

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική εργασία με θέμα :

**« Συνδυαστική εφαρμογή μεθόδων σεισμικής
διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας »**

Φοιτήτρια : Κότση Μαρία ΑΕΜ : 4438

Επιβλέποντες καθηγητές :

Βαργεμέζης Γεώργιος, επίκουρος καθηγητής ΑΠΘ

Παναγιωτόπουλος Δημήτριος, καθηγητής ΑΠΘ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2012

Περιεχόμενα

<u>Περιεχόμενα.....</u>	<u>4</u>
<u>1 Εισαγωγή.....</u>	<u>5</u>
<u>2 Περιγραφή περιοχής μελέτης.....</u>	<u>6</u>
<u>2.1 Θέση περιοχής έρευνας.....</u>	<u>6</u>
<u>2.2 Γεωτεκτονική θέση και παλαιογεωγραφία.....</u>	<u>6</u>
<u>2.3 Λιθοστρωματογραφία και τεκτονική.....</u>	<u>7</u>
<u>2.4 Στοιχεία γεωτεχνικής έρευνας.....</u>	<u>8</u>
<u>3 Γεωφυσική έρευνα</u>	<u>11</u>
<u>3.1 Σεισμικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης.....</u>	<u>12</u>
<u>3.1.1 Γενικά.....</u>	<u>12</u>
<u>3.1.2 Τρόποι παραγωγής των ελαστικών κυμάτων στην ξηρά</u>	<u>13</u>
<u>3.1.3 Σεισμικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης</u>	<u>15</u>
<u>3.1.4 Σεισμική διάθλαση.....</u>	<u>15</u>
<u>3.1.5 Ανάπτυξη της μεθόδου βασικών σχέσεων ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο.....</u>	<u>17</u>
<u>3.1.6 Διάφορες δομές στρωμάτων που μπορούμε να συναντήσουμε.....</u>	<u>18</u>
<u>3.1.7 Μέθοδος Plus-Minus.....</u>	<u>19</u>
<u>3.1.8 Εφαρμογές σεισμικής διάθλασης.....</u>	<u>21</u>
<u>3.2 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης.....</u>	<u>21</u>
<u>3.2.1 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....</u>	<u>22</u>
<u>3.2.2 Τρόποι μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....</u>	<u>25</u>
<u>3.2.3 Ηλεκτρική τομογραφία.....</u>	<u>26</u>
<u>3.2.4 Εξοπλισμός μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας.....</u>	<u>26</u>
<u>4 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων.....</u>	<u>27</u>
<u>4.1 Σεισμική έρευνα.....</u>	<u>27</u>
<u>4.2 Ηλεκτρική έρευνα.....</u>	<u>38</u>
<u>5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....</u>	<u>39</u>
<u>6 Ευχαριστίες.....</u>	<u>40</u>
<u>7 Βιβλιογραφία :.....</u>	<u>42</u>

1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του τμήματος Γεωλογίας από την φοιτήτρια Κότση Μαρία υπό την εποπτεία του καθηγητή Παναγιωτόπουλου Δημήτριου και του επίκουρου καθηγητή Γεώργιου Βαργεμέζη του τομέα Γεωφυσικής.

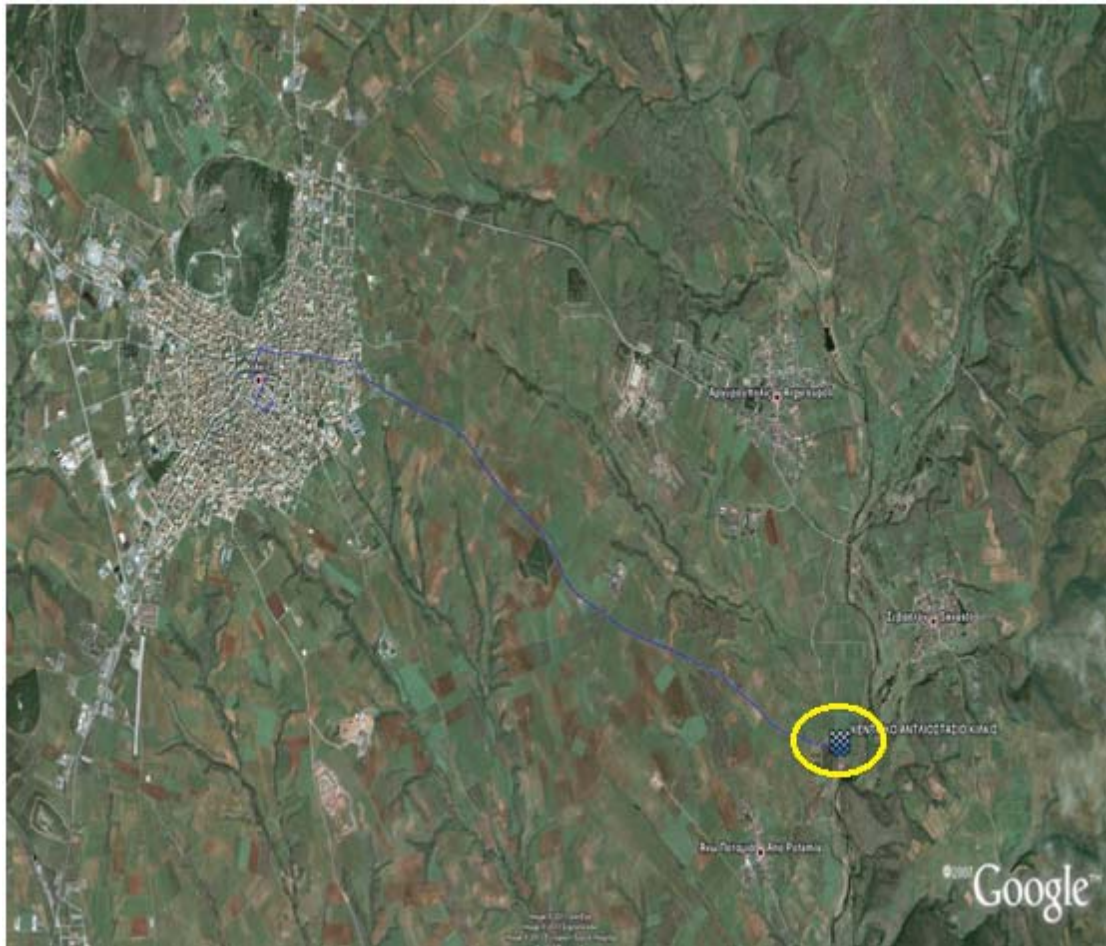
Διεξήχθη στην περιοχή του κεντρικού αντλιοστασίου του Κιλκίς με αντικείμενο μελέτης την επιφανειακή γεωλογική δομή με τη χρήση Ηλεκτρικών και Σεισμικών Μεθόδων Γεωφυσικής Διασκόπησης και την σύγκριση των επιμέρους αποτελεσμάτων των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν .

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας , τα δεδομένα των οποίων αναλύθηκαν με την χρήση του λογισμικού DC2DPRO, και μετρήσεις σεισμικής διάθλασης οι οποίες αναλύθηκαν με την χρήση του λογισμικού SeisImager 2D.

2 Περιγραφή περιοχής μελέτης

2.1 Θέση περιοχής έρευνας

Η εξεταζόμενη περιοχή βρίσκεται δίπλα στο κεντρικό αντλιοστάσιο του Νομού Κιλκίς, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 5,41 km από το κέντρο του Κιλκίς.(σχήμα 1)

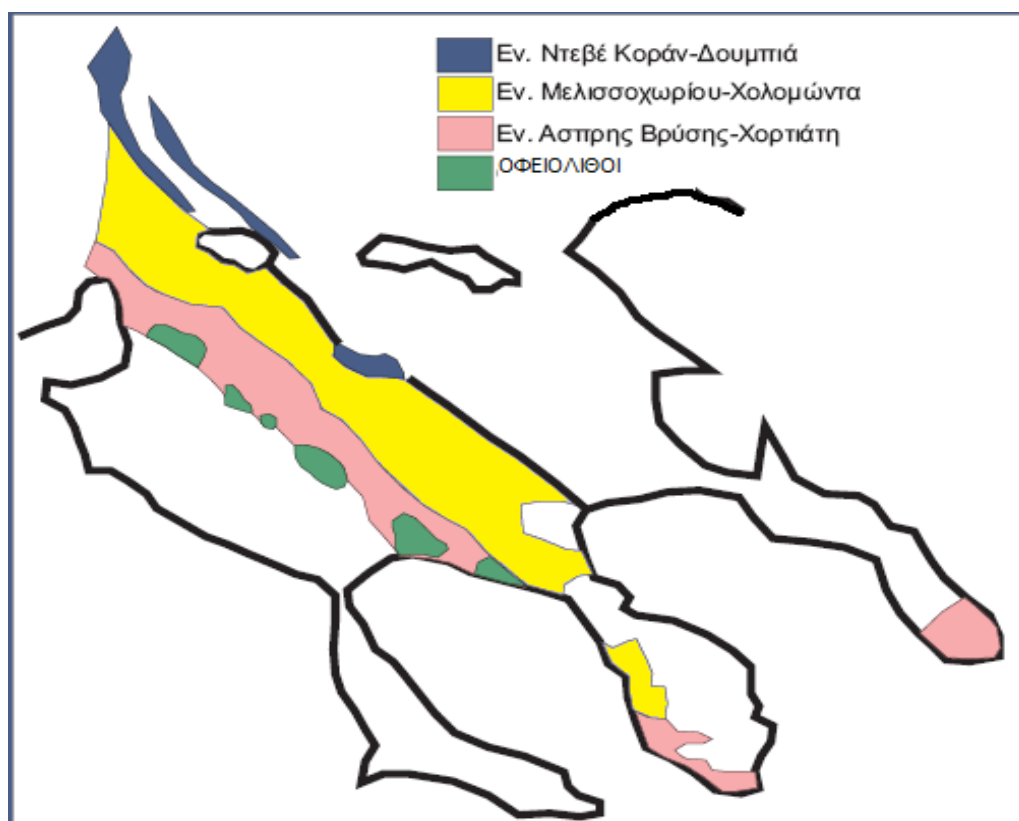


Σχήμα : Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής και ειδικά του χώρου της εφαρμογής των μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης στο κεντρικό αντλιοστάσιο του Κιλκίς.

Η περιοχή βρίσκεται σε υψόμετρο 165 μέτρα περίπου και χαρακτηρίζεται από χαμηλό ορεινό ανάγλυφο με μικρή κλίση.

2.2 Γεωτεκτονική θέση και παλαιογεωγραφία

Γεωλογικά η ευρύτερη περιοχή του Κιλκίς εντάσσεται στη γεωτεκτονική ζώνη της Περιοδοπικής. Σημαντικές όμως, είναι και οι εμφανίσεις ομάδων πετρωμάτων που εντάσσονται στην ενότητα της Παιονίας της γεωτεκτονικής ζώνης του Αξιού. (σχήμα 2)



Σχήμα : Χάρτης της Περιοδοπικής ζώνης με τις τρεις ενότητες της και τις σημαντικότερες οφειολιθικές εμφανίσεις (Μουντράκης, 2010)

Παλαιογεωγραφικά η Περιοδοπική ζώνη αποτελούσε, κατά το Ιουρασικό, την ηπειρωτική κατώφρεια της ηπειρωτικής Ελληνικής ενδοχώρας και κυρίως της Σερβομακεδονικής μάζας. Η κατώφρεια αυτή κατέληγε σε μία βαθιά αύλακα περιφερειακή της ηπειρωτικής μάζας (Μουντράκης, 2010).

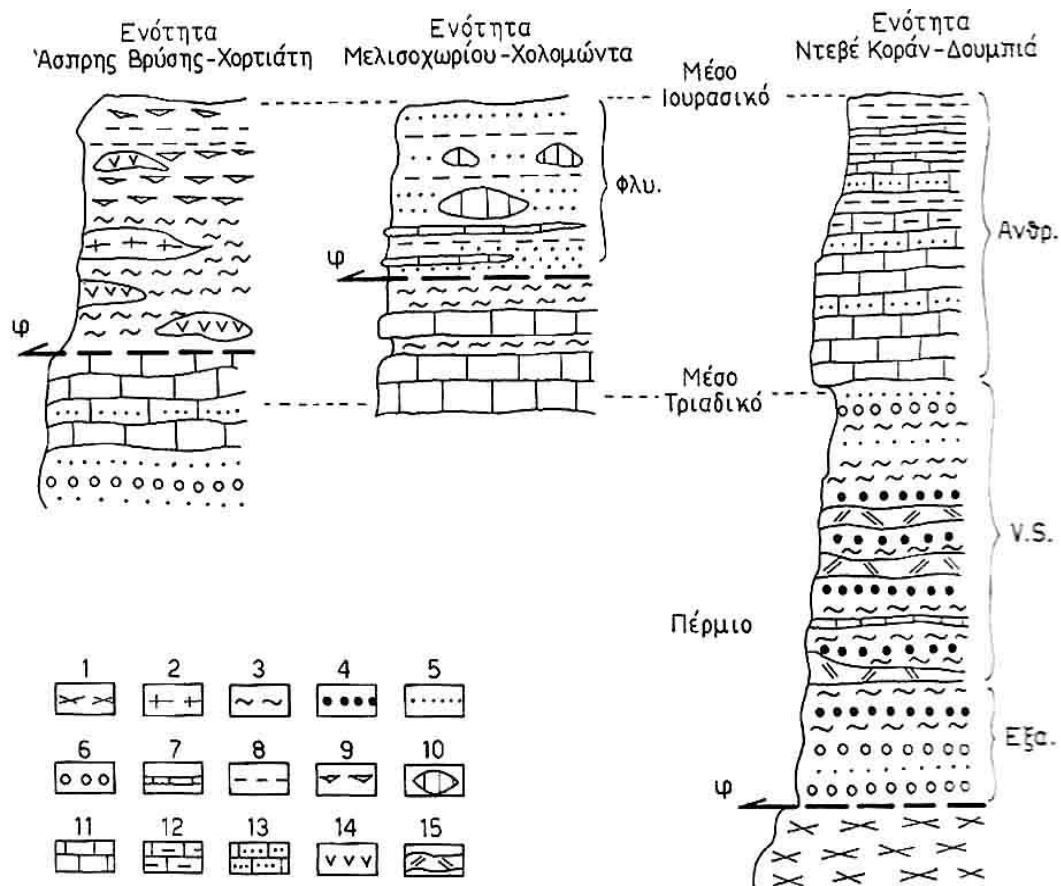
Η περιφερειακή αυτή αύλακα θεωρείται σήμερα η θέση βύθισης της ωκεάνιας περιοχής της ζώνης Αξιού κάτω από την Ευρασιατική ηπειρωτική πλάκα, το περιθώριο της οποίας αποτελούσαν οι μάζες Ροδόπης και Σερβομακεδονικής.

2.3 Λιθοστρωματογραφία και τεκτονική

Λόγω του ότι η περιοχή βρίσκεται μεταξύ της Περιοδοπικής ζώνης και της Παιονίας, εντοπίζονται ιζηματογενή και μετά-ιζηματογενή πετρώματα των τριών ενοτήτων της Περιοδοπικής ζώνης καθώς και της υποζώνης της Παιονίας, τμήματα από το κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής ζώνης και Τριτογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.(σχήμα 3)



Σχήμα : Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής (ΙΓΜΕ)



Σχήμα : Στρωματογραφικές στήλες περιοχής (Μουντράκης, 2010)

1: κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής, 2: πράσινοι γενέσιοι της Θεσσαλονίκης, 3: σχιστόλιθοι και φυλλίτες, 4: πυροκλαστικά υλικά, 5: μεταψαμμίτες, χαλαζίτες, 6: μετα-κροκαλοπαγή, 7: ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, 8: αργιλικό σχιστόλιθοι και μάργες, 9: κερατόλιθοι, 10: ολισθόλιθοι Τριαδικών μαρμάρων, 11: ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι, μάρμαρα., 12: μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, 13: ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι, 14: οφειολιθικά πετρώματα, 15: ηφαιστειακά υλικά (σχιστοποιημένοι ρυόλιθοι, πορφυροειδή), Φ: τεκτονική επαφή, Εξο : σειρά Εξαμυλίου, VS: ηφαιστειοιζηματογενής σειρά

Η περιοχή του Κιλκίς διαμορφώθηκε κατά το Τεταρτογενές από μια σειρά παράλληλων κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ (σχήμα 5 και 6), αποτέλεσμα των εφελκυστικών τάσεων στον Ελληνικό χώρο μετά την οριστική ανάδυση των Ελληνίδων. Οι διαδικασίες της διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης έδωσαν ένα σύστημα αναβαθμίδων που αποτελούν το κύριο σχηματισμό της περιοχής μελέτης. Το σύστημα των αναβαθμίδων υπέρκειται σε μια σειρά αργίλων Πλειστοκαινικής ηλικίας χερσαίας έως λιμναίας φάσης με χαρακτηριστικές διασταυρωμένες στρώσεις.

Το σύστημα των ανώτερων αναβαθμίδων πάνω στο οποίο βρίσκεται η περιοχή μελέτης αποτελείται από ερυθρές αργιλούχες άμμους με ενστρώσεις άμμων χαλικιών και κροκαλών. Στην ευρύτερη περιοχή εντοπίζονται αποθέσεις στις κοίτες ποταμών και χειμάρρων αποτελούμενες από αργιλικές άμμους και ψηφίδες και κυρίως χαλίκια της κατώτατης βαθμίδας του κατώτερου συστήματος αναβαθμίδων με αργιλώδες κάλυμμα. Το υπόβαθρο της περιοχής (Μουντράκης, 2010) αποτελούν διμαρμαρυγικοί γενέσιοι του σχηματισμού του Βερτίσκου της Σερβομακεδονικής μάζας. (σχήμα 4)



Σχήμα : Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (ΙΓΜΕ)



Σχήμα : Γεωλογική τομή περιοχής μελέτης υπό κλίμακα 1:50.000 (ΙΓΜΕ)

Υπόμνημα



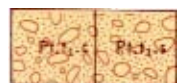
Άμμοι, άργιλοι του Ολοκαίνου



Χαλίκια και αργιλώδες κάλυμμα του Πλειστοκαίνου



Κροκάλες και χαλίκια, αποθέσεις στις κοίτες ποταμών και χειμάρρων



Άμμοι και χαλίκια Πλειστοκαίνου



Ηφαιστειο-ιζηματογενής σειρά του Κατώτερου Τριαδικού



Υπόβαθρο της περιοχής. Διμαρμαρυγικός Γενεύσιος του σχηματισμού Βερτίσκου, του Παλαιοζωϊκού ή και παλαιότερος



Όριο γεωλογικών σχηματισμών

2.4 Στοιχεία γεωτεχνικής έρευνας

Στη περιοχή είχαν πραγματοποιηθεί 2 γεωτρήσεις στα πλαίσια της γεωτεχνικής μελέτης (ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΕ, προσωπική επικοινωνία). Οι θέσεις των γεωτρήσεων σημειώνονται στο σχήμα (10).

Η πρώτη γεώτρηση Γ1 είχε συνολικό βάθος τα 13 μέτρα και συνάντησε συνολικά 8 στρώματα. Σε βάθος μέχρι 1,5 μέτρου περίπου έχουμε καστανέρυθρη αμμώδη άργιλο, ακολουθεί ανοιχτή καστανή άμμο-ιλύς μέχρι τα 2 μέτρα και ακόμα μισό μέτρο με αποσαθρωμένο σχιστόλιθο. Έπειτα και μέχρι το βάθος των 6 μέτρων έχουμε καστανή, μαλακή, ιλυώδη άμμο. Ξανά αποσαθρωμένο σχιστόλιθο για μισό μέτρο και καστανή, σταθερή, άμμο-ιλύς μέχρι τα 9 μέτρα βάθος. Τέλος εντοπίστηκε αποσαθρωμένος σχιστόλιθος για 1,5 μέτρο ακόμα και γνεύσιος ως κατώτερο στρώμα της γεώτρησης και πιθανό υπόβαθρο (σχήμα 7). Ο υδροφόρος ορίζοντας εντοπίστηκε στα 5 μέτρα βάθος εντός της ιλυώδους άμμου.

Στη δεύτερη γεώτρηση Γ2 με συνολικό βάθος διείσδυσης τα 15 μέτρα συναντήθηκαν 6 στρώματα συνολικά. Αναλυτικότερα, βρέθηκε καστανέρυθρη αμμώδης άργιλος στα 2 μέτρα βάθος, καστανή ιλυώδης-χαλικώδης άμμος μέχρι τα 4,7 μέτρα, καστανή αμμώδης άργιλος μέχρι τα 8 μέτρα, καστανοπράσινη αμμώδης ιλύς μέχρι τα 12,2 μέτρα, αποσαθρωμένος σχιστόλιθος μέχρι τα 14 μέτρα και τέλος γνεύσιος όπως φαίνεται και στο σχήμα (8). Χαρακτηριστικό με την γεώτρηση αυτή είναι η έλλειψη υδροφόρου ορίζοντα.

Στην γεώτρηση Γ2 έγινε επίσης και κανονική δοκιμή διείσδυσης – Standard Penetration Test (SPT). Στην δοκιμή αυτή μετράται ο αριθμός των κρούσεων που απαιτούνται για την διείσδυση του δειγματολήπτη κατά 30 cm στον υπό εξέταση εδαφικό ορίζοντα. Ορίζεται ως αριθμός (N) το άθροισμα των κρούσεων για την διείσδυση του διαιρετού δειγματολήπτη κατά 45 cm χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός κρούσεων των πρώτων 15 cm (καθώς θεωρείται η περιοχή αυτή ως ζώνη διατάραξης). Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι να συσχετιστεί ο αριθμός N_{SPT} με την γωνία τριβής (ϕ), την ανεμπόδιστη θλίψη και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή των εδαφών.

Τα όρια **SPT** που υπολογίστηκαν στην συγκεκριμένη γεώτρηση είναι:

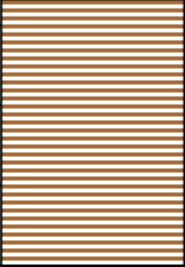
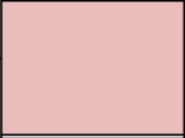
- 37 για βάθος 2 μέτρα
- 46 για βάθος 4 μέτρα
- 63 για βάθος 6 μέτρα
- 63 για βάθος 8 μέτρα

Πυκνότητα (αδρόκοκκα εδάφη) (GR)	Πυκνότητα (αδρόκοκκα εδάφη) (EN)	Τιμή SPT
Πολύ χαλαρό	Very loose	0-4
Χαλαρό	Loose	5-10
Μέτρια πυκνό	Medium dense	11-30
Πυκνό	Dense	31-50
Πολύ πυκνό	Very dense	>50

*Πίνακας : Όρια SPT αναλόγως της πυκνότητας των σχηματισμών
(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg881e/assets/geologikes-meletes-2o-mathima-site.pdf>)*

ΒΑΘΟΣ (m)	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ Η ΤΟΜΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1		Καστανέρυθρη, σταθερή, αμμώδης αργίλος με MnO
2		Ανοιχτή καστανή, ΑΜΜΟΪΛΥΣ
3		Αποσαθρωμένος ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
4		Καστανή, μαλακή, ιλυώδης ΑΜΜΟΣ
5		
6		
7		
8		Αποσαθρωμένος ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
9		Καστανή, σταθερή, ΑΜΜΟΪΛΥΣ
10		
11		Αποσαθρωμένος ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
12		ΓΝΕΥΣΙΟΣ
13		
14		13,00 Τέλος Γεώτρησης
15		

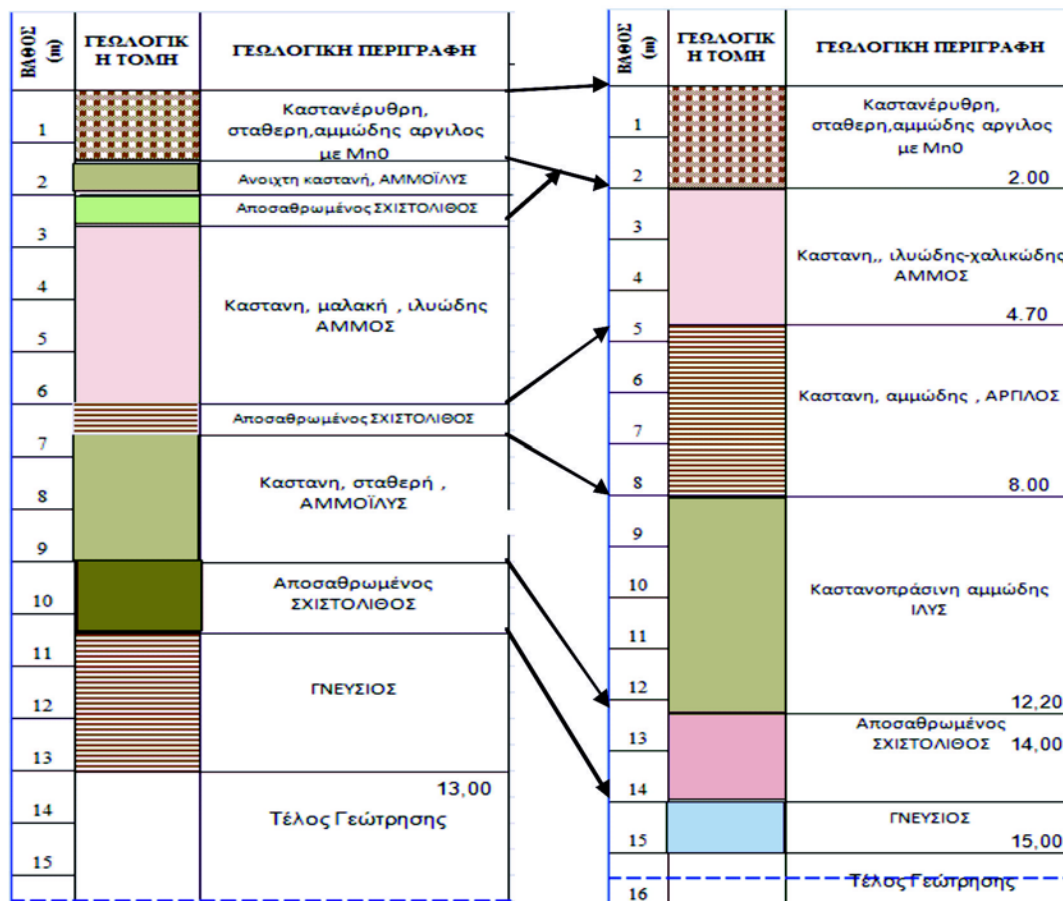
Σχήμα : Στρωματογραφική Στήλη γεώτρησης Γ'1 (Προσωπική επικοινωνία,
ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΕ)

ΒΑΘΟΣ (m)	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1		Καστανέρυθρη, σταθερή, αμμώδης αργίλος με MnO
2		2.00
3		Καστανή,, υλώδης-χαλικώδης ΑΜΜΟΣ
4		
5		4.70
6		Καστανή, αμμώδης , ΑΡΓΙΛΟΣ
7		
8		8.00
9		Καστανοπράσινη αμμώδης ΙΛΥΣ
10		
11		
12		12,20
13		Αποσαθρωμένος ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
14		14,00
15		ΓΝΕΥΣΙΟΣ 15,00
16		Τέλος Γεώτρησης

Σχήμα : Στρωματογραφική Στήλη γεώτρησης Γ'2 (Προσωπική επικοινωνία,
ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΕ)

Γ1

Γ2



Σχήμα . Στρωματογραφική συσχέτιση των δύο γεωτρήσεων.

Η διαφορά στα πάχη και την στρωματογραφία της περιοχής σε συνδυασμό με την απουσία υδροφόρου ορίζοντα στη δεύτερη γεώτρηση αποτελούν ενδείξεις για την ύπαρξη κάποιας πλευρικής ασυνέχειας στο διάστημα μεταξύ των δυο γεωτρήσεων.

Συγκεκριμένα, παρατηρείται άλμα του γνευσιακού υποβάθρου (σχήμα 9) από τα 10.3 μέτρα (γεώτρηση Γ1) στα 14 (Γεώτρηση Γ2). Δεδομένης της απόστασης των 50 μέτρων μεταξύ των γεωτρήσεων η διαφορά δεν κρίνεται ιδιαίτερα βάσιμη για την υπόθεση ύπαρξης ρήγματος, τα τεκτονικά αίτια δεν μπορούν να αποκλειστούν αφού το άλμα αυτό παρατηρείται και στα υποκείμενα στρώματα.

Με βάση την παρατήρηση αυτή, η ύπαρξη τεκτονικής ασυνέχειας αντιμετωπίζεται στη συνέχεια της γεωφυσικής έρευνας σαν μία πιθανότητα.

3 Γεωφυσική έρευνα

Η επιφανειακή γεωλογική δομή μιας περιοχής μπορεί να βρεθεί είτε με τεχνικές μελέτες- γεωτρήσεις, είτε με γεωφυσική έρευνα. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική μελετά φυσικές ιδιότητες του υπεδάφους για να παρέχουν έμμεσα πληροφορίες για την γεωλογική δομή που η γνώση της είναι απαραίτητη σε πρακτικές εφαρμογές. Η γεωφυσική έρευνα είναι μη καταστροφική, λιγότερο δαπανηρή και χρονοβόρα σε σχέση με τις γεωτρήσεις και μπορεί να καλύψει μεγάλες περιοχές. Σε περιβάλλοντα όπου οι ενοχλητικές- θορυβώδεις έρευνες είναι αδύνατες, μόνο η γεωφυσική μπορεί να δώσει απαντήσεις.

Στην περιοχή μελέτης είχαν πραγματοποιηθεί δύο γεωτρήσεις στο παρελθόν στα πλαίσια του σχεδιασμού κατασκευής νέων αντλιοστασίων. Αυτός είναι και ο σκοπός που επιλέχθηκε και η συγκεκριμένη περιοχή για την διπλωματική εργασία, έτσι ώστε να γίνει και μία γεωφυσική έρευνα, για να μπορούν να δοθούν ακόμα πιο τεκμηριωμένα συμπεράσματα. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε και ένα προφίλ έρευνας μεταξύ των δύο γεωτρήσεων όπως φαίνεται και στο σχήμα (10).



Σχήμα : Θέση γεωτρήσεων Γ1 και Γ2 και προφίλ μετρήσεων

Η γεωφυσική έρευνα στην περιοχή μελέτης της διπλωματικής περιλαμβάνει σεισμική και ηλεκτρική διασκόπηση. Επομένως οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους που μελετάμε είναι η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Μελετώντας τις ιδιότητες αυτές μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την γεωλογική δομή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος που επιτρέπει το ανάπτυγμα των γεωφυσικών μεθόδων, καθώς κάθε πέτρωμα και υλικό παρουσιάζει διαφορετική ταχύτητα και αντίσταση, όπως φαίνεται και στους πίνακες 2 και 3.

Material	Resistivity ($\Omega \cdot m$)	Conductivity (Siemen/m)
Igneous and Metamorphic Rocks		
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalt	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Sedimentary Rocks		
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Limestone	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Soils and waters		
Clay	1 - 100	0.01 - 1
Alluvium	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Groundwater (fresh)	10 - 100	0.01 - 0.1
Sea water	0.2	5
Chemicals		
Iron	9.074×10^{-8}	1.102×10^7
0.01 M Potassium chloride	0.708	1.413
0.01 M Sodium chloride	0.843	1.185
0.01 M acetic acid	6.13	0.163
Xylene	6.998×10^{16}	1.429×10^{-17}

Πίνακας : Αντιστάσεις από διάφορα κοινά πετρώματα, ορυκτά και χημικές ουσίες (Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, Dr. M.H.Loke 2001)

MEDIUM	Velocity [m/s]	Velocity [m/s]
	min	max
Air depending on temperature	310	360
Weather soil horizon	100	500
Gravel, dray sand	100	600
Loam	300	900
Wet sand	200	1800
Clay	1200	2500
Water depending on temperature	1430	1590
Sandstone friable	1500	2500
Sandstone dense	1800	4000
Chalk	1800	3500
Limestone	2500	6000
Marl	2000	3500
Gypsum	4500	6500
Ice	3100	4200
Granite	4000	5700
Metamorphosed rock	4500	6800

**Πίνακας : Ταχύτητες σεισμικών κυμάτων υλικών κάτω από την επιφάνεια
(MEASUREMENT OF THE SEISMIC WAVES PROPAGATION
VELOCITY IN THE REAL MEDIUM
Pavlovic, V.D., Vilickovic, Z.S., 1998))**

3.1 Σεισμικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

3.1.1 Γενικά

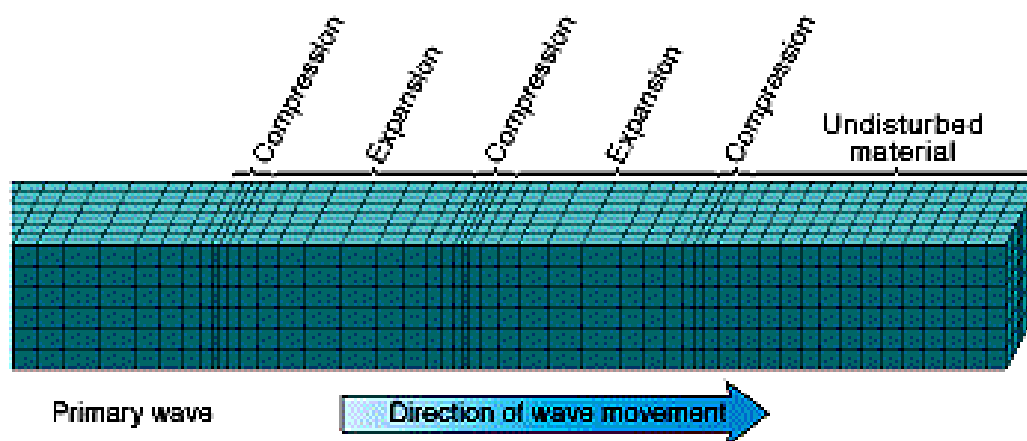
Στις σεισμικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης το φυσικό φαινόμενο το οποίο μετράται είναι οι χρόνοι διαδρομής των σεισμικών ελαστικών κυμάτων. Οι μεταβολές στους χρόνους διαδρομής βασίζονται στις μεταβολές της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων στα πετρώματα. Έτσι, οι σεισμικές μέθοδοι βασίζονται στην κατασκευή πειραματικών καμπύλων χρόνων διαδρομής, δηλαδή την κατασκευή γραφικών παραστάσεων των χρόνων διαδρομής, T , των ελαστικών κυμάτων σε συνάρτηση με τις αποστάσεις, Δ , των γεωφώνων από την πηγή των ελαστικών κυμάτων.

Είδη ελαστικών κυμάτων

Τα ελαστικά κύματα χωρίζονται σε :

1. Κύματα χώρου
 - Επιμήκη κύματα, P
 - Εγκάρσια κύματα, S
2. Επιφανειακά κύματα
 - Κύματα Rayleigh
 - Κύματα Love

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την μελέτη των επιμήκων κυμάτων χώρου, P, κατά την διάδοση των οποίων τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης ταλαντώνονται κατά διεύθυνση παράλληλη προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα. (σχήμα 11)

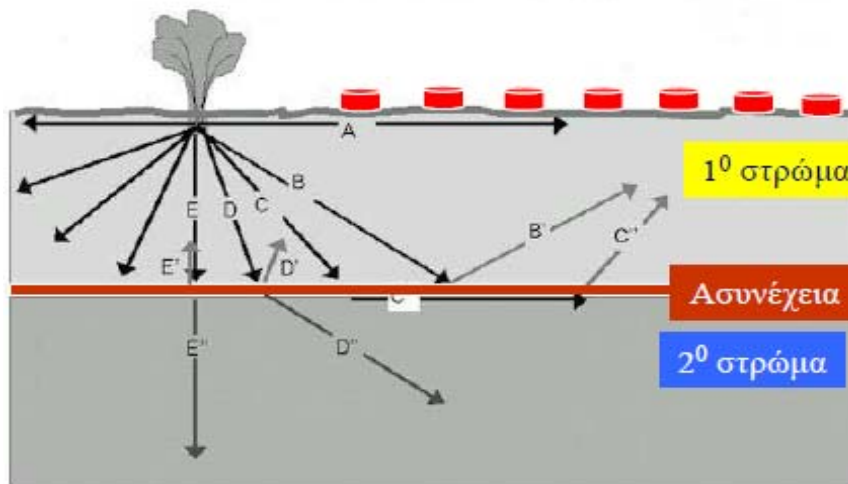


Σχήμα : Μοντέλο διάδοσης επιμήκων κυμάτων ,P, κατά την διεύθυνση διάδοσης της σεισμικής ακτίνας.
(<http://edu.glogster.com/media3863908639011>)

3.1.2 Τρόποι παραγωγής των ελαστικών κυμάτων στην ξηρά

- 1. Τεχνητές εκρήξεις :** Ως υλικό χρησιμοποιείται συνήθως δυναμίτης ή εκρηκτική ζελατίνη. Κατά τον τρόπο αυτό γίνεται έκρηξη μίας μάζας M , η οποία προκαλεί ελαστική παραμόρφωση και έχει ως αποτέλεσμα την διάδοση ελαστικών κυμάτων (σχήμα 12). Οι εκρήξεις αποτελούν μία σχετικά φτηνή πηγή παρα-

γωγής ελαστικών κυμάτων και έχουν το πλεονέκτημα ότι η διάρκεια του σήματος που παράγουν είναι πολύ μικρή γιατί και η διάρκεια της έκρηξης είναι πολύ μικρή. Από την άλλη πλευρά παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα όπως το ότι υπάρχει κίνδυνος στην αποθήκευση, είναι μία επικίνδυνη εργασία, υπάρχει αρκετή γραφειοκρατία για την άδεια εκτέλεσης έργου και δεν μπορούν να παράγουν όμοια ελαστικά κύματα με το ίδιο συχνοτικό περιεχόμενο ώστε να επιτευχθεί η διαδικασία της σώρευσης (stacking) με επιτυχία.



Σχήμα : Σχηματική απεικόνιση τεχνητής έκρηξης σε σεισμικό προφίλ

(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp432e/PDF/EISAGOGH-3.pdf>)

- 2. Thumper** : Αποτελείται από μία μάζα σιδήρου συγκεκριμένου βάρους (π.χ. 3 τόνων) η οποία μεταφέρεται με φορτηγό και πέφτει από κάποιο ύψος τριών μέτρων περίπου. Στην συνέχεια η μάζα συλλέγεται για να χρησιμοποιηθεί πάλι καθώς το αυτοκίνητο μεταφέρεται σε νέα θέση. Ο τρόπος αυτός παραγωγής ελαστικών κυμάτων δεν παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια και μπορεί να παράγει μόνο ισχυρά επιμήκη κύματα.(σχήμα 13)



Σχήμα : Σύγχρονη διάταξη σεισμικής πηγής *Thumper* , σε αυτοκινούμενο όχημα.
 (http://www.google.gr/imgres?q=thumper+seismic+source&hl=el&gbv=2&tbn=isch&tbnid=9xX3emO6Fp10SM:&imgrefurl=http://hvo.wr.usgs.gov/volcanowatch/2008/08_01_03.html&docid=Rcq8JecKBg8Z6M&w=450&h=193&ei=dBg4TtLJBc7FswaesPUr&zoom=1&biw=1366&bih=664)

3. Dinoseis : Αποτελείται από θάλαμο ο οποίος περιέχει εκρηκτικό αέριο (προπάνιο και οξυγόνο) ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κάτω μέρος ενός φορτηγού αυτοκινήτου. Η κάτω πλευρά του θαλάμου αποτελείται από οριζόντια πλάκα η οποία μπορεί να μετακινείται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Κατά την διάρκεια του πειράματος η πλάκα μετακινείται προς τα κάτω και βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος και με ηλεκτρική εκκένωση γίνεται έκρηξη στο αέριο με αποτέλεσμα την έντονη εκτόνωση του και τη άσκηση στιγμιαίας ισχυρής πίεσης στο έδαφος μέσω της πλάκας. Όπως και το *thumper* έτσι και το *dinoseis* παρουσιάζουν μικρή ακρίβεια, μπορούν να παράγουν ισχυρά επιμήκη κύματα και επιπλέον το *dinoseis* έχει το μειονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε ανοιχτές περιοχές λόγω του μεγάλου όγκου του και της σχετικής επικινδυνότητας λόγω της διαδικασίας έκρηξης αερίου για την παραγωγή της πηγής των ελαστικών κυμάτων.(σχήμα 14)



Σχήμα : Σύγχρονη διάταξη, Dinoseis, σε αυτοκινούμενο όχημα

[\(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp432e/PDF/EISAGOGH-3.pdf>\)](http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp432e/PDF/EISAGOGH-3.pdf)

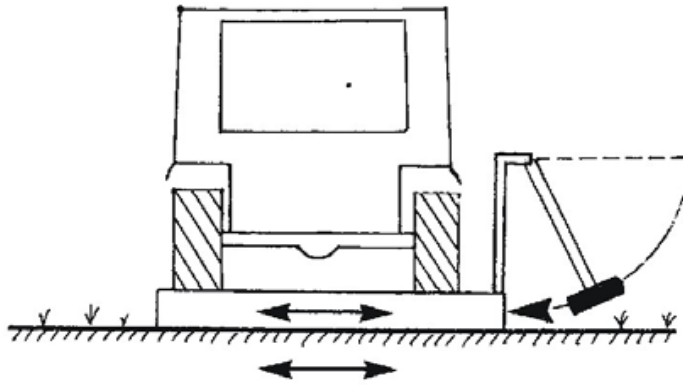
- 4. Vibroseis** : Είναι μία μονάδα παραγωγής ελαστικών κυμάτων η οποία παράγει ταλαντώσεις με υδραυλικό τρόπο μικρού πλάτους και συνεχώς ελεγχόμενης συχνότητας οι οποίες μεταφέρονται στο έδαφος μέσα από μία χαλύβδινη τετραγωνική πλάκα που τοποθετείται σταθερά στο έδαφος. Η μονάδα αυτή παράγει σήματα που έχουν συνήθως διάρκεια 7 δευτερόλεπτα και ένα παράθυρο συχνοτήτων από 6 Hz έως 8 Hz. Το vibroseis παράγει με σχετικά εύκολο και αξιόπιστο τρόπο όμοια επαναλαμβανόμενα σήματα μικρής ενέργειας. Έχει το πλεονέκτημα ότι δεν προκαλεί βλάβες στο έδαφος όπως τα εκρηκτικά , και μπορεί να εφαρμοστεί και σε κατοικημένες περιοχές σε αντίθεση με το dinoseis. Το μέγιστο πλεονέκτημά του στηρίζεται στο γεγονός ότι, μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία η διαδικασία της σώρευσης (stacking) στις επαναλαμβανόμενες κυματομορφές από την πηγή του vibroseis, λόγω του γεγονότος ότι τα παραγόμενα κύματα είναι ισοφασικά (πλήρης έλεγχος στην πηγή) ώστε να εξαχθεί ένα τελικό αθροιζόμενο σήμα ικανού πλάτους.(σχήμα 15)



Σχήμα : Σύγχρονη διάταξη, Vibroseis, σε αυτοκινούμενο όχημα

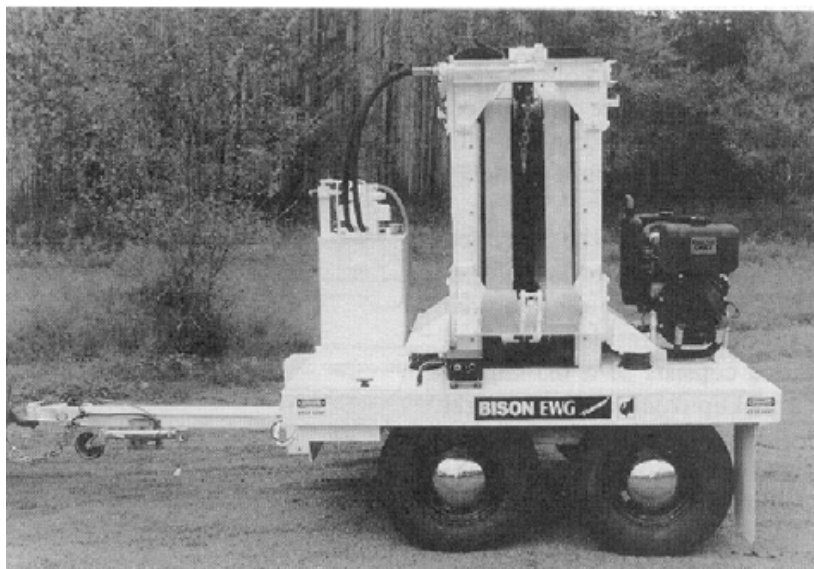
(<http://www.google.gr/imgres?q=vibroseis+seismic+refraction&um=1&hl=el&tbm=isch&tbnid=bL5UmexscK2l5M:&imgrefurl=http://www.sage.lanl.gov/2008.shtml&docid=G2a2Wzb3KSmz4M&w=1037&h=778&ei=sSg4TqvpMo3Rsga4kJUM&zoom=1&biw=1366&bih=664>)

- 5. Sledge Hammer** : Με την μονάδα αυτή χτυπάμε το έδαφος διαμέσου μίας μεταλλικής πλάκας κάθετα κάτω για να δημιουργήσουμε ισχυρά επιμήκη κυμάτα και οριζόντια ενάντια στις πλευρές της πλάκας για να παράγουμε ισχυρά εγκάρσια κύματα. Ένας αυτοματοποιημένος διακόπτης, πιεζοηλεκτρικού τύπου στο σφυρί, ενεργοποιεί την καταγραφή των δεδομένων κατά την πρόσκρουση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προφίλ διάθλασης που απλώνεται μέχρι και 200 μέτρα. Βέβαια υπάρχουν κάποια προβλήματα τα οποία συνδέονται με την επαναληψιμότητα και την πιθανή αναπήδηση του σφυριού.(σχήμα 16)



Σχήμα : Διάταξη παραγωγής ισχυρών εγκάρσιων κυμάτων για τα σεισμικά προφίλ
(*Introduction to Geophysics (EASC 207) Section 5: Seismic Refraction Surveying*)

- 6. Επιταχυνόμενη πτώση βάρους :** Ένα μηχανικό σύστημα χρησιμοποιώντας πεπιεσμένο αέρα ή κάποιον χοντρό ελαστικό ιμάντα ασκεί δύναμη λόγω βάρους σε μια πλάκα με μεγαλύτερη δύναμη για την παραγωγή ελαστικών κύματων. Η μέθοδος αυτή έχει καλύτερη επαναληψιμότητα σε σχέση με το sledge hammer. (σχήμα 17)



Σχήμα : Σύγχρονη διάταξη τύπου Sledge Hammer

(*Introduction to Geophysics (EASC 207) Section 5: Seismic Refraction Surveying*)

3.1.3 Σεισμικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Οι σεισμικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

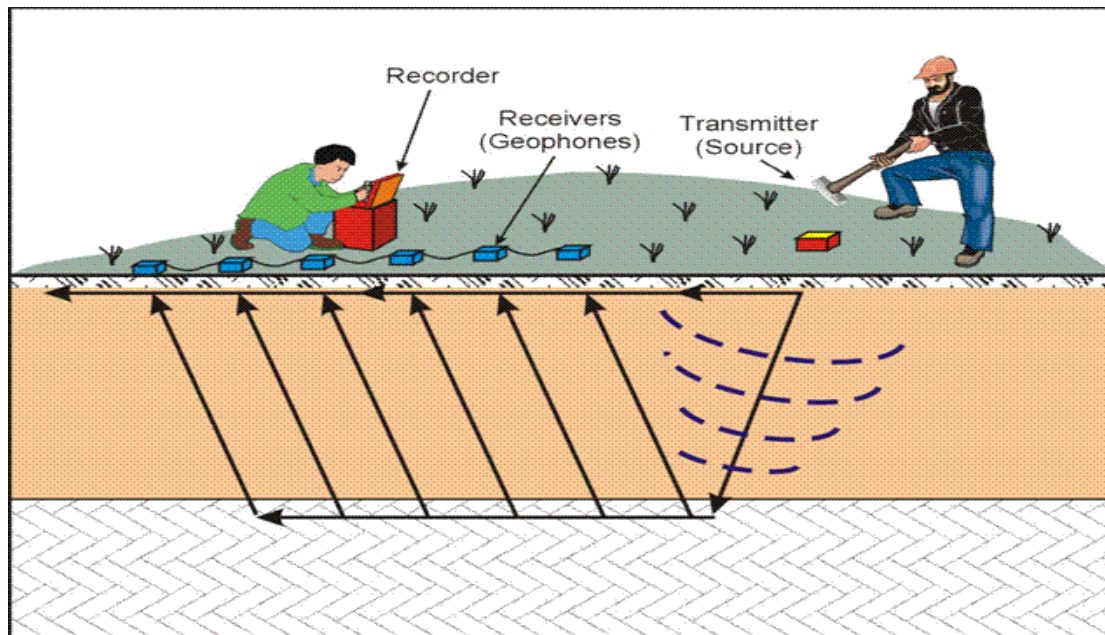
- Σεισμική ανάκλαση
- Σεισμική διάθλαση

Κατά την μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης, όταν ένα ελαστικό κύμα συναντήσει μία απότομη αλλαγή στις ελαστικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης τότε μέρος της ενέργειας του θα ανακλαστεί και θα παραμείνει στο μέσο που βρίσκεται το αρχικό κύμα. Για την εφαρμογή του νόμου της ανάκλασης χρησιμοποιούμε την αρχή του Huygens σύμφωνα με την οποία *«Κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί πηγή ενός νέου δευτερογενούς κύματος»* και την αρχή του Fermat σύμφωνα με την οποία *« Το κύμα το οποίο φθάνει σε ορισμένο σημείο από ορισμένη πηγή ακολουθεί το συντομότερο δρόμο από όλους τους δρόμους που είναι δυνατόν να ακολουθήσει, δηλαδή, ακολουθεί αυτόν που απαιτεί τον ελάχιστο χρόνο»* (Παπαζάχος, Β.Κ., 1986).

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης, την οποία θα αναλύσουμε περισσότερο.

3.1.4 Σεισμική διάθλαση

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας επιμήκων κυμάτων και των επιμήκων κυμάτων διάθλασης σε ένα σεισμικό προφίλ (σχήμα 18) και στην χρησιμοποίηση έπειτα καμπύλων χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών για τον καθορισμό των ταχυτήτων των επιμήκων κυμάτων στο πάνω μέρος του φλοιού καθώς και του πάχους των ενδιάμεσων στρωμάτων (σχήμα 18) με τη χρήση θεωρητικών σχέσεων.



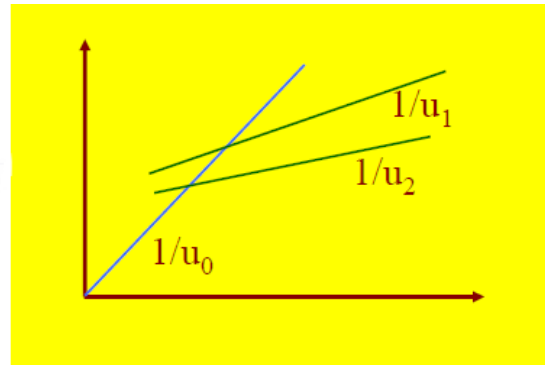
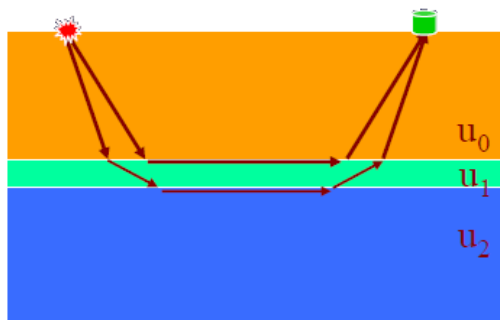
Σχήμα : Διάταξη σεισμικού προφίλ διάθλασης με τη χρήση σφυριού ως πηγής ελαστικών κυμάτων (δομή ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο)
http://www.google.gr/imgres?q=seismic+refraction&hl=el&gbv=2&tbn=isch&tbnid=43vM28eqQA_SpDM:&imgrefurl=http://www.microgeo.com/detailed_discussions/dm1.html&docid=gUXrRTahDJxRPM&w=635&h=431&ei=U8k3TqKRCcyx8QPHrOnrAg&zoom=1&biw=1024&bih=581

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το μικρό της κόστος και τα ικανοποιητικά της αποτελέσματα σε περιοχές με έντονες μορφολογικές ανωμαλίες.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου ανήκουν η μικρή της ακρίβεια, η δυσκολία στις μετρήσεις λόγω της μεγάλης απόστασης πηγής – γεωφώνων (η απόσταση αυτή μπορεί να είναι πολύ μεγάλη ανάλογα με τον σκοπό της έρευνας και το είδος της σεισμικής πηγής) και οι ανωμαλίες στις δομές οι οποίες μπορούν να κάνουν απαγορευτική την χρήση της. Οι συνθήκες γεωλογικών δομών που επιβάλλουν ακύρωση της μεθόδου είναι δύο. Πρώτον η παρεμβολή στρώματος μικρού πάχους σε παχυστρωματώδεις δομές και η παρεμβολή στρώματος με μικρότερη ταχύτητα από το υπερκείμενο.

➤ Παρεμβολή στρώματος μικρού πάχους σε παχυστρωματώδεις δομές

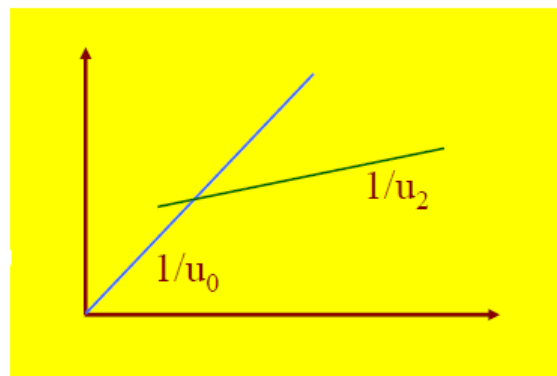
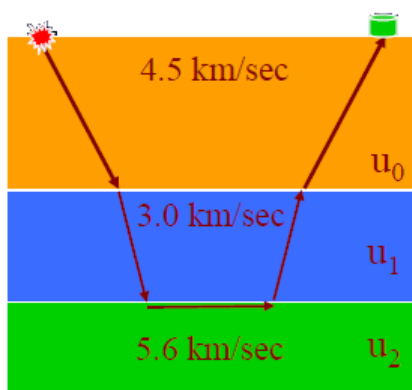
Όταν ένα στρώμα μικρού πάχους (σχήμα 19) βρίσκεται μεταξύ άλλων στρωμάτων ή όταν το στρώμα αυτό έχει σχεδόν ίση ή λίγο μεγαλύτερη ταχύτητα από το αμέσως επάνω του στρώμα , τα μετωπικά κύματα που διαδίδονται προς την πάνω επιφάνεια του στρώματος (σχήμα 19) δεν φθάνουν πουθενά πρώτα αλλά παντού φθάνουν μετά τα άλλα κύματα (απευθείας ή μετωπικά σε άλλα στρώματα). Έτσι, τα μετωπικά που αντιστοιχούν στο στρώμα αυτό δεν εμφανίζονται στις καταγραφές ως πρώτα κύματα για να μετρηθεί με ακρίβεια ο χρόνος άφιξης τους και να καθοριστεί το αντίστοιχο τμήμα της καμπύλης χρόνων διαδρομής ώστε να υπολογιστεί η ταχύτητα και το πάχος του στρώματος.



Σχήμα : Στρώμα μικρού πάχους (ταχύτητας u_1) μεταξύ δύο στρωμάτων σχετικά μεγάλων παχών και οι αντίστοιχες καμπύλες χρόνων διαδρομής.

➤ Παρεμβολή στρώματος με μικρότερη ταχύτητα από το υπερκείμενο.

Αν στρώμα μικρής ταχύτητας βρίσκεται μεταξύ δύο στρωμάτων μεγαλύτερων ταχυτήτων, οι προσπίπτουσες σεισμικές ακτίνες στην πάνω επιφάνεια του στρώματος αυτού πλησιάζουν προς την κάθετη στην επιφάνεια της ασυνέχειας μετά την διάθλαση τους, με συνέπεια να μην διαδίδονται μετωπικά κύματα τα οποία να ακολουθούν την πάνω οριζική επιφάνεια του στρώματος. (σχήμα 20) Επομένως, δεν αναγράφονται τέτοια κύματα και δε μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη των χρόνων διαδρομής αυτών. Η μη αναγνώριση του στρώματος αυτού έχει ως συνέπεια την υπερεκτίμηση των παχών των στρωμάτων όταν εφαρμόζεται η μέθοδος της διάθλασης και την παραγωγή ενός τελείως λανθασμένου μοντέλου στρωμάτων.



Σχήμα : Στρώμα μικρής ταχύτητας (u_1) μεταξύ δύο στρωμάτων μεγαλύτερων ταχυτήτων και οι αντίστοιχες καμπύλες χρόνων διαδρομής.

Για την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου χρειαζόμαστε μία αξιόπιστη πηγή παραγωγής ελαστικών κυμάτων, γεώφωνα που θα λαμβάνουν το σήμα της πηγής και ένα σύγχρονο καταγραφικό σύστημα των κυματομορφών που λαμβάνουν τα γεώφωνα.

3.1.5 Ανάπτυξη της μεθόδου βασικών σχέσεων ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο.

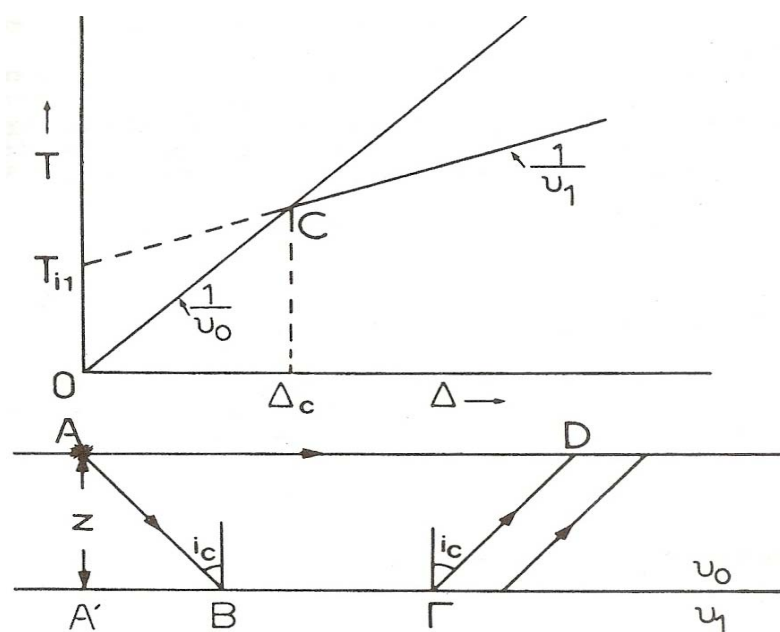
Ας υποθέσουμε ότι η δομή αποτελείται από ένα οριζόντιο στρώμα μέσα στο οποίο η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων είναι σταθερή u_0 , κι ότι κάτω από το στρώμα αυτό υπάρχει ένα άλλο στρώμα μέσα στο οποίο η ταχύτητα είναι u_1 και ότι $u_1 > u_0$. καθορισμός της γεωφυσικής δομής στην περίπτωση αυτή σημαίνει προσδιορισμό των ταχυτήτων u_0 και u_1 και του πάχους z , του πάνω στρώματος. (Παπαζάχος, 1986)

Πραγματοποιείται έκρηξη σε ορισμένο σημείο, A, της επιφάνειας της Γης ενώ τα γεώφωνα τοποθετούνται σε διάφορα σημεία, D, τομής, η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης και περνάει από το σημείο της έκρηξης. (σχήμα 21) Τα γεώφωνα αυτά τοποθετούνται μέχρι και απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τα βάθος z , γράφουν τα πρώτα κύματα που αναχωρούν από την εστία και από τις αναγραφές αυτών βρίσκονται οι χρόνοι άφιξης των κυμάτων. Με αφαίρεση από τους χρόνους άφιξης του χρόνου γένεσης βρίσκονται οι χρόνοι διαδρομής των κυμάτων.

Από την εστία, A, αναχωρούν κύματα προς διάφορες κατευθύνσεις. Από αυτά, εκείνα που φθάνουν πρώτα στις θέσεις των γεωφώνων είναι τα **απευθείας** και τα **μετωπικά**

κύματα. Τα απευθείας κύματα φθάνουν σε ορισμένο σταθμό, D, αφού διατρέξουν την απόσταση, AD, με σταθερή ταχύτητα, u_0 , δηλαδή, οι σεισμικές ακτίνες των κυμάτων αυτών είναι ευθείες γραμμές. Τα μετωπικά κύματα, που γράφονται στον ίδιο σταθμό, προσπίπτουν στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο στρωμάτων υπό την ορική γωνία i_c και διατρέχουν την απόσταση AB με ταχύτητα u_0 . Μετά, διαδίδονται κατά μήκος της τομής BΓ, της διαχωριστικής επιφάνειας και του κατακόρυφου επιπέδου με ταχύτητα u_1 και φθάνουν στο σταθμό από το συμμετρικό δρόμο ΓD, τον οποίο διατρέχουν με ταχύτητα u_0 .

Τα απευθείας κύματα φθάνουν και γράφονται πρώτα στους σταθμούς, που βρίσκονται μέχρι ορισμένη απόσταση Δ_c από το σημείο της έκρηξης. Αυτή λέγεται **ορική απόσταση**.



Σχήμα : Σεισμικές ακτίνες των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων και οι καμπύλες χρόνων διαδρομής. (Παπαζάχος, 1986)



Αν Δ είναι η απόσταση κάποιου γεωφώνου, D, από το σημείο, A, της έκρηξης, ο χρόνος διαδρομής, T_0 , των απευθείας κυμάτων θα είναι $T_0 = AD/u_0$ ή (1)

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος διαδρομής των απευθείας κυμάτων είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης. Συνεπώς η καμπύλη χρόνων διαδρομής των απευθείας είναι ευθεία γραμμή και στο σχήμα (20) αντιστοιχεί στην OC. Από την σχέση (1) προκύπτει ότι το αντίστροφο της κλίσης της ευθείας είναι ίσο με την ταχύτητα u_0 .

Ο χρόνος διαδρομής των μετωπικών κυμάτων θα είναι :



(2)

Αλλά $AB = \Gamma D = z / \sin i_c$ και $B\Gamma = \Delta - 2z \epsilon \phi i_c$. Συνεπώς,



(3)

Από το νόμο του Snell έχουμε ότι $u_1 = u_0 / \eta \mu i_c$. Επομένως,



(4)

Από την σχέση αυτή προκύπτει η



(5)

ή



(6)

Η σχέση (6) γράφεται με την μορφή :



(7)

Όπου T_{11} είναι ο **χρόνος συνάντησης** της καμπύλης χρόνων διαδρομής των μετωπικών κυμάτων και ισούται με :



(8)

Προκύπτει ότι η σχέση (7) μεταξύ T_1 και Δ είναι πρώτου βαθμού συνάρτηση δηλαδή ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση είναι το αντίστροφο της ταχύτητας του κύματος στο κάτω στρώμα. Συνεπώς, και η ταχύτητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί από την καμπύλη που χαράζεται με βάση τις παρατηρήσεις. Στο σχήμα (21) δείχνεται και η ευθεία αυτή και το τμήμα OT_{i1} παριστάνει τον χρόνο συνάντησης.

Χρόνο καθυστέρησης σε ορισμένο κλάδο της τροχιάς ελάχιστου χρόνου, ABΓD, ονομάζουμε τον πρόσθετο χρόνο που χρειάζεται το κύμα για να διατρέξει τον κλάδο αυτό, σε σχέση με τον χρόνο που θα χρειαζόταν για να διατρέξει την οριζόντια προβολή του κλάδου με η μέγιστη ταχύτητα που απέκτησε αυτό κατά τη διαδρομή του. Ο χρόνος καθυστέρησης δίνεται από τον τύπο :



(9)

Το βάθος , z , της επιφάνειας της ασυνέχειας τη ταχύτητας μπορεί να υπολογιστεί από τον χρόνο συνάντησης σχέση (8) ή από την κρίσιμη απόσταση σχέση (10).



(10)

3.1.6 Διάφορες δομές στρωμάτων που μπορούμε να συναντήσουμε

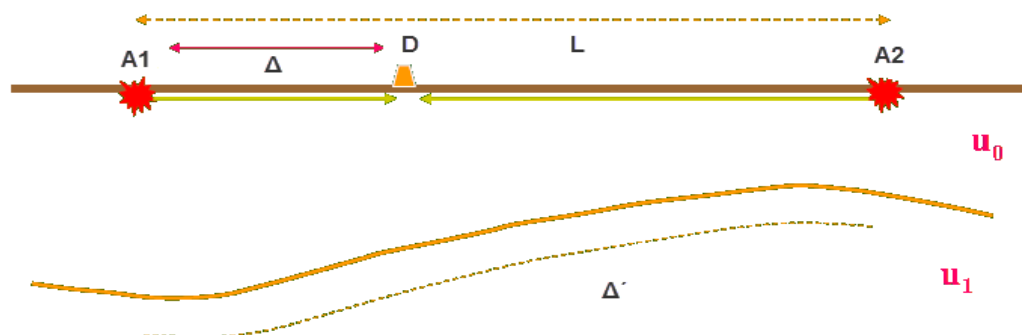
Οι συνήθεις δομές που καλούμαστε να επιλύσουμε με τα σεισμικά προφίλ διάθλασης είναι οι παρακάτω:

- ✓ Δομή ενός ή δύο οριζόντιων στρωμάτων.
- ✓ Δομή πολλών οριζόντιων στρωμάτων.
- ✓ Στρώμα με κεκλιμένη την κάτω επιφάνεια.(ασυνέχεια στρώματος – ημιχώρου)
- ✓ Στρώμα με μη επίπεδη την κάτω επιφάνεια.

Ειδικότερα, στην τελευταία περίπτωση της «μη επίπεδης» ασυνέχειας εφαρμόζουμε την ειδική μέθοδο **Plus-Minus**, η οποία και αναλύεται διεξοδικότερα παρακάτω.

3.1.7 Μέθοδος Plus-Minus

Η μέθοδος αυτή όπως προαναφέραμε χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η κάτω επιφάνεια δεν είναι επίπεδη. Για την εφαρμογή της μεθόδου, έχουμε δύο σημεία A_1 και A_2 (σχήμα 22) τα οποία αποτελούν πηγές ελαστικών κυμάτων, τα οποία καταγράφονται από γεωφώνον D , με στόχο τον υπολογισμό των διάφορων κατακόρυφων αποστάσεων d , των γεωφώνων από την μη επίπεδη επιφάνεια.



Σχήμα : Γεωφυσική δομή με μη επίπεδη ασυνέχεια μεταξύ του πρώτου στρώματος και του ημιχώρου από κάτω.

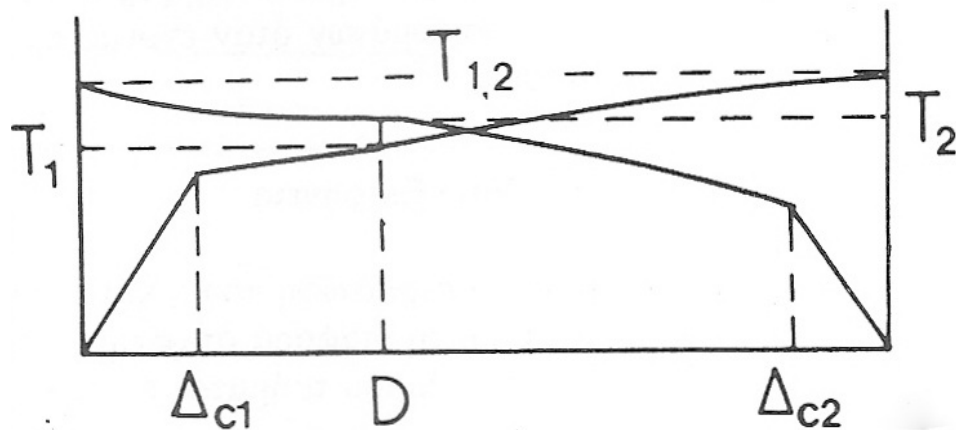
Κατά την εκτέλεση του σεισμικού προφίλ αυτά που φτάνουν πρώτα είναι τα απευθείας κύματα. Η χαρτογράφηση της καμπύλης χρόνων διαδρομής είναι μία ευθεία που περνάει από την αρχή των αξόνων. Η δε κλίση της ευθείας αυτής ισούται με το αντίστροφο της ταχύτητας διάδοσης των επιμήκων κυμάτων στο πρώτο στρώμα ($b = 1/v_0$).

Με το δεδομένο ότι η επιφάνεια της ασυνέχειας είναι σχετικά ομαλή και με μικρή κλίση η σχέση που ισχύει για τον χρόνο διαδρομής των διαθλώμενων κυμάτων που ξεκινούν από το σημείο A_1 και καταλήγουν στο σημείο A_2 είναι :



(11)

Όπου $T_{1,2}$ (σχήμα 23) είναι ο αντιστρέψιμος χρόνος, T_{01} και T_{02} είναι οι χρόνοι καθυστέρησης στις θέσεις των πηγών και L είναι η απόσταση μεταξύ των δύο πηγών.



Σχήμα : Καμπύλες χρόνων διαδρομής στην περίπτωση στρώματος με μη επίπεδη την κάτω επιφάνεια.

Ο χρόνος διαδρομής των διαθλώμενων κυμάτων μεταξύ της πηγής A_1 (σχήμα 24) και του τυχαίου γεωφώνου ,D, δίνεται από την σχέση :



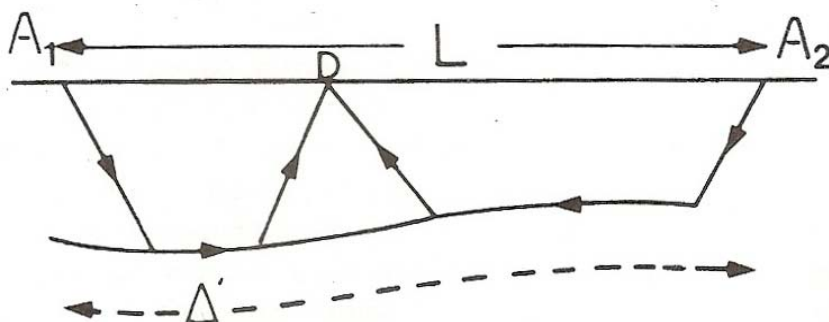
(12)

Ενώ ο χρόνος διαδρομής μεταξύ της πηγής A_2 και του γεωφώνου ,D, (σχήμα 24) δίνεται από την σχέση :



(13)

Όπου T_{OD} είναι ο χρόνος καθυστέρησης στη θέση του γεωφώνου τον οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε.(σχήμα 24)



Σχήμα : Σεισμικές ακτίνες στην περίπτωση στρώματος με μη επίπεδη την κάτω επιφάνεια

Εάν προσθέσουμε κατά μέλη τις δύο σχέσεις (12) και (13) και στην συνέχεια από το αποτέλεσμα αφαιρέσουμε με την σχέση (11) των διαθλώμενων κυμάτων θα προκύψει η σχέση :

$$T_{OD} = \frac{T_1 + T_2 - T_{1,2}}{2}$$

Σχέση PLUS

(14)

με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε όπως φαίνεται και από την σχέση τον χρόνο καθυστέρησης στο γεώφωνο.

Εάν αφαιρέσουμε στην πορεία κατά μέλη τις σχέσεις (12) και (13) που μας δίνουν τους χρόνους διαδρομής των διαθλώμενων κυμάτων και από τις δύο πηγές προκύπτει η σχέση minus :

$$T_1 - T_2 = \frac{2}{u_1} \Delta + \left(-\frac{L}{u_1} + T_{01} - T_{02} \right)$$

Σχέση MINUS

(15)

Η σχέση “Minus” μας δηλώνει ότι υπάρχει σχέση πρώτου βαθμού ανάμεσα στις δύο ποσότητες ($T_1 - T_2$) και Δ . Η χαρτογράφηση σε καρτεσιανό διάγραμμα των δύο ποσοτήτων αυτών θα μας δώσει μία ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση είναι $2/u_1$. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ο υπολογισμός της ταχύτητας, u_1 , των

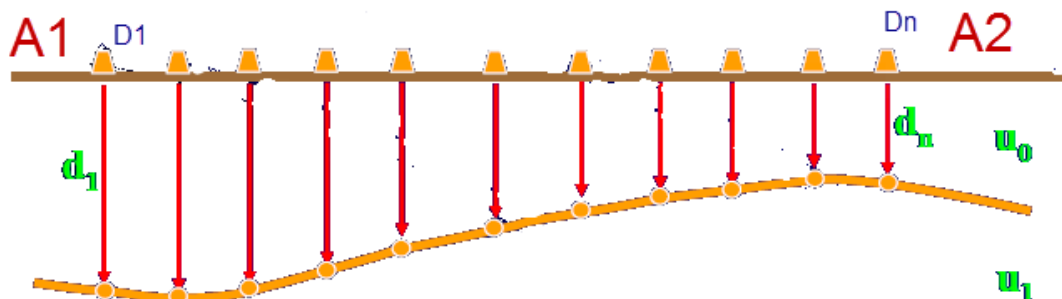
επιμήκων κυμάτων διάθλασης στον ημιχώρο κάτω από την ανώμαλη μη επίπεδη ασυνέχεια.

Τέλος υπολογίζουμε το d που είναι η κατακόρυφη απόσταση του γεωφώνου από την ασυνέχεια σύμφωνα με την σχέση :



(16)

Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει για όλες τις θέσεις των γεωφώνων του σεισμικού προφίλ όπου αναγράφονται διαθλώμενα κύματα τα οποία προέρχονται και από τις δύο πηγές, έτσι ώστε στο τέλος να πάρουμε μία γενική εικόνα της δομής. (σχήμα 25)



Σχήμα : Τελικός υπολογισμός των βαθών της ασυνέχειας κάτω από τα γεωφώνων του σεισμικού προφίλ.

3.1.8 Εφαρμογές σεισμικής διάθλασης

Την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης την χρησιμοποιούμε συνήθως για να ελέγξουμε :

- ✓ Την ικανότητα και αντοχή των πετρωμάτων σε διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές αφού υπολογιστεί χονδρικά η πυκνότητα αυτών από τις τιμές των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων.
- ✓ Για να ελέγξουμε δομές του φλοιού και να κάνουμε έρευνα σε συνάρτηση με την τεκτονική
- ✓ Για να βρούμε το βάθος του υποβάθρου.

Στην παρούσα εργασία, ο λόγος εφαρμογής της μεθόδου είναι για τον εντοπισμό του βάθους του υποβάθρου στην περιοχή μελέτης.

3.2 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται η εύρεση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και έμμεσα να ληφθούν πληροφορίες για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην Υδρογεωλογία, στην Τεχνική Γεωλογία στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνητών φραγμάτων, στην αρχαιομετρία κ.τ.λ. Στις μεθόδους αυτές η ποσότητα η οποία μετράται είναι η ηλεκτρική τάση V . Η ιδιότητα του εδάφους που κυρίως μας ενδιαφέρει είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης είναι οι εξής :

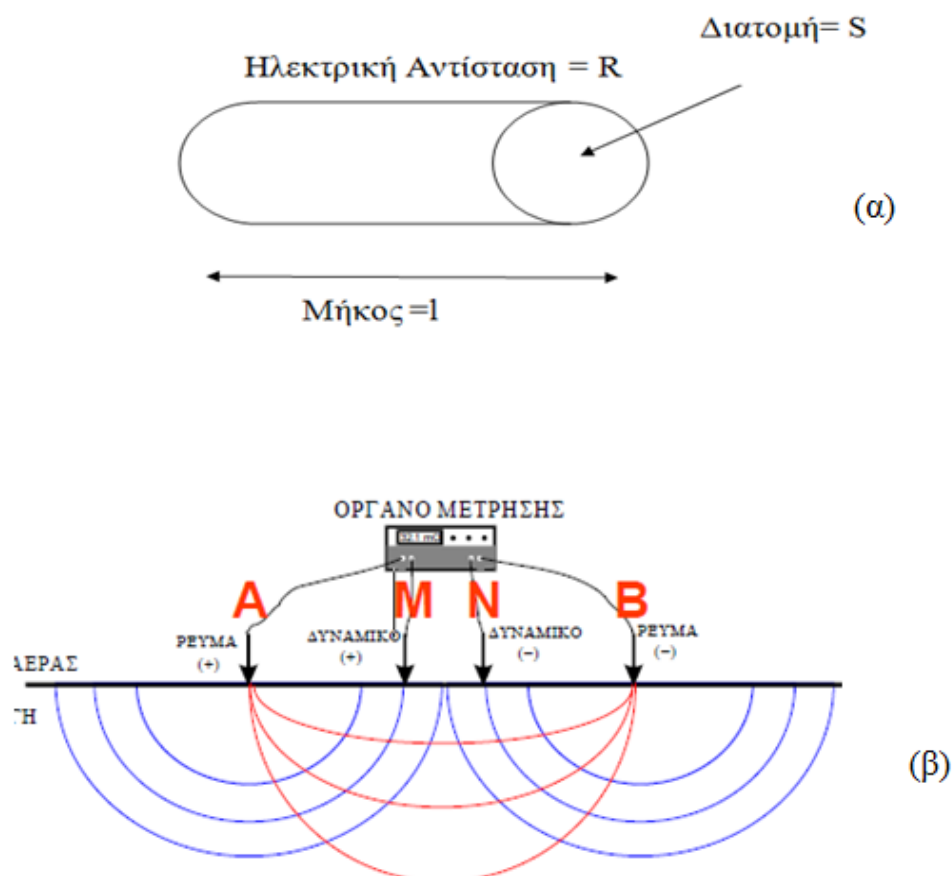
- Ειδική ηλεκτρική αντίσταση
- Επαγόμενη πόλωση
- Ισοδυναμικές γραμμές
- Φυσικό δυναμικό
- Τελλουρικά ρεύματα

3.2.1 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού είναι μέτρο του πόσο ισχυρά αντιστέκεται το υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος (Παπαζάχος, 1986). Υλικό με χαμηλή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης επιτρέπει την εύκολη διέλευση του ρεύματος. Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το $\text{ohm} \cdot \text{meter}$ και υπολογίζεται από τον τύπο $\rho = R \cdot (S/l)$ (σχήμα 26α).

Διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα έντασης , I μέσα στη γη με δυο ηλεκτροδία ρεύματος A, B και μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού , V_{MN} μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού M,N.



Σχήμα : α) Υπολογισμός ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, β) Βασική διάταξη ηλεκτροδίων στην ηλεκτρική διασκόπηση

Επειδή η γη είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής , η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι πλέον συνάρτηση όχι μόνο της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους αλλά και της γεωμετρίας της μέτρησης δηλαδή τις θέσεις των A, B, M, N. Έτσι λοιπόν εισάγεται η έννοια της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία δίνεται από τον τύπο $\rho_A = K * V/I$

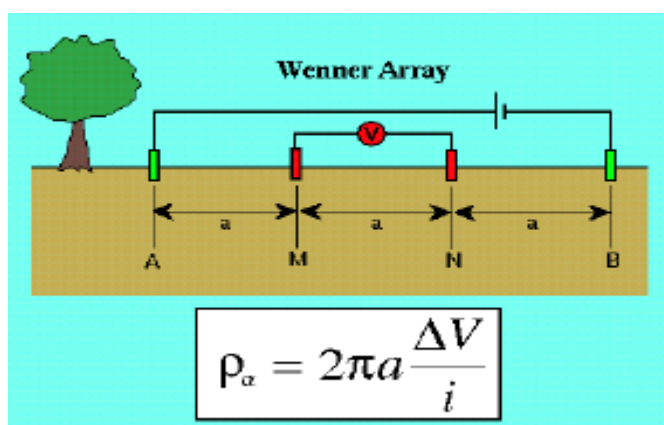
Όπου I , η ένταση του ρεύματος και V , η μετρούμενη διαφορά δυναμικού. Το K αποτελεί γεωμετρικό παράγοντα που εξαρτάται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (17)$$

Υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι για να διαταχθούν τα τέσσερα ηλεκτρόδια A,B, M, N, και ο γεωμετρικός παράγοντας K αλλάζει ανάλογα με την διάταξη. Οι πιο γνωστές διατάξεις είναι οι εξής :

✓ Διάταξη Wenner

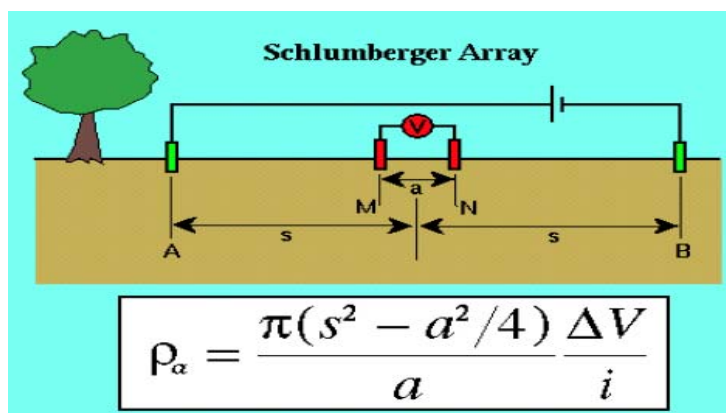
Κατά την διάταξη αυτή λαμβάνονται $AM=MN=NB= a$, δηλαδή τα ηλεκτρόδια διατάσσονται συμμετρικά σε ορισμένη γραμμή (σχήμα 27). Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή, για κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται σε σχέση με ορισμένο κέντρο με αύξηση της 'α' κατά ορισμένη απόσταση, ενώ κατά την εφαρμογή της για ηλεκτρική χαρτογράφηση, δηλαδή, για οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση η από-σταση 'α' παραμένει σταθερή και τα τέσσερα ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής, κατόπιν κατά μήκος άλλης κ.ο.κ. και η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης.



Σχήμα : Διάταξη Wenner μαζί με την σχέση για την φαινόμενη ειδική αντίσταση(http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf)

✓ Διάταξη Schlumberger

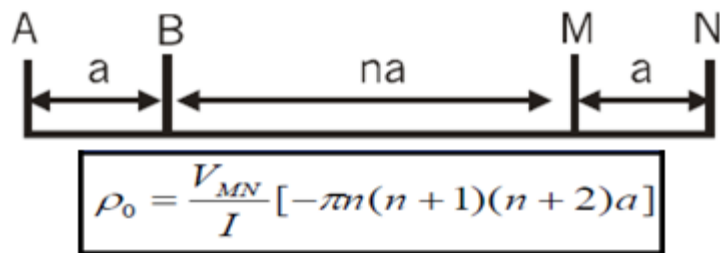
Στη διάταξη αυτή η απόσταση, $MN = 2l$, μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση, $AB = 2L$, μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ($L \gg l$) (σχήμα 28). Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger σε μια γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά σχετικά με το κέντρο της διάταξης, ενώ κατά την εφαρμογή της διάταξης αυτής για μία γεωηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται πάνω στην τομή, ενώ η απόσταση τους παραμένει σταθερή όπως και στην διάταξη Wenner (Παπαζάχος, 1986).



Σχήμα : Διάταξη Schlumberger μαζί με την σχέση για την φαινόμενη ειδική αντίσταση. (http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf)

✓ Διάταξη Διπόλου – Διπόλου

Στη διάταξη αυτή τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή απόσταση, $AB = 2l$, αλλά είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, δηλαδή απέχουν από αυτά σημαντική απόσταση $BM = n2l$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν, συνήθως, την ίδια μικρή απόσταση, $MN = 2l$ (σχήμα 29). Στην περίπτωση αυτή είναι $n \gg 1$. Οι μετρήσεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής πραγματοποιούνται με αύξηση του n κατά βήματα.

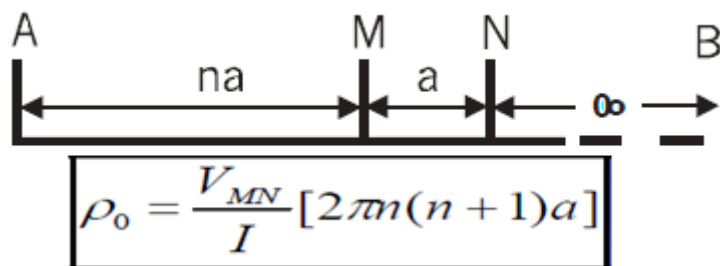


Σχήμα : Διάταξη διπόλου – διπόλου μαζί με την σχέση για την φαινόμενη ειδική αντίσταση.

(http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf)

✓ Διάταξη Πόλου – Διπόλου

Στη διάταξη πόλου – διπόλου ή αλλιώς διάταξη τριών σημείων το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα άλλα τρία ηλεκτρόδια όπως φαίνεται στο σχήμα (30).

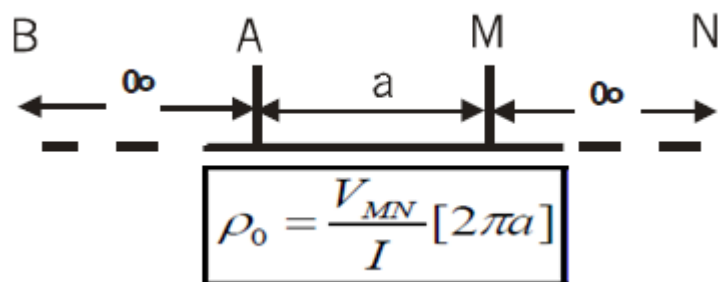


Σχήμα : Διάταξη πόλου – διπόλου μαζί με την σχέση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

(http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf)

✓ Διάταξη Πόλου – Πόλου

Στην διάταξη πόλου – πόλου το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και το ένα ηλεκτρόδιο διαφοράς δυναμικού τοποθετούνται σε μεγάλη απόσταση από τα άλλα δύο (σχήμα 31). Η διάταξη πόλου- πόλου δίνει ισχυρό σήμα, αλλά είναι χρονοβόρα στο ύπαιθρο σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις και απαιτεί μακριά καλώδια.



Σχήμα : Διάταξη πόλου – πόλου μαζί με την σχέση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.
(http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf)

Στην παρούσα εργασία , οι διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι η Schlumberger, η διπόλου – διπόλου και η πόλου – διπόλου.

3.2.2 Τρόποι μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να γίνει είτε σε μία διάσταση, είτε σε δύο είτε ακόμα και σε τρεις.

Όσον αφορά την **μονοδιάστατη διασκόπηση** έχουμε δύο τρόπους :

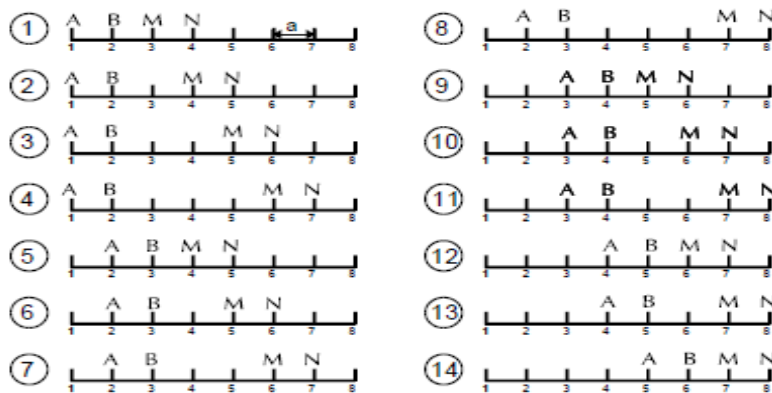
- Την **βυθοσκόπηση**, δηλαδή την μελέτη της κατακόρυφης μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Βασική αρχή στην διεξαγωγή μιας βυθοσκόπησης είναι η σταδιακή αύξηση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος A,B. Ως αποτέλεσμα αυξάνεται το βάθος διείσδυσης των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου και του βαθμού επιρροής των βαθύτερων στρωμάτων στη διαμόρφωση της φαινόμενης αντίστασης.
- Την **όδευση – οριζοντιογραφία** , δηλαδή την μελέτη της πλευρικής μεταβολής της αντίστασης. Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων μένουν σταθερές

(σταθερό βάθος διασκόπησης) και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα .

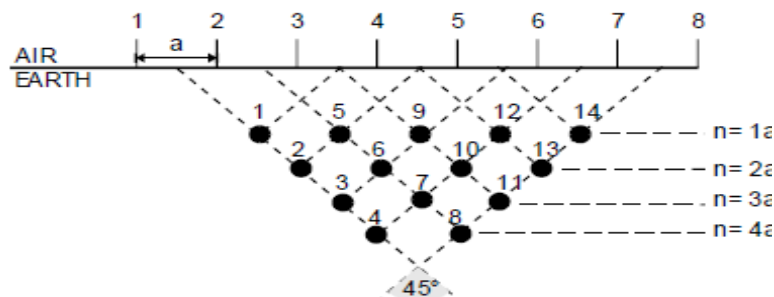
Η **διδιάστατη διασκόπηση** (σχήμα 32) είναι ο συνδυασμός των δύο τρόπων της μονοδιάστατης, δηλαδή, είναι ο συνδυασμός βυθοσκόπησης και όδευσης με σκοπό την καταγραφή τόσο της πλευρικής όσο και της εις βάθος μεταβολής της γεωηλεκτρικής αντίστασης.

Η αρχική ερμηνεία γίνεται με ψευδοτομή (σχήμα 33). Ψευδοτομή είναι η κατασκευή ενός χάρτη με την χρήση των φαινόμενων αντιστάσεων.

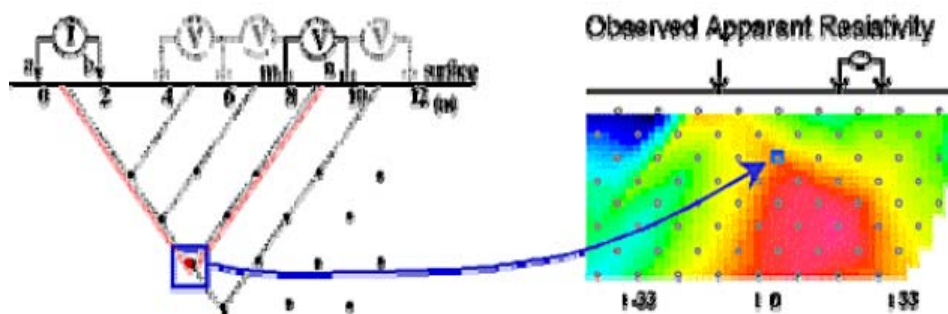
(a)



(b)



Σχήμα : Παράδειγμα διδιάστατης διασκόπησης και ψευδοτομής με διάταξη διπόλου-διπόλου
(http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC4_NEW.pdf)



Σχήμα : Παράδειγμα ψευδοτομής

(http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC4_NEW.pdf)

3.2.3 Ηλεκτρική τομογραφία

Οι κλασικές διδιάστατες μετρήσεις παρουσίαζαν δύο βασικά προβλήματα. Αρχικά ήταν πολύ αργή και επίπονη η λήψη των μετρήσεων στο ύπαιθρο, και από την άλλη υπήρχε δυσκολία στην ερμηνεία καθώς η ψευδοτομή δίνει μία παραμορφωμένη εικόνα της πραγματικής γεωηλεκτρικής αντίστασης.

Με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας δημιουργούνται όργανα μέτρησης που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη λήψη των μετρήσεων. Εξελίσσονται οι αυτοματοποιημένες τεχνικές ερμηνείας με αποτέλεσμα να υπάρχει πλέον ακριβής απεικόνιση των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Ο συνδυασμός αυτών των δύο εξελίξεων χαρακτηρίζεται ως «**ηλεκτρική τομογραφία**».

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ότι λαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων σε αντίθεση με άλλες τεχνικές. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και η ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι πολύ δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των καλωδίων. Γι αυτό χρησιμοποιούνται πλέον συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών με πολυκάναλα καλώδια. (σχήμα 34)



Σχήμα : Πολυκάναλο καλώδιο για λήψη μετρήσεων στην ηλεκτρική τομογραφία

(<http://www.scribd.com/doc/50896257/25/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%A4%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1>)

3.2.4 Εξοπλισμός μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας

Η εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το όργανο SYSCAL (σχήμα 35) της IRIS INSTRUMENTS. Πρόκειται για ένα όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχεδιασμένο να λειτουργεί με συνεχές ρεύμα. Το συγκεκριμένο όργανο έχει μέγιστη τάση πηγής 800 V και επιτυγχάνει την δημιουργία ρεύματος με ένταση γύρω στα 2000 mA.

Το όργανο μέτρησης χρησιμοποιεί τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές μπαταρίες (σχήμα 35)

Το όργανο μέτρησης έχει εσωτερικό πολυπλέκτη 48 ηλεκτροδίων, ενώ έχει την δυνατότητα να μετράει ταυτόχρονα μέχρι και 10 διαφορές δυναμικού, γεγονός το οποίο επιτρέπει την λήψη αρκετά μεγάλου αριθμού μετρήσεων όπως προαναφέρθηκε.

Επίσης για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιούνται κατάλληλα πολυκάναλα καλώδια και ειδικά ηλεκτρόδια ατσαλιού.



Σχήμα : Όργανο λήψης ηλεκτρικών μετρήσεων SYSCAL μαζί με τον εξοπλισμό του

(<http://www.scribd.com/doc/50896257/25/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%A4%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1>)

4 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων

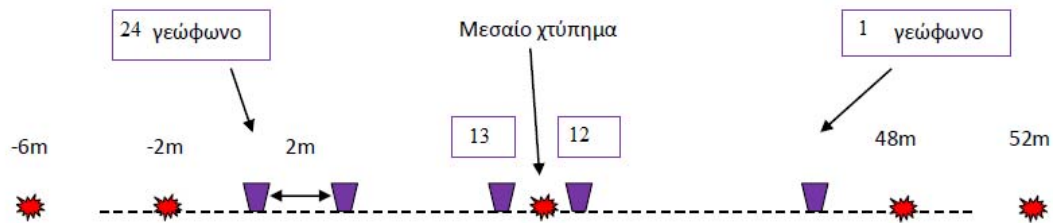
Η υπό μελέτη περιοχή επιλέχθηκε με το δεδομένο ότι είναι γνωστά τα αποτελέσματα των δύο γεωτρήσεων που έγιναν στην περιοχή. Σκοπός της διπλωματικής ήταν να προσδιοριστούν οι φυσικές ιδιότητες των σχηματισμών κάτω από την επιφάνεια (ταχύτητα σεισμικών κυμάτων, ειδική ηλεκτρική αντίσταση) μέσω της γεωφυσικής έρευνας σε περιοχή με γνωστή στρωματογραφική δομή (λόγω των γεωτρήσεων). Απώτερος σκοπός είναι να γίνει μία συγκριτική ερμηνεία γεωφυσικής και γεωτεχνικής έρευνας.

4.1 Σεισμική έρευνα

Στην υπό μελέτη περιοχή αρχικά πραγματοποιήθηκε η σεισμική έρευνα με την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης.. Για την καταγραφή των μετρήσεων

χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός GEOMETRICS και 24 γεώφωνα. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. (2 μέτρα). Το συνολικό ανάπτυγμα των γεωφώνων είχε μήκος 46 μέτρα (σχήμα 36).

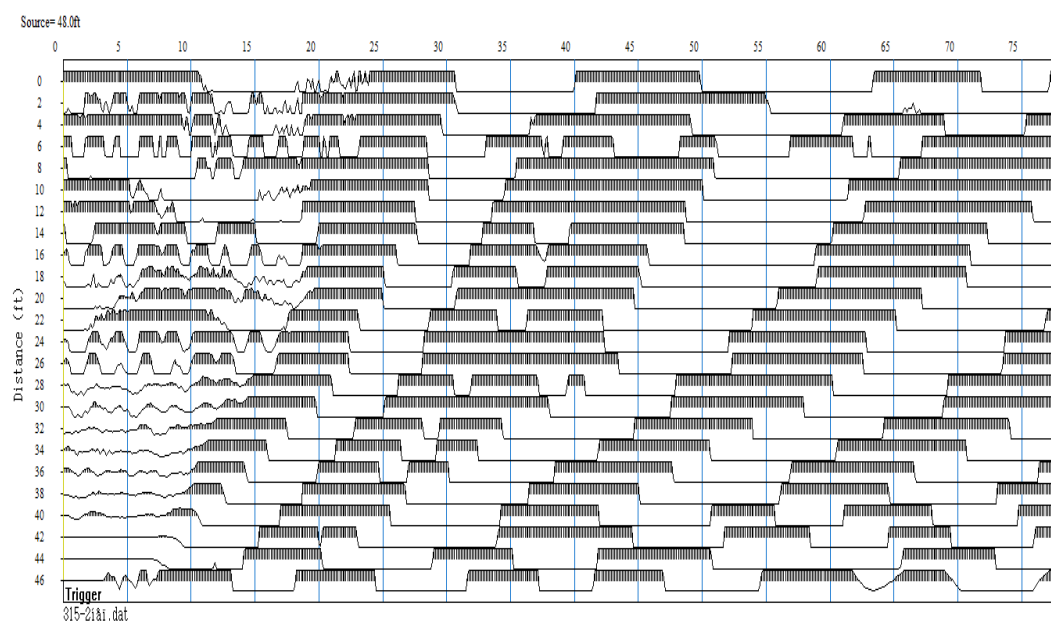
Πραγματοποιήθηκαν 5 διαφορετικές εκρήξεις για την παραγωγή επιμήκων σεισμικών κυμάτων στα -6 m, -2m, 23m, 48m και 52m όπως φαίνεται και στο σχήμα 31.



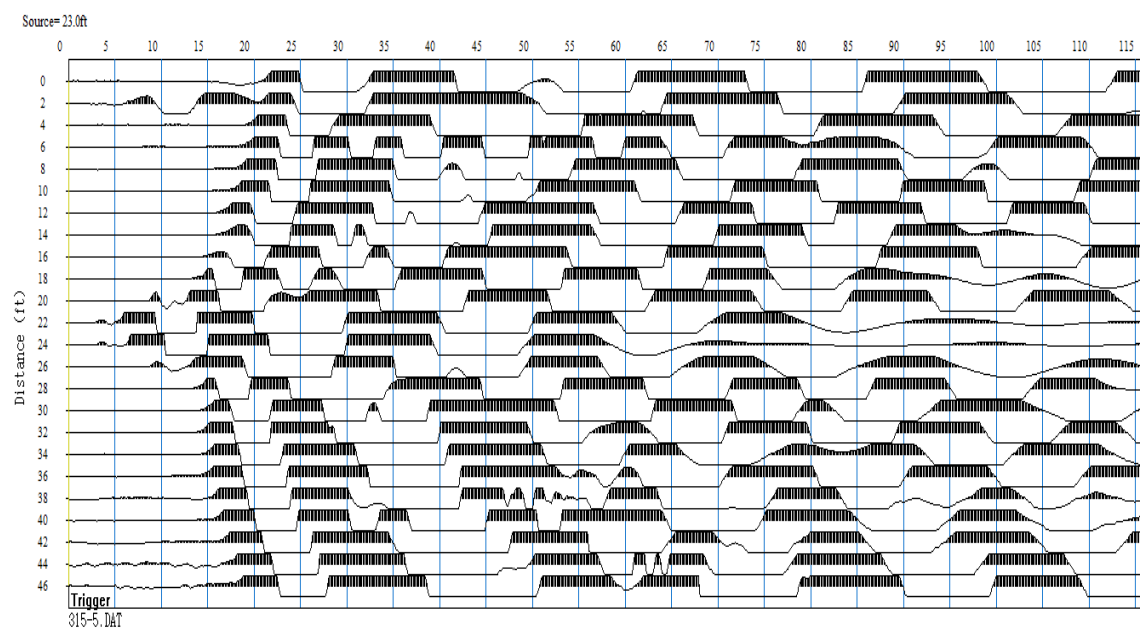
Σχήμα : Σχέδιο του προφίλ των σεισμικών μετρήσεων

Ως μηχανισμός έκρηξης χρησιμοποιήθηκε ένα σφυρί (βαριοπούλα) που ήταν συνδεδεμένο με το μηχανισμό triggering (πιεζοηλεκτρικού τύπου) για τον καθορισμό του σημείου μηδέν στην συνδυασμένη καταγραφή του χρόνου στο καταγραφικό των σεισμικών.

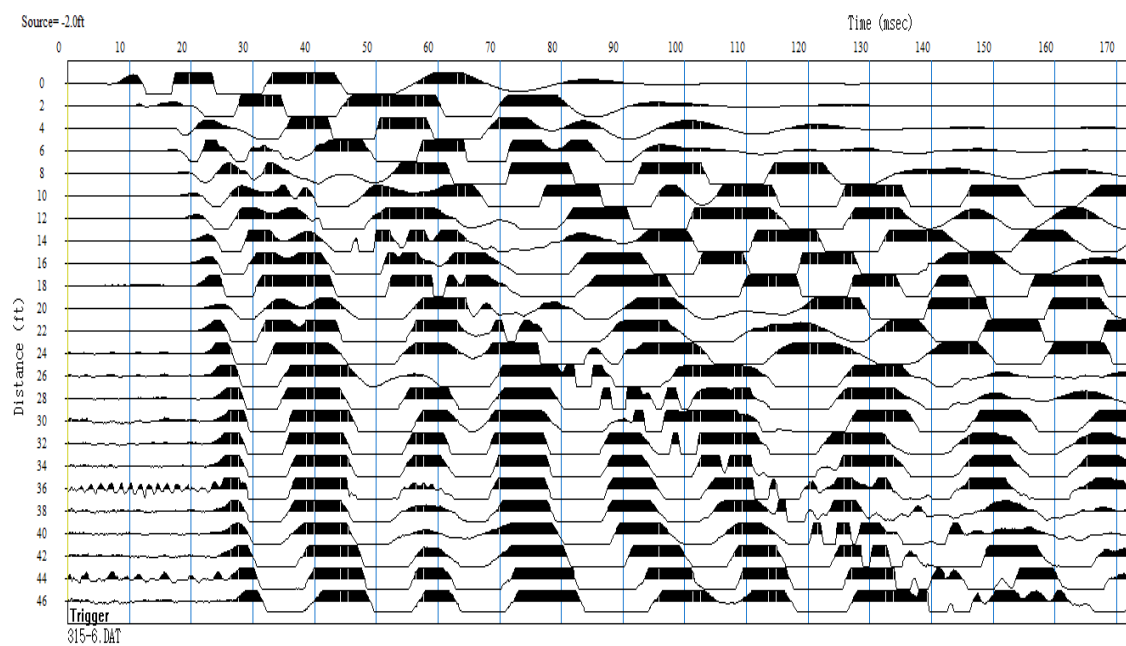
Παρακάτω παραθέτουμε τα δεδομένα των μετρήσεων αυτών :



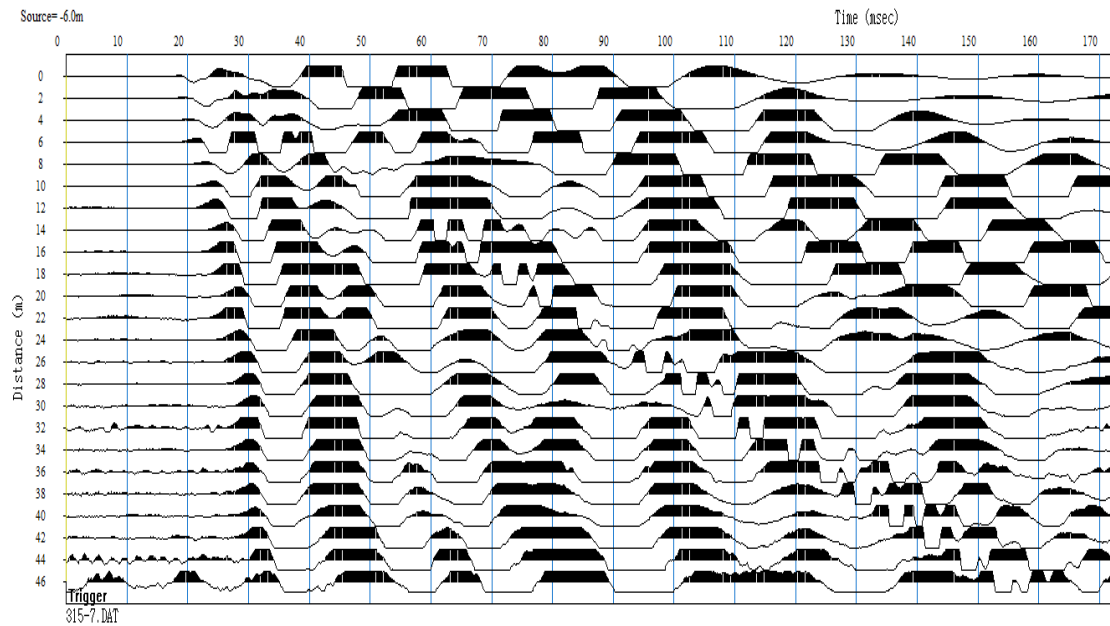
Σχήμα : Πρώτο χτύπημα με πηγή στα 48 μέτρα



Σχήμα : Δεύτερο χτύπημα με πηγή στα 23 μέτρα



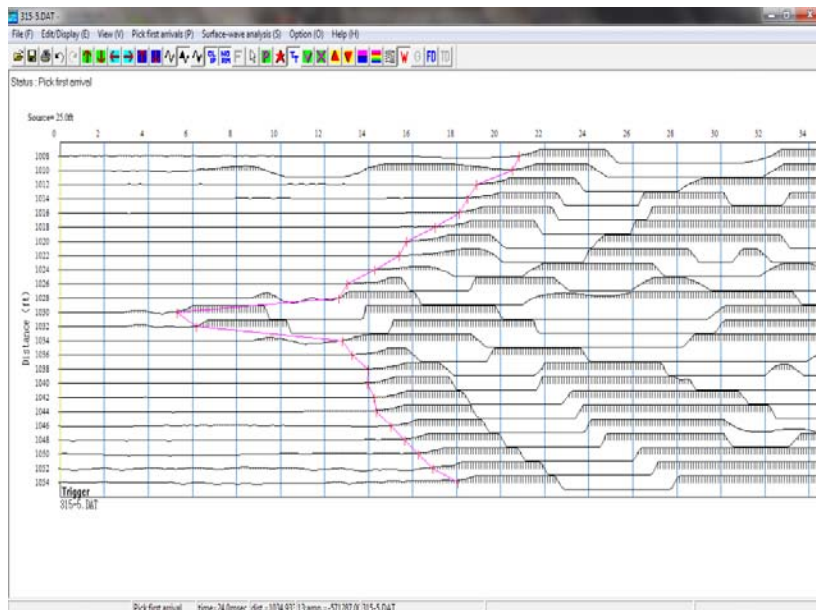
Σχήμα : Τρίτο χτύπημα με πηγή στα -2 μέτρα



Σχήμα : Τέταρτο χτύπημα με πηγή στα -6 μέτρα

Επεξεργασία σεισμικών μετρήσεων

Η επεξεργασία των σεισμικών μετρήσεων (όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή) έγινε με το λογισμικό SeisImager 2D. Το λογισμικό αυτό αποτελείται από επιμέρους προγράμματα. Αρχικά ανοίγουμε το πρόγραμμα «pickwin» στο οποίο σημειώνουμε τις αφίξεις των πρώτων κυμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα (41).



Σχήμα : Σημείωση πρώτων αφίξεων

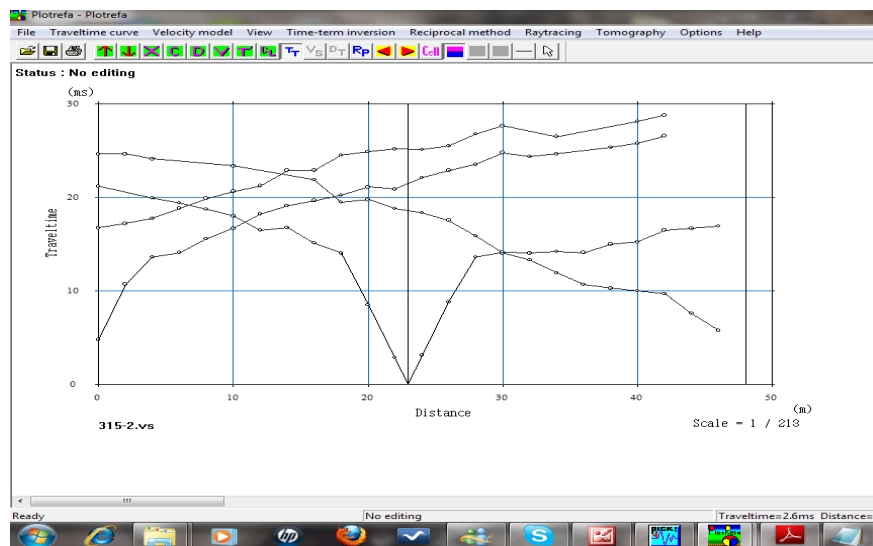
Κάνουμε την διαδικασία αυτή και για τα πέντε σεν των μετρήσεων. Η τελική αξιολόγηση των χρόνων άφιξης περιέλαβε τέσσερις καταγραφές αφού η μία από αυτές (πηγή 52 μέτρα) ήταν πολύ κακής ποιότητας σε βαθμό που δεν έγινε δυνατή η αναγνώριση των πρώτων αφίξεων. Οι χρόνοι άφιξης που μετρήθηκαν παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Γεώφωνα	Θέση (m)	Πηγή 48m	Πηγή 23m	Πηγή -2m	Πηγή -6m
1	46	5.79	16.93		
2	44	7.63	16.66		
3	42	9.72	16.50	26.57	28.75
4	40	10.00	15.25	25.75	28.13
5	38	10.30	15.00	25.32	
6	36	10.71	14.13		
7	34	11.94	14.25	24.62	26.50
8	32	13.33	14.05	24.35	
9	30	14.05	14.16	24.75	27.63
10	28	15.88	13.62	23.50	26.75
11	26	17.56	8.82	22.88	25.50
12	24	18.38	3.16	22.13	25.13
13	22	18.79	2.89	20.88	25.17
14	20	19.75	8.55	21.13	24.88
15	18	19.50	14.05	20.25	2.45

16	16	21.88	15.14	19.67	22.88
17	14		16.78	19.12	22.88
18	12		16.50	18.25	21.25
19	10	23.35	18.03	16.66	20.63
20	8		18.73	15.57	19.88
21	6		19.39	14.13	18.85
22	4	24.13	19.94	13.62	17.75
23	2	24.63		10.73	17.21
24	0	24.63	21.19	4.80	16.75

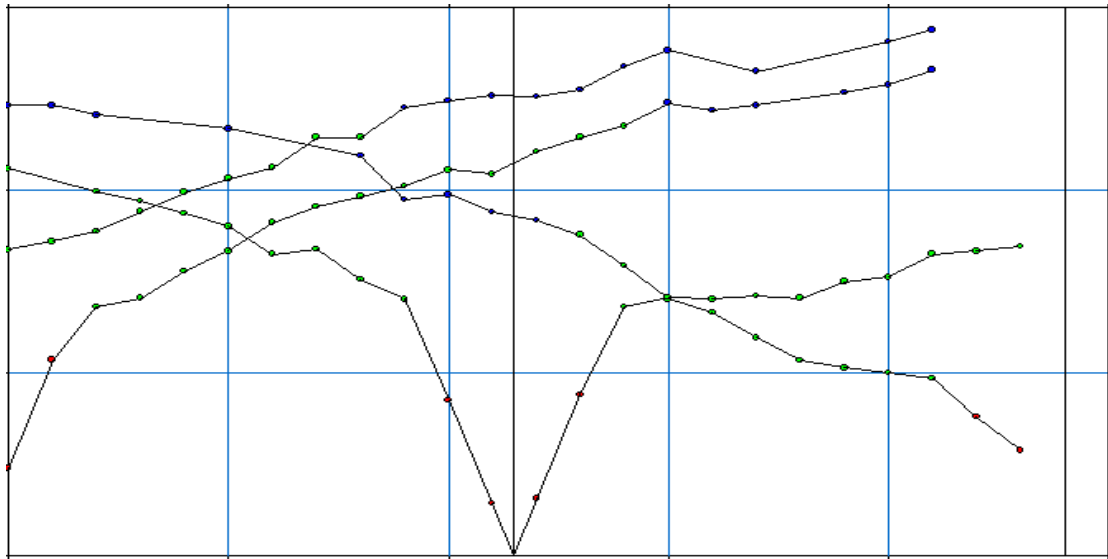
Πίνακας : Χρόνοι πρώτων αφίξεων.

Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα « plotrefa» στο οποίο χαρτογραφούμε τις καμπύλες χρόνων διαδρομής της κάθε μέτρησης. Προσθέτουμε τις καμπύλες και των τεσσάρων σετ μετρήσεων έτσι ώστε να είναι όλες μαζί στο ίδιο διάγραμμα όπως φαίνεται και στο σχήμα (42).



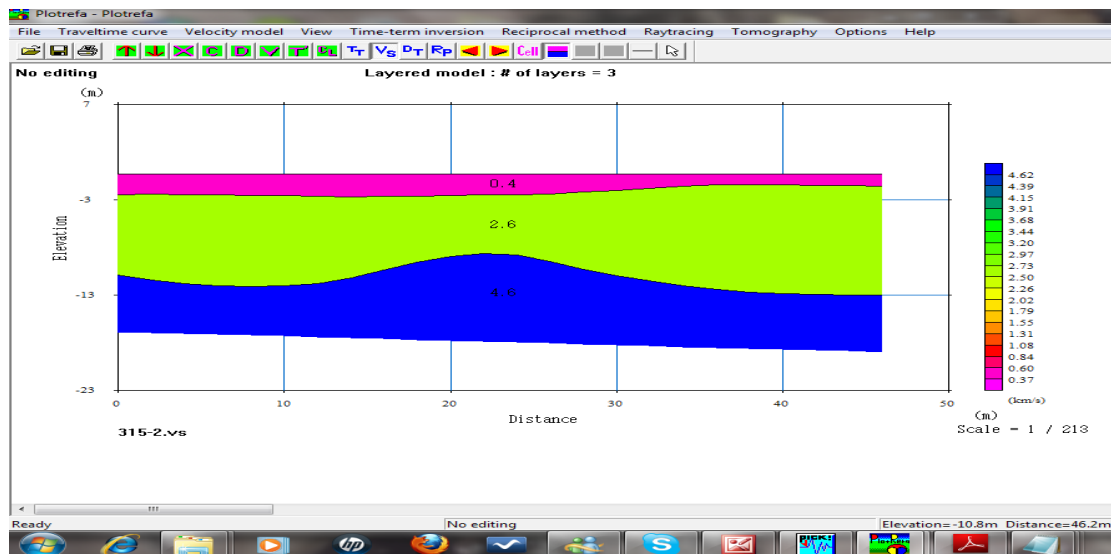
Σχήμα : Καμπύλες χρόνων διαδρομής στο plotrefa

Στην συνέχεια επιλέγουμε τα σημεία στις καμπύλες που διακρίνουμε ότι υπάρχει αλλαγή στρώματος(σχήμα 43), για να μπορέσουμε μετά να πάρουμε τη δισδιάστατη ερμηνεία της δομής για την περιοχή μελέτης. Τα διαφορετικά στρώματα διακρίνονται από το διαφορετικό χρώμα των κύκλων που έχουν τοποθετηθεί.



Σχήμα : Σημείωση στρωμάτων στις καμπύλες

Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας παράγει το προτεινόμενο γεωφυσικό μοντέλο δομής ταχυτήτων και παχών των στρωμάτων της γεωλογικής δομής (σχήμα 44).



Σχήμα : Τελικό μοντέλο επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων

Από τα στοιχεία της γεώτρησης Γ2 που είναι και η πλησιέστερη στην σεισμική τομή το εδαφικό κάλυμμα που εμφανίζεται με ταχύτητα 0.4 km/sec αντιστοιχεί σε αμμώδη άργιλο. Το βαθύτερο στρώμα που εμφανίζει ταχύτητα 2.6 km/sec στην γεώτρηση περιγράφεται ως εναλλαγές ιλυώδους-χαλικώδους άμμου, αργίλου και αμμώδους

ιλύος. Διαπιστώνεται πολύ καλή ταύτιση στον υπολογισμό του πάχους του στρώματος που είναι περί τα 10 μέτρα ενώ στην γεώτρηση στο τέλος ο αποσαθρωμένος σχιστόλιθος και ο γνεύσιος συναντάται στα 12.2μ περίπου.

Στα 12 μέτρα εντοπίζεται ο σχηματισμός του υποβάθρου που η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων υπολογίζεται σε 4.6 km/sec.

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα που υπολογίζεται για το στρώμα των ιζημάτων είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τη σύστασή τους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στον πίνακα 3 με βάση βιβλιογραφικές αναφορές η ταχύτητα των 2.5 km/sec αντιστοιχεί σε σχηματισμούς ψαμμίτη ή ασβεστόλιθου. Η μεγάλη ταχύτητα σχετίζεται όμως με τον μεγάλο αριθμό κρούσεων στη Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης (SPT) που στα στρώματα αυτά είναι 46 και 63 που σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 1 τον κατατάσσει σε αρκετά πυκνό σχηματισμό γεγονός που δικαιολογεί την μεγάλη ταχύτητα.

4.2 Ηλεκτρική έρευνα

Για την πραγματοποίηση της ηλεκτρικής διασκόπησης χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL (σχήμα 35 και 45) της IRIS INSTRUMENTS. Για το όργανο μέτρησης χρησιμοποιήσαμε τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές μπαταρίες. Χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια ατσαλιού τα οποία τοποθετήθηκαν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. (3 μέτρα). Επίσης χρησιμοποιήθηκε ειδικό πολυκάναλο καλώδιο με το οποίο συνδέαμε το όργανο μέτρησης με τα ηλεκτρόδια. Έτσι δημιουργήθηκε ένα προφίλ 144 μέτρων.



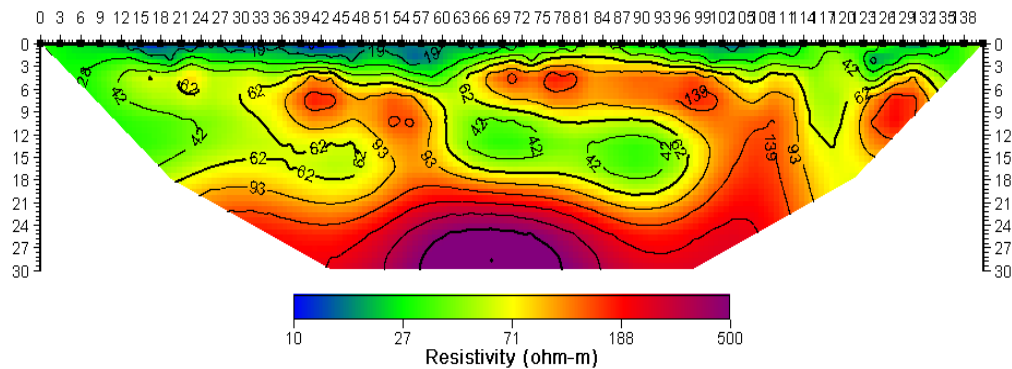
Σχήμα : Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήσαμε στο ύπαιθρο



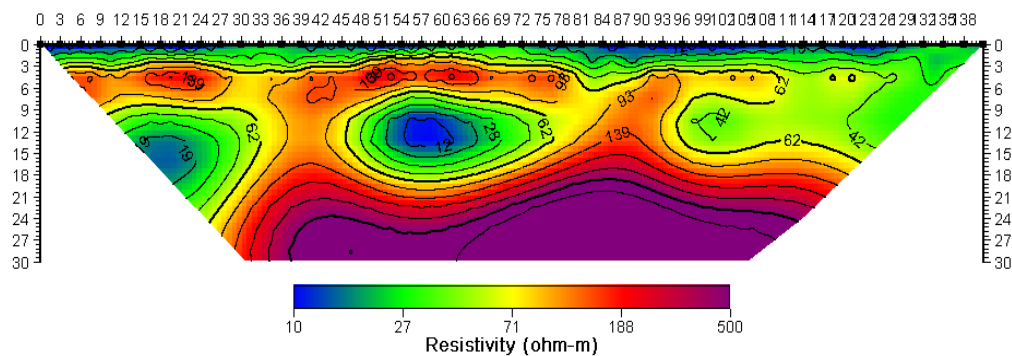
Σχήμα : Φωτογραφία κατά την διάρκεια της έρευνας

Αφού έγινε η λήψη των δεδομένων, ακολούθησε η επεξεργασία τους με το πρόγραμμα DC2DPRO. Αφού εισάγουμε τα δεδομένα στο πρόγραμμα, γίνεται

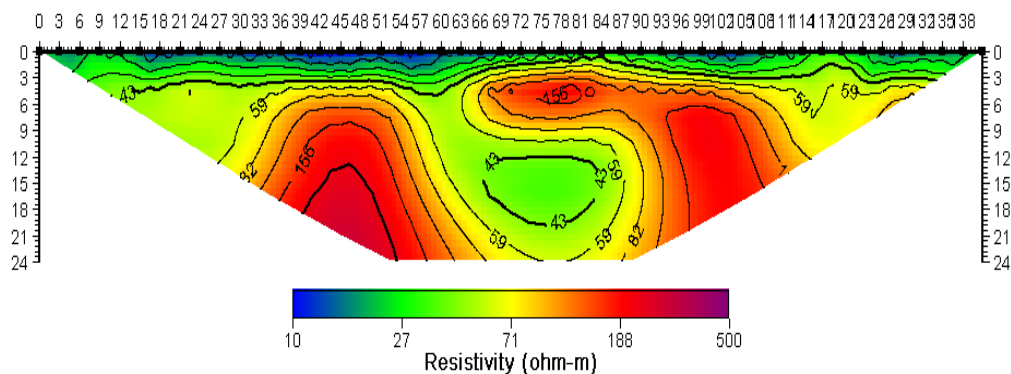
αντιστροφή μετρήσεων έτσι ώστε να μειωθεί τα σφάλμα και στη συνέχεια παίρνουμε ως αποτέλεσμα μία δισδιάστατη τομή. Από κάθε διάταξη που χρησιμοποιήσαμε παίρνουμε μία τομή. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των δεδομένων της ηλεκτρικής (τομογραφίας) διασκόπησης φαίνονται στα σχήματα (47), (48) και (49).



Σχήμα : Αποτέλεσμα διάταξης διπόλου – διπόλου

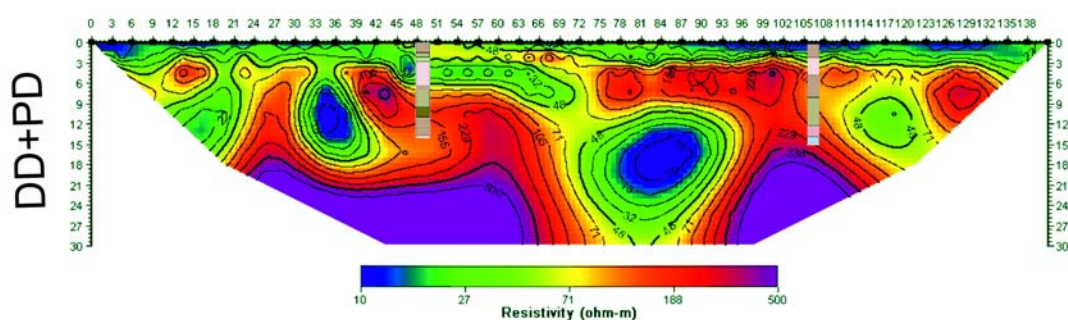


Σχήμα : Αποτέλεσμα διάταξης πόλου – διπόλου.



Σχήμα : Αποτέλεσμα διάταξης Schlumberger

Με βάση την γεωλογία της περιοχής, οι διατάξεις διπόλου- διπόλου(DD) και πόλου-διπόλου(PD) είναι αυτές οι οποίες αντιπροσωπεύουν καλύτερα την περιοχή. Έτσι, γίνεται κοινή αντιστροφή των δύο ώστε να μπορέσει να γίνει καλύτερη ερμηνεία.. Για την ερμηνεία, τοποθετούμε στο ηλεκτρικό προφίλ τις στήλες των γεωτρήσεων (σχήμα 50) για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τους σχηματισμούς με τις αντιστάσεις που εμφανίζουν.



Σχήμα : Προφίλ από συνδυασμό διατάξεων DD και PD , με ενσωματωμένες τις γεωτρήσεις

Παρατηρούμε ότι μέχρι το βάθος των 2,7 έως 3 μέτρων διακρίνονται αντιστάσεις που κυμαίνονται από 10 έως 28 Ωm , οι οποίες αντιστοιχούν σύμφωνα με τις γεωτρήσεις στο εδαφικό κάλυμμα, δηλαδή στην συγκεκριμένη περίπτωση σε αμμώδη άργιλο. Το βαθύτερο στρώμα, μέχρι το βάθος των 12 μέτρων, εμφανίζει αντιστάσεις από 90 έως 150 Ωm και αντιστοιχούν σε εναλλαγές ιλυώδους – χαλκώδους άμμου, αργίλου και αμμώδους ιλύος. Από το βάθος των 12 μέτρων και άνω, αρχίζει να συναντάται ο σχηματισμός του υποβάθρου, που αντιστοιχεί σε γνεύσιο, για αυτό και παρατηρούνται αντιστάσεις που κυμαίνονται από 300 έως 1000 Ωm .

5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Πραγματοποιώντας συγκριτική μελέτη των δύο μεθόδων παρατηρείται ότι υπάρχει λογική αντιστοιχία στα αποτελέσματα της κάθε μίας. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στον πίνακα (5) το εδαφικό κάλυμμα αντιπροσωπεύεται από ταχύτητα επιμήκων κυμάτων 0,4 km/sec και ηλεκτρική αντίσταση που κυμαίνεται από 10 έως 28 Ωm , δηλαδή τιμές οι οποίες είναι σύμφωνες με την σύσταση του, η οποία είναι αμμώδης άργιλος. Οι βαθύτεροι σχηματισμοί, μέχρι το βάθος των 12 μέτρων, είναι ένα στρώμα ιζημάτων που αποτελείται από εναλλαγές ιλυώδους – χαλκώδους άμμου, αργίλου και αμμώδους ιλύος όπως προκύπτει από τις στρωματογραφικές στήλες των γεωτρήσεων Γ1 και Γ2. Το στρώμα αυτό εμφανίζει αντιστάσεις που κυμαίνονται από 90 έως 150 Ωm . Η αντίσταση είναι σχετικά μεγαλύτερη από την αναμενόμενη με βάση την σύσταση, γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί από την μεγάλη συνεκτικότητα του σχηματισμού. Στο τελευταίο συνηγορεί και η ταχύτητα που εμφανίζει το στρώμα αυτό, 2,6 km/sec, που είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τον πίνακα (3) όπου υπάρχουν χαρακτηριστικές ταχύτητες. Η μεγάλη αυτή ταχύτητα σχετίζεται με το μεγάλο αριθμό κρούσεων από την δοκιμή πρότυπης διείδυσης (SPT). Για το στρώμα αυτό των ιζημάτων, ο αριθμός αυτός είναι από 46 έως 63, όπου σύμφωνα με στοιχεία του πίνακα (1) τον κατατάσσει σε πολύ πυκνό σχηματισμό, γεγονός που δικαιολογεί την μεγάλη ταχύτητα. Τέλος, στα 12 περίπου μέτρα εντοπίζεται ο σχηματισμός του υποβάθρου, όπου η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων φτάνει τα 4,6 km/sec ενώ η ηλεκτρική αντίσταση κυμαίνεται από 300 έως 1000 Ωm .

Επιπλέον, στο μοντέλο των σεισμικών κυμάτων (σχήμα 44) παρατηρείται κάποια αναθόλωση του σχηματισμού του υποβάθρου περίπου στα 20 -25 μέτρα του προφίλ. Η ίδια αναθόλωση παρατηρείται και στο μοντέλο της ηλεκτρικής τομογραφίας (σχήμα 50) περίπου στο εύρος των 80 έως 90 μέτρων. Πρόκειται για την ίδια αναθόλωση, καθώς η διαφορά στην απόσταση έγκειται στο γεγονός ότι το προφίλ των σεισμικών σε έκταση αποτελεί ένα μέρος του προφίλ της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Τελικά τα αποτελέσματα των δύο γεωφυσικών μεθόδων προσέγγισαν σε πολύ καλό βαθμό τους σχηματισμούς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και έφεραν κοινά αποτελέσματα. Σαν συνέπεια, μπορούμε να προτείνουμε την κοινή εφαρμογή των δύο μεθόδων όπου είναι δυνατόν για τον καλύτερο έλεγχο των συμπερασμάτων σχετικά με την γεωφυσική δομή.

Παρακάτω, παρατίθεται ένας πίνακας ο οποίος δείχνει συγκεντρωτικά τους γεωλογικούς σχηματισμούς με τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων που εμφανίζουν, τις ηλεκτρικές αντιστάσεις καθώς και τα αποτελέσματα της δοκιμής πρότυπης διείσδυσης (SPT) που έγινε κατά την διάρκεια της γεωτεχνικής μελέτης που έλαβε χώρα στην περιοχή.

Πίνακας : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στρώματα	Γεωλογικοί σχηματισμοί	Βάθος (m)	v (km/sec)	R ($\Omega \cdot m$)	SPT
1 ^ο στρώμα	εδαφικό κάλυμμα (αμμώδης άργιλος)	0 έως 2,7	0,4 km/sec	10 έως 28 Ωm	37
2 ^ο στρώμα	εναλλαγές ιλυώδους-χαλικώδους άμμου, αργίλου και αμμώδους ιλύος	3 έως 12	2,6 km/sec	90 έως 150 Ωm	46 έως 63
3 ^ο στρώμα	σχηματισμός του υποβάθρου(γενεύσιος)	12 έως κάτω	4,6 km/sec	300 έως 1000 Ωm	

6 Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου, Παναγιωτόπουλου Δημήτριο και Βαργεμέζη Γεώργιο, οι οποίοι με βοήθησαν πολύ στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και τους Σταμπολίδη Αλέκο και Φίκο Ηλία οι οποίοι με βοήθησαν στην λήψη των μετρήσεων στο ύπαιθρο.

7 Βιβλιογραφία :

- Παπαζάχος, Β.Κ. (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Εεωφυσική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 321
- Μουντράκης, Δ.Μ. (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 369
- Pavlovic, V.D. and Vilickovic, Z.S. (1998). Measurement of the seismic waves propagation velocity in the real medium, FACTA UNIVERSITATIS, Vol.1, 5, 63-73
- Loke, M.H. (2001). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies- A practical guide to 2-D and 3-D surveys, (obtained from www.geoelectrical.com)