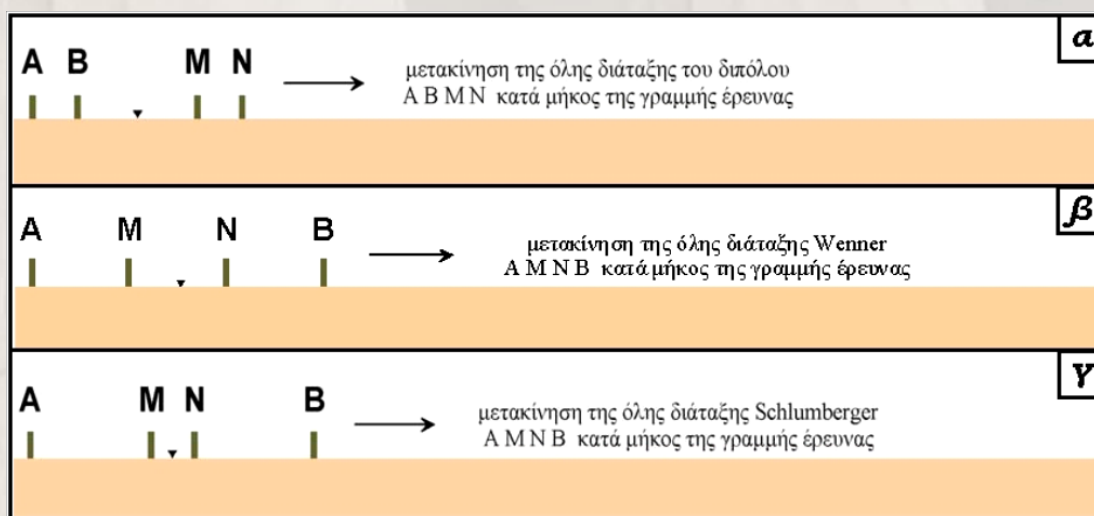
Όργανο Ρύθμισης της Απόστασης των Ηλεκτροδίων Δυναμικού. Μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης παρεμβάλλεται ένας ακόμα διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικών για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.



Εικόνα 2.14: Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Αποστολόπουλος, 2013)

### 2.2.4. 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.

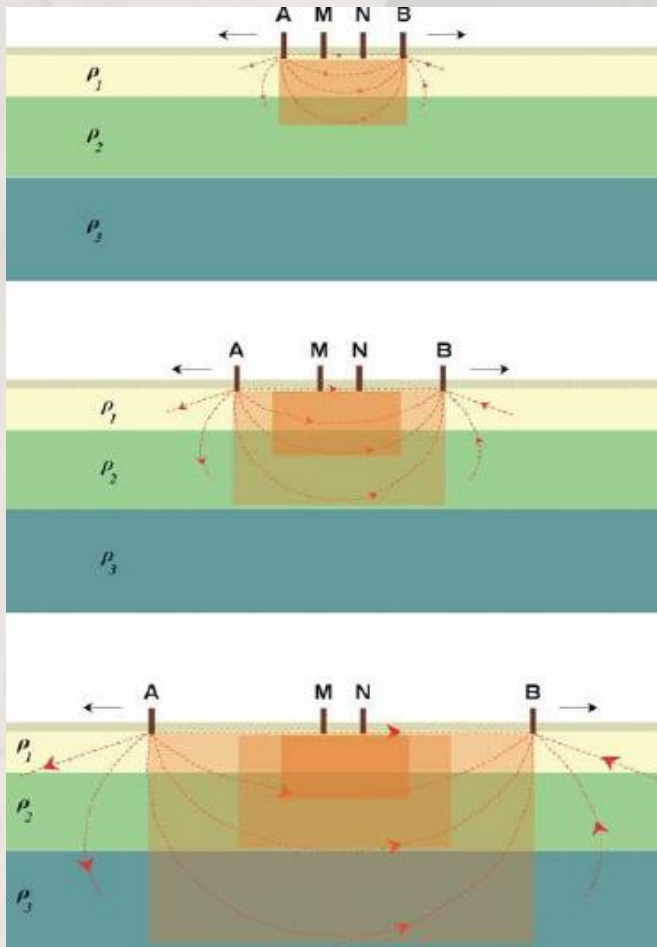


**Εικόνα 2.15:** Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης *Dipole–Dipole* (α), *Wenner* (β) και *Schlumberger* (γ) (Μαυρομμάτης, 2007)

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.

### 2.2.5. 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 2.16:** Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Ιωάννης Φ.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.

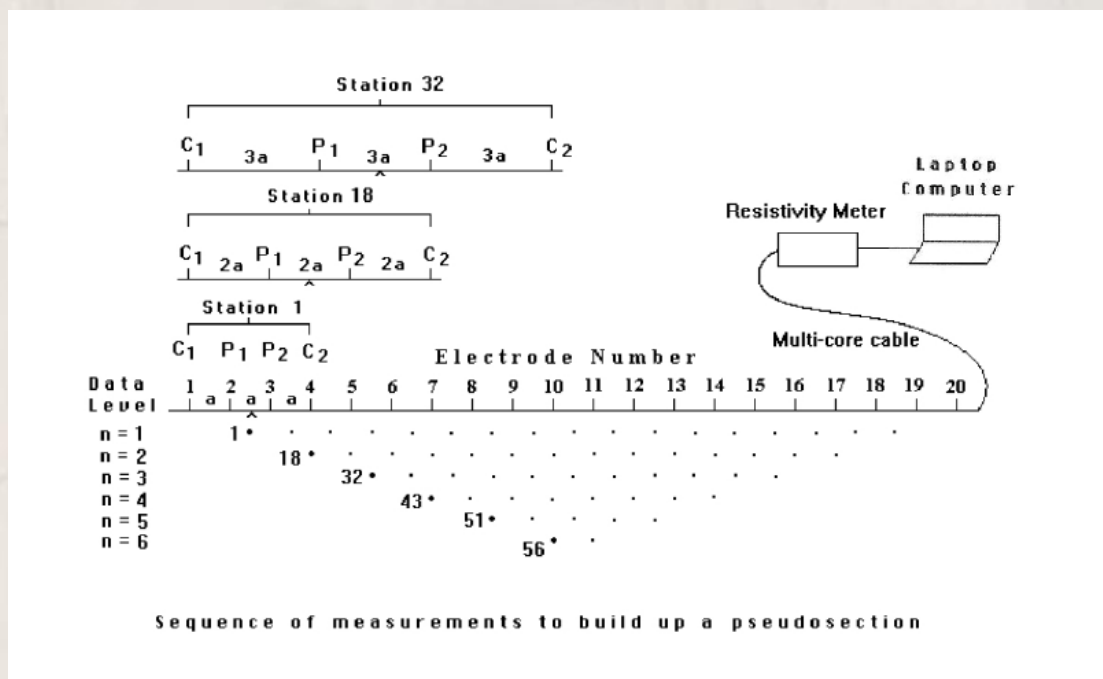


### 2.2.6. Μέθοδος Διδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

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

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι αντιμετωπίζει σύνθετες γεωλογικές τομές, αίροντας τη θεώρηση της οριζόντια στρωματωμένης 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 υπεδάφικων 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.

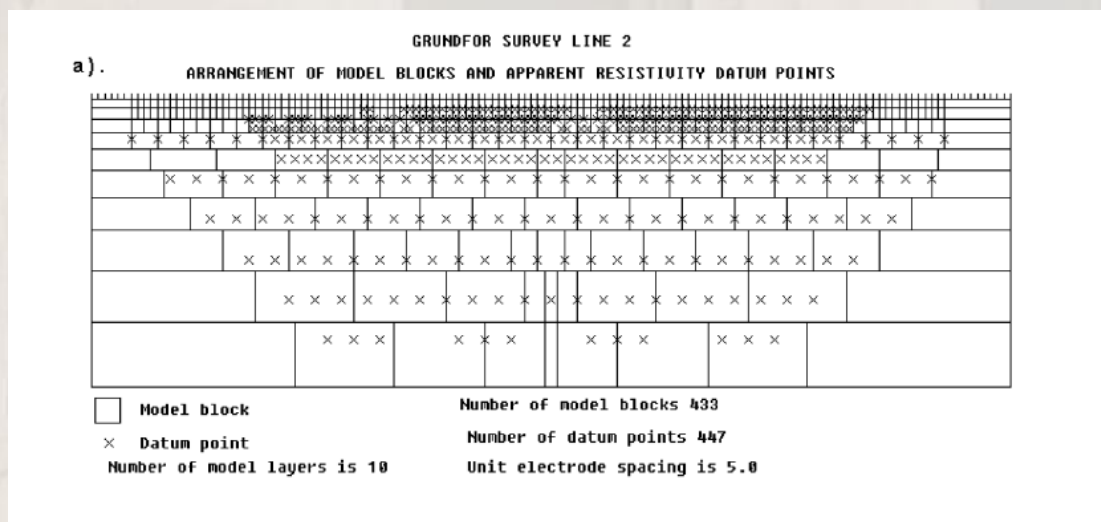
Η διδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του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



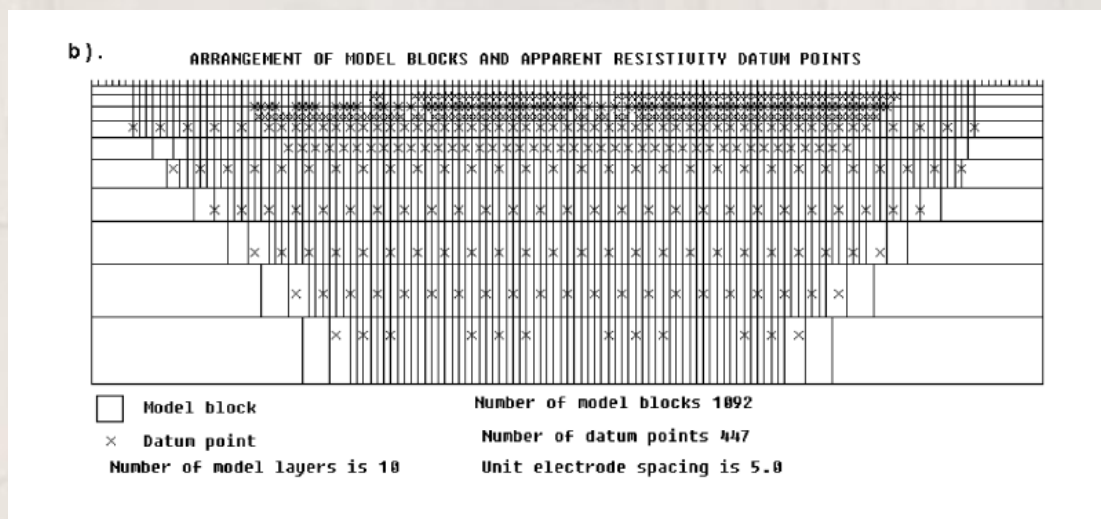
Εικόνα 2.17: Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση διδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 1999)

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά, απαιτούν με τη σειρά τους αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντίστροφης δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτή την ανάγκη. (Oldenburg & Li. 1994, Tsourlos. 1995, Loke & Barker. 1996 κ.ά.)

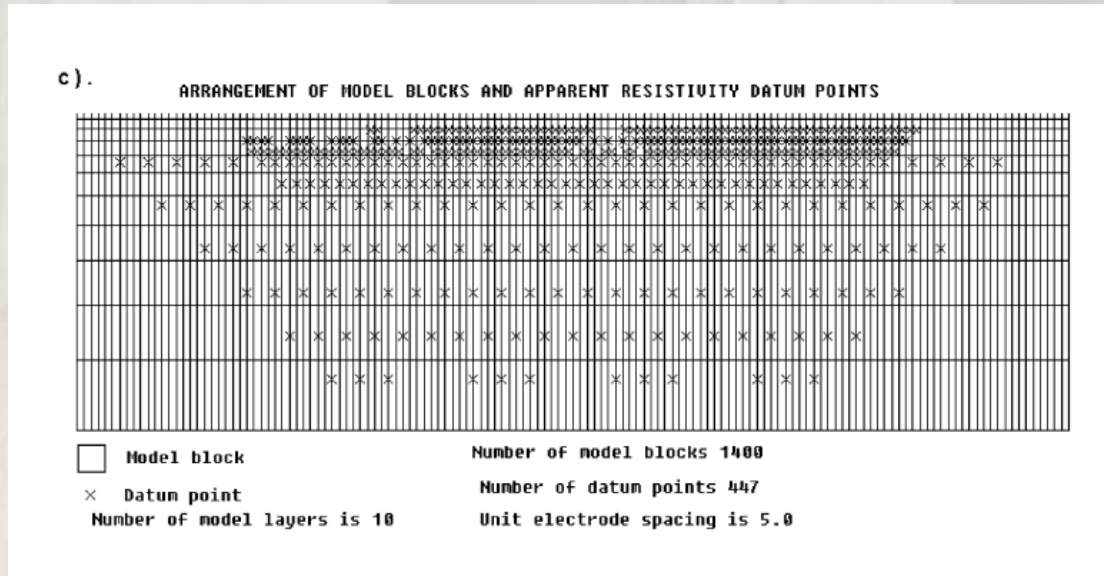
Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος (**Εικόνα 2.18**)



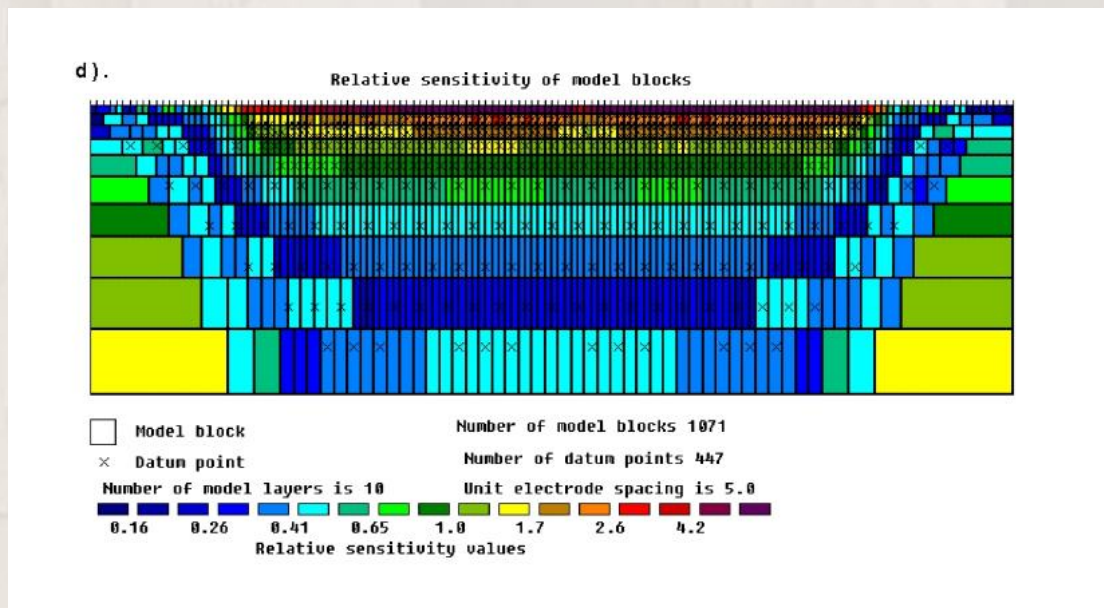
**Εικόνα 2.19:** Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου. (Loke, 1999)



**Εικόνα 2.20:** Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με περισσότερα κελιά από τα δεδομένα. (Loke, 1999)



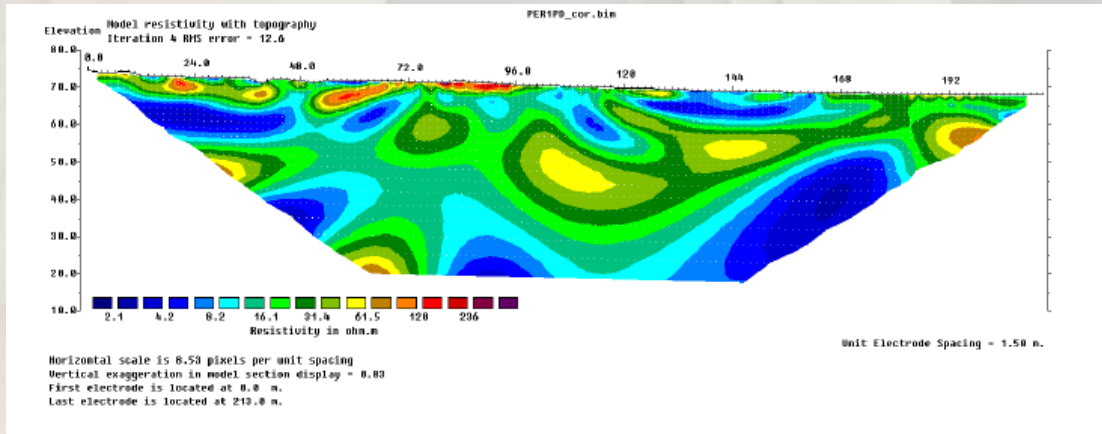
Εικόνα 2.21: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με επιμήκυνση στις άκρες της γραμμής των μετρήσεων. (Loke, 1996)



Εικόνα 2.22: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τις τιμές ευαισθησίας ενός μοντέλου ομογενούς γης. (Loke, 1996)

Οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις τους προσαρμόζονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου (Εικόνα 2.23). Αρκετές προσεγγιστικές λύσεις έχουν δοθεί, προκειμένου να μειωθεί η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του μοντέλου (πχ η μέθοδος Quasi – Newton, Loke και Barker, 1996). Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές είναι κατάλληλες κυρίως για μικρές αντιθέσεις ειδικής αντίστασης.

Όσον αφορά στην τοπογραφία, αυτή αντιμετωπίζεται είτε με διορθώσεις, δηλαδή μετατροπή των δεδομένων πριν και μετά την αντιστροφή, είτε με απευθείας εισαγωγή της στο πλέγμα.



Εικόνα 2.23: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

### 2.2.7. 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.

## 2.3. Σεισμική μέθοδος

### 2.3.1. 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 διεπισδυτικότητά 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.

### 2.3.2. 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.

### 2.3.3. Ελαστικές Σταθερές

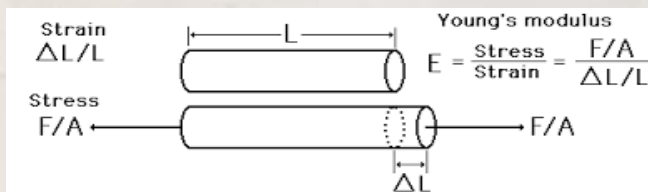
Εάν δημιουργηθούν κύματα με ένα κτύπημα ενός σφυριού σε σκληρό πέτρωμα, τότε τα κύματα αυτά θα οδεύσουν μέσω του πετρώματος ως σωματιδιακές (μοριακές) μετατοπίσεις, με τρόπο ανάλογο με αυτόν που διαδίδονται τα κύματα μέσα στο νερό, ως μετατοπίσεις των υδατικών μορίων. Μετά τη διέλευση της διαταραχής (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 διαμήκους ελαστικότητας E.

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

$$E = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l} \quad (2.14)$$

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.



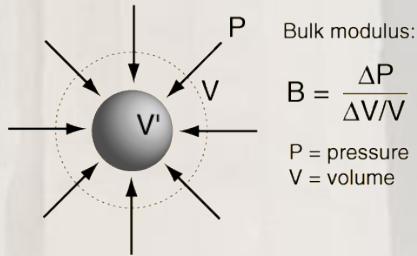
Εικόνα 2.24: Μέτρο Ελαστικότητας (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>)

Το αντίστροφο του E, δηλαδή το 1/E, ονομάζεται συντελεστής ελαστικότητας.

Μέτρο κυβικής ελαστικότητας, k (Bulkmodulus).

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:

$$k = \frac{F/A}{\Delta V/V} = \frac{F \cdot V}{A \cdot \Delta V} \quad (2.15)$$

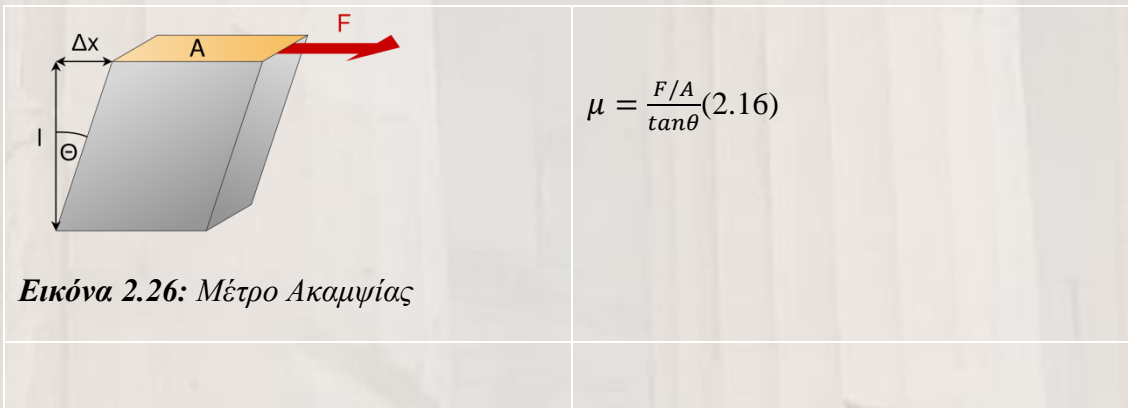


**Εικόνα 2.25:** Μέτρο κυβικής ελαστικότητας

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

Μέτρο Ακαμψίας ή Διατμητικής Ελαστικότητας,  $\mu$  (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.



**Εικόνα 2.26:** Μέτρο Ακαμψίας

Λόγος του Poisson,  $\sigma$ .

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  $\Delta l$  αλλά την ίδια στιγμή θα επιβραχυνθεί στη διάμετρο κατά  $\Delta d$ . Το αντίθετο θα συμβεί όταν το συμπιέσουμε παράλληλα προς το  $l$ , οπότε θα έχουμε επιβράχυνση κατά  $\Delta l$  αλλά και αύξηση κατά  $\Delta d$ .

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

$$\sigma = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (2.17)$$

Ο λόγος του Poisson δεν μπορεί ποτέ να ξεπεράσει την τιμή 0,5. Για τα περισσότερα πετρώματα το  $\sigma$  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  $E$ ,  $k$ ,  $\mu$  και  $\sigma$ , δύο μόνο είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να εκφραστούν σα συνάρτηση των δύο άλλων. Έτσι έχουμε:

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

### 2.3.4. Σεισμικά Κύματα

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.

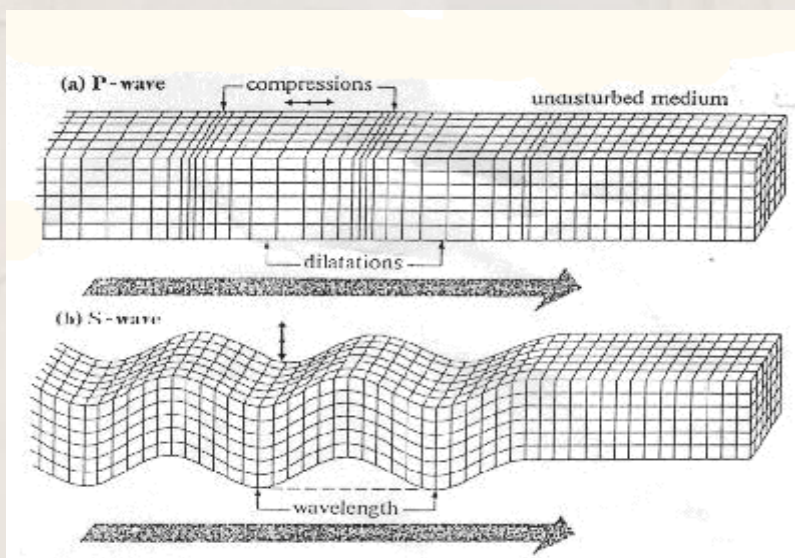
Επιμήκη κύματα.

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 συμπιέσεις 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 2.27: Κύματα S και P (<http://www.ucl.ac.uk/>)



### Επιφανειακά κύματα

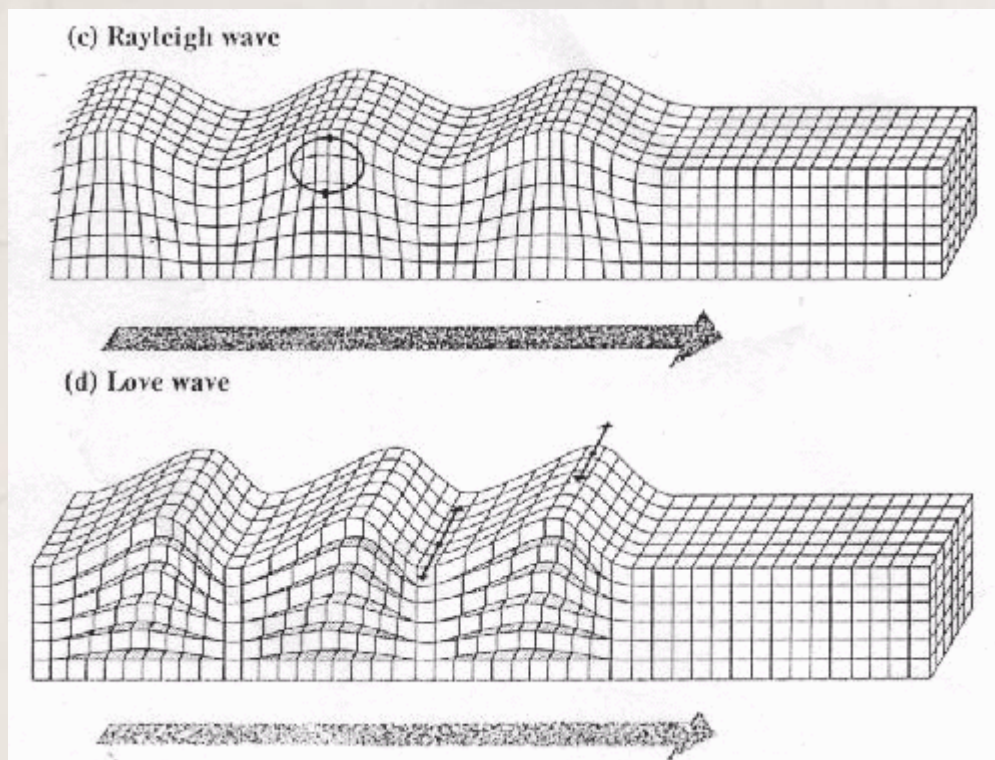
Είναι τα κύματα τα οποία περιορίζονται στην επιφάνεια της γης, τα πλάτη τους δηλαδή είναι μεγάλα κοντά στην επιφάνεια της γης και ελαττώνονται όσο αυξάνεται το βάθος. Λόγω της μικρής τους συχνότητας, του αυξημένου πλάτους και της μεγάλης τους διάρκειας είναι ιδιαίτερος καταστροφικά. Τα κύματα αυτά έχουν 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 2.28:Κύματα Love και Rayleigh (<http://www.ucl.ac.uk/>)

### 2.3.5. 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 συμπίκνωσης 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.

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

**Πίνακας 2.2:** Σεισμικές ταχύτητες των  $P$  κυμάτων για διάφορα υλικά

### 2.3.6. 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 ενέργεια, 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  $a$  εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας το οποίο χάθηκε, κατά τη μετάδοση του σεισμικού παλμού, σε απόσταση ίση με ένα πλήρες μήκος κύματος  $\lambda$ .

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.

### 2.3.7. 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. (Ιωάννης Φ.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.

Δ) 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 φορητό. Το φορητό ανυψώνεται 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.

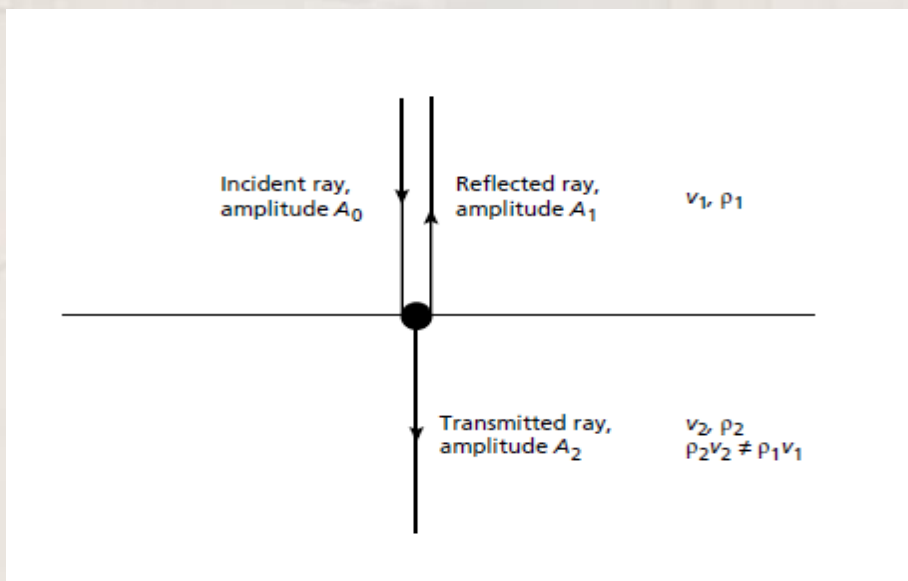
**2.3.8. Σεισμικές Ακτίνες σε Μέσο με Στρώσεις**

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)

**2.3.8.1. 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 2.29: Κατακόρυφα προσπίπτουσα σεισμική ακτίνα (Keary & Brooks)

Όπως φαίνεται από το σχήμα., 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:

$$Z = \rho \cdot v_p \quad (2.18)$$

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:

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \Rightarrow R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.19)$$

Όπου:

$\rho_1, \rho_2$ : 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  $\pi$  ( $180^\circ$ ) στην ανακλώμενη ακτίνα.

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

$$T = \frac{A_2}{A_0} \quad (2.20)$$

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

$$T = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \Rightarrow T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.21)$$

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:

$$R' \implies R' = \left[ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad (2.22)$$

$$T' = \frac{I_2}{I_0} \implies T' = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.23)$$

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.

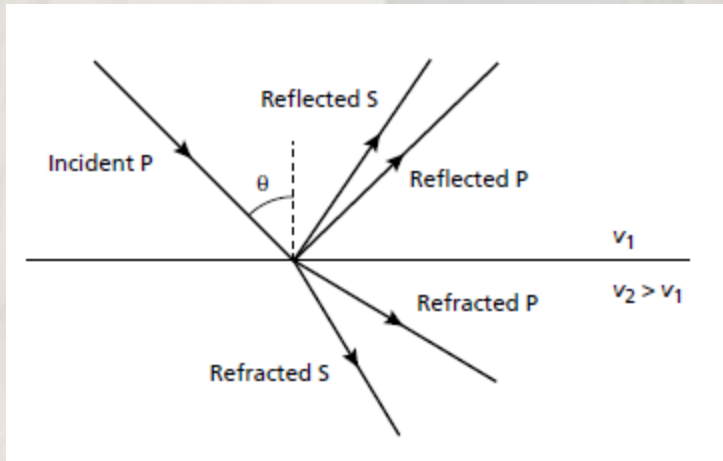
Ο υπολογισμός του συντελεστή ανάκλασης από τις ταχύτητες διάδοσης των P-κυμάτων είναι εφικτός, με τη χρήση της ακόλουθης εμπειρικής σχέσης (Gardner et al. 1974 και Meckel & Nath. 1977):

$$R = 0,625 * \ln \left( \frac{v_1}{v_2} \right) \quad (2.24)$$

### 2.3.8.2. Ανάκλαση και διάθλαση σεισμικών ακτίνων που προσπίπτουν υπό γωνία

Όταν ένα P-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 P-κυμάτων μετατρέπεται σε ανακλώμενα και διερχόμενα S-κύματα, τα οποία πολώνονται σε ένα κάθετο επίπεδο. Αυτό παρουσιάζεται και στο σχήμα που ακολουθεί:





**Εικόνα 2.30:** Ανακλώμενη και διαθλώμενη P-ακτίνα, υπό γωνία πρόσπτωσης σεισμικής ακτίνας (Keary & Brooks).

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2} \implies \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.25)$$

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.

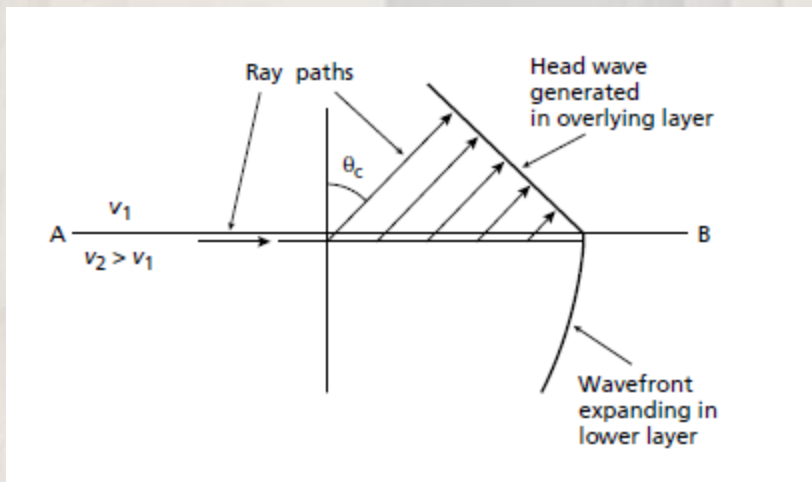
### 2.3.8.3. Οριακά διαθλώμενα κύματα

Όταν η σεισμική ταχύτητα ενός στρώματος είναι μεγαλύτερη από αυτή του υπερκείμενου, υπάρχει μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, η οποία είναι γνωστή ως οριακή γωνία  $\theta_c$ , για την οποία η γωνία διάθλασης είναι ίση με  $90^\circ$ . 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  $\theta_c$  δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\sin\theta_c}{v_1} = \frac{\sin 90^\circ}{v_2} \implies \sin\theta_c = \frac{v_1}{v_2} \implies \theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (2.26)$$

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.



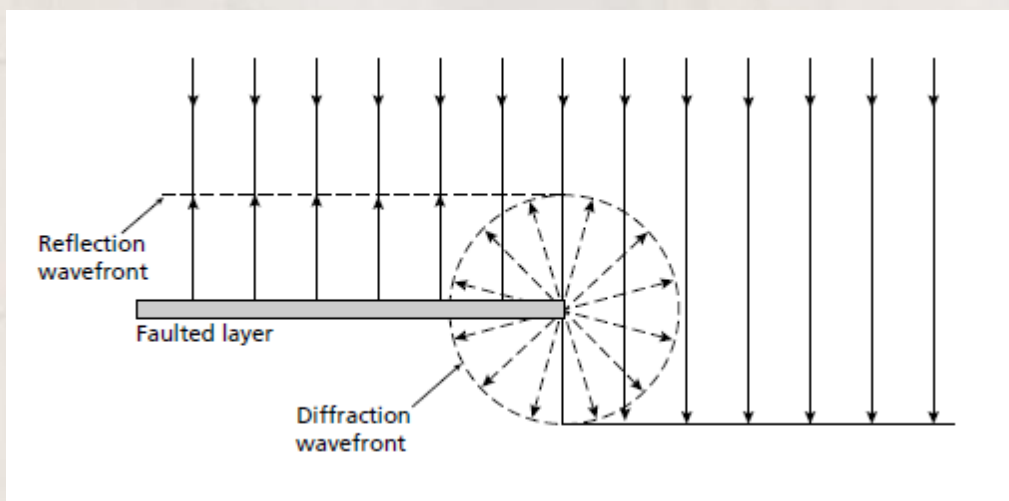
Εικόνα 2.31: Μετωπικά κύματα

### 2.3.8.4. 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 ρωγατωμένων 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 2.32: Περίθλαση στο άκρο ρωγατωμένου στρώματος (Keary & Brooks)

### 2.3.9. 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 ασυνέχεια, 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.

### 2.3.10. Μέθοδος της σεισμικής διάθλασης

#### 2.3.10.1. 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.

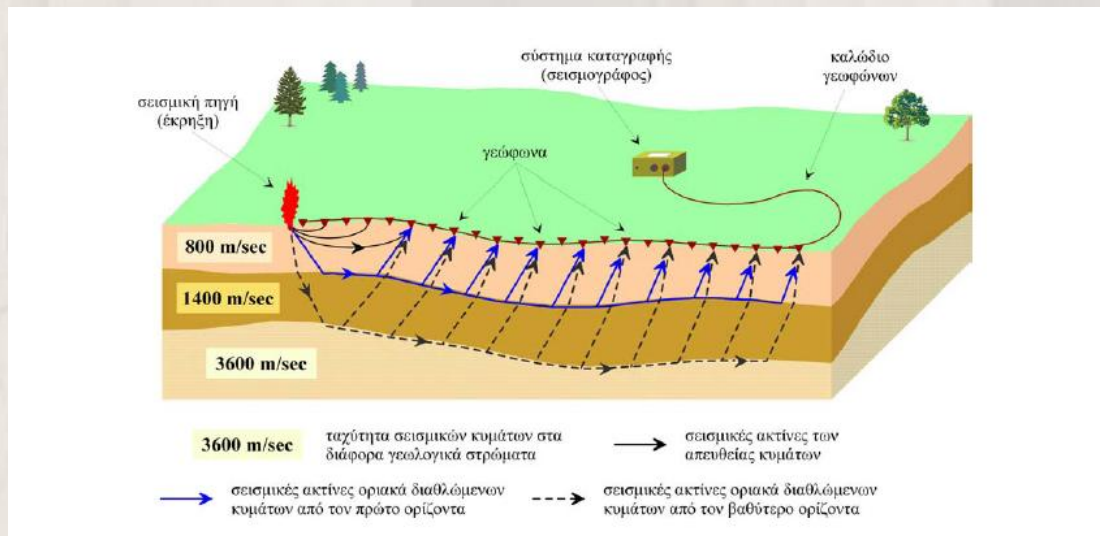
Το οριακά διαθλώμενο κύμα το οποίο φθάνει στο γεώφωνο, διανύοντας ένα τμήμα της διαδρομής του (κατερχόμενος και ανερχόμενος κλάδος) με την ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος και το υπόλοιπο (οριζόντιος κλάδος) με την ταχύτητα του υποκείμενου στρώματος.

Όσον αφορά στη χρονική στιγμή άφιξης των προαναφερθέντων κυμάτων, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.33**, 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.

### 2.3.10.2. Εργασίες υπαίθρου

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



**Εικόνα 2.33:** Διάταξη για τη συλλογή σεισμικών δεδομένων στην ύπαιθρο (Ιωάννης Φ.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 (σειсмоγράφο). Για την παραγωγή σεισμικών κυμάτων διεγείρεται μια σεισμική πηγή. Η διέγερση αυτή πραγματοποιείται, συνήθως, στα άκρα της γραμμής του αναπτύγματος των γεωφώνων, καθώς και σε άλλες επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος του αναπτύγματος.

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

### **2.3.10.3. 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.

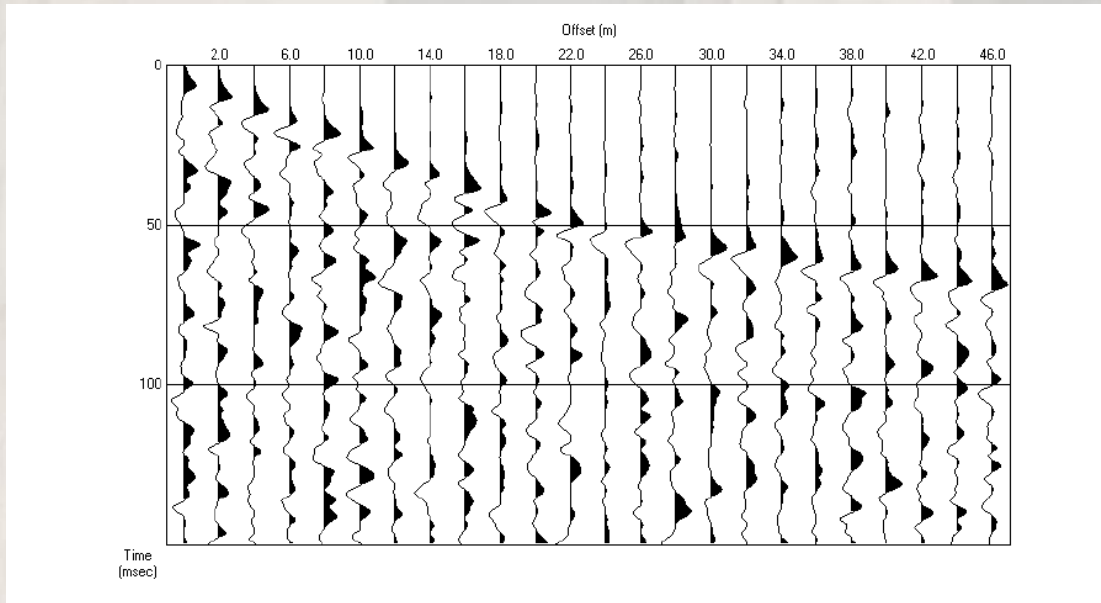
- Γεωλογικός θόρυβος (Geological Noise) – Οποιοδήποτε είδος υπεδάφικου γεωλογικού σχηματισμού που μας είναι δύσκολο να απεικονίσουμε μπορεί να θεωρηθεί πηγή θορύβου. Στη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης υποθέτουμε ότι η γεωλογική δομή μεταβάλλεται πλευρικά μόνο κατά μήκος της ευθείας που συνδέει τα γεώφωνα 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. (Ιωάννης Φ.Λούης, 2004)

#### **2.3.10.4. 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 2.34:** Σεισμική καταγραφή κοινής πηγής

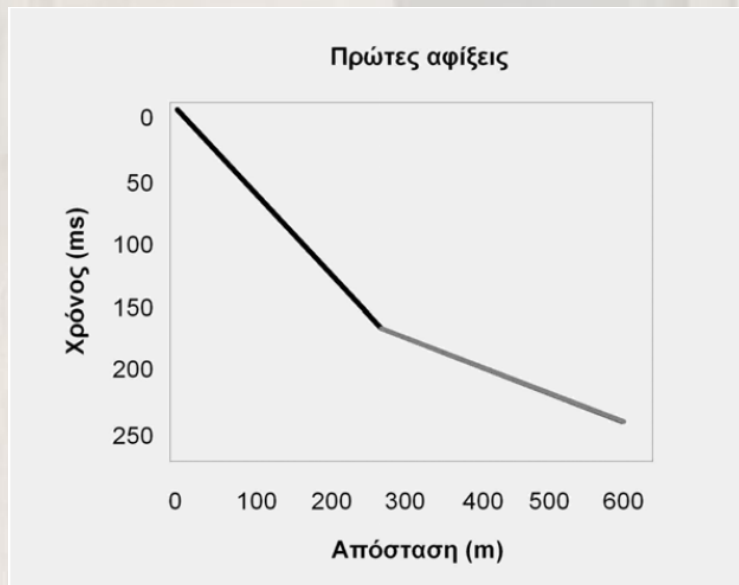
Στην **Εικόνα 2.34** παρουσιάζονται οι καταγραφές 24 γεωφώνων, τοποθετημένων σε σειρά, ανά 2m. Στο διάγραμμα αυτό, ο χρόνος σημειώνεται στον κατακόρυφο άξονα και η απόσταση από την πηγή στον οριζόντιο, ενώ για κάθε κατάλληλη απόσταση πηγής – δέκτη έχει σχεδιαστεί το αντίστοιχο σεισμόγραμμα, το οποίο 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.

### 2.3.10.5. Δρομοχρονικές καμπύλες

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

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



Εικόνα 2.35: Δρομοχρονική καμπύλη πρώτων αφίξεων (Thomas M. Boyd. 1999)

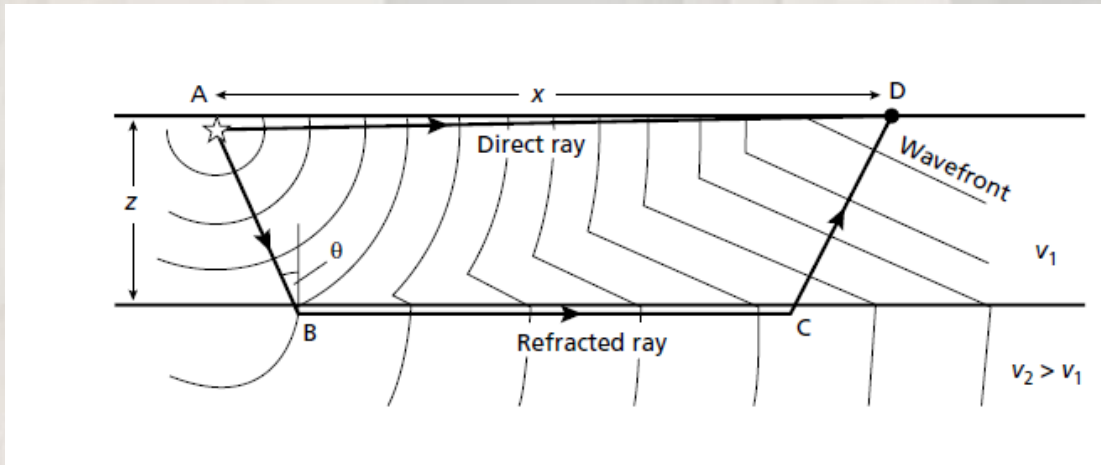
Για να περάσουμε από τα σειсмоγράμματα στις δρομοχρονικές καμπύλες των πρώτων αφίξεων, πρέπει να καθορίσουμε τη χρονική στιγμή στην οποία ξεκινά η εδαφική κίνηση σε κάθε σεισμόγραμμα. Αν, όμως, έχει καταγραφεί οποιοδήποτε είδους θόρυβος πριν το χρόνο της πρώτης άφιξης, τότε μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να επιλέξουμε τον χρόνο αυτό. Στη πράξη, η επιλογή του χρόνου άφιξης των πρώτων κυμάτων θεωρείται πιο πολύ ως διαδικασία ερμηνείας παρά ως διαδικασία συλλογής δεδομένων.

### 2.3.10.6. 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 2.36: 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  $\theta$  – 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:

$$t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \Rightarrow$$

$$t = \frac{z}{v_1 \cos \theta} + \frac{(x - 2z \cdot \tan \theta)}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cdot \cos \theta} \Rightarrow$$

$$t = \frac{(x - 2z \cdot \tan \theta)}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cdot \cos \theta} \quad (2.28)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

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

και ότι

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

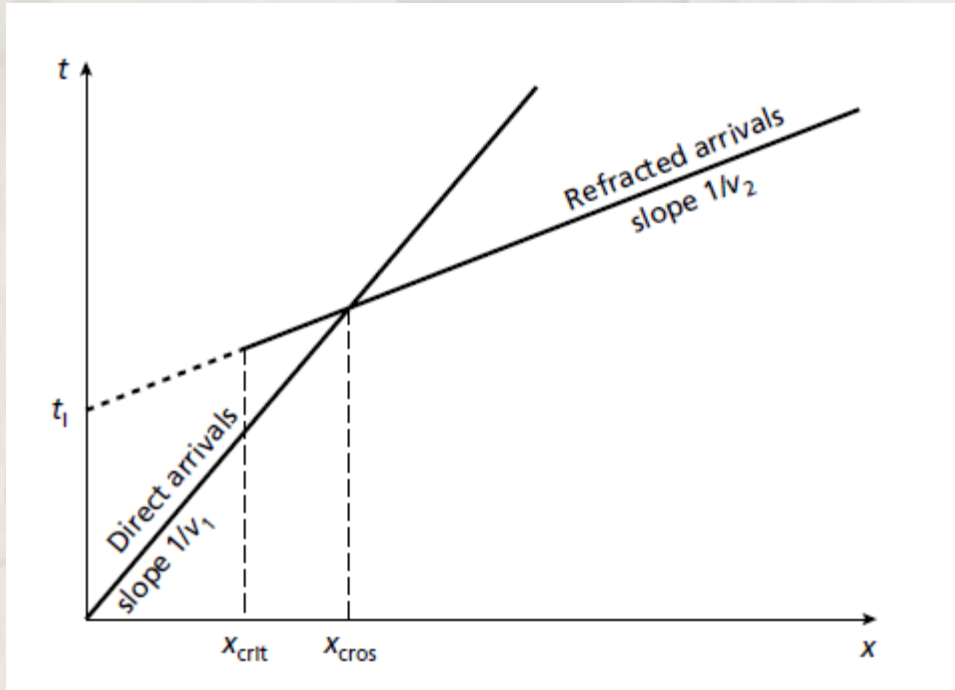
Έχουμε:

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

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 2.37: 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 αφίξη, 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:

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

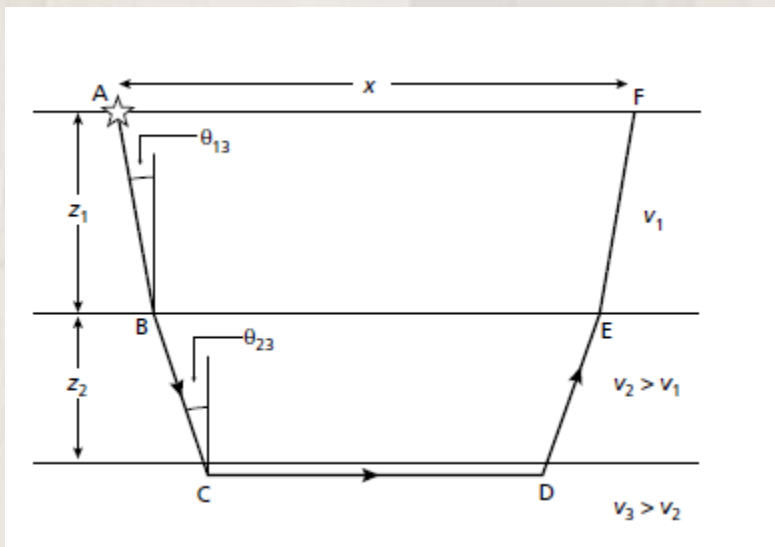
Επιλύοντας ως προς  $x_{cross}$  έχουμε:

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

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  $\theta_1$  ενώ στη δεύτερη  $\theta_2$  (κρίσιμη γωνία). Τα πάχη των στρωμάτων 1 και 2 είναι  $z_1$  και  $z_2$  αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.38:** Μοντέλο δύο στρωμάτων πάνω από ημιχώρο, με οριζόντιες διεπιφάνειες (Keary & Brooks)

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

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

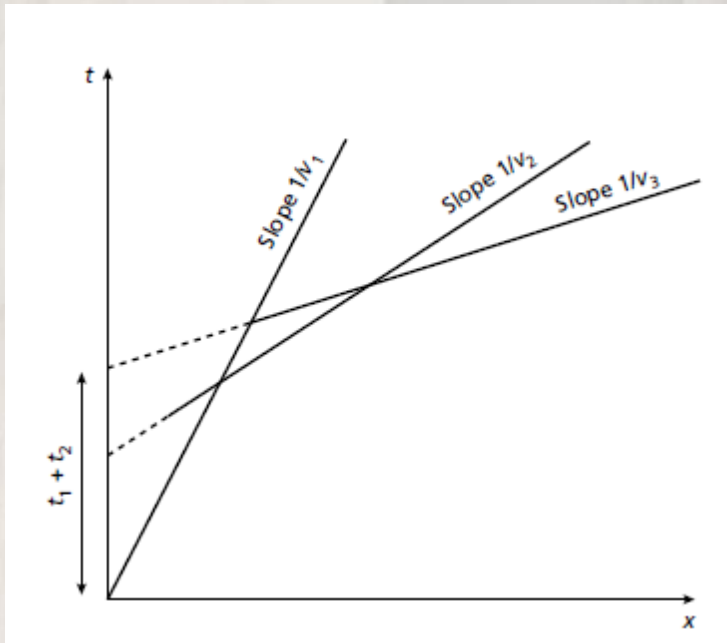
όπου:

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

Επομένως:

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

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 2.39:** 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:

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

όπου:

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

Η εξίσωση 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 ω	και	AF = x cos ω
EF = PF tan i <sub>c</sub> = x sin ω tan i <sub>c</sub>	και	EP = PF / cos i <sub>c</sub> = x sin ω / cos i <sub>c</sub>
AE = AF - EF = x (cos ω - sin ω tan i <sub>c</sub> )		(2.44)

Έτσι, τελικά, ο χρόνος t<sub>AKLP</sub>, που λέγεται και “χρόνος για προς τα κάτω κλίση” (DownDip) και που συμβολίζεται με t<sub>d</sub> δίνεται από τη σχέση και που δίνεται από τη σχέση:

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

Η σχέση... 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.. έχουμε:

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

Η σχέση.. 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” (UpDip), 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 Τρισδιάστατη απεικόνιση των τομογραφιών της σεισμικής διαθλάσεως και της ηλεκτρικής αντιστάσεως στο κάστρο Occhiola.

Γεωφυσική έρευνα διεξήχθη στα ερείπια του κάστρου Occhiola, ενός μεσαιωνικού οικισμού που βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του λόφου "Terravecchia" 490 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Σικελία, Ιταλία). Το 1963 το χωριό Occhiola υπέστη σοβαρές καταστροφές από ισχυρούς σεισμούς. Το πρώτο γεγονός στις 9 Ιανουαρίου προκάλεσε ισχυρή καταστροφή. Το χωριό όμως καταστράφηκε ολοσχερώς από τον δεύτερο ισχυρό σεισμό στις 11 Ιανουαρίου. Κτήρια που είχαν αποδυναμωθεί από τον πρώτο σεισμό τώρα ισοπεδώθηκαν. Ο μισός πληθυσμός πέθανε εγκλωβισμένος στα συντρίμια. Ο πρίγκιπας Carlo Maria Brancifortedi Butera ξαναέχτισε την πόλη, με το όνομα Grammichele, σε μια περιοχή που απέιχε λίγα χιλιόμετρα από την παλιά πόλη.



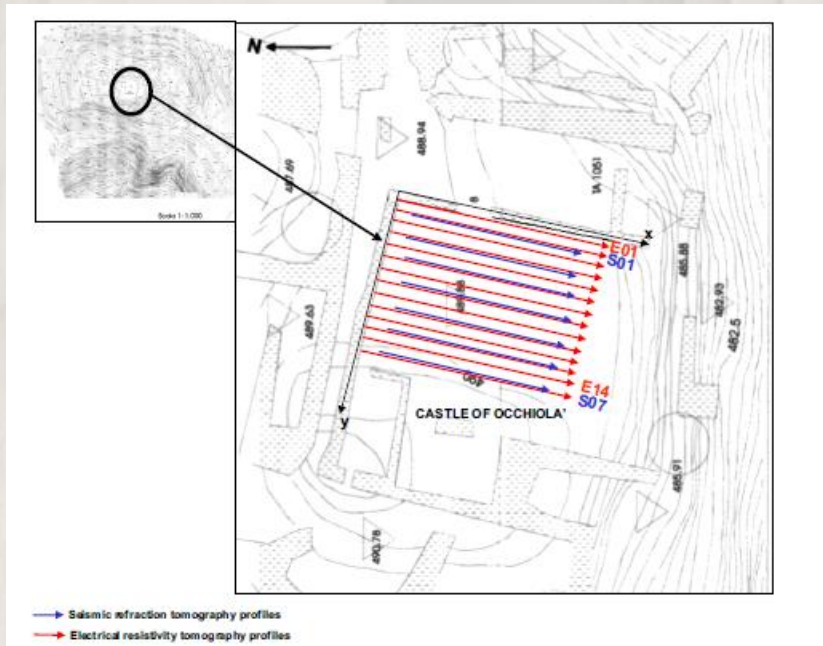
Εικόνα 3.1 : Η θέση του χωριού Occhiola στην Ιταλία

Προκειμένου να χαρτογραφηθούν οι αρχαιολογικές δομές (τοίχοι και υπόγειες στοές) χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι:

1. Γεωηλεκτρική Τομογραφία (ERT)
2. Τομογραφία Σεισμικής διάθλασης

Οι δύο μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν γιατί αφενός οι διακυμάνσεις της ηλεκτρικής αντιστάσεως σχετίζονται άμεσα με την πετρογραφία οπότε πολύτιμες πληροφορίες αντλήθηκαν για τα υποσκαφή αρχαιολογικά ερείπια, και αφετέρου οι διακυμάνσεις της σεισμικής ταχύτητας παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες ως προς τα γεωμετρικά στοιχεία των ερειπίων. Συνδυάζοντας τις δύο αυτές γεωφυσικές μεθόδους μπορούμε να ερμηνεύσουμε καθώς και να αξιολογήσουμε την σημασία και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων κάθε μιας. Με την βοήθεια της επιφανειακής ειδικής αντίστασης και της επιφανειακής ταχύτητας τα ηλεκτρικά και σεισμικά δεδομένα αντίστοιχα, παρουσιάζονται στις 3 διαστάσεις (3D) καθιστώντας έτσι εφικτό να προσδιορίσουμε τις διάφορες αλλοιώσεις στα επιμέρους ηλεκτρικά και σεισμικά μοντέλα. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν την παρουσία δομών κανονικού σχήματος και πιθανόν να έχουν χαρακτηριστικά αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.





Εικόνα 3.2 : Η περιοχή της Γεωφυσικής έρευνας

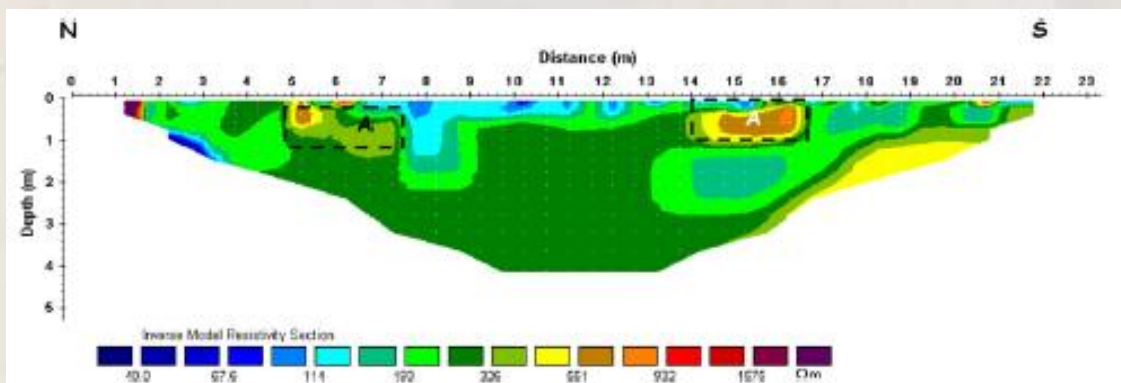
### 3.1.1. Γεωφυσική Έρευνα

Η έρευνα στο κάστρο Occhiola διεξήχθη το 2004 σε μία επιφάνεια 23 χ 13 m (Εικόνα 3.2).

Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν 2 μέθοδοι η ERT και η SRT. Κρίθηκε απαραίτητη η από κοινού εφαρμογή και των 2 μεθόδων ούτως ώστε να ενισχυθεί η ανάλυση της έρευνας καθώς οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορετική ευαισθησία και ανάλυση στις φυσικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών.

### 3.1.2. Γεωηλεκτρική Τομογραφία

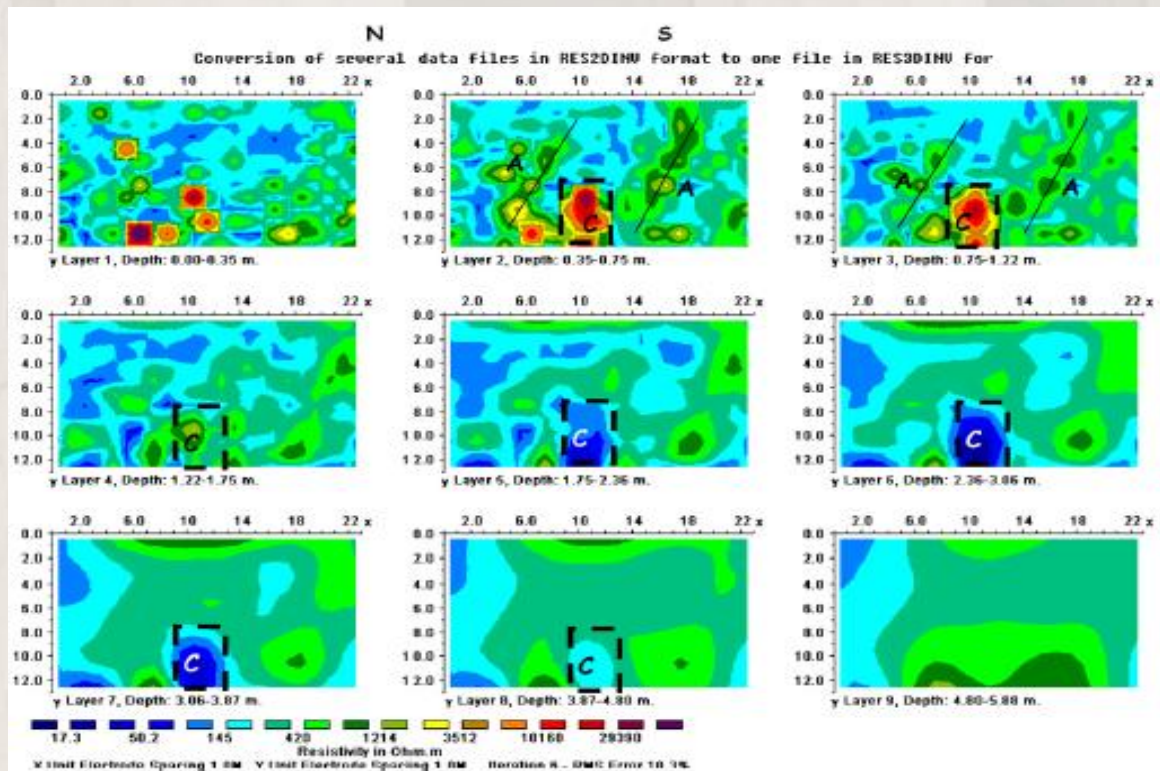
Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε 14 παράλληλα προφίλ με διεύθυνση από Βορρά προς Νότο(Εικόνα 3.3). Αρχικά τα δεδομένα παρουσιάζονται στις 2 διαστάσεις (2D) και μετά τα δεδομένα από όλα τα προφίλ έρευνας παρουσιάζονται στις 3 διαστάσεις(3D). Κατά ένα γενικό κανόνα το διάστημα μεταξύ των προφίλ δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων..



Εικόνα 3.3: Μοντέλο 2D ειδικών αντιστάσεων.

Τελικά η απόσταση μεταξύ των προφίλ ήταν 1m και συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια που απέιχαν 1m μεταξύ τους. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των δεδομένων ήταν η dipole - dipole και αυτό γιατί όπως είναι γνωστό η μέθοδος αυτή είναι πολύ ευαίσθητη στις αλλαγές της ηλεκτρικής αντίστασης σε οριζόντιο επίπεδο οπότε είναι κατάλληλη για την χαρτογράφηση κάθετων κτισμάτων.

Για να δημιουργηθεί η γεωηλεκτρική τομή (μοντέλο) με την κατανομή της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης συναρτήσε του βάθους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αντιστροφής robust διότι ελαχιστοποιεί τις απόλυτες αλλαγές στις τιμές του μοντέλου αντίστασης. Η αντιστροφή – ερμηνεία των δεδομένων έγινε με την χρήση του λογισμικού RES2DIV.



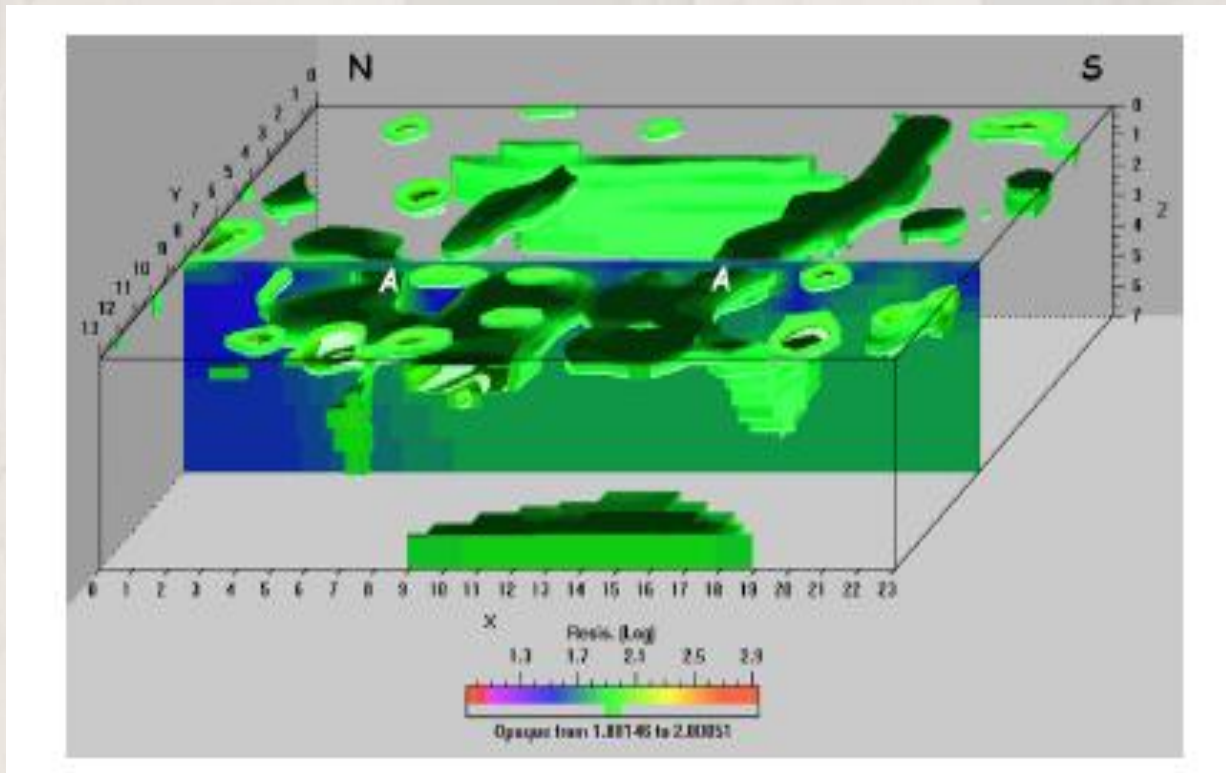
**Εικόνα 3.4:** 3D μοντέλο ειδικών αντιστάσεων . Οι ανωμαλίες υψηλών αντιστάσεων (A) πιθανόν να υποδεικνύουν σημεία αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Η **Εικόνα 3.3** αντιπροσωπεύει το γεωηλεκτρικό μοντέλο μετά από την αντιστροφή των δεδομένων της τομής «E08» που φαίνεται στην **Εικόνα 3.2**. Όπως είναι εμφανές η επιλογή robust δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στο μοντέλο. Οι ανωμαλίες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους που έχουν σημειωθεί με A, μπορούν να συσχετιστούν με ερείπια αρχαίων τοιχείων.

Επειδή 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 και την απόδοση τους σε 3D χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RES3DIV. Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή “smoothness-constraint robust”. Οι ψευδο 3D εικόνες φαίνονται στην **Εικόνα 3.5**. Το στρώμα 1 στην **Εικόνα 3.5** αφορά μια περιοχή με υψηλές μεταβολές στην αντίσταση που συμβαίνουν σε μικρές αποστάσεις . Αντίθετα το στρώμα 2, που εκτείνεται σε βάθος 0,35-075m απεικονίζει

ομαλότερες πλευρικές μεταβολές στην αντίσταση. Η ανωμαλία A που εμφανίζεται και στο στρώμα 3 με έντονες μεταβολές μπορεί να σχετίζεται με ανθρωπογενή δραστηριότητα (τοιχεία).

Στα επίπεδα βάθους από 2-8 μέτρα την τριδιάστατη ερμηνεία των δεδομένων που φαίνονται στην **Εικόνα 3.4** υπάρχει μια ζώνη σημειωμένη με C. Αυτή η ζώνη παρουσιάζει υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης στα επίπεδα 2,3 και 4 ενώ στα επίπεδα 5,6 και 7 χαμηλότερες τιμές. Εξαιτίας του σχήματος των διαστάσεων και των τιμών της αντίστασης, η ανωμαλία C θα μπορούσε να αφορά κάποιο πηγάδι, το οποίο στα πρώτα 2m είναι κενό και μετά γεμάτο με νερό.



**Εικόνα 3.5:** 3D μοντέλο ειδικών αντιστάσεων. Οι ανωμαλίες υψηλών αντιστάσεων (A) πιθανόν αποδεικνύουν στοιχεία αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

### 3.1.3. Τομογραφία της σεισμικής διάθλασης.

Σε αυτή την μέθοδο τα σεισμικά κύματα που δημιουργούνται από τεχνητές πηγές όπως ένα σφυρί διαδίδονται μέσα στο μέσο και διαθλώνται σε διαστήματα όπου η σεισμική ταχύτητα ή πυκνότητα αλλάζει. Γεώφωνα τοποθετημένα σε γραμμή καταγράφουν τα κύματα που επιστρέφουν στην επιφάνεια αφού αυτά έχουν διανύσει διαφορετική απόσταση μέσα στο έδαφος. Μετρώντας τον χρόνο από την στιγμή της κρούσης και την καταγραφή σεισμικού σήματος, μπορεί να υπολογιστεί η σεισμική ταχύτητα στο υπέδαφος και το βάθος των ασυνεχειών μεταξύ στρωμάτων διαφορετικής ταχύτητας. Το σεισμικό μοντέλο ταχυτήτων του υπεδάφους παρουσιάζεται από τετράπλευρα κελιά (**Εικόνα 3.7β**).

Τα σεισμικά δεδομένα δημιουργούν κάναβο 15 x12 μ με παράλληλα σεισμικά προφίλ με απόσταση 2μ ανάμεσά τους και με διεύθυνση από Βορρά προς Νότο χρησιμοποιώντας 16

γεώφωνα (14Hz) σε διαστήματα ενός μέτρου. Για την ερμηνεία των δεδομένων της διάθλασης επιλέχθηκαν 5 κρούσεις στην σεισμική γραμμή: μια στην μέση, 2 κρούσεις στα άκρα της σεισμικής γραμμής και 2 κρούσεις στα γεώφωνα 4 και 12 αντίστοιχα.

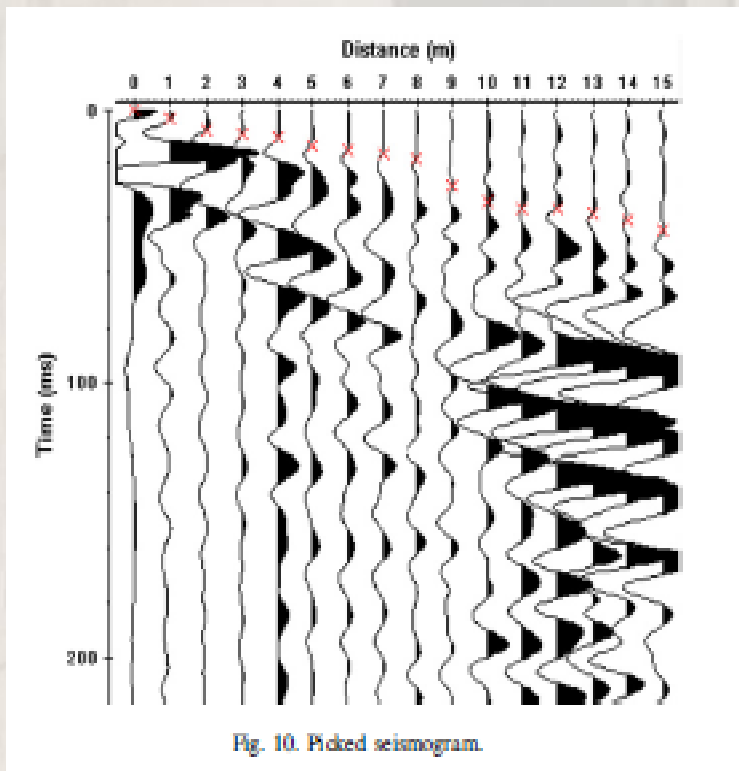


Fig. 10. Picked seismogram.

**Εικόνα 3.6:** Πρώτες αφίξεις σεισμικών κυμάτων

Το πρώτο βήμα εξεργασίας των δεδομένων σεισμικής διάθλασης περιλαμβάνει την μέτρηση των χρόνων πρώτης άφιξης των σεισμικών κυμάτων, σε σχέση με της αποστάσεις πομπού δέκτη κατά μήκος μιας σεισμικής γραμμής (Εικόνα 3.6). Τα αποτελέσματα της αντιστροφής των σεισμικών δεδομένων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7α και το μοντέλο απεικονίζει την μεταβολή της ταχύτητας  $V_p$  στο υπέδαφος.

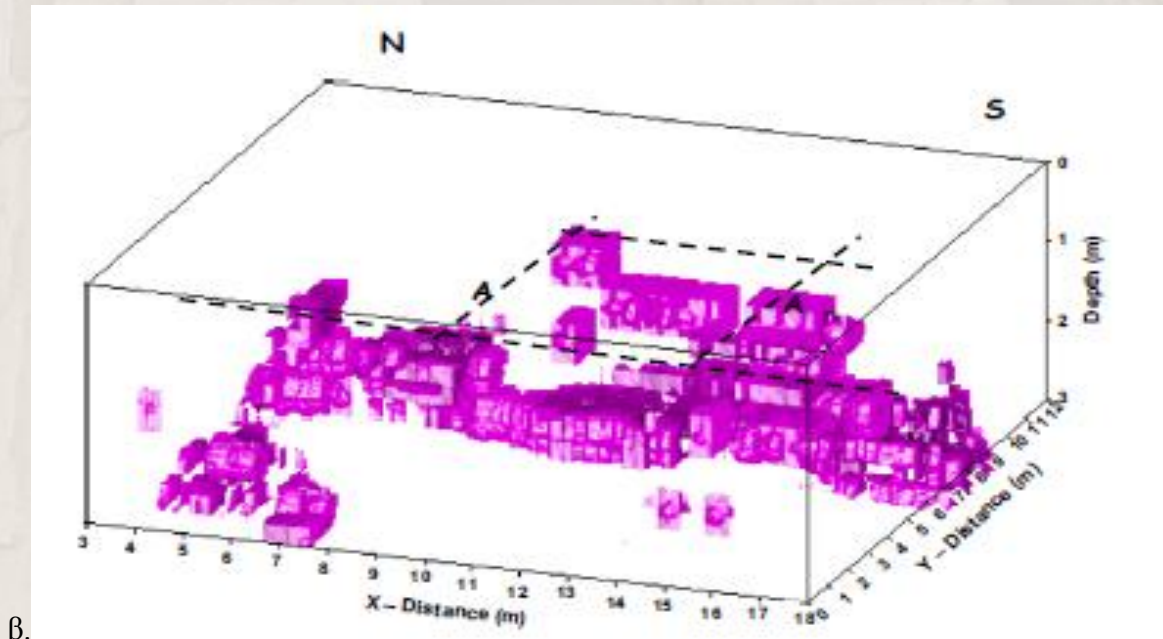
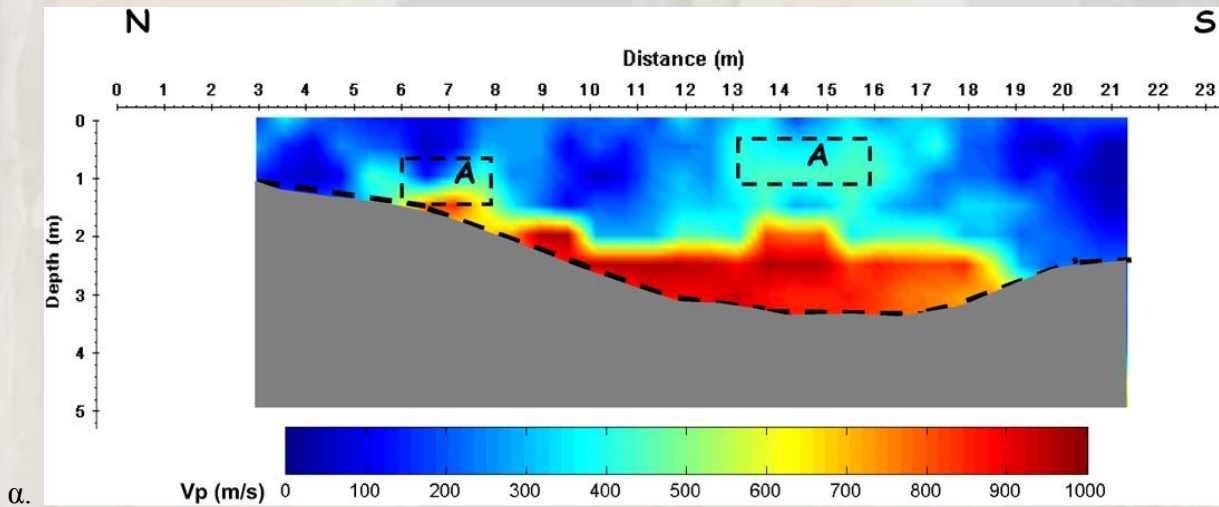
Τα αποτελέσματα της μεθόδου δείχνουν ότι το υπέδαφος για μικρά βάθη, μπορεί να χωριστεί σε δυο βασικές ζώνες

1) Η πρώτη μεταξύ 0-2m βάθος όπου εντοπίστηκαν οι χαμηλότερες σεισμικές ταχύτητες  $V_p$  (200-400m/s) αντιστοιχεί σε μια περιοχή όπου τα προφίλ ERT δείχνουν χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Άρα συμπεραίνουμε ότι σε αυτές τις περιοχές υπάρχει διαβρωμένο υπόβαθρο.

2) Η δεύτερη (βάθος πάνω από 2,5m) χαρακτηρίζεται από ταχύτητες 700-900 m/s στην περιοχή όπου τα προφίλ ERT δείχνουν υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης. Η αύξηση της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων μπορεί να οφείλεται σε περισσότερο συνεκτικό υλικό.

Αφού όλες οι τιμές 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 των ίσων

σεισμικών ταχυτήτων. Εδώ η ανωμαλία Α είναι πιο εμφανής και η εμφάνισή της με έντονη μεταβολή του σχήματος και των διαστάσεων μπορούν να την συνδέσουν με ανθρωπογενή ερείπια.



Εικόνα 3.7 :α) 2D σεισμικό μοντέλο και β) 3D απεικόνιση επιφανειών ίσων σεισμικών ταχυτήτων

### 3.1.4. Συμπεράσματα

Η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων βασίστηκε σε δύο φυσικές παραμέτρους με διαφορετική ανάλυση και ευαισθησία σε σχέση με τις δομές που προτίθεται να εντοπίσει. Η γεωηλεκτρική τομογραφία αποδίδει χώρους στο υπέδαφος διαφορετικής ειδικής αντίστασης που βοήθησαν στον εντοπισμό ανωμαλιών και αντιστοιχούν σε αρχαιολογικά ερείπια.

Η συνδυασμένη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της σεισμικής διάθλασης και της ηλεκτρικής αντίστασης βοηθά στην εξάλειψη των ασαφειών ανάμεσα στα αποτελέσματα καθώς υψηλές

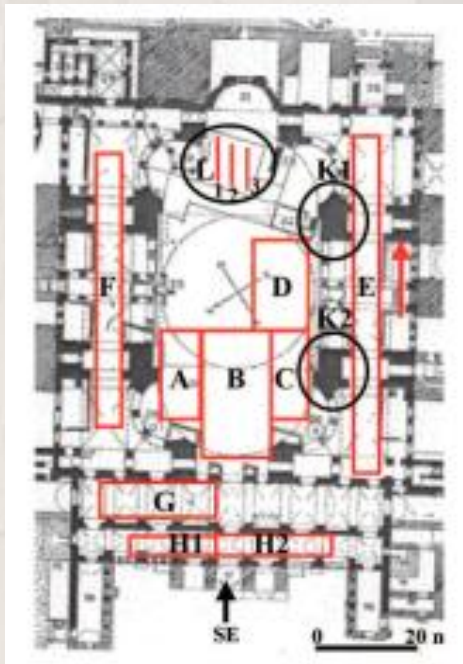
ειδικές αντιστάσεις και υψηλές σεισμικές ταχύτητες συναντάμε σε πιο συμπαγή υλικά. Οι σχετικά χαμηλές τιμές  $V_p$  μπορεί να είναι λόγω της κακής συντήρησης του τείχους, το οποίο μπορεί να επιβεβαιωθεί και από τις σχετικά χαμηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης που βρέθηκαν στον ίδιο τύπο ανωμαλιών. Παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων στην ίδια κλίμακα, τα αποτελέσματα παράγουν λογικές συσχετίσεις και ερμηνείες. Ο συνδυασμός των ταχυτήτων  $V_p$  μαζί με την μεταβολή των ηλεκτρικών ειδικών αντιστάσεων περιορίζει τα σφάλματα και τις ασάφειες και δίνει καλύτερη δυνατότητα χωρικού προσδιορισμού πιθανών αρχαιολογικών ευρημάτων.

### 3.2. Ναός Αγίας Σοφίας, Κωνσταντινούπολη

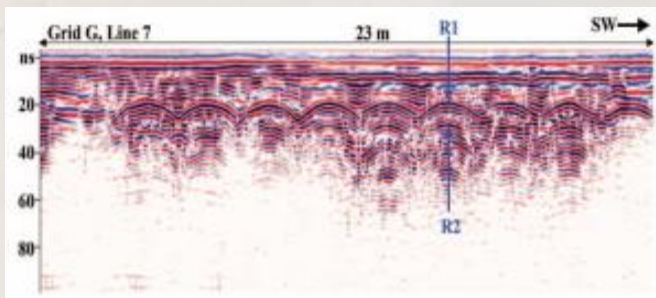
Σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν η εξέταση της θεμελίωσης του σημερινού κτιρίου, στα πλαίσια προγράμματος ανακατασκευής του το 2010. Κτισμένη μεταξύ 532 και 537 μ.Χ. από το Βυζαντινό αυτοκράτορα Ιουστινιανό, η εκκλησία της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη έχει εντυπωσιακή κατασκευή, ενώ ο τρούλος 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.

#### 3.2.1. Μέθοδος Γεωραντάρ

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 3.8: Οι μετρήσεις με GPR στο επίπεδο του δαπέδου του ναού



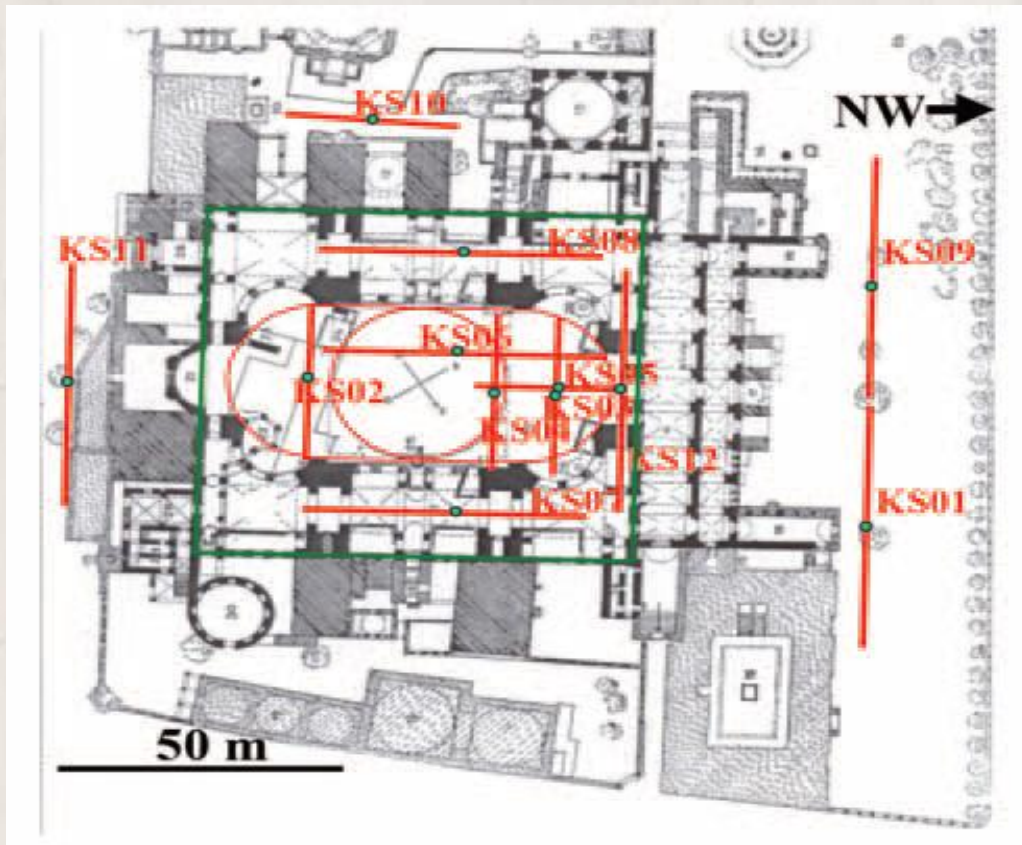
Εικόνα.3.9.: Ανακλάσεις R1 και R2 από την κορυφή και τη βάση της δεξαμενής κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα

Παρατηρήθηκαν δύο ζώνες στις τομές του γεωραντάρ. Η ανώτερη ζώνη εκτείνεται σε βάθος 5m και μάλλον οφείλεται στα απομεινάρια 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.

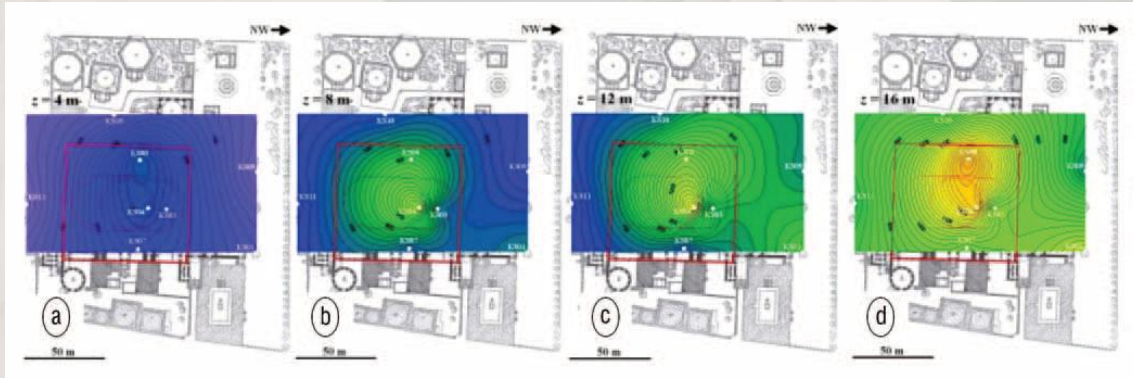
### 3.2.2. Σεισμική μέθοδος

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 τοποθετήθηκαν τα γεώφωνα. Χρησιμοποιήθηκε χειροκίνητη σφύρα και μια πλάκα αλουμινίου με ένα μικρό πλαστικό μαξιλάρι ώστε να μην προξενηθούν ζημιές στο μαρμάρινο δάπεδο, και εφαρμόστηκαν τρεις καταγραφές της κρούσης σε αναφορά με την τοποθεσία τα πηγής, στις άκρες του αναπτύγματος και στο κέντρο του αναπτύγματος.



Εικόνα 3.9: Κάνναβος μετρήσεων σεισμικών.





**Εικόνα 3.10:** Ισοβαθή μοντέλα τομών S- κύματος σε βάθη από (α) 4 m, (β) 8 m, (γ) 12 m, και (δ) 16 m . Η χαμηλότερη ταχύτητα είναι 200m / s (σκούρο μπλε) και η υψηλότερη ταχύτητα είναι 1200 m / s (κίτρινο).

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.

### 3.2.3. Συμπεράσματα

Από την έρευνα με GPR στην εκκλησία της Αγ. Σοφίας εντοπίστηκε η γεωμετρία των ερειπίων θεμελίωσης της προηγούμενης κατασκευής που βρισκόταν στην ίδια περιοχή, μαζί με εδαφικό υλικό που ήταν γνωστό ότι υπήρχε όταν χτιζόταν το σημερινό κτήριο.

Στην συνέχεια προσδιορίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά το πηγαδιού που ανακαλύφθηκε κάτω από τον εσωτερικό νάρθηκα, από προηγούμενη έρευνα με GPR.

Από την σεισμική μελέτη, υπολογίστηκαν οι ταχύτητες P και S των κυμάτων κάτω από τα θεμέλια της εκκλησίας. Εκτός από τα πρώτα μέτρα βάθος (0-6m) οι ταχύτητες των κυμάτων είναι πάνω από 700m/s γεγονός που δείχνει ότι η εκκλησία χτίστηκε επάνω σε ένα ισχυρό υπόστρωμα. (Oz Yilmaz, 2013)

### **3.3. Χαρακτηρισμός χωμάτινου φράγματος μέσω της συνδυασμένης χρήσης της ηλεκτρικής τομογραφίας, και της σεισμικής τομογραφίας και επιφανειακών σεισμικών κυμάτων**

Ο προσδιορισμός της τρέχουσας κατάστασης των κτιρίων και υποδομών μέσω μη επεμβατικών γεωφυσικών μεθόδων είναι ένα θέμα που δεν καλύπτεται ακόμη από τεχνικές προδιαγραφές, δεδομένου ότι η εφαρμογή των ερευνών αυτών για υψηλής ανάλυσης εντοπισμού στόχων είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία.

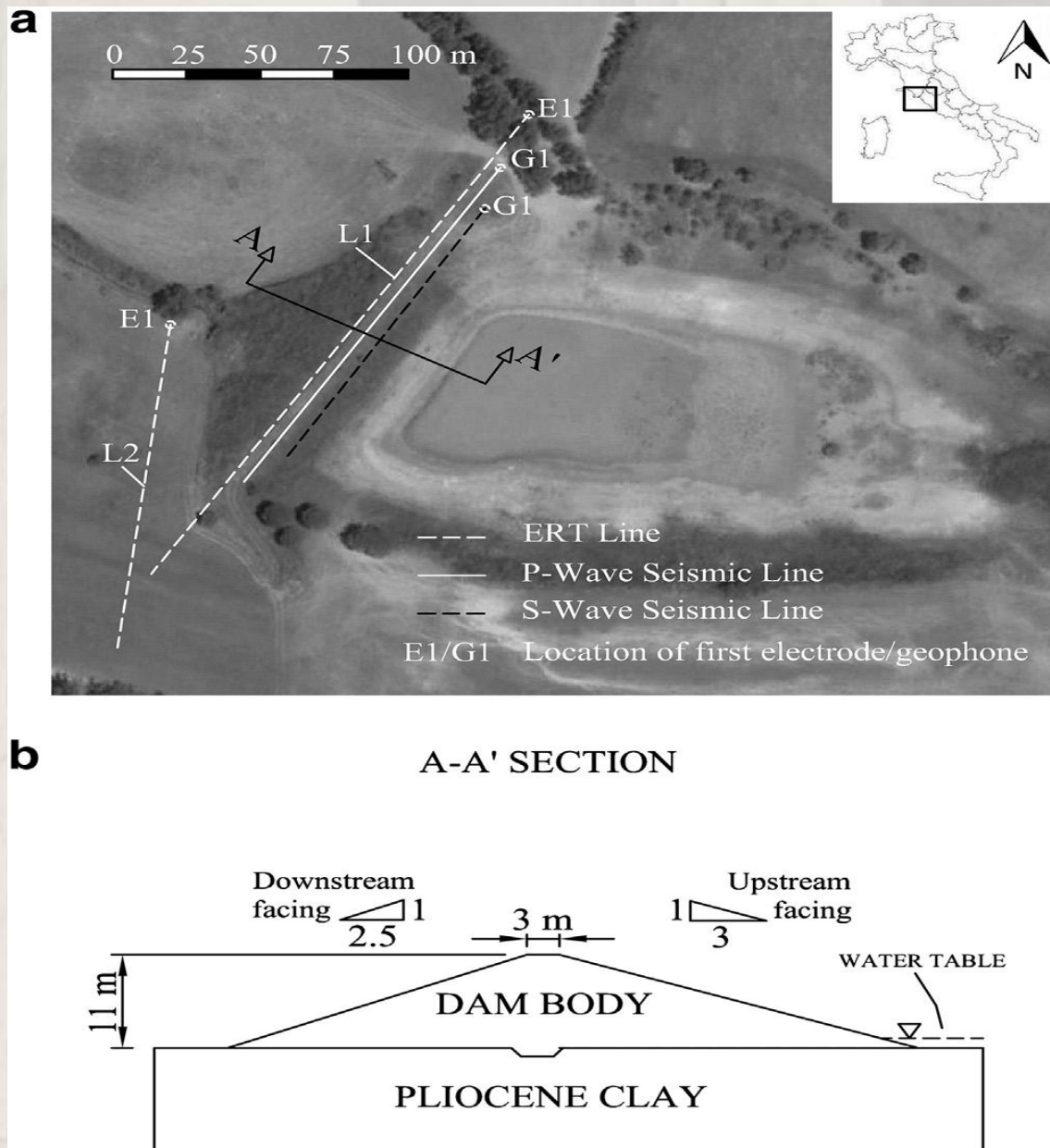
Τα φράγματα με υλικό από την περιοχή εκσκαφής τους είναι μια καινούρια εφαρμογή στη μηχανική. Προτείνεται η εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας της σεισμικής τομογραφίας και της μεθόδου επιφανειακών σεισμικών κυμάτων για την απεικόνιση της γεωμετρίας του σώματος του φράγματος και του υποκείμενου εδάφους και για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του. Επειδή η ταχύτητα S-κύματος είναι στενά συνδεδεμένη με τις ιδιότητες της μηχανικής, όπως η αντοχή σε διάτμηση, ζώνες χαμηλής ταχύτητας στα μοντέλα ταχύτητας S-κύματος είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Κατά την απόκτηση σεισμικών δεδομένων στα φράγματα που γεμίζονται με υλικό από την εκσκαφή τους, δεν είναι ασυνήθιστο να συναντήσουν επιφανειακά στρώματα με μεγάλες μεταβολές στην σεισμική ταχύτητα. Εάν είναι διαθέσιμες ελαφρού τύπου σεισμικές πηγές τα σεισμικά δεδομένα εμφανίζουν γενικώς ένα στενό εύρος ζώνης συχνοτήτων: η έλλειψη εξαρτημάτων υψηλής συχνότητας γενικά εμποδίζει της καλής ποιότητας ρηχές αντανάκλασεις. Αν δεν υπάρχει δυνατότητα να αυξηθεί η δυναμικότητα καθώς και το περιεχόμενο συχνότητας της σεισμικής πηγής, η ενσωμάτωση δεδομένων από άλλες σεισμικές μεθόδους είναι ο μόνος διαθέσιμος τρόπος για να επιτευχθεί ένας αξιόπιστος χαρακτηρισμός στα πλαίσια της μελέτης.

Για τους λόγους αυτούς, συνδυάστηκαν P- και SH- σεισμική τομογραφία με πολυκαναλική ανάλυση των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων για να χαρτογραφήσουν το εσωτερικό και τα βασικά χαρακτηριστικά του φράγματος που βρίσκεται στην κεντρική Ιταλία.

Η ταυτόχρονη χρήση των P και S-κυμάτων τομογραφία μας επέτρεψε να ελέγξει την διαστρωμάτωση του φράγματος με τις σεισμικής ταχύτητες, ενώ η ερμηνεία των επιφανειακών κυμάτων επέτρεψε να καθοριστούν πολύ ισχυρές αντιθέσεις ταχύτητας μέσα και κάτω από τη δομή. Ομοίως, η ηλεκτρική τομογραφία επιβεβαίωσε ότι το σώμα του φράγματος είναι ομοιογενές, χωρίς ανώμαλες διακυμάνσεις τόσο πλευρικά όσο και με το βάθος. Τα γεωφυσικά αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για να καθοδηγήσουν τη μελλοντική παρέμβαση-μετασκευή στο χώρο.

Το ανάχωμα, που βρίσκεται κοντά Civitavecchia (περίπου 50 χιλιόμετρα στη βόρεια Ρώμη, Ιταλία) χτίστηκε για να δημιουργήσει μια δεξαμενή για την άρδευση και να χρησιμεύσει και ως αντιπυρική ζώνη. Το φράγμα είναι σήμερα εκτός λειτουργίας, και η γεωφυσική έρευνα διεξήχθη με τη στάθμη του νερού πολύ πιο κάτω από ότι αρχικά σχεδιάστηκε να λειτουργεί. Ως εκ τούτου, η πιθανή διαρροή εντός του σώματος του φράγματος δεν θα μπορούσε να διερευνηθεί.



Εικόνα 3.11 : Η περιοχή μελέτης κοντά στην Cittavecchia.

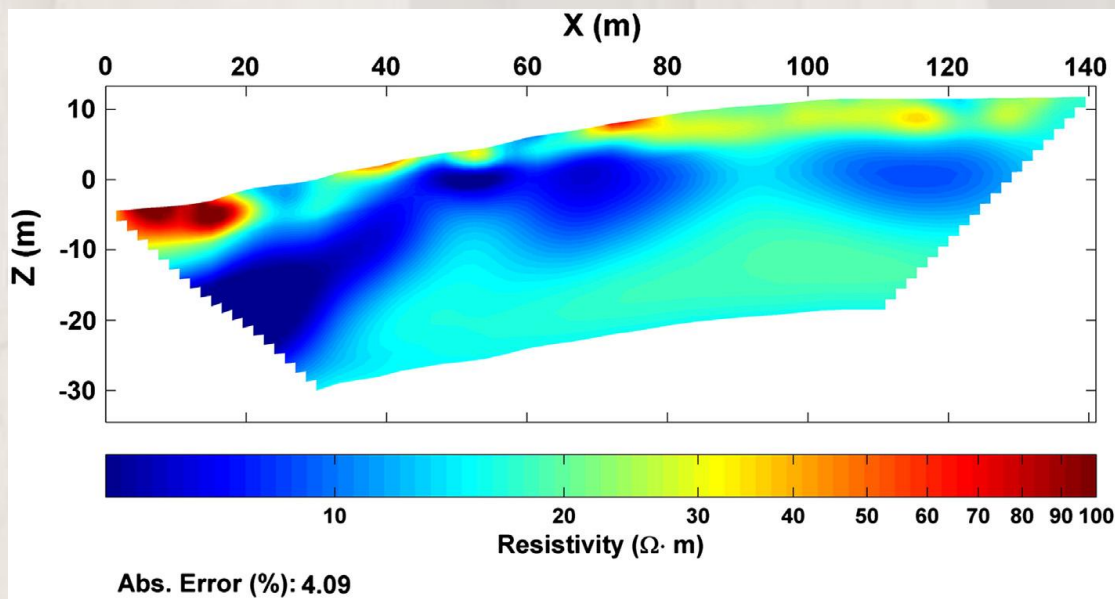
### 3.3.1. Γεωηλεκτρική τομογραφία

Η γεωηλεκτρική τομογραφία EPT, πραγματοποιείται με τη χρήση 48 ηλεκτρόδια με μεταβλητή απόσταση (2 ή 3 μέτρα) σχεδιαστεί για να επικυρώνει την υποτιθέμενη γεωμετρία και τις φυσικές ιδιότητες του φράγματος σώματος (L1) και του εδάφους θεμελίωσης (L2).

Πραγματοποιήθηκαν δύο γραμμές EPT, μία στην κορυφή του αναχώματος (L1) και ένα έξω από το ανάχωμα για να διερευνήσει τις ηλεκτρικές ιδιότητες των in-place γεωλογικών υλικών (L2). Ολόκληρο το τμήμα παρουσιάζει χαμηλές τιμές αντίστασης, υποδεικνύοντας την παρουσία μιας αργιλώδους μήτρας σε όλους τους σχηματισμούς.

Το σώμα του φράγματος (εξαιρουμένης της επιφάνειας ξεπερασμένο ζώνη) είναι καλά οριοθετημένο αρκετά ομοιογενές όσον αφορά ηλεκτρική αντίσταση, και χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές αντίστασης ( $5-10 \Omega \cdot m$ ), επιβεβαιώνοντας ότι το ανάχωμα αποτελείται κυρίως από άργιλο.

Πλευρικά του φράγματος η αντίσταση είναι ελαφρώς υψηλότερη, υποδεικνύοντας την παρουσία προσχώσεων. Από τις ηλεκτρικές μετρήσεις μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι το σώμα του φράγματος είναι αρκετά ομοιογενές όσον αφορά την ηλεκτρική αντίσταση: οι αποδείξεις από τις γραμμές L1 επιβεβαιώνουν ότι το σχήμα του φράγματος διατηρείται σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό και ότι τα θεμέλια του εδάφους παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές αντίστασης σε σύγκριση με το σώμα του φράγματος, σύμφωνα με ανεξάρτητες γεωλογικές πληροφορίες.



Εικόνα 3.12 : Αποτέλεσμα αντιστροφής για τη γραμμή ERT L2.

### 3.3.2. Σεισμικά

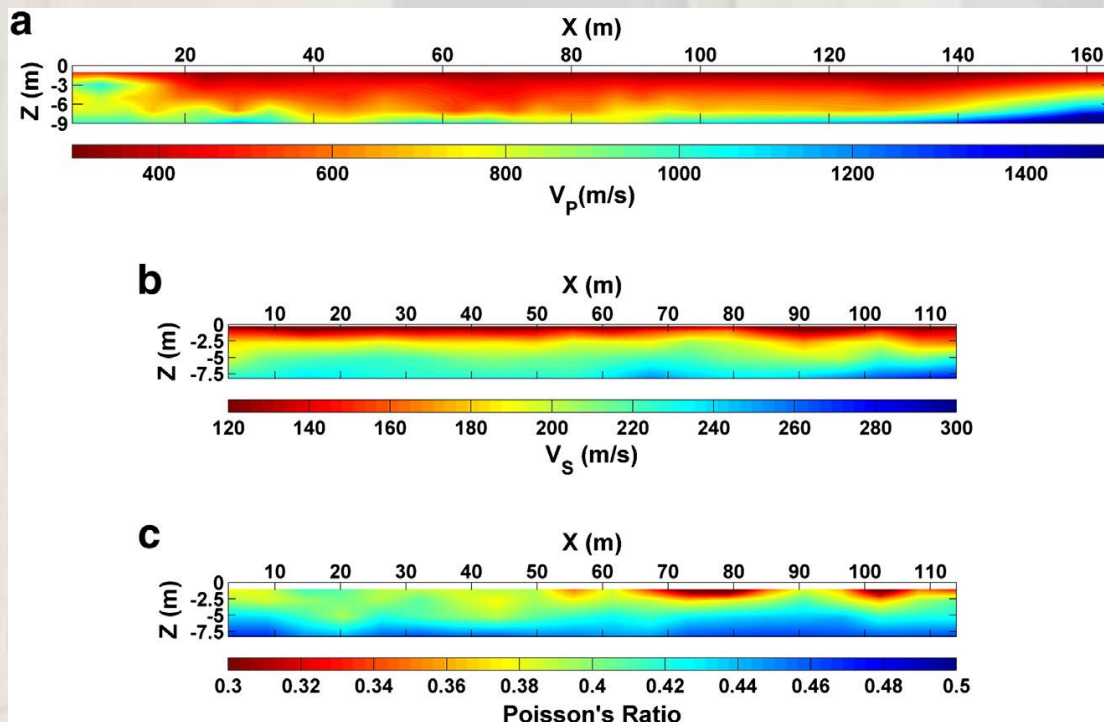
Το τμήμα P-κυμάτων της σεισμικής τομογραφίας επιβεβαιώνει την γεωμετρία του σώματος του φράγματος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ERT. Το επιφανειακό στρώμα, συνεχής κατά μήκος του σώματος του φράγματος, παρουσιάζει τιμές ταχύτητας που κυμαίνονται μεταξύ 400 και 600 m / s. Κάτω από το επιφανειακό στρώμα το φράγμα επιδεικνύει υψηλότερες ταχύτητες P-κυμάτων μέχρι 1200-1400 m / s

Αυτά τα ευρήματα είναι συνεπή με τα αποτελέσματα της ERT. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων αλληλοεπαληθεύονται..

Τα S-κύματα κυμαίνονται από περίπου 120 m / s στην επιφάνεια, σε περίπου 250 m / s στα 8 m βάθος, που είναι το μέγιστο βάθος που διερευνάται με αυτήν την τομογραφία.

Έχοντας τόσο το P-κυμάτων και τις ταχύτητες S-κυμάτων, υπολογίστηκε ένα τμήμα σε όρους της αναλογίας Poisson, όπου είναι ο λόγος μεταξύ  $V_P$  και  $V_S$ . Εκτός από την επιφάνεια του εδάφους ο εσωτερικός πυρήνας του φράγματος παρουσιάζει μια τιμή Poisson στην περιοχή των 0,30 και 0,49, όπου οι κορυφαίες τιμές είναι τυπικές για μια τέτοια κατάσταση. Κατωτέρω, όπου ένας

αργιλλούχος πηλός αποτελεί το κορεσμένο υποκείμενο στρώμα, η αναλογία αυξάνει Poisson μέχρι 0.49, η οποία είναι μια συνήθης τιμή κάτω από τέτοιες συνθήκες.



Εικόνα 3.13: α) μοντέλο της σεισμικής γραμμής P-Wave. β) μοντέλο της σεισμικής γραμμής S-Wave. γ) το τμήμα του λόγου Poisson που προέρχεται από τα σεισμικά μοντέλα

### 3.3.3. Συμπεράσματα

Στην μελέτη αυτή επανεξετάστηκε η δομική ακεραιότητα του χωμάτινου φράγματος ώστε να μπορέσει να μετασκευαστεί. Η ηλεκτρική και η σεισμική τομογραφία παρέχουν πληροφορίες για το είδος του εδάφους και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά με πολύ αξιόπιστο τρόπο όπως συνδυάστηκαν Παρ όλο που η σεισμική τομογραφία δεν έγινε σε βάθος, με την multichannel analysis MASW αυξήθηκε το βάθος διείσδυσης οδηγώντας σε σχετικά ασφαλή συμπεράσματα συνδυαζόμενο με την ηλεκτρική τομογραφία ERT τόσο για την στρωματογραφία όσο και για τις μηχανικές ιδιότητες του φράγματος (Cardarelli, Cercato, & Donno, 2014)

### **3.4 Η ηλεκτρική τομογραφία ERT στην απεικόνιση υπεδάφους ως Μη Καταστροφική Έρευνα στην συντήρηση ιστορικών κτιρίων .Εφαρμογή στο παλάτι του HabibSakakini.**

Η μελέτη αυτή παρουσιάζει την εφαρμογή της μη καταστροφικής μεθόδου της γεωηλεκτρικής τομογραφίας για τις έρευνες απεικόνισης του υπεδάφους στην Αίγυπτο για την αποκατάσταση και ενίσχυση του παλατιού του Habib Sakakini. Η χρήση αρκετών γεωηλεκτρικών μεθόδων υψηλής ανάλυσης που προέρχονται από τεχνικές επιτόπιων ερευνών αποδείχτηκαν πολύ αποτελεσματικές στα πλαίσια των μη καταστροφικών τεστ καθώς και στην μελέτη της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς. Συγκεκριμένα η εφαρμογή μιας τομογραφικής προσέγγισης μας επέτρεψε να αποκτήσουμε μια εικόνα της τομής του φέροντος εδάφους με τα πολύπλοκα στρώματά του που ξεκάθαρα εμφανίζει ενδεχόμενες ανωμαλίες. Ορισμένα πειράματα που έγιναν με γεωηλεκτρικές τομογραφικές μεθόδους έδωσαν πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα παρόλο που έγιναν σε ιστορικά κτίρια που θεωρούνται εχθρικό περιβάλλον για τα γεωηλεκτρικά. Επίσης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ταχύτητα των μετρήσεων καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, που είναι πιο γρήγορες και πιο οικονομικές. Η χρήση των γεωφυσικών μεθόδων παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, εν' αντιθέσει με μερικές "κλασσικές" τεχνικές, μερικές από τις οποίες είναι η ταχύτητα της εκτέλεσης του πειράματος η μη καταστρεπτική εφαρμογή τους και το κόστος.

#### **3.4.1. Πεδίο εργασιών**

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να διαχωρίσουμε τις εδαφολογικές συνθήκες σε μια συνεχόμενη δισδιάστατη εικόνα της κατανομής της ειδικής αντίστασης τόσο οριζόντια όσο και σε βάθος και να την συγκρίνουμε με τα δεδομένα από τις γεωτρήσεις έτσι ώστε να εντοπίσουμε διάφορες ανωμαλίες καθώς και την εδαφική ομοιογένεια.

#### **3.4.2. Το Παλάτι El-Sakakini**

Η περιοχή γύρω από το παλάτι του Χαμίμπ Σακακίνι έχει τραβήξει την προσοχή αρκετών ιστορικών και αρχαιολόγων καθώς η τοποθεσία του παλατιού στους αρχαίους χρόνους ήταν μία λίμνη η οποία αποξηράνθηκε το 1892 από τον Χαμίμπ Σακακίνη για να κατασκευαστεί το παλάτι του το 1897 .Το παλάτι βρίσκεται μέσα στην πόλη του Καΐρου σε μια περιοχή γεμάτη ανθρώπους και γειτονικά κτίρια. Χτισμένο με εκκεντρική, για τα δεδομένα της Αιγύπτου, αρχιτεκτονική εικάζεται ότι είναι αντιγραφή ενός Ιταλικού παλατιού με ροκοκό επιρροές. Η τοποθεσία είναι εξέχουσα καθώς 8 κύριοι δρόμοι εκτείνονται προς τα έξω καθιστώντας το παλάτι το κέντρο της οικοδομικής ζώνης.

#### **3.4.3. Περίληψη της μεθόδου γεωηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) , και της διάταξης των ηλεκτροδίων**

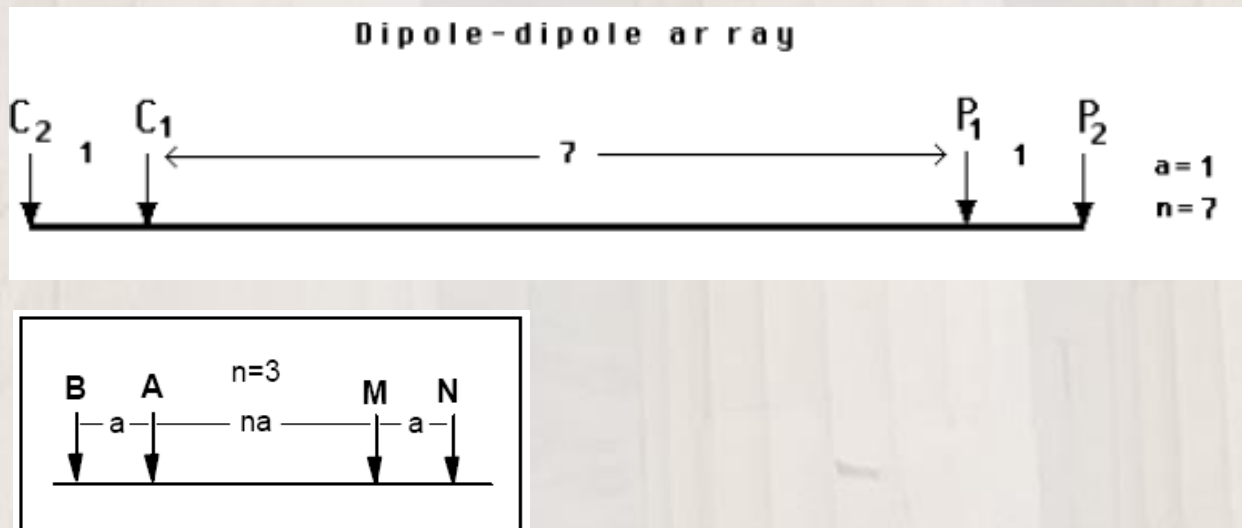
Με την μέθοδο ERT μπορούμε να απεικονίσουμε δισδιάστατα τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Όσον αφορά την διάταξη των ηλεκτροδίων υπάρχουν διάφοροι τύποι διατάξεων όπως:

Η διάταξη Wenner

Η διάταξη Schlumberger

Η διπολική διάταξη (Dipole-Dipole)

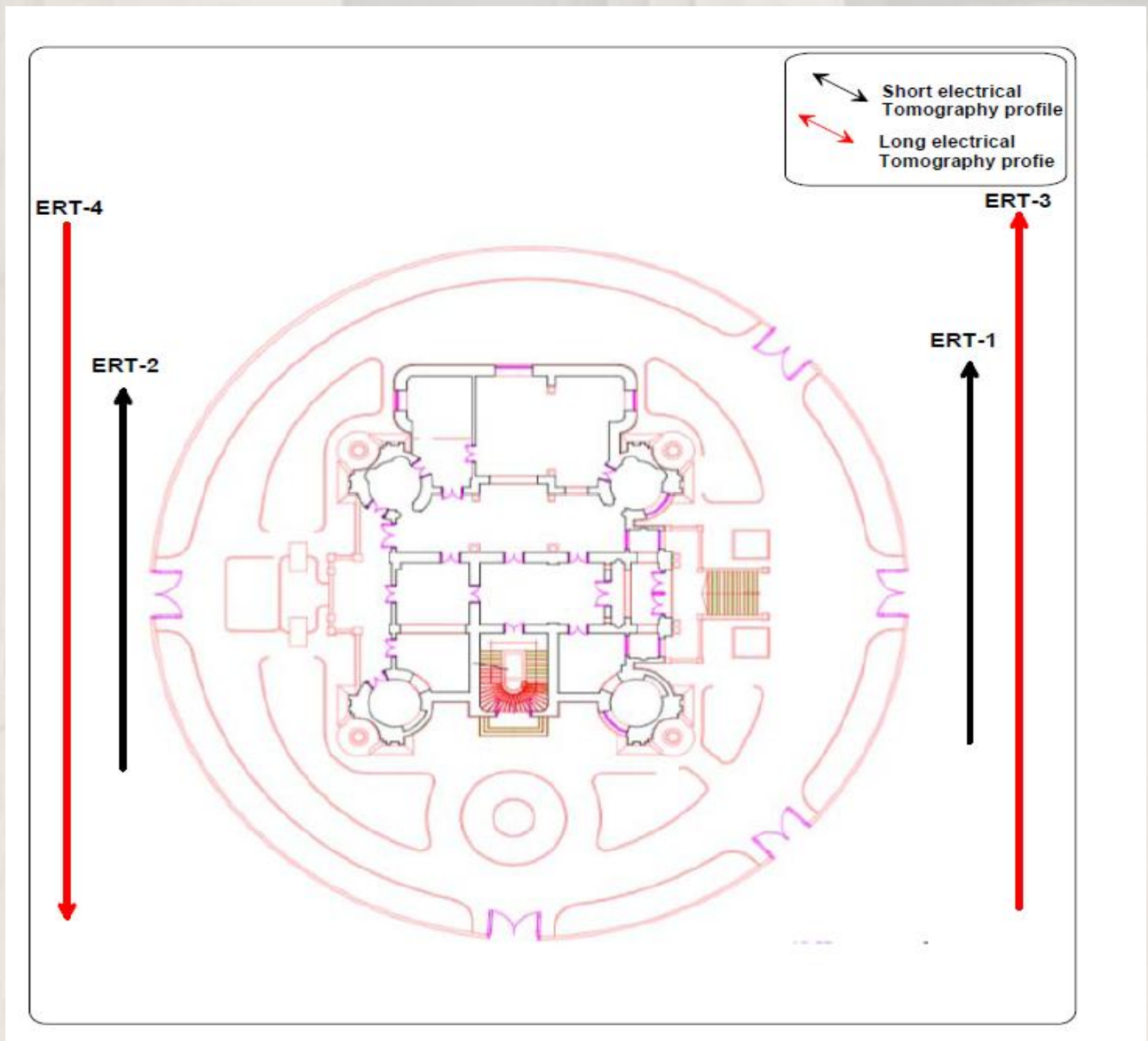
Για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η dipole- dipole διάταξη λόγω της ισχύς του σήματος και της οριζόντιας ευκρίνειας που παρουσιάζει. Η κατανομή των ηλεκτροδίων στην dipole- dipole διάταξη παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.14**. Το διάστημα ανάμεσα στο τρέχον ζεύγος ηλεκτροδίων C1 - C2 δίνεται ως "α" και είναι το ίδιο με την απόσταση ανάμεσα στο δυναμικό ζεύγος ηλεκτροδίων P1 - P2. Στην **Εικόνα 3.14** παρουσιάζεται και ο παράγοντας "n" που είναι η αναλογία της απόστασης ανάμεσα στα ηλεκτρόδια C1 και P1 προς την απόσταση "α" ανάμεσα στα C2-C1. Για μελέτες που χρησιμοποιούν αυτή την διάταξη το "α" μένει σταθερό και ο παράγοντας "n" αυξάνεται από το 1 στο 2 στο 3 ή και περισσότερο έτσι ώστε να αυξήσουμε και το βάθος της έρευνας.



**Εικόνα 3.14:** Η διάταξη των ηλεκτροδίων στην dipole- dipole διάταξη

### 3.4.4. Έρευνα πεδίου, επεξεργασία δεδομένων και μοντελοποίηση.

Για τις μετρήσεις στο πεδίο χρησιμοποιήθηκε η Dipole-Dipole διάταξη Δύο προφίλ έγιναν με μήκος στα 90μ και δύο στα 30μ για να εντοπίσουμε τις βαθιές και ρηχές ιδιότητες. Εγινε έλεγχος αντίστασης επαφής πριν την διενέργεια των μετρήσεων και η επεξεργασία των δεδομένων και η μοντελοποίηση έγινε με την βοήθεια του λογισμικού RES2DINV. Το συγκεκριμένο λογισμικό υποστηρίζει και την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 3.15 : Οι ηλεκτρικές τομογραφίες στο παλάτι ElSakakini

### 3.4.5. Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.16 και 3.17, με τα γεωηλεκτρικά μοντέλα του υπεδάφους, το υπέδαφος στο παλάτι El Sakakini αποτελείται κυρίως από 4 στρώματα:

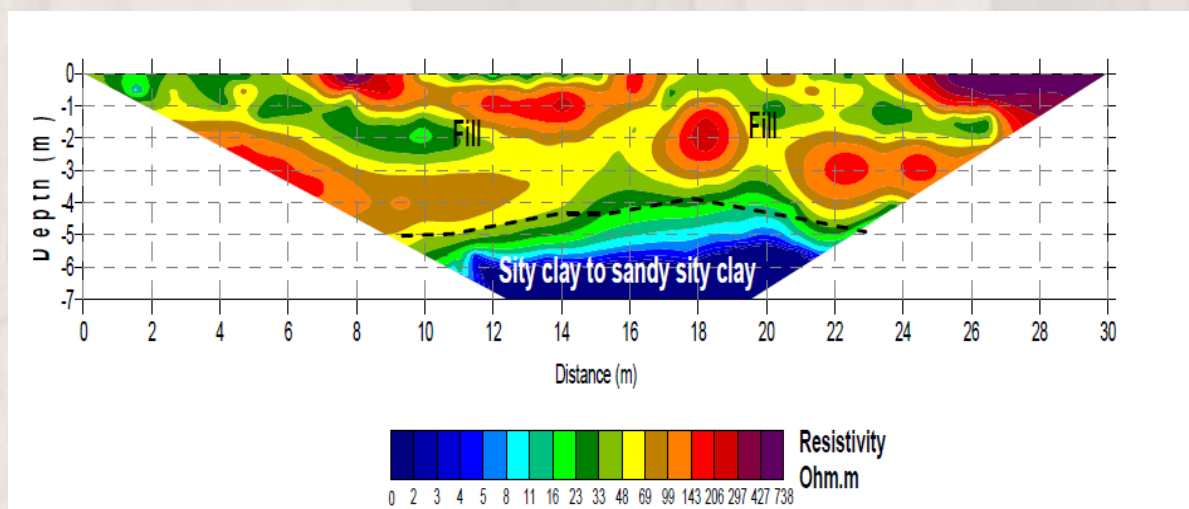
1. το πρώτο στρώμα αποτελείται από ιλυώδες πυλό, κομμάτια ασβεστόλιθου, θραύσματα αγγείων και εκτείνεται σε βάθος 5μ και έχει κατά μέσο όρο ειδική αντίσταση 10-450 Ohm.m
2. Το δεύτερο στρώμα αποτελείται από ιλυώδες πυλό αναμειγμένο με άμμο σε μερικά σημεία και ξεκινώντας από μέσο βάθος 5μ και εκτείνεται σε βάθος 15μ. Στο δεξί τμήμα το έδαφος έχει σχετικά χαμηλή ειδική αντίσταση ανάμεσα 2-30 Ohm.m. Στο αριστερό τμήμα το έδαφος έχει



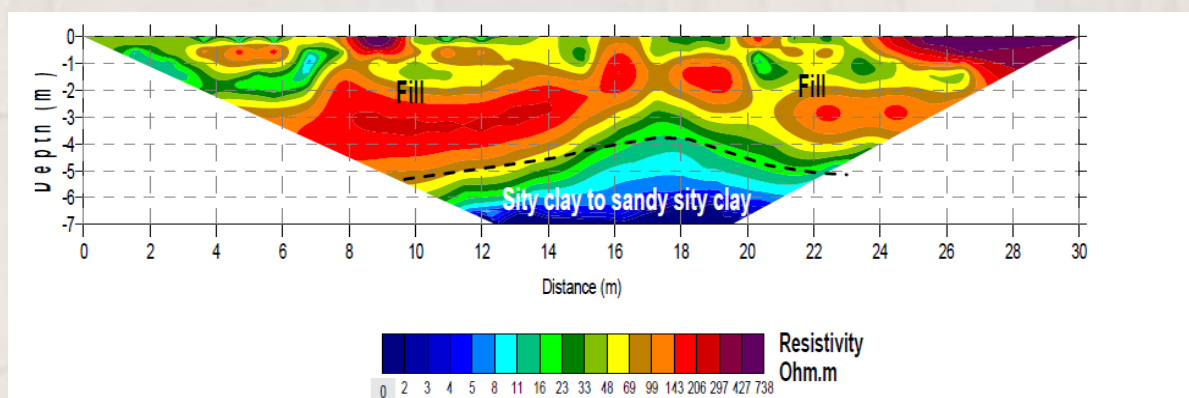
υψηλότερη ειδική αντίσταση ανάμεσα 70-300 Ohm.m. Αυτό ίσως οφείλεται στην παρουσία διαφόρων στοιχείων μέσα στο έδαφος.

3. Το τρίτο στρώμα αποτελείται κυρίως από άμμο και χαλίκι και εκτείνεται σε βάθος 15-20μ και έχει μεσαία ειδική αντίσταση 100-300 Ohm.m.

Βάσει των γεωηλεκτρικών μοντέλων ειδικής αντίστασης το υπέδαφος δεν παρουσιάζει ομοιογενή χαρακτηριστικά. Τα τμήματα που είναι κορεσμένα παρουσιάζουν υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης παρεμβαλλόμενη από χαμηλή τιμή και το αντίστροφο. Επίσης το έδαφος είναι κορεσμένο με νερό στο ρηχό τμήμα το οποίο συνιστά φαινόμενο αποσάθρωσης στο παλάτι. Κλείνοντας πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας την μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι σε ορισμένα τμήματα που υποδηλώνει την διάβρωση της βάσης των θεμελίων του παλατιού(Hemeda, 2013).



Εικόνα 3.16 : Ηλεκτρική τομογραφία γραμμή ERT1



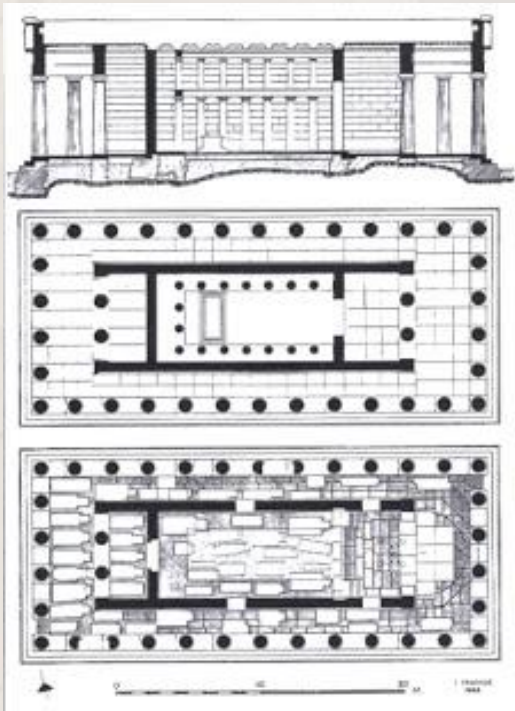
Εικόνα 3.17 : Ηλεκτρική τομογραφία γραμμή ERT2.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

## 4. Γεωφυσική Έρευνα: Θησείο, Ναός του Ηφαίστου

### 4.1 Ο Ναός του Ηφαίστου (Θησείο).

Στην κορυφή του λόφου του Αγοραίου Κολωνού, που οριοθετεί την Αρχαία Αγορά των Αθηνών στη δυτική πλευρά, βρίσκεται ο ναός του Ηφαίστου, ευρύτερα γνωστός ως "Θησείο". Πρόκειται για έναν από τους καλύτερα διατηρημένους αρχαίους ναούς, γεγονός που οφείλεται εν μέρει και στη μετατροπή του σε χριστιανική εκκλησία. Σύμφωνα με τον περιηγητή Πausανία (I, 14, 5-6), στο ναό λατρεύονταν από κοινού ο Ήφαιστος, προστάτης των μεταλλουργών, και η Αθηνά Εργάνη, προστάτρια των κεραμέων και της οικοτεχνίας. Κατασκευάστηκε από πεντελικό, κυρίως, μάρμαρο σε ρυθμό δωρικό και ήταν αφιερωμένος στη λατρεία του Ηφαίστου αλλά και της Αθηνάς, που αμφότεροι προστάτευαν τις τέχνες και τα επαγγέλματα – γύρω από τον ναό, εξάλλου, υπήρχε έντονη μεταλλουργική δραστηριότητα. Την ταύτιση του ναού ως "Ηφαιστείο" επιβεβαίωσε η ανασκαφική έρευνα με την αποκάλυψη εργαστηρίων μεταλλουργίας στην ευρύτερη περιοχή του λόφου, επισκιάζοντας, έτσι, παλαιότερες απόψεις, που αναγνώριζαν ως λατρευόμενες θεότητες το Θησεά, τον Ηρακλή ή τον Άρη. Η οικοδόμηση του ναού πρέπει να πραγματοποιήθηκε ανάμεσα στα έτη 460-420 π.κ.χ. από άγνωστο αρχιτέκτονα, στον οποίο, όμως, αποδίδονται και άλλοι ναοί στην Αττική, με παρόμοια κατασκευή.



Εικόνα 4.1: Σκαρίφημα-κάτοψη του ναού

Ο ναός διέθετε πρόναο και οπισθόδομο, δίστυλους εν παραστάσι. Εξωτερικά περιβαλλόταν από την περίσταση, μια δωρική κιονοστοιχία, με 6 κίονες στις στενές πλευρές και 13 στις μακρές. Ολόκληρο το οικοδόμημα, από την κρηπίδα έως και την οροφή, ήταν κατασκευασμένο από πεντελικό μάρμαρο, ενώ τα αρχιτεκτονικά γλυπτά που το κοσμούσαν ήταν από παριανό μάρμαρο. Στο εσωτερικό του σηκού υπήρχε δίτονη κιονοστοιχία σε σχήμα Π και στο βάθος του υπήρχε βάθρο, επάνω στο οποίο στέκονταν τα ορειχάλκινα λατρευτικά αγάλματα του Ηφαίστου και της Αθηνάς, έργα του γλύπτη Αλκαμένη, σύμφωνα με τον Pausanias, τα οποία πρέπει να

φιλοτεχνήθηκαν ανάμεσα στα έτη 421-415 π.κ.χ. Ο ναός έφερε πλούσιο γλυπτικό διάκοσμο. Από τα αρχιτεκτονικά γλυπτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετόπες, που κοσμούσαν την ανατολική πλευρά της περίστασης εξωτερικά και παριστάνουν τους εννέα άθλους του Ηρακλή. Σε συνέχεια αυτών, στη βόρεια και στη νότια πλευρά, εικονίζονται από τέσσερις άθλοι του Θησέα, σκηνές από τις οποίες προέκυψε η λαϊκή ονομασία "Θησείο" για το ναό. Η ζωφόρος δεν διατρέχει τις τέσσερις πλευρές του σηκού, αλλά μόνο τον πρόναο και τον οπισθόδομο. Στον πρόναο παριστάνεται ο νικηφόρος αγώνας του Θησέα κατά των απαιτητών του θρόνου, των 50 υιών του Πάλλαντα, στον οποίο παρίστανται και έξι θεοί του Ολύμπου. Στον οπισθόδομο, στο πλάτος του σηκού, παριστάνεται η Κενταυρομαχία. Αξιόλογες γλυπτικές παραστάσεις κοσμούσαν, επίσης, και τα αετώματα του ναού. Στο δυτικό παριστανόταν η Κενταυρομαχία και στο ανατολικό η υποδοχή του Ηρακλή στον Όλυμπο ή η γέννηση της Αθηνάς. Ορισμένα από τα γλυπτά αυτά αναγνωρίζονται σε αγάλματα που βρέθηκαν στην περιοχή του ναού, όπως το αποσπασματικά σωζόμενο σύμπλεγμα δύο γυναικείων μορφών, από τις οποίες η μια μεταφέρει στον ώμο της την άλλη, σαν να προσπαθεί να τη σώσει ("Εφεδρισμός", Μουσείο της Αρχαίας Αγοράς, αρ. ευρ. S 429), και ο κορμός μιας ενδεδυμένης γυναικείας μορφής με έντονο το στοιχείο της κίνησης, που θα μπορούσε να είναι ένα από τα ακρωτήρια του ναού ("Νηρηίδα", Μουσείο της Αρχαίας Αγοράς, αρ. ευρ. S 182).

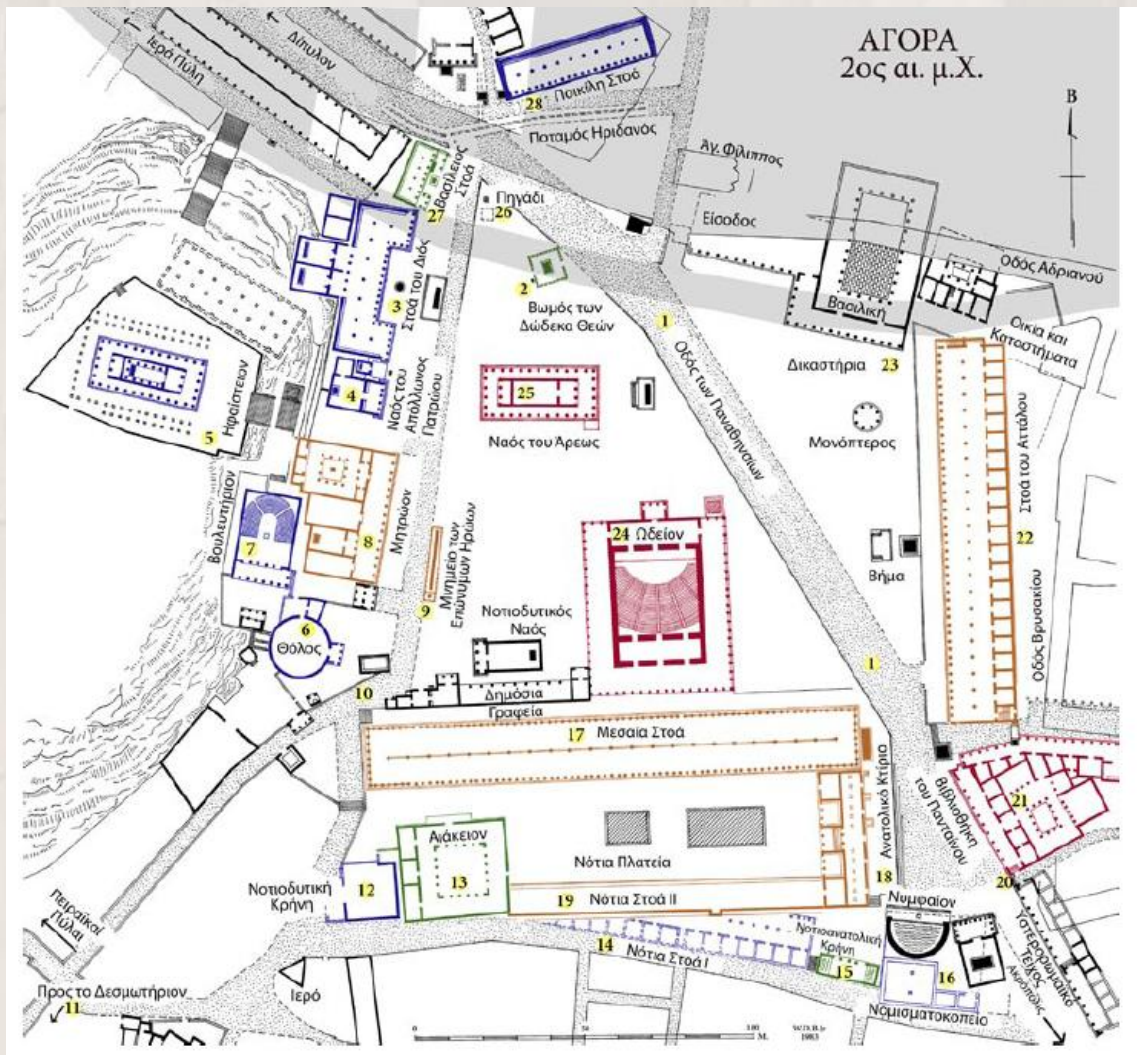


*Εικόνα 4.2 : Δυτική όψη του Ναού*

Κατά τους ελληνιστικούς χρόνους γύρω από το ναό φυτεύθηκαν θάμνοι ή μικρά δένδρα σε παράλληλες σειρές, μέσα σε γλάστρες, οι οποίες ήλθαν στο φως κατά τις ανασκαφές. Τον 7ο αι. μ.κ.χ. ο ναός μετατράπηκε σε εκκλησία του Αγίου Γεωργίου του Ακάμα και λειτούργησε έτσι έως την απελευθέρωση της Ελλάδας από τους Τούρκους. Κατά το 18ο αιώνα μέσα στο κτήριο ενταφιάσθηκαν πολλοί επιφανείς προτεστάντες, που πέθαναν στην Αθήνα, ενώ το 1834 πραγματοποιήθηκε εδώ η τελετή υποδοχής του βασιλιά Όθωνα. Έκτοτε ο ναός λειτούργησε ως αρχαιολογικό μουσείο, μέχρι την έναρξη των ανασκαφών της Αμερικανικής Σχολής στην Αρχαία Αγορά, το 1930.

## 4.2. Ανασκαφές και Αρχαία Αγορά

Το ευρύ τετράγωνο πλάτωμα που περιστοιχίζόταν από κτίρια, αποτελούσε την Αγορά, το πολύβουο κέντρο της πόλης. Τα οικοδομήματα, τα μνημεία και τα αντικείμενα (που έχουν βρεθεί, καταδεικνύουν τη σημασία αυτού του χώρου για τις ποικίλες λειτουργίες της πόλης. Το Βουλευτήριο, τα κτίρια με τα δημόσια γραφεία (Βασίλειος Στοά, Νότια Στοά I) και τα αρχεία (Μητρώο) έχουν όλα ανασκαφεί και μελετηθεί. Από τα δικαστήρια βρέθηκαν, μεταξύ άλλων, χάλκινες ψήφοι και μία κλειψύδρα που χρησιμοποιούνταν για τη χρονομέτρηση των ομιλιών. Η χρήση της περιοχής ως εμπορικού κέντρου υποδηλώνεται από τα πολυάριθμα καταστήματα, όπου αγγειοπλάστες, υποδηματοποιοί, χαλκουργοί και γλύπτες κατασκεύαζαν και πωλούσαν τα προϊόντα τους. Στους σκιερούς χώρους των επιμήκων στοών συνέρρεαν όσοι επιθυμούσαν να συναντήσουν φίλους, προκειμένου να συζητήσουν για δουλειές, πολιτική ή φιλοσοφία, ενώ αγάλματα και μνημεία υπενθύμιζαν στους πολίτες παλαιότερους θριάμβους. Μία βιβλιοθήκη και ένα ωδείο εξυπηρετούσαν τις πολιτιστικές ανάγκες. Πολυάριθμα μικρά ιερά και ναοί αποτελούσαν τόπους τακτικής λατρείας. Διοικητικές, πολιτικές και δικαστικές, εμπορικές και κοινωνικές, πολιτιστικές και θρησκευτικές δραστηριότητες συγκεντρώνονταν στο χώρο της Αγοράς, στην καρδιά της αρχαίας Αθήνας.



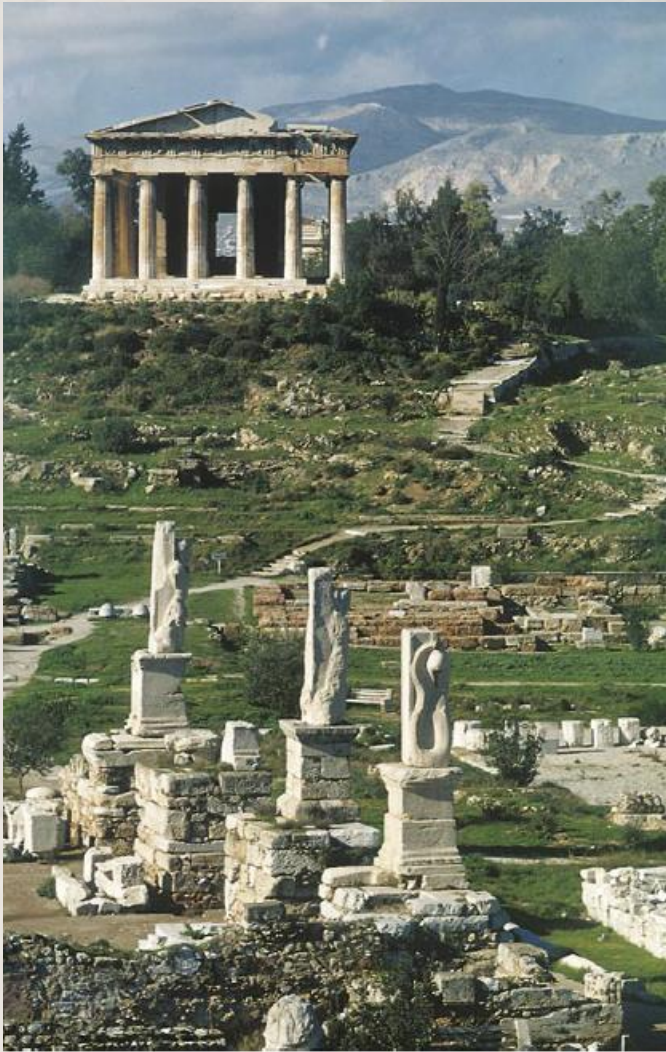
Εικόνα 4.3: Κάτοψη της Αγοράς στο απόγειο της ανάπτυξής της, γύρω στο 150 μ.Χ. (Camp, 2002)

Κατά τις ανασκαφές της αθηναϊκής Αγοράς διερευνήθηκαν τα περίπου 122 στρέμματα του κατηφορικού εδάφους στα βορειοδυτικά της Ακροπόλεως (εικ. 4.3). Ανασκάφθηκε υλικό όλων των περιόδων από την Ύστερη Νεολιθική έως τους νεότερους χρόνους, που ρίχνει φως σε 5.000 χρόνια αθηναϊκής ιστορίας. Η περιοχή κατοικούνταν πολύ καιρό πριν καταστεί το πολιτικό κέντρο της Αθήνας. Κατά την Ύστερη Εποχή του Χαλκού χρησιμοποιήθηκε ως νεκροταφείο, από το οποίο έχουν βρεθεί περίπου 50 τάφοι, που χρονολογούνται από το 1600 έως το 1100 π.Χ. Πρόκειται κυρίως για θαλαμωτούς τάφους με πολλαπλές ταφές. Η χρήση της περιοχής ως νεκροταφείου συνεχίστηκε και στην Εποχή του Σιδήρου (1100-700 π.Χ.)· βρέθηκαν περισσότερες από 80 ταφές (ενταφιασμοί και καύσεις). Δεκάδες πηγάδια υποδεικνύουν την ύπαρξη οικιών και υποδηλώνουν ότι η περιοχή είχε αρχίσει παράλληλα να κατοικείται.

Από τα μέσα του 6ου αι. π.Χ. φαίνεται ότι η γη μετατράπηκε σταδιακά από ιδιωτική σε δημόσια. Τα πρώτα κτίρια ή μνημεία (Νοτιοανατολική Κρήνη [15], Βωμός των Δώδεκα Θεών [2]) ανεγέρθηκαν στη δεκαετία του 520, κατά τη διάρκεια της τυραννίδας των Πεισιστρατιδών. Η εγκαθίδρυση της δημοκρατίας το 508/7 π.Χ. οδήγησε στην κατασκευή του Παλαιού Βουλευτηρίου [8] (στη θέση του μεταγενέστερου Μητρώου), στην τοποθέτηση των ορόσημων [10] και ίσως στην οικοδόμηση της Βασιλείου Στοάς [27].



*Εικόνα 4.4 :Πανοραμική άποψη της Αγοράς από τα νότια. Αριστερά το Ηφαίστειο (Θησείο) και δεξιά η αναστηλωμένη Στοά του Αττάλου (σήμερα μουσείο).*



*Εικόνα 4.5 : Το Ηφαιστείο (Θησείο), από την απέναντι πλευρά της Αγοράς*

Η καταστροφή του 480/479 π.Χ. από τους Πέρσες μετέτρεψε την πόλη σε ερειπίωνα. Όμως τα κτίρια στην Αγορά επισκευάστηκαν και τον 5ο και τον 4ο αι. προστέθηκαν πολλά ακόμη προκειμένου να εξυπηρετήσουν την ακμάζουσα αθηναϊκή δημοκρατία. Η Ποικίλη Στοά [28], η Θόλος [6], το Νέο Βουλευτήριο [7], η Στοά του Διός Ελευθερίου [3], η Νότια Στοά I [14], το Νομισματοκοπέιο [16] και τα Δικαστήρια [23], χτίστηκαν στην περιφέρεια της μεγάλης πλατείας, μαζί με κρήνες, ναούς και καταστήματα.

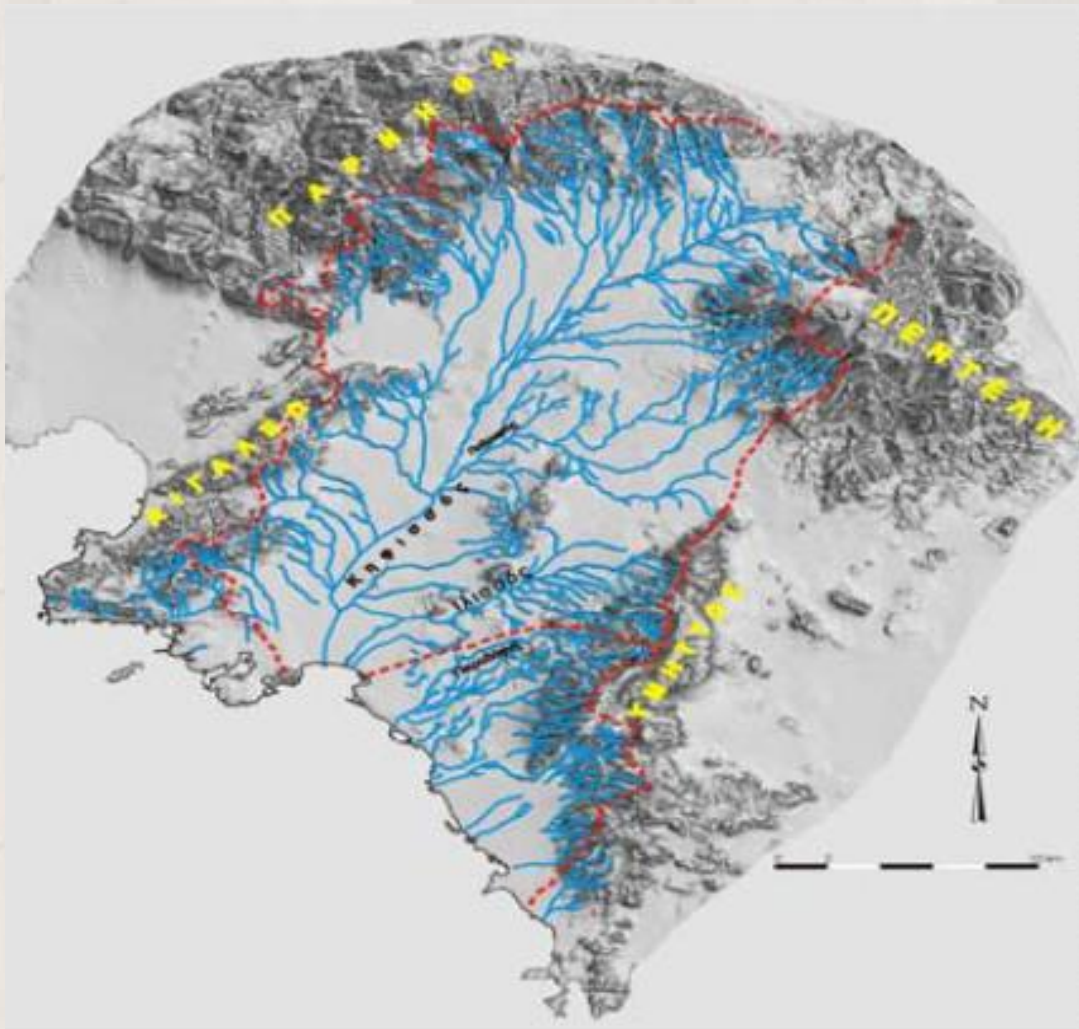
Η άνοδος του Μεγάλου Αλεξάνδρου επισκίασε την πολιτική θέση της Αθήνας, και κατά τον 3ο αι. π.Χ. η πόλη βρέθηκε υπό την επιρροή των διαδόχων του. Η ανάκαμψη του 2ου αι. τροφοδοτήθηκε από την αίγλη της Αθήνας ως του σημαντικότερου πολιτιστικού και εκπαιδευτικού κέντρου της Μεσογείου, και άκμασαν οι φιλοσοφικές σχολές που είχαν ιδρύσει ο Πλάτωνας, ο Αριστοτέλης, ο Ζήνωνας και ο Επίκουρος. Κατά τον 2ο αι. π.Χ. οικοδομήθηκαν τρεις μεγάλες στοές στην Αγορά, η Μεσαία [17], η Νότια II [19] και η Στοά του Αττάλου [22]· ακόμη, το κτίριο των αρχείων (Μητρώο [8]) ανακαινίστηκε και απέκτησε πρόσοψη με κιονοστοιχία. (Camp, 2002)

### 4.3. Γεωλογία Περιοχής

#### 4.3.1. Γεωλογία ευρύτερης περιοχής λεκανοπεδίου Αττικής

Για να μπορέσουμε να διεξάγουμε μια πλήρη και εμπειρισταωμένη Γεωφυσική Έρευνα θα πρέπει να είμαστε άριστα ενημερωμένοι για την ευρύτερη Γεωλογική κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή μελέτης. Το Λεκανοπέδιο των Αθηνών βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της Αττικής και έχει μήκος περίπου 22km από ΒΑ προς τα ΝΔ και πλάτος 11km εγκαρσίως. Αποτελεί ένα μεγάλο βύθισμα γενικής διεύθυνσης ΒΒΑ–ΝΝΔ, που οριοθετείται από τα όρη Πάρνηθα προς τα ΒΒΔ, Πεντέλη προς τα ΒΑ, Υμηττό προς τα Α και Αιγάλεω και Ποικίλο προς τα Δ, ενώ προς τα ΝΔ ανοίγεται στον Σαρωνικό Κόλπο.

Στο εσωτερικό του Λεκανοπεδίου και κατά μήκος του κεντρικού του άξονα αναπτύσσεται μια σειρά από λόφους όπως: Τουρκοβούνια, Λυκαβηττός, Στρέφη, Ακρόπολη, Φιλοπάππου, Αρδηττός, Ζωοδόχος Πηγή και άλλοι μικρότεροι.



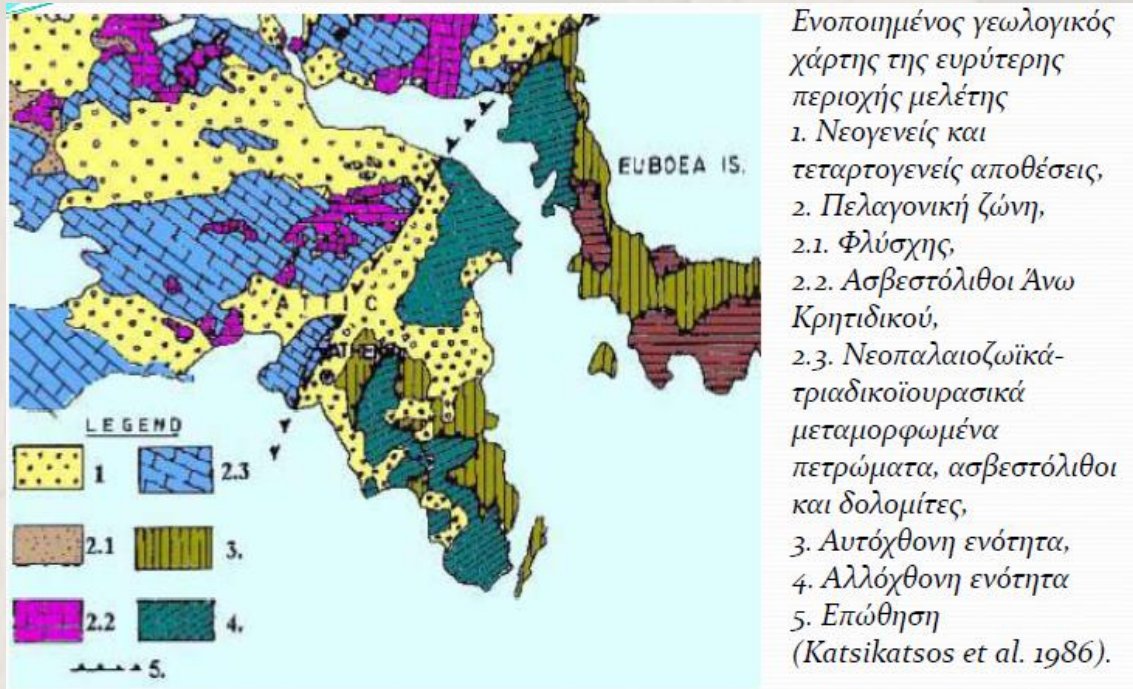
**Εικόνα 4.5 :** Κύρια Γεωλογικά χαρακτηριστικά Λεκανοπεδίου Αττικής

Οι σχηματισμοί που λαμβάνουν μέρος στη γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου, διακρίνονται σε αλπικούς και μεταλπικούς. Οι αλπικοί εντοπίζονται στους ορεινούς όγκους που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο αλλά και στους μικρούς λόφους που αναπτύσσονται μέσα σε αυτό, ενώ οι

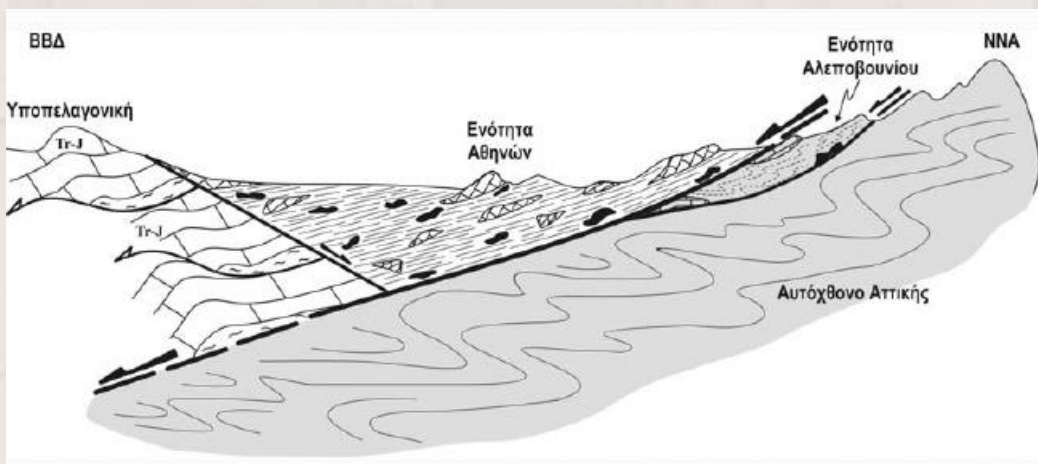


μεταλλικοί πληρούν το εσωτερικό του λεκανοπεδίου, όπου καλύπτουν ασύμφωνα τους υποκείμενους.

Η γεωλογική δομή που κυριαρχεί στο λεκανοπέδιο είναι μια μεγάλη τεκτονική ζώνη (αποκόλληση – detachment) που οριοθετεί δύο διαφορετικές ενότητες πετρωμάτων. Τα πετρώματα ανατολικά της τεκτονικής ζώνης ανήκουν στην ενότητα του μεταμορφωμένου Αυτόχθονου συστήματος της Αττικής, ενώ αυτά στα δυτικά της τεκτονικής ζώνης ανήκουν στην αλλόχθονη ενότητα της Υποπελαγονικής (Παπανικολάου 2002).



Εικόνα 4.6 : Γεωλογικός Χάρτης ευρύτερης Αττικής.



Εικόνα 4.7 : Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της ευρύτερης περιοχής των Αθηνών (Παπανικολάου 2004).

Η ζώνη τεκτονικής αποκόλλησης εφελκυστικού χαρακτήρα, έχει βυθίσει προς ΒΒΔ τα αμεταμόρφωτα πετρώματα της Υποπελαγονικής και της Ενότητας Αθηνών, και έχει ανυψώσει προς τα ΝΝΑ τα πετρώματα της Ενότητας Αλεποβουνίου και του σχετικά αυτόχθονου μεταμορφωμένου της Αττικής (Παπανικολάου κ.α. 2004).

Κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί στο Λεκανοπέδιο :

1. Αλπικοί σχηματισμοί :

A) Η Αυτόχθονη Ενότητα Αλμυροποτάμου - Αττικής, αναπτύσσεται στη Α-ΒΑ Αττική και δομεί τους ορεινούς όγκους Πεντέλης – Υμηττού και τα άλλα όρη που βρίσκονται ανατολικότερα. Κατά Παπανικολάου (2002) η αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου – Αττικής περιλαμβάνει τις ακόλουθες επιμέρους ενότητες:

A1) Τη μεταμορφωμένη ενότητα της Βάρης με εν μέρει Τριαδική ηλικία και άγνωστη μέχρι στιγμής γεωτεκτονική ένταξη.

A2) Την υπερκείμενη μεταμορφωμένη ενότητα Υμηττού, με εν μέρει τριαδικο-ιουρασική ηλικία και άγνωστη επίσης ένταξη. Αντιστοιχεί στο «Κατώτερο Μάρμαρο», «Ανώτερο Μάρμαρο» και «Σχιστόλιθους Καισαριανής» του Lepsius (1893) και περιλαμβάνει μια ακολουθία από μάρμαρα και δολομίτες που με μετάβαση περνάει σε σχιστόλιθους (που περικλείουν μεταβασικά και υπερβασικά πετρώματα), πτυχωμένα ισοκλινώς με πτυχές χιλιομετρικής κλίμακας που δημιουργούν επαναλήψεις των ίδιων οριζόντων.

A3) Την επίσης μεταμορφωμένη ενότητα Πεντέλης που ανήκει στις εξωτερικές ελληνίδες με χαρακτήρες που θυμίζουν την ενότητα της Τρίπολης ή αυτή των Νοτίων Κυκλάδων. Περιλαμβάνει μια μετα-ηφαιστειοϊζηματογενή ακολουθία στη βάση που με μετάβαση περνάει σε μια παχιά ακολουθία από μάρμαρα.

B) Τα μη-μεταμορφωμένα ιζηματογενή πετρώματα, της Υποπελαγονικής (Τεκτονικές ενότητες Σφενδάλης & Μαυρηγόρας – Κατσιμιδιού), αναπτύσσονται στη ΒΔ Αττική και δομούν τους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας, του Ποικίλου Όρους και του Αιγάλεω (Marinos & Petracheck 1956, Παπανικολάου 1986).

B1) Ο σχηματισμός βάσης, αποτελεί ένα ηφαιστειοϊζηματογενές σύμπλεγμα που αποτελείται από εναλλαγές τεφροπράσινων κυρίως και φαιών αργιλικών σχιστών, πηλιτών, ψαμμιτών, χαλαζιακών κροκαλοπαγών, τόφων και τοφφωτών μέσα στις οποίες απαντούν επίσης ασβεστόλιθοι, αρκόζες και γραουβάκες, καθώς και τεμάχια λαβών, που ανήκουν κυρίως στον τύπο του χαλαζιακού κερατοφύρη.

B2) Ο κύριος λιθολογικός τύπος της Υποπελαγονικής ενότητας αποτελείται από λευκούς, τεφρόλευκους και κατά θέσεις ροδόχρους ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, άστρωτους έως παχυστρωματώδεις, νηρητικής φάσεως. Τα ανθρακικά πετρώματα της Υποπελαγονικής εμφανίζονται συνήθως κατακερματισμένα, αναπτύσσοντας πυκνές διακλάσεις και δευτερογενές πορώδες, λόγω καρστικοποίησης, ενώ το πάχος τους φθάνει τις μερικές εκατοντάδες μέτρα.

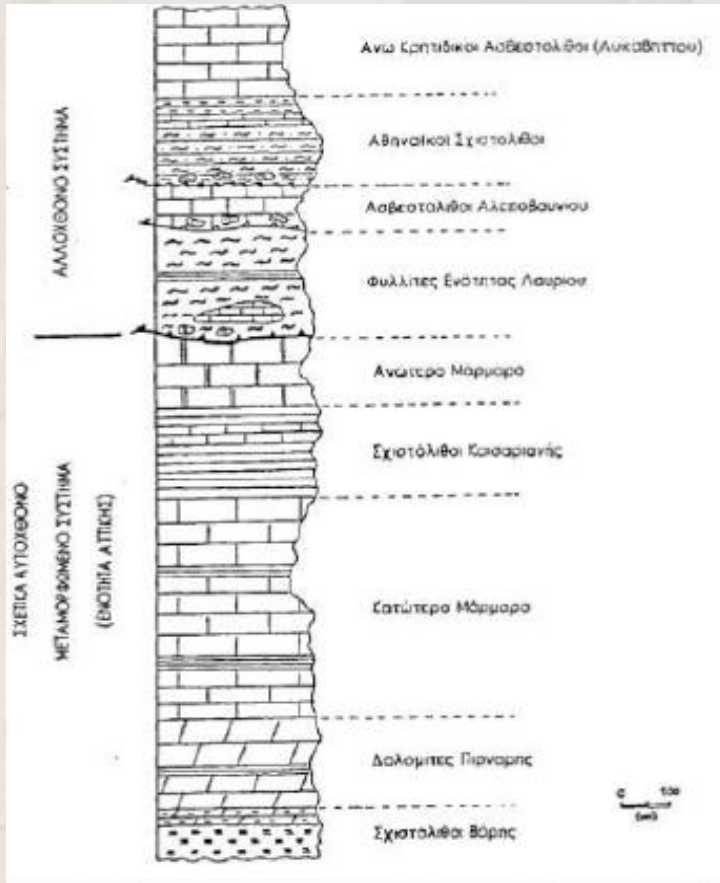
Γ) Στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του Λεκανοπεδίου, υπερκείμενη τεκτονικά της Υποπελαγονικής Ενότητας, καθώς και το ανατολικό τμήμα, υπερκείμενη τεκτονικά του Αυτόχθονου της Αττικής,

εμφανίζεται το Αλλόχθονο Σύστημα του Λεκανοπεδίου Αττικής οι «Σχιστόλιθοι των Αθηνών» (Marinos et al. 1971, 1974), οι οποίοι, με βάση τη lithολογική σύσταση, την παραμόρφωση και το βαθμό μεταμόρφωσης, διακρίνονται σε δύο ενότητες:

G1) Την υπερκείμενη, ουσιαστικά αμεταμόρφωτη, Ενότητα Αθηνών και

G2) Την υποκείμενη ελαφρά ή μη φρ μεταμορφωμένη Ενότητα Αλεποβουνίου.

Ο Κατσίκατσος (1986) εντάσσει το σύνολο των σχηματισμών αυτών στο Νεοελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα.



Εικόνα 4.8: Κόρυφο Γεωλογικοί σχηματισμοί Λεκανοπεδίου Αττικής

## 2. Μετααλπικοί σχηματισμοί

Οι μετααλπικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε σχηματισμούς του Νεογενούς και σε σχηματισμούς του Τεταρτογενούς.

Βάσει της φάσης τους αλλά και της γεωγραφικής τους κατανομής, οι νεογενείς σχηματισμοί έχουν διαιρεθεί (Παπανικολάου κ.α. 2004):

A) σε θαλάσσιους, οι οποίοι περιλαμβάνουν αμιγώς θαλάσσιες, αλλά και παράκτιες και παράλιες φάσεις και εντοπίζονται στην περιοχή του Νότιου Λεκανοπεδίου Αθηνών και

B) σε ηπειρωτικούς, οι οποίοι περιλαμβάνουν λιμναίες έως λιμνοχερσαίες αποθέσεις οι οποίες κατά θέσεις περιέχουν απολιθώματα της Πικερμικής πανίδας (Πύργος Βασιλίσσης) και εντοπίζονται στην περιοχή του Βόρειου Λεκανοπεδίου Αθηνών.

*A1) Θαλάσσιοι Νεογενείς σχηματισμοί:*

1) Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί: μάργες, ψαμμίτες, μαργαϊκοί ψαμμίτες, λατυποπαγή, ασβεστόλιθοι.

2) Άνω Μειοκαινικοί σχηματισμοί: κλαστική σειρά στην σειρά, οποία απαντώνται άργιλοι και ιλύες με κυμαινόμενο ποσοστό κυρίως σχιστολιθικών λατύπων, αμμούχες μάργες, λατυποπαγή. Η σειρά αυτή συνήθως υπόκειται των ανθρακικών ανωμειοκαινικών σχηματισμών, οι οποίοι αποτελούνται από λατυποπαγείς ασβεστόλιθους, ασβεστοψαμμίτες, κοραλλιογενείς και ωολιθικούς ασβεστόλιθους.

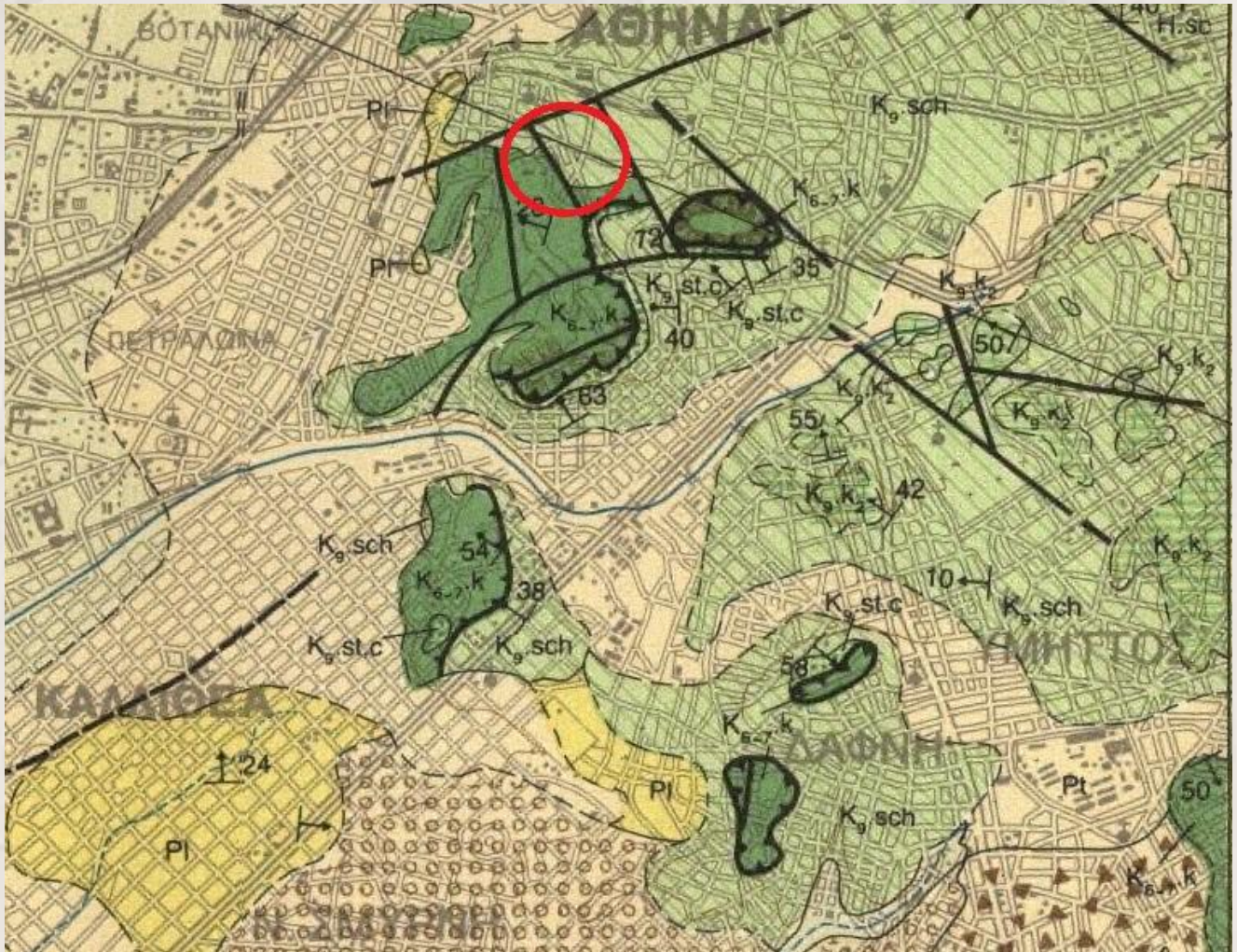
*B1) Ηπειρωτικοί Νεογενείς σχηματισμοί:*

1) Πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί: άμμοι και άργιλοι, οι οποίοι υπέρκεινται των Άνω Μειοκαινικών ηπειρωτικών σχηματισμών.

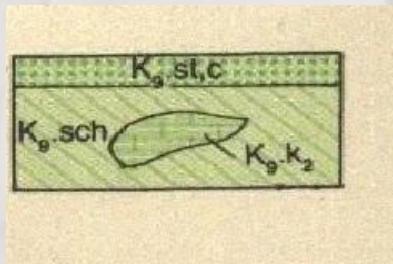
2) Άνω Μειοκαινικοί ηπειρωτικοί-λιμναίοι σχηματισμοί: μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, αμμούχες μάργες και μάργες (λιμναίες φάσεις) και ερυθρές άργιλοι και λατυποπαγή (χερσαίες φάσεις).

### 4.3.2. Γεωλογία Ναού Ηφαίστου στο Θησείο.

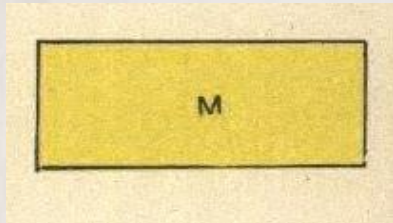
Ο Ναός του Ηφαίστου στο Θησείο ανήκει γεωλογικά στην υποπελαγονική ζώνη, στην αυτόχθονη σειρά (Μαιστρίχτιο-Ηώκαινο) όπως φαίνεται και στον χάρτη του ΙΓΜΕ .



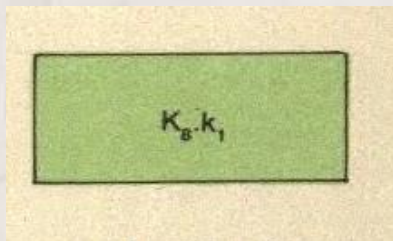
Εικόνα 4.9: Γεωλογικός χάρτης περιοχής της Αττικής με κόκκινο κύκλο απεικονίζεται η περιοχή που βρίσκεται ο Ναός του Ηφαίστου στο Θησείο (Γεωλογικός χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε., Φύλλο Αθήνα-Πειραιάς, 1997-2000)



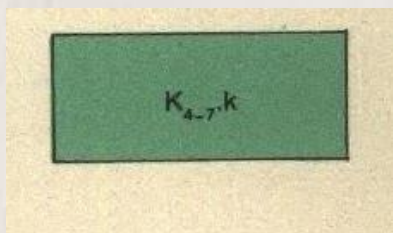
.....Αθηναϊκός Σχιστόλιθος



.....Άμμοι-Ιλύς



.....Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι



.....Ασβεστόλιθοι (επικείμενοι της σχιστολιθικής φάσεως)

**Εικόνα 4.10 :** Τμήμα από το υπόμνημα του γεωλογικού φύλλου Αθήνα-Πειραιάς

Από το υπόμνημα βλέπουμε ότι ο ναός βρίσκεται στην περιοχή του Αθηναϊκού σχιστόλιθου την οποία θα αναλύσουμε εκτενέστερα.

*Σχιστόλιθος Αθηνών (Κρητιδικό).* Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της κεντρικής περιοχής των Αθηνών αποτελώντας ταυτόχρονα το υπόβαθρο Μεταλλικών σχηματισμών και αποθέσεων. Ο Lepsius (1893) εντάσσει τους Αθηναϊκούς σχιστόλιθους στην ενδιάμεση Κρητιδική βαθμίδα και τους θεωρεί επικλυσιογενείς στα Ιουρασικά – Κάτω Κρητιδικά μάρμαρα. Οι Kober (1929), Μαρίνος & Petrascheck (1956) και Katsikatsos (1977) θεωρούν το σύστημα των Αθηναϊκών σχιστόλιθων μαζί με τους υπερκείμενους τους ανθρακικούς σχηματισμούς ως ένα σύστημα, το οποίο είναι επωθημένο στα μάρμαρα. Ο πρώτος τους τοποθετεί στο Ιουρασικό και οι υπόλοιποι στο Ανώτερο Κρητιδικό. Οι Katsikatsos et al (1986) τοποθετούν τον σχιστόλιθο Αθηνών στο Νεοελληνικό κάλυμμα, το οποίο χαρακτηρίζεται τουλάχιστον από μια μεταμόρφωση σε συνθήκες ΥΠ-ΧΘ. Ο Παπανικολάου (1986), το σύστημα αυτό το εντάσσει στην αλλόχθονη ενότητα Λαυρίου. Ο ίδιος και οι συνεργάτες του το 2004 αναφέρουν ότι πάνω

στην αυτόχθονη ενότητα και στους σχηματισμούς της Υποελαγονικής, αναπτύσσονται με τεκτονική επαφή οι σχηματισμοί της Ενότητας Αθηνών.

Ο σχιστόλιθος Αθηνών αποτελεί έναν κυρίως κλαστικό δυναμο- μεταμορφωμένο σχηματισμό, φλυσχοειδούς χαρακτήρα, μέσα στον οποίο οι επικρατούντες πετρολογικοί τύποι εναλλάσσονται τόσο στρωματογραφικά, όσο και πλευρικά με μεγάλη συχνότητα. Οι βασικοί πετρολογικοί τύποι στον Αθηναϊκό σχιστόλιθο είναι ιλυόλιθοι, αργιλικόι σχιστόλιθοι, μεταψαμμίτες χαλαζίτες και κροκαλοπαγή. Εναλλάσσονται μεταξύ τους, με επικράτηση κατά θέσεις του ενός ή του άλλου, αλλά τα ψαμμιτικά μέλη επικρατούν στους ανώτερους ορίζοντες. Χαρακτηριστικό της σειράς αυτών είναι η παρουσία υπερβασικών και βασικών σωμάτων, έντονα εξαλλοιωμένων (σερπεντινίτες, σερπεντινωμένοι περιδοτίτες, διαβάσες καισπηλίτες) και από ανθρακικά πετρώματα (κυρίως μάρμαρα).

*Βασικά γεωλογικά στοιχεία για την Γεωφυσική Έρευνα είναι ότι :*

- 1) Οι ασβεστόλιθοι Αθηνών βρίσκονται διάσπαρτοι, στις κορυφές κυρίως των λόφων, υπερκείμενοι πάντα του σχιστόλιθου Αθηνών.
- 2) Ο σχιστόλιθος Αθηνών και οι υπερκείμενοι ασβεστόλιθοι αποτελούν ενιαίο μεικτό πετρολογικό σύστημα φλυσχοειδούς τύπου με ίδια τεκτονική δομή.
- 3) Οι ασβεστόλιθοι αυτοί υπέρκεινται κανονικά του σχιστόλιθου Αθηνών.

Επίσης :

α) Τα κατώτερα μέλη αποτελούνται από λεπτοστρωματώδεις, μαργαϊκούς, κιτρινόφαιους έως κιτρινοπράσινους ασβεστολίθους, με ενδιαστρώσεις ψαμμούχων μαργών και λατυποπαγών καθώς και παρεμβολές συμπαγών κρυσταλλικών ασβεστολίθων.

β) Τα ανώτερα μέλη, που εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στις κορυφές των λόφων, συνίσταται εξολοκλήρου από γκριζόλευκους άστρωτους έως παχυστρωματώδεις συμπαγείς κρυσταλλικούς ασβεστολίθους. Αυτοί είναι αρκετά καρστικοποιημένοι και κατά θέσεις κατακερματισμένοι. Στη βάση τους συχνά εμφανίζουν λατυποπαγή χαρακτήρα.

## 4.4. Επιλογή Γεωφυσικών μεθόδων για το Ναό του Ηφαίστου στο Θησείο

### 4.4.1. Γενικά

Δεν είναι γενικά δυνατό να προβλεφθεί αν μια περιοχή που δεν έχει ερευνηθεί προηγουμένως θα είναι κατάλληλη για γεωφυσική έρευνα, αυτό συμβαίνει και στην περίπτωση του Ναού του Ηφαίστου στο Θησείο. Όμως είναι δυνατόν να εξεταστούν οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται αν η γεωφυσική έρευνα θα είναι επιτυχής.

Η καταλληλότητα μίας περιοχής μπορεί να διερευνηθεί απαντώντας και μελετώντας μία σειρά από ερωτήματα, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω και είναι σε συντομία τα εξής:

1) Σκοπός της έρευνας

2) Ποια είναι τα σημεία αναζήτησης, και ποια η γεωλογία της περιοχής (υγρασία, καταλληλότητα εδάφους για διέλευση των γεωφυσικών οργάνων).

3) Τι ακριβώς αναζητάμε στο υπέδαφος (στόχους, στρωματογραφία περιοχής, επιφέρους γεωλογικά στρώματα με συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά κτλ.)

Απαντώντας τα παραπάνω ερωτήματα με μεγάλη ακρίβεια εκτίμησης, είμαστε σε θέση να δούμε αν στην περιοχή του Θησείου είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί γεωφυσική έρευνα, και ποια όργανα θα πάρουν μέρος. Παρακάτω θα απαντηθούν τα ερωτήματα, με τον τρόπο που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης της έρευνας.

Σημείο έρευνας και γεωλογία της περιοχής

Η περιοχή της συγκεκριμένης έρευνας είναι κυρίως ο χώρος πέριξ του Ναού του Ηφαίστου στο Θησείο. Ο Ναός του Ηφαίστου στο Θησείο είναι ένα από τα γνωστότερα μνημεία του κόσμου, και συγκαταλέγεται στους πιο δημοφιλείς αρχαιολογικούς προορισμούς της Ελλάδας. Το γεγονός αυτό καθιστά την έρευνά μας ιδιαίτερα προσεκτική, και θα πρέπει να είμαστε απολύτως ακριβείς και ευαίσθητοι με τη διαδικασία των μετρήσεων μας.

Η γεωλογία της περιοχής, η οποία αναλύθηκε σε παραπάνω παράγραφο του συγκεκριμένου κεφαλαίου, μας έδειξε ότι πατάμε πάνω κυρίως σε ένα στρώμα του αθηναϊκού σχιστολίθου.

Οι συνθήκες στην επιφάνεια του εδάφους είναι εξίσου σημαντικές με τις υπόγειες. Συχνά περιφράξεις, το ανώμαλο έδαφος και κυρίως οι βλάστηση κάνουν την έρευνα δύσκολη και πιο οικονομικά ακριβή. Πολλοί αρχαιολογικοί χώροι βρίσκονται σε περιοχές με έντονη βλάστηση. Οι περισσότερες έρευνες διεξάγονται με όργανα τα οποία αυτόματα συλλέγουν δεδομένα με σταθερό ρυθμό. Τέτοια όργανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν χειροκίνητα αλλά αυτό αυξάνει το χρόνο συλλογής δεδομένων. Εξαιτίας δένδρων και άλλων εμποδίων όπως μαρμάρινων ογκιδίων καθιστούν αδύνατη την διέλευση του χειριστή σε ευθεία γραμμή για την ομαλή συλλογή των δεδομένων. Μία μέτρηση ίσως να χρειαστεί να παρθεί 0,2 m. αριστερά από την ευθεία, και λίγο πιο κάτω μία άλλη μέτρηση να γίνει 0,5 m. στα δεξιά. Δυστυχώς, όταν τα δεδομένα επεξεργάζονται, το λογισμικό επεξεργάζεται τις τιμές ακριβώς όπως συλλέχθηκαν κατά μήκος της διαδρομής. Η αποφυγή των εμποδίων έχει ως αποτέλεσμα την πιθανή εισαγωγή θορύβου στα



δεδομένα. Οι χάρτες που δημιουργούνται από αυτά τα δεδομένα ίσως να μην είναι τόσο ακριβείς στην τοποθεσία και την μορφή των ανωμαλιών, και η διόρθωσή τους μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρα, όταν δεν είναι αδύνατη.

Οι ρίζες μεγάλων δέντρων δημιουργούν πρόσθετα προβλήματα στην γεωφυσική έρευνα. Στην μαγνητική έρευνα, μεγάλες ρίζες σε έδαφος πλούσιο σε σίδηρο, μπορεί να εντοπιστούν σαν αδύναμες αρνητικές ανωμαλίες. Βέβαια, στις περισσότερες μαγνητικές έρευνες οι ρίζες των δέντρων δεν φαίνονται καθόλου. Στις έρευνες αντίστασης και αγωγιμότητας, οι ρίζες μπορεί να απορροφήσουν την τοπική υγρασία, προκαλώντας μεγάλη αντίσταση ή χαμηλής αγωγιμότητας ανωμαλίες. Οι ρίζες μπορούν να ανιχνευτούν αμέσως (εξαιτίας της διαφορετικής ανάκλασης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας) με το GPR. (Kvamme K. L. 2001)

Σε χέρσες περιοχές το ψηλό χορτάρι, θάμνοι και τα σπαρτά μπορεί και αυτά να δημιουργήσουν πρόβλημα. Οι ιδανικές περιοχές είναι αυτές που έχουν μόνο κοντό χορτάρι, ειδικά για τις μεθόδους GPR όπου τα όργανα πρέπει να είναι πολύ κοντά στο έδαφος, ενώ αυτά της EMI μπορεί να μεταφέρονται και πιο ψηλά. Σε μερικές περιπτώσεις ίσως να πρέπει να μετακινηθούν μερικά εμπόδια, όπως είναι θάμνοι ή μικροί βράχοι, για να γίνει η έρευνα σωστά.

Στη δική μας περίπτωση είχαμε στο 60% του εξωτερικού του ναού χώμα και γρασίδι, το οποίο ήταν ιδανικό για όλες τις γεωφυσικές μεθόδους. Αντιθέτως, το άλλο σχεδόν 40% του εξωτερικού του ναού που έγιναν οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις είχε γρασίδι και μικρές ρίζες δέντρων και κάποια πηγάδια, γεγονός που καθιστούσε λίγο πιο δύσκολη την πραγματοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων (**Εικόνα 4.11**).

Αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας

Γενικά οι στόχοι της γεωφυσικής έρευνας είναι ο εντοπισμός της στρωματογραφίας, της λιθολογίας, κοκκομετρίας, συνεκτικότητας των στρωμάτων και αν υπάρχουν τοπικές δομές (έγκοιλα και κενά στον σχιστόλιθο ή ασβεστόλιθο, ανθρωπογενείς κατασκευές, κλπ.), που παρουσιάζουν διαφορετικές γεωφυσικές ιδιότητες (αντίσταση ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, σεισμικές ταχύτητες).

Στην περίπτωση των τοπικών δομών, το μέγεθός τους είναι σχετικά άγνωστο. Για όλες τις γεωφυσικές μεθόδους, η πιθανότητα για την ανίχνευση μίας τοπικής δομής μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος της κάτω από την επιφάνεια. Υπάρχουν ρυθμίσεις ανάλογα την μέθοδο που χρησιμοποιούμε, ώστε να επιτύχουμε μεγαλύτερη διεισδυτικότητα σε βάθος, αλλά αυτό είναι πάντα εις βάρος της ανάλυσης. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι ότι αντικείμενα μικρότερα από 0,25-0,30 m. δεν θα ανιχνευτούν από τις γεωφυσικές μεθόδους εκτός από αυτά που αποτελούνται από μαγνητικά υλικά.

Στην δική μας περίπτωση, το βάθος των στόχων ήταν άγνωστο, αλλά μπορούσαμε σχετικά να το εκτιμήσουμε με ένα ευρύ φάσμα βάθους. Στον πίνακα 4.1 παραθέτονται το φάσμα βάθους (depth) ανάλυσης κάθε γεωφυσικού οργάνου (Instrument). (**Πίνακας 4.1**)



**Εικόνα 4.11:** Παρουσίαση της θέσης όλων των γεωφυσικών μετρήσεων σε τομές στο GoogleEarth (κόκκινο οι ηλεκτρικές τομογραφίες, πράσινο οι σεισμικές τομογραφίες, κίτρινο τα ηλεκτρομαγνητικά)

Method	Instrument	Depth (m)
Resistivity	RM15 or similar, twin probe array, .5 m separation	0.5
Resistivity	RM15 or similar, twin probe array, 1 m separation	1
EMI	EM38, conductivity, vertical mode	1.5
EMI	EM38, conductivity, horizontal mode	0.75
EMI	EM38, magnetic susceptibility, vertical mode	0.5
EMI	EM38, magnetic susceptibility, horizontal mode	0.25
EMI	EM31, conductivity, vertical mode	6
EMI	EM31, conductivity, horizontal mode	3
EMI	EM31, magnetic susceptibility, vertical mode	2
EMI	EM31, magnetic susceptibility, horizontal mode	1
Magnetometry	Fluxgate (Bartington, Geoscan, or similar)	1 – 1.5
GPR	GSSI system with 200 MHz antenna	3 – 7
GPR	S&S system with 250 MHz antenna	2.5 – 6.5
GPR	GSSI system with 270 MHz antenna	2 – 6
GPR	GSSI system with 400 MHz antenna	0.5 – 4
GPR	S&S system with 450 MHz antenna	0.5 – 3.5
GPR	S&S system with 500 MHz antenna	0.5 – 3
GPR	GSSI system with 900 MHz antenna	0.2 – 1

**Πίνακας 4.1:** Βάθος (depth) ανάλυσης κάθε οργάνου (Instrument). (Resistivity =ηλεκτρική αντίσταση, EMI=ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, MAG=μαγνητογραφία, GPR=γεωραντάρ) (Καραλής, Π. 2011).

#### Σχεδιασμός Γεωφυσικής έρευνας

Αφού έχουμε καταλήξει για την περιοχή έρευνας στην κατάλληλη γεωφυσική μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να σχεδιάσουμε πως ακριβώς θα γίνουν οι μετρήσεις στο πεδίο. Οι αποστάσεις (πυκνότητα δειγματοληψίας), ο προσανατολισμός και η ακριβής θέση του «πλέγματος» μετρήσεων πρέπει να καθοριστούν και να εφαρμοστούν στο πεδίο.

Γενικά η σειρά εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων είναι πρώτα η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που είναι και αναγνωριστική και χωρική και έπειτα για λεπτομερέστερη αποτύπωση η ηλεκτρική και η σεισμική μέθοδος και τέλος το γεωραντάρ για επιφανειακή λεπτομερή διασκόπηση.

#### 4.5. Γεωφυσική Έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν δυο περιοχές που διεξήχθη Γεωφυσική Έρευνα (Εικόνα 4.11). Η μια περιοχή αφορά την ευρύτερη περιοχή του Ναού όπου πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με στόχο να δώσουν μια πρώτη και γενικότερη εικόνα του υποβάθρου της γύρω περιοχής, καθώς και να αποκαλύψουν πιθανούς θαμμένους στόχους (τοιχεία, τάφους, μαρμάρινες κατασκευές κ.ο.κ.) έως και το βάθος των 6m. Η δεύτερη περιοχή είναι η περιοχή γύρω από τον Ναό του Ηφαίστου όπου πραγματοποιήθηκαν τέσσερις ηλεκτρικές τομογραφίες, και δύο σεισμικές τομογραφίες με στόχο τον εντοπισμό της στρωματογραφίας, της λιθολογίας και της συνεκτικότητας των στρωμάτων.

##### 4.5.1. Γεωφυσική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή του Ναού του Ηφαίστου.

Στην βόρεια ευρύτερη περιοχή του Ναού πραγματοποιήθηκαν μόνο ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις. Χωρίσαμε το κομμάτι που μας ενδιέφερε σε έναν κάνναβο αποτελούμενο από 4 τομές με διεύθυνση από ΒΑ προς ΒΔ με βήμα προχώρησης το 1m. Οι συνολικές διαστάσεις του καννάβου ήταν 16mX 8m.

##### 4.5.1.2. Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με την διαμόρφωση “High” του CMD-2(Εικόνα 4.12) και, βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m. Το όργανο με κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο μπορεί να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.



Εικόνα 4.12 : Το όργανο ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων CMD-2.



**Εικόνα 4.13 :** Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων βόρεια του ναού με την πιο πυκνή βλάστηση και τα πηγάδια .

Το όργανο αποτελείται από την μονάδα ελέγχου και το σύστημα πομπού δέκτη.

Μονάδα Ελέγχου:

Η Μονάδα ελέγχου Attachable CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη

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.

GPS χειροκίνητη μέτρηση - 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.

Εμείς χρησιμοποιήσαμε τον τρόπο μέτρησης GPS με 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.

128 MB μνήμη δεδομένων:

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 μπαταρία 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.

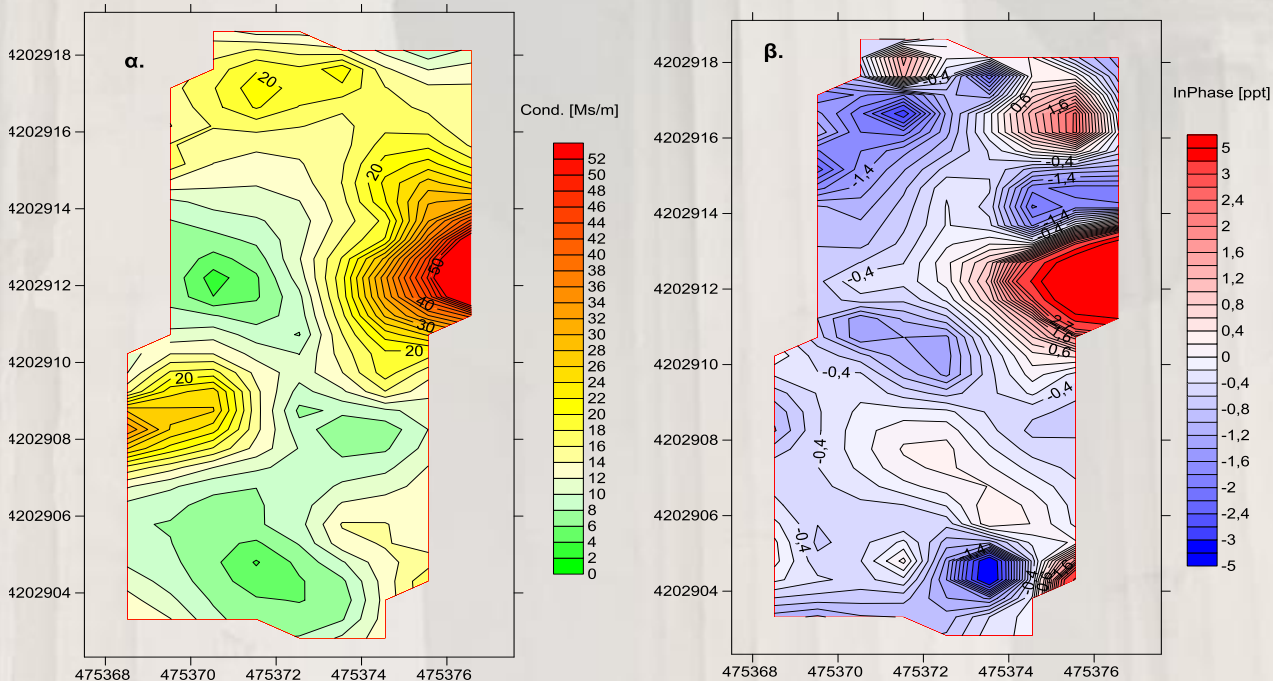
Θερμοκρασία λειτουργίας: -10°C έως +50 ° C.

(CMD, Electromagnetic Conductivity Meter User Manual)

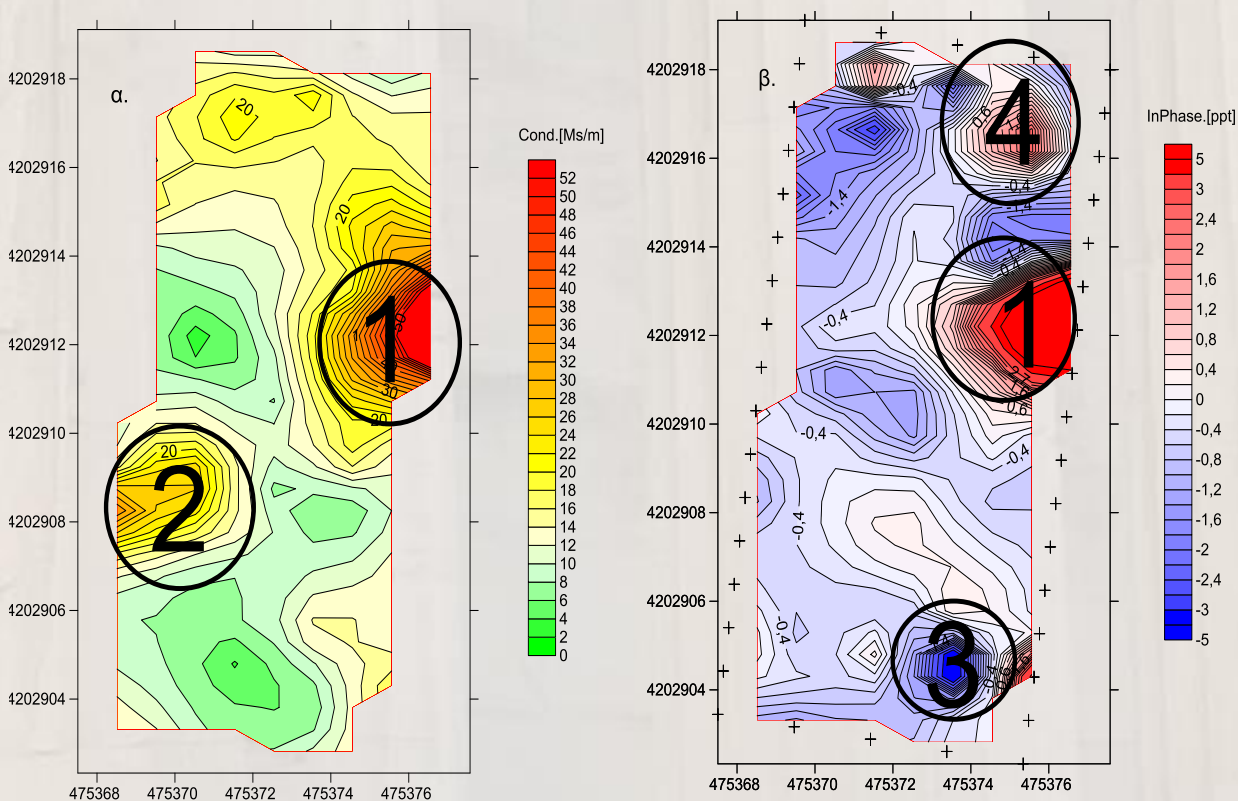
Με τη βοήθεια των οργάνων που αναφέρθηκαν παραπάνω πάρθηκαν μετρήσεις με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 και 6 m. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα ονομάζονται medium και high αντίστοιχα.

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

### 4.5.1.3. Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες



**Εικόνα 4.14:** Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (εικόνα α.) και μαγνητικής επιδεκτικότητας (εικόνα β.) με ρύθμιση του οργάνου CMD-2 στην διαμόρφωση «High» ώστε να έχει βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3m.



**Εικόνα 4.15 :** Σημεία ενδιαφέροντος των χαρτών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (εικόνα α.) και μαγνητικής επιδεκτικότητας (εικόνα β.) με ρύθμιση του οργάνου να είναι medium ώστε να έχει βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3m.

### Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στην Εικόνα 4.15α όπου φαίνεται η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

Οι περιοχές που εμφανίζονται με πράσινο χρώμα έχουν και τις χαμηλότερες αγωγιμότητες επομένως μιλάμε για το συνεκτικό βραχώδες υπόβαθρο του ασβεστόλιθου που βρίσκεται μέσα στον αθηναϊκό σχιστόλιθο σύμφωνα με την γεωλογία της περιοχής που περιγράψαμε προηγουμένως. (Σύμφωνα με την γεωλογία της περιοχής οι πλακοειδείς ασβεστόλιθοι βρίσκονται στις κορφές των λόφων και παρουσιάζουν καλά μηχανικά χαρακτηριστικά)

Οι περιοχές με κίτρινο χρώμα πιθανόν σχετίζονται με χαλαρά ιζήματα με αδρομερή και λεπτόκοκκα υλικά.

3) Στην περιοχή 1 υπάρχει μια βρύση η οποία δίνει υψηλή αγωγιμότητα και στη περιοχή 2 ένα πηγάδι το οποίο δεν φαίνεται να έχει συνέχεια και πιθανώς είναι πλήρες με αργλικό υλικό.

Επίσης, στην Εικόνα 4.15β όπου φαίνεται η κατανομή της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m έχουμε εξάγει τα εξής συμπεράσματα:

Οι περιοχές σημειωμένες με 1 , 3 και 4 δείχνουν την παρουσία μεταλλικών υλικών λόγω των σωλήνων ύδρευσης που υπάρχουν. (Η περιοχή 1 είναι η βρύση που αναφέραμε προηγουμένως). Στην περιοχή του πηγαδιού δεν βλέπουμε να υπάρχουν κάποια μεταλλικά υλικά.

Στην ευρύτερη περιοχή του χάρτη μας παρατηρούμε μια ομαλή κατανομή της μαγνητικής επιδεκτικότητας γεγονός που δείχνει ότι βρισκόμαστε στην ίδια φάση πετρώματος όπως ήδη ξέρουμε από την γεωλογία της περιοχής ( σύνθετη φάση αθηναϊκού σχιστόλιθου)



## 4.5.2. Γεωφυσική έρευνα γύρω από τον Ναό του Ηφαίστου.

### 4.5.2.1. Ηλεκτρική Μέθοδος

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή γύρω από τον Ναό ήταν η ηλεκτρική τομογραφία (ERT). Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις τομές (THIS-RES1, THIS-RES2, THIS-RES3 και THIS-RES4) όπως φαίνονται στην **Εικόνα 4.16**, με τη μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιώντας τις διατάξεις pole – dipole, Shlumberger και Dipole-Dipole. 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 4.16:** Με κόκκινο χρώμα σημειωμένες οι ηλεκτρικές τομογραφίες.

### 4.5.2.2. 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 SYSCAL Pro 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 72 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 (SYSCALProSwitch-48): 31 x 23 x 36 cm.

Βάρος (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg (IRIS INSTRUMENTS: SYSCAL Pro. ManualGuide)

#### **4.5.2.3. Επεξεργασία μετρήσεων.**

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία λήψης των μετρήσεων στην ύπαιθρο, τότε έγινε η ανάλυση και η επεξεργασία των μετρήσεων, δηλαδή των Γεωηλεκτρικών Τομών.

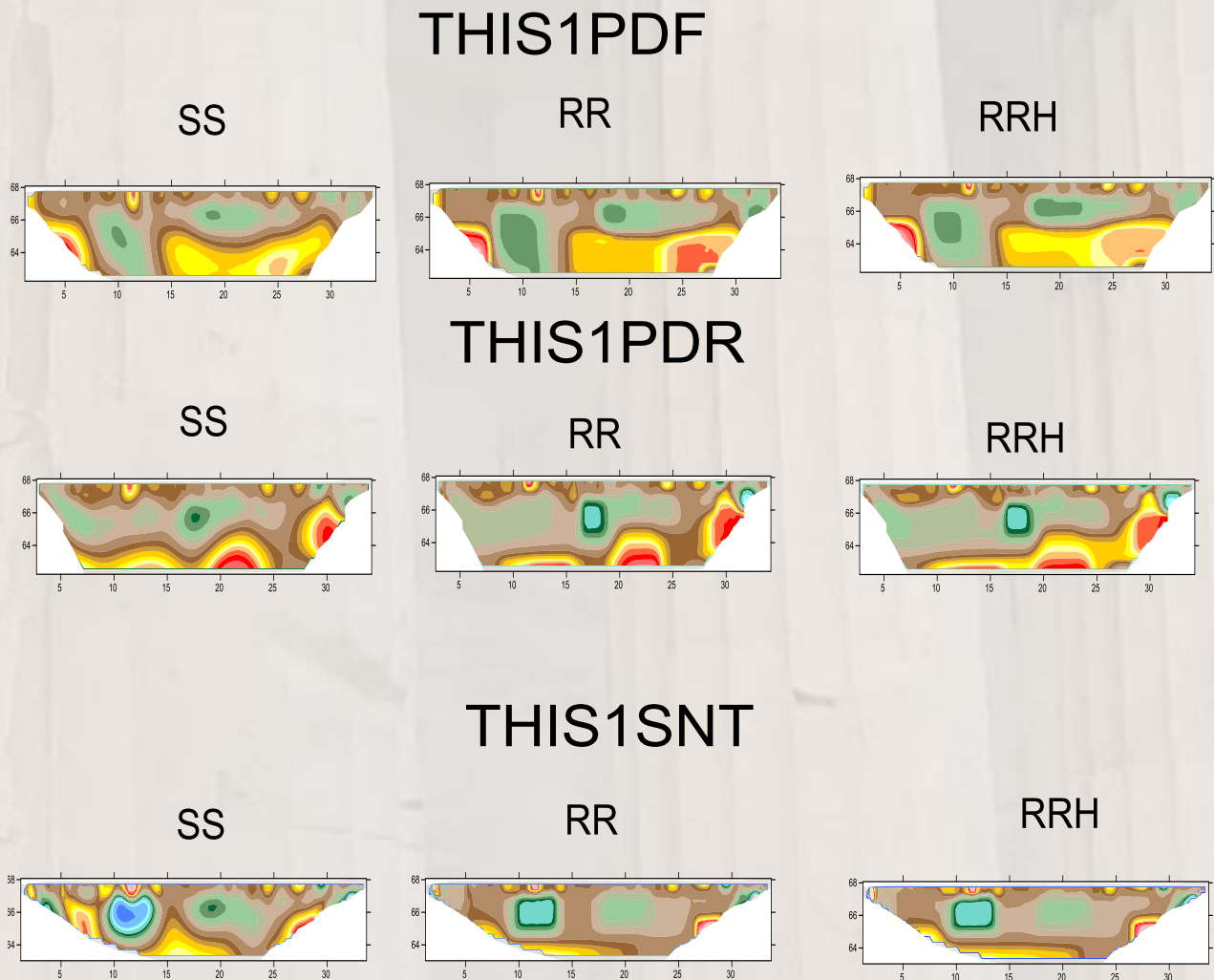
Για την ερμηνεία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2din (Loke and Barker,1996). Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας. Τα βήματα επεξεργασίας είναι τα παρακάτω:

1. 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 με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων. Έτσι, το τελικό μοντέλο μας θα έχει απόσταση ηλεκτροδίων στις παράλληλες τομές 0,5 m και στις κάθετες τομές 0,25 m . Τέλος, το μοντέλο μας να διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος
2. Επιλέξαμε στην ρύθμιση «Inversion method» τρεις(3) εναλλακτικές διαδικασίες ερμηνείας:
  - Επιλογή StandardStandard (SS): Με αυτή την επιλογή τα δεδομένα ερμηνεύονται (αντιστρέφονται) όπως ακριβώς τα έχουμε εισάγει στο πρόγραμμα.
  - Επιλογή Robust – Robust (RR): Με αυτή την επιλογή στο Res2din έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην εξομάλυνση της παρουσίας θορύβου.
  - Επιλογή Robust – Robust και Vertical-Horizontal (RRH): Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται ώστε επιπρόσθετα στην προηγούμενη όταν θέλουμε να δώσουμε έμφαση στην οριζόντια στρωματογραφία.

#### 4.5.2.4. Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου

Κατ' αρχήν παρουσιάζονται όλα τα μοντέλα των Γεωηλεκτρικών τομών τα οποία σχεδιάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer της Golden Software και αποκτήθηκαν με τις τρεις εναλλακτικές διαδικασίες ερμηνείας.

#### Γεωηλεκτρική Τομή THIS1 με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ

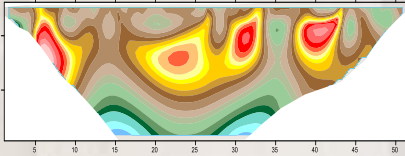


**Εικόνα 4.17:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS1 με διεύθυνση ΒΑ προς ΝΔ. Έχουμε από αριστερά προς τα δεξιά τις μεθόδους επεξεργασίας Standard-Standard, Robust-Robust και RRH (Vertical-Horizontal) και από επάνω έως κάτω τις μεθόδους Pole-Dipole (forward), Pole-Dipole (reverse) και Schlumberger.

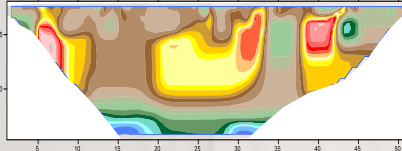
Γεωηλεκτρική Τομή THIS2 με διεύθυνση ΝΑ προς ΒΔ.

THIS2PDF

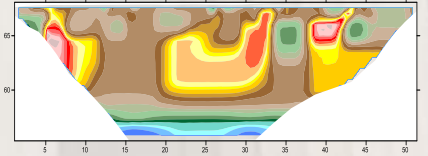
SS



RR

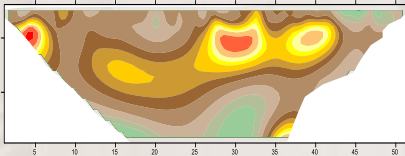


RRH

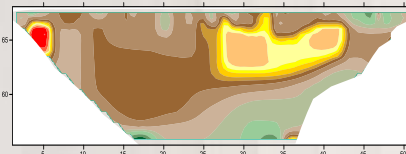


THIS2PDR

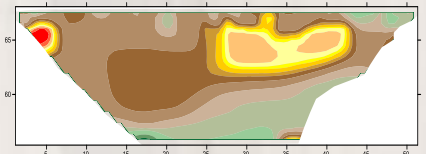
SS



RR

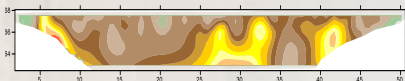


RRH

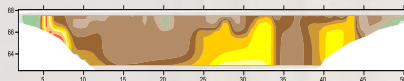


THIS2SNT

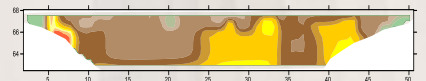
SS



RR

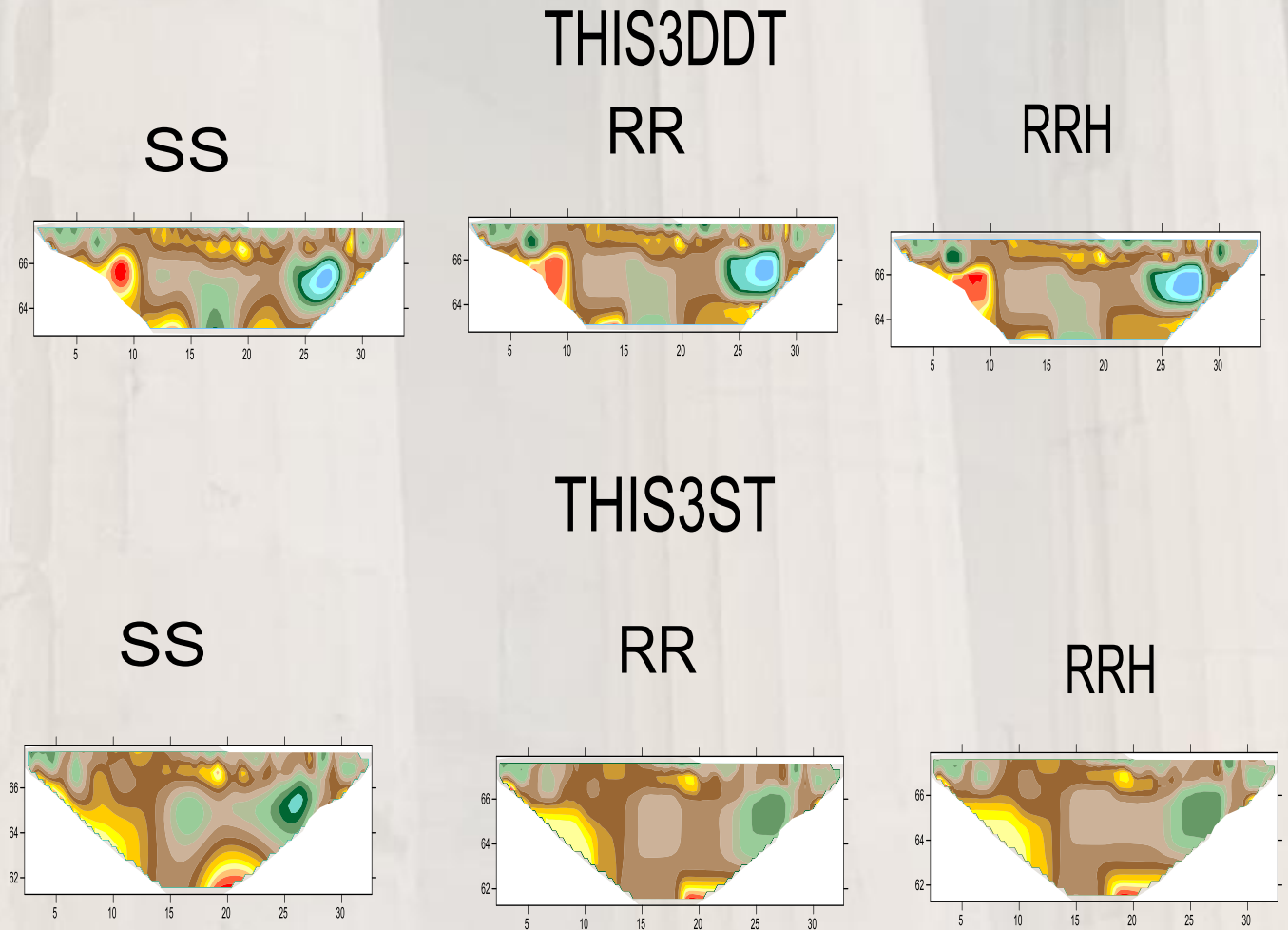


RRH



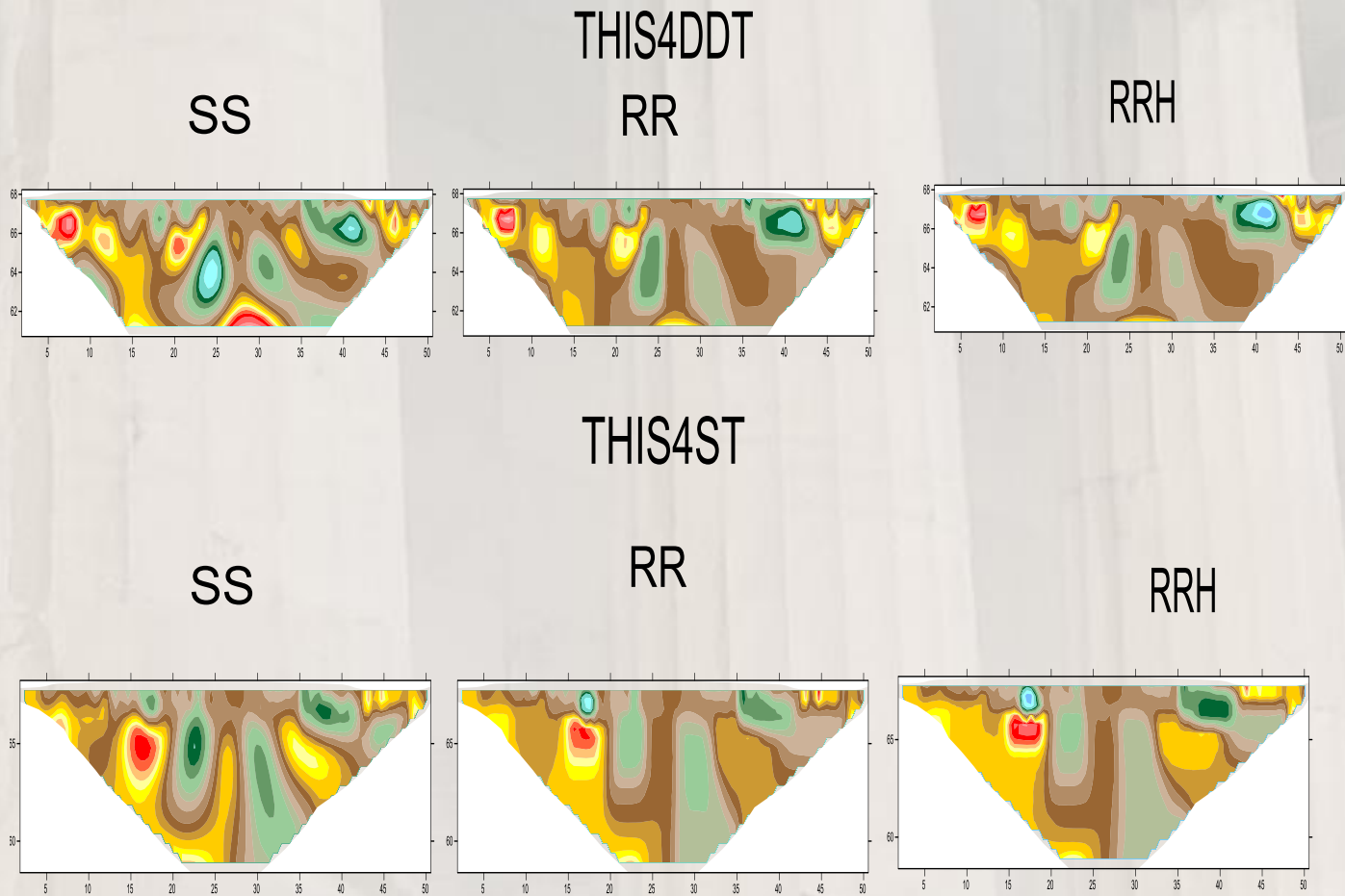
**Εικόνα 4.18:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS2 με διεύθυνση ΝΑ προς ΒΔ. Έχουμε από αριστερά προς τα δεξιά τις μεθόδους επεξεργασίας Standard-Standard, Robust-Robust και RRH (Vertical-Horizontal) και από επάνω έως κάτω τις μεθόδους Pole-Dipole (forward), Pole-Dipole (reverse) και Schlumberger.

Γεωηλεκτρική Τομή THIS3 με διεύθυνση ΒΑ προς ΝΔ.



**Εικόνα 4.19:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS3 με διεύθυνση ΒΑ προς ΝΔ. Έχουμε από αριστερά προς τα δεξιά τις μεθόδους επεξεργασίας Standard-Standard, Robust-Robust και RRH (Vertical-Horizontal) και από επάνω έως κάτω τις μεθόδους Dipole -Dipole και Schlumberger

Γεωηλεκτρική Τομή THIS4 με διεύθυνση Α προς Δ.



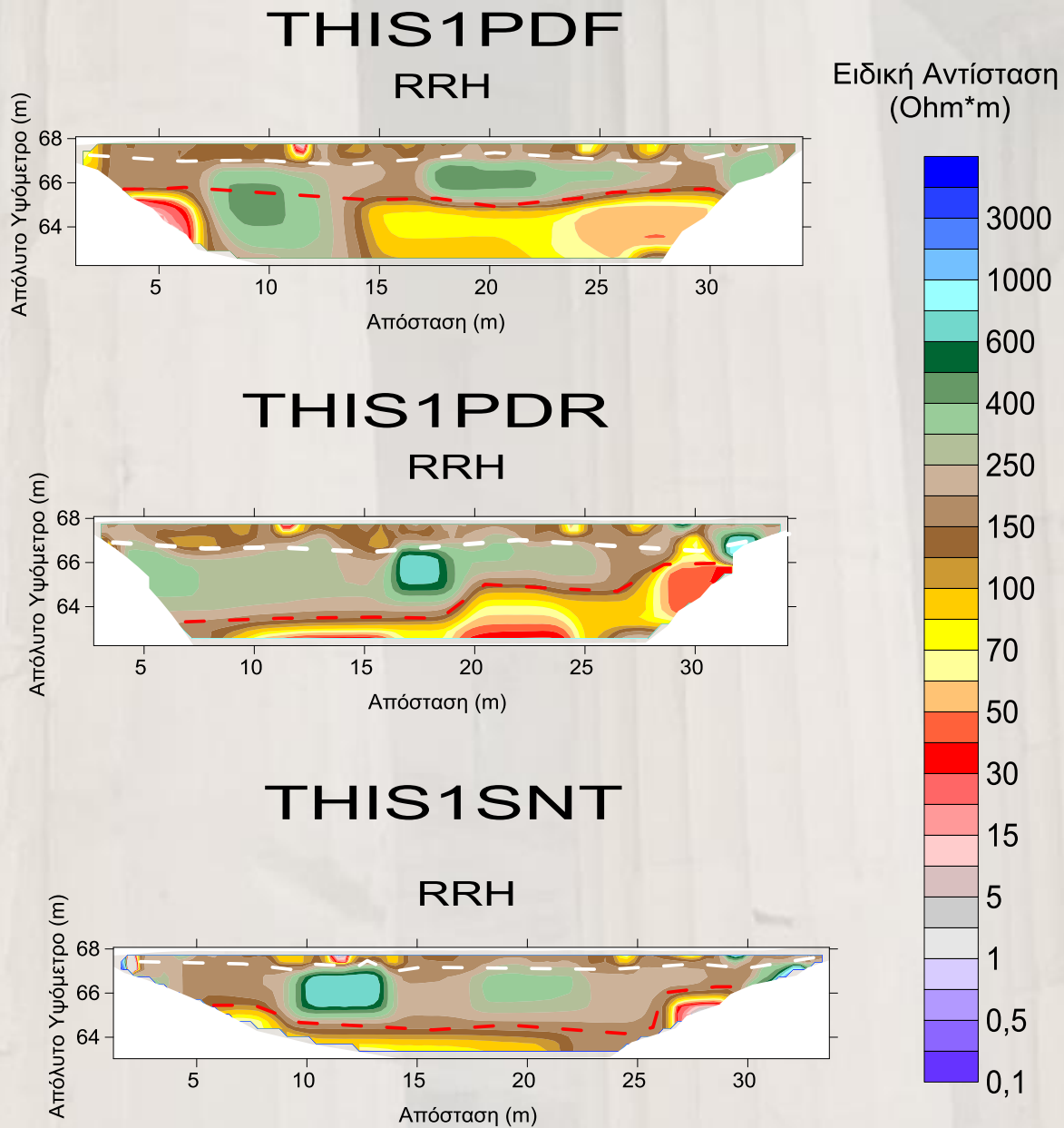
**Εικόνα 4.20:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS4 με διεύθυνση Α προς Δ. Έχουμε από αριστερά προς τα δεξιά τις μεθόδους επεξεργασίας Standard-Standard, Robust-Robust και RRH (Vertical-Horizontal) και από επάνω έως κάτω τις μεθόδους Dipole -Dipole και Schlumberger

Κριτήρια επιλογής γεωλογικών μοντέλων για την τελική ερμηνεία

Παρατηρώντας όλες τις τομές και όλες τις μεθόδους επεξεργασίας προσεκτικά διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχουν πολλές διαφορές ως προς την οριζόντια στρωματογραφία και την γενικότερη εικόνα του υπεδάφους της περιοχής μελέτης από τομή σε τομή.

Με δεδομένο ότι αναζητούμε την όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση της στρωματογραφίας καθώς και τον εντοπισμό τυχόν στόχων ανθρωπογενούς προελεύσεως θα επιλέξουμε από κάθε τομή την μέθοδο επεξεργασίας RRH (Robust-Robust Inversion μαζί με την επιλογή Vertical Horizontal.)

Γεωηλεκτρική Τομή THIS1 με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ



**Εικόνα 4.21:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS1 με διεύθυνση ΒΑ προς ΝΔ με επεξεργασία RRH για τις μεθόδους (από επάνω προς τα κάτω) Pole-Dipole (forward), Pole-Dipole (reverse) και Schlumberger .

Από την τομή THIS1 συμπεραίνουμε από τις γεωηλεκτρικές τομές με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων ότι υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις και θα προσπαθήσουμε να ομογενοποιήσουμε τα αποτελέσματα ως εξής:

Τα πρώτα μέτρα κοντά στην επιφάνεια και μέχρι την άσπρη διακεκομμένη γραμμή (σε περίπου απόλυτο υψόμετρο 67m) είναι αδρομερή υλικά σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης.

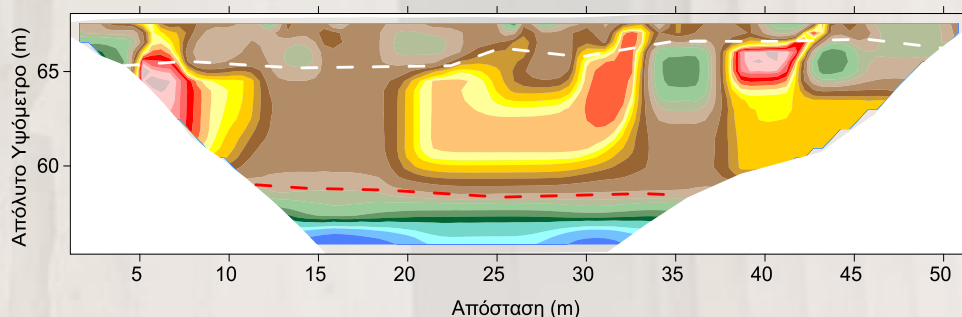
Έπειτα μεταξύ της άσπρης και κόκκινης γραμμής (67m -65m) διακρίνουμε μια κυρίως πράσινη περιοχή με ειδική αντίσταση από 400-600 Ohm\*m η οποία αποτελεί πιθανά τον συνεκτικό ασβεστόλιθο και ακριβώς από κάτω σε απόλυτο υψόμετρο περίπου 64m εμφανίζεται η φάση του Αθηναϊκού σχιστόλιθου με κίτρινο χρώμα και ειδικές αντιστάσεις 60-80Ohm\*m.

Η τοπική δομή υψηλής ειδικής αντίστασης που φαίνεται σε διαφορετική θέση μεταξύ των γεωηλεκτρικών τομών αδυνατούμε να χαρακτηρίσουμε γιατί πιθανά να οφείλεται σε συναφή θόρυβο που σχετίζεται με τις ανθρωπογενείς κατασκευές στον χώρο ή δομή που η θέση της βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ αποστάσεων 9-14μ.

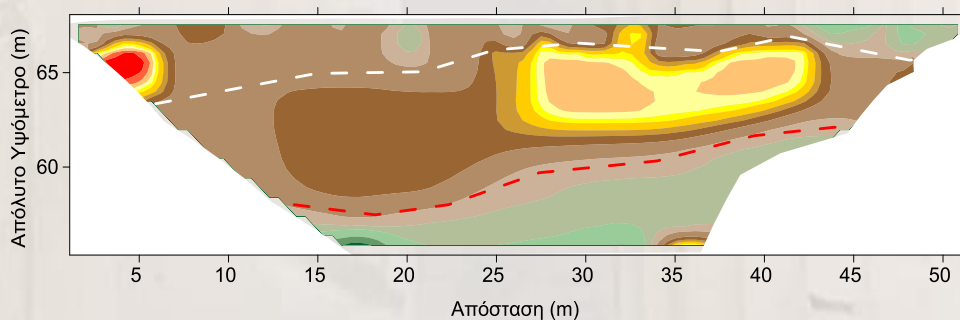


Γεωηλεκτρική Τομή THIS2 με διεύθυνση ΝΑ προς ΒΔ.

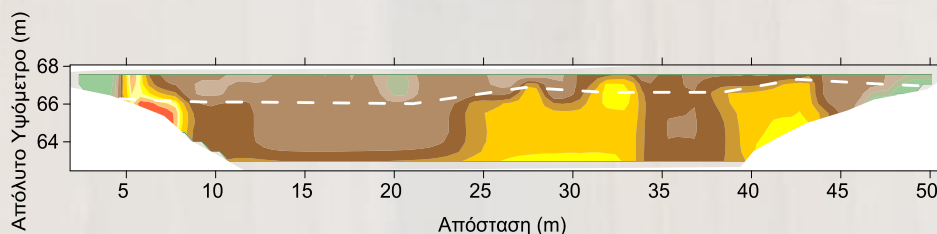
## THIS2PDF RRH



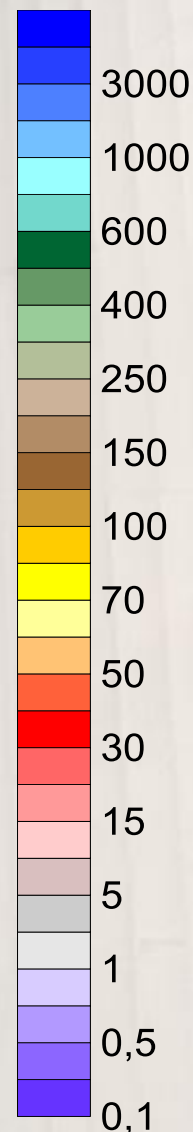
## THIS2PDR RRH



## THIS2SNT RRH



Ειδική Αντίσταση  
( $\Omega\text{m}\cdot\text{m}$ )



**Εικόνα 4.22:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS2 με διεύθυνση ΝΑ προς ΒΔ. Με επεξεργασία RRH για τις μεθόδους (από επάνω προς τα κάτω) Pole-Dipole (forward), Pole-Dipole (reverse) και Schlumberger .

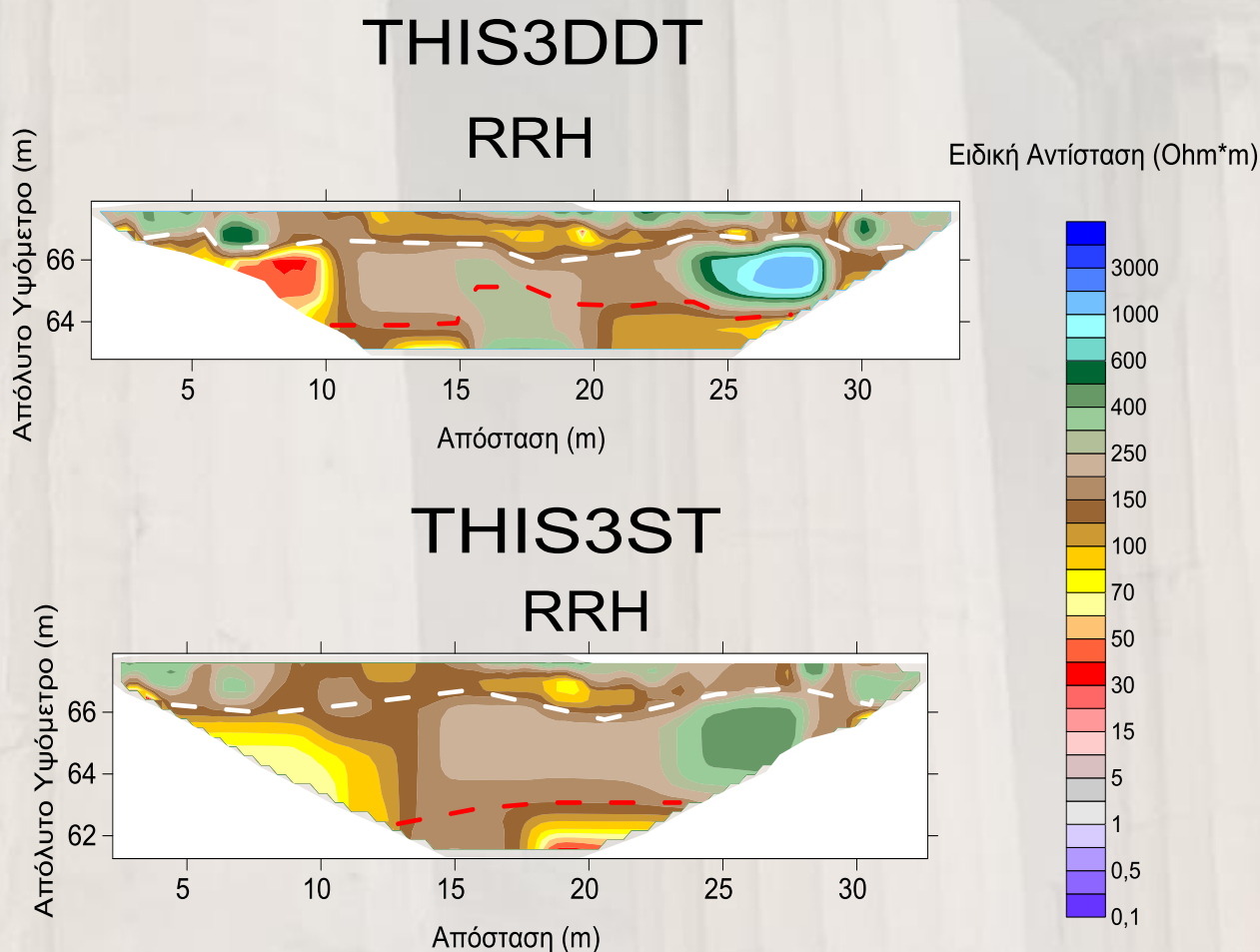
Από την τομή THIS2 συμπεραίνουμε από τις γεωηλεκτρικές τομές με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων ότι υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις και θα προσπαθήσουμε να ομογενοποιήσουμε τα αποτελέσματα ως εξής:

Τα πρώτα μέτρα κοντά στην επιφάνεια και μέχρι την άσπρη διακεκομμένη γραμμή (απόλυτο υψόμετρο 67-65m) είναι αδρομερή ή συνεκτικά (φάση ασβεστολίθου) υλικά σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης.

Έπειτα μεταξύ της άσπρης και κόκκινης γραμμής (65m–περίπου 57m) διακρίνουμε μια κυρίως κίτρινη περιοχή με ειδική αντίσταση από 60-80 Ohm\*mη οποία αποτελεί την φάση του Αθηναϊκού σχιστόλιθου και ακριβώς από κάτω σε απόλυτο υψόμετρο περίπου 58m εμφανίζεται η φάση του ασβεστολίθου με πράσινο χρώμα και ειδικές αντιστάσεις 400-600 Ohm\*m.

Εδώ αξίζει να αναφέρουμε ότι στην τομή της *Schlumbergerto* βάθος διασκόπησης είναι μικρό και βλέπουμε μόνο την φάση του σχιστόλιθου με κίτρινο χρώμα και όχι βαθύτερα που είναι και ο ασβεστόλιθος.

Γεωηλεκτρική Τομή THIS3 με διεύθυνση ΒΑ προς ΝΔ.



**Εικόνα 4.23:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS3 με διεύθυνση ΒΑ προς ΝΔ. με επεξεργασία RRH για την μέθοδο Dipole-Dipole και Schlumberger.

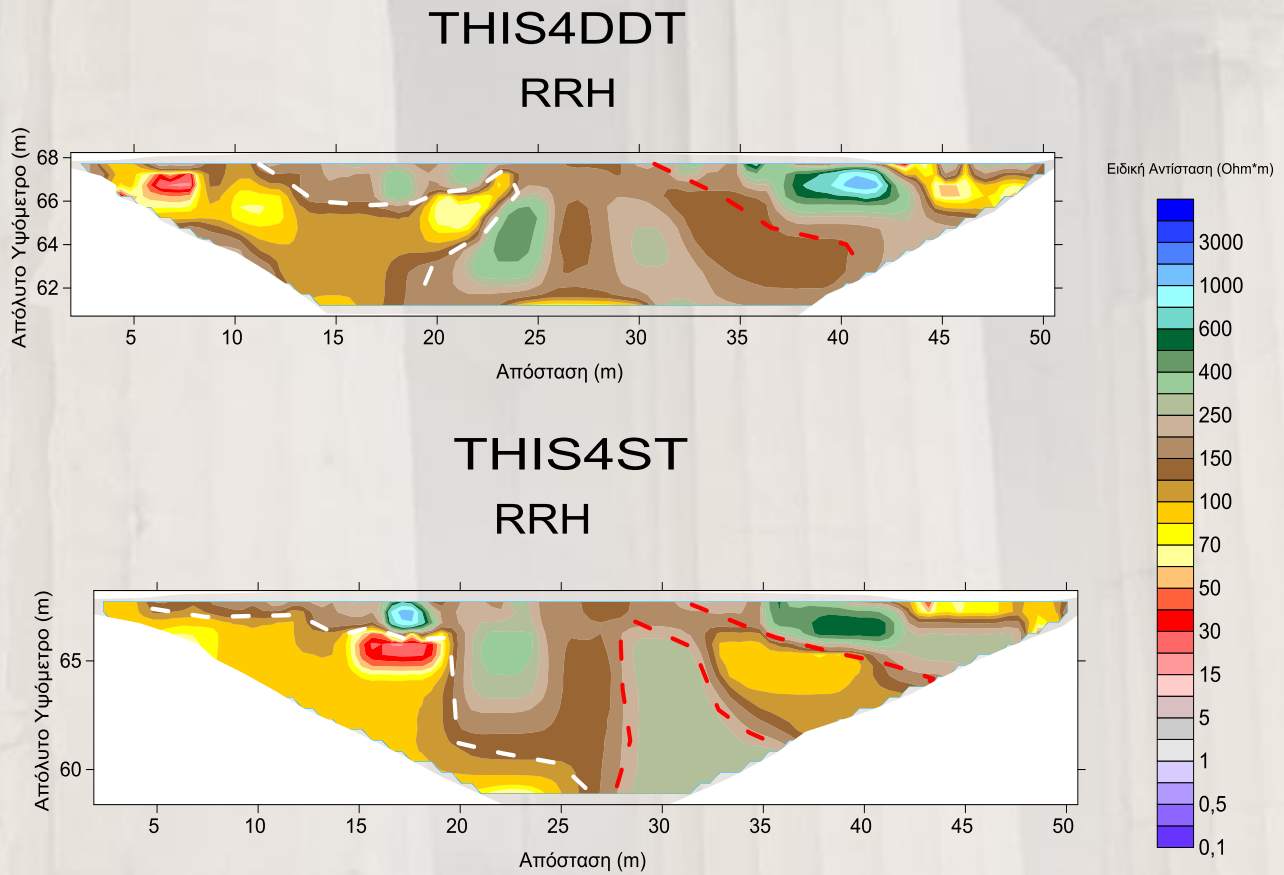
Από την τομή THIS3 συμπεραίνουμε από τις γεωηλεκτρικές τομές με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων ότι υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις και θα προσπαθήσουμε να ομογενοποιήσουμε τα αποτελέσματα ως εξής:

Τα πρώτα μέτρα κοντά στην επιφάνεια και μέχρι την άσπρη διακεκομμένη γραμμή (απόλυτο υψόμετρο 66m) είναι αδρομερή υλικά.

Έπειτα μεταξύ της άσπρης και κόκκινης γραμμής (66m -63m) διακρίνουμε μια κυρίως πρασινο-καφέ περιοχή με ειδική αντίσταση από 150-600 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$  η οποία αποτελεί φάσεις του ασβεστολίθου μέσα στον Αθηναϊκού σχιστόλιθο. Στο ΒΑ άκρο της τομής παρουσιάζεται παράπλευρη ανομοιογένεια με δομή (κίτρινο χρώμα) ειδικών αντιστάσεων 60-80 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$  που αντιστοιχεί σε σχιστόλιθο. Βαθύτερα και σε απόλυτο υψόμετρο περίπου 63m εμφανίζεται η φάση του σχιστολίθου με κίτρινο-κόκκινοχρώμα και ειδικές αντιστάσεις 50-100 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$ .

Πρέπει να επισημάνουμε ότι σε αυτή την τομή διαφαίνεται καλύτερα η μορφολογία του αυτόχθονου συστήματος του αθηναϊκού σχιστολίθου με την φάση του ασβεστολίθου (πράσινο χρώμα) μέσα στην κυρίως φάση του σχιστολίθου. Αυτές οι πλάκες ασβεστολίθου μέσα στον σχιστόλιθο αποτελούν μια πολύ καλή οπτική προσέγγιση αυτού του σχηματισμού η οποία έρχεται και σε συμφωνία με τους γεωλογικούς χάρτες της περιοχής.

Γεωηλεκτρική Τομή THIS4 με διεύθυνση Α προς Δ.



**Εικόνα 4.24:** Γεωηλεκτρική Τομή THIS4 με διεύθυνση Α προς Δ. Έχουμε από αριστερά προς τα δεξιά τις μεθόδους επεξεργασίας Standard-Standard, Robust-Robust και RRH (Vertical-Horizontal) και από επάνω έως κάτω τις μεθόδους Dipole -Dipole και Schlumberger

Από την τομή THIS4 συμπεραίνουμε από τις γεωηλεκτρικές τομές με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων ότι υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις και θα προσπαθήσουμε να ομογενοποιήσουμε τα αποτελέσματα ως εξής:

Βασιζόμενοι κυρίως στην τομή με την διάταξη dipole-dipole(και η τομή με την διάταξη Schlumbergerγενικά αλλά πιο πολύπλοκα αποτυπώνει το ίδιο) παρατηρούμε παράπλευρες ανομοιογένειες. Αριστερά με κίτρινο χρώμα παρουσιάζονται πιο χαλαρά πετρώματα και πιθανότατα ο σχιστόλιθος (περιοχή ειδικής αντίστασης 60-80 Ohm) ενώ προς τα δεξιά (ανατολικά) έχουμε συνολικά πιο συνεκτικό πέτρωμα με φάσεις του ασβεστολίθου της τάξης των 400-1000 Ohm\*.

#### **4.5.2.5. Συνδυαστικά Σχόλια για την Ηλεκτρική μέθοδο**

- Παρατηρούμε ότι στα πρώτα 2-3 m έως την άσπρη διακεκομμένη γραμμή των γεωηλεκτρικών τομών (περίπου 67m απόλυτο υψόμετρο) παρατηρούνται αδρομερή υλικά.

- Στις δύο γεωηλεκτρικές τομές BA-NΔ (THIS1, THIS3) μία λεπτή φάση ασβεστολίθου έως 66m απόλυτο υψόμετρο ακολουθεί.

- Η οροφή του σχιστολίθου εμφανίζεται περίπου στα 65 με 66m απόλυτο υψόμετρο και έπειτα η οροφή του ασβεστόλιθου εμφανίζεται στα 58m απόλυτο υψόμετρο.

- Επίσης στις τομές THIS2 και THIS4 εμφανίζονται α) παράπλευρη ανομοιογένεια στα ανατολικά του ναού η οποία ξεχωρίζει τα πιο χαλαρά πετρώματα (ενδεχομένως αργιλοσαμμιτικό υλικό ) από το πιο συνεκτικό βραχώδες υπόβαθρο (ασβεστόλιθος) του Αθηναϊκού σχιστολίθου και β) κυρίως παράπλευρη ανομοιογένεια στα δυτικά του Ναού μεταξύ ασβεστολίθου και σχιστολίθου.

#### 4.5.2.6. Σεισμική Μέθοδος

Για την σεισμική μέθοδο πραγματοποιήθηκαν οι τομές SEIS1 και SEIS2. Ο τομές είχαν διεύθυνση Β-Ν και Α-Δ αντίστοιχα όπως φαίνονται και στην **Εικόνα 4.23**. Τόσο η SEIS1 όσο και η SEIS2 είχαν μήκος 46m και είναι σημειωμένες με πράσινο χρώμα στην **Εικόνα 4.23**.

Η απόσταση των γεωφώνων και στις δύο τομές ήταν 1.5m.



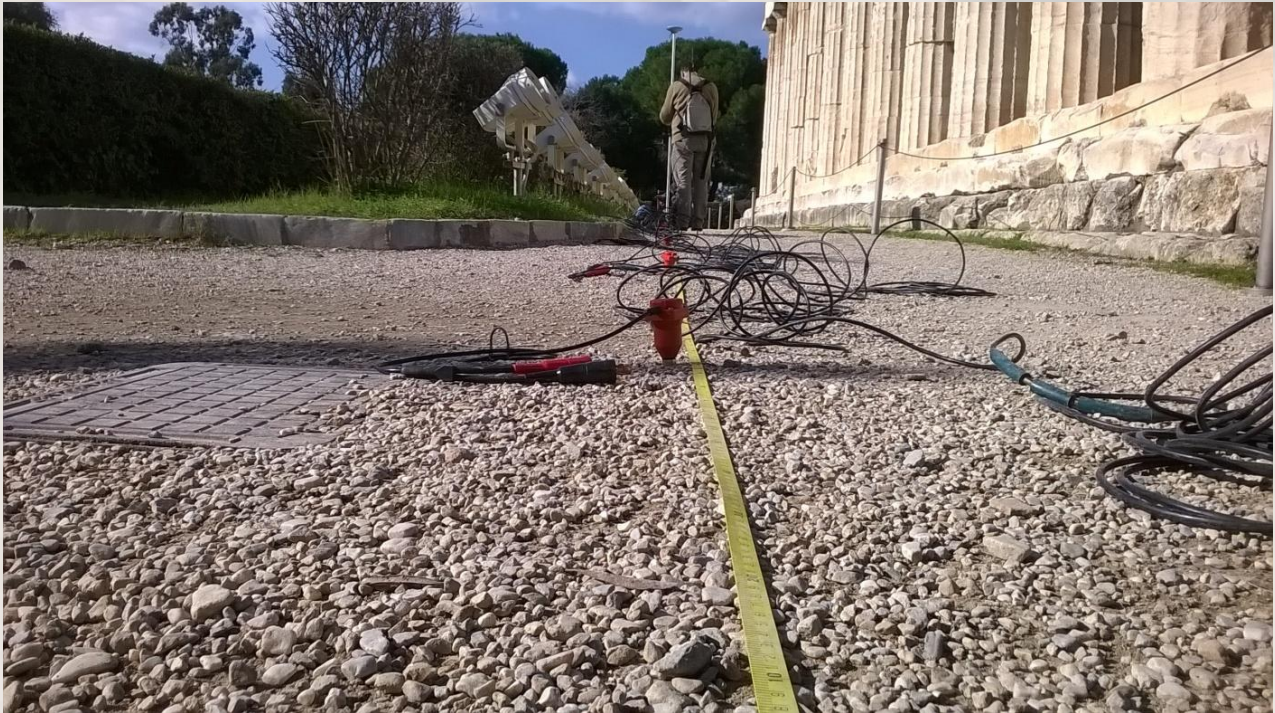
**Εικόνα 4.25** : Σημειωμένες με πράσινο χρώμα οι σεισμικές τομογραφίες.

#### 4.5.2.7. Εξοπλισμός

Για την διεξαγωγή της σεισμικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκε ο σειсмоγράφος DAQlink III της Seismic Source. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν γεώφωνα 4.5Hz τα οποία είναι συσκευές που μετρούν την διαμήκη ή εγκάρσια κίνηση του εδάφους, η οποία είναι αποτέλεσμα μιας σεισμικής πηγής και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία καταγράφονται από τον σειсмоγράφο.

Έγινε χρήση σεισμικής σφύρας, η οποία διοχετεύει την σεισμική ενέργεια στο έδαφος. Όπως όλες οι σεισμικές πηγές, είναι επαναληπτική ενώ παρέχει 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 την χρήση ειδικών καλωδίων.



*Εικόνα 4.26: Διάταξη γεωφώνων στην ηλεκτρική τομογραφία SEIS2*

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

Επιλογή πρώτων αφίξεων

Δημιουργία δρομοχρονικών καμπυλών

Προσδιορισμός των μοντέλων του υπεδάφους (σεισμικές τομές) και των σεισμικών ταχυτήτων

Επιλογή πρώτων αφίξεων

Κατά τα 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&Geometrics.

Δημιουργία δρομοχρονικών καμπυλών

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 την σεισμική πηγή. Στο διάγραμμα αυτό εντοπίζονται τα απευθείας και τα μετωπικά κύματα από κάθε διεπιφάνεια με τη βοήθεια του λογισμικού PlotRefa της EG&Geometrics και αντιστοιχούνται σε εδαφικά στρώματα.

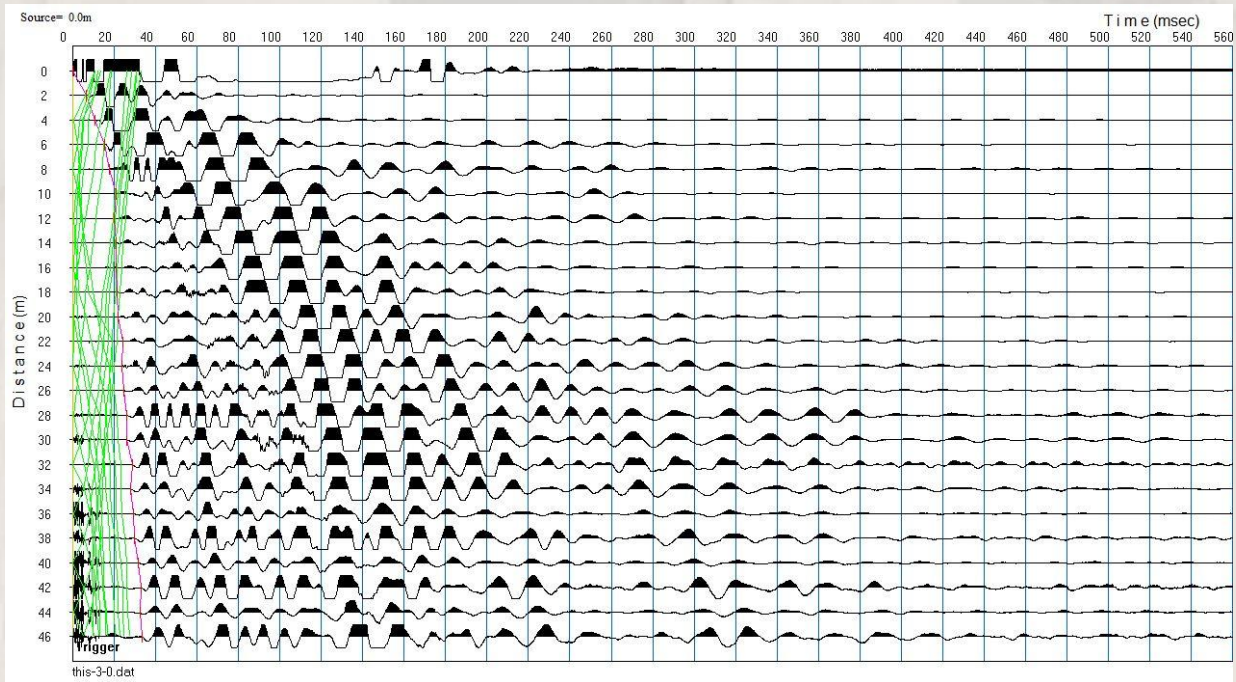


Προσδιορισμός των μοντέλων του υπεδάφους (σεισμικές τομές) και των σεισμικών ταχυτήτων

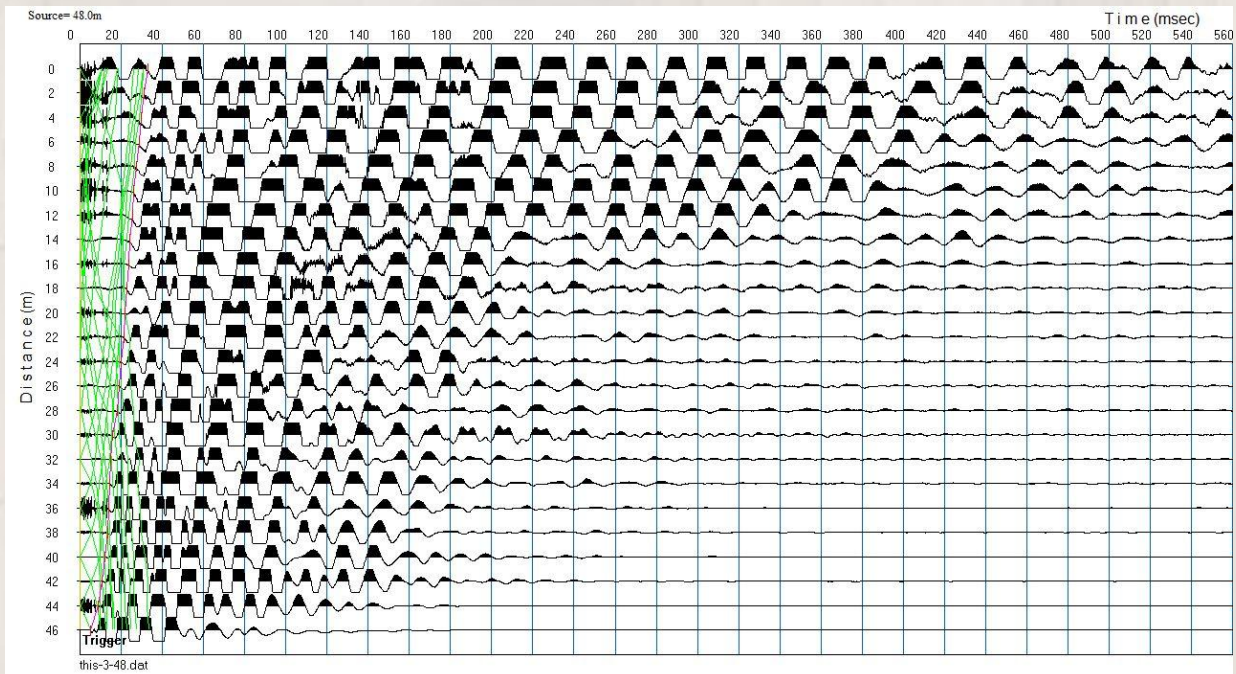
Με χρήση του λογισμικού SeisImager προκύπτουν τα μοντέλα βάθους για κάθε σεισμική γραμμή, όπου υπολογίζεται η ταχύτητα κάθε στρώματος του εδαφικού μοντέλου που προκύπτει και παράλληλα προσδιορίζεται το βάθος στο οποίο υπάρχει αλλαγή των γεωλογικών σχηματισμών στο υπέδαφος.

### 4.5.2.8. Αποτελέσματα Σεισμικών Μετρήσεων

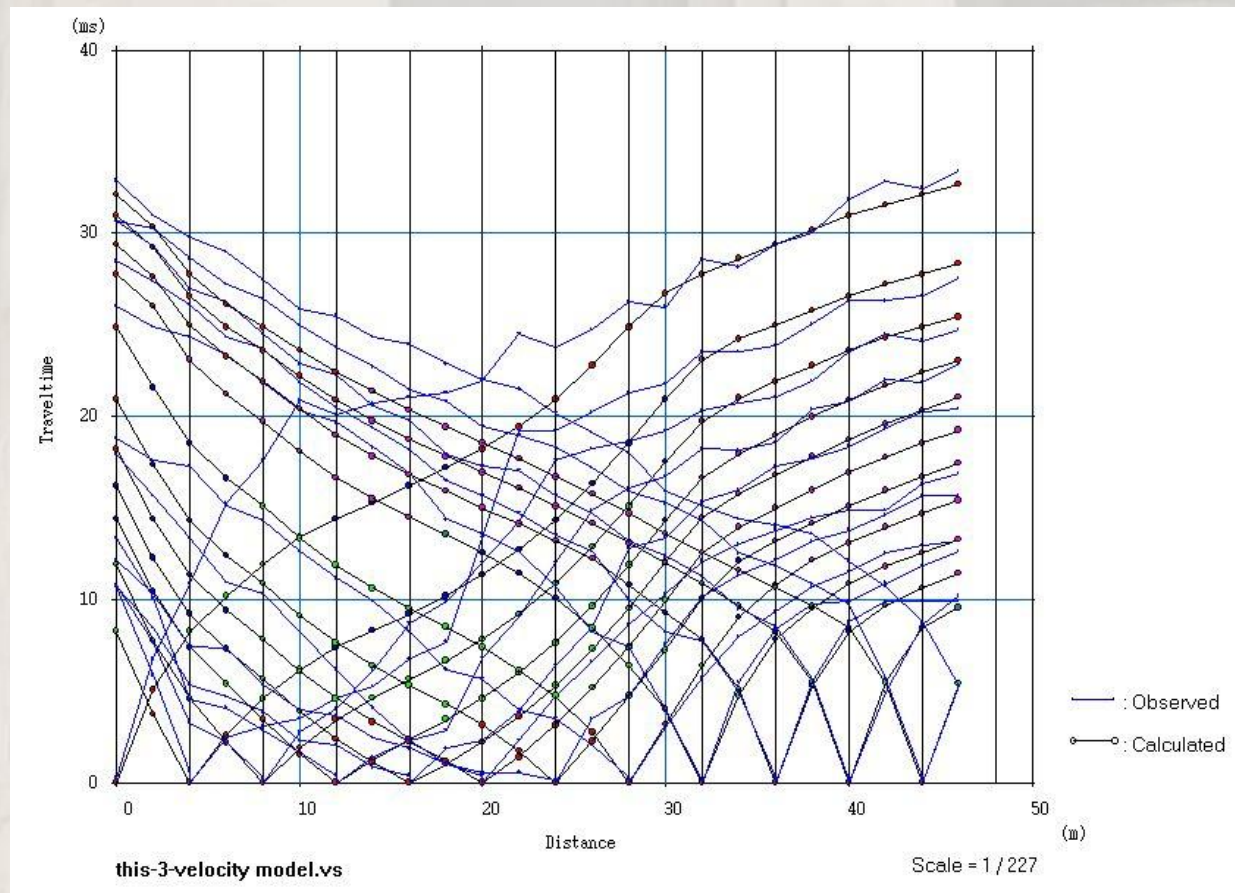
#### Σεισμική γραμμή SEIS1



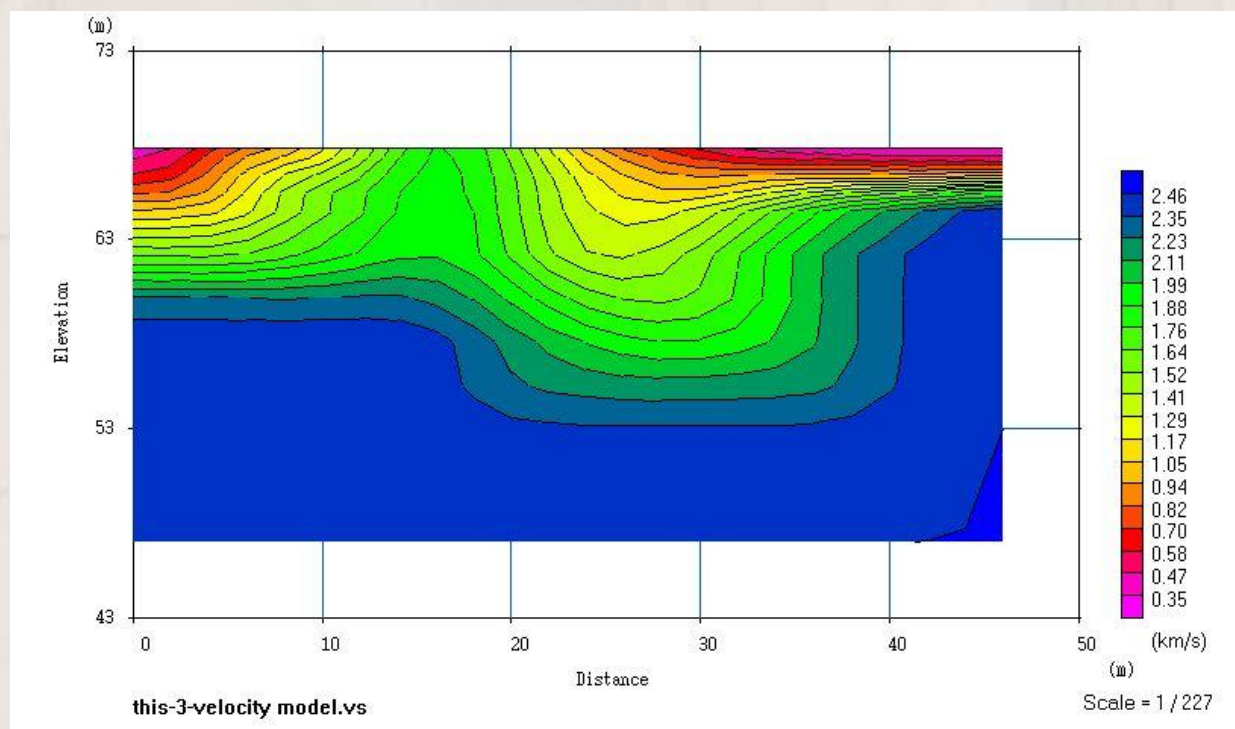
Εικόνα 4.27: Σεισμόγραμμα όπου με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 0 της γραμμής SEIS1 ενώ με πράσινες γραμμές είναι χρόνοι πρώτης άφιξης σε άλλες θέσεις της πηγής.



Εικόνα 4.28: Σεισμόγραμμα όπου με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 48 της γραμμής SEIS1 ενώ με πράσινες γραμμές είναι χρόνοι πρώτης άφιξης σε άλλες θέσεις της πηγής.

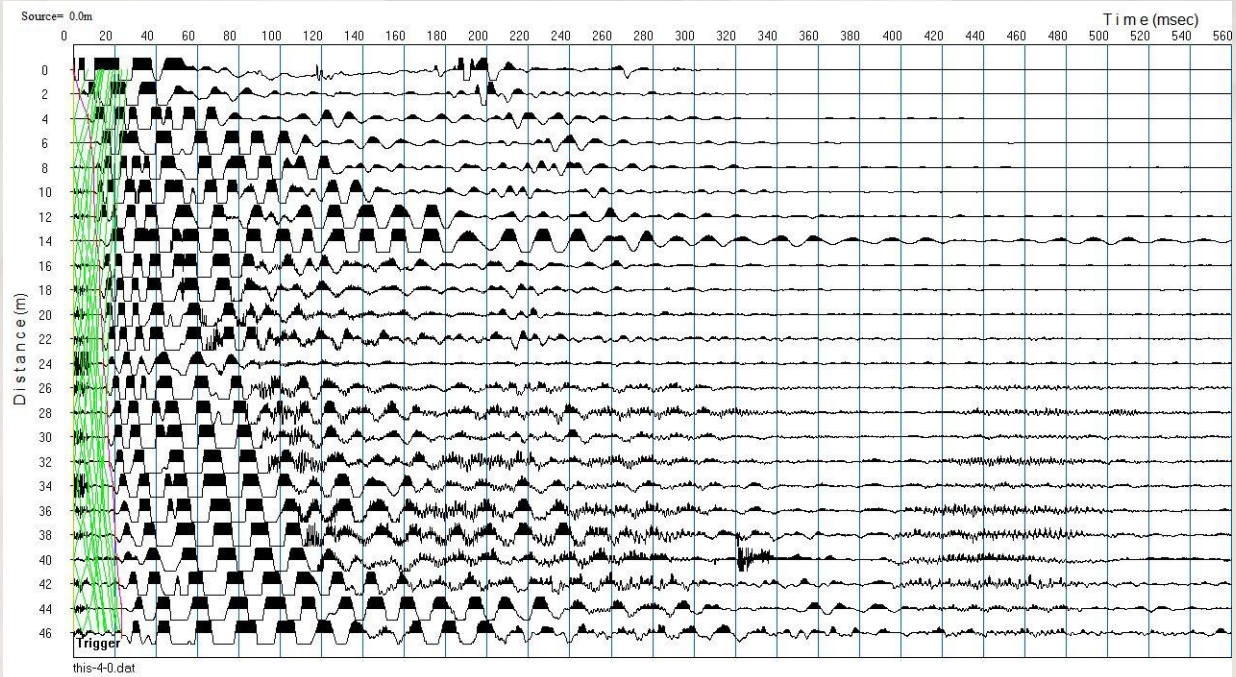


Εικόνα 4.29: Δρομοχρονική Καμπύλη της γραμμής SEIS1

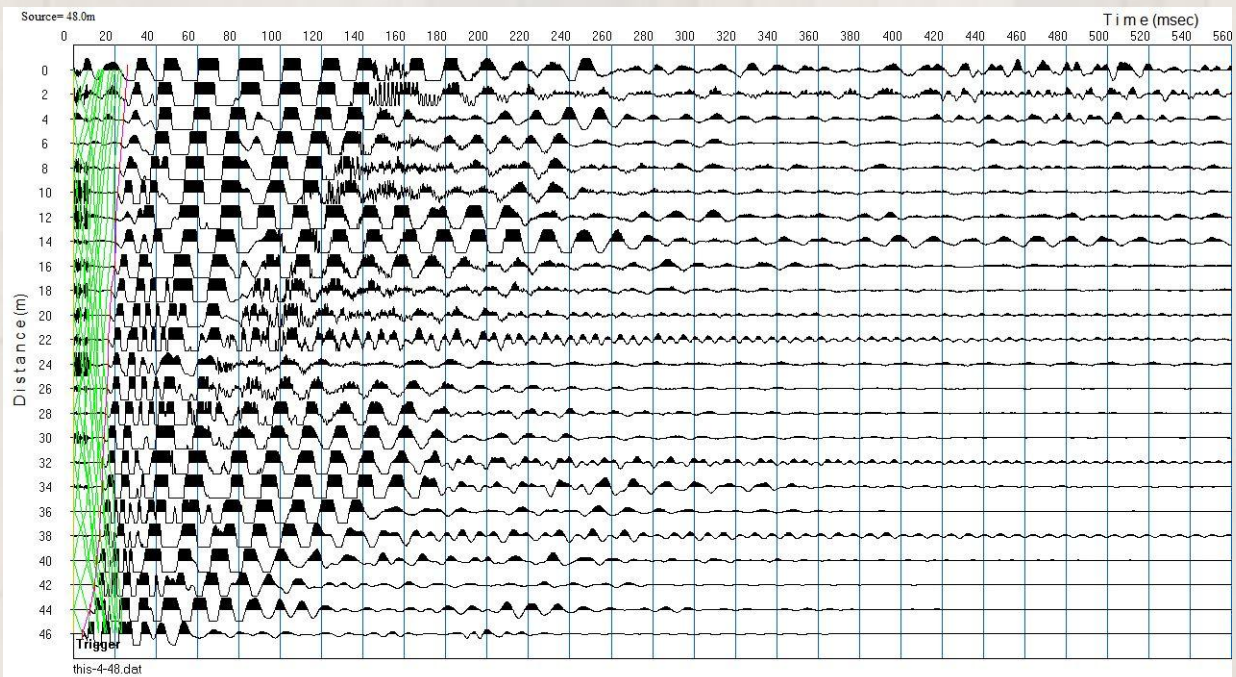


Εικόνα 4.30: Μοντέλο του υπεδάφους για την σεισμική γραμμή SEIS1.

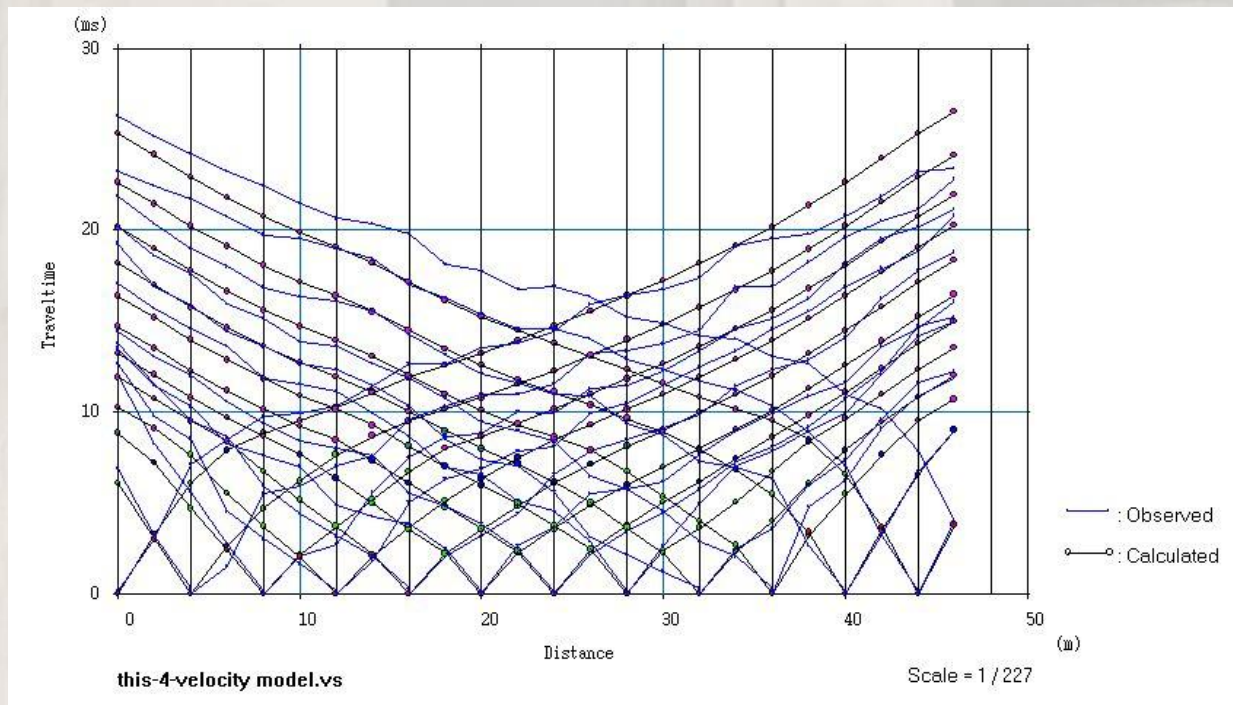
Σεισμική γραμμή SEIS2



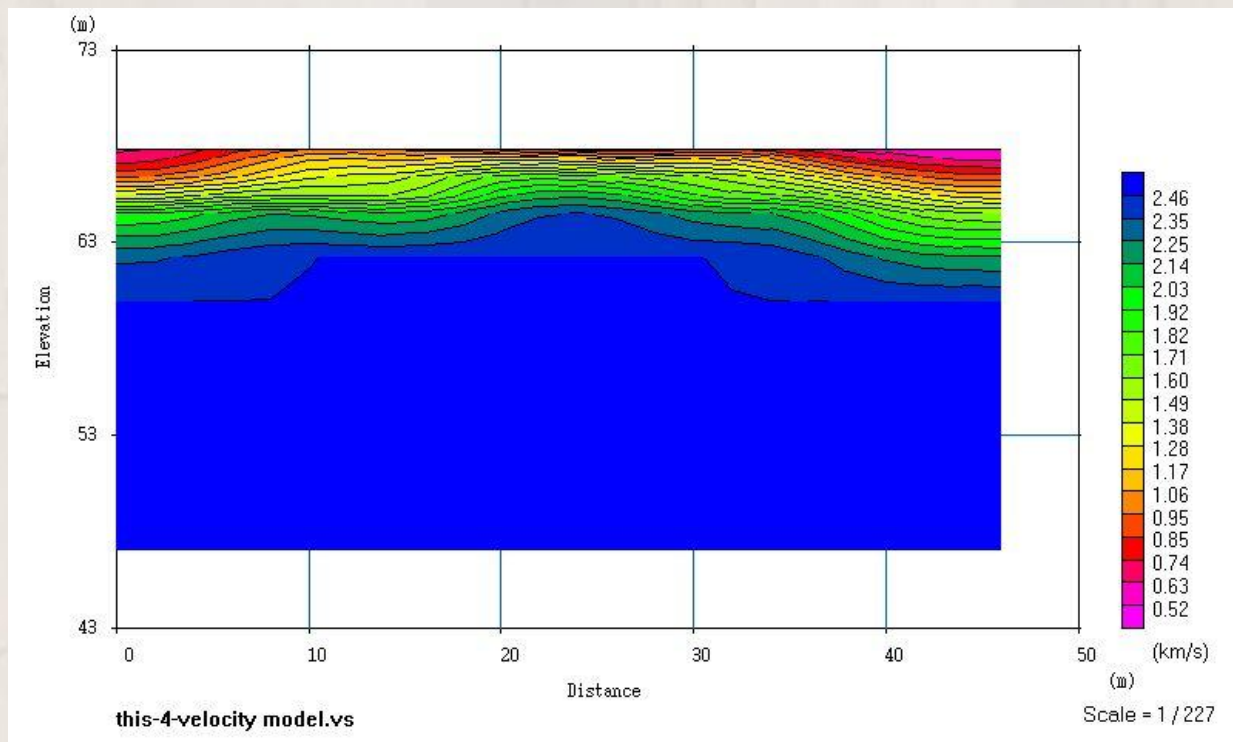
**Εικόνα 4.31:** Σεισμόγραμμα όπου με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 0 της γραμμής SEIS2 ενώ με πράσινες γραμμές είναι χρόνοι πρώτης άφιξης σε άλλες θέσεις της πηγής.



**Εικόνα 4.32:** Σεισμόγραμμα όπου με ροζ χρώμα είναι σημειωμένοι οι χρόνοι πρώτης άφιξης όταν η πηγή βρίσκεται στο γεώφωνο 48 της γραμμής SEIS2 ενώ με πράσινες γραμμές είναι χρόνοι πρώτης άφιξης σε άλλες θέσεις της πηγής.



Εικόνα 4.33: Δρομοχρονική Καμπύλη της γραμμής SEIS2



Εικόνα 4.34: Μοντέλο του υπεδάφους για την σεισμική γραμμή SEIS2

#### 4.5.2.9. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Και στις δύο τομές παρατηρείται μια σαφής εικόνα του εδάφους κάτω από τον ναό όσον αφορά την συνεκτικότητα. Όσο το βάθος μεγαλώνει η τιμή των σεισμικών ταχυτήτων αυξάνεται όσο προσεγγίζουμε το συνεκτικό βραχώδες υπόβαθρο του ασβεστόλιθου.

Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η φάση του σχιστολίθου που βρίσκεται κάτω από τον ασβεστόλιθο δεν απεικονίζεται στις σεισμικές τομογραφίες γιατί η ταχύτητα στο στρώμα αυτό είναι χαμηλότερη. Άρα υπάρχει ένα τυφλό στρώμα σχιστολίθου το οποίο δεν θα απεικονιστεί όμως είναι ήδη εντοπισμένο από τις ηλεκτρικές τομογραφίες με μεγάλη ακρίβεια.

**Στην Εικόνα 4.30** όπου φαίνεται η σεισμική τομή με διεύθυνση Β-Ν παρατηρούνται ένα επιφανειακό στρώμα σχετικά χαμηλών ταχυτήτων (κόκκινο χρώμα) και χαλαρών αδρομερών υλικών το οποίο βρίσκεται εκατέρωθεν του Ναού ο οποίος ουσιαστικά εδράζεται σε στρώμα υψηλότερων ταχυτήτων (πράσινο χρώμα) πιθανά ασβεστόλιθο με τις πιο συνεκτικές φάσεις του να παρουσιάζονται με τις υψηλές τιμές ταχυτήτων (πράσινο προς μπλε χρώμα).

**Στην Εικόνα 4.34** όπου φαίνεται η σεισμική τομή με διεύθυνση Α-Δ παρατηρούνται παρατηρούνται ένα επιφανειακό στρώμα σχετικά χαμηλών ταχυτήτων (κόκκινο χρώμα) και χαλαρών αδρομερών υλικών το οποίο βρίσκεται εκατέρωθεν του Ναού ο οποίος ουσιαστικά εδράζεται σε στρώμα υψηλότερων ταχυτήτων (πράσινο χρώμα) πιθανά ασβεστόλιθο με τις πιο συνεκτικές φάσεις του να παρουσιάζονται με τις υψηλές τιμές ταχυτήτων (πράσινο προς μπλε χρώμα).

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

## 5. Συμπεράσματα και Σχόλια

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το υπέδαφος του Ναού του Ηφαίστου στο Θησείο με γεωφυσικές μεθόδους. Ο σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι ο εντοπισμός της στρωματογραφίας, της λιθολογίας, κοκκομετρίας, συνεκτικότητας των στρωμάτων και αν υπάρχουν τοπικές δομές, που παρουσιάζουν διαφορετικές γεωφυσικές ιδιότητες (αντίσταση ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, σεισμικές ταχύτητες).

Η περιοχή της έρευνας, αφορά χώρο με ένα από τα πιο δημοφιλή αρχαιολογικά μνημεία στον κόσμο, το Ναό του Ηφαίστου (Θησείο) και επιβάλλει έρευνα με μη καταστρεπτικές μεθόδους όπως είναι αυτές της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

Από την εφαρμογή των τριών γεωφυσικών μεθόδων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους προκύπτουν μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται παρακάτω:

-Οι εφαρμογές που παρουσιάστηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία (cases studies), βοήθησαν σημαντικά στην έρευνά μας. Πιο συγκεκριμένα, οι 4 εφαρμογές που μελετήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είχαν ομοειδή προβλήματα με τη γεωφυσική έρευνα στο Θησείο. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές ακολουθώντας σχεδόν όμοιο σχεδιασμό γεωφυσικής έρευνας, κατάφεραν να φέρουν εις πέρας δύσκολα γεωφυσικά προβλήματα. Για αυτό το λόγο, έγινε εκτενής ανάλυση του σχεδιασμού των τεσσάρων εφαρμογών, ούτως ώστε να δημιουργηθεί ένα αρχικό πλάνο σχεδιασμού για τη γεωφυσική έρευνα στο Ναό του Ηφαίστου στο Θησείο. Εκεί που δόθηκε μεγάλη βαρύτητα ήταν ο συνδυασμός της ηλεκτρικής με την σεισμική τομογραφία στην ίδια περιοχή για να μπορέσουμε να βγάλουμε ασφαλή και λεπτομερή συμπεράσματα για την στρωματογραφία και την συνεκτικότητα των πετρωμάτων καθώς και πως ακριβώς διαμορφώνεται η φάση του Αθηναϊκού σχιστόλιθου στο υπέδαφος του Ναού.

- Κάθε μία από τις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην προσπάθεια εντοπισμού τόσο πιθανών αρχαιολογικών η άλλων ανθρωπογενών στόχων στο υπέδαφος όσο και στο κομμάτι της στρωματογραφίας της περιοχής και της συνεκτικότητας των επιμέρους πετρωμάτων που εμφανίζονται. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δυο διακριτές περιοχές: Πρώτα **στην ευρύτερη περιοχή του Ναού** με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και ύστερα στην περιοχή γύρω από τον Ναό με τις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) και της σεισμικής τομογραφίας. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι παρ'ότι έγιναν ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις και γύρω από τον Ναό, λόγω των μεταλλικών προβολέων που υπάρχουν γύρω του δημιουργήθηκε πολύς θόρυβος στις μετρήσεις και έτσι δεν έγινε δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα από αυτές.

- Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο στην ευρύτερη περιοχή του Ναού, μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο οι χάρτες με βάθος συνολικής διασκόπησης 3 m. εντόπισαν ότι στο ευρύτερο γεωλογικό περιβάλλον με το συνεκτικό πέτρωμα του αθηναϊκού σχιστόλιθου χαμηλής αγωγιμότητας εντοπίστηκαν πιο αγώγιμες περιοχές που αντιστοιχούν σε χαλαρά ιζήματα ενώ εντοπίστηκαν τοπικά πολύ αγώγιμες περιοχές που



συνδέονται με μεταλλικές ανθρωπογενείς κατασκευές (βρύση, σωλήνες ύδρευσης). Επίσης τοπική παρουσίαση σχετικά πιο αγώγιμης περιοχής αντιστοιχεί σε φρέαρ πληρωμένο με αγώγιμο υλικό.

-Η γεωηλεκτρική τομογραφία γύρω από τον Ναό αποδείχθηκε πως είναι χρήσιμη στην περίπτωση μας καθώς αποτυπώνει με λεπτομέρεια τα γεωλογικά στρώματα που βρίσκονται στο υπεδάφος του Ναού. Εντοπίζει τα αδρόκοκκα χαλαρά υλικά στα πρώτα μέτρα βάθους και ειδικότερα διακρίνει μέσω της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης ασβεστόλιθο και σχιστόλιθο που αποτελούν φάσεις του Αθηναϊκού σχιστόλιθου με παρόμοιες συνεκτικότητες.

-Η σεισμική μέθοδος που ακολούθησε την ηλεκτρική έδωσε σαφή εικόνα για την κατάσταση του υπεδάφους σε σχέση με την συνεκτικότητα και φάνηκε ότι οι τιμές των σεισμικών ταχυτήτων αυξάνουν με το βάθος. Επιβεβαιώθηκαν οι εκτιμήσεις που είχαν γίνει με τις ηλεκτρικές τομογραφίες σε ότι είχε να κάνει με την στρωματογραφία, καθώς εμφανίζονται αρχικά μέχρι τα 2-3m βάθος αδρομερή υλικά και έπειτα στα περίπου 65m απόλυτο υψόμετρο η οροφή του Αθηναϊκού σχιστόλιθου που όσο αυξάνεται το βάθος γίνεται πιο συνεκτικός με αυξανόμενες σεισμικές ταχύτητες.

- Παρατηρούμε έτσι ότι τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής και σεισμικής τομογραφίας είναι σε σημαντική συμφωνία μεταξύ τους όσον αφορά την στρωματογραφία, την κοκκομετρία και την συνεκτικότητα των πετρωμάτων του υπεδάφους του Ναού. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι στην περίπτωση που ο ασβεστόλιθος βρίσκεται επάνω από τον σχιστόλιθο η σεισμική τομογραφία δεν τον αποτυπώνει καθώς ο ασβεστόλιθος είναι ένα στρώμα πιο συνεκτικό με μεγαλύτερη σεισμική ταχύτητα. Επομένως μιλάμε για την «τυφλή» ζώνη των σεισμικών. Εδώ σημαντικό ρόλο έπαιξε η ηλεκτρική τομογραφία που έλυσε αυτού του είδους το πρόβλημα.

- Συμπεράσματα μπορούμε επίσης να βγάλουμε και για την καταλληλότητα των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στην γεωηλεκτρική τομογραφία. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων Pole-Dipole και Schlumberger έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς την στρωματογραφία ενώ η Dipole-Dipole αποτύπωσε καλύτερα τις παράπλευρες δομές.

- Ο σχεδιασμός των μετρήσεων ήταν ο καταλληλότερος. Οι τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας σχεδιάστηκαν ώστε να οδηγήσουν σε υψηλής ποιότητας μετρήσεις χωρίς θόρυβο λόγω της ύπαρξης γύρω από τον Ναό μεταλλικών ανθρωπογενών κατασκευών (προβολείς, μεταλλικοί σωλήνες, κλπ.)

- Στην περίπτωση των σεισμικών είχαμε να αντιμετωπίσουμε τον θόρυβο από τον ηλεκτρικό σιδηρόδρομο και γινόταν προσπάθεια οι μετρήσεις να γίνονται σε «ήσυχα» διαστήματα.

- Η επεξεργασία των δεδομένων της κάθε μεθόδου και η ερμηνεία τους έγινε χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα : το RES2DIV της Geotomo Software για την γεωηλεκτρική τομογραφία, το Pickwin και Plotref της EG&G GEOMETRICS για τα σεισμικά και το Surf της Golden Software για την σχεδίαση γεωηλεκτρικών τομών και ηλεκτρομαγνητικών χαρτών

- Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής μεθόδου με το RES2DIV, η διαδικασία ερμηνείας Robust-Vertical/Horizontal έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές

στις τιμές της ειδικής αντίστασης , στην παρουσία θορύβου στις μετρήσεις καθώς και στην οριζόντια στρωματογραφία .

## **5.2 Σχόλια**

Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης γεωφυσικής έρευνας είναι ορθός και προτείνεται σε περιπτώσεις με παρόμοιο αντικείμενο έρευνας με την συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα στο Ναό του Ηφαίστου. Αναλυτικότερα η επιλογή των συγκεκριμένων γεωφυσικών μεθόδων, η σειρά εφαρμογής τους, οι διατάξεις τους και η επεξεργασία των μετρήσεων είναι η ενδεδειγμένη για γεωφυσικές έρευνες με παρόμοια γεωλογικά και αρχαιολογικά στοιχεία. Άλλωστε στις πιο πολλές περιπτώσεις έρευνα σε αρχαιολογικούς χώρους η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική είναι απαραίτητη καθώς παρέχει χρήσιμη πληροφορία με εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων.

Φάνηκε με μεγάλη σαφήνεια ότι για την εξαγωγή συγκεκριμένων συμπερασμάτων είναι απαραίτητη η εφαρμογή παραπάνω της μιας μεθόδων .Στην περίπτωση μας αναδείχθηκε ότι η μια μέθοδος επιβεβαιώνει και συμπληρώνει την άλλη αφού αφενός η ασυνέχεια μεταξύ χαλαρών υλικών και βραχώδους υποβάθρου εντοπίστηκε και από τις δύο μεθόδους η διαφοροποίηση όμως μεταξύ ασβεστολιθικής και σχιστολιθικής φάσης στον Αθηναϊκό σχιστόλιθο έγινε μόνο από την γεωηλεκτρική τομογραφία.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που πραγματοποιήθηκε στην ευρύτερη περιοχή του Ναού είναι μια σύντομη και ταυτόχρονα οικονομική μέθοδος με την οποία μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα σε σχέση με τη φύση του υλικού των σχηματισμών του υπεδάφους και τον τρόπο που αυτά κατανέμονται στον χώρο. Πολύ σημαντική είναι η συμβολή της και στον εντοπισμό τοπικών μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας οι οποίες εντοπίζουν την ύπαρξη και την διάκριση ανθρωπογενών κατασκευών (πηγάδια ,έγκοιλα, σωληνώσεις).

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής και σεισμικής τομογραφίας είναι πιο χρονοβόρες ,επίπονες και ακριβές μέθοδοι όμως η λεπτομέρεια που παρέχουν για την εικόνα του υπεδάφους είναι τεράστιο πλεονέκτημα και κίνητρο για να πραγματοποιούνται σε παρόμοιας φύσης προβλήματα. Το μεγάλο πλεονέκτημα του συνδυασμού των δύο μεθόδων είναι ότι αποτυπώνουν με ακρίβεια την στρωματογραφία της περιοχής, τα διαφορετικά πετρώματα, το πόσο συνεκτικά είναι αυτά καθώς και το πώς η συνεκτικότητα αυτή κατανέμεται στον χώρο από την άποψη χαλαρών και συνεκτικών περιοχών στον χάρτη. Ακόμα μπορεί να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το ποια πετρώματα είναι υδροπερατά καθώς οι περιοχές απορροής νερού μπορούν και αυτές να δημιουργήσουν προβλήματα αν δεν προβλεφθούν. Αυτό αποτελεί και τον στόχο του μηχανικού ο οποίος μπορεί σε παρόμοιες περιπτώσεις μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς και αρχαιολογικών χώρων να αντιμετωπίζει εδάφη υδροπερατά ή μη με ακατάλληλα μηχανικά χαρακτηριστικά. Έτσι η εφαρμογή των μεθόδων που προτείνουμε μπορεί να δώσει μια σαφή και αξιόπιστη λύση για τέτοιου είδους προβλήματα εφόσον υπάρχει εμπειρία στον τομέα της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και σωστή συλλογή και ερμηνεία των δεδομένων πεδίου.

Πιθανώς μια επανάληψη των γεωφυσικών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την τρισδιάστατη αποτύπωση των δεδομένων στον χώρο, να βοηθούσε περισσότερο στην λεπτομερή χωρική αποτύπωση της στρωματογραφίας και της συνεκτικότητας των πετρωμάτων της περιοχής του Ναού του Ηφαίστου.

## 6.Βιβλιογραφία

- Αποστολόπουλος. (2013). Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.
- Camp, John M. (2002). Η Αγορά της Αρχαίας Αθήνας, 1–48.
- Cardarelli, E., Cercato, M., & Donno, G. De. (2014). Characterization of an earth-filled dam through the combined use of electrical resistivity tomography, P- and SH-wave seismic tomography and surface wave data. *Journal of Applied Geophysics*, 106, 87–95.
- Oz Yilmaz. (2013). Geophysical investigations of historic buildings—A case study of the Great Church of St. Sophia, (March).
- G. Leucci, F. Greco, L. De Giorgi, R. Mauceri Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiola` (Sicily, Italy) *c-Journal of Archaeological Science* 34 (2007) 233e242
- Sayed Hemed-- Electrical Resistance Tomography (ERT) Subsurface Imaging for Non-destructive Testing and Survey in Historical Buildings Preservation, -*Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1): 344-357, 2013 ISSN 1991-8178
- Witten, A.J., 2006. Handbook of Geophysics and Archaeology. Equinox Publishing, London.
- Loke, D. M. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Cangkat Minden Lorong*, 6574525, 63.
- 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.
- Loke M.H. and Barker R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131–152.
- Βερβερέλης Ε. (2011). Εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στον Αστικό Ιστό, για τον Εντοπισμό Στρωματογραφίας και Πεπερασμένων Δομών.
- Ιωάννης Φ.Λούης. (2004). Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική.
- Μαυρομάτης, Δ. (2007). Συνδυασμός Στρωματογραφικών Δεδομένων και Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών για τον εντοπισμό του Προλοκαϊνικού Υποβάθρου στην περιοχή Πειραιά – Νέου Φαλήρου, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Φωκίων Λοΐζος, 2014. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΝΑΟ ΤΟΥ ΠΟΣΕΙΔΩΝΑ ΣΤΟ ΣΟΥΝΙΟ.
- CMD. 2013 Electromagnetic Conductivity Meter User Manual

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.

Δούνας Α., Καλλέργης Γ., Μόρφης Α., 1976. Υδρογεωλογική έρευνα στα πλαίσια της μελέτης του ΜΕΤΡΟΑθηνών. ΙΓΜΕ

Marinos, G. & Petracheck, W. 1956. Laurium. I.G.M.E. Geol. Geoph. Res., V/1, 247pp.

Μαρίνος Γ Κατσικάτσος Μαρίνος, Γ., Κατσικάτσος, Γ., Γεωργιάδου-Δικαιούλια, Ε. & Μίρκου Ρ., 1971. Το σύστημα των Σχιστολίθων Αθηνών. Ι. Στρωματογραφία και τεκτονική, Ann. Geol. Pays Hell, XXIII, 183-26.

Μαρίνος, Γ., Κατσικάτσος, Γ., Μίρκου-Περιποπούλου, Ρ., 1974. Το σύστημα των σχιστολίθων των Αθηνών ΙΙ. Στρωματογραφία και τεκτονική. Ann. Geol. Pays Hell., XXV, 439-444.

Niedermayer, S., 1973. Γεωλογικός χάρτης Αθηνών 1:10.000. Έκδοση Ε.Γ.Ε.- Τ.Ε.Ε. Αθήνα.

Παπανικολάου Δ., Λόζιος Σ., Σούκης Κ. και Σκούρτσος Εμ., 2004. «Η Γεωλογική Δομή του Αλλόχθονου Συστήματος των Σχιστολίθων Αθηνών». 10<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο Ε.Γ.Ε., Θεσσαλονίκη 2004, Δ.Ε.Γ.Ε. τομ. XXXVI

Παπανικολάου Δ. και συνεργάτες (πάνω από 10 ονόματα) 2002. Γεωλογική – Γεωτεχνική μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών. Εφαρμοσμένο Ερευνητικό πρόγραμμα. Αθήνα

Ernenwein E. G., . Hargrave M. L. (2009). Archaeological Geophysics for DoD Field Use: a Guide for New and Novice Users. Project 200611: Streamlined Archaeo-geophysical Data Processing and Integration for DoD Field Use.

CMD. 2013 Electromagnetic Conductivity Meter User Manual

Κ. Σπυράκος, Ε. Τουτουδάκη-Βασικές έννοιες Σεισμολογίας

Geonics Instruments for Engineers, Geophysicists, Geologists, Military, Archaeologist

