

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Χαρακτηρισμός βιογενούς ασβεστόλιθου περιοχής Αλφά Ρεθύμνου με  
επιτόπιες και εργαστηριακές μετρήσεις

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Ν. Φέγγος  
Μάριος Ι. Κουβελάς

Εξεταστική Επιτροπή

Αντώνιος Βαφείδης	Καθηγητής (συνεπιβλέπων)
Ζαχαρίας Αγιουτάντης	Καθηγητής (συνεπιβλέπων)
Κωνσταντίνος Προβιδάκης	Αν. Καθηγητής

Χανιά  
Οκτώβριος, 2006

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή επιτόπιων και εργαστηριακών μετρήσεων για το χαρακτηρισμό βιοκλαστικού ασβεστόλιθου της περιοχής Αλφά Ρεθύμνου.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε σεισμική διασκόπηση στο χωριό Αλφά Ρεθύμνου για την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων καθώς και εργαστηριακές μέτρησεις της ταχύτητας διάδοσης με υπέρηχους. Στη συνέχεια οι ταχύτητες συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Τέλος πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό του υπό εξέταση πετρώματος και τον προσδιορισμό των μηχανικών του ιδιοτήτων.

## Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής οφείλουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στους καθηγητές κ. Αντώνιο Βαφείδη και κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη για την καθοδήγηση τους και τις γνώσεις που μας μετέδωσαν καθ' όλη την διάρκειά της.

Επίσης θέλουμε να ευχαριστήσουμε τους κ. Βασίλειο Περδικάτση Καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη Αν. Καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου Επίκουρο Καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς και τους επιστημονικούς συνεργάτες κ. Εμμανουήλ Στειακάκη, κ. Ελένη Χαμηλάκη, κ. Διονύση Βαβαδάκη, κ. Αντώνιο Σκουνάκη, και την μεταπτυχιακή φοιτήτρια κ. Ελένη Χατζήνα, για την βοήθειά τους στη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών.

Δεν μπορούμε να ξεχάσουμε την βοήθεια που μας προσέφεραν ο κ. Μαυριγιαννάκης Στυλιανός και κ. Ανδρονικίδης Νικόλαος με την καθημερινή συμπαράσταση και τις χρήσιμες συμβουλές τους. Επίσης θα πρέπει να ευχαριστήσουμε τον κ. Διογένη Σαρρή ιδιοκτήτη του λατομείου Αλφά για την βοήθεια στην διεξαγωγή των σεισμικών μετρήσεων, τα δείγματα και τις πληροφορίες που μας προσέφερε.

Τέλος θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειές μας και τους φίλους μας για την αμέριστη βοήθεια και ψυχολογική συμπαράσταση που μας προσέφεραν.

*Αφιερώνεται  
στις οικογένειες μας.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	3
2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ .....	3
2.1.1 Θεωρητικές παραδοχές .....	3
2.1.2 Τάση.....	4
2.1.3 Παραμόρφωση .....	5
2.1.4 Ο νόμος του Hooke.....	7
2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	10
2.2.1 Τύποι σεισμικών κυμάτων .....	10
2.2.1.1 Κύματα χώρου .....	11
2.2.1.2 Επιφανειακά κύματα.....	13
2.2.2 Διάδοση των σεισμικών κυμάτων.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	17
3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΩΡΥΧΕΙΑ .....	17
3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ .....	20
3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ ΣΕ ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΥΓΡΑΣΙΑ ..	23
3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ P ΚΑΙ S ΚΥΜΑΤΩΝ .....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	32
4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	32
4.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ.....	36
4.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	36
4.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	41
4.4.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης .....	41
4.4.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων από την δοκιμή θλίψης .....	45
4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ XRD .....	49
4.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΛΕΠΤΩΝ ΤΟΜΩΝ .....	51
4.7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ .....	53

4.7.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	53
4.7.2 Πειραματική διαδικασία .....	54
4.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ .....	57
4.9 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ .....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ .....	61
5.1 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ.....	61
5.1.1 Πειραματική διάταξη .....	61
5.1.2 Σεισμική πηγή, γεώφωνα και καταγραφικό όργανο .....	66
5.1.2.1 Καταγραφικό όργανο .....	66
5.1.2.2 Σεισμική πηγή .....	68
5.1.2.3 Γεώφωνα .....	68
5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	79
6.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ .....	79
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ .....	80
6.2.1 PUNDIT .....	80
6.2.2 PROCEQ.....	82
6.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	83
6.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	96
7.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	96
7.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις πειραματικές και in-situ μετρήσεις....	96
7.1.2 Αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων για τις ιδιότητες των υπό εξέταση πετρωμάτων .....	97
7.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	98
7.2.1 Σύγκριση πειραματικών και in-situ αποτελεσμάτων .....	98
7.2.2 Σύγκριση ταχυτήτων των πετρωμάτων των δυο διαζωμάτων .....	99
7.2.3 Εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson).....	100
7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	104

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	122

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν και οι γεωφυσικές διασκοπήσεις αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια και χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία σε πολλές ερευνητικές διαδικασίες αξίζει να σημειωθεί ότι δεν πρόκειται για νέα επιστήμη. Οι ρίζες τους βρίσκονται το δέκατο έβδομο μ.Χ. αιώνα και ορισμένοι κλάδοι ακόμα και στην αρχαιότητα (Βαφείδης, 1993).

Οι σεισμικές διασκοπήσεις αλλά και γενικότερα η επιστήμη της γεωφυσικής έχουν βοηθήσει τα μέγιστα στην ανάπτυξη μεταλλείων, στην ανίχνευση νέων κοιτασμάτων αλλά και στην βιομηχανία πετρελαίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 1972 στις Η.Π.Α. το 90% των δαπανών για γεωφυσικές διασκοπήσεις (περίπου 600 εκ. δολάρια) αντιστοιχούσαν σε χερσαίες και θαλάσσιες σεισμικές διασκοπήσεις (Geophysics, 1972) (Πηγή: Βαφείδης, 1993). Η εφαρμογή τους μειώνει αισθητά τον αριθμό των ερευνητικών γεωτρήσεων.

Η συσχέτιση των επιτόπιων (in-situ) και εργαστηριακών μετρήσεων θα μπορούσε να οδηγήσει σε διασκοπήσεις αυξημένης ακρίβειας ως προς τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η χρήση ερευνητικών γεωτρήσεων.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση εργαστηριακών και in-situ μετρήσεων της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών και ηχητικών κυμάτων σε πετρώματα. Από τις μετρούμενες ταχύτητες υπάρχει η δυνατότητα εκτίμησης των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων οι οποίες συχνά αποκλίνουν από τις εργαστηριακά προσδιοριζόμενες.

Οι μετρούμενες ταχύτητες μπορεί να επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες όπως η ύπαρξη ασυνεχειών, η περιεχόμενη υγρασία και κατ'επέκταση το πορώδες και η διαπερατότητα. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια να ερευνηθεί η επίδραση των παραπάνω παραγόντων στη ταχύτητα διάδοσης σεισμικών και ηχητικών κυμάτων στα προς μελέτη πετρώματα.



Κατά την μελέτη ενός τεχνικού ή άλλου έργου, είναι κατά κανόνα απαραίτητη η πειραματική μοντελοποίηση του προβλήματος. Συχνά όμως η αναγωγή του προβλήματος σε εργαστηριακή κλίμακα εισάγει σφάλματα στα μετρούμενα μεγέθη τα οποία είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν για την έγκυρη διεξαγωγή των διορθώσεων.

Η παραπάνω μοντελοποίηση όμως προσδίδει ελεγχόμενο χαρακτήρα στους παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης, γεγονός που βοηθά στον προσδιορισμό των τους με μεγαλύτερη ακρίβεια και την ανάπτυξη της μεθόδου της σεισμικής διασκόπησης. Γίνεται προσπάθεια, συνδέοντας τους παράγοντες αυτούς με τις μεταβολές που καθέναν τους προκαλεί στις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων, να αντιστραφεί η παραπάνω διαδικασία και εν τέλει να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός της φύσης και των χαρακτηριστικών του πετρώματος από in-situ μετρήσεις.

Τα κύματα των υπερήχων ομοιάζουν με τα σεισμικά. Η αναγωγή των σεισμικών διασκοπήσεων σε εργαστηριακή κλίμακα δεν είναι εφικτή λόγω της φύσης του εξοπλισμού και της απαίτησης μεγάλου μεγέθους βραχομάζας για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Αντίθετα, υπάρχουν για τους υπέρηχους εργαστηριακές συσκευές μικρού μεγέθους που δεν απαιτούν την ύπαρξη δοκιμίων μεγάλου όγκου για την πειραματική μελέτη.

Στην προσπάθεια συσχέτισης εργαστηριακών και in-situ μετρήσεων διεξήχθησαν δοκιμές σε δείγματα συμπαγούς ασβεστόλιθου χωρίς εμφανείς ασυνέχειες, ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στο υγιές πέτρωμα. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε σεισμική διασκόπηση σε λατομείο του ιδίου πετρώματος όπου η εκμετάλλευση γίνεται χωρίς την διατάραξη του πετρώματος (κοπή).

Το λατομείο αυτό λειτουργεί στο χωριό Αλφάς του Νομού Ρεθύμνου και παράγει δομικούς λίθους. Η σεισμική διασκόπηση αλλά και η δειγματοληψία έγινε σε δύο διαφορετικά διαζώματα του λατομείου αυτού. Στα δείγματα αυτά μετρήθηκαν μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μέτρο ελαστικότητας αλλά και πορώδες, διαπερατότητα κ.α.. Επίσης τα δείγματα εξετάστηκαν ορυκτολογικά και χημικά για να γίνει γνωστή οποιαδήποτε παράμετρος μπορεί να επηρεάσει τις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### 2.1 Στοιχεία ταλαντώσεων γεωυλικών

Η μελέτη των ταλαντώσεων βασίζεται στη θεωρία της ελαστικότητας. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικά βασικές έννοιες που αφορούν στη διάδοση των σεισμικών (ελαστικών) κυμάτων καθώς και η σχέση των κυμάτων αυτών, με τις δυναμικές ιδιότητες του πετρώματος και τα φυσικά φαινόμενα που συνοδεύουν τη σεισμική απόκριση των γεωλογικών σχηματισμών.

#### 2.1.1 Θεωρητικές παραδοχές

Βασικό αντικείμενο μελέτης στη θεωρία της ελαστικότητας αποτελεί η ανηγμένη παραμόρφωση (strain) της ύλης όταν υπόκειται σε τάση (stress). Σε γενικές γραμμές, σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας, όταν κάποιο πέτρωμα υπόκειται σε εξωτερικές δυνάμεις, οι δυνάμεις αυτές τείνουν να μεταβάλλουν τον όγκο και το σχήμα του. Όταν το μέσο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση, μετά την άρση των εξωτερικών δυνάμεων, τότε χαρακτηρίζεται ως ελαστικό μέσο.

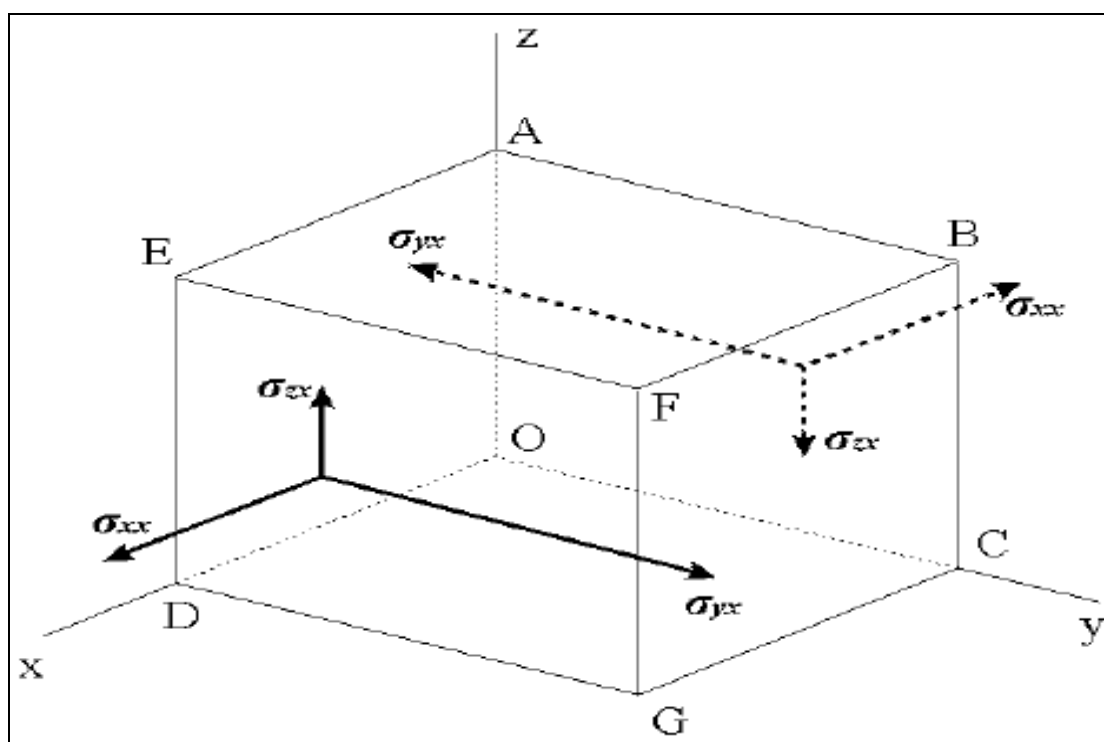
Το πλαίσιο παραδοχών που αφορά στις συνθήκες και τα όρια εφαρμογής της θεωρίας της ελαστικότητας, σχετίζεται με τη φυσικοχημική δομή των πετρωμάτων, τη συνέχεια του μέσου, τις επενεργούσες δυνάμεις (τάξη μεγέθους των τάσεων), το βαθμό παραμόρφωσης και γενικότερα τη μακροσκοπική θεώρηση της μηχανικής συμπεριφοράς. Σύμφωνα με τις παραδοχές αυτές, η δομή των υλικών θεωρείται ως κρυσταλλική ή μοριακή, οι εσωτερικές δυνάμεις (μεταξύ των μορίων της ύλης) παραβλέπονται και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι συνισταμένες δυνάμεις των αλληλεπιδράσεων. Όλες οι μακροσκοπικές μεταβλητές ορίζονται ως τέλειες και θεωρούνται συνεχείς. Οι συνοπτικές αυτές παραδοχές προϋποθέτουν ότι οι όγκοι στους οποίους επενεργούν οι συνισταμένες δυνάμεις, περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό

κόκκων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η «συνέχεια» του μέσου και των τάσεων που ασκούνται σ' αυτό.

Οι καταστατικοί νόμοι που αναφέρονται σε ένα τέλει ελαστικό στερεό, παρουσιάζονται παρακάτω (Παπακωνσταντίνου, 2004) ( Πηγή: Sheriff and Geldart, 1995).

### 2.1.2 Τάση

Ως τάση ορίζεται η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Έτσι, όταν μια δύναμη εφαρμόζεται σε μια επιφάνεια, η τάση είναι ο λόγος της δύναμης προς την επιφάνεια πάνω στην οποία εφαρμόζεται η δύναμη αυτή (Sheriff and Geldart, 1995). Αν η δύναμη μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, η τάση επίσης μεταβάλλεται. Η τιμή της σε κάθε σημείο προσδιορίζεται λαμβάνοντας ένα απειροελάχιστο μικρό τμήμα της επιφάνειας με κέντρο αυτό το σημείο και διαιρώντας τη συνολική δύναμη που επιδρά σ' αυτήν την στοιχειώδη επιφάνεια με το μέγεθος της επιφάνειας. Αν η δύναμη είναι κάθετη στην επιφάνεια, η τάση ονομάζεται ορθή τάση ή πίεση (normal stress or pressure,  $\sigma_{xx}$ , Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Συνιστώσες της τάσης σε πλευρές κάθετες στον x άξονα (Sheriff and Geldart, 1995).

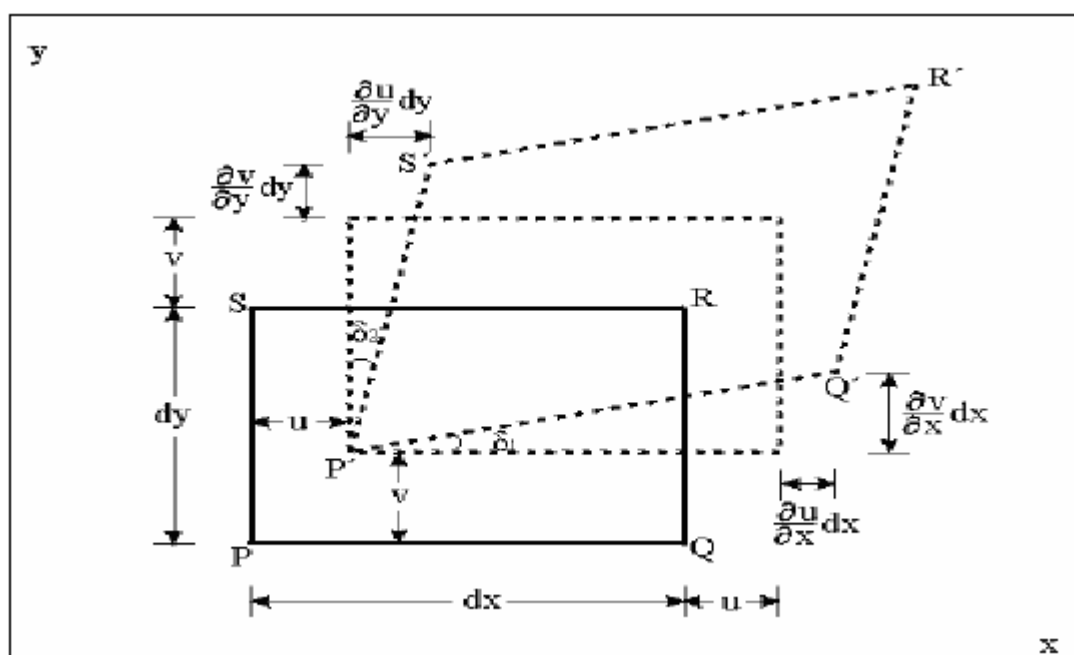
Όταν η δύναμη είναι εφαπτομενική στο τμήμα της επιφάνειας, η τάση ονομάζεται διατμητική τάση ( $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{yx}$ , Σχήμα 2.1). Όταν η δύναμη δεν είναι, ούτε παράλληλη, ούτε κάθετη την επιφάνεια, μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες παράλληλες και κάθετες σ' αυτήν. Με αυτό τον τρόπο, κάθε τάση μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες κύριων και διατμητικών τάσεων.

### 2.1.3 Παραμόρφωση

Όταν ένα ελαστικό σώμα υποβάλλεται σε τάση, συμβαίνουν μεταβολές στο σχήμα του και στις διαστάσεις του, οι οποίες ονομάζονται παραμορφώσεις (Sheriff and Geldart, 1995).

Αν θεωρηθεί ένα ορθογώνιο PQRS στο xy επίπεδο (Σχήμα 2.2) και εφαρμοστεί κάποια τάση στο ορθογώνιο, με το σημείο P να μετακινείται στο P', τότε το διάνυσμα PP' θα έχει συνιστώσες τα u και v. Αν οι υπόλοιπες κορυφές Q, R και S έχουν την ίδια μετατόπιση όπως το P, τότε το ορθογώνιο απλώς θα μετακινηθεί ολόκληρο κατά τις αποστάσεις u και v. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν μεταβολές στο μέγεθος και το σχήμα του ορθογωνίου και επομένως δεν υφίσταται σ' αυτό παραμόρφωση.

Ωστόσο, αν τα u και v είναι διαφορετικά για τις διάφορες κορυφές, το ορθογώνιο θα υφίσταται μεταβολές στο μέγεθος και το σχήμα του και επομένως θα υπάρχει παραμόρφωση.



Σχήμα 2.2 Ανάλυση μιας δισδιάστατης παραμόρφωσης (Sheriff and Geldart, 1995).

Με αυτή την προϋπόθεση, προκύπτουν τα παρακάτω (Sheriff and Geldart, 1995):

1. Το PQ αυξάνεται στο μήκος κατά το ποσό  $(\partial u / \partial x) \cdot dx$  και το PS κατά  $(\partial v / \partial y) \cdot dy$ . Έτσι, τα  $\partial u / \partial x$  και  $\partial v / \partial y$  είναι οι κλασματικές αυξήσεις του μήκους του κάθε άξονα.
2. Οι απειροελάχιστες γωνίες  $\delta_1$  και  $\delta_2$  είναι ίσες με τα μεγέθη  $\partial v / \partial x$  και  $\partial u / \partial y$  αντίστοιχα.
3. Η ορθή γωνία στο σημείο P ελαττώνεται κατά  $\delta_1 + \delta_2 = \partial v / \partial x + \partial u / \partial y$ .
4. Το ορθογώνιο ολόκληρο έχει περιστραφεί αριστερόστροφα κατά γωνία  $(\delta_1 - \delta_2)/2 = (\partial v / \partial x - \partial u / \partial y)/2$ .

Παραμόρφωση ορίζεται ως η σχετική μεταβολή (κλασματική (fractional) μεταβολή) σε μια διάσταση ή το σχήμα ενός σώματος (Sheriff and Geldart, 1995). Οι ποσότητες  $\partial u / \partial x$  και  $\partial v / \partial y$  είναι οι σχετικές αυξήσεις στο μήκος κατά τη διεύθυνση του x και του y άξονα αντίστοιχα και αναφέρονται ως κύριες παραμορφώσεις (normal strains). Η ποσότητα  $\partial v / \partial x + \partial u / \partial y$  εκφράζει το ποσό της ελάττωσης της ορθής γωνίας στο επίπεδο xy. Έτσι, το ποσό αυτό αποτελεί ένα μέτρο της μεταβολής του σχήματος του μέσου, γνωστό και σαν διατμητική παραμόρφωση (shearing strain) και συμβολίζεται με  $\epsilon_{xy}$ . Η ποσότητα  $(\partial v / \partial x - \partial u / \partial y)/2$ , η οποία παριστά μια περιστροφή του σώματος γύρω από τον z άξονα και συμβολίζεται με  $\theta_z$ , δεν συμπεριλαμβάνει μεταβολή στο μέγεθος ή το σχήμα και γι' αυτό δεν αποτελεί παραμόρφωση.

Επεκτείνοντας την ανάλυση αυτή στις τρεις διαστάσεις, θεωρούνται ως (u, v, w οι συνισταμένες της μετατόπισης ενός σημείου P (x, v, z). Έτσι, οι στοιχειώδεις παραμορφώσεις είναι (Sheriff and Geldart, 1995):

Κύριες παραμορφώσεις :

$$\epsilon_{xx} = \partial u / \partial x,$$

$$\epsilon_{yy} = \partial v / \partial y,$$

$$\epsilon_{zz} = \partial w / \partial z$$

εξισώσεις 2.1

Διατμητικές παραμορφώσεις :

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \partial v / \partial x + \partial u / \partial y,$$

$$\epsilon_{zy} = \epsilon_{yz} = \partial w / \partial y + \partial v / \partial z,$$

εξισώσεις 2.2

$$\varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} = \partial u / \partial z + \partial w / \partial x$$

Οι μεταβολές στις διαστάσεις που προκύπτουν κατά τις κύριες παραμορφώσεις έχουν ως αποτέλεσμα μεταβολές στον όγκο όταν ένα σώμα βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης. Η μεταβολή στον όγκο ανά μονάδα όγκου ονομάζεται διαστολή (dilatation) και παρίσταται με  $\Delta$ .

#### 2.1.4 Ο νόμος του Hooke

Έχοντας σαν σκοπό τον υπολογισμό των παραμορφώσεων όταν οι τάσεις είναι γνωστές, θα πρέπει πρώτα να είναι γνωστή η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Όταν οι παραμορφώσεις είναι μικρές, αυτή η σχέση δίνεται από το νόμο του Hooke, ο οποίος διατυπώνει ότι μια δεδομένη παραμόρφωση είναι ευθέως ανάλογη προς την τάση που την προκαλεί. Οι παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων είναι της τάξεως των  $10^{-8}$  m (εκτός και αν μετρώνται πολύ κοντά στην πηγή) και επομένως ο νόμος του Hooke για αυτή την περίπτωση ισχύει.

Η συνολική παραμόρφωση είναι το άθροισμα των παραμορφώσεων που προκαλείται από τις ανεξάρτητες τάσεις. Αυτό σημαίνει ότι κάθε παραμόρφωση είναι μια γραμμική συνάρτηση όλων των τάσεων που επενεργούν στο σώμα και το αντίστροφο.

Γενικά, ο νόμος του Hooke οδηγεί σε περίπλοκους συσχετισμούς. Η τάση και η παραμόρφωση μπορούν να παρασταθούν ως τανυστές δευτέρας τάξης (πίνακες  $3 \times 3$ ) έτσι ώστε η μεταξύ τους συσχέτιση από το νόμο του Hooke να είναι ένας τανυστής τέταρτης τάξης. Η τάση και η παραμόρφωση μπορούν επίσης να παρασταθούν ως πίνακες  $1 \times 6$  (εξίσωση 2.5) και η αναλογία τους, σύμφωνα με το νόμο του Hooke, ως ένας πίνακας  $6 \times 6$ , του οποίου τα στοιχεία είναι ελαστικές σταθερές (Sheriff and Geldart, 1995). Η συμμετρία του πίνακα αυτού ελαττώνει αμέσως τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών σε 21.

Ωστόσο, όταν το μέσο είναι ισότροπο, που σημαίνει ότι οι ιδιότητές του δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση, η συσχέτιση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης μπορεί να εκφραστεί κατά την ακόλουθη σχετικά απλή μορφή (Sheriff and Geldart, 1995) :

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{ii} \quad (i = x, y, z) \quad \text{εξίσωση 2.3}$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (i, j = x, y, z \quad i \neq j) \quad \text{εξίσωση 2.4}$$

Αυτές οι εξισώσεις συχνά εκφράζονται από μια συνάρτηση πινάκων  $\sigma = C \cdot \varepsilon$

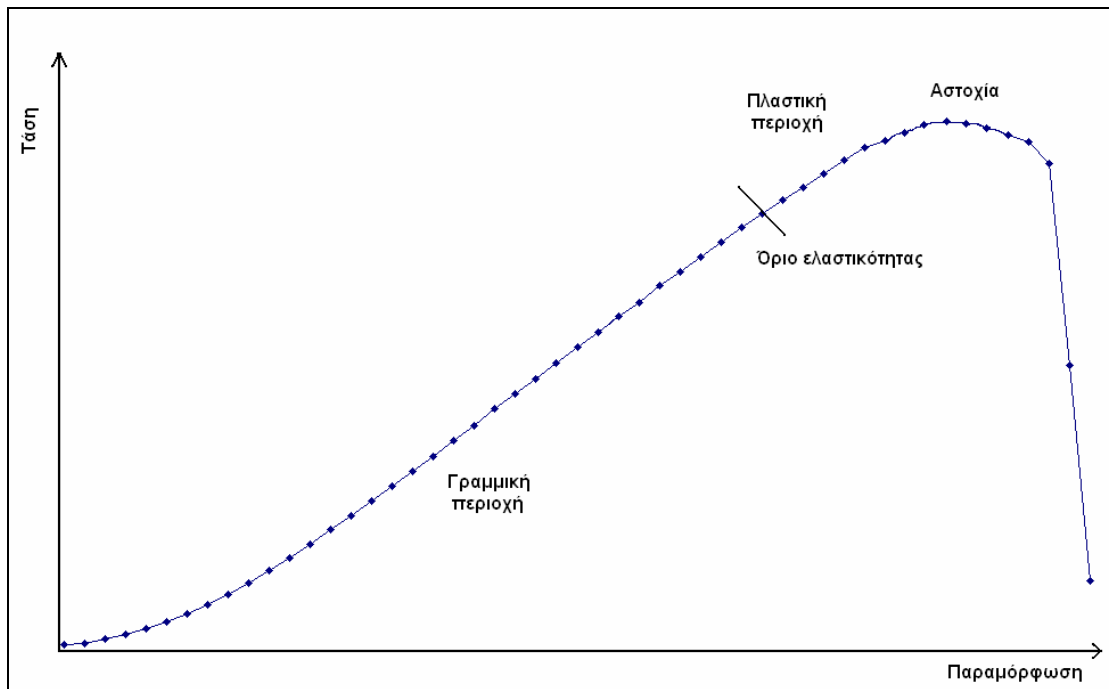
$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad \text{εξίσωση 2.5}$$

Η εξίσωση αυτή κάποιες φορές γράφεται ως  $\varepsilon = S \cdot \sigma$ , όπου  $S = C^{-1}$ . Τα στοιχεία του C (ή του S) μερικές φορές αποκαλούνται συντελεστές ακαμψίας ή δυστροπίας (ή υποχώρησης) (stiffness or compliance components).

Η ποσότητες  $\lambda$  και  $\mu$  είναι γνωστές ως σταθερές του Lamé. Αν θεωρηθεί η ποσότητα  $\varepsilon_{ij} = \sigma_{ij}/2\mu$ , είναι εύλογο ότι η διατμητική παραμόρφωση είναι τόσο μικρότερη, όσο το  $\mu$  αυξάνεται. Έτσι το  $\mu$  αποτελεί ένα μέτρο της αντίστασης που προβάλλει ένα υλικό στην διατμητική παραμόρφωση και συχνά αναφέρεται ως συντελεστής ακαμψίας (modulus of rigidity) ή διατμητικός συντελεστής (shear modulus).

Σε μη ιξώδη ρευστά (non-viscous fluids), η διατμητική σταθερά είναι  $\mu = 0$  και γι' αυτό  $K = \lambda$ . Επειδή δεν έχει δοθεί προηγουμένως ένα συγκεκριμένο όνομα στο  $\lambda$ , είναι δυνατό να ονομαστεί ως «ασυμπίεστότητα των ρευστών» (fluid incompressibility).

Παρ' όλο που ο νόμος του Hooke έχει ευρεία εφαρμογή, δεν είναι δυνατόν να εξακολουθεί να εφαρμόζεται για μεγάλες τάσεις. Όταν η τάση αυξηθεί πάνω από το όριο της ελαστικότητας (Σχήμα 2.3) ο νόμος του Hooke δεν ισχύει πλέον και οι παραμορφώσεις αυξάνονται πιο γρήγορα. Οι παραμορφώσεις που προκύπτουν από τις τάσεις που έχουν ξεπεράσει αυτό το όριο, δεν εξαφανίζονται πλήρως όταν οι τάσεις πάψουν να υφίστανται και το μέσο πλέον παραμορφώθηκε πλαστικά (Παπακωνσταντίνου, 2004).



Σχήμα 2.3 Σχέση τάσης και παραμόρφωσης.

## 2.2 Σεισμικές μέθοδοι

### 2.2.1 Τύποι σεισμικών κυμάτων

Τα σεισμικά κύματα αποτελούν χωροχρονικές ταλαντώσεις των σωματιδίων της ύλης και παράγονται κατά την άσκηση μίας δύναμης χώρου, είτε διαμέσου τεχνητής διέγερσης όπως είναι πυρηνικές εκρήξεις, κρούσεις με διάφορες πηγές διέγερσης, είτε με φυσικές διεργασίες που προκαλούνται από σεισμούς. Η διάδοσή τους, ακολουθεί τους νόμους της κυματικής και της οπτικής φυσικής.

Οι τύποι των σεισμικών κυμάτων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία καθώς αριθμούν αρκετές δεκάδες (Aki and Richards, 1980). Χαρακτηρίζονται σε σχέση με το χρόνο άφιξης, το δρόμο και τρόπο διάδοσης τους και εμφανίζονται σε ένα σεισμόγραμμα ως διακεκριμένες φάσεις. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των σεισμικών κυμάτων (κυματομορφή, πλάτος, συχνότητα κ.α.) μεταβάλλονται συναρτήσει της απόστασης (στα σημεία παρατήρησης) και του χρόνου διάδοσης.

Οι τύποι των σεισμικών κυμάτων, αναγνωρίζονται και προσδιορίζονται από ένα πλήθος παραμέτρων, ιδιαίτερης σημασίας, τόσο στην κλίμακα της κλασσικής σεισμολογίας όσο και σ' αυτή των σεισμικών διασκοπήσεων ή ακόμη και της εργαστηριακής δυναμικής δοκιμής. Οι βασικότερες παράμετροι, που καθορίζουν την



ταυτότητα των σεισμικών κυμάτων, σχετίζονται με τις διαστάσεις του μέσου διάδοσης, την στρωματογραφία, την γεωλογική ηλικία, τη σύσταση ή δομή των πετρωμάτων, τους χρόνους άφιξης των κυμάτων, τον τρόπο και την ταχύτητα διάδοσης τους, το φασματικό τους περιεχόμενο, τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοσή τους και τις σεισμικές πηγές, φυσικές και τεχνητές.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναλύονται περιληπτικά οι κυριότεροι τύποι σεισμικών κυμάτων, που κατά κανόνα εμφανίζονται στις σεισμικές γεωφυσικές διασκοπήσεις. Η βασική τους διάκριση γίνεται σε κύματα χώρου και επιφανειακά. Τα κύματα χώρου διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις ενώ τα επιφανειακά διαδίδονται σε διαχωριστικές επιφάνειες.

### **2.2.1.1 Κύματα χώρου**

Τα κύματα χώρου διαδίδονται στο εσωτερικό των γεωλογικών σχηματισμών και διακρίνονται σε δύο τύπους κυμάτων, ανάλογα με το είδος της διαταραχής που προκαλούν στην ύλη, δηλαδή της επιμήκους ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$ ) και της διατμητικής ( $\epsilon_{xy}$ ,  $\epsilon_{yz}$ ,  $\epsilon_{zx}$ ) παραμόρφωσης. Οι μεταβολές αυτές αντιστοιχούν στα διαμήκη (ή επιμήκη ή συμπίεσης ή P) κύματα και τα εγκάρσια (ή διατμητικά ή στρέψης ή S) κύματα, τα οποία χαρακτηρίζονται έτσι από τον τρόπο και την ταχύτητα διάδοσης στους διάφορους σχηματισμούς (Σχήμα 2.4).

#### **Διαμήκη κύματα.**

Τα διαμήκη (P) είναι τα ταχύτερα κύματα, καταγράφονται πρώτα στα σειсмоγράμματα (πρώτες αφίξεις) και διαδίδονται ακτινικά, προκαλώντας πυκνώματα και αραιώματα της ύλης κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης. Η ταχύτητα διάδοσης τους, δίνεται σε συνάρτηση των σταθερών Lamé.

Χαρακτηρίζονται από φασματικό περιεχόμενο με υψηλές συχνότητες και η διάδοσή τους επηρεάζεται έντονα από τον υδροφόρο ορίζοντα την ύπαρξη ασυνεχειών και την ποσότητα τους, το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, τις μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας, το πορώδες και τη διαπερατότητα καθώς και την πυκνότητα.

## Διατμητικά κύματα

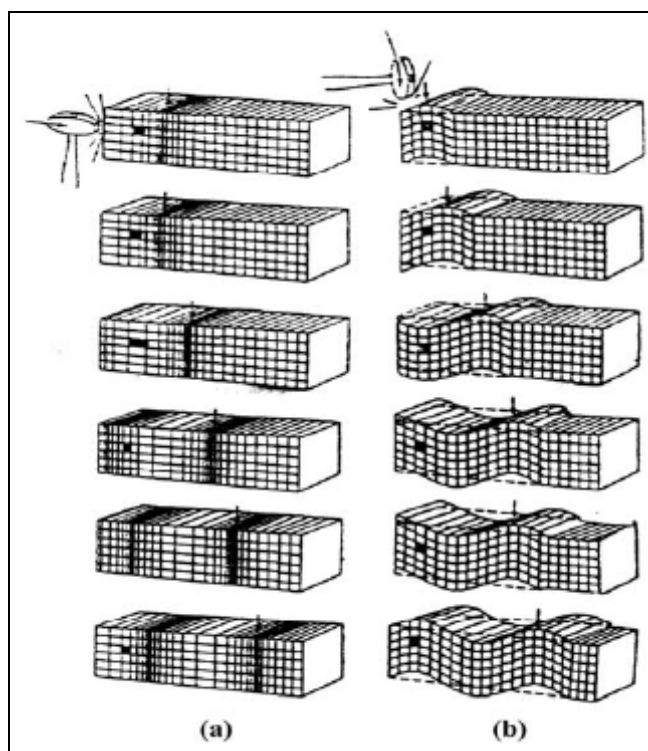
Τα διατμητικά (S) κύματα, εμφανίζονται στις σεισμικές καταγραφές μετά τα κύματα P και η διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων είναι εγκάρσια στη διεύθυνση διάδοσής τους, τείνοντας να προκαλέσουν διάτμηση στη δομή του υλικού.

Η ταχύτητα διάδοσης των S κυμάτων δίνεται σε συνάρτηση των σταθερών Lamé. Η τάξη μεγέθους των ταχυτήτων των S κυμάτων, κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα ανά δευτερόλεπτο για τα χαλαρά και μικρής ακαμψίας εδάφη (ιλύς, μαλακές άργιλοι κ.ά.), μέχρι και χιλιάδες m/sec για το αποσαθρωμένο ή υγιές βραχώδες υπόβαθρο (γρανίτης, σχιστόλιθος, κ.ά.) (Ραπτάκης, 1995).

Τα εγκάρσια κύματα είναι πολωμένα καθότι έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας με αντίστοιχες κινήσεις σε δύο διαφορετικά επίπεδα. Όταν η ταλάντωση των υλικών σωματιδίων πραγματοποιείται σε κατακόρυφο επίπεδο τότε το κύμα είναι κατακόρυφα πολωμένο (SV). Όταν η διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων είναι κάθετη στο κατακόρυφο επίπεδο, τότε αποτελεί οριζόντια πολωμένο κύμα (SH). Οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων μπορεί να αναλυθεί σε SV και SH κύματα.

Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο ένα από τα δύο είδη των εγκάρσιων κυμάτων (SV ή SH), γίνεται αναφορά για επίπεδα πολωμένα εγκάρσια κύματα, ενώ αν τα SV και SH κύματα έχουν την ίδια συχνότητα και διαδίδονται με διαφορά φάσης, τότε γίνεται αναφορά σε ελλειπτικά πολωμένα εγκάρσια κύματα, γεγονός που υποδηλώνει την ετερογενή φύση των διερχόμενων σχηματισμών (Ραπτάκης, 1995).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο νερό, όπως και σε άλλα ασυμπίεστα ρευστά, το μέτρο διάτμησης  $\mu$  (ή G) είναι μηδενικό και ως εκ τούτου τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται διαμέσου των υλικών αυτών.



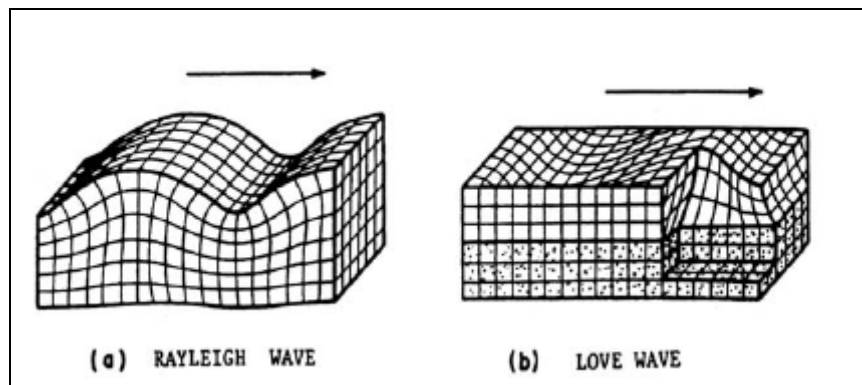
Σχήμα 2.4 Εδαφική κίνηση κατά τη διάδοση των κυμάτων χώρου. (a) P – κύματα, (b) S – κύματα. (Sheriff and Geldart, 1995).

### 2.2.1.2 Επιφανειακά κύματα

Τα επιφανειακά κύματα μελετήθηκαν για πρώτη φορά από τον Rayleigh (1885), ως κυματικό φαινόμενο (κύματα Rayleigh, Σχήμα 2.5a) στην ελεύθερη επιφάνεια ομοιογενούς ελαστικού ημίχωρου. Στη συνέχεια ο Love μελέτησε τα SH κύματα επιφάνειας (κύματα Love, Σχήμα 2.5b), σε ομοιογενές στρώμα υπερκείμενο σε ομοιογενή ημίχωρο. Ο Stoneley, μελέτησε τα ομώνυμα επιφανειακά κύματα Stoneley, που διαδίδονται μεταξύ υδάτινου και εδαφικού στρώματος ή στη διαχωριστική επιφάνεια δύο εδαφικών ημιχώρων. Όταν όμως ισχύει  $V_{s1} \approx V_{s2}$ , οι λόγοι των πυκνοτήτων ( $\rho_1/\rho_2$ ) και των μέτρων διάτμησης ( $\mu_1/\mu_2$ ) κυμαίνονται περίπου στη μονάδα (Sheriff and Geldart, 1995).

Εκτός από αυτούς τους τύπους επιφανειακών κυμάτων, υπάρχουν και τα σωληνοκύματα (tube waves), τα οποία διαδίδονται στη διεύθυνση του άξονα, πληρωμένης με νερό γεώτρησης και θεωρούνται σημαντικά για τις πληροφορίες που παρέχουν σχετικά με τις ελαστικές ιδιότητες του περιβάλλοντος μέσου. Κυριότερο

χαρακτηριστικό των επιφανειακών κυμάτων είναι ότι το πλάτος τους ελαττώνεται όσο απομακρύνεται κανείς από τη σεισμική πηγή.



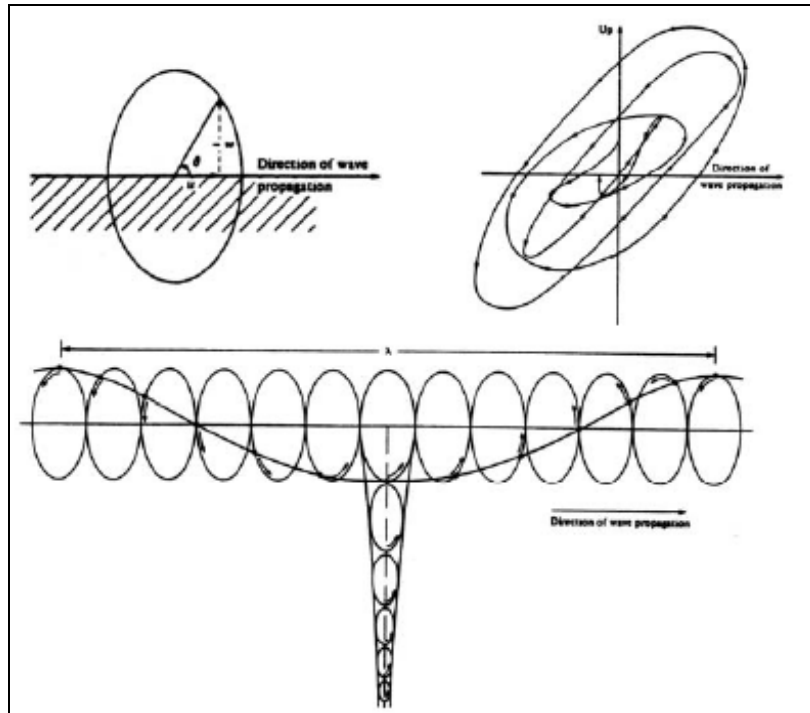
Σχήμα 2.5 Σχηματικός τρόπος διάδοσης των σεισμικών (a) Rayleigh και (b) επιφανειακών κυμάτων Love (Ραπτάκης, 1995).

### Κύματα Rayleigh

Τα κύματα Rayleigh διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια με φορά κίνησης αντίθετη με τη φορά των δεικτών του ρολογιού και προκαλούν μια σύνθετη κίνηση των σωματιδίων της ύλης, η οποία είναι συνισταμένη της οριζόντιας ή ακτινικής και της κατακόρυφης ή διατμητικής συνιστώσας με τη μορφή της έλλειψης. Η ταχύτητα διάδοσής τους είναι μικρότερη από αυτή των εγκαρσίων κυμάτων.

### Κύματα Love

Τα κύματα Love συνδέονται με την εδαφική κίνηση, που περιορίζεται σε οριζόντιο επίπεδο και είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος SH. Ο τύπος αυτός του επιφανειακού κύματος μπορεί να υπάρχει μόνο όταν εδαφικοί σχηματισμοί χαμηλής ταχύτητας είναι υπερκείμενοι των αντίστοιχων υψηλότερης ταχύτητας (Ραπτάκης, 1995). Η δημιουργία των κυμάτων αυτών προκύπτει από την παγίδευση σεισμικών κυμάτων, που υπόκεινται σε ολικές πολλαπλές ανακλάσεις, στην άνω και κάτω διεπιφάνεια των υπερκείμενων επιφανειακών στρωμάτων χαμηλής ταχύτητας. Κατά κανόνα η ταχύτητά τους είναι μικρότερη από αυτή των εγκαρσίων κυμάτων και σε υψηλές συχνότητες είναι συγκρίσιμη με την ταχύτητα των κυμάτων S.



Σχήμα 2.6 Σχηματική παράσταση της διάδοσης των κυμάτων Rayleigh (Sheriff and Geldart, 1995).

### 2.2.2 Διάδοση των σεισμικών κυμάτων

Στην ενότητα αυτή αποτυπώνονται συνοπτικά οι μηχανισμοί και τα φαινόμενα που θεωρούνται ως οι αιτίες, που είναι υπεύθυνες για την συχνά περίπλοκη συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, κατά τη σεισμική διέγερση των πετρωμάτων από κάποιο σεισμό ή μια τεχνητή σεισμική διέγερση.

Τα φαινόμενα αυτά, που συνοδεύουν τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, είναι η απόσβεση, η σκέδαση, η ανάκλαση, η διάθλαση και η περίθλαση. Στην πραγματικότητα, τα φαινόμενα αυτά δεν εμφανίζονται μεμονωμένα και με την απλότητα που περιγράφονται παρακάτω, αλλά σε συνδυασμό, ανάλογα με το βαθμό πολυπλοκότητας των εδαφικών συνθηκών (στη θέση παρατήρησης). Η γεωμετρία των εδαφικών σχηματισμών (πάχος εδαφικών στρώσεων, ασυνέχειες, τοπογραφία) και η διαφοροποίηση των δυναμικών ιδιοτήτων τους ανά σχηματισμό, καθώς και τα φαινόμενα που προκαλούν, έχουν ως συνέπεια τη “διαμόρφωση” του κυματικού πεδίου (Παπακωνσταντίνου, 2004).

## **Απόσβεση**

Η απόσβεση αποτελεί ιδιότητα του πετρώματος, που σχετίζεται κυρίως με την ανελαστική και μη-γραμμική συμπεριφορά του. Η εκτίμηση της εξασθένησης, που προκαλεί το γεωλογικό μέσο στους διάφορους τύπους κυμάτων (κυματικό πεδίο), είναι εξίσου μεγάλης σημασίας με τον καθορισμό άλλων δυναμικών παραμέτρων του μέσου, όπως είναι οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων και η πυκνότητα. Η απόσβεση των κυμάτων χώρου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης με αριθμητικές και αναλυτικές μεθόδους προσομοίωσης (Βαφείδης, 1993).

## **Σκέδαση**

Το φαινόμενο της σκέδασης (ή διασποράς), αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα των πετρωμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται ως σκεδάζον μέσο (dispersive medium), καθώς αποτελούνται από στρώματα με διαφορετικές ελαστικές σταθερές και πυκνότητες. Ορισμένα σεισμικά κύματα που διαδίδονται σε σκεδάζον μέσο, υπόκεινται στο φαινόμενο της διασποράς, σύμφωνα με το οποίο η ταχύτητα διάδοσης τους μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη συχνότητα. (Βαφείδης, 1993).

## **Ανάκλαση - Διάθλαση**

Τα φαινόμενα ανάκλασης και διάθλασης, είναι τα πλέον γνωστά στη σεισμολογία και τις σεισμικές μεθόδους διασκόπησης και υφίστανται, όταν ένα κύμα στη πορεία της διάδοσης του συναντήσει μια έντονη μεταβολή των ελαστικών σταθερών, δηλαδή μια επιφάνεια μεταξύ δυο εδαφικών στρώσεων (διεπιφάνεια).

Στην εφαρμοσμένη γεωφυσική, η αξιοποίηση της διάθλασης ή της ανάκλασης, οδήγησε στην «επινόηση» ενός πλήθους μεθοδολογιών λήψης τεχνητά παραγόμενων κυμάτων και τεχνικών ερμηνείας των δεδομένων διάθλασης και ανάκλασης, που λαμβάνονται κατά τις σεισμικές γεωφυσικές διασκοπήσεις.

Οι αρχές του Huygen και Fermat, οι νόμοι του Snell (απλός και γενικευμένος) και οι αρχές της γεωμετρικής οπτικής περιγράφουν μαθηματικά τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης (Βαφείδης, 1993).

## Περίθλαση

Οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης των σεισμικών κυμάτων, ισχύουν στην περίπτωση, όπου η διεπιφάνεια δυο μέσων με διαφορετικές ελαστικές σταθερές, είναι σχετικά ομαλή με μικρή καμπυλότητα.

Αντίθετα, όταν το μήκος κύματος του προσπίπτοντος μετώπου κύματος, είναι σχετικά συγκρίσιμο με τις διαστάσεις μίας «ανωμαλίας», μίας ασυνέχειας ή με την ακτίνα καμπυλότητας μιας διεπιφάνειας, δεν ισχύουν απόλυτα οι νόμοι που διέπουν τα φαινόμενα ανάκλασης και διάθλασης. Έτσι, με την πρόσπτωση του μετώπου κύματος σε τέτοιου είδους ανωμαλίες, οι ανωμαλίες αυτές γίνονται δευτερογενείς πηγές σεισμικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σεισμικά κύματα σε περιοχές του μέσου, όπου δεν αναμένονται σύμφωνα με τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής (Βαφείδης, 1993).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η χρήση της σεισμικής ανάκλασης και διάθλασης βοήθησαν στην ανάπτυξη των ορυχείων πρωτοπορώντας πριν από περίπου 60 χρόνια. Τη δεκαετία του 1940 οι Terzaghi (1943) και Hvorslev (1949) χρησιμοποίησαν σεισμικά κύματα στη μελέτη δονούμενων θεμελίων. Το 1958 ο Jones σε εργαστηριακή κλίμακα χρησιμοποίησε επιφανειακά κύματα για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων, αλλά λόγω της ακατάλληλης τεχνολογίας δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η απόκτηση, η επεξεργασία και η ανάλυση των σεισμικών δεδομένων έγινε περισσότερο προσιτή και ακριβής, με αποτέλεσμα να δοθεί ώθηση στην ανάπτυξη των μεταλλείων. Τα τελευταία χρόνια οι σεισμικές διασκοπήσεις χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών. Παρακάτω παρουσιάζονται παλαιότερες μελέτες για την επίδραση παραμέτρων του πετρώματος στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων.

### **3.1 Μελέτη για την διακύμανση της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε ανθρακωρυχεία**

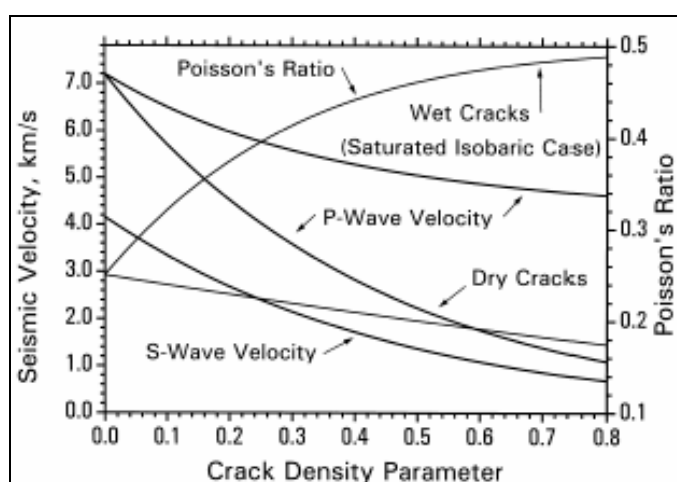
Στην Thabazimbi της Νότιας Αφρικής πραγματοποιήθηκε μελέτη στην οποία εξετάστηκαν οι μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων κατά την εκσκαφή σηράγγων. Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης (Wright et al., 1999).

Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας πιθανότατα να οφείλονται στη διατάραξη του πεδίου των τάσεων, καθώς και σαν αποτέλεσμα και των μικρών θερμοκρασιακών αλλαγών. Η πιθανή χρησιμότητα της διακύμανσης της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων σύμφωνα με τους Wright et al., 1999, είναι στην αναγνώριση ζωνών αδυναμίας.



Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας βρέθηκε ότι η ταχύτητα των P κυμάτων στο δολομίτη, μακριά από τη ζώνη διαταραχής, ποικίλει από 4.400 έως 7.200m/s με την πλειονότητα των τιμών να βρίσκεται πάνω από τα 5.800m/s. Οι ταχύτητες στα τοιχώματα της σήραγγας ήταν από 4.200 έως 5.200m/s. Οι εκτιμώμενες τιμές για τα πάχη της ζώνης διαταραχής από την εκσκαφή της σήραγγας ποικίλουν από 2 μέχρι 9 μέτρα.

Η μεγάλη διακύμανση της σεισμικής ταχύτητας σε απόσταση μικρότερη των 15 μέτρων αποδίδεται κατά μεγάλο βαθμό στη μεταβαλλόμενη πυκνότητα ρωγμάτωσης. Η διαφορά στη σύσταση του δολομίτη και στο βαθμό κορεσμού των ρωγμών σε νερό μπορεί να συμβάλει επίσης στη διακύμανση της ταχύτητας. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η εξάρτηση της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων και του λόγου Poisson από τις παραμέτρους των ρωγμών και την πυκνότητά τους.



**Σχήμα 3.1 Διακύμανση σεισμικής ταχύτητας και λόγου Poisson σε συνάρτηση με τις παραμέτρους της πυκνότητας ρωγμάτωσης για το βαθμό κορεσμού της ρωγμής (Wright et al., 1999).**

Ο Malinsky το 1996 μελέτησε τη διάδοση κυμάτων ήχου σε ορυχείο άνθρακα στο Kladno της Πράγας. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, τα κύματα περνώντας από τη μάζα του πετρώματος περιέχουν πληροφορίες για τη μάζα αυτή. Η παρουσία νερού στους πόρους του πετρώματος και ο βαθμός κορεσμού μετρήθηκαν αφού κρίνονται ουσιώδεις παράμετροι.

Το νερό όπως και άλλα ρευστά μεταναστεύουν ανάλογα με τα βαρυτικά πεδία και της επενεργούσες δυνάμεις της περιοχής. Συγκεκριμένα η εμφάνιση μιας μεγάλης

ποσότητας μικρορωγμών σαν επακόλουθο ενός σεισμού επιφέρουν αλλαγή στη συγκέντρωση του νερού των πόρων.

Δεδομένα τα οποία πάρθηκαν από ορυχεία άνθρακα δείχνουν συσχέτιση των ταχυτήτων διάδοσης ηχητικών κυμάτων με το βαθμό κορεσμού σε νερό. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων αυξάνεται κατά μέσο όρο 23% με τον κορεσμό του πετρώματος σε νερό, σύμφωνα με τους Vozoff et al., 1993 (Πηγή: Malinsky, 1996).

Η ταχύτητα όμως των διατμητικών κυμάτων, παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη από το περιεχόμενο των πόρων σε νερό. Η διαφορά αυτή εξηγείται εύκολα απ' το γεγονός ότι τα διατμητικά κύματα δεν διαδίδονται σε ρευστά.

Η ταχύτητα του ήχου σε άμμους με διαφορετική συνεκτικότητα καθώς και σε ψαμμίτες έχει μελετηθεί εκτενώς. Γενικά, υπάρχει γραμμική συσχέτιση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων με το βαθμό κορεσμού όπως προκύπτει από όλα τα δημοσιευμένα δεδομένα (Hughes et al., 1952, Gist et al., 1993, Blangy et al., 1993, Mavko et al., 1994) (Πηγή: Malinsky, 1996).

Η ταχύτητα των P κυμάτων σαν συνάρτηση της τάσης έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές Η ταχύτητα του ήχου σε ψαμμίτες αυξάνεται με την υδροστατική πίεση (King et al., 1966, Yu et al., 1991 και 1993) (Πηγή: Malinsky, 1996). Αναλυτικότερα η ταχύτητα αυξάνεται κατά 10% με αύξηση της πίεσης από τα 0 στα 7 MPa. Για υψηλότερες πιέσεις, η αύξηση της ταχύτητας, μειώνεται και η ταχύτητα παραμένει σταθερή για τάση άνω των 30 MPa.

Υψηλή συγκέντρωση τάσεων, κυρίως διατμητικών, αυξάνει το μέγεθος των μικρορωγμών. Οι μικρορωγμές αυτές οδηγούν σε μείωση της ταχύτητας και αύξηση της εξασθένησης των κυμάτων (Stacey et al., 1976), (Πηγή: Malinsky, 1996), δεικνύοντας ότι τα διαμήκη κύματα είναι λιγότερο ευαίσθητα σε τέτοιες ανωμαλίες. Η ύπαρξη μικρορωγμών επηρεάζει περισσότερο την εξασθένηση των κυμάτων από την ταχύτητα (Lockner et al., 1977, Shea et al., 1988), (Πηγή: Malinsky 1996).

Ο Malinsky το 1996 εξήγαγε ως συμπέρασμα ότι από τη μέτρηση της ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων σαν συνάρτηση της ασκούμενης δύναμης, μπορεί να εκτιμηθεί το εντατικό πεδίο στο εσωτερικό της βραχόμαζας. Ωστόσο, η ύπαρξη πολλών περίπλοκων παραγόντων (όπως ανομοιογένεια, βαθμός κορεσμού κ.α.) δεν επιτρέπουν μια απλή σύγκριση μεταξύ του εντατικού πεδίου και των αποτελεσμάτων της ταχύτητας των υπερήχων (Hudson et al., 1988) (Πηγή: Malinsky, 1996).

Στην πραγματικότητα η ταχύτητα διάδοσης του ήχου εξαρτάται από την κατάσταση της βραχόμαζας, την τάση, την αύξηση των μικρορωγμών και την

ποσότητα του νερού σε αυτές. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να μετρηθούν ανεξάρτητα. Η πολυπλοκότητα των μετρήσεων στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης δίδει την καλύτερη ευκαιρία για τη σύγκριση των μετρούμενων δεδομένων, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εκσκαφή σύμφωνα με τον Malinsky, 1996. Με τον τρόπο αυτό η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων του εντατικού πεδίου και των μετρήσεων της ταχύτητας των κυμάτων επιτρέπουν την εύρεση στην αύξηση των μικρορωγμών και τον κίνδυνο πιθανής αστοχίας.

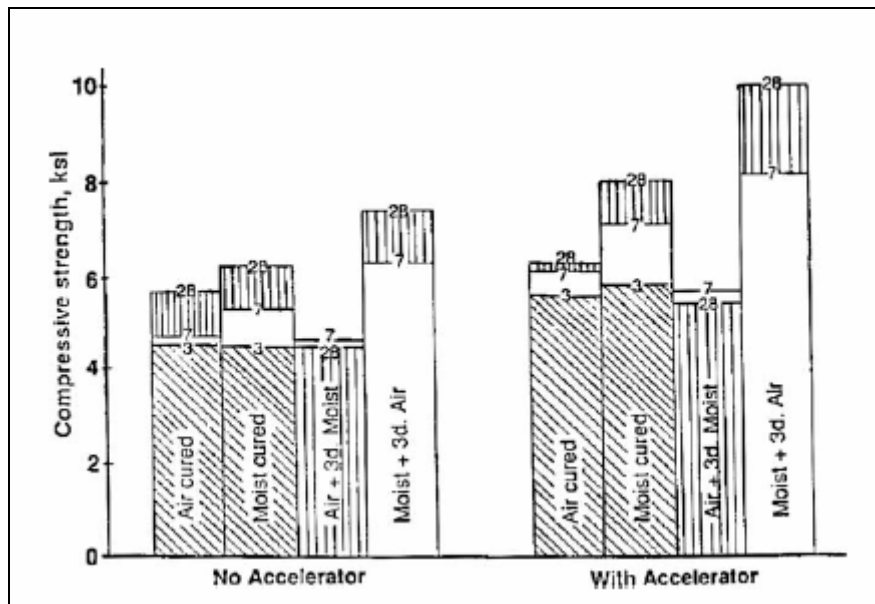
### **3.2 Επίδραση της άνισης κατανομής υγρασίας στην αντοχή και στην ταχύτητα διάδοσης κυμάτων**

Ο Popovics το 2004 μελέτησε την επίδραση της άνισης κατανομής υγρασίας, στην αντοχή και στην ταχύτητα διάδοσης κυμάτων.

- **Επίδραση της κατανομής της υγρασίας στην αντοχή.**

Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια Portland τύπου 1, ακμής 50mm. Όλα τα δείγματα έμειναν στα καλούπια για 24 ώρες και στη συνέχεια χωρίστηκαν σε 4 κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο γήρανσης. Οι τρόποι γήρανσης των δοκιμίων ήταν: α) γήρανση με αέρα (ξήρανση), β) γήρανση με νερό (ύγρανση), γ) γήρανση με αέρα και νερό 3 ημέρες πριν τη δοκιμή θλίψης, δ) γήρανση με νερό και αέρα 3 ημέρες πριν τη δοκιμή θλίψης. Η θερμοκρασία για όλους τους τύπους γήρανσης ήταν σταθερή και ίση με 23°C.

Η αντοχή των δειγμάτων καθορίστηκε μετά από τρεις, επτά και εικοσιοκτώ μέρες γήρανσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν στο δείγμα γίνεται γήρανση με συνεχή ύγρανση και στη συνέχεια 3 μέρες ξήρανση με αέρα πριν τη δοκιμή θλίψης. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάστηκε στην περίπτωση γ.



Σχήμα 3.2 Επίδραση του τρόπου γήρανσης στην αντοχή των δοκιμίων (Popovics, 2004).

Από τα αποτελέσματα γίνεται εμφανές ότι όχι μόνο ο βαθμός κορεσμού του δείγματος σε νερό, αλλά και η κατανομή του, επηρεάζει άμεσα την αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη.

- **Επίδραση της κατανομής της υγρασίας στην ταχύτητα διάδοσης κυμάτων.**

Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν τσιμεντένια πλακίδια πάχους 102mm και αφέθηκαν στο νερό για 43 ημέρες. Στη συνέχεια τα πλακίδια αυτά, αφού βγήκαν απ' το νερό, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και τοποθετήθηκαν κάθετα, στηριζόμενα στις δυο πλευρές τους, έτσι ώστε και η πάνω και η κάτω επιφάνεια να μπορεί να στεγνώσει ελεύθερα.

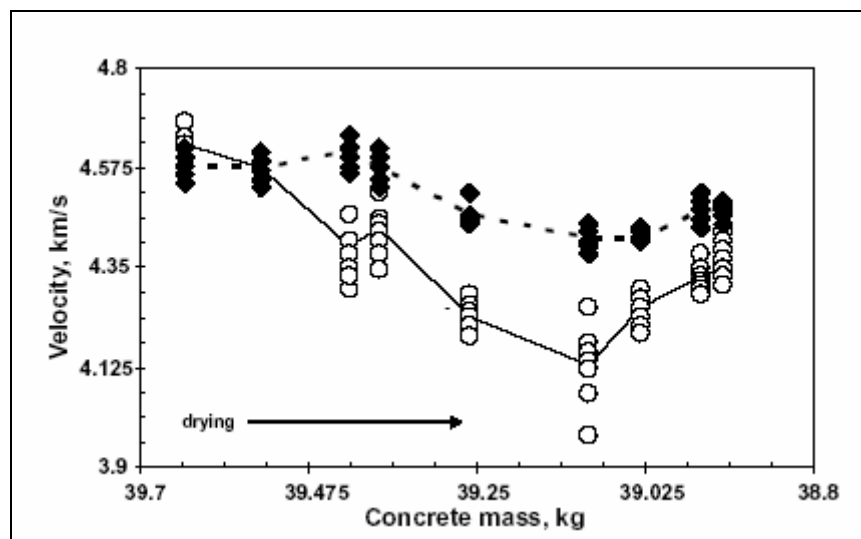
Οι μετρήσεις των ταχυτήτων ξεκίνησαν αμέσως και διήρκεσαν 25 συνεχόμενες μέρες. Η απώλεια της ολικής ελεύθερης υγρασίας παρακολουθήθηκε και μετρήθηκε από το βάρος των δοκιμίων. Οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων κυμάτων μετρήθηκαν με 2 διαφορετικούς τρόπους.

Στην πρώτη μέθοδο ο πομπός και οι δυο δέκτες τοποθετήθηκαν στην ίδια μεριά του πλακιδίου. Η ταχύτητα υπολογίστηκε από τη διαφορά χρόνου

καταγραφής των 2 δεκτών και της μεταξύ τους απόστασης. Η δοκιμή αυτή παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση υγρασίας της επιφάνειας.

Στη δεύτερη μέθοδο οι δυο δέκτες τοποθετήθηκαν στην απέναντι πλευρά από αυτή του πομπού. Η δοκιμή αυτή υποδεικνύει το μέσο βαθμό κορεσμού σε νερό κατά το πάχος του δοκιμίου.

Στο Σχήμα 3.3 γίνεται εμφανές ότι οι ταχύτητες από τη μονόπλευρη  $V_{Lf}$  και αμφίπλευρη  $V_{Ltt}$  δοκιμή είναι σε καλή συμφωνία κατά την έναρξη της διαδικασίας, την χρονική στιγμή κατά την οποία τα δοκίμια είναι ομοιόμορφα κορεσμένα σε νερό. Καθώς ο βαθμός κορεσμού μειώνεται και οι δυο ταχύτητες μειώνονται, με τη διαφορά ότι η  $V_{Lf}$  μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό, υποδεικνύοντας ότι υπάρχει μεγαλύτερη μείωση της υγρασίας κοντά στην επιφάνεια.



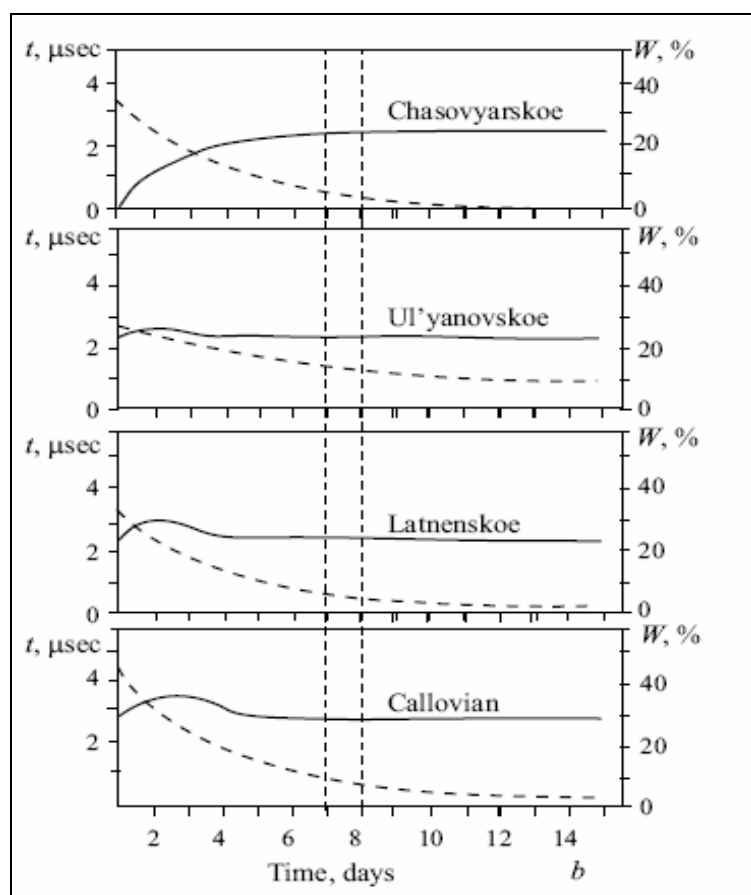
Σχήμα 3.3 Μετρήσεις της ταχύτητας  $V_{Lf}$  (λευκοί κύκλοι) και  $V_{Ltt}$  (μαύροι ρόμβοι) συναρτήσει της ξήρανσης. Οι γραμμές αντιπροσωπεύουν τους μέσους όρους των μετρήσεων (Poronics, 2004).

Η μέγιστη διαφορά, μεταξύ των δυο ταχυτήτων, παρατηρείται όταν η βρεγμένη και η στεγνή ζώνη αποκτούν το ίδιο πάχος. Με την πάροδο του χρόνου το πάχος της ζώνης που είναι κορεσμένο με νερό μικραίνει και παρατηρείται σύγκλιση των δυο ταχυτήτων. Ακολουθώντας την ίδια λογική, οι τιμές μετά από την τελική ξήρανση θα έπρεπε να ταυτίζονται, κάτι που όμως δεν παρατηρείται λόγω της υγρασίας που παραμένει παγιδευμένη μέσα

στο δοκίμιο. Τα αποτελέσματα αυτά κατά τον Poronics είναι μια ακόμη απόδειξη, ότι όχι μόνο ο κορεσμός σε νερό, αλλά και η κατανομή του επηρεάζουν τις ιδιότητες της μάζας.

### 3.3 Πειραματική μελέτη με υπερήχους σε αργιλικά πετρώματα με υγρασία

Οι Brovtsyn et al., 2000 πραγματοποίησαν πειραματική μελέτη, σε αργιλικά πετρώματα, για την επίδραση της υγρασίας στην ταχύτητα των υπερήχων. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κύλινδροι ύψους 5mm και διαμέτρου 30mm. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από δείγματα τεσσάρων περιοχών, είναι εφικτό να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή του νερού που βρίσκεται στους πόρους του πετρώματος (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Πάροδος του χρόνου (ημέρες) σε συνάρτηση με το χρόνο διάδοσης των κυμάτων (συνεχής γραμμή) και με το ποσοστό υγρασίας (διακεκομμένη γραμμή), για αργιλικά πετρώματα, (Brovtsyn et al., 2000).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.4 για τις αποθέσεις της περιοχής Chasovnyarskoe ο χρόνος διάδοσης του κύματος αυξάνεται με τη μείωση της υγρασίας, οπότε η μείωση της υγρασίας προκαλεί μείωση στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Στα αργιλικά πετρώματα των υπόλοιπων περιοχών η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αρχικά μειώνεται και εν συνεχεία αυξάνεται, μέσα σε χρονικό διάστημα περίπου τεσσάρων ημερών.

Σε όλες τις γραφικές απεικονίσεις, μετά από χρόνο περίπου 7 με 8 ημερών, οπότε και η υγρασία τείνει ασυμπτωτικά στο 0, η ταχύτητα λαμβάνει σταθερή τιμή η οποία είναι σχεδόν ίδια για όλα τα παρουσιαζόμενα αργιλικά πετρώματα.

### **3.4 Πειραματικές μελέτες για την επίδραση των ρωγμών στην ταχύτητα διάδοσης των p και s κυμάτων**

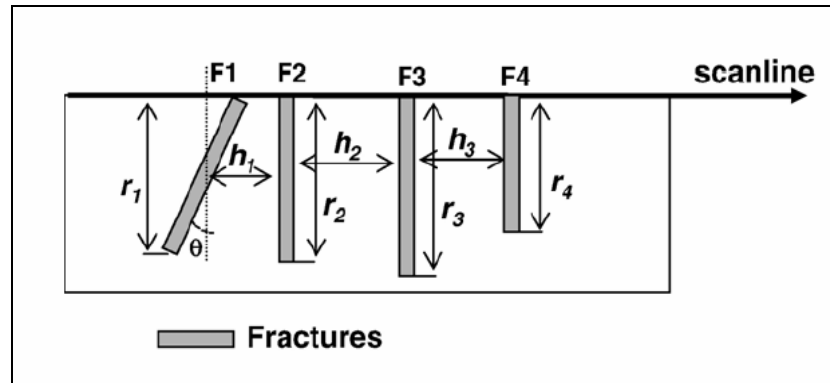
Οι Leucci et al., 2005 πραγματοποίησαν πειραματικές μελέτες προκειμένου να ερευνηθούν τα αποτελέσματα της ρωγμάτωσης στην ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων (P) και διατμητικών (S) κυμάτων και επομένως οι σχέσεις μεταξύ των σεισμικών ιδιοτήτων και παραμέτρων του βράχου. Ο δείκτης ασυνέχειας  $I_d$ , η παράμετρος C πυκνότητας ασυνεχειών, η γραμμική παράμετρος ρωγμάτωσης  $\Gamma$  και ο δείκτης ποιότητας πετρώματος (Rock Quality Designation) χρησιμοποιήθηκαν για να περιγράψουν τις παραμέτρους του πετρώματος.

Όπως περιγράφεται από τον Boadu (1997), οι παράμετροι ενός ρωγματωμένου πετρώματος καθορίζονται ως εξής:

- α) Ο αριθμός ρωγμών ανά μονάδα μήκους καθορίζει τη γραμμική πυκνότητα ρωγμάτωσης  $\Gamma$
- β) Η παράμετρος πυκνότητα ρωγμάτωσης C είναι

$$C = \frac{\Gamma}{(\cos \theta_i)(1 - \ln r_{\min})} \quad \text{εξίσωση 3.1}$$

όπου  $\theta_i$  είναι ο προσανατολισμός των  $i$  ρωγμών ( $\theta=0^\circ$  για τις κάθετες ρωγμές),  $\Gamma$  είναι η γραμμική πυκνότητα ρωγματώσεων και  $r_{\min}$  είναι το ελάχιστο μήκος ρωγματώσεων (δηλ. στο Σχήμα 3.5  $r_{\min}=r_4$ ).



Σχήμα 3.5 Σχηματική απεικόνιση του μήκους ( $r$ ), του διακένου ( $h$ ) και του προσανατολισμού ( $\theta$ ) ρωγμών, (Leucci et al., 2005).

- γ) Η παράμετρος ποιοτικού προσδιορισμού βράχου (RQD), Deere (1963), ορίζεται ως το άθροισμα των μηκών άθικτων κομματιών πετρώματος τα οποία είναι μεγαλύτερα των 10cm, εκφραζόμενο ως ποσοστό επί του συνολικού μήκους του πυρήνα. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει ποιοτική ταξινόμηση πετρώματος με βάση την παράμετρο RQD. Ισχυροί και ογκώδεις βράχοι που τα μήκη των κομματιών είναι μεγαλύτερα από 10cm έχουν RQD 100% (πολύ καλό), ενώ για ένα έντονα σπασμένο βράχο το RQD προσεγγίζει το 0% (πολύ χαμηλό). Σε πετρώματα με RQD από 0 έως 10% λαμβάνεται RQD ίσο με 10% (Αγιουτάντης, 2002).

Πίνακας 3.1 Ταξινόμηση πετρώματος με βάση το RQD (Bieniawski, 1984).

Δείκτης RQD	Χαρακτηρισμός πετρώματος
0-25	Πολύ κακό
25-50	Κακό
50-75	Μέτριο
75-90	Καλό
90-100	Πολύ καλό

- δ) Ο δείκτης ασυνέχειας  $I_d$  ορίζεται ως ο λόγος του μέσου μήκους των ρωγμών προς το μέσο όρο της απόστασης μεταξύ των διαδοχικών ρωγμών (spacing).

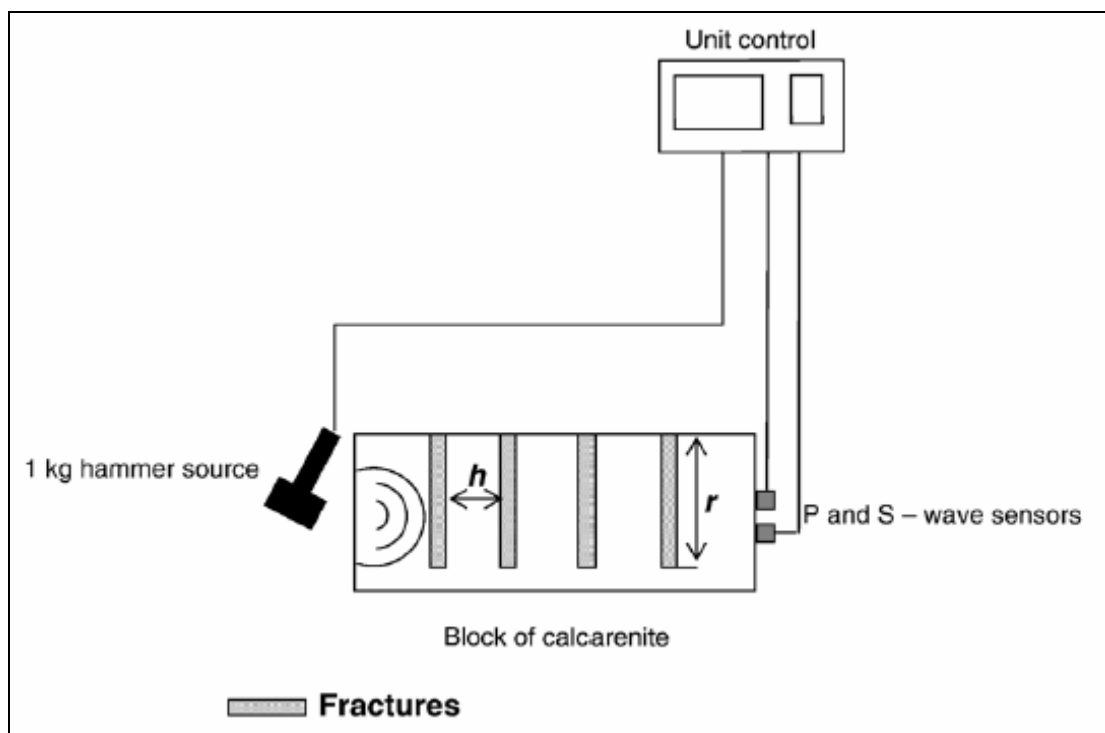


Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερα διαφορετικά δοκίμια του πετρώματος cacarenite. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 0.6x0.4x0.4m. Στη συνέχεια στα δοκίμια αυτά δημιουργήθηκαν ρωγμές, οι οποίες πληρώθηκαν με τέσσερα διαφορετικά υλικά. Οι ρωγμές στο πρώτο δοκίμιο πληρώθηκαν με αέρα, στο δεύτερο δοκίμιο με «terra rossa», στο τρίτο δοκίμιο με υγρή «terra rossa» και στο τέταρτο δοκίμιο με άργιλο. Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων των τεσσάρων δοκιμίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2 Τιμές των φυσικών παραμέτρων των δοκιμίων, (Leucci et al., 2005).**

Physical properties	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.64	14.60	14.68	14.54
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.40	18.38	18.45	18.35
$\Phi$ (%)	44.60	44.54	44.67	44.45
$w_a$ (%)	35.40	35.30	35.57	35.27
$s_r$ (%)	100	100	100	100

Όπου  $\gamma_d$  η πυκνότητα του ξηρού δείγματος,  $\gamma_{sat}$  η πυκνότητα του υγρού δείγματος,  $\Phi$  το πορώδες%,  $w_a$  η απορρόφηση νερού% και  $s_r$  ο βαθμός κορεσμού. Οι τιμές των παραμέτρων που μετρήθηκαν δεν διαφέρουν κατά πολύ στα τέσσερα δοκίμια και επομένως όλα τα δοκίμια μπορούν να θεωρηθούν ίδια. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης διατμητικών και εγκαρσίων κυμάτων, (Leucci et al., 2005).

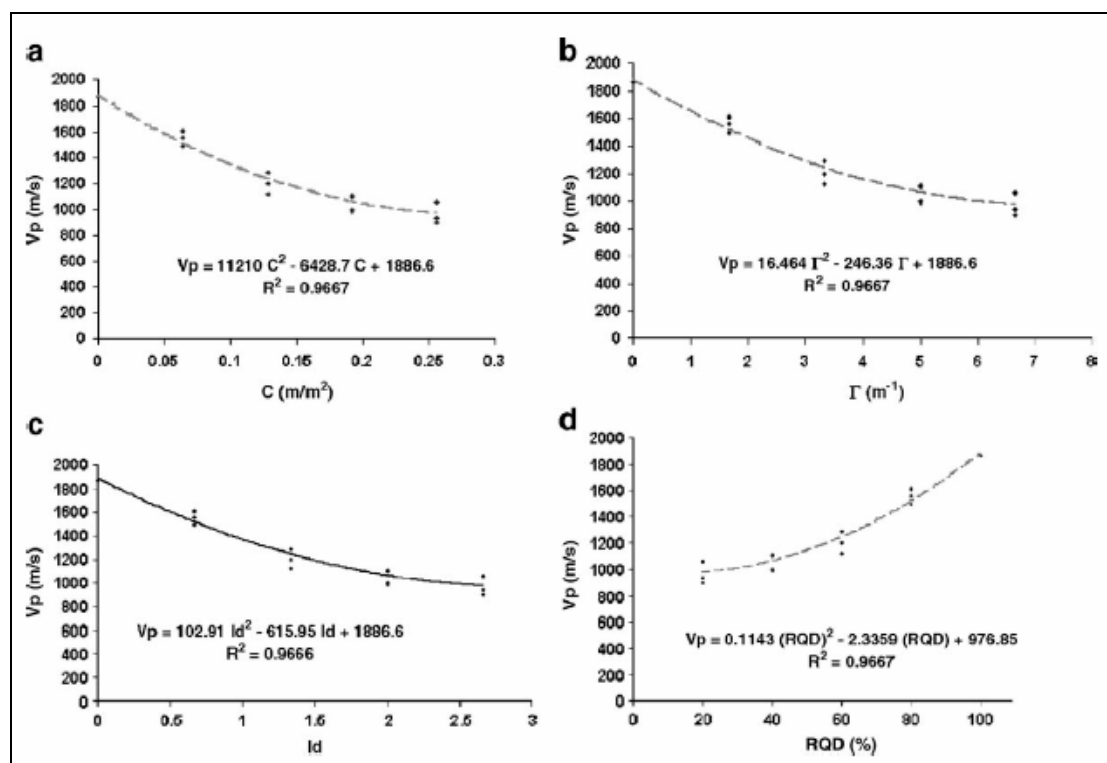
Το δοκίμιο εμφανίζει τέσσερις κάθετες ρωγμές μήκους 0.3m, με άνοιγμα 0.01m και διάκενο 0.1m. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν τεχνητά, χρησιμοποιώντας ένα απλό πριόνι. Οι επιφάνειες των δοκιμίων λειάνθηκαν αρκετά ώστε να επιτευχθεί καλή επαφή. Οι δέκτες ήταν δύο πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες με συχνότητα 4 kHz και ως πηγή χρησιμοποιήθηκε ένα σφυρί ενός κιλού.

Οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται, αναλυτικά για κάθε δοκίμιο, στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3 Πειραματικές μετρήσεις ταχυτήτων των P και S κυμάτων, (Leucci et al., 2005).

Number of fractures	$V_p$ (m/s) air filled	$V_p$ (m/s) terra rossa filled	$V_p$ (m/s) wet terra rossa filled	$V_p$ (m/s) clay filled	$V_s$ (m/s) air filled	$V_s$ (m/s) terra rossa filled	$V_s$ (m/s) wet terra rossa filled	$V_s$ (m/s) clay filled
1	1495	1560	1604	1615	590	721	800	808
2	1121	1200	1290	1290	423	530	590	620
3	987	1002	1100	1112	357	390	410	430
4	900	936	1054	1061	271	300	387	390

Στη συνέχεια, με τις μετρούμενες ταχύτητες  $V_p$  και  $V_s$  καθώς και με το λόγο τους ( $V_p/V_s$ ), χαράχθηκαν καμπύλες σε συνάρτηση με το δείκτη ασυνέχειας  $I_d$ , την παράμετρο πυκνότητας ασυνεχειών  $C$ , τη γραμμική παράμετρο ρωγμάτωσης  $\Gamma$  και το (RQD). Οι καμπύλες παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.6, 3.7 και 3.8.



**Σχήμα 3.6** Διάγραμμα της ταχύτητας διάδοσης  $V_p$  με τις ακόλουθες παραμέτρους της ρωγματομένης βραχομάζας: α) παράμετρο  $C$  πυκνότητας ασυνεχειών, β) γραμμική παράμετρο ρωγμάτωσης  $\Gamma$ , γ) δείκτη ασυνέχειας  $I_d$  και δ) RQD, (Leucci et al., 2005).

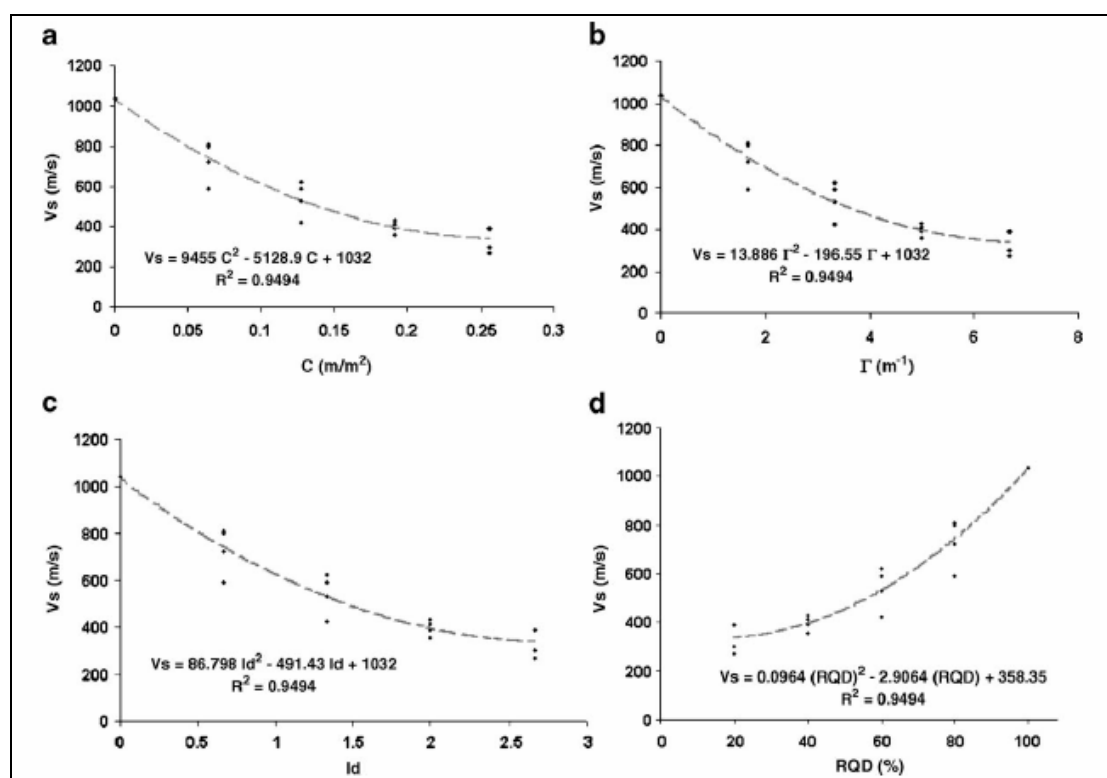
Παρατηρείται ότι η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων ( $V_p$ ) μειώνεται με την αύξηση της παραμέτρου πυκνότητας των ασυνεχειών  $C$ . Η παράμετρος  $C$  σχετίζεται άμεσα με τη διαπερατότητα (Boadu 1997) και επομένως η μείωση της ταχύτητας των P κυμάτων, υποδηλώνει μια αύξηση της διαπερατότητας, η οποία οφείλεται στη διεύρυνση των ρωγμών (Σχήμα 3.6.α).

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων ( $V_p$ ) μειώνεται με την αύξηση της γραμμικής ρωγμάτωσης  $\Gamma$  (Σχήμα 3.6.β). Αυτή η τάση επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται από το αριθμητικό μοντέλο που προτείνεται από τους Boadu και Long (1996). Ο ρυθμός της μείωσης που παρατηρείται είναι αρκετά μεγάλος για μικρές

πυκνότητες ρωγμάτωσης και μικρότερος για τις υψηλότερες τιμές. Φαίνεται ότι η ταχύτητα των P κυμάτων γίνεται λιγότερο ευαίσθητη στην πυκνότητα ρωγμάτωσης στις περισσότερο υψηλότερες τιμές της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα των P κυμάτων γίνεται όλο και περισσότερο ευαίσθητη, στις ιδιότητες ρωγμάτωσης και λιγότερο ευαίσθητη στο ακέραιο πέτρωμα, όταν η πυκνότητα ρωγμάτωσης αυξάνεται.

Στο Σχήμα 3.6.c μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα των P κυμάτων μειώνεται με μια αύξηση του δείκτη ασυνέχειας ( $I_d$ ). Αυτό δείχνει ότι για ρωγματωμένο μέσο, μείωση της σεισμικής ταχύτητας θα μπορούσε να οφείλεται στην αύξηση της διαπερατότητας λόγω αυξημένης ρωγμάτωσης.

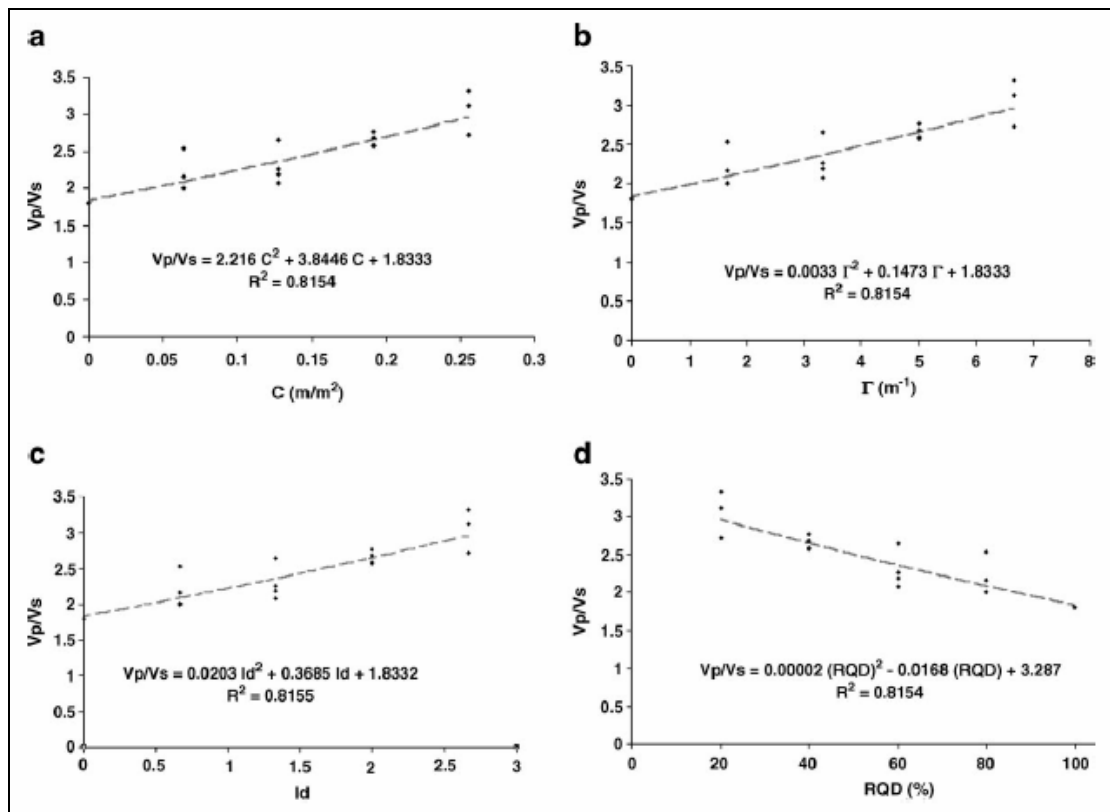
Τέλος η ταχύτητα των P κυμάτων μειώνεται με μια μείωση του RQD. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα των κυμάτων P μειώνεται όσο η ποιότητα του βράχου επιδεινώνεται (Σχήμα 3.6.d).



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα της ταχύτητας διάδοσης  $V_s$  με τις ακόλουθες παραμέτρους της ρωγματωμένης βραχομάζας: α) παράμετρο  $C$  πυκνότητας ασυνεχειών, β) γραμμική παράμετρο ρωγμάτωσης  $\Gamma$ , γ) δείκτη ασυνέχειας  $I_d$  και δ) RQD, (Leucci et al., 2005).

Τα αποτελέσματα των παραμέτρων του ρωγματωμένου βράχου στην ταχύτητα των S κυμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7a-d. Οι σχέσεις μεταξύ των

παραμέτρων του ρωγματωμένου βράχου, με την ταχύτητα των S κυμάτων, είναι ουσιαστικά παρόμοιες με εκείνες των P κυμάτων. Η ταχύτητα των S κυμάτων μειώνεται με την αύξηση του δείκτη ασυνέχειας και της πυκνότητας ρωγμάτωσης, ενώ αυξάνεται με αύξηση του RQD.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα του λόγου  $V_p/V_s$  με τις ακόλουθες παραμέτρους της ρωγματωμένης βραχομάζας: α) παράμετρο  $C$  πυκνότητας ασυνεχειών, β) γραμμική παράμετρο ρωγμάτωσης  $\Gamma$ , γ) δείκτη ασυνέχειας  $I_d$  και δ) RQD, (Leucci et al., 2005).

Ο λόγος  $V_p/V_s$  παρέχει περισσότερες πληροφορίες για τις παραμέτρους του ρωγματωμένου βράχου. Το Σχήμα 3.8a-d παρουσιάζει τη γραφική παράσταση του λόγου  $V_p/V_s$  συναρτήσει των παραμέτρων του ρωγματωμένου βράχου.

Η εξάρτηση των παραμέτρων του ρωγματωμένου βράχου από το λόγο  $V_p/V_s$  είναι διαφορετική από εκείνη που παρατηρείται στα διαγράμματα με την ταχύτητα  $V_p$  και  $V_s$  χωριστά. Ο λόγος  $V_p/V_s$  αυξάνεται με μια αύξηση των παραμέτρων του ρωγματωμένου βράχου ( $C$ ,  $\Gamma$  και  $I_d$ ), ενώ μειώνεται με μια αύξηση του RQD.

Ο λόγος  $V_p/V_s$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό του ρωγματομένου βράχου. Στην πραγματικότητα η ποσότητα  $V_p/V_s$  καθορίζεται από τον λόγο Poisson ( $\nu$ ) και δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{1-\nu}{\frac{1}{2}-\nu}} \quad \text{εξίσωση 3.2}$$

Αξιίζει να σημειωθεί ότι ο λόγος Poisson μπορεί να πάρει μέγιστη τιμή 0.5. Για πολύ σκληρά πετρώματα παίρνει τιμές περίπου στο 0.05 ( $V_p/V_s=1.45$ ), ενώ για πιο χαλαρά μη συνεκτικά ιζήματα φτάνει περίπου σε 0.45 ( $V_p/V_s=3.32$ ), (Reynolds, 1997).

Τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές των σεισμικών ταχυτήτων αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η εξίσωση της καλύτερης δυνατής καμπύλης, το διάστημα εμπιστοσύνης (95%) και ο συντελεστής συσχέτισης ( $R^2$ ) καθορίστηκαν για κάθε παλινδρόμηση. Από την επεξεργασία προέκυψαν οι εξής πολυωνυμικές εξισώσεις (Leucci et al., 2005) :

$$\begin{aligned} V_p &= 11210 C^2 - 6428 C + 1886.6 R^2 = 0.9667 \\ V_p &= 16.464 \Gamma^2 - 246.36 \Gamma + 1886.6 R^2 = 0.9667 \\ V_p &= 102.91 (I_d)^2 - 615.95 (I_d) + 1886.6 R^2 = 0.9667 \\ V_p &= 0.1143 (RQD)^2 - 2.3359 (RQD) + 976.85 R^2 = 0.9667 \end{aligned} \quad \text{εξισώσεις 3.3}$$

$$\begin{aligned} V_s &= 9455 C^2 - 5128.9 C + 1032 R^2 = 0.9494 \\ V_s &= 13.886 \Gamma^2 - 196.55 \Gamma + 1032 R^2 = 0.9494 \\ V_s &= 86.798 (I_d)^2 - 491.43 I_d + 1032 R^2 = 0.9494 \\ V_s &= 0.0964 (RQD)^2 - 2.9064 (RQD) + 358.35 R^2 = 0.9494 \end{aligned} \quad \text{εξισώσεις 3.4}$$

$$\begin{aligned} V_p/V_s &= 2.216 C^2 + 3.8446 C + 1.8333 R^2 = 0.8154 \\ V_p/V_s &= 0.0033 \Gamma^2 + 0.1473 \Gamma + 1.8333 R^2 = 0.8154 \\ V_p/V_s &= 0.0203 (I_d)^2 + 0.3685 (I_d) + 1.8332 R^2 = 0.8154 \\ V_p/V_s &= 0.00002 (RQD)^2 - 0.0168 (RQD) + 3.287 R^2 = 0.8154 \end{aligned} \quad \text{εξισώσεις 3.5}$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

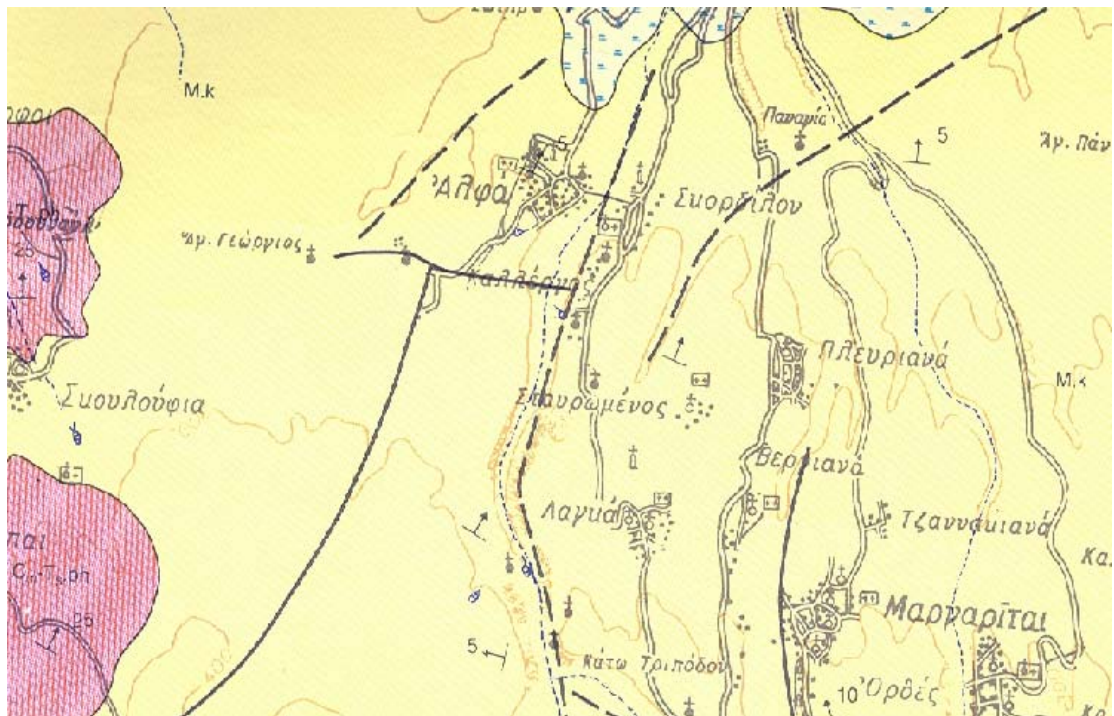
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η υπό μελέτη περιοχή και χαρακτηρίζεται το πέτρωμα στο οποίο έγιναν οι εργαστηριακές μετρήσεις και οι μετρήσεις πεδίου. Οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν σε λατομείο που λειτουργεί στο χωριό Αλφάς του νομού Ρεθύμνου. Η γεωλογία της περιοχής περιγράφεται σε χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών.

Για το χαρακτηρισμό του πετρώματος λήφθηκαν δείγματα από το χώρο του λατομείου και διαμορφώθηκαν κατάλληλα ώστε να πραγματοποιηθούν εργαστηριακές μετρήσεις σε αυτά. Τα μετρούμενα μεγέθη ήταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το πορώδες, η διαπερατότητα, η πυκνότητα, καθώς επίσης κατασκευάστηκαν λεπτές τομές και έγινε ανάλυση XRD.

### 4.1 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Τα γεωλογικά στρώματα που εμφανίζονται στην περιοχή εκμετάλλευσης, έχουν σχηματιστεί κατά το μειόκαινο. Το συνολικό πάχος των γεωλογικών σχηματισμών είναι περίπου 200m. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω προέρχονται από χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών (1991), (Σχήμα 4.1).

Ο χάρτης είναι σε κλίμακα 1/50.000 και περιέχει υπόμνημα στο οποίο παρουσιάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται σε κάθε περιοχή με διαφορετικό χρώμα.



Σχήμα 4.1 Γεωλογικός χάρτης, περιοχή Αλφά (Ι.Γ.Μ.Ε. 1991).

Όπως φαίνεται, στην ευρύτερη περιοχή παρουσιάζεται ο σχηματισμός ο οποίος συμβολίζεται με **M.k.** και αποτελείται από βιογενείς ασβεστόλιθους, μάργες, αργίλους και κροκαλοπαγή. Υπέρκεινται ασύμφωνα των αλπικών σχηματισμών και διακρίνονται λιθοστρωματογραφικά σε τρεις ορίζοντες, που είναι από πάνω προς τα κάτω οι εξής:

1. Ανώτερος ορίζοντας: Αποτελείται από οργανογενείς υφαλώδεις ή στρωματώδεις ασβεστόλιθους, χρώματος υπόλευκου έως τεφροκίτρινου, με Κοράλλια και Φύκη, στους οποίους παρεμβάλλονται μάργες με *Ostrea sp.*, *Pecten sp.* και Βρυόζωα. Οι ασβεστόλιθοι αντικαθίστανται από εναλλασσόμενες λεπτοφυλλώδεις και συνεκτικές μάργες, με φυτικά λείψανα, βελόνες Σπόγγων, υπολείμματα ψαριών, Μαλακίων και Εχινόδερμων. Στις παραπάνω μάργες παρεμβάλλονται τεμάχη ασβεστολίθων του υποβάθρου.
2. Ενδιάμεσος ορίζοντας: Αποτελείται από θαλάσσιες και υφάλμυρες αποθέσεις. Στη βάση απαντούν μικρολατυποπαγή, τα οποία εξελίσσονται, προς τα πάνω, σε άμμους και ψαμμίτες με *Heterostegina sp.*, *Pecten sp.* και *Clypeaster sp.* Εκεί όπου το πάχος τους είναι σημαντικό (Βιγλότοποι), εμφανίζονται παρεμβολές ψαμμούχων ασβεστολίθων με Φύκη και Γαστερόποδα (*Turittella*



sp.). Οι αποθέσεις αυτές προς τα πάνω εξελίσσονται σε μάργες και αργίλους, κατά θέσεις λεπτοφυλλώδεις με Ελασματοβράγχια και Εχινοειδή (*Clypeaster*, *Scutella*).

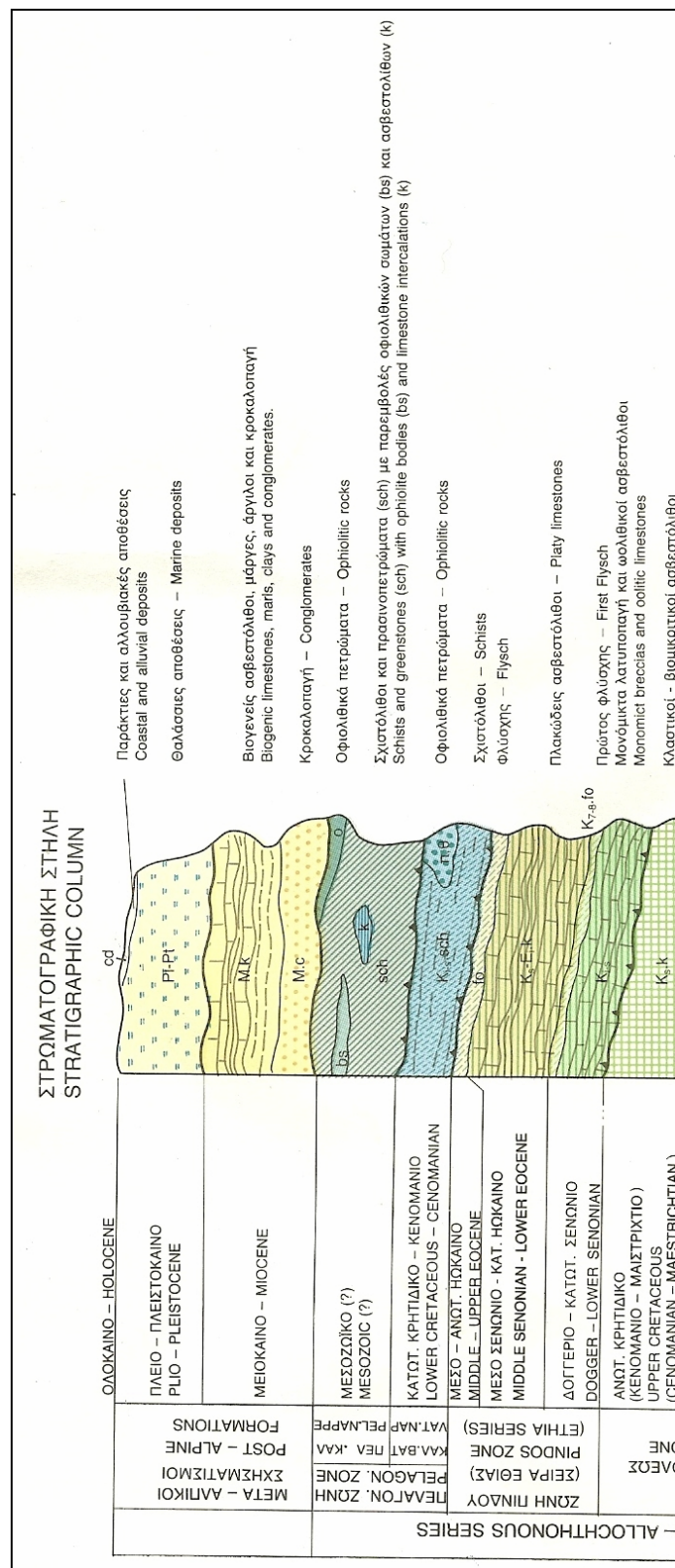
3. Κατώτερος ορίζοντας: Ο κατώτερος ορίζοντας αποτελείται από αποθέσεις. Οι ποταμοχερσαίες αποθέσεις περιλαμβάνουν ελαφρά συγκολλημένα ερυθρά έως ερυθροκάστανα κροκαλοπαγή που προέρχονται από τη φυλλιτική-χαλαζιτική σειρά. Σπάνια περιέχουν παρεμβολές αμμούχων φακών και ενστρώσεις ασβεστολιθικών κροκαλών. Οι αποθέσεις του γλυκού νερού περιλαμβάνουν κροκαλοπαγή και αργιλομαργαϊκούς ασβεστολίθους.

Τα κροκαλοπαγή έχουν ποικίλη λιθολογική σύσταση, είναι ελαφρά συγκολλημένα και περιέχουν αργιλικές διαστρώσεις και φακούς από αμμούχα υλικά με απολιθώματα *Planorbis* sp., *Melanopsis* sp. και φυτικά λείψανα.

Οι υφάλμυρες αποθέσεις απαντούν σε μικρή έκταση και αποτελούνται από παχυστρωματώδεις ασβεστιτικούς ψαμμίτες, που εναλλάσσονται με αμμούχες αργίλους, χρώματος καστανού έως τεφρού και εγκλείουν μικρές διάσπαρτες κροκάλες, καθώς και λεπτά λιγνιτικά στρώματα. Στις υφάλμυρες αποθέσεις βρέθηκε πανίδα από *Crassostrea* sp. και *Cerithium* sp..

Όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.2 ο σχηματισμός αυτός υπέρκειται σε ζώνη σχιστολίθων και πρασινοπετρωμάτων με παρεμβολές οφιολιθικών σωμάτων και ασβεστολίθων. Οι σχηματισμοί αυτοί ανήκουν στη Μεσοζωική περίοδο.

Ψηλότερα των σχηματισμών βρίσκονται θαλάσσιες αποθέσεις καθώς και παράκτιες και αλλουβιακές της περιόδου του Πλειστοκαίνου.



Σχήμα 4.2 Στρωματογραφική στήλη (Ι.Γ.Μ.Ε. 1991).

## 4.2 Δειγματοληψία

Για την καλύτερη δυνατή μελέτη κάθε φαινομένου που απαιτεί την λήψη δειγμάτων, βασική αρχή είναι η όσο το δυνατόν σωστότερη επιλογή των δειγμάτων αυτών. Η διαδικασία αυτή έχει σαν βασικό της στόχο, την αποκομιδή ενός όγκου πετρώματος με τη μικρότερη δυνατή διαταραχή, ώστε τα αποτελέσματα από την μέτρηση των ταχυτήτων και των μηχανικών ιδιοτήτων να αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατόν καλύτερα την αρχική κατάσταση της βραχομάζας πριν παρέμβουμε σε αυτή.

Από τις γεωλογικές αναφορές της περιοχής καθώς και από πληροφορίες που δόθηκαν από το λατομείο που λειτουργεί στην περιοχή, υπήρχαν δύο διαφορετικής συμπεριφοράς υλικά στις δύο βαθμίδες στις οποίες γινόταν εκμετάλλευση. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε ορθότερο να αξιολογηθούν τα δύο υλικά και να συγκριθούν και μεταξύ τους.

Τα δείγματα που μας δόθηκαν από το εργοτάξιο ήταν δύο κύβοι ακμής 20cm και προερχόντουσαν το καθένα από την μια βαθμίδα. Από τον κάθε κύβο κόπηκαν 9 κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 5.2cm και ύψους 19cm.

## 4.3 Διαμόρφωση δοκιμίων

Μετά τη διαδικασία της δειγματοληψίας από το λατομείο ακολούθησε, στο εργαστήριο πλέον, η διαδικασία της διαμόρφωσης των δοκιμίων. Στο στάδιο αυτό κόβονται με το εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία), τα κυβικά δείγματα που λήφθηκαν από το λατομείο, σε κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων περίπου 19x5.2cm (Σχήμα 4.3). Τα 9 δοκίμια που προέκυψαν από τον κύβο του πάνω διαζώματος έχουν τον κωδικό Β. Στο δείγμα που προέρχεται από το κάτω διάζωμα κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί πιθανή ανισοτροπία του υλικού. Για τον λόγο αυτό κόπηκαν 6 κυλινδρικά δοκίμια κατά την οριζόντια διεύθυνση και ονομάστηκαν δοκίμια Γ και 3 κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που ονομάστηκαν Δ.



**Σχήμα 4.3 Δοκίμιο αλφά.**

Για την κοπή και την διαμόρφωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εργαστηριακά όργανα: α) γεωτρύπανο (καροταρία), β) δισκοπρίονο κοπής πετρωμάτων και γ) λειαντής δοκιμίων. Τέλος η μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων που προέκυψαν έγινε με παχύμετρο (Vernier).

#### **Εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία)**

Το μηχάνημα αυτό (Σχήμα 4.4) λειτουργεί με την ίδια αρχή όπως και ένα απλό τρυπάνι. Πρόκειται για ένα άξονα που περιστρέφεται κατά την κατακόρυφο και στη άκρη φέρει άκρο το οποίο κόβει το πέτρωμα. Η διαφορά του με το απλό τρυπάνι είναι ότι το κοπτικό άκρο του είναι δακτυλοειδές (πυρηνολήπτης) και έτσι το κομμάτι πετρώματος που προκύπτει είναι κυλινδρικό.

Για την κοπή του δοκιμίου το πέτρωμα στερεώνεται σταθερά σε εσχάρα που βρίσκεται στην βάση της μηχανής κοπής κάτω από το κοπτικό άκρο. Στην συνέχεια το πέτρωμα και το κοπτικό άκρο έρχονται σε επαφή και ξεκινά η κοπή. Η κατακόρυφη δύναμη που είναι απαραίτητη για την κοπή των δοκιμίων ασκείται χειροκίνητα. Στην μηχανή υπάρχει κλειστό κύκλωμα νερού για την ψύξη του κοπτικού άκρου το οποίο τίθεται σε λειτουργία κατά την έναρξη της κοπής.



**Σχήμα 4.4 Εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία).**

#### **Εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής δοκιμίων πετρωμάτων.**

Μετά την κοπή των δοκιμίων σε κυλινδρικά πρέπει να διαμορφωθούν οι άκρες των κυλίνδρων αυτών, γιατί κατά το τέλος της κοπής τα δοκίμια αποχωρίζονται με σπάσιμο από τον υπόλοιπο όγκο του πετρώματος. Έτσι τα κομμάτια αυτά στις άκρες του κυλίνδρου πρέπει να κοπούν για να δημιουργηθούν επίπεδες επιφάνειες.



**Σχήμα 4.5** Εργαστηριακό δισκοπρίνο κοπής δοκιμίων πετρωμάτων.

Το κάθε δοκίμιο τοποθετείται στο μηχάνημα και στερεώνεται σταθερά, έτσι ώστε να βρίσκεται κάθετα στον άξονα περιστροφής του δίσκου. Το δοκίμιο αρχικά απέχει λίγα εκατοστά από το δίσκο. Ο δίσκος (Σχήμα 4.5) τίθεται σε κίνηση και μετακινείται με σταθερή ταχύτητα προς το δοκίμιο κόβοντας το ανώμαλο άκρο. Η ίδια διαδικασία γίνεται και για το άλλο άκρο του δοκιμίου.

Το μηχάνημα αυτό διαθέτει επίσης κλειστό κύκλωμα νερού για τη ψύξη του δίσκου.

#### **Εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων.**

Μετά την κοπή των δοκιμίων με το εργαστηριακό δισκοπρίνο, οι επιφάνειές τους δεν είναι επίπεδες, επειδή κατά την κοπή δημιουργούνται μικροσπασίματα. Επειδή για τη διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων οι επιφάνειες των δοκιμίων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λείες και οριζόντιες χρησιμοποιείται ο εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων (Σχήμα 4.6).





Σχήμα 4.6 Εργαστηριακός λειαντής.

Το δοκίμιο τοποθετείται σταθερά σε ειδική βάση που φέρει το μηχάνημα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η παραλληλότητά του με τον άξονα λείανσης, άρα και τη δημιουργία οριζόντιας επιφάνειας. Το μηχάνημα τίθεται σε λειτουργία. Ο δίσκος εφάπτεται στο δοκίμιο και λειανεί την επιφάνεια του δοκιμίου. Η μετακίνηση του δίσκου γίνεται χειροκίνητα κατά την οριζόντια διεύθυνση. Μετά από λίγες επαναλήψεις της οριζόντιας αυτής κίνησης ο δίσκος σταματά να έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο. Τότε, ο δίσκος μετακινείται χειροκίνητα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση έως ότου έρθει πάλι σε επαφή με το δοκίμιο.

Μετά από μια με δυο επαναλήψεις το δοκίμιο βγαίνει από τη μηχανή και τοποθετείται σε λεία οριζόντια επιφάνεια. Στη συνέχεια εξετάζεται η τέλεια εφαρμογή της λειανθείσας επιφάνειας με την επιφάνεια αυτή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιτευχθεί η τέλεια εφαρμογή τους και για τις δυο άκρες του δοκιμίου.

Το μηχάνημα διαθέτει επίσης κλειστό κύκλωμα νερού για τη ψύξη του δίσκου λείανσης.

## 4.4 Η μέθοδος της μονοαξονικής θλίψης

Η ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη, αποτελεί απλή και αξιόπιστη μέθοδο για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, καθώς και για τον προσδιορισμό της αντοχής των δοκιμίων. Παρόλα αυτά πρόκειται για μια καταστροφική μέθοδο μέτρησης των μεγεθών αυτών. Για την διεξαγωγή του πειράματος θλίψης, ήταν απαραίτητη η διαμόρφωση των δοκιμίων ώστε αυτά να αποκτήσουν τις κατάλληλες διαστάσεις.

Έτσι από τον κάθε κύβο προέκυπταν 9 κυλινδρικά δοκίμια, όπως περιγράφεται στην αρχή του κεφαλαίου, τα οποία κόπηκαν στην μέση. Από τα 36 πλέον δοκίμια τα 30 υποβλήθηκαν στην δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης. Τα υπόλοιπα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση άλλων μεγεθών του πετρώματος.

Στα 30 αυτά δοκίμια, μετά την κοπή τους λειάνθηκαν εκ νέου, οι καινούργιες επιφάνειες που είχαν δημιουργηθεί με τον τρόπο που αναφέρεται στην Ενότητα 4.3. Στην συνέχεια μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια με παχύμετρο τύπου Vernier. Η ακριβής μέτρηση των διαστάσεων επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας, για τον λόγο αυτό έγιναν επαναληπτικές μετρήσεις και οι τελικές διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών. Οι διαστάσεις των δοκιμίων που προέκυψαν ήταν 9x5.2cm περίπου.

### 4.4.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

Η μέθοδος αφορά στον ταχύ προσδιορισμό της ανεμπόδιστης αντοχής αδιατάρακτου δείγματος ή συνεκτικού εδάφους κατά την εφαρμογή ενός αξονικού φορτίου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η συνεκτικότητα του πετρώματος να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει τη διατήρηση της γεωμετρίας του δοκιμίου χωρίς την εφαρμογή πλευρικής πιέσεως. Η εκτέλεση της δοκιμής δεν είναι εφικτή στα μη συνεκτικά εδάφη, επειδή δεν είναι δυνατή η παρασκευή εδαφικών δοκιμίων (Αγιουτάντης, 2002).

Με τον όρο αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη εννοείται η θραύση μετά από φόρτιση ενός δείγματος σε κατάσταση φυσικής υγρασίας (U test), κατά μία μόνο κατεύθυνση (κατακόρυφη), ενώ πλευρικά μπορεί να επεκτείνεται χωρίς κανένα εξωγενή



περιορισμό. Με την δοκιμή αυτή μπορεί να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας ενός δοκιμίου, η διατμητική του αντοχή αλλά και άλλες γεωτεχνικές παράμετροι (συνοχή  $c$ , γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ ).

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε ειδική συσκευή φόρτισης (Σχήμα 4.7) του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης σε όλα τα δοκίμια αμέσως μετά τη δοκιμή των υπερήχων.



Σχήμα 4.7 Συσκευή φόρτισης MTS 1600 kN.

Κατά τη διαδικασία του πειράματος, αφού το δοκίμιο έχει μετρηθεί με ακρίβεια (0.1mm) με το παχύμετρο, εισάγεται σε ειδική θέση της θλιπτικής διάταξης. Οι διαστάσεις των δοκιμίων παρατίθενται στους πίνακες 4.1 και 4.2.

**Πίνακας 4.1 Διαστάσεις δοκιμίων πάνω διαζώματος.**

Δοκίμιο	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B
Υψος (cm)	18.63	19.69	19.47	19.31	19.74	19.54	19.74	19.54	19.46
Διάμετρος (cm)	5.260	5.248	5.292	5.265	5.207	5.235	5.290	5.252	5.225

**Πίνακας 4.2 Διαστάσεις δοκιμίων κάτω διαζώματος**

Δοκίμιο	1Γ	2Γ	3Γ	4Γ	5Γ	6Γ	1Δ	2Δ	3Δ
Υψος (cm)	19.152	19.130	19.165	19.088	19.033	18.890	18.993	19.165	19.483
Διάμετρος (cm)	5.257	5.287	5.258	5.287	5.285	5.258	5.243	5.268	5.250

Ο ρυθμός φόρτισης σε συνθήκη ελέγχου μετατόπισης (displacement control) που ασκήθηκε στο δοκίμιο ήταν της τάξης των 0.01mm/sec. Ο χρόνος της διαδικασίας δεν ξεπέρασε τα 3 λεπτά της ώρας για κάθε δοκίμιο ώστε να επέλθει η θραύση του πετρώματος. Εναλλακτικά θα ήταν δυνατόν ο ρυθμός φόρτισης να γίνεται με έλεγχο φορτίου. Για την καλύτερη όμως επεξεργασία των αποτελεσμάτων θραύσης, η φόρτιση με την μέθοδο ελέγχου μετατόπισης κρίνεται ότι είναι αποτελεσματικότερη.

Τα δεδομένα των τιμών των φορτίων και των μετατοπίσεων καταγράφηκαν από ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με την μηχανή θραύσης (Σχήμα 4.8). Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται ενδεικτικά φύλλο εργασίας με τις καταγραφές όπως αυτές δίδονται από τον Η/Υ της διάταξης. Ο τρόπος επεξεργασίας και τα αποτελέσματα από δοκιμή αυτή παρουσιάζονται στην επόμενη Ενότητα.



Σχήμα 4.8 Ολοκληρωμένο σύστημα καταγραφής δεδομένων ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης.

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα όπως αυτά δίδονται από το σύστημα καταγραφής δεδομένων που είναι συνδεδεμένο με την μηχανή θλίψης.

DASYLab - V 3.00.16						
WORKSHEET : SMT1600L						
Recording Date : 7/ 7/2006, 10:42:29						
Block Length : 1						
Delta : 1.000003 sec.						
Number of Channels : 6						
Time	Write 0	Write 1	Write 2	Write 3	Write 4	Write 5
0	25.56	-2.14844	0.579834	1.488037	-0.00458	0
1	25.57221	-1.70898	0.823975	1.492615	-0.00305	0
2	25.58289	-0.83008	1.312256	1.503296	-0.00458	0
3	25.59509	-0.48828	1.831055	1.513367	-0.00305	0
4	25.6073	0.195313	2.426147	1.51001	-0.00458	0
5	25.61493	1.171875	3.112793	1.528015	-0.00153	0
6	25.62561	1.904297	3.845215	1.534729	-0.00458	0
7	25.63782	3.125	4.699707	1.5448	-0.00458	0
8	25.64087	4.199219	5.706787	1.53595	-0.00458	0
9	25.6546	4.980469	6.698608	1.564941	-0.00305	0
10	25.66223	6.738281	7.843018	1.568298	-0.00305	0
11	25.66986	7.666016	8.972168	1.5802	-0.00458	0
12	25.67902	8.935547	10.36072	1.596069	-0.00305	0

**Πίνακας 4.3 Συνέχεια.**

13	25.6897	10.79102	11.6272	1.607056	-0.00458	0
14	25.6958	11.81641	13.1073	1.581421	-0.00305	0
15	25.70801	13.47656	14.52637	1.603088	-0.00305	0
16	25.71564	15.42969	16.17432	1.646729	-0.00305	0
17	25.72632	16.60156	17.63916	1.636353	-0.00305	0
18	25.73547	18.55469	19.34815	1.656189	-0.00305	0
19	25.74463	20.3125	20.87402	1.678467	-0.00305	0
20	25.75531	21.72852	22.59827	1.683044	-0.00305	0
21	25.76447	23.82813	24.23096	1.672363	-0.00305	0
22	25.7721	25.39063	26.00098	1.693726	-0.00305	0
23	25.78583	26.9043	27.63367	1.713867	-0.00458	0
24	25.79498	28.95508	29.41895	1.69342	-0.00458	0
25	25.80566	30.32227	31.11267	1.716614	-0.00153	0
26	25.81635	31.98242	32.86743	1.714783	-0.00305	0
27	25.82855	33.93555	34.53064	1.745605	-0.00305	0
28	25.83771	35.20508	36.14807	1.740723	-0.00305	0
29	25.85297	36.96289	37.82654	1.75293	-0.00305	0
30	25.8606	38.91602	39.39819	1.773682	-0.00458	0
31	25.8728	40.03906	41.07666	1.749573	-0.00305	0
32	25.88348	41.94336	42.5415	1.764221	-0.00305	0
33	25.89264	43.21289	44.05212	1.810303	-0.00305	0
34	25.90637	44.23828	45.41016	1.795959	-0.00458	0
35	25.914	46.14258	46.875	1.821289	-0.00305	0
36	25.92773	46.82617	48.08044	1.841736	-0.00458	0
37	25.94147	47.65625	49.36218	1.826477	-0.00305	0
38	25.95367	49.16992	50.33875	1.84082	-0.00153	0
39	25.96283	49.60938	51.3916	1.846008	-0.00305	0
40	25.97656	33.49609	52.07825	1.918335	-0.00305	0
41	25.98419	12.10938	34.95789	1.960449	-0.00458	0
42	25.99335	12.30469	19.27185	1.585388	-0.00305	0

Η πρώτη στήλη αναφέρεται στις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες γίνεται καταγραφή μετρήσεων. Από τις υπόλοιπες στήλες, για την επεξεργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι στήλες write2 (φορτίο σε kN) και write3 (μετατόπιση σε mm).

#### **4.4.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων από την δοκιμή θλίψης**

Από τον καταγραφέα της μηχανής φόρτισης προέκυψαν τα δεδομένα, τα οποία, μεταξύ άλλων, περιέχουν την παραμόρφωση του δοκιμίου και τη δύναμη που του ασκήθηκε. Γνωρίζοντας το αρχικό μήκος του δοκιμίου  $L_0$  και με συνεχείς ενδείξεις παραμορφώσεων  $L$  υπολογίστηκε η ανηγμένη παραμόρφωση του δοκιμίου,  $\epsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Η τάση υπολογίστηκε διαιρώντας το φορτίο που ασκείται σε κάθε βήμα φόρτισης με το εμβαδόν του δοκιμίου, εφόσον υπάρχουν οι τιμές της εφαρμοζόμενης δύναμης και οι διαστάσεις του δοκιμίου.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

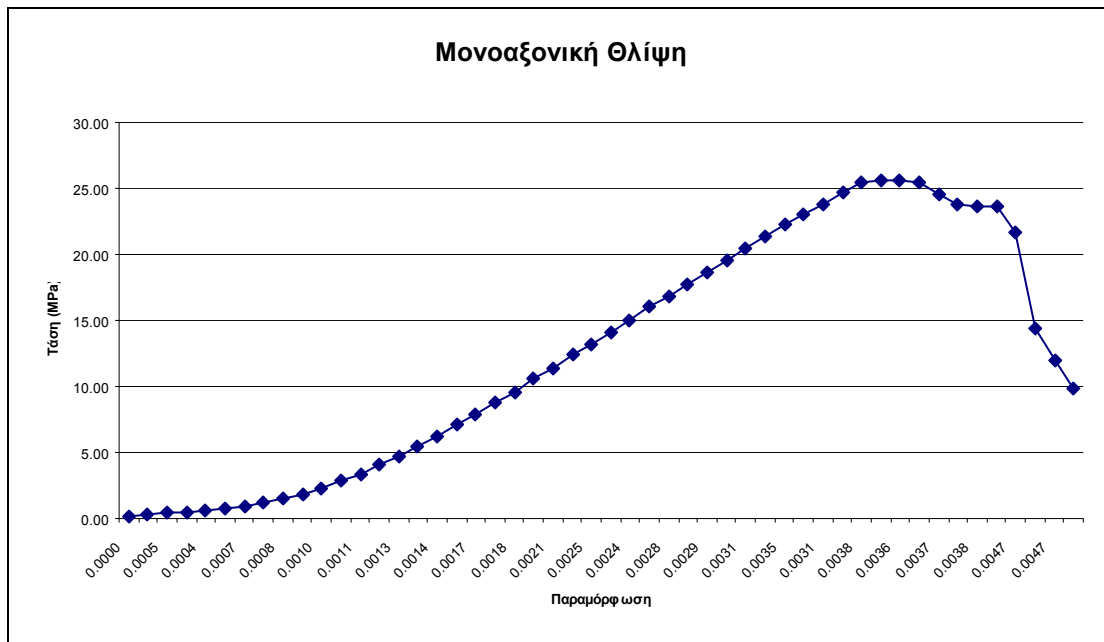
Στη συνέχεια με δεδομένα ζεύγη τιμών τάσης παραμόρφωσης ( $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ) προέκυψε το διάγραμμα (Σχήμα 4.9). Από το διάγραμμα μπορεί να προκύψει το τέμνον μέτρο ελαστικότητας. Ενδεικτικά παρατίθενται τα δεδομένα (Πίνακας 4.4) και η επεξεργασία τους ώστε να δημιουργηθεί το διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης.

**Πίνακας 4.4** Δεδομένα μονοαξονικής θλίψης.

		Δοκίμιο	1Γ1		
		Ύψος(mm)	91.28		
		Διάμετρος(mm)	52.57		
		Εμβαδό (mm <sup>2</sup> )	2169.43		
A/A	Φορτίο (kN)	Μετατόπιση (mm)	ΔL (mm)	Παραμόρφωση	Τάση (MPa)
0	0.473	3.9355	0	0	0.22
1	0.5951	3.9438	0.0082	0.0001	0.27
2	0.8392	3.9795	0.0439	0.0005	0.39
3	0.9766	3.9847	0.0491	0.0005	0.45
4	1.2817	3.9731	0.0375	0.0004	0.59
5	1.5564	4.007	0.0714	0.0008	0.72
6	2.0294	3.999	0.0635	0.0007	0.94
7	2.5177	4.01	0.0745	0.0008	1.16
8	3.2806	4.0106	0.0751	0.0008	1.51
9	4.0436	4.0143	0.0787	0.0009	1.86
10	4.9896	4.0225	0.087	0.001	2.3
11	6.1493	4.0036	0.0681	0.0007	2.83
12	7.37	4.0381	0.1025	0.0011	3.4
13	8.8196	4.0402	0.1047	0.0011	4.07
14	10.3149	4.0567	0.1212	0.0013	4.75
15	11.9476	4.0845	0.1489	0.0016	5.51
16	13.5956	4.0646	0.1291	0.0014	6.27
17	15.3809	4.0887	0.1532	0.0017	7.09
18	17.1356	4.0863	0.1508	0.0017	7.9
19	19.0125	4.0741	0.1386	0.0015	8.76
20	20.8435	4.104	0.1685	0.0018	9.61
21	22.8729	4.1296	0.1941	0.0021	10.54

Πίνακας 4.4 Συνέχεια.

22	24.7498	4.1241	0.1886	0.0021	11.41
23	26.7944	4.1611	0.2255	0.0025	12.35
24	28.6713	4.1635	0.228	0.0025	13.22
25	30.7159	4.1486	0.213	0.0023	14.16
26	32.6538	4.1571	0.2216	0.0024	15.05
27	34.7137	4.1443	0.2087	0.0023	16
28	36.6211	4.1925	0.257	0.0028	16.88
29	38.62	4.1891	0.2536	0.0028	17.8
30	40.5884	4.1962	0.2606	0.0029	18.71
31	42.5415	4.2032	0.2676	0.0029	19.61
32	44.4183	4.2148	0.2792	0.0031	20.47
33	46.3257	4.2316	0.296	0.0032	21.35
34	48.172	4.2526	0.3171	0.0035	22.2
35	49.9878	4.2322	0.2966	0.0032	23.04
36	51.7426	4.216	0.2805	0.0031	23.85
37	53.4363	4.2426	0.307	0.0034	24.63
38	55.1453	4.2783	0.3427	0.0038	25.42
39	55.6641	4.2691	0.3336	0.0037	25.66
40	55.6488	4.2664	0.3308	0.0036	25.65
41	55.1453	4.281	0.3455	0.0038	25.42
42	53.0853	4.274	0.3384	0.0037	24.47
43	51.59	4.3036	0.368	0.004	23.78
44	51.2848	4.2841	0.3485	0.0038	23.64
45	51.239	4.321	0.3854	0.0042	23.62
46	47.1039	4.368	0.4324	0.0047	21.71
47	31.0822	4.3594	0.4239	0.0046	14.33
48	25.8942	4.3662	0.4306	0.0047	11.94
49	21.225	4.3747	0.4391	0.0048	9.78



Σχήμα 4.9 Γραφική παράσταση τάσης - παραμόρφωσης.

Από την κλίση της καμπύλης υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου  $E$ , ενώ η μέγιστη τάση που παρατηρείται στο διάγραμμα είναι η αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη  $C_0$ .

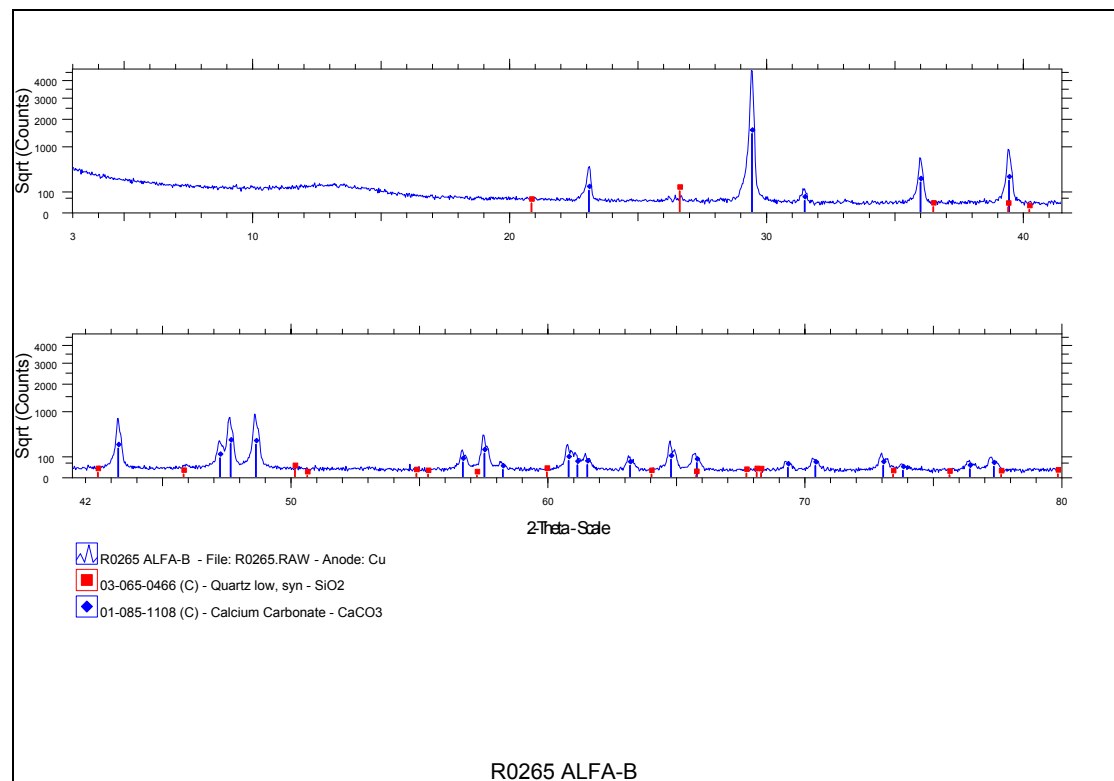
Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται συνοπτικά το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του κάθε δοκιμίου που υπολογίστηκαν με την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω.

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Δοκίμιο	1B1	2B1	3B1	4B1	5B1	6B1	7B1	8B1	9B1
Αντοχή $C_0$ (MPa)	24.62	24.71	22.69	23.3	22.01	23.77	-	25.21	25.83
$E$ (MPa)	6688	6481	7227	7369	7070	7516	-	6925	7919
Δοκίμιο	1B2	2B2	3B2	4B2	5B2	6B2	7B2	8B2	9B2
Αντοχή $C_0$ (MPa)	23.98	25.99	24.97	22.18	22.56	25.02	-	23.77	20.12
$E$ (MPa)	6401	6976	7190	6416	7429	8524	-	5874	6313
Δοκίμιο	1Γ1	2Γ1	3Γ1	4Γ1	5Γ1	6Γ1	1Δ1	2Δ1	3Δ1
Αντοχή $C_0$ (MPa)	25.66	-	27.53	-	29.95	30.21	30.75	23.08	29.62
$E$ (MPa)	8368	-	7793	-	7625	7546	8647	7724	8335
Δοκίμιο	1Γ2	2Γ2	3Γ2	4Γ2	5Γ2	6Γ2	1Δ2	2Δ2	3Δ2
Αντοχή $C_0$ (MPa)	26.47	-	32	-	30.79	36.97	17.17	40.05	40.78
$E$ (MPa)	8594	-	9589	-	7607	8702	5258	9880	10440

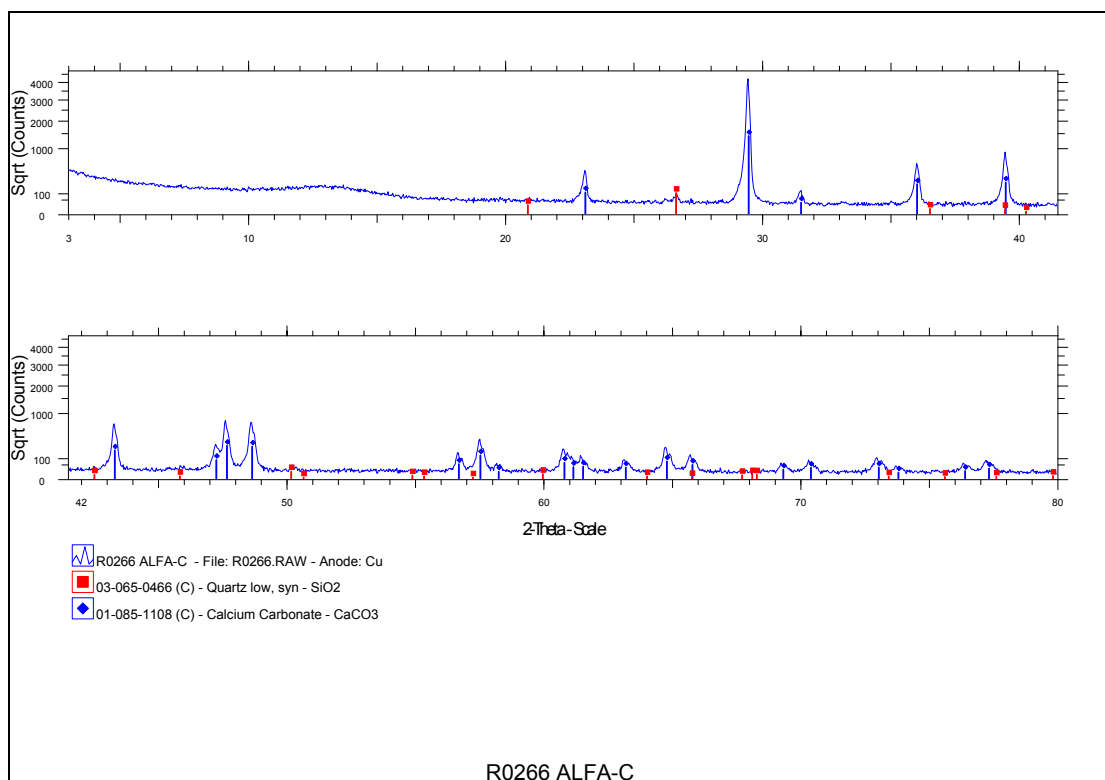
## 4.5 Μέθοδος XRD

Για τον προσδιορισμό της σύστασης των πετρωμάτων των δύο διαζωμάτων έγινε ακτινοσκοπία του υλικού αυτού. Τμήματα του υλικού των διαζωμάτων Β και Γ κονιορτοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε ειδικές θήκες οι οποίες τοποθετήθηκαν μέσα στο μηχάνημα ακτίνων Χ. Η συσκευή συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή και εξάγει το αποτέλεσμα που φαίνεται παρακάτω.



Sample name: **R0265 ALFA-B**





**Sample name: R0266 ALFA-C**

Από την ανάγνωση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το πέτρωμα Β έχει σύσταση 1% σε SiO<sub>2</sub> διοξείδιο του πυριτίου (χαλαζίας) και 99% σε CaCO<sub>3</sub> ανθρακικό ασβέστιο (ασβεστίτης). Το πέτρωμα Γ έχει σύσταση 1.7% σε SiO<sub>2</sub> διοξείδιο του πυριτίου (χαλαζίας) και 98.3% σε CaCO<sub>3</sub> ανθρακικό ασβέστιο (ασβεστίτης). Όπως φαίνεται πρόκειται για πετρώματα παρόμοιας σύστασης.

Από την στοιχειακή ανάλυση προκύπτουν για το Β τα εξής:

C	11.9%	CO <sub>2</sub>	43.5%
O	48.0%		
Si	0.5%	SiO <sub>2</sub>	1.0%
Ca	39.6%	CaO	55.5%

Ενώ για το Γ:

C	11.8%	CO <sub>2</sub>	43.2%
O	48.0%		
Si	0.8%	SiO <sub>2</sub>	1.7%
Ca	39.4%	CaO	55.1%

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το XRD του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10 Συσκευή XRD.

#### 4.6 Κατασκευή λεπτών τομών

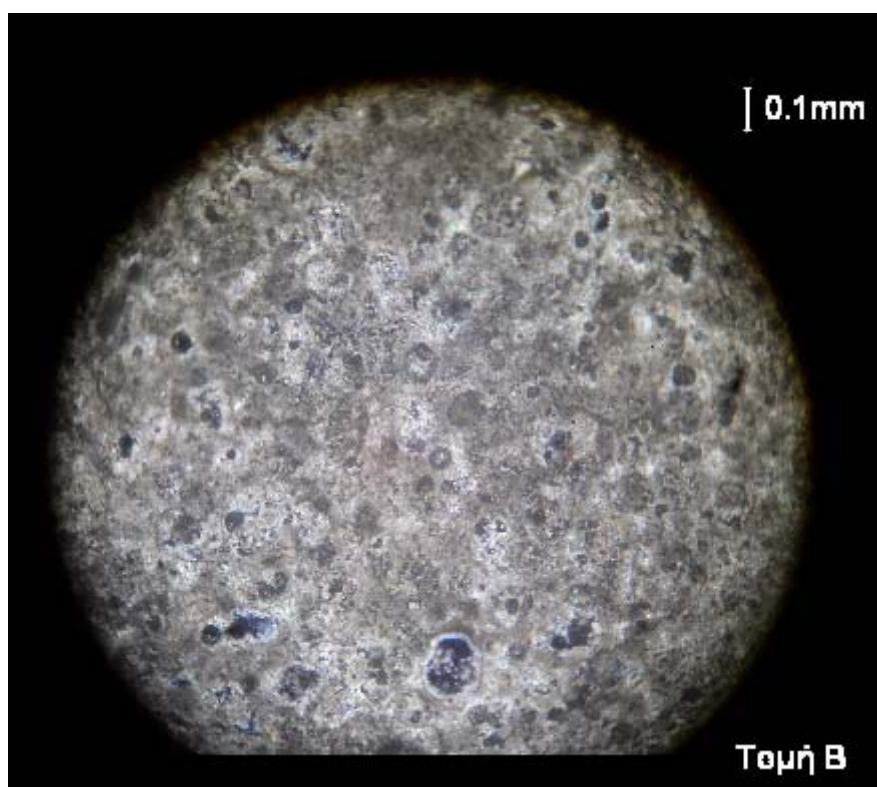
Ορυκτά, πετρώματα και διάφορα βιομηχανικά προϊόντα όπως π.χ. πυρίμαχα υλικά, κλίνκερς από την παραγωγή τσιμέντου κ.ά. προκειμένου να εξεταστούν με το πολωτικό μικροσκόπιο παρασκευάζονται υπό την μορφή ειδικών παρασκευασμάτων, των λεπτών τομών. Η παρασκευή μιας λεπτής τομής ενός στερεού γίνεται με απλό τρόπο.

Αρχικά κόβεται με ένα κατάλληλο κοπτικό μηχανήμα ένα μικρό τμήμα του υπό εξέταση σώματος σε μορφή πλακιδίου, το οποίο στη συνέχεια λειανίνεται στη μια πλευρά δια τριβής πάνω σε ένα γυάλινο πλακίδιο με τη βοήθεια λειαντικών μέσων (σμύριδα ή ανθρακοκορούνδιο) που χρησιμοποιούνται υπό μορφή σκόνης και με προσθήκη μικρής ποσότητας νερού που πολτοποιεί τη σκόνη. Η λειανθείσα επιφάνεια

στερεώνεται κατόπιν επί ενός γυάλινου πλακιδίου (διαστάσεων περίπου 3cm, 5cm και 0.1cm) με τη βοήθεια καναδικού βάλσαμου.

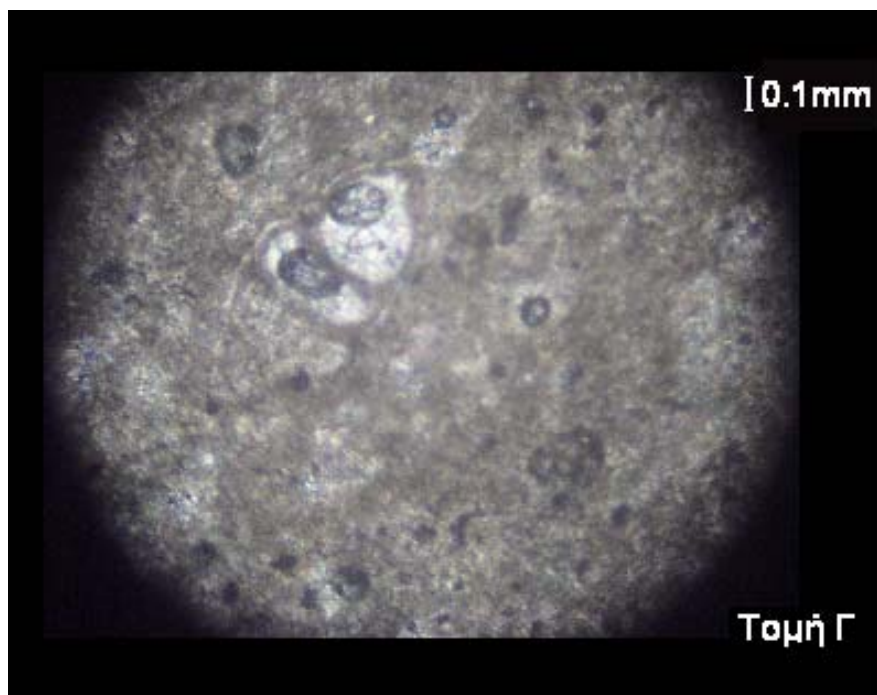
Το καναδικό βάλσαμο θερμαινόμενο ρευστοποιείται και χρησιμοποιείται σαν κολλητική στρώση, που στερεοποιείται κατά την ψύξη, μεταξύ γυάλινου πλακιδίου και πλακιδίου του δείγματος. Στη συνέχεια με την κοπή και την λείανση της ελεύθερης πλευράς του, το πλακίδιο φτάνει μέχρι το πάχος των 20 έως 40μm. Τέλος, η λειανθείσα δεύτερη αυτή επιφάνεια επικαλύπτεται με μια πολύ λεπτή διαφανή καλυπτρίδα που επικολλάται με τη βοήθεια καναδικού βάλσαμου.

Από τα δείγματα που υπήρχαν από τις δύο βαθμίδες προέκυψαν δυο λεπτές τομές οι οποίες εξετάστηκαν στο μικροσκόπιο. Οι τομές παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης και πήραν τους κωδικούς Β και Γ όπως και τα διαζώματα από όπου προέρχονται (Σχήμα 4.11 και 4.12).



Σχήμα 4.11 Τομή Β από το λατομείο Αλφά Ρεθύμνου (πάνω διαζώμα).

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται εικόνα από την τομή που κατασκευάστηκε από το πέτρωμα του πάνω διαζώματος στο οποίο φαίνονται κρύσταλλοι ασβεστίτη ενώ δεν διακρίνονται απολιθώματα και χαλαζίας.



**Σχήμα 4.12 Τομή Γ από το λατομείο Αλφά Ρεθύμνου (κάτω διάζωμα).**

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται φωτογραφία της τομής που κατασκευάστηκε από το πέτρωμα του κάτω διαζώματος στο οποίο εμφανίζονται κατά κύριο λόγο κρύσταλλοι ασβεστίτη. Στην τομή διακρίνεται απολίθωμα εντός του οποίου έχει αρχίσει μεταμόρφωση και υπάρχει δημιουργία μαρμάρου. Κρύσταλλοι χαλαζία δεν παρατηρούνται.

## **4.7 Μέτρηση πορώδους**

### **4.7.1 Θεωρητικό υπόβαθρο**

Οι όγκοι οι οποίοι μπορούν να μετρηθούν για τον υπολογισμό του πορώδους ενός πετρώματος είναι :

- Ο όγκος των πόρων του (PV)
- Ο όγκος των στερεών κόκκων που το αποτελούν (GV)
- Ο ολικός όγκος του δείγματος (BV)

Για να υπολογισθεί το πορώδες ενός πετρώματος πρέπει να είναι γνωστά δύο από τα παραπάνω μεγέθη.

Ανάλογα με το αν συνδέονται ή όχι οι πόροι του πετρώματος μεταξύ τους το πορώδες διακρίνεται σε αλληλοσυνδεδεμένο (interconnected) και απομονωμένο (isolated). Το αλληλοσυνδεδεμένο πορώδες ονομάζεται και ενεργό και με αυτή την ονομασία θα χρησιμοποιείται από δω και στο εξής. Το ενεργό πορώδες ορίζεται ως:

$$\Phi = \frac{V_2 - V_1}{V_2} \cdot 100 \quad \text{εξίσωση 4.1}$$

όπου  $V_1$ =όγκος κόκκων

$V_2$ =ολικός όγκος πετρώματος

#### 4.7.2 Πειραματική διαδικασία

Για την μέτρηση των όγκων των κόκκων ( $V_G$ ) η μέθοδος που χρησιμοποιείται βασίζεται στον νόμο του Boyle. Το ξηρό δείγμα τοποθετείται εντός δοχείου κενού αέρος γνωστού όγκου  $V_S$ . Το δοχείο συνδέεται με άλλο δοχείο γνωστού όγκο  $V_R$  το οποίο περιέχει αέριο ήλιο (He) υπό πίεση  $P_1$ . Με την εκτόνωση του αερίου στο πρώτο δοχείο αποκαθίσταται πίεση  $P_2$  στο σύστημα. Σύμφωνα λοιπόν με τον νόμο του Boyle ισχύει:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \text{εξίσωση 4.2}$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η εξίσωση 4.2 παίρνει την μορφή της εξίσωσης 4.3 από την οποία υπολογίζεται ο όγκος των κόκκων του πετρώματος.

$$P_1 V_R = P_2 (V_R + V_S - V_G) \quad \text{εξίσωση 4.3}$$

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται είναι ένα ποροσίμετρο τύπου Boyle. Αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Μεταλλικά αεροστεγή δοχεία
- Μανόμετρα ψηφιακά με διακριτική ικανότητα 0.01 bar
- Σύστημα σωλήνων και βαλβίδων
- Αντλία κενού
- Φιάλη He

Επειδή ο ακριβής προσδιορισμός του συνολικού όγκου τόσο των δοχείων όσο και του υπόλοιπου συστήματος είναι πρακτικά αδύνατο να υπολογιστούν, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Τοποθετούνται σφαίρες γνωστής διαμέτρου στο πρώτο δοχείο. Στο δοχείο αυτό δημιουργείται κενό και στην συνέχεια απομονώνεται από το υπόλοιπο σύστημα.

Το δεύτερο δοχείο, το οποίο είναι άδειο, πληρούται με ήλιο γνωστής πίεσης. Στην συνέχεια γίνεται εκτόνωση του δοχείου αυτού, στο δοχείο στο οποίο βρίσκονται οι μεταλλικές σφαίρες και σημειώνεται η ένδειξη της πίεσεως μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας στο δοχείο αυτό.

Στην συνέχεια τοποθετείται ακόμα μια σφαίρα στο δοχείο και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Μετά από επαναλήψεις της διαδικασίας προκύπτει ο Πίνακας 4.6 και κατασκευάζεται το διάγραμμα Πίεσης - Όγκου Στερεών Προτύπων από το οποίο προκύπτει η καμπύλη αναφοράς (Σχήμα 4.13).

Στην συνέχεια τα υπό προσδιορισμό δοκίμια παίρνουν την θέση των σφαιρών και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Οι μετρήσεις που προκύπτουν και η εξίσωση της καμπύλης που εξήχθη στο προηγούμενο βήμα δίνουν των όγκο των κόκκων του πετρώματος. Με την βοήθεια της εξίσωσης 4.1 προκύπτει το πορώδες του πετρώματος. Ενδεικτικά παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του πορώδους για το δείγμα 7B2B (Πίνακας 4.7) και τα αποτελέσματα για όλα τα δείγματα (Πίνακας 4.8).

**Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα μετρήσεων στερεών προτύπων.**

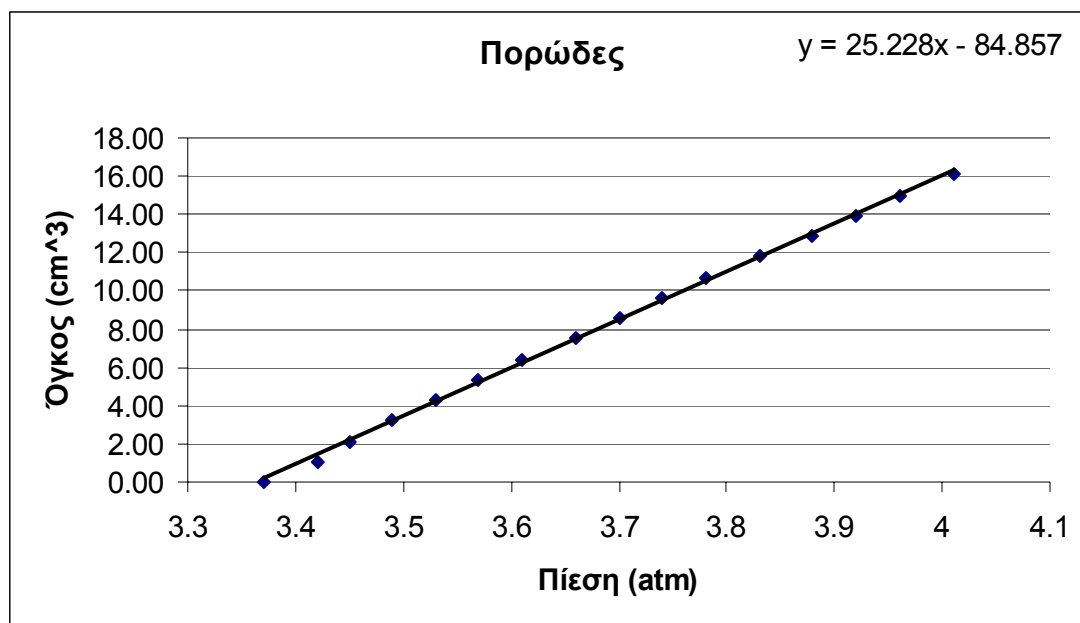
Αριθμός σφαιρών	V(cm <sup>3</sup> )	P(bar)
0	0.00	3.37
1	2.57	3.42
2	5.14	3.45
3	7.72	3.49
4	10.29	3.53
5	12.86	3.57
6	15.43	3.61
7	18.01	3.66
8	20.58	3.70
9	23.15	3.74
10	25.72	3.78
11	28.30	3.83

**Πίνακας 4.6 Συνέχεια.**

12	30.87	3.88
13	33.44	3.92
14	36.01	3.96
15	38.59	4.01

**Πίνακας 4.7 Υπολογισμός πορώδους για το δείγμα 7B2B.**

Ύψος δοκιμίου	3.7	(cm)
Διάμετρος δοκιμίου	2.59	(cm)
Όγκος Δοκιμίου (ολικός)	19.57	(cm <sup>3</sup> )
<b>Όγκος Πόρων</b>	<b>7.55</b>	(cm <sup>3</sup> )
<b><u>Πορώδες</u></b>	<b><u>38.59</u></b>	
D μεταλλικής σφαίρας	1.27	(cm)
V μεταλλικής σφαίρας	1.0725	(cm <sup>3</sup> )
Μέτρηση 1 πίεσεως δοκιμίου	3.84	(bar)
Μέτρηση 2 πίεσεως δοκιμίου	3.84	(bar)
P δοκιμίου (μέσος όρος)	3.84	(bar)
V δοκιμίου (κόκκων)	12.02	(cm <sup>3</sup> )
Εξίσωση γραφήματος	$V_{\text{ΚΟΚ}} = 25.228P_{\text{ΔΟΚ}} - 84.857$	



Σχήμα 4.13 Καμπύλη Πίεσης – Όγκου Στερεών Προτύπων.

Οι τιμές του πορώδους που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8 Πορώδες δοκιμίων.

Δείγμα	4Γ1Α	4Γ1Β	4Γ2	7Β1Α	7Β1Β	7Β2Α	7Β2Β
Μετρούμενη πίεση	4.00	3.93	4.11	3.89	3.84	3.95	3.84
Συνολικός Όγκος	21.89	22.64	27.25	21.63	19.59	24.31	19.57
Όγκος κόκκων	16.06	14.29	18.83	13.15	12.02	14.79	12.02
Πορώδες%	26.66	36.89	30.91	39.19	38.64	39.14	38.59

Το μέσο πορώδες που προκύπτει από τα 7 αυτά δείγματα φαίνεται να είναι 31% στα δείγματα Γ και 39% στα δείγματα Β.

## 4.8 Μέτρηση διαπερατότητας

Η διαπερατότητα αποτελεί ιδιότητα του πετρώματος και σχετίζεται με την ικανότητά του να άγει τα ρευστά. Το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η διαπερατότητα είναι μεγάλο, ανάλογα με το υπό μελέτη πέτρωμα. Το 1856 ο Darcy μελετώντας τη ροή νερού διαμέσου μίας στήλης άμμου κατέληξε στην εξίσωση που φέρει το όνομα του. Ο νόμος του Darcy δίνει:



$$q = -K \cdot \frac{A \cdot \Delta P}{\mu \cdot L}$$

εξίσωση 4.4

όπου,

$q$  = η παροχή του ρευστού σε ατμοσφαιρικές συνθήκες ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

$K_a$  = η διαπερατότητα του αέρα σε πορώδες μέσο (mD)

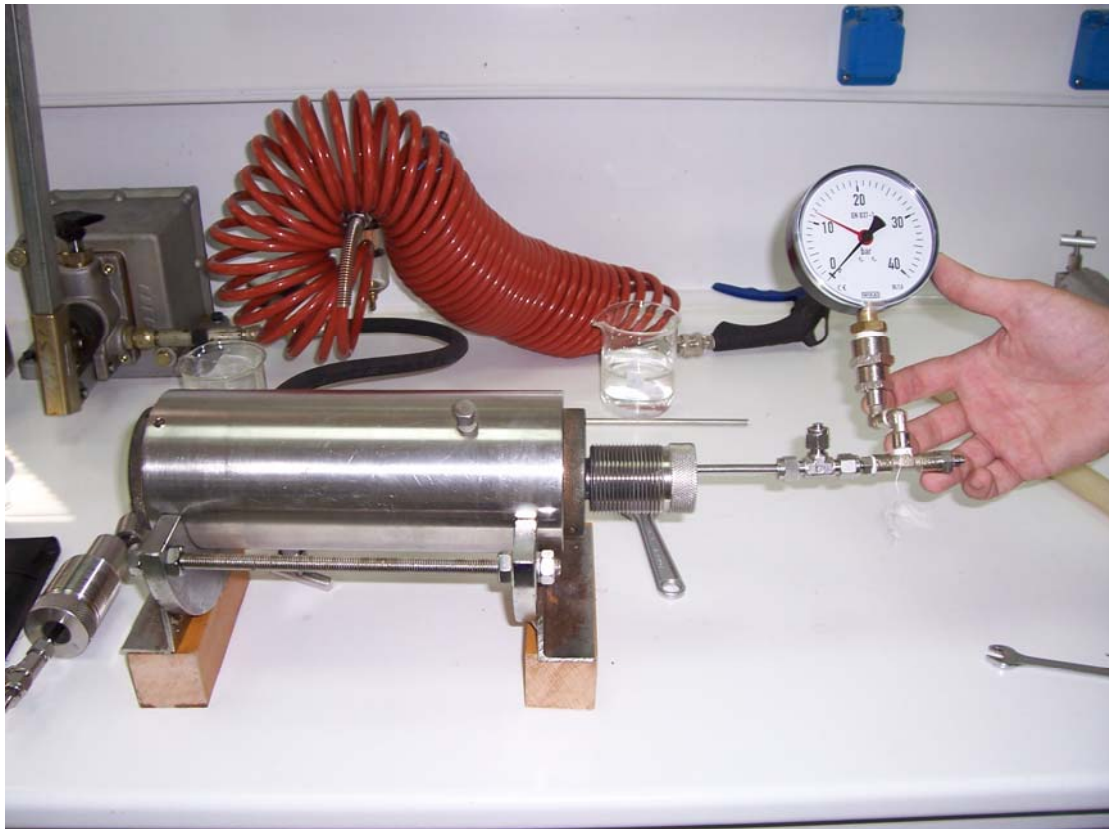
$A$  = η διατομή του δείγματος εγκάρσια στη ροή ( $\text{cm}^2$ )

$\Delta P = P_2 - P_1$ , με  $P_1$ ,  $P_2$  τις απόλυτες πιέσεις στα ανάντη και κατόντη της ροής (atm)

$\mu$  = το ιξώδες του ρευστού (cP)

$L$  = το μήκος του δείγματος (cm)

Κατά την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε κελί όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.14. Στο δοκίμιο εφαρμόστηκε πίεση υπερκειμένων για την διασφάλιση της ροής του ρευστού δια μέσω των πόρων του πετρώματος. Στη συνέχεια το κελί συνδέθηκε με αντλία σταθερής παροχής.



Σχήμα 4.14 Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση διαπερατότητας.

Στην είσοδο του κελιού υπήρχε μανόμετρο το οποίο μετρούσε την πίεση του ρευστού. Το ρευστό, διερχόμενο από το δοκίμιο κατέληγε σε ογκομετρικό σωλήνα υπό ατμοσφαιρική πίεση. Ο ογκομετρικός αυτός σωλήνας επιβεβαίωνε ότι η παροχή στην έξοδο του κελιού ήταν ίση με την παροχή της αντλίας, εξασφαλίζοντας την πλήρωση όλων των πόρων με νερό. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.9.

**Πίνακας 4.9 Πειραματικές μετρήσεις διαπερατότητας.**

Δοκίμιο	Παροχή(ml/s)	Ρεισ.(bar)	Ρεξ.(bar)	ΔΡ	Εμβαδό(cm <sup>2</sup> )	Υψος(cm)	Ιξώδες νερού(cp)
7B1B	0.017	5.5	1	-4.5	5.23	3.75	1
4Γ2	0.058	3	1	-2	5.07	5.37	1

Οι διαπερατότητες που προέκυψαν από την εξίσωση 4.4 για τα δείγματα είναι 2.66mD στο δοκίμιο 7B1B και 30.9mD στο δοκίμιο 4Γ2.

## 4.9 Μέτρηση πυκνότητας

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας μετρήθηκαν οι διαστάσεις κυλινδρικών δοκιμίων και υπολογίστηκε ο όγκος τους. Στη συνέχεια ζυγίστηκαν τα δοκίμια και

$$\text{από την } \rho = \frac{m}{V} \quad \text{εξίσωση 4.5}$$

όπου  $\rho$  : πυκνότητα πετρώματος (g/cm<sup>3</sup>)

$m$  : μάζα πετρώματος (g)

$V$  : όγκος πετρώματος (cm<sup>3</sup>)

υπολογίστηκε η πυκνότητα των δοκιμίων.

Για τον υπολογισμό του όγκου μετρήθηκαν η διάμετρος και το ύψος του δοκιμίου. Επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος προσδιορισμού του όγκου διότι μέθοδοι που απαιτούν κέρωμα του δοκιμίου και εισαγωγή του σε ογκομετρικό σωλήνα για την εύρεση του εκτοπιζόμενου ρευστού εισαγάγουν σφάλμα. Το σφάλμα το οποίο εισάγεται από την επικάλυψη του δοκιμίου με κερί αντισταθμίζει το υποθετικό μη κανονικό σχήμα των δοκιμίων. Επίσης το σφάλμα που εισάγεται με αυτό τον τρόπο

είναι αρκετά μικρό ώστε να μην επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την προσδιοριζόμενη τιμή της πυκνότητας (Στειακάκης, 2006) Η διάμετρος όπως και το ύψος του δοκιμίου μετρήθηκαν σε τρία διαφορετικά σημεία. Από αυτές τις μετρήσεις, για τον υπολογισμό του όγκου, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.10.

**Πίνακας 4.10 Πυκνότητα δοκιμίων.**

Δοκίμιο	Μάζα(g)	Διάμετρος (cm)	Ύψος(cm)	Όγκος(cm <sup>3</sup> )	Πυκνότητα(g/cm <sup>3</sup> )
7B2A	38.8734	2.57	4.70	24.31	1.60
7B2B	31.7738	2.59	3.71	19.57	1.62
7B1A	34.7797	2.53	4.32	21.63	1.61
7B1B	31.7691	2.58	3.75	19.59	1.62
4Γ1A	42.2871	2.59	4.15	21.89	1.93
4Γ1B	37.6404	2.58	4.34	22.64	1.66
4Γ2	48.3996	2.54	5.37	27.25	1.78

Τα δοκίμια Β έχουν μια μέση πυκνότητα 1.61 g/cm<sup>3</sup> και τα δοκίμια Γ 1.79 g/cm<sup>3</sup>.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Τα πειραματικά δεδομένα πεδίου στη παρούσα διατριβή, προέκυψαν από διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε σε λατομείο που λειτουργεί στη θέση Αλφάς του νομού Ρεθύμνου. Στόχος του πειράματος ήταν να μετρηθούν οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (P, S) σε δυο υλικά με παρόμοια σύσταση και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.

### 5.1 Απόκτηση σεισμικών καταγραφών

Το πείραμα που διεξήχθη στο λατομείο Αλφά περιελάμβανε διασκόπηση σε διαφορετικά επίπεδα (βαθμίδες). Το πάνω διάζωμα, Β, αποτελείτο από βραχώμαζα σύστασης 99% σε ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ) και 1% σε χαλαζία ( $\text{SiO}_2$ ). Το κάτω διάζωμα, Γ, το οποίο ήταν παρόμοιας σύστασης με το Β περιείχε ασβεστίτη σε ποσοστό 98.3% και χαλαζία 1.7%.

#### 5.1.1 Πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η περιοχή όπου πραγματοποιήθηκε η σεισμική διασκόπηση για το κάτω διάζωμα. Στην συνέχεια υπάρχει σκαρίφημα της βαθμίδας με όλες τις γραμμές μελέτης (Σχήμα. 5.1). Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις γραμμές μελέτης. Τα σημεία που εμφανίζονται κόκκινα ✕ αποτελούν τις σεισμικές πηγές, ενώ με τρίγωνο συμβολίστηκαν τα γεώφωνα. Σε κάθε γραμμή μελέτης υπήρξαν τρία σημεία σεισμικής διέγερσης και δώδεκα γεώφωνα.

Για την κατανόηση των σεισμικών καταγραφών αναφέρεται ότι οι σεισμικές πηγές που βρίσκονται Βόρεια των γραμμών έχουν ονομαστεί 01, στο κέντρο της διάταξης 02 ενώ στα Νότια 03. Έτσι για την γραμμή 3 υπάρχουν τρεις καταγραφές, οι

301, 302 και 303. Αντίστοιχα ονομάστηκαν οι γραμμές 4 και 5. Στην γραμμή 6 το σημείο 01 βρίσκεται κοντά στο μέτωπο της βαθμίδας, το 02 στο κέντρο της διάταξης ενώ το σημείο 03 ανατολικά της.




**Σχήμα 5.1** Φωτογραφία από την περιοχή διασκόπησης στο λατομείο Αλφα Ρεθύμνου.

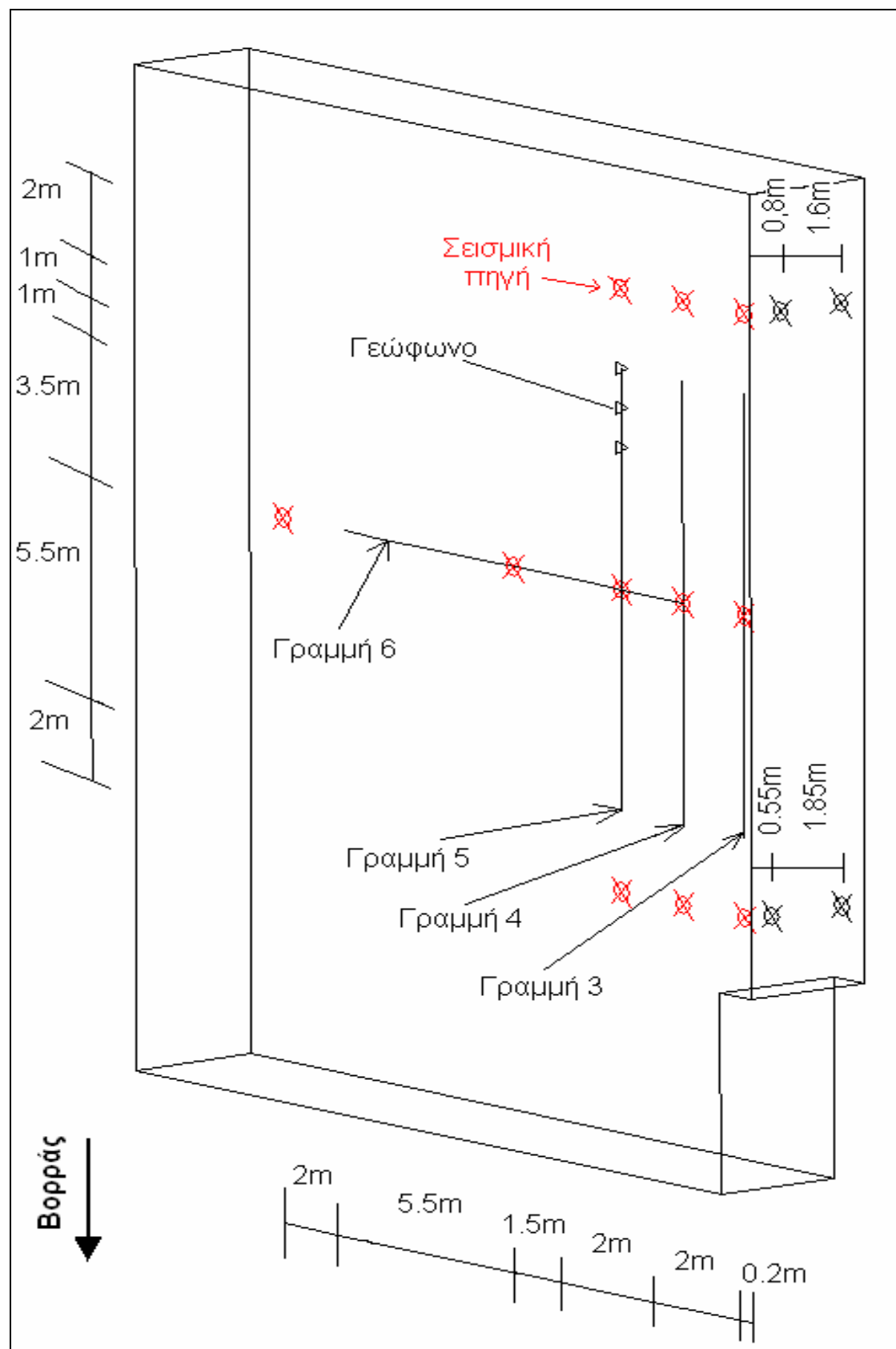
Σε κάθε καταγραφή ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Οριοθετείται το πρώτο σημείο της γραμμής μελέτης.
2. Τοποθετούνται τα 12 γεώφωνα.
3. Τοποθετείται ο σειсмоγράφος στην άκρη της γραμμής μελέτης
4. Απλώνονται τα καλώδια των γεωφώνων, έτσι ώστε σε κάθε θέση γεωφώνου να υπάρχει και μια απόληξη στην οποία συνδέεται το γεώφωνο. Η άκρη των καλωδίων αυτών συνδέεται με το σειсмоγράφο.
5. Ελέγχεται η σύνδεση της σεισμικής πηγής (βαριοπούλας) με το σειсмоγράφο.

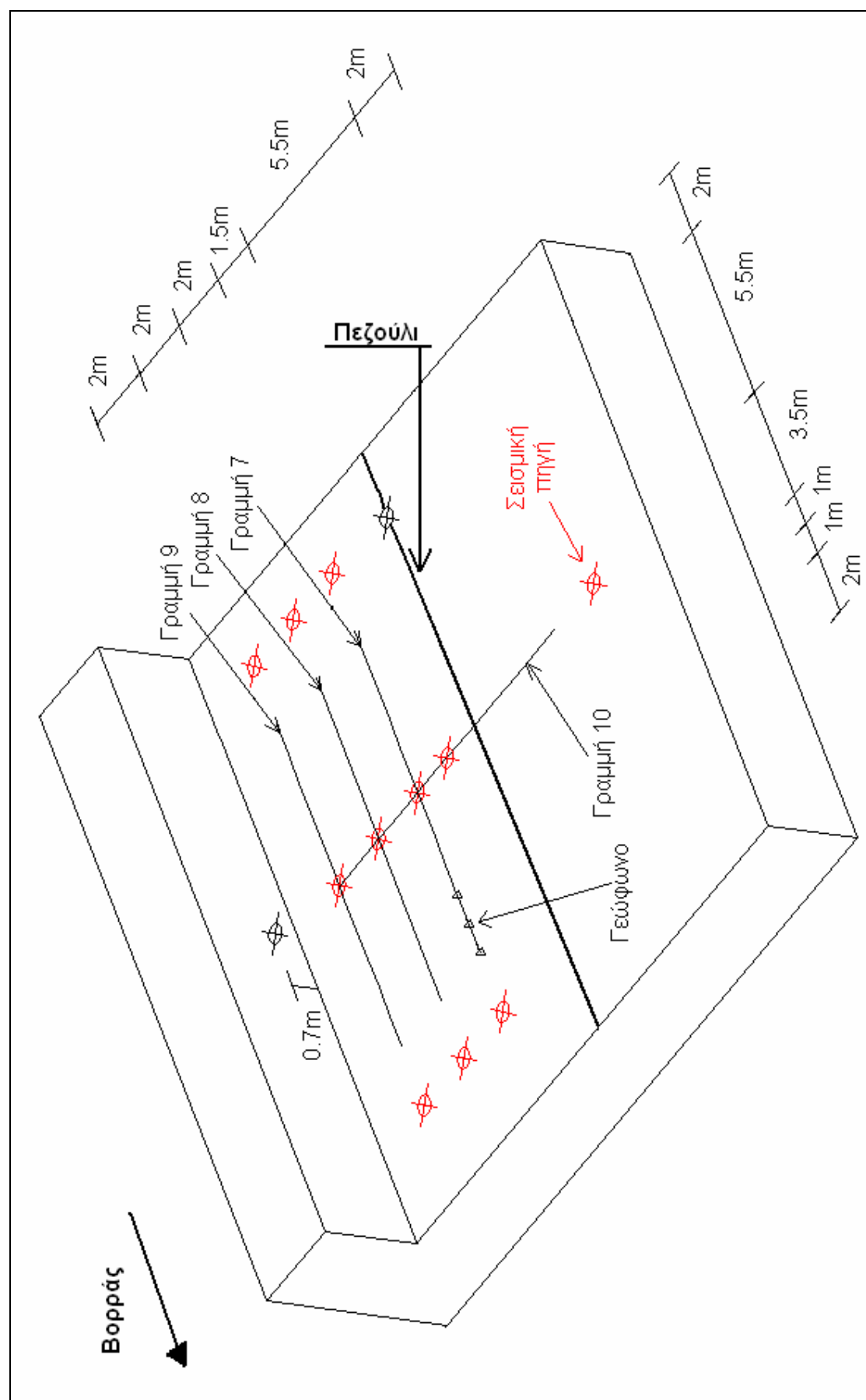
6. Η βαριοπούλα κρούεται στο σημείο που έχει επιλεγθεί και ο σειсмоγράφος καταγράφει αυτόματα τις εδαφικές ταλαντώσεις που ανιχνεύουν τα γεώφωνα.
7. Η καταγραφή αποθηκεύεται στο φορητό υπολογιστή.

Για την μέτρηση των P κυμάτων η ισαπόσταση γεωφώνων είναι 1m, η ισαπόσταση των γραμμών μελέτης 3, 4, 5 είναι 2m, οι σεισμικές πηγές είναι 2m εκατέρωθεν της έκαστης γραμμής ενώ υπάρχει και μια πηγή στο κέντρο της κάθε γραμμής (Σχήμα 5.2). Η γραμμή 3 βρίσκεται 0.2m από το μέτωπο της βαθμίδας. Η γραμμή έξι ξεκινάει 2.2m από το μέτωπο και περνάει κάθετα από το κέντρο των γραμμών 4 και 5 ενώ οι ισαποστάσεις γεωφώνων και πηγών είναι οι ίδιες.

Για την μέτρηση των S κυμάτων η διάταξη παρέμεινε η ίδια, αλλάζοντας τον τύπο των γεωφώνων και την θέση των σεισμικών πηγών. Η δημιουργία εγκαρσίων κυμάτων επιτεύχθηκε με κρούση της βαριοπούλας στην κατακόρυφη πλευρά του μετώπου και σε διαφορετικές αποστάσεις από το επίπεδο της βαθμίδας. Συγκεκριμένα υπήρξαν τέσσερις σεισμικές πηγές για τις γραμμές 3, 4 και 5. Στην γραμμή 6 δεν μετρήθηκε ταχύτητα κυμάτων S. Οι σεισμικές αυτές πηγές συμβολίστηκαν με ,  όπως φαίνονται στο σχήμα 5.1. Η θέση των πηγών είναι 0.55m και 2.4m πιο χαμηλά από την επιφάνεια της βαθμίδας και 2m βορειότερα των γραμμών μελέτης. Ενώ οι υπόλοιπες δύο πηγές βρίσκονται 2m νοτιότερα των γραμμών και 0.8m η μια και 2.4m η άλλη από το επίπεδο μελέτης. Οι καταγραφές αυτές ονομάστηκαν αντίστοιχα 011, 012, 031 και 032 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1 Σκαρίφημα του κάτω διαζώματος.



Σχήμα 5.2 Σκαρίφημα του πάνω διαζώματος.



Στο πάνω διάζωμα, Γ (Σχήμα 5.2) , υπάρχουν 4 γραμμές μελέτης από τις οποίες οι 7, 8 και 9 είναι μεταξύ τους παράλληλες με ισαπόσταση 2m. Κάθετα σε αυτές υπήρχε η γραμμή 10 η οποία ξεκινούσε από το κέντρο της γραμμής 7. Η ισαπόσταση γεωφώνων και ο αριθμός τους παρέμεινε ίδιος. Η πηγή τοποθετήθηκε σε ανάλογες θέσεις με το κάτω διάζωμα. Για τις γραμμές 7, 8, 9 το σημείο 01 βρισκόταν βόρεια της γραμμής, το 03 νότια και το 02 στο κέντρο. Για τη γραμμή 10 το σημείο 01 ήταν κοντά στο μέτωπο.

Για την καταγραφή των ταχυτήτων των κυμάτων S οι θέσεις της πηγής δεν διακρίνονται εύκολα. Αυτές βρίσκονταν σε ένα πεζούλι το οποίο ήταν ανατολικότερα, παράλληλα και 20cm χαμηλότερα από τις γραμμές μελέτης. Για τη γραμμή 10, η πηγή ήταν στο πόδι της επόμενης βαθμίδας σε ύψος 70cm.

### **5.1.2 Σεισμική πηγή, γεώφωνα και καταγραφικό όργανο**

Ο απαραίτητος εξοπλισμός για την πραγματοποίηση της σεισμικής διασκόπησης περιελάμβανε ένα δωδεκακάναλο σειсмоγράφο, μια σεισμική πηγή, 12 γεώφωνα για την καταγραφή των P και 12 για την καταγραφή των S κυμάτων και ένα φορητό υπολογιστή.

Σε κάποιες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε μια σιδερένια πλάκα διαστάσεων 20x20cm πάνω στην οποία χτυπούσε η βαριοπούλα. Η πλάκα αυτή χρησιμοποιήθηκε σε σημεία όπου δεν υπήρχε καλή επαφή μεταξύ της βαριοπούλας και του πετρώματος. Επίσης για τον προσδιορισμό των αποστάσεων χρησιμοποιήθηκαν μετροταινίες των 50m και των 30m.

#### **5.1.2.1 Καταγραφικό όργανο**

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε φορητός 12-κάναλος σειсмоγράφος GEODE της Geometrics (Σχήμα 5.3), ο οποίος πραγματοποιεί ψηφιακή καταγραφή των σεισμικών δεδομένων, τα οποία αποθηκεύονται με ψηφιακή μορφή στον σκληρό δίσκο του φορητού υπολογιστή. Ο σειсмоγράφος ήταν συνδεδεμένος μέσω των γεωφώνων (Σχήμα 5.4) με δύο καλώδια 12 απολήξεων.



Σχήμα 5.3 Σεισμογράφος GEODE.



Σχήμα 5.4 Γεώφωνα που χρησιμοποιήθηκαν στις σεισμικές διασκοπήσεις.

### 5.1.2.2 Σεισμική πηγή

Ως πηγή των σεισμικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα σφυρί 5kg (sledgehammer), το οποίο χτύπαγε μια μεταλλική πλάκα που τοποθετούνταν στη θέση της πηγής. Σε πολλές περιπτώσεις, η πλάκα ήταν περιττή και το σφυρί χτυπούσε απ' ευθείας το έδαφος. Πρόκειται για μια απλή σεισμική πηγή που παράγει κύματα με κτυπήματα του εδάφους.

### 5.1.2.3 Γεώφωνα

Η εδαφική κίνηση που προκαλείται από την πηγή γίνεται αισθητή από τα γεώφωνα. Στη διασκόπηση χρησιμοποιήθηκαν δυο είδη γεωφώνων ανάλογα με το αν ήταν επιθυμητό να καταγραφούν P ή S κύματα. Για την ανίχνευση των P κυμάτων χρησιμοποιήθηκαν 12 γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας με ιδιοσυχνότητα 4.5Hz. Για την ανίχνευση των S κυμάτων χρησιμοποιήθηκαν 12 γεώφωνα οριζόντιας συνιστώσας ιδιοσυχνότητας 14Hz. Η ισαπόσταση των γεωφώνων ήταν 1m.

Για την τοποθέτηση των γεωφώνων στον υπό μελέτη σχηματισμό, κατά κανόνα, ανοίγονται οπές μέσα στις οποίες εφαρμόζεται η ακίδα του γεωφώνου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν ήταν δυνατή η όρυξη των οπών. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν ειδικά διαμορφωμένες μεταλλικές πλάκες (Σχήμα 5.5) οι οποίες εφάπτονταν με το έδαφος και έφεραν ειδική υποδοχή για τα γεώφωνα. Οι πλάκες αυτές έχουν κατασκευαστεί από το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει δυνατότητα όρυξης οπών.

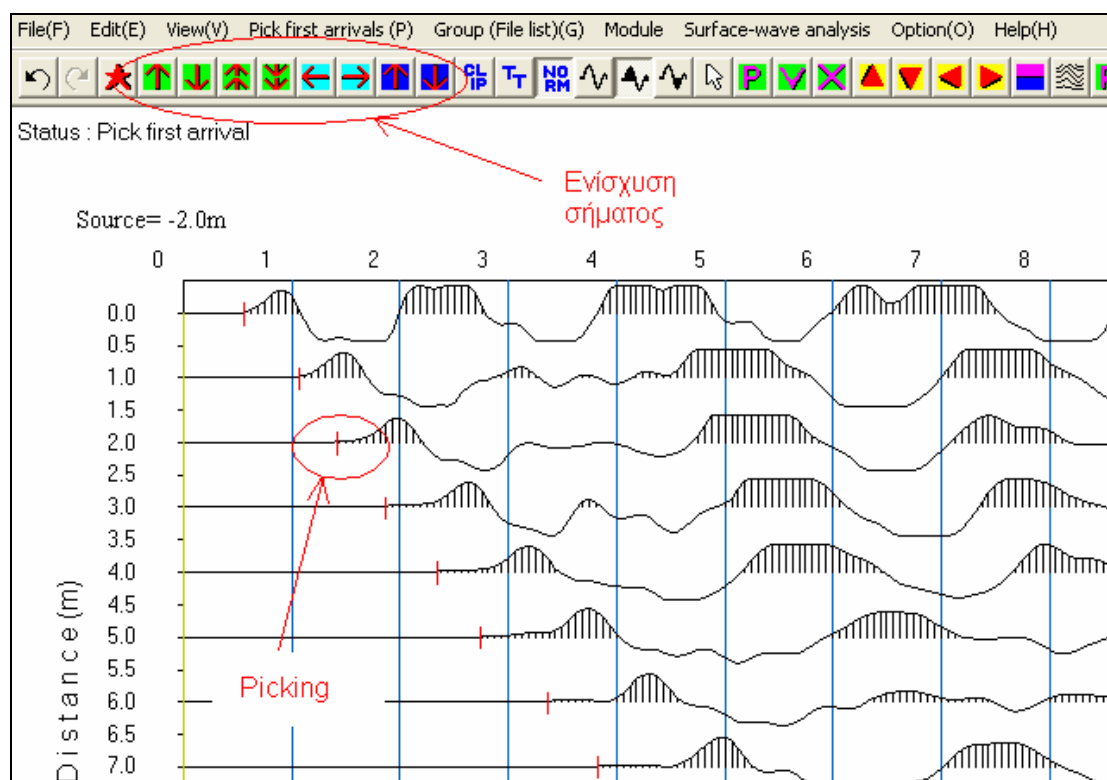


Σχήμα 5.5 Μεταλλική πλάκα.

## 5.2 Μέθοδος επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων της σεισμικής διασκόπησης έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος SeisImager. Με το υποπρόγραμμα PickWin του λογισμικού SeisImager βρέθηκαν οι χρόνοι των πρώτων αφίξεων του σεισμικού κύματος σε κάθε γεωφώνο. Βάσει των χρόνων και της απόστασης του κάθε γεωφώνου από τη σεισμική πηγή, υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος στον υπό μελέτη σχηματισμό.

Ανοίγοντας το πρόγραμμα επιλέγεται (File → SEG2 file → Open SEG2 file) το αρχείο. Στην συνέχεια επειδή ο σειсмоγράφος είναι 12-κάναλος από την επιλογή View → # number of traces shown επιλέγεται ο αριθμός 12.

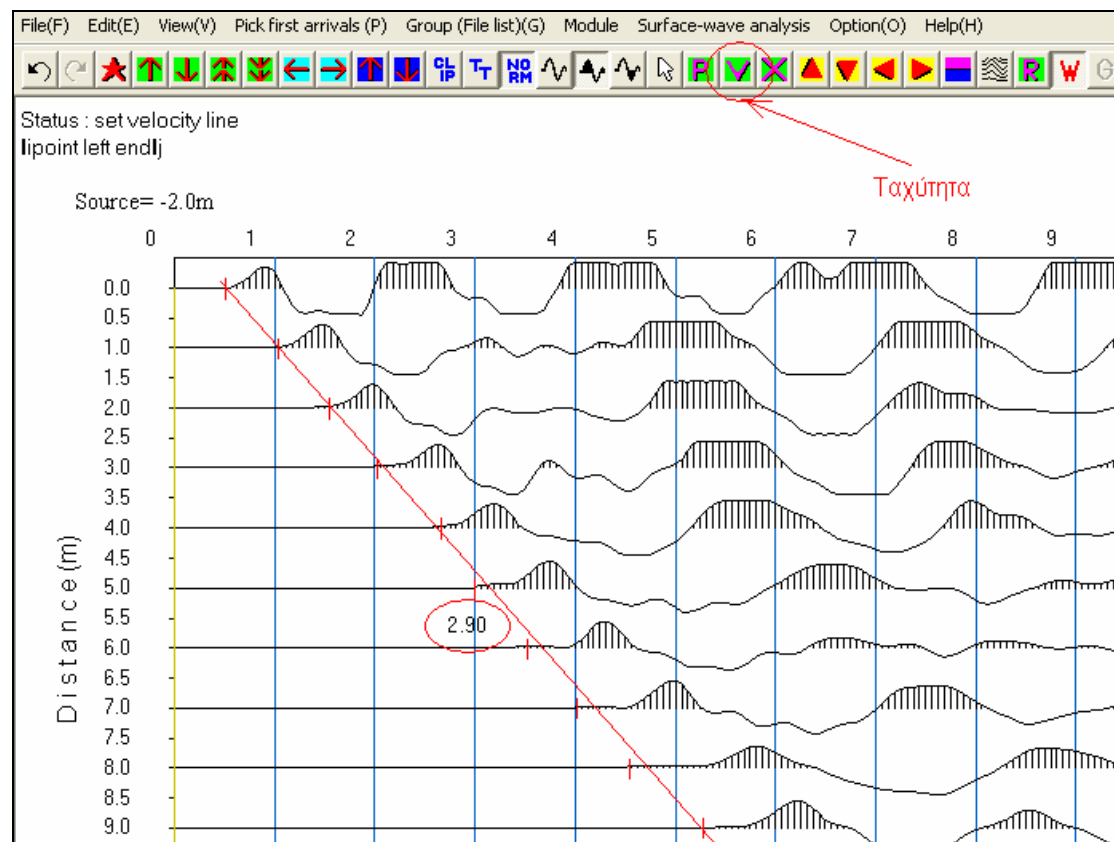


Σχήμα 5.6 Σεισμογράμματα. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος (msec) και στον κατακόρυφο η ισαπόσταση των γεωφώνων (m).

Στην συνέχεια για κάθε σεισμογράμματα επιλέχθηκε το σημείο στο οποίο αρχίζει η καταγραφή του κάθε γεωφώνου “picking” πατώντας αρχικά το εικονίδιο που έχει πάνω του το γράμμα P στην γραμμή εργαλείων για να εκκινήσει η διαδικασία (Σχήμα 5.6). Για να εντοπιστεί καλύτερα το σημείο στο οποίο αρχίζει η καταγραφή,

χρησιμοποιούνται οι επιλογές του προγράμματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλα τα γεώφωνα και για κάθε γραμμή μελέτης.

Το σήμα που καταγράφεται από το σειсмоγράφο (σεισμογράμμα) έχει ημιτονοειδή μορφή και μπορεί να αρχίζει με θετική ή αρνητική φάση. Από επιλογή του προγράμματος είναι δυνατόν να τονιστεί η θετική ή αρνητική φάση των σεισμογραμμάτων αυτών. Στο σχήμα 5.8 έχει επιλεγεί να τονιστεί η θετική φάση του σήματος, ενώ στο σχήμα 5.9 η αρνητική. Η επιλογή αυτή γίνεται για την ευκολότερη αναγνώριση των πρώτων αφίξεων.



Σχήμα 5.7 Εύρεση ταχύτητας.

Στην συνέχεια για τον υπολογισμό της ταχύτητας υπάρχουν δυο τρόποι. Ο πρώτος τρόπος ο οποίος είναι πιο εύκολος και είναι αυτός που ακολουθήθηκε είναι από επιλογή του προγράμματος (Σχήμα 5.7). Επιλέγεται η ευθεία η οποία να περνά από τα περισσότερα σημεία. Στην συνέχεια με δεξί κλικ από το ποντίκι το πρόγραμμα εξάγει μια τιμή δίπλα στην καμπύλη (Σχήμα 5.7), η οποία δείχνει την ταχύτητα διάδοσης του κύματος σε km/sec.

Στην επεξεργασία με τον δεύτερο τρόπο αποθηκεύονται οι πρώτες αφίξεις σε αρχείο. Στο αρχείο αυτό υπάρχουν οι χρόνοι των πρώτων αφίξεων και οι αποστάσεις των γεωφώνων από την σεισμική πηγή. Εάν οι τιμές αυτές υψωθούν στο τετράγωνο και παρασταθούν σε διάγραμμα απόστασης-χρόνου προκύπτει το σχήμα 5.8. Η ρίζα της κλίση της καμπύλης, είναι η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Από την προβολή της εξίσωσης στο γράφημα γίνεται κατανοητό ότι η μορφή της είναι τύπου  $y=ax+\beta$  και η  $\sqrt{a}$  συμπίπτει με την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

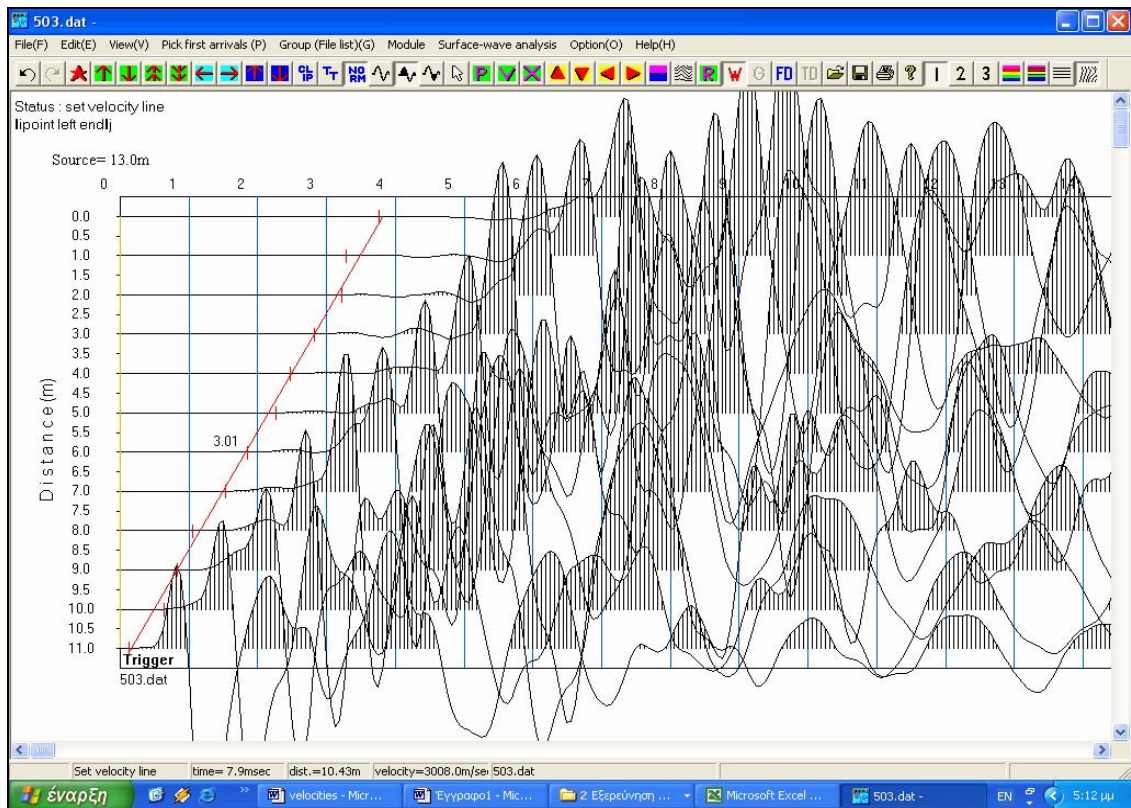


Σχήμα 5.8 Εύρεση της ταχύτητας με την δεύτερη μέθοδο για την καταγραφή 5032.

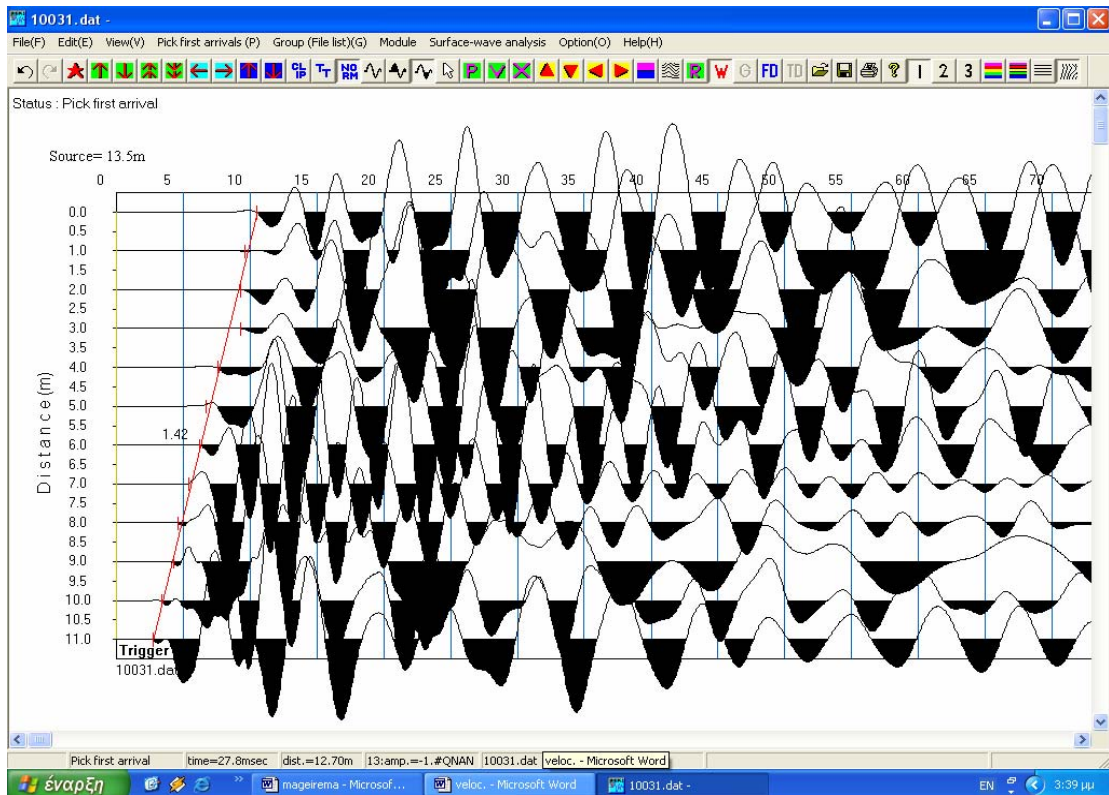
Στην ουσία πρόκειται για την ίδια μέθοδο επεξεργασίας με την διαφορά ότι η καλύτερη ευθεία βρίσκεται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων στην δεύτερη μέθοδο, ενώ στην πρώτη γίνεται μια προσέγγιση. Η διαφορά για παράδειγμα της καταγραφής 5032 είναι μόλις 60m/sec και επομένως επιλέγεται η πρώτη διαδικασία για οικονομία χρόνου.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια καταγραφή διαμήκων κυμάτων P και μια καταγραφή εγκάρσιων κυμάτων S. Όλες οι καταγραφές που επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα PickWin παρουσιάζονται στο παράρτημα.





Σχήμα 5.9 Καταγραφή διαμήκων κυμάτων P.



Σχήμα 5.10 Καταγραφή εγκάρσιων κυμάτων S.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι ταχύτητες όπως αυτές υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα SeisImager.

**Πίνακας 5.1 Ταχύτητες σεισμικών κυμάτων.**

Γραμμή	Καταγραφή	Ταχύτητα P (m/sec)	Καταγραφή	Ταχύτητα S (m/sec)	$V_p/V_s$
3	301	2930	3011	1790	1.64
			30111	1790	1.64
			3012	1860	1.58
	302	2930			
	303	2930	3031	1750	1.67
			3032	1780	1.65
4	401	2910	4011	1730	1.68
			4012	1710	1.70
	403	2900	4032	1800	1.61
5	501	2900	5011	1850	1.57
			5012	1840	1.58
	502	2930			
	503	3008	5031	1770	1.70
			5032	1730	1.74
6	601	2920			
	602	2870			
	603	3030			
7	701	2330			
	702	2290			
8	803	2480	8031	1380	1.80
9	901	2510			
	902	2460			
	903	2460			
10			10031	1420	

Στον Πίνακα 5.1 λείπουν κάποιες τιμές σεισμικών ταχυτήτων. Οι τιμές αυτές δεν υπολογίστηκαν επειδή οι καταγραφές της σεισμικής διασκόπησης ήταν κακές και η απόκλιση τους από το μέσο όρο ήταν μεγάλη.

Η μεγαλύτερη παρατηρούμενη ταχύτητα των P σεισμικών κυμάτων του κάτω διαζώματος είναι 3030m/sec και η μικρότερη 2870m/sec. Για τα S κύματα η μεγαλύτερη ταχύτητα είναι 1860m/sec ενώ η μικρότερη 1710m/sec. Για το πάνω διάζωμα η μεγαλύτερη παρατηρούμενη ταχύτητα των P σεισμικών κυμάτων είναι 2510m/sec και η μικρότερη 2290m/sec. Για τα S κύματα υπάρχουν μόνο δυο ταχύτητες. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία απόκτησης σεισμικών δεδομένων εγκαρσίων κυμάτων για το πάνω διάζωμα.

Η πειραματική διάταξη στις γραμμές μελέτης 6 και 10 τοποθετήθηκε κάθετα στις υπόλοιπες για να εξεταστεί πιθανή ανισοτροπία του πετρώματος. Η ταχύτητα που



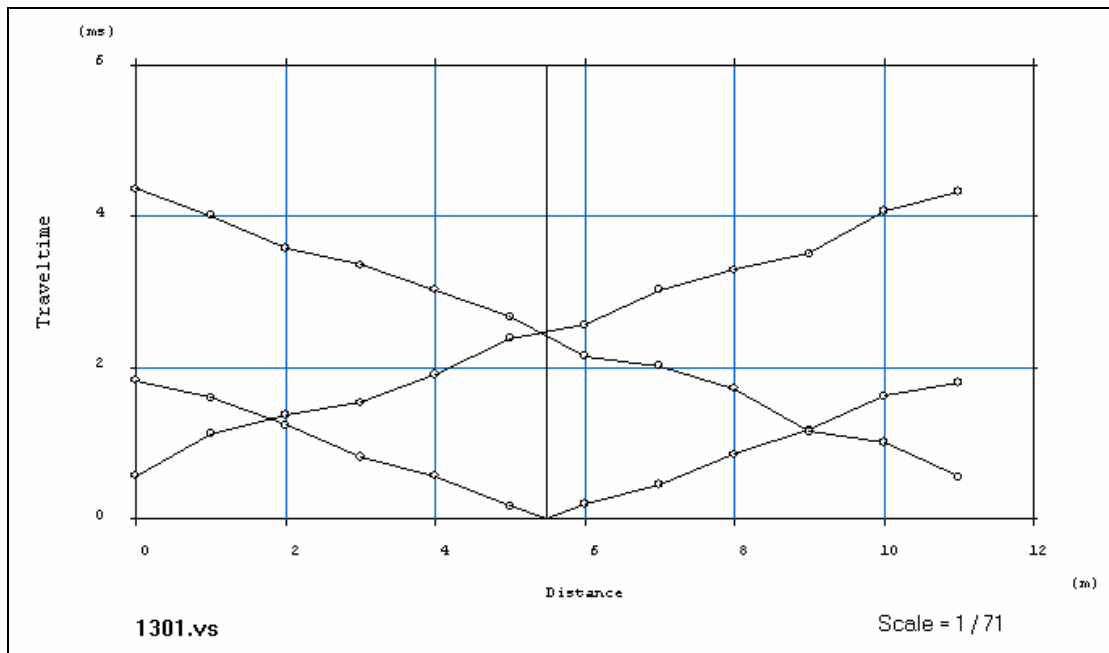
υπολογίστηκε για τα P κύματα στη γραμμή 6 δεν διαφέρει από τις υπόλοιπες και επομένως δεν συμπεραίνεται ανισοτροπία του πετρώματος. Για τη γραμμή αυτή δεν ήταν εφικτή καταγραφή εγκαρσίων κυμάτων S. Για τη γραμμή 10 αν και υπάρχουν καταγραφές κυμάτων P δεν ήταν δυνατή η επεξεργασία τους και επομένως δεν προκύπτει κάποιο συμπέρασμα. Στο πάνω διάζωμα υπολογίστηκαν μόνο δυο ταχύτητες εγκαρσίων κυμάτων S και η σύγκρισή τους για την ύπαρξη ανισοτροπίας είναι αδόκιμη.

Για κάθε γραμμή μελέτης υπήρξαν τρεις καταγραφές και η κάθε καταγραφή περιελάμβανε δώδεκα σειсмоγράμματα. Από τις καταγραφές της κάθε γραμμής προέκυψαν τρεις καμπύλες πρώτων αφίξεων. Αν οι καμπύλες αυτές προβληθούν σε διάγραμμα απόστασης – χρόνου προκύπτει το δρομοχρονικό διάγραμμα του σχήματος 5.11. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).

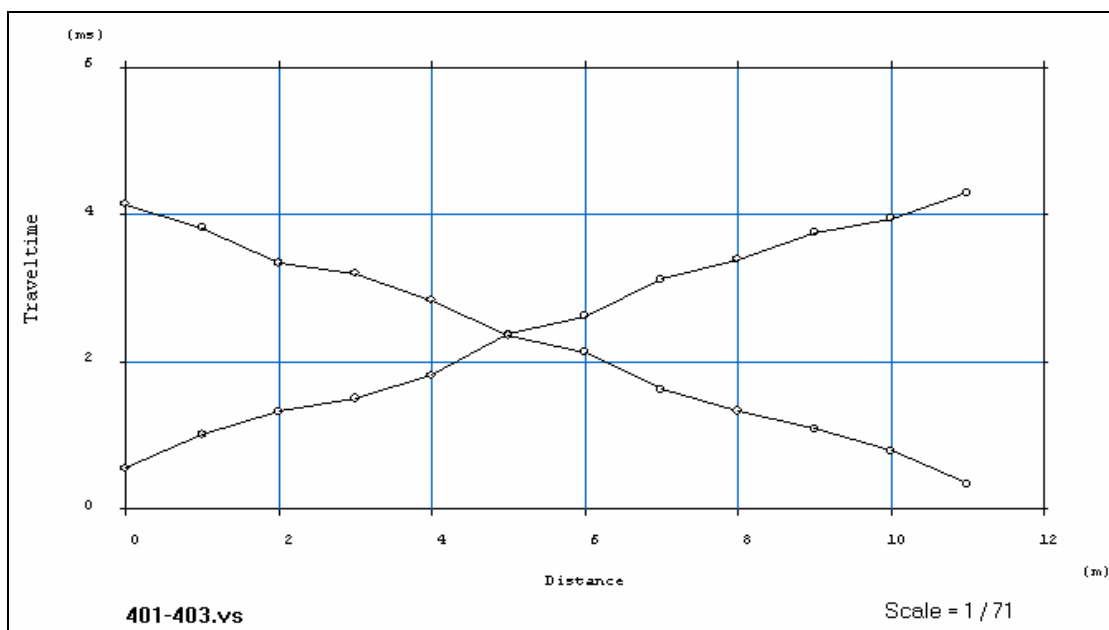
Για τις καταγραφές στα σημεία 01, το μηδέν του οριζόντιου άξονα συμπίπτει με το πρώτο γεώφωνο ενώ στα 11m υπάρχει το δωδέκατο γεώφωνο και η κλίση της καμπύλης δίνει την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

Για τις καταγραφές 03 το πρώτο γεώφωνο αντιστοιχεί σε απόσταση 11 m ενώ το τελευταίο γεώφωνο βρίσκεται στο 0 του οριζόντιου άξονα. Η κλίση της καμπύλης είναι αρνητική και είναι επίσης η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κατά απόλυτη τιμή.

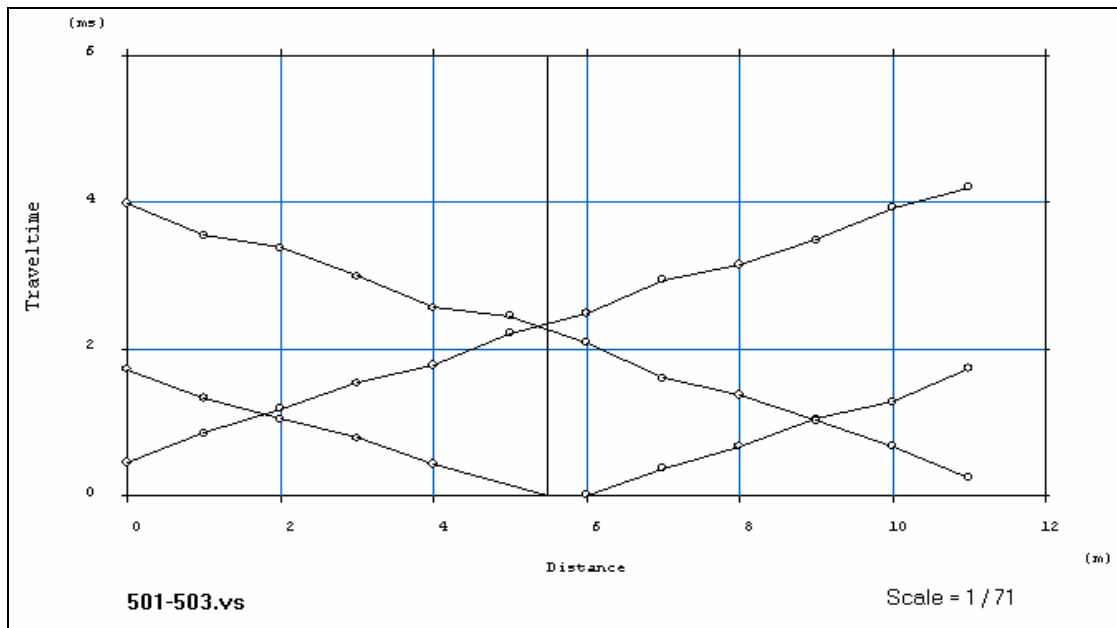
Για τις καταγραφές στα σημεία 02 το κεντρικό σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στο κέντρο της διάταξης. Από το σημείο αυτό εκκινούν δύο καμπύλες με παρόμοια αλλά αντίθετου πρόσημου κλίση. Η κλίση τους κατά απόλυτη τιμή δίδει τις αντίστοιχες τιμές ταχυτήτων. Στα σχήματα 5.11 – 5.17 παρουσιάζονται τα δρομοχρονικά διαγράμματα των διαμήκων κυμάτων.



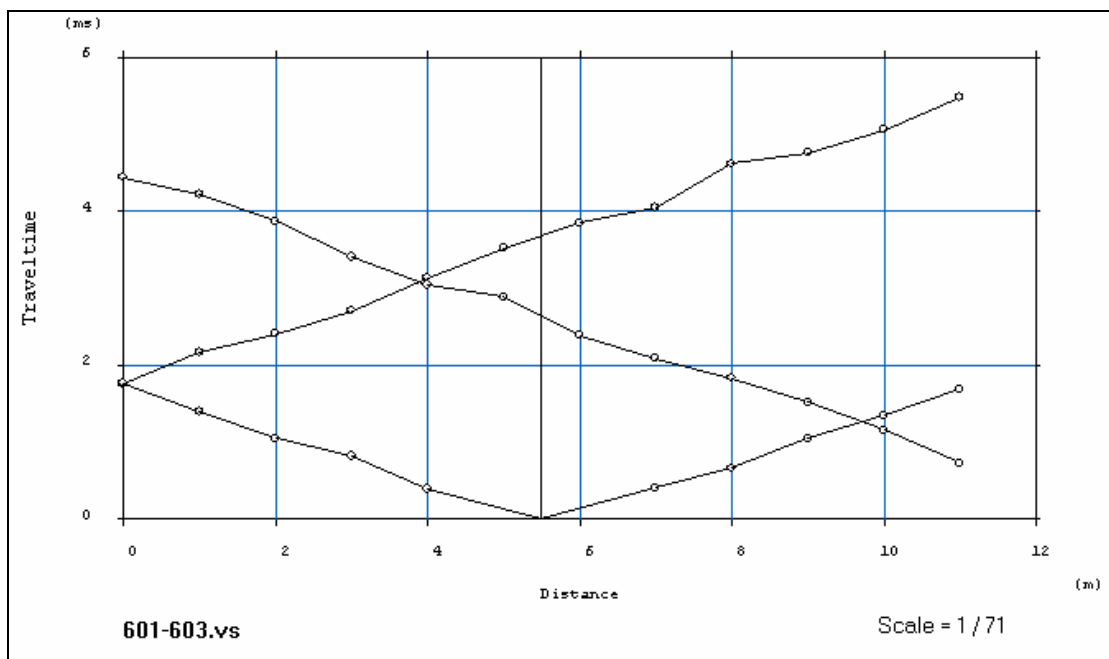
Σχήμα 5.11 Δρομοχρονικό διάγραμμα γραμμής μελέτης 3. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).



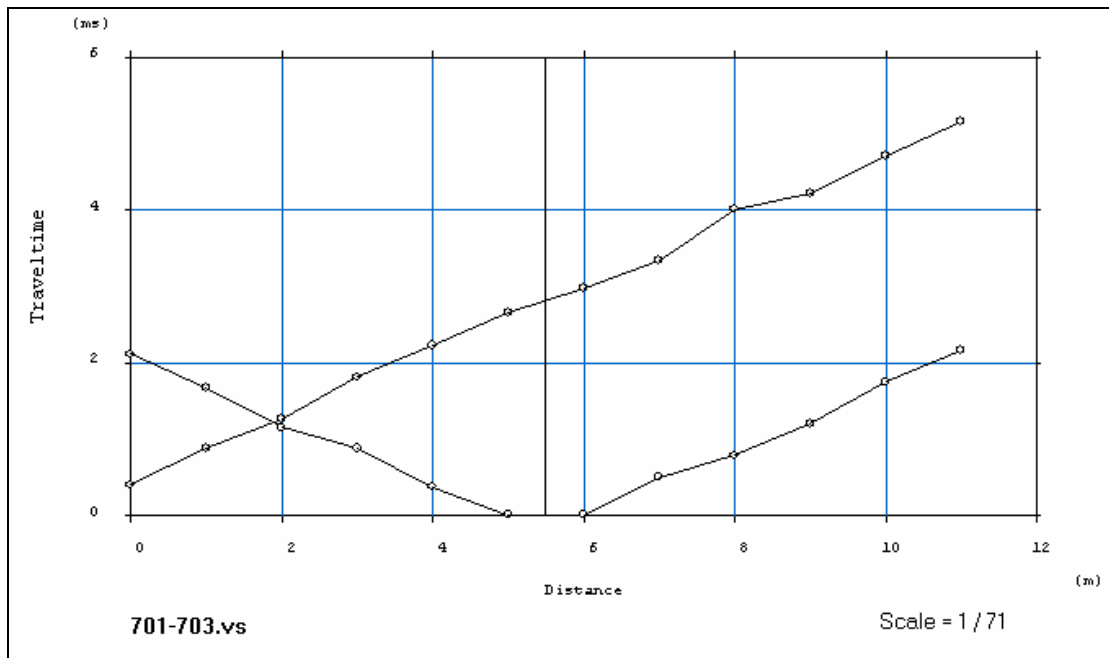
Σχήμα 5.12 Δρομοχρονικό διάγραμμα γραμμής μελέτης 4. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).



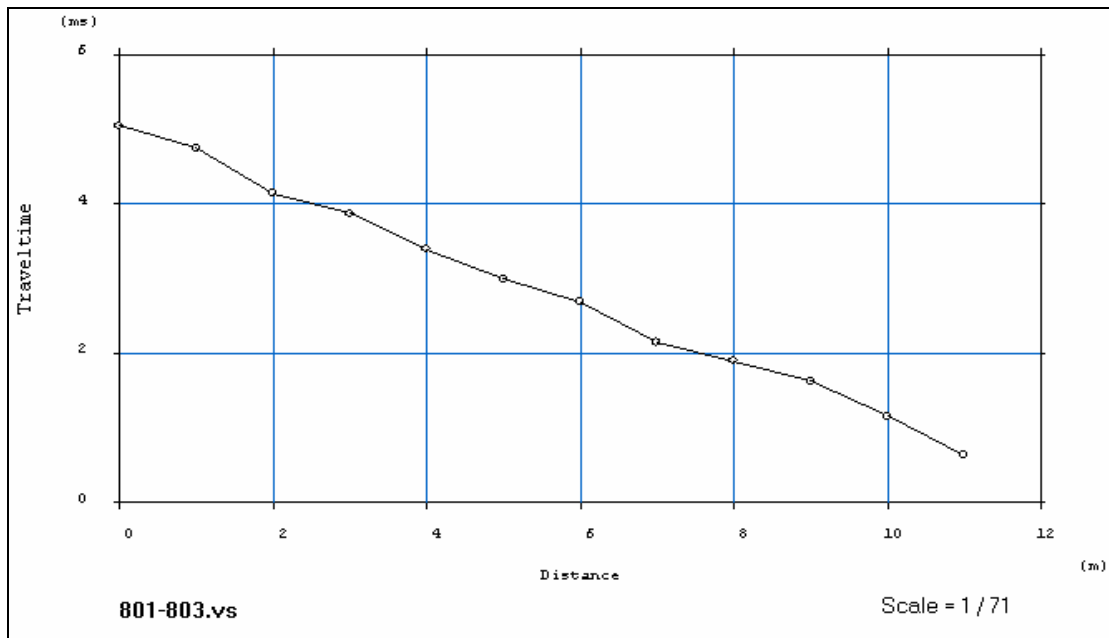
Σχήμα 5.13 Δρομοχρονικό διάγραμμα γραμμής μελέτης 5. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).



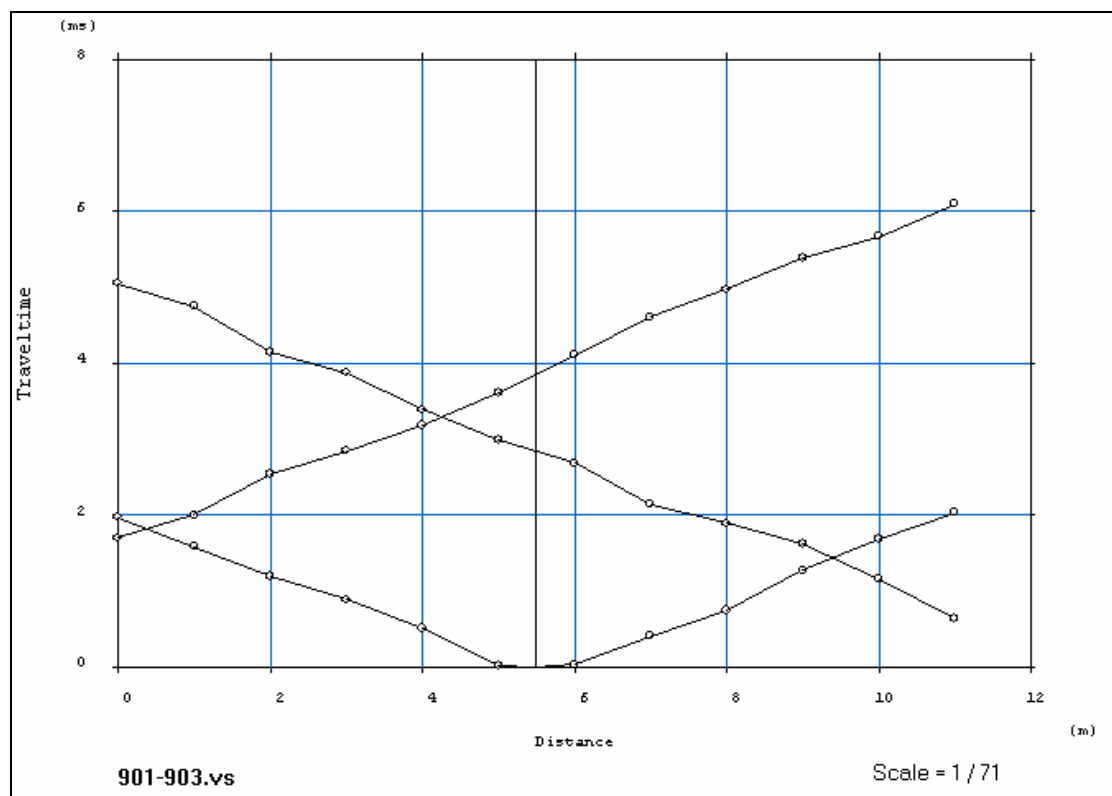
Σχήμα 5.14 Δρομοχρονικό διάγραμμα γραμμής μελέτης 6. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).



Σχήμα 5.15 Δρομοχρονικό διάγραμμα γραμμής μελέτης 7. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).



Σχήμα 5.16 Δρομοχρονικό διάγραμμα γραμμής μελέτης 8. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).



Σχήμα 5.17 Δρομοχρονικό διάγραμμα γραμμής μελέτης 9. Στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε αποστάσεις (m) ενώ ο οριζόντιος σε χρόνο διάδοσης σεισμικών κυμάτων (msec).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Σαν στόχος της εργασίας αυτής τέθηκε η σύγκριση των ταχυτήτων που θα προέκυπταν από την γεωφυσική διασκόπηση και των ταχυτήτων από το εργαστήριο με την βοήθεια των υπερήχων. Έτσι έγινε δειγματοληψία από το λατομείο που λειτουργεί στο χωριό Αλφάς του νομού Ρεθύμνου για την μέτρηση των χρόνων διάδοσης των κυμάτων του ήχου.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίον πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, η επεξεργασία τους και τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών. Για την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων των υπερήχων, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια των οποίων η διαμόρφωση περιγράφεται στην Ενότητα 4.3.

### 6.1 Η μέθοδος των υπερήχων

Με τη μέθοδο αυτή μετρήθηκε εργαστηριακά η ταχύτητα διάδοσης των Ρ κυμάτων. Η μέθοδος των υπερήχων βασίζεται στην διάδοση των κυμάτων του ήχου διαμέσου της βραχομάζας και χρησιμοποιείται από τα περισσότερα εργαστήρια βραχομηχανικής σε όλο τον κόσμο (Birch, 1960).

Σε αυτήν την μέθοδο, τα σεισμικά κύματα υψηλής συχνότητας (50 kHz έως και μέχρι μερικά MHz) παράγονται από μια παλμική γεννήτρια και μετατρέπονται σε μηχανική δόνηση μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα (πομπός). Η δόνηση αυτή εφαρμόζεται σε δοκίμιο του προς εξέταση σχηματισμού. Τα διαδιδόμενα σεισμικά κύματα μέσω του δοκιμίου μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα από έναν δέκτη ο οποίος εφάπτεται σε κάποια άλλη θέση του δοκιμίου. Ο χρόνος διαδρομής των σεισμικών κυμάτων καταγράφεται ώστε η ταχύτητα να υπολογίζεται ως :

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

εξίσωση 6.1

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα των διαμηκών, είτε των εγκαρσίων κυμάτων,  $L$  είναι το μήκος της διαδρομής των σεισμικών κυμάτων (απόσταση πομπού – δέκτη) και  $\Delta t$  είναι ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων στο δείγμα.

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων σε ένα δοκίμιο, λόγω των μεγάλων ταχυτήτων που αναμένονται στα υπό εξέταση υλικά και των σχετικά μικρών τους διαστάσεων, θα πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις με τη χρήση υψίσυχων σημάτων, έτσι ώστε τα παραγόμενα μήκη κύματος των διαδιδόμενων σεισμικών κυμάτων να είναι πολύ μικρότερα των διαστάσεων των δοκιμίων και υψηλής χρονικής ακρίβειας, προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.

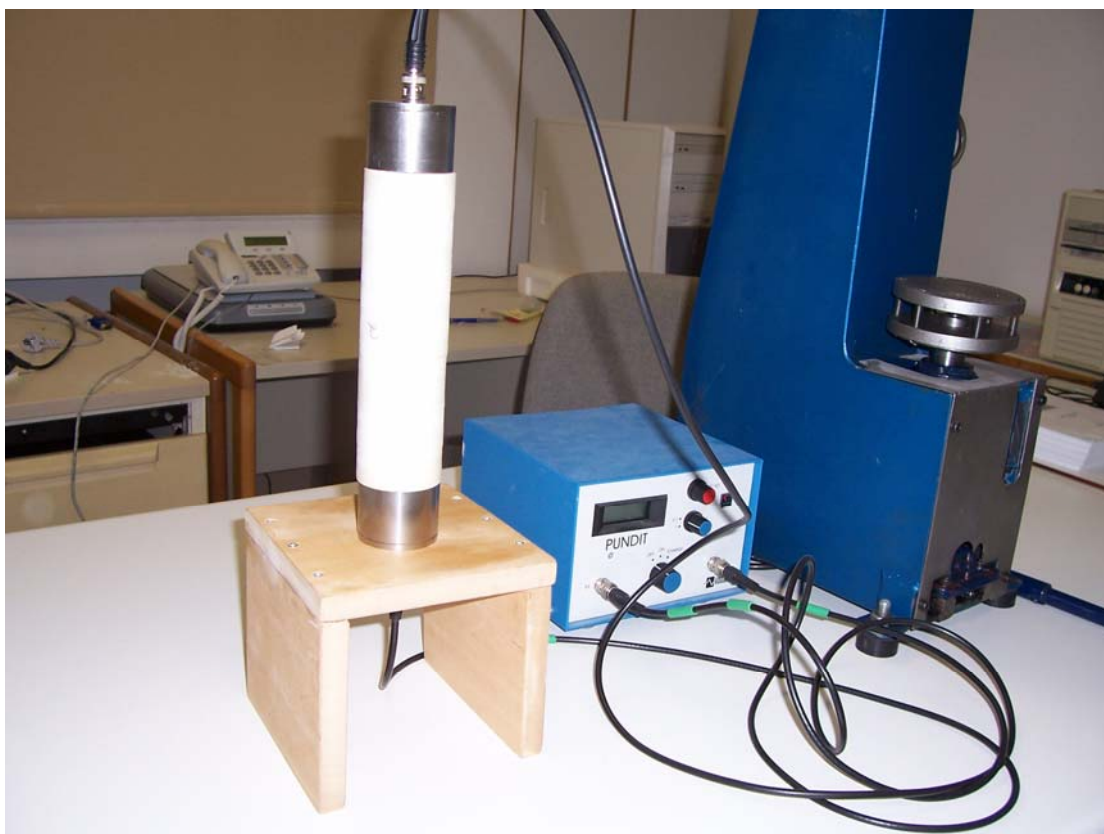
Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια διάταξη που επιτρέπει την δημιουργία υψίσυχνου παλμού σεισμικών κυμάτων (υπέρηχοι), ενώ παράλληλα έχει τη δυνατότητα να μετρά το χρόνο διάδοσης των κυμάτων αυτών στο υπό εξέταση υλικό με μεγάλη ακρίβεια της τάξεως του 0.1  $\mu\text{sec}$ .

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων σε ένα στερεό ομογενές και ισότροπο (ή ελαφρά ανισότροπο) μέσο σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα του μέσου και τις ελαστικές του ιδιότητες (πχ. μέτρο ελαστικότητας του Young και λόγος του Poisson).

## **6.2 Παρουσίαση οργάνων μέτρησης**

### **6.2.1 PUNDIT**

Για την παρούσα μελέτη των υπερήχων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η συσκευή αυτή αποτελείται από ένα πομπό και ένα δέκτη (πρεσσοστάτες), οι οποίοι τοποθετούνται στα άκρα του προς μελέτη δοκιμίου, και μια ψηφιακή μονάδα η οποία παράγει το σεισμικό σήμα και αναλαμβάνει την τελική μέτρηση των χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων μεταξύ πομπού – δέκτη σε  $\mu\text{sec}$ . Αναλυτικότερη παρουσίαση της συσκευής PUNDIT δίνεται στο Σχήμα 6.1.



**Σχήμα 6.1 Διάταξη PUNDIT.**

Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με πρέσα φόρτισης για την καλύτερη εφαρμογή του πομπού και του δέκτη (transducers) στο δοκίμιο, όταν αυτό απαιτείται από την μέθοδο. Αναφέρεται πως η τάση που εφαρμόσθηκε στα δοκίμια από την πρέσα στα πειράματα ήταν ίση με 0.5MPa. Η διαδικασία των μετρήσεων αρχίζει τη στιγμή που το σύστημα καθυστέρησης της έναρξης της καταγραφής, δώσει σήμα στην γεννήτρια των παλμών των υπερήχων και αυτή μεταδώσει τον παλμό των υπερήχων στον πομπό.

Ακολούθως, μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (delay) η ίδια μονάδα δίνει σήμα στον ταλαντωτή και τη θύρα ελέγχου, η οποία ενεργοποιεί τον μετρητή που καταγράφει τις ταλαντώσεις. Μόλις τα σεισμικά κύματα καταγραφούν στον δέκτη και ενισχυθούν, στέλνεται σήμα στη θύρα ελέγχου, η οποία αποσυνδέει τον ταλαντωτή από τον μετρητή έτσι ώστε να σταματήσει η καταμέτρηση των ταλαντώσεων.



### 6.2.2 PROCEQ

Πρόκειται επίσης για μια μη καταστροφική μέθοδο μέτρησης. Ο τρόπος καταγραφής δεν διαφέρει με αυτόν του PUNDIT (Σχήμα 6.2). Το σήμα καταγραφής είναι υψίσυγχο της τάξης των 54kHz.



Σχήμα 6.2 Διάταξη PROCEQ.

Το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει υπό πίεση αλλά έχει περισσότερες δυνατότητες σε σχέση με το PUNDIT οι οποίες όμως δεν μπορούν να είναι χρήσιμες για την συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία. Ως εκ τούτου δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν. Ο λόγος χρησιμοποίησης του έγκειται στην επαλήθευση της καλής λειτουργίας της συσκευής PUNDIT

### 6.3 Προσδιορισμός μεθόδου μέτρησης

Για την όσο δυνατόν καλύτερη και πλέον αξιόπιστη μέθοδο μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων, εξετάστηκαν μια σειρά εναλλακτικών τρόπων προσέγγισης του προβλήματος. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι όσο καλύτερη είναι η εφαρμογή του δοκιμίου με την διάταξη πομπού - δέκτη τόσο πιο αξιόπιστη είναι η μέτρηση αυτή. Από παλαιότερες χρήσης του οργάνου PUNDIT η εφαρμογή του δοκιμίου με το σύστημα πομπού – δέκτη γινόταν με την χρήση φύλλων κασσιτέρου.

Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια μαρμάρου και 5 δοκίμια αλφά. Τα δοκίμια του αλφά ήταν διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην κυρίως εργασία. Το πείραμα περιελάμβανε τις εξής διατάξεις:

- α) όργανο μέτρησης PUNDIT, ζεύγος πομπού – δέκτη με ικανότητα μέτρησης P και S κυμάτων, όλο το σύστημα υπό πίεση 0.5 MPa και μέσο εφαρμογής του ζεύγους πομπού – δέκτη και πετρώματος, κασσίτερος και λιπαντικό μέσο (γράσο).
- β) όργανο μέτρησης PUNDIT, ζεύγος πομπού – δέκτη με ικανότητα μέτρησης P και S κυμάτων, χωρίς πίεση και μέσο εφαρμογής του ζεύγους πομπού – δέκτη και πετρώματος μόνο λιπαντικό μέσο.
- γ) όργανο μέτρησης PUNDIT, ζεύγος πομπού – δέκτη με ικανότητα μέτρησης P και S κυμάτων, όλο το σύστημα υπό πίεση 0.5 MPa και μέσο εφαρμογής του ζεύγους πομπού – δέκτη και πετρώματος, μόνο λιπαντικό μέσο.
- δ) όργανο μέτρησης PUNDIT, ζεύγος πομπού – δέκτη με ικανότητα μέτρησης μόνο P κυμάτων, χωρίς πίεση και μέσο εφαρμογής του ζεύγους πομπού – δέκτη και πετρώματος, μόνο λιπαντικό μέσο.
- ε) όργανο μέτρησης PROCEQ (Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης), ζεύγος πομπού – δέκτη με ικανότητα μέτρησης μόνο P κυμάτων, χωρίς πίεση και μέσο εφαρμογής του ζεύγους πομπού – δέκτη και πετρώματος, κασσίτερος και λιπαντικό μέσο.

Η συσκευή μέτρησης υπερήχων του εργαστηρίου Μηχανικής των Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (PUNDIT), σαν αποτέλεσμα δίνει το χρόνο που χρειάζεται το κύμα να διασχίσει το πέτρωμα. Η συσκευή PROCEQ δίνει τον χρόνο διάδοσης του

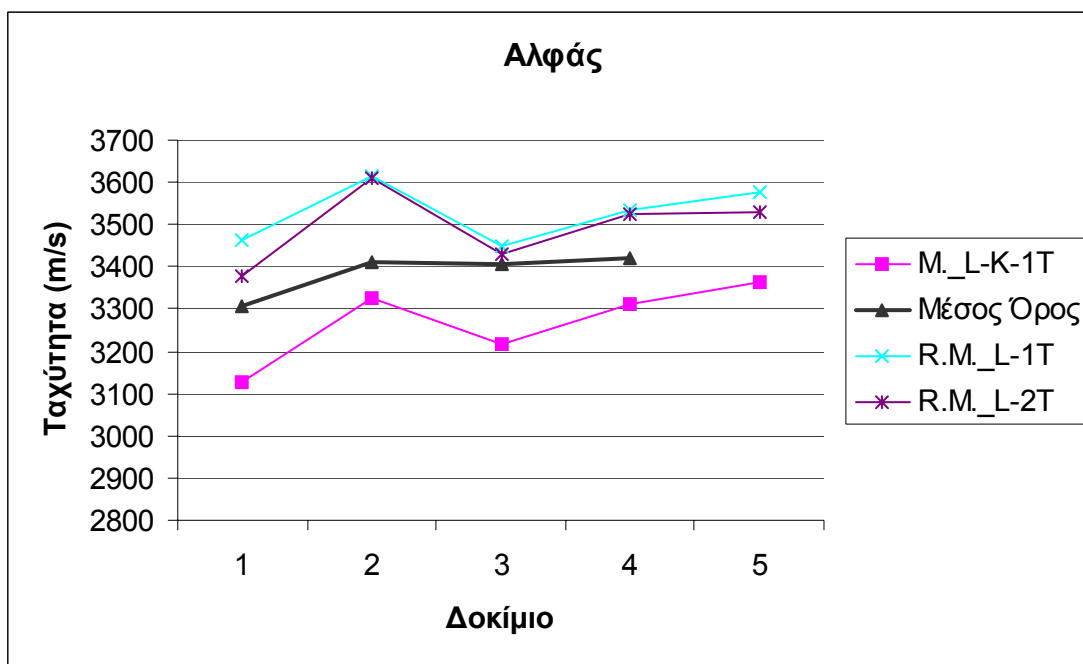
κύματος και με εισαγωγή του ύψους του δοκιμίου δίδει απευθείας και την ταχύτητα. Κατά την διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν και από τα δύο όργανα μόνοι οι χρόνοι.

Μετρώντας τις διαστάσεις των δοκιμίων με την βοήθεια ενός παχύμετρου τύπου Vernier και με την βοήθεια της σχέσης 6.1 προκύπτουν οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων του ήχου από την μάζα του πετρώματος. Η σωστή μέτρηση των διαστάσεων επηρεάζει άμεσα την ορθότητα των αποτελεσμάτων και για τον λόγο αυτό έγιναν επαναληπτικές μετρήσεις του ύψους και τελικά χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών.

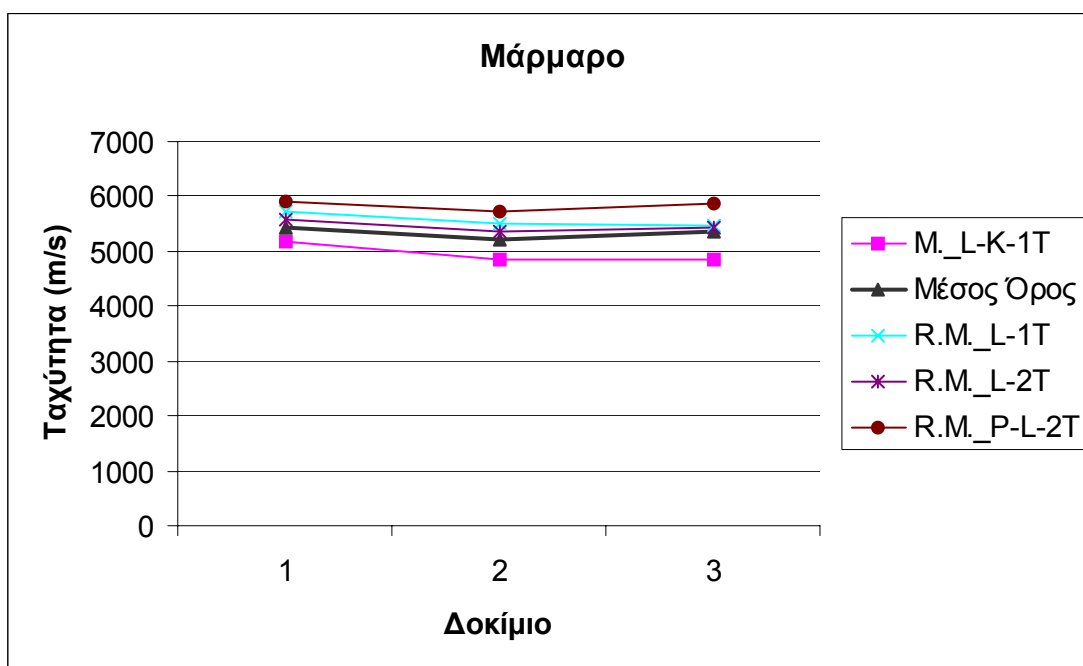
Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 6.1 με τις μετρήσεις με τις μεθόδους που αναλύθηκαν προηγουμένως και γραφική απεικόνιση τους (Σχήματα 6.3 και 6.4).

**Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα εναλλακτικών τρόπων μέτρησης ταχύτητας διάδοσης υπερήχων.**

Εργαστήριο	Δοκίμιο					R.M.	Rock Mechanics
	1	2	3	4	5	M	Mechanics
	<b>Αλφάς</b>					L	Lubricant
	Χρόνος (μs)					P	Pressure
R.M. P-L-K-2T	58.5	57.4	54.7	60.7	57.7	K	Κασσίτερος
R.M. L-2T	56	51.9	54.4	54.9	52.8	1T	Απλοί Πομποί
R.M. P-L-2T	56.8	57.6	52.9	54.6	51.4	2T	Πομποί P-S
R.M. L-1T	54.6	51.8	54.1	54.7	52.1		
M. L-K-1T	60.5	56.3	58	58.4	55.4		Μέσος όρος ταχυτήτων (m/s)
	Ταχύτητα (m/s)						
R.M. P-L-K-2T	3234	3263	3410	3186	3231		3402
R.M. L-2T	3379	3609	3428	3523	3530		
R.M. P-L-2T	3331	3252	3526	3542	3626		
R.M. L-1T	3465	3616	3447	3536	3578		
M. L-K-1T	3127.3	3326.8	3215.5	3311.6	3364.6		
	Ύψος (cm)						
	18.92	18.73	18.65	19.34	18.64		
	Διάμετρος (cm)						
	5.23	5.25	5.27	5.23	5.27		
	<b>Μάρμαρο</b>						
	Χρόνος (μs)						
R.M. P-L-K-2T	39.8	42.3	37.6				
R.M. L-2T	34.9	36.6	36				
R.M. P-L-2T	33	34.1	33.3				
R.M. L-1T	34	35.4	35.7				
M. L-K-1T	37.6	40.3	40.2				Μέσος όρος ταχυτήτων (m/s)
	Ταχύτητα (m/s)						
R.M. P-L-K-2T	4887	4622	5199				5344
R.M. L-2T	5573	5342	5431				
R.M. P-L-2T	5894	5733	5871				
R.M. L-1T	5721	5523	5476				
M. L-K-1T	5172.9	4851.1	4863.2				
	Ύψος (cm)						
	19.45	19.55	19.55				
	Διάμετρος (cm)						
	5.28	5.29	5.28				



Σχήμα 6.3 Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων ταχυτήτων διάδοσης υπερήχων στο πέτρωμα του αλφά.



Σχήμα 6.4 Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων ταχυτήτων διάδοσης υπερήχων στο μάρμαρο.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων και την γραφική τους απεικόνιση γίνεται κατανοητό ότι με την κάθε μέθοδο μέτρησης οι καμπύλες απλά μετατοπίζονται. Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι αυτό το οποίο αλλάζει και επηρεάζει κυρίως τις τιμές

είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη εφαρμογή του δοκιμίου με την διάταξη πομπού - δέκτη.

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνεται ότι η μέθοδος με την καλύτερη εφαρμογή και επομένως τις μεγαλύτερες μετρήσεις είναι η α) με όργανο μέτρησης PUNDIT, ζεύγος πομπού – δέκτη με ικανότητα μέτρησης P και S κυμάτων, όλο το σύστημα υπό πίεση 0.5MPa και μέσο εφαρμογής του ζεύγους πομπού – δέκτη και πετρώματος, κασσίτερος και λιπαντικό μέσο (γράσο).

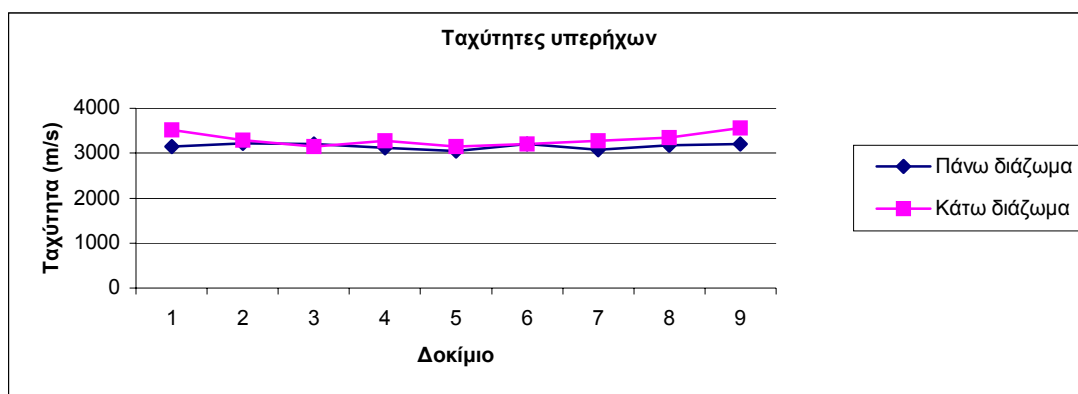
Επειδή όμως η ύπαρξη κασσιτέρου δεν έχει διερευνηθεί κατά πόσο επηρεάζει την αύξηση των ταχυτήτων, καθώς και για τον λόγο ότι η μέθοδος αυτή απαιτεί την άσκηση ορισμένης τάσης στο όλο σύστημα, η οποία καθυστερεί την διαδικασία και δεν ήταν εύκολο να εφαρμοστεί με ακρίβεια επιλέχθηκε η μέθοδος δ. Η μέθοδος αυτή γινόταν με χρήση του όργανο μέτρησης PUNDIT, ζεύγος πομπού – δέκτη με ικανότητα μέτρησης μόνο P κυμάτων, χωρίς πίεση και μέσο εφαρμογής του ζεύγους πομπού – δέκτη και πετρώματος, μόνο λιπαντικό μέσο.

## 6.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Με τη μέθοδο που επιλέχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, μετρήθηκαν οι χρόνοι διάδοσης των κυμάτων του ήχου στα προς μελέτη δοκίμια και γνωρίζοντας τις διαστάσεις του κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων στα δοκίμια αυτά. Στον Πίνακα 6.2 υπάρχουν τα αποτελέσματα από τα δοκίμια Β του πάνω διαζώματος, Γ & Δ του κάτω διαζώματος, καθώς και η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Σχήμα 6.5).

**Πίνακας 6.2 Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων.**

<b>Δοκίμιο</b>	<b>1B</b>	<b>2B</b>	<b>3B</b>	<b>4B</b>	<b>5B</b>	<b>6B</b>	<b>7B</b>	<b>8B</b>	<b>9B</b>
Χρόνος (μs)	59.3	61.1	60.7	62	64.7	61	64.3	61.6	60.9
Ύψος (cm)	18.63	19.69	19.47	19.31	19.74	19.54	19.74	19.54	19.46
Διάμετρος (cm)	5.260	5.248	5.292	5.265	5.207	5.235	5.290	5.252	5.225
Ταχύτητα (m/s)	3142	3223	3208	3114	3051	3203	3069	3172	3196
<b>Δοκίμιο</b>	<b>1Γ</b>	<b>2Γ</b>	<b>3Γ</b>	<b>4Γ</b>	<b>5Γ</b>	<b>6Γ</b>	<b>1Δ</b>	<b>2Δ</b>	<b>3Δ</b>
Χρόνος (μs)	54.5	58.2	61.0	58.4	60.4	58.9	58.0	57.3	54.7
Ύψος (cm)	19.152	19.130	19.165	19.088	19.033	18.890	18.993	19.165	19.483
Διάμετρος (cm)	5.257	5.287	5.258	5.287	5.285	5.258	5.243	5.268	5.250
Ταχύτητα (m/s)	3514	3287	3142	3269	3151	3207	3275	3345	3562



Σχήμα 6.5 Γραφική παράσταση της διακύμανσης των ταχυτήτων στα δυο διαζώματα.

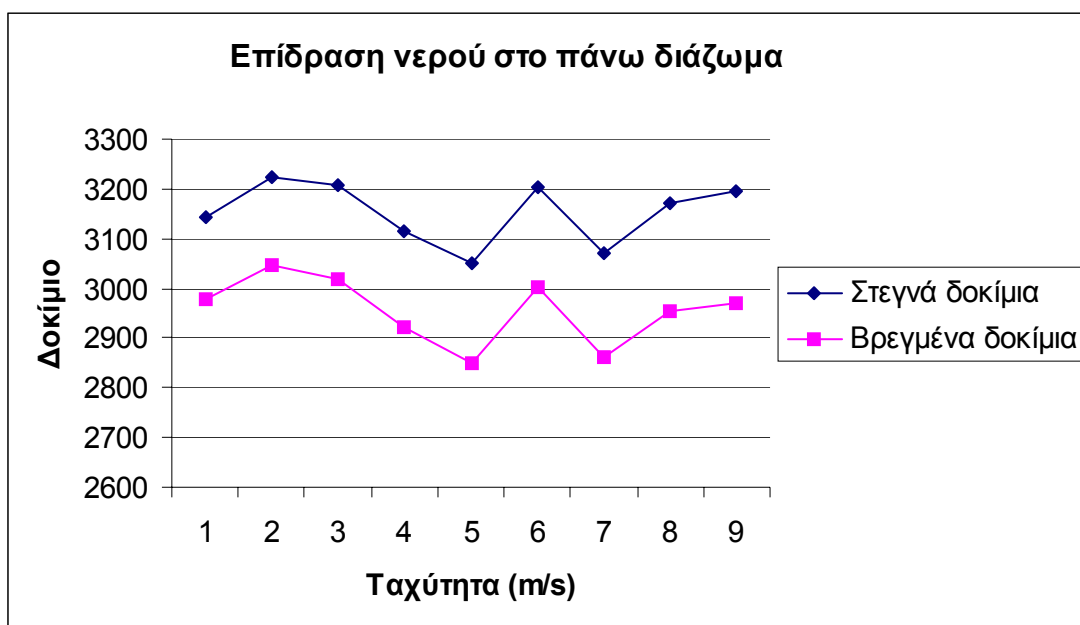
Στην συνέχεια στα δοκίμια αυτά μετρήθηκαν οι χρόνοι διάδοσης με τα δοκίμια να είναι βρεγμένα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3 και 6.4 και δείχνουν την επίδραση του νερού στο χρόνο διάδοσης των κυμάτων. Όπως διακρίνεται από τις τιμές του πίνακα καθώς και από τις γραφικές απεικονίσεις 6.6 και 6.7 το νερό καθυστερεί την διάδοση των κυμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε στο κεφάλαιο 3.

Πίνακας 6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων βρεγμένων και στεγνών δοκιμίων στο πάνω διάζωμα.

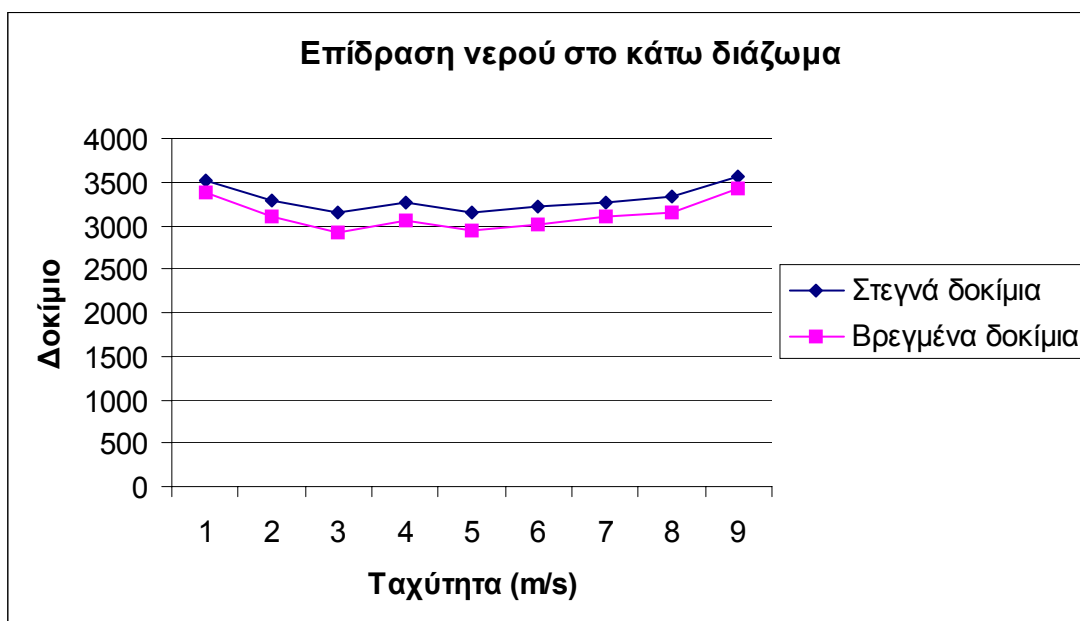
Δοκίμιο	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	M.O.
Χρόνος (μs)	59.3	61.1	60.7	62	64.7	61	64.3	61.6	60.9	61.73
Υψος (cm)	18.63	19.69	19.47	19.31	19.74	19.54	19.74	19.54	19.46	19.46
Διάμετρος (cm)	5.26	5.25	5.29	5.27	5.21	5.24	5.29	5.25	5.23	5.25
Ταχύτητα (m/s) Στεγνό Πέτρωμα	3142	3223	3208	3114	3051	3203	3069	3172	3196	3153
Ταχύτητα (m/s) Βρεγμένο Πέτρωμα	2977	3048	3019	2921	2849	3002	2860	2956	2971	2956
Διαφορά ταχυτήτων	166	175	189	193	203	202	209	216	224	197

Πίνακας 6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων βρεγμένων και στεγνών δοκιμίων στο κάτω διάζωμα.

Δοκίμιο	1Γ	2Γ	3Γ	4Γ	5Γ	6Γ	1Δ	2Δ	3Δ	M.O.
Χρόνος (μs)	54.5	58.2	61.0	58.4	60.4	58.9	58.0	57.3	54.7	57.93
Υψος (cm)	19.15	19.13	19.17	19.09	19.03	18.89	18.99	19.17	19.48	19.12
Διάμετρος (cm)	5.26	5.29	5.26	5.29	5.29	5.26	5.24	5.27	5.25	5.27
Ταχύτητα (m/s) Στεγνό Πέτρωμα	3514	3287	3142	3269	3151	3207	3275	3345	3562	3306
Ταχύτητα (m/s) Βρεγμένο Πέτρωμα	3378	3100	2930	3064	2951	3022	3098	3157	3436	3126
Διαφορά ταχυτήτων	136	186	211	205	200	185	176	187	126	179



Σχήμα 6.6 Επίδραση νερού στο πάνω διάζωμα.



Σχήμα 6.7 Επίδραση νερού στο κάτω διάζωμα.

Στην συνέχεια τα αρχικά δοκίμια κόπηκαν στην μέση με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 4.3. Στα καινούργια δοκίμια μετρήθηκε εκ νέου η ταχύτητα διάδοση των υπερήχων. Επόμενο βήμα της πειραματικής διαδικασίας ήταν τα δύο κομμάτια από το αρχικό δοκίμιο, να ενωθούν ακουμπώντας το ένα πάνω στο

άλλο. Έτσι στην ουσία δημιουργήθηκε δοκίμιο με τεχνητή ασυνέχεια. Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις της ταχύτητας.

Τα ύψη που μετρήθηκαν στα δυο κομμένα δοκίμια κάθε αρχικού δοκιμίου προστέθηκαν και διαιρέθηκαν με την αντίστοιχη πρόσθεση των χρόνων των δοκιμών αυτών. Έτσι προέκυψε η ταχύτητα σε υποθετικά ενοποιημένα δοκίμια. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων βρίσκονται στον Πίνακα 6.5 και η γραφική τους απεικόνιση στα σχήματα 6.8 και 6.9.

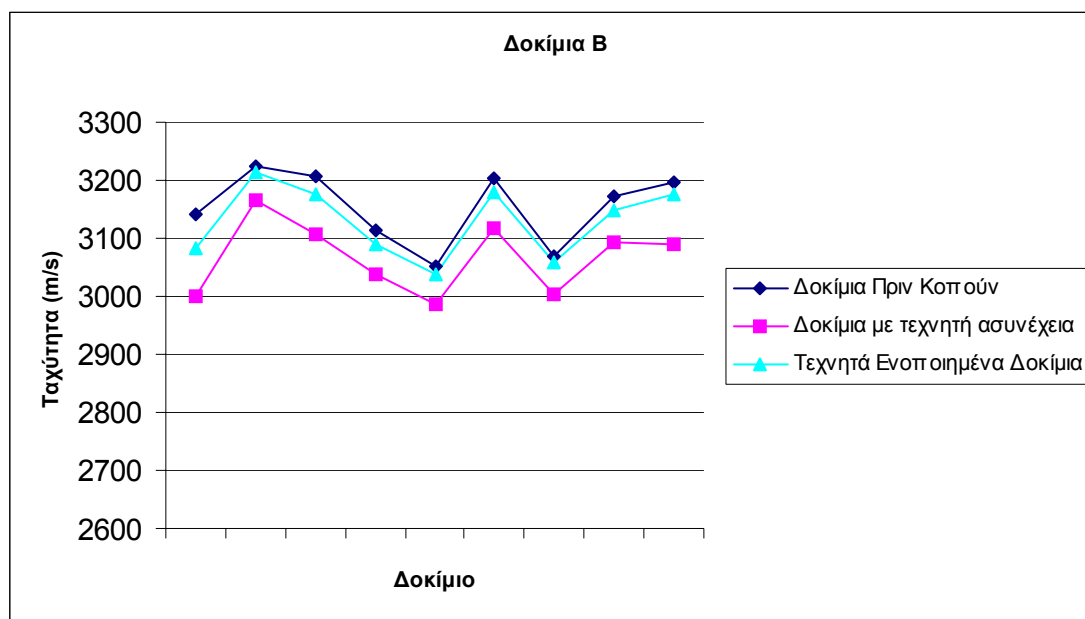
**Πίνακας 6.5 Επίδραση ασυνεχειών.**

ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΡΙΝ ΚΟΠΟΥΝ									
Δοκίμιο	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B
Χρόνος (μs)	59.3	61.1	60.7	62	64.7	61	64.3	61.6	60.9
Ύψος (cm)	18.63	19.69	19.47	19.31	19.74	19.54	19.74	19.54	19.46
Διάμετρος (cm)	5.26	5.248	5.292	5.265	5.207	5.235	5.29	5.252	5.225
Ταχύτητα (m/s)	3142	3223	3208	3114	3051	3203	3069	3172	3196
ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΡΙΝ ΚΟΠΟΥΝ									
Δοκίμιο	1Γ	2Γ	3Γ	4Γ	5Γ	6Γ	1Δ	2Δ	3Δ
Χρόνος (μs)	54.5	58.2	61	58.4	60.4	58.9	58	57.3	54.7
Ύψος (cm)	19.152	19.13	19.165	19.088	19.033	18.89	18.993	19.165	19.483
Διάμετρος (cm)	5.257	5.287	5.258	5.287	5.285	5.258	5.243	5.268	5.25
Ταχύτητα (m/s)	3514	3287	3142	3269	3151	3207	3275	3345	3562
ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΤΕΧΝΗΤΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ									
Δοκίμιο	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B
Χρόνος (μs)	55.2	58.4	59.7	60.8	61.5	60.1	63	60.8	59.2
Ύψος (cm)	16.557	18.482	18.552	18.47	18.375	18.727	18.927	18.797	18.285
Διάμετρος (cm)	5.26	5.248	5.292	5.265	5.207	5.235	5.29	5.252	5.225
Ταχύτητα (m/s)	2999	3165	3107	3038	2988	3116	3004	3092	3089
ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΤΕΧΝΗΤΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ									
Δοκίμιο	1Γ	2Γ	3Γ	4Γ	5Γ	6Γ	1Δ	2Δ	3Δ
Χρόνος (μs)	53.1	57.6	60.7	56.5	60	58.6	58.5	57.2	55.2
Ύψος (cm)	18.3	18.4	18.565	18.05	18.418	18.337	18.475	18.543	18.988
Διάμετρος (cm)	5.257	5.287	5.258	5.287	5.285	5.258	5.243	5.268	5.25
Ταχύτητα (m/s)	3446	3194	3058	3195	3070	3129	3158	3242	3440
ΚΟΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ									
Δοκίμιο	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B
Χρόνος (μs) 1	26.7	28.9	29.4	29.9	30.5	29.7	30.8	29.7	27.6
Χρόνος (μs) 2	27	28.6	29	29.9	30	29.2	31.1	30	30
Ύψος (cm) 1	8.405	9.272	9.27	9.318	9.312	9.358	9.39	9.423	9.1
Ύψος (cm) 2	8.152	9.21	9.282	9.152	9.063	9.368	9.537	9.373	9.185
Ταχύτητα (m/s) 1	3148	3208	3153	3116	3053	3151	3049	3173	3297
Ταχύτητα (m/s) 2	3019	3220	3201	3061	3021	3208	3066	3124	3062

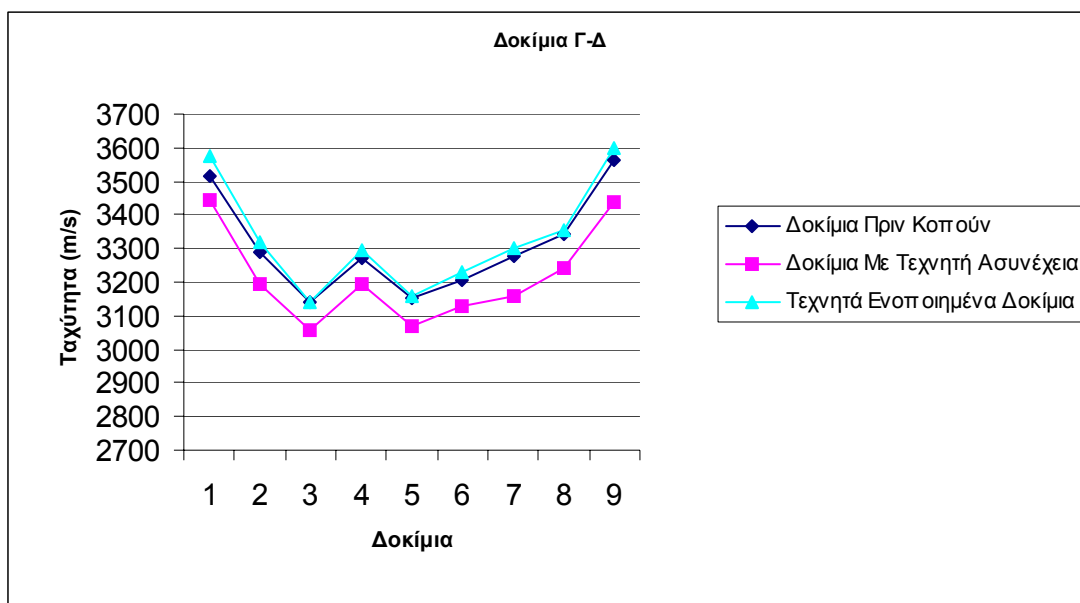


Πίνακας 6.5 Συνέχεια.

ΚΟΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ									
Δοκίμιο	1Γ	2Γ	3Γ	4Γ	5Γ	6Γ	1Δ	2Δ	3Δ
Χρόνος (μs) 1	28.1	28.9	30	26.5	29.2	28.1	27.7	30.1	29.4
Χρόνος (μs) 2	23.1	26.5	29.1	28.3	29.1	28.7	28.3	25.2	23.4
Υψος (cm) 1	9.128	9.192	9.28	9.048	9.135	9.148	9.087	9.345	9.583
Υψος (cm) 2	9.172	9.208	9.285	9.002	9.283	9.188	9.388	9.198	9.405
Ταχύτητα (m/s) 1	3249	3181	3093	3414	3128	3256	3280	3105	3260
Ταχύτητα (m/s) 2	3970	3475	3191	3181	3190	3202	3317	3650	4019
ΤΕΧΝΗΤΑ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ									
Δοκίμιο	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B
Χρόνος (μs)	53.7	57.5	58.4	59.8	60.5	58.9	61.9	59.7	57.6
Υψος (cm)	16.56	18.48	18.55	18.47	18.38	18.73	18.93	18.8	18.29
Ταχύτητα (m/s)	3083	3214	3177	3089	3037	3179	3058	3149	3174
ΤΕΧΝΗΤΑ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ									
Δοκίμιο	1Γ	2Γ	3Γ	4Γ	5Γ	6Γ	1Δ	2Δ	3Δ
Χρόνος (μs)	51.2	55.4	59.1	54.8	58.3	56.8	56	55.3	52.8
Υψος (cm)	18.3	18.4	18.57	18.05	18.42	18.34	18.48	18.54	18.99
Ταχύτητα (m/s)	3574	3321	3141	3294	3159	3228	3299	3353	3596



Σχήμα 6.8 Επίδραση ασυνεχειών στο πάνω διάζωμα.

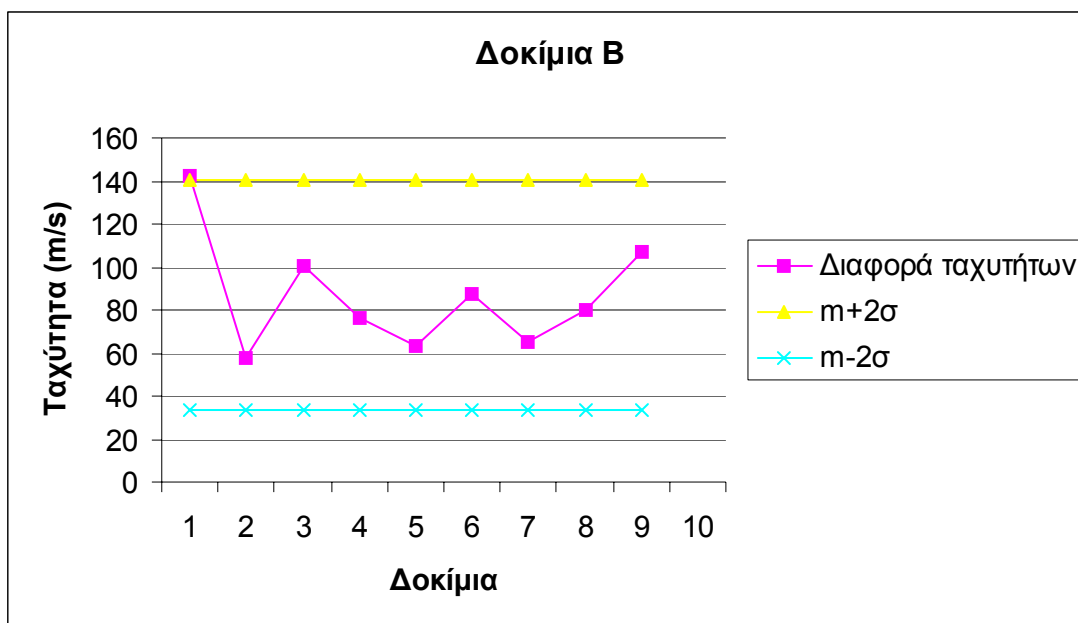


Σχήμα 6.9 Επίδραση ασυνεχειών στο κάτω διάζωμα.

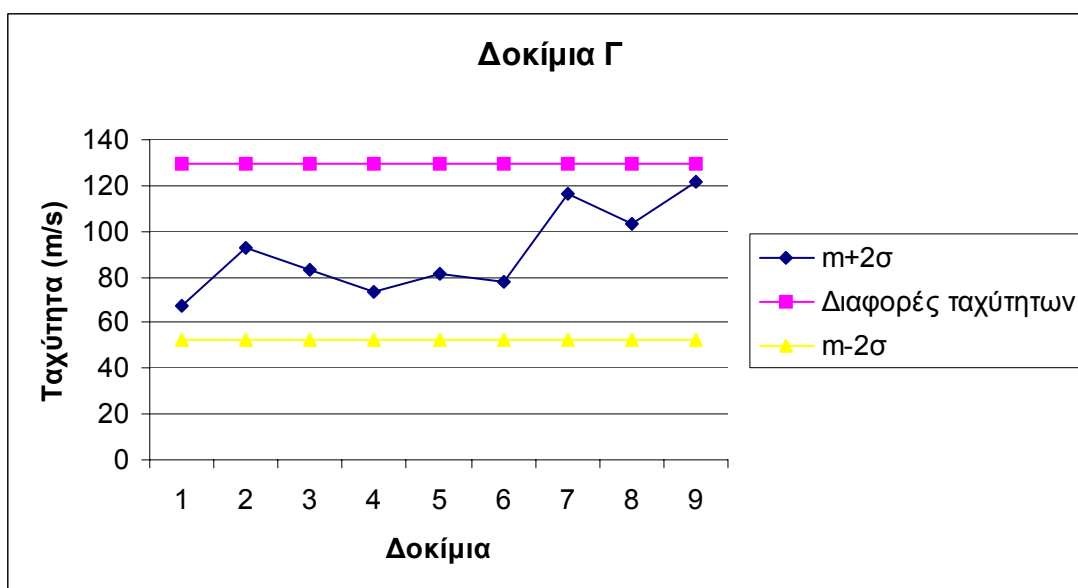
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα οι ταχύτητες που προκύπτουν για τα αρχικά δοκίμια και αυτές που υπολογίζονται για υποθετικά ενοποιημένα δοκίμια συμπίπτουν.

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων διακρίνεται ότι η ύπαρξη ασυνεχειών επηρεάζει την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο από αναμενόμενο για τον λόγο ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι πολύ μικρότερη στον αέρα σε σχέση με το πέτρωμα. Από την συγκεκριμένη μελέτη προκύπτει ότι οι διαφορές των ταχυτήτων είναι σταθερές μέσα στα όρια του στατιστικού λάθους.

Εάν παρασταθεί γραφικά (Σχήμα 6.10, 6.11) η διαφορά των ταχυτήτων και με ευθείες γραμμές ο μέσος όρος των τιμών αυτών συν πλην 2 τυπικές αποκλίσεις παρατηρούμε ότι όλες οι διαφορές βρίσκονται εντός των ορίων οπότε προκύπτει μια κανονική κατανομή των τιμών.



Σχήμα 6.10 Διαφορά ταχυτήτων στα δοκίμια Β.



Σχήμα 6.11 Διαφορά ταχυτήτων στα δοκίμια Γ.

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων για την επήρεια των ασυνεχειών στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον δείγματα αλφά. Στα δοκίμια αυτά το μόνο που μετρήθηκε ήταν μόνο η παράμετρος αυτή. Από τα ολόκληρα και τεχνητά ενοποιημένα δοκίμια βγήκε το συμπέρασμα ότι οι ταχύτητες διάδοσης είναι στην ουσία οι ίδιες.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 6 και είχαν διαστάσεις περίπου 11x5.2 cm. Στα δοκίμια αυτά μετρήθηκαν χρόνοι διάδοσης των κυμάτων και υπολογίστηκε η ταχύτητα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6.

**Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα ταχυτήτων.**

Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6
Χρόνος (μs)	39.2	35.5	36.8	38.9	38.6	38.2
Ταχύτητα (m/s)	2810	3051	2951	2828	2808	2891
Ύψος Δοκιμίου (cm)	11.017	10.83	10.858	11	10.84	11.042
Διάμετρος Δοκιμίου (cm)	5.29	5.292	5.29	5.302	5.318	5.315

Στην συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς (Πίνακας 6.7) και μετρήθηκαν χρόνοι και μήκη.

**Πίνακας 6.7 Μετρήσεις χρόνων και μηκών δοκιμίων.**

Χρόνοι και μήκη κάθε ζεύγους δοκιμίων						
1	2	3	4	5	6	Δοκίμιο
81.80	77.00	78.70	80.10	80.20	χ	6
82.00	77.00	77.80	81.60	χ	21.88	5
83.10	78.00	79.50	χ	21.84	22.04	4
80.70	75.90	χ	21.86	21.70	21.90	3
79.60	χ	21.69	21.83	21.67	21.87	2
χ	21.85	21.88	22.02	21.86	22.06	1

Επεξήγηση

Χρόνοι (μs)	Χρόνοι (μs)	
Χρόνοι (μs)		Μήκη (cm)
	Μήκη (cm)	Μήκη (cm)

Οι χρόνοι αυτοί μετατράπηκαν σε ταχύτητες με την σχέση 6.1.

**Πίνακας 6.8 Αποτελέσματα ταχυτήτων.**

Ταχύτητες με τεχνητή ασυνέχεια						
6	5	4	3	2	1	Δοκίμιο
2697	2665	2649	2711	2745		1
2841	2814	2799	2857			2
2783	2789	2749				3
2752	2676					4
2728						5
						6

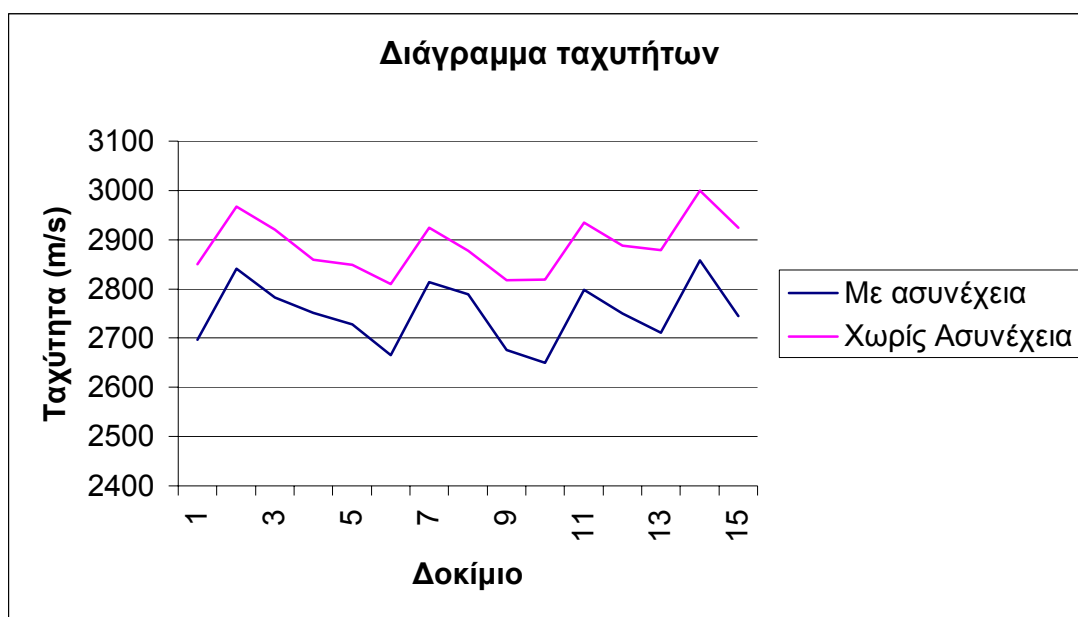
Επεξήγηση	
Ταχύτητες (m/s)	Ταχύτητες (m/s)
Ταχύτητες (m/s)	

Κάνοντας χρήση του συμπεράσματος που εξήχθη προηγουμένως υπολογίζεται η ταχύτητα σε τεχνητά ενοποιημένα δοκίμια (Πίνακας 6.9). Εάν τώρα συγκριθούν οι ταχύτητες που υπολογίστηκαν από τον Πίνακα 6.8 με αυτές του 6.9 δημιουργείται το Σχήμα 6.12.

**Πίνακας 6.9 Ταχύτητες τεχνητά ενοποιημένων δοκιμίων.**

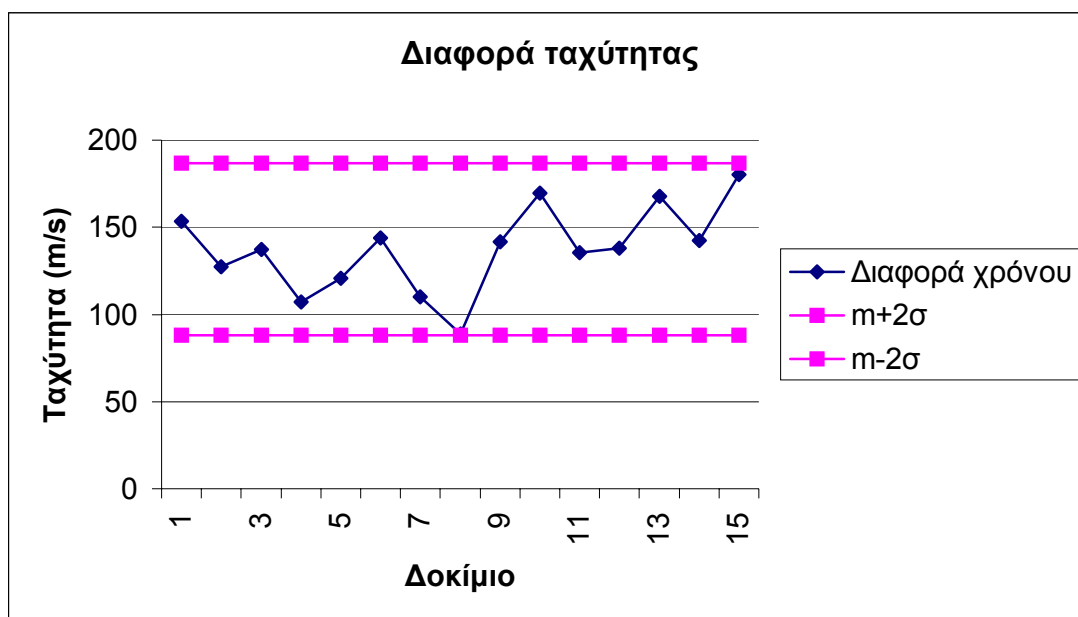
Υποθετικές ταχύτητες χωρίς ασυνέχεια							Επεξήγηση
6	5	4	3	2	1	Δοκίμιο	
2850	2809	2819	2878	2925		1	
2968	2924	2934	3000			2	
2920	2878	2887				3	
2859	2818					4	
2849						5	
						6	

Ταχύτητες (m/s)	Ταχύτητες (m/s)



**Σχήμα 6.12 Γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων.**

Εάν τώρα παρασταθούν γραφικά οι διαφορές των ταχυτήτων αυτών συναρτήσει των τυπικών αποκλίσεων όπως έγινε και στο Σχήμα 6.10 θα προκύψει το Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13 Διακύμανση διαφοράς ταχύτητας σε δοκίμια με και χωρίς ασυνέχεια.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σύγκριση των εργαστηριακών μετρήσεων της ταχύτητας των υπερήχων, με επιτόπιες μετρήσεις πεδίου με τη σεισμική μέθοδο. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια προσπάθεια να συγκριθούν τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές και in-situ μετρήσεις και να αιτιολογηθούν τυχόν διαφορές τους.

### 7.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

#### 7.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις πειραματικές και in-situ μετρήσεις

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο χωριό Αλφά του Νομού Ρεθύμνου με τη σεισμική μέθοδο για τα δυο διαφορετικά διαζώματα έδωσαν τα εξής αποτελέσματα:

- Για το κάτω διάζωμα ο μέσος όρος των ταχυτήτων που προέκυψε είναι 2930m/s για τα διαμήκη κύματα και 1650m/s για τα εγκάρσια. Ο λόγος των δυο ταχυτήτων είναι ίσος με 1.78. Αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων βρίσκεται στην ενότητα 5.2.
- Για το πάνω διάζωμα ο μέσος όρος των ταχυτήτων που προέκυψε είναι 2420m/s για τα διαμήκη κύματα και 1400m/s για τα εγκάρσια. Ο λόγος των δυο ταχυτήτων είναι ίσος με 1.73. Αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων βρίσκεται στην ενότητα 5.2.

Από τα διαζώματα που πραγματοποιήθηκε η σεισμική διασκόπηση λήφθηκαν δείγματα στα οποία έγιναν μετρήσεις για την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων. Από τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν και εξετάστηκαν προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Για τα δοκίμια του κάτω διαζώματος (Γ και Δ) η μέση ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων είναι ίση με 3300m/s.
- Για τα δοκίμια του πάνω διαζώματος (Β) η μέση ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων είναι ίση με 3100m/s.

Σε όλα τα δοκίμια στα οποία μετρήθηκε η ταχύτητα με κύματα ήχου δεν ήταν εφικτή η μέτρηση των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων λόγω έλλειψης κατάλληλου εξοπλισμού.

#### **7.1.2 Αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων για τις ιδιότητες των υπό εξέταση πετρωμάτων**

Στο σημείο αυτό αξίζει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν εργαστηριακά, για τις ιδιότητες των πετρωμάτων. Στα δοκίμια που λήφθηκαν από τα δυο διαζώματα μετρήθηκαν:

- **Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.** Η μέση αντοχή των δοκιμίων του κάτω διαζώματος είναι 30MPa και το προκύπτον μέτρο ελαστικότητας 8300MPa. Για το πάνω διάζωμα η μέση αντοχή των δοκιμίων είναι 23.8MPa και το μέτρο ελαστικότητας 7000MPa.
- **Διαπερατότητα.** Η διαπερατότητα των δοκιμίων του κάτω διαζώματος υπολογίστηκε ίση με 2.7mD ενώ του πάνω διαζώματος 30.9 mD.
- **Πορώδες.** Για το κάτω διάζωμα το πορώδες που υπολογίστηκε είναι 32% ενώ για το πάνω διάζωμα 38%.
- **Πυκνότητα.** Η πυκνότητα που μετρήθηκε στα δοκίμια του κάτω και πάνω διαζώματος είναι 1.79 και 1.61g/cm<sup>3</sup> αντίστοιχα.
- **Χημική σύσταση.** Η χημική σύσταση των δοκιμίων του κάτω διαζώματος είναι 98.3% CaCO<sub>3</sub> και 1.7% SiO<sub>2</sub> και του πάνω διαζώματος 99% CaCO<sub>3</sub> και 1% SiO<sub>2</sub>.



## 7.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

### 7.2.1 Σύγκριση πειραματικών και in-situ αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 7.1.1 φαίνεται μια διαφορά μεταξύ των μετρούμενων ταχυτήτων της σεισμικής διασκόπησης και της ταχύτητας που μετρήθηκε με τη μέθοδο των υπερήχων. Η διαφορά των ταχυτήτων αυτών πιθανολογείται ότι έγκειται στον περιορισμένο αριθμών δειγμάτων και σε απροσδιόριστες συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή διεξαγωγής της σεισμικής διασκόπησης. Μερικές από τις συνθήκες αυτές είναι η ύπαρξη νερού στους πόρους του πετρώματος και μικρορωγμές στο εσωτερικό της βραχόμαζας.

Δεν παρατηρήθηκε εμφανής ύπαρξη ασυνεχειών και στα δυο διαζώματα, ενώ στο πάνω διάζωμα υπήρχε ένα μικρό έγκοιλο στο πόδι της βαθμίδας που δικαιολογεί τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των εργαστηριακών και των in-situ μετρήσεων.

Στις εργαστηριακές μετρήσεις παρατηρήθηκε μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων με την ύπαρξη νερού στους πόρους των κόκκων. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις διαπιστώσεις που προκύπτουν από έρευνες προηγούμενων μελετητών σε ψαμμίτες, αργίλους και γαιάνθρακες, όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 3. Με τη μελέτη που έγινε δεν ήταν δυνατό να εξηγηθεί με ακρίβεια ο λόγος της αντίθεσης αυτής.

Πιθανολογείται ότι ο λόγος της διαφωνίας αυτής έγκειται στη διαφορά της χημικής σύστασης καθώς και των ιδιοτήτων του υπό εξέταση πετρώματος με τα πετρώματα που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3. Πιθανός λόγος για την μείωση της ταχύτητας των υπερήχων ίσως έγκειται στο γεγονός ότι η ένταση του σήματος που παράγεται από τον πομπό εξασθενεί κατά την διάδοσή του στο νερό και δεν καταγράφεται από τον δέκτη.

Με την αποδοχή των αποτελεσμάτων για τη μείωση των ταχυτήτων που παρατηρήθηκε στο εργαστήριο λόγω της ύπαρξης νερού, γίνεται η παραδοχή ότι την ίδια συμπεριφορά θα παρουσιάζει και η ταχύτητα που μετράται στο ύπαιθρο με την σεισμική μέθοδο. Την εποχή κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η σεισμική διασκόπηση αξίζει να σημειωθεί ότι δυο μέρες πριν είχε βρέξει. Επομένως συμπεραίνεται ότι η ύπαρξη νερού μείωσε τις ταχύτητες που θα παρατηρούνταν εάν το πέτρωμα ήταν στεγνό.

Ο ακριβής προσδιορισμός της υγρασίας δεν είναι γνωστός και στις δυο περιπτώσεις. Η διαφορά ταχυτήτων που προκύπτει στις εργαστηριακές μετρήσεις για στεγνά και βρεγμένα δοκίμια είναι 200m/s. Δεχόμενοι ότι οι συνθήκες υγρασίας στο πεδίο ήταν παρόμοιες η εναπομένουσα διαφορά ταχυτήτων λογικά οφείλεται στην ύπαρξη ασυνεχειών και μικρορωγμών στο εσωτερικό της βραχώμαζας. Στο πάνω διάζωμα η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η ύπαρξη του εγκοίλου μειώνει περαιτέρω την ταχύτητα.

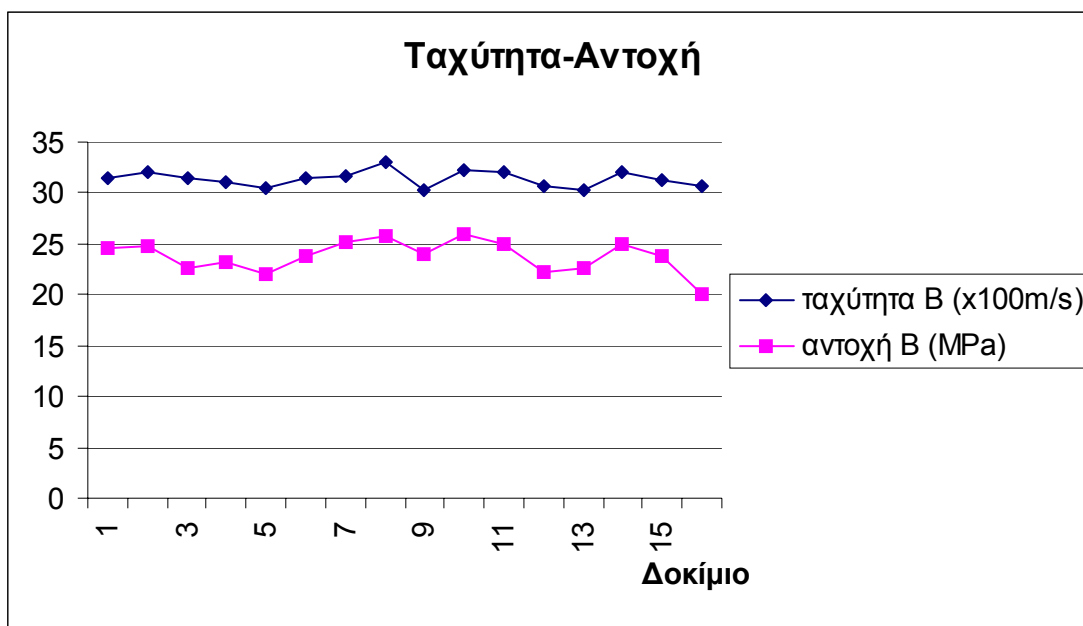
### **7.2.2 Σύγκριση ταχυτήτων των πετρωμάτων των δυο διαζωμάτων**

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει προσπάθεια αιτιολόγησης της διαφοράς της ταχύτητας στα δυο διαζώματα. Τα δείγματα από τα δυο διαζώματα έχουν την ίδια λιθολογική σύσταση.

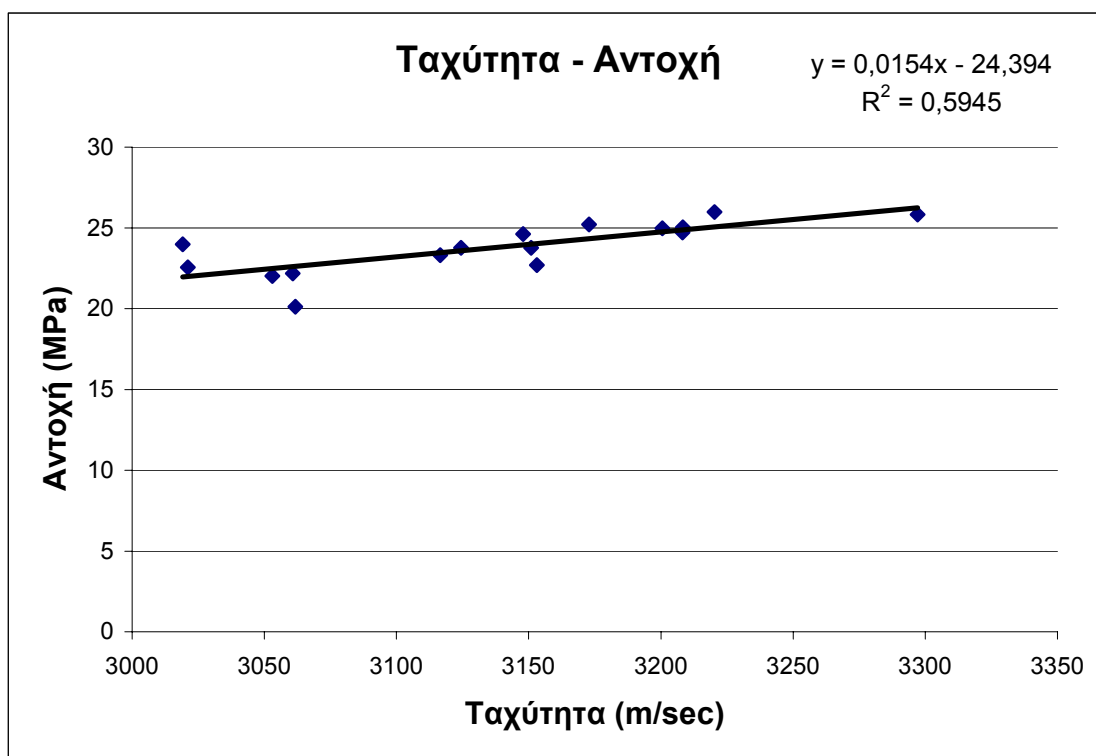
Όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου οι δυο ομάδες δειγμάτων παρουσιάζουν διαφορετικό πορώδες. Η διαφορά αυτή έχει αντίκτυπο στη διαφορά της ταχύτητας λόγω του ότι όσο αυξάνεται το πορώδες αυξάνεται και ο κενός όγκος στο εσωτερικό του δοκιμίου. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων στον αέρα είναι πολύ μικρότερη από ότι στους κόκκους του πετρώματος και αιτιολογεί το αποτέλεσμα αυτό.

Ένα αποτέλεσμα το οποίο προκαλεί αίσθηση είναι η διαφορά των διαπερατοτήτων των δυο πετρωμάτων. Πρόκειται για διαφορά τάξης μεγέθους. Αυτό δείχνει ότι τα πετρώματα του πάνω και κάτω διαζώματος, αν και έχουν μικρή διαφορά στο πορώδες, η διαφορά στη διαπερατότητα είναι μεγάλη. Επομένως οι κενοί πόροι του κάτω διαζώματος είναι μικρότεροι σε μέγεθος, κάτι το οποίο δείχνει ότι η συνεκτικότητά του είναι μεγαλύτερη. Η αύξηση της συνεκτικότητας οδηγεί και σε μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της διαφοράς πίεσης που δέχονται τα δυο πετρώματα, από τους υπερκείμενους σχηματισμούς τους.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών της μονοαξονικής θλίψης προκύπτει ότι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του κάτω διαζώματος είναι μεγαλύτερα από του πάνω διαζώματος. Η μείωση της διαπερατότητας, που συνεπάγεται αύξηση της αντοχής, δείχνει σχέση αναλογίας μεταξύ των ιδιοτήτων αυτών και της μετρούμενης ταχύτητας. Η αναλογία της ταχύτητας με την αντοχή φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται η γραμμική εξάρτησή τους και η εξίσωση που τα συνδέει.



Σχήμα 7.1 Εξάρτηση της ταχύτητας από την αντοχή.



Σχήμα 7.2 Εξάρτηση της ταχύτητας από την αντοχή.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια Γ και Δ τα οποία προέρχονται από το ίδιο δείγμα (διάζωμα) πάρθηκαν σε διαφορετικές κατευθύνσεις έτσι ώστε να εξεταστεί πιθανή ανισοτροπία. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρείται

ότι δεν υπάρχει διαφορά στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων των δοκιμίων Γ και Δ οπότε δε συμπεραίνεται ανισοτροπία.

### 7.2.3 Εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson)

Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τις μετρήσεις που έγιναν στην ύπαιθρο και στο εργαστήριο και με τη βοήθεια των σχέσεων 7.1-7.4 εκτιμώνται οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Με τις ίδιες σχέσεις και τα εργαστηριακά δεδομένα για τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος εκτιμήθηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων σε αυτό.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις ταχύτητες με τη μέθοδο της σεισμικής διασκόπησης, την πυκνότητα και τις εξισώσεις 7.1, 7.2 υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος Poisson ν. Για να υπολογιστούν το E και το ν από τις ταχύτητες που μετρήθηκαν με τους υπέρηχους χρειάστηκε να γίνει η θεώρηση ότι ο λόγος  $V_p/V_s$  των υπερήχων και των σεισμικών είναι ο ίδιος. Επειδή δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί η ταχύτητα  $V_s$  των υπερήχων, υπολογίστηκε ο λόγος  $V_p/V_s$  από τα σεισμικά. Γνωρίζοντας την ταχύτητα  $V_p$  των υπερήχων υπολογίστηκε η  $V_s$ .

Στη συνέχεια, εργαζόμενοι αντίστροφα, χρησιμοποιώντας το μέτρο ελαστικότητας E, το λόγο Poisson ν από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, την πυκνότητα και τις σχέσεις 7.3, 7.4 υπολογίστηκαν οι ταχύτητες των διαμήκων ( $V_p$ ) και των εγκάρσιων κυμάτων ( $V_s$ ). Ο λόγος Poisson δε μετρήθηκε εργαστηριακά, αλλά θεωρήθηκε ίσος με 0.24 από δεδομένα μετρήσεων που έγιναν στη συγκεκριμένη περιοχή στα πλαίσια διδακτορικής εργασίας (Σ. Κλεφτάκης). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 όπου οι τιμές που προέκυψαν από τις εξισώσεις είναι με έντονους χαρακτήρες.

$$E = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad \text{εξίσωση 7.1}$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad \text{εξίσωση 7.2}$$

$$V_p = \left[ \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{εξίσωση 7.3}$$

$$V_s = \left[ \frac{E}{2(1+\nu)\rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

εξίσωση 7.4

**Πίνακας 7.1 Δεδομένα και αποτελέσματα (έντονα) που προκύπτουν από τις εξισώσεις.**

	Μετρούμενα μεγέθη			Αποτελέσματα εξισώσεων	
	Vp σεισμικών (m/s)	Vs σεισμικών (m/s)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	E (MPa)	Λόγος Poisson
Κάτω Διάζωμα	2930	1650	1.79	<b>12357</b>	<b>0.27</b>
Πάνω διάζωμα	2420	1400	1.61	<b>7879</b>	<b>0.25</b>
	Vp υπερήχων (m/s)	Vs υπερήχων (m/s)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	E (MPa)	Λόγος Poisson
Κάτω Διάζωμα	3300	1854	1.79	<b>15620</b>	<b>0.27</b>
Πάνω διάζωμα	3100	1792	1.61	<b>12915</b>	<b>0.25</b>
	Λόγος Poisson	E (Mpa)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	Vp (m/s)	Vs (m/s)
Κάτω Διάζωμα	0.24	8300	1.79	<b>2338</b>	<b>1367</b>
Πάνω διάζωμα	0.24	7000	1.61	<b>2264</b>	<b>1324</b>

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εξισώσεις έχουν μεγάλη απόκλιση από αυτά που μετρήθηκαν. Ο λόγος που υπάρχει αυτή η διαφορά είναι ότι οι εξισώσεις αυτές θεωρούν το υλικό ομογενές, συνεχές και ισότροπο. Όμως το υπό εξέταση υλικό στη συγκεκριμένη μελέτη λόγω του μεγάλου πορώδους του (32% - 39%) δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστα ως συνεχές. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτά.

### 7.3 Προτάσεις

Η σεισμική διασκόπηση στο λατομείο Αλφά Ρεθύμνου υπέδειξε ότι η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων στο μαργαϊκό ασβεστόλιθο παρουσιάζει χωρική μεταβολή η οποία οφείλεται πιθανώς στις ατέλειες του σχηματισμού που υπάρχουν στην υπό μελέτη θέση. Από την σύγκριση εργαστηριακών μετρήσεων σε περιορισμένο αριθμό δειγμάτων, με τα αποτελέσματα από την σεισμική διασκόπηση, παρατηρείται ότι υπάρχει απόκλιση στις τιμές της ταχύτητας διάδοσης διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων της τάξης του 15%.

Στην σεισμική διασκόπηση, σε μερικές καταγραφές για την εκτίμηση της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων δεν κατέστη δυνατή η επεξεργασία τους λόγω κακής ποιότητας και για αυτό προτείνεται η χρήση άλλης πηγής παραγωγής εγκαρσίων κυμάτων.

Κατά την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων δεν υπήρχε η δυνατότητα εμφάνισης της κυματομορφής σε παλμογράφο αλλά η μόνη ένδειξη ήταν ο χρόνος διαδρομής του κύματος πράγμα το οποίο δεν επιτρέπει την διαπίστωση του ότι ο παρατηρούμενος χρόνος αντιστοιχεί σε πρώτη άφιξη. Επίσης προτείνεται η μέτρηση της ταχύτητας  $S$  κυμάτων στο εργαστήριο.

Για την πιο ολοκληρωμένη σύγκριση των δύο μεθόδων προτείνεται η εφαρμογή των εργαστηριακών μεθόδων σε μεγαλύτερο αριθμό δοκιμίων από την περιοχή που διασκοπήθηκε με την σεισμική μέθοδο. Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής όμως δεν υπήρχε αυτή η δυνατότητα λόγω της εν εξελίξει εκμετάλλευσης στην υπό μελέτη περιοχή.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία συνδυαστικής ερμηνείας τόσο στο πεδίο όσο και στο εργαστήριο για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του μαργαϊκού ασβεστόλιθου είναι χρήσιμη. Η προσπάθεια πρέπει να ενταθεί και να επικεντρωθεί στον ποσοτικό προσδιορισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν την ταχύτητα και σε άλλα είδη πετρωμάτων. Ο ποσοτικός αυτός προσδιορισμός ξεπερνάει τα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας και φτάνει στα όρια μεταπτυχιακών εργασιών. Η εργασία αυτή δίνει τον στόχο και την κατεύθυνση που θα πρέπει να ακολουθηθεί.

## Ελληνική βιβλιογραφία

1. **Αγιουτάντης, Γ. Ζ. και Σ. Π. Μερτίκας, (2003).** Ένας πρακτικός οδηγός για τη Συγγραφή Τεχνικών Κειμένων. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα
2. **Αγιουτάντης, Γ. Ζ., (2002).** Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
3. **Βαρότσης, Ν., (2002).** Σημειώσεις Εργαστηρίων Μηχανικής Ταμιευτήρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. **Βαφείδης, Α., (1993).** Εφαρμοσμένη Γεωφυσική – Ι, Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
5. **Κλεφτάκης, Σ.** Εν εξελίξει διδακτορική εργασία.
6. **Μυλωνάκης, Ι.Γ.Μ.Ε, (1991).** Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο ‘Πέραμα’, κλίμακα 1:50000
7. **Παπακωνσταντίνου, Κ., (2004).** Μελέτη των μηχανικών παραμέτρων του εδάφους με τη χρήση σεισμικών μεθόδων και εργαστηριακών μετρήσεων, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
8. **Ραπτάκης, Α., (1995).** Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκριση τους, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνική σχολή Α.Π.Θ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
9. **Στειακάκης, Ε., (2006).** Προσωπική επικοινωνία.

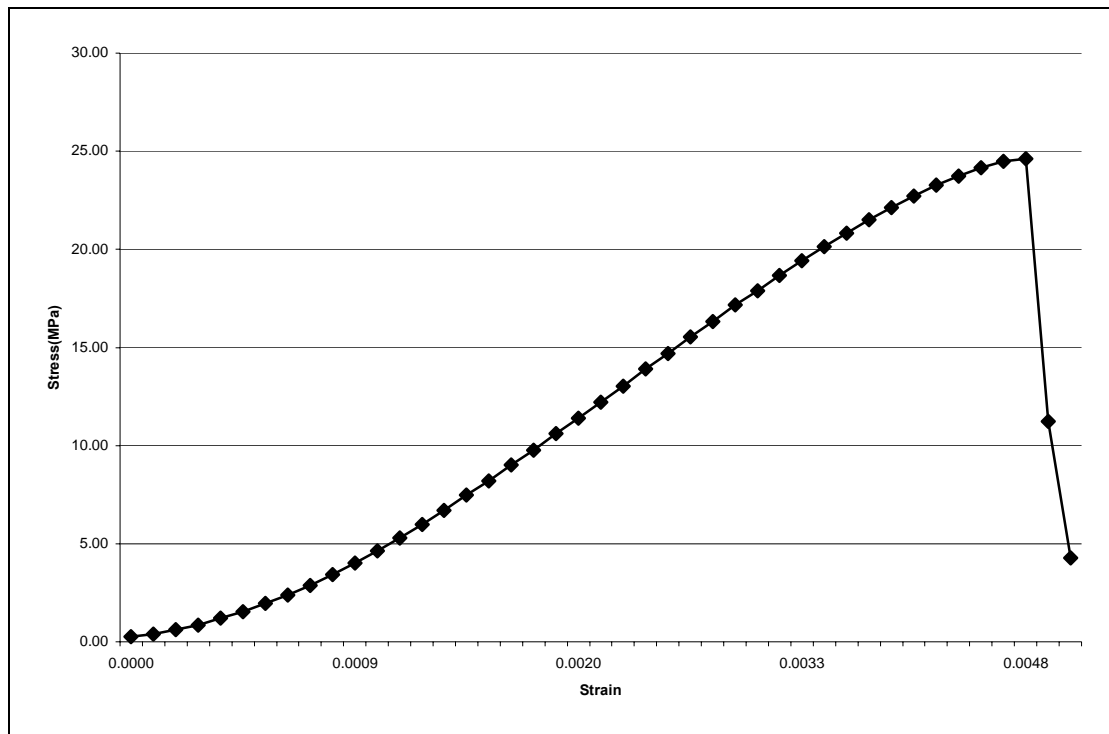
## Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

1. **Aki, K. and P. Richards, (1980).** *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, Vol. 1, W.H. Freeman, San Francisco.
2. **Brovtsyn, K. and G.S. Chersheva, (2000).** Experimental ultrasonic study of the moisture content of clay rocks, *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol. 41, pp 320 – 321, retrieved September, 9, 2000 (translated from *Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika*, Vol. 9, pp. 35 – 36, retrieved September, 2000), from <http://www.springerlink.com>.
3. **Leucci, G., (2006).** Experimental studies on the effects of fracture on the P and S wave velocity propagation in sedimentary rock (“Calcarenite del Salento”), *Engineering Geology*, Vol 84, pp 130 – 142, retrieved March, 6, 2006, from <http://www.sciencedirect.com>.
4. **Malinsky, K., (1996).** Ultrasonic investigations in a coal mine, *Ultrasonics*, Vol 34, pp. 421 – 423, retrieved 1996, from <http://www.sciencedirect.com>.
5. **Popovic, S., (2004).** Effects of uneven moisture distribution on the strength of and wave velocity in concrete, *Ultrasonics*, Vol. 43, pp 429 - 434, retrieved November, 4, 2004, from <http://www.sciencedirect.com>.
6. **Reynolds, M.J., (1997).** *An introduction to applied and environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
7. **Sheriff, R. E. and L.P. Geldart, (1995).** *Exploration Seismology*, 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge University Press, ISBN 0-521-46282-7.
8. **Wright, C., E.J. Walls and D. de J. Carneiro, (2000).** The seismic velocity distribution in the vicinity of a mine tunnel at Thabazimbi, South Africa, *Journal of Applied Geophysics*, Vol 44, pp 369 – 382, retrieved April, 13, 2000, from <http://www.sciencedirect.com>.

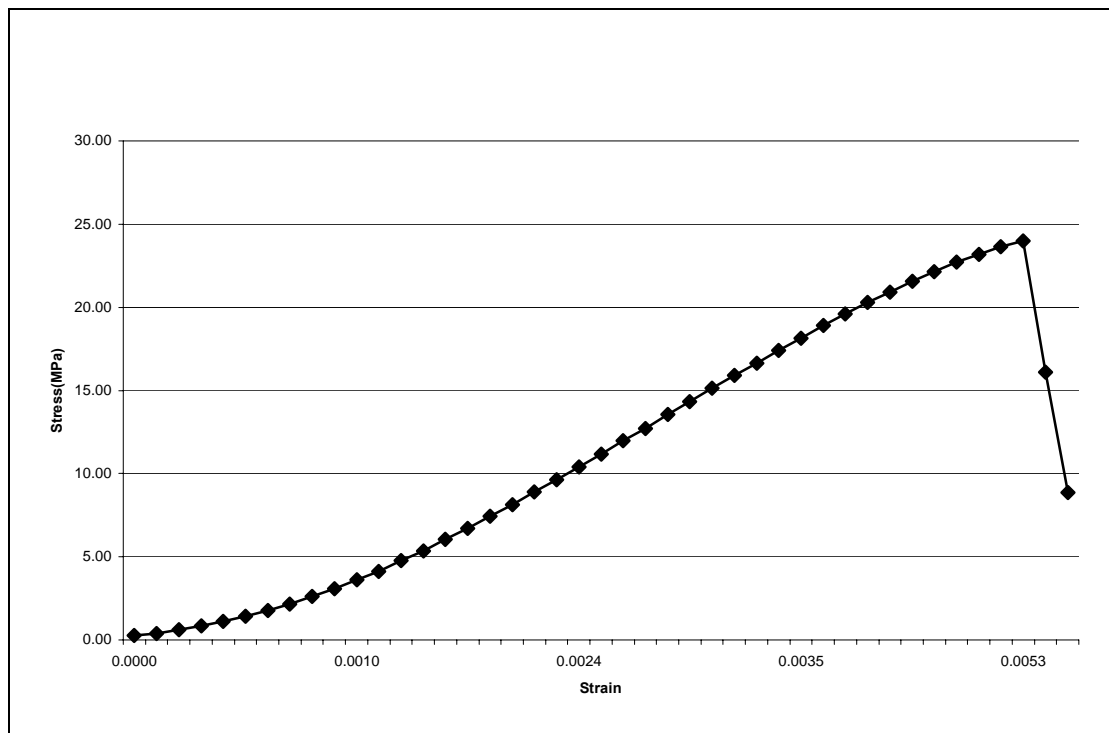


# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

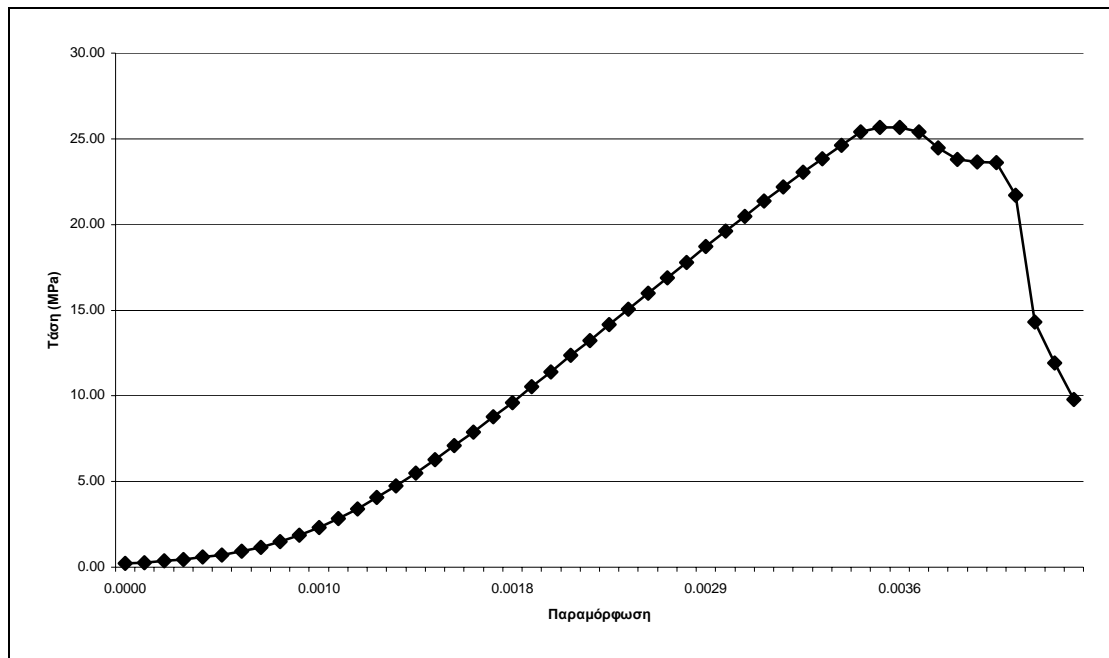
## Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης



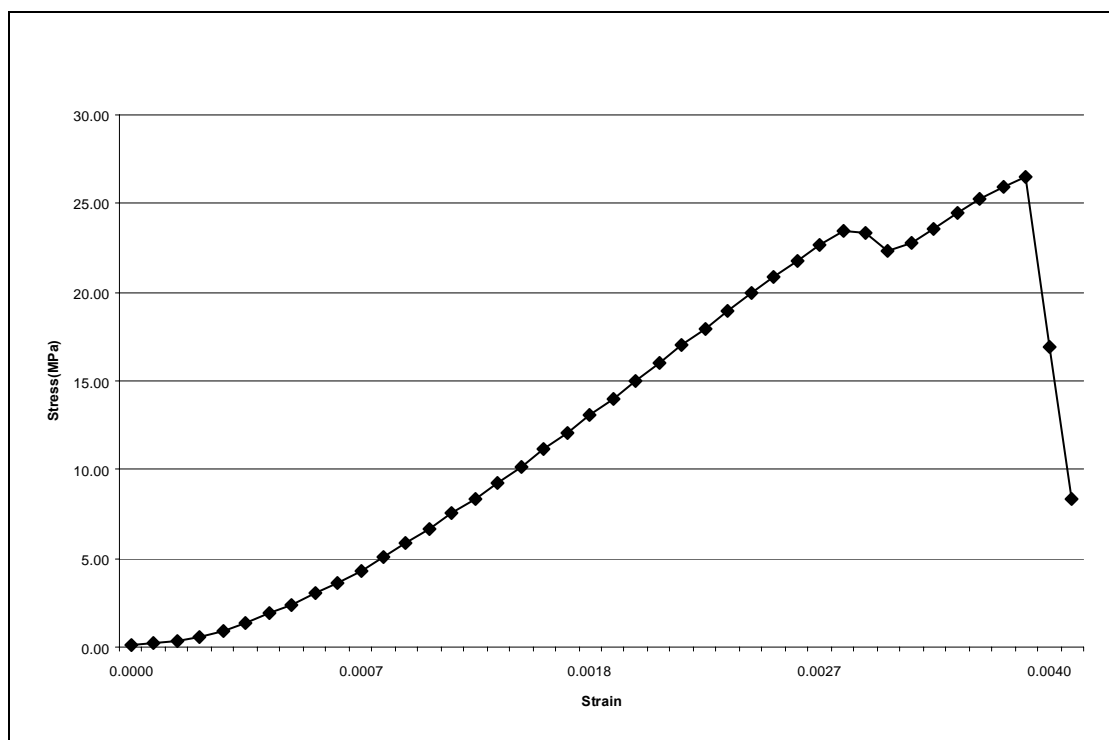
Σχήμα Α1. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 1B1.



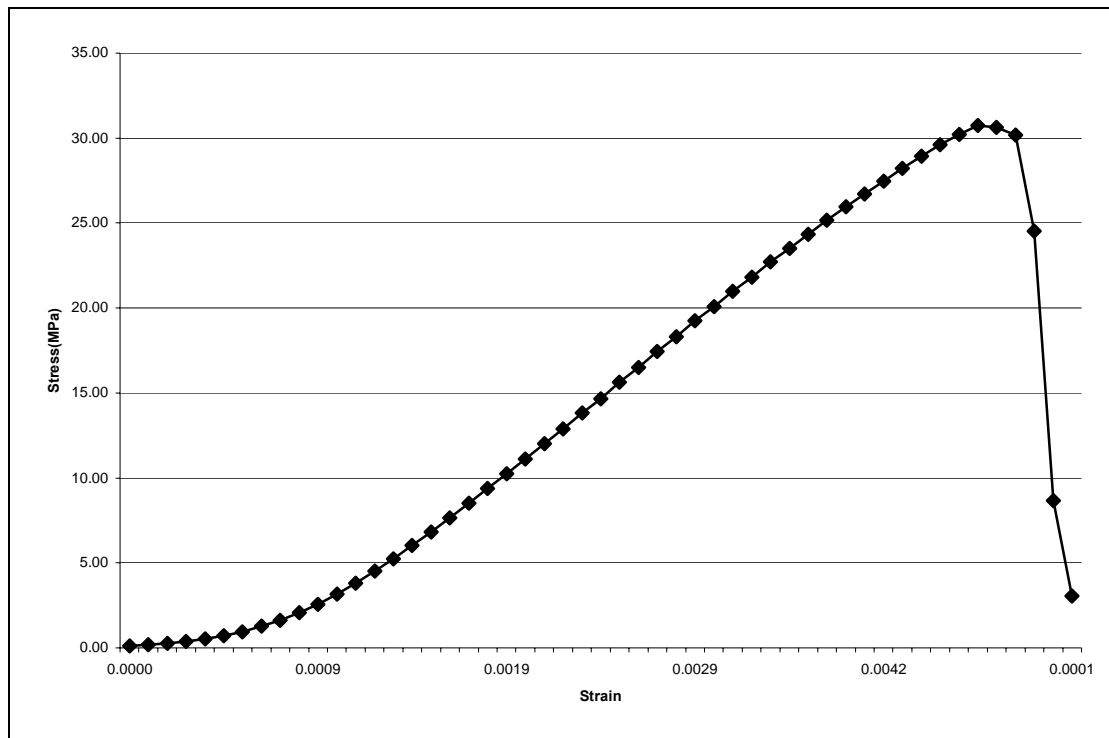
Σχήμα Α2. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 1B2.



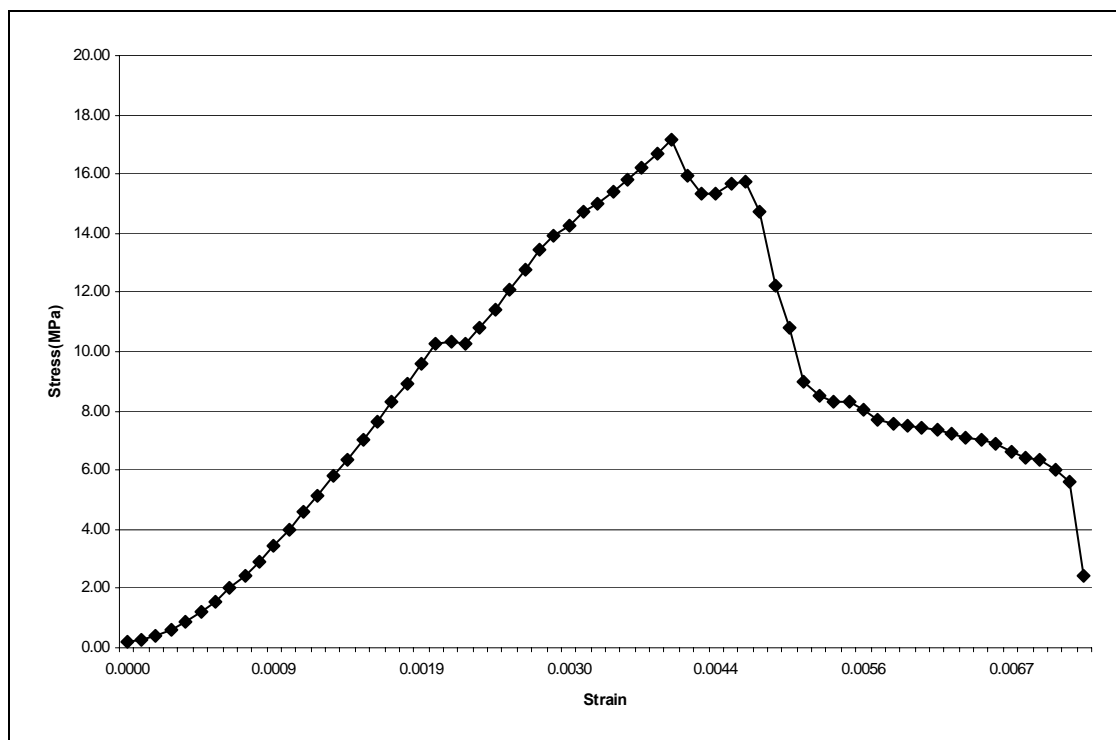
Σχήμα Α3. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 1C1.



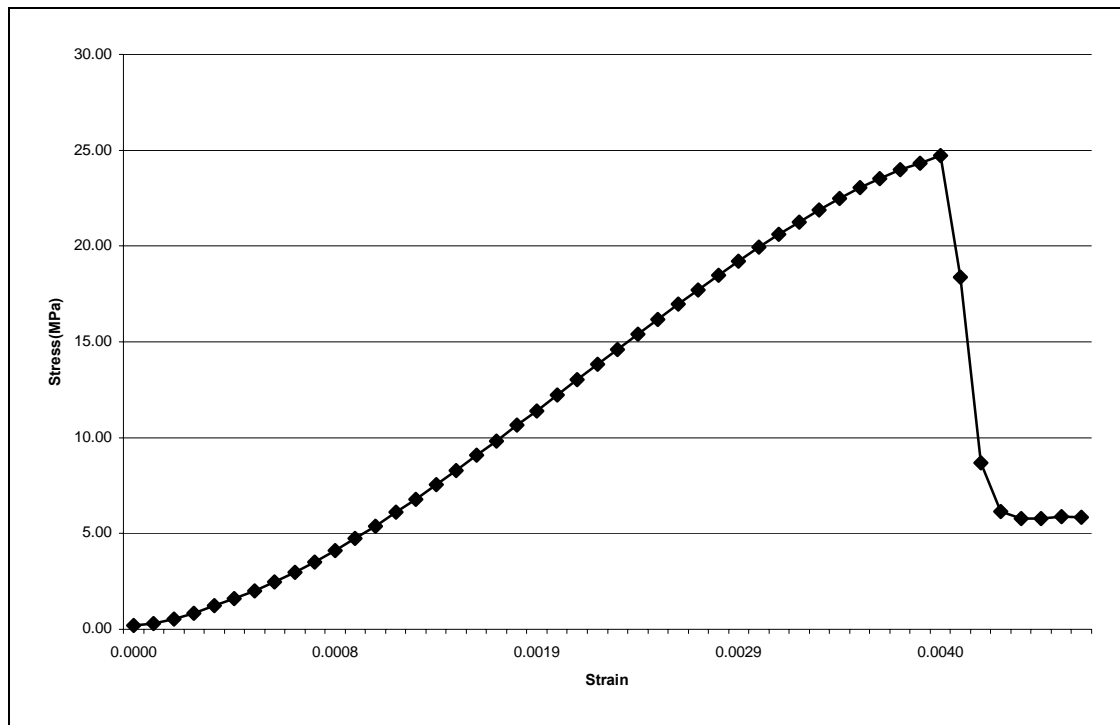
Σχήμα Α4. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 1C2.



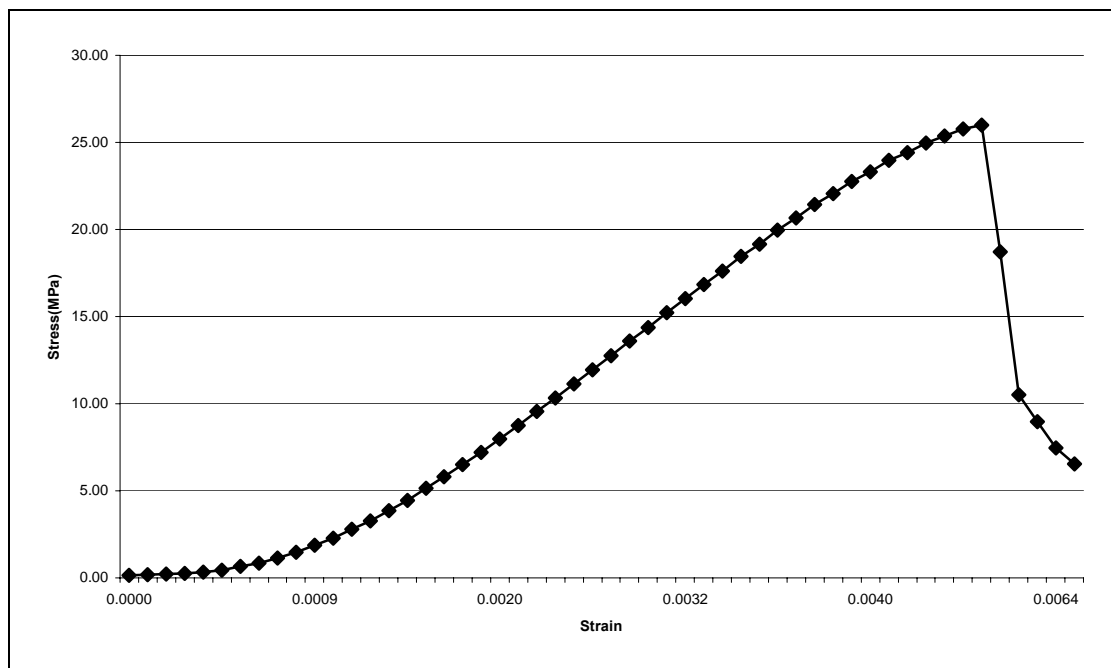
Σχήμα Α5. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 1D1.



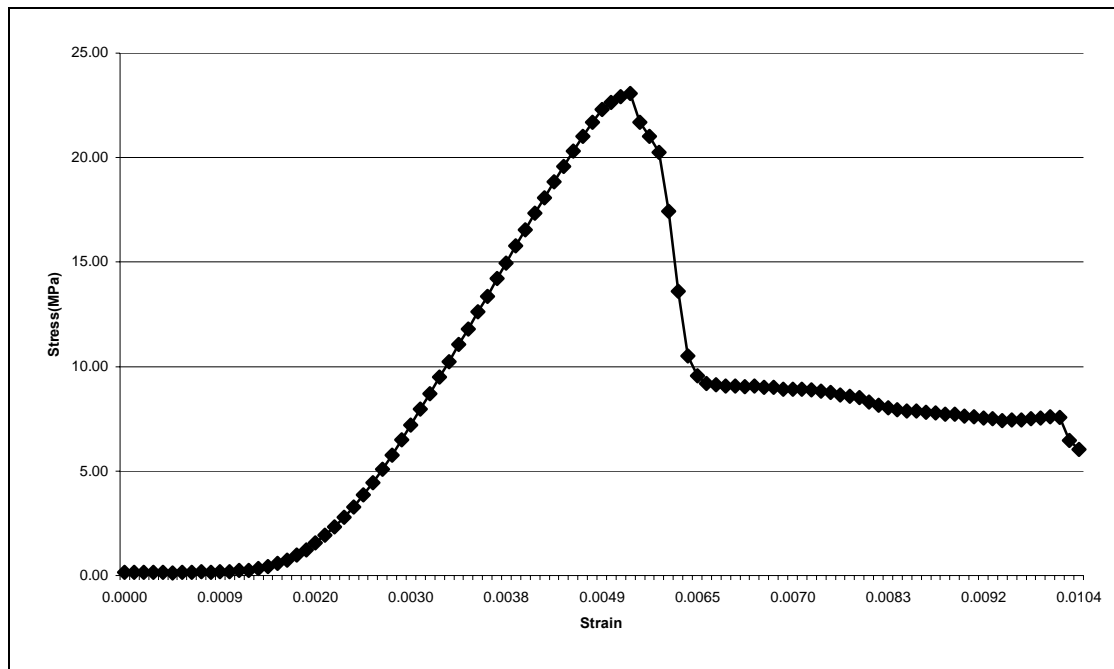
Σχήμα Α6. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 1D2.



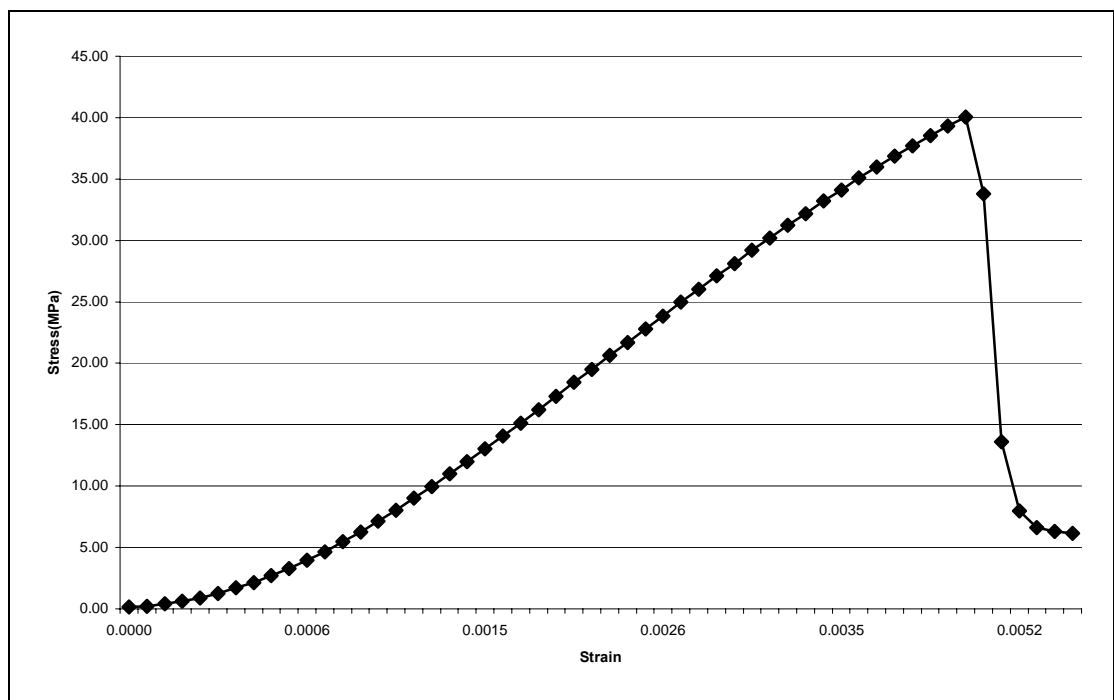
Σχήμα Α7. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 2B1.



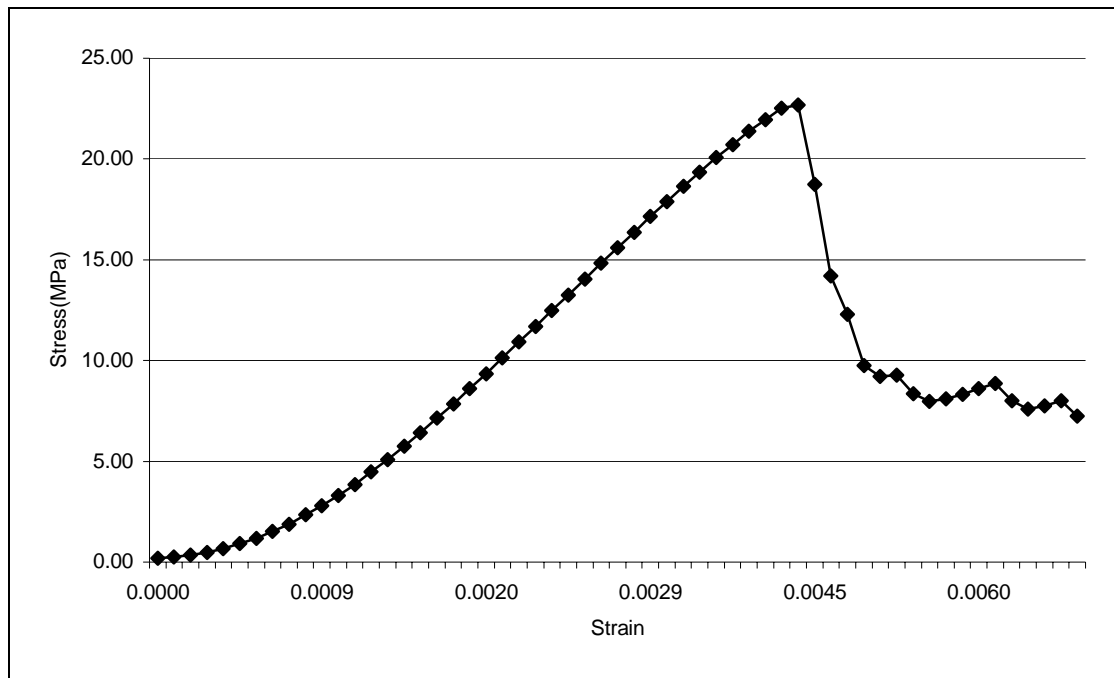
Σχήμα Α8. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 2B2.



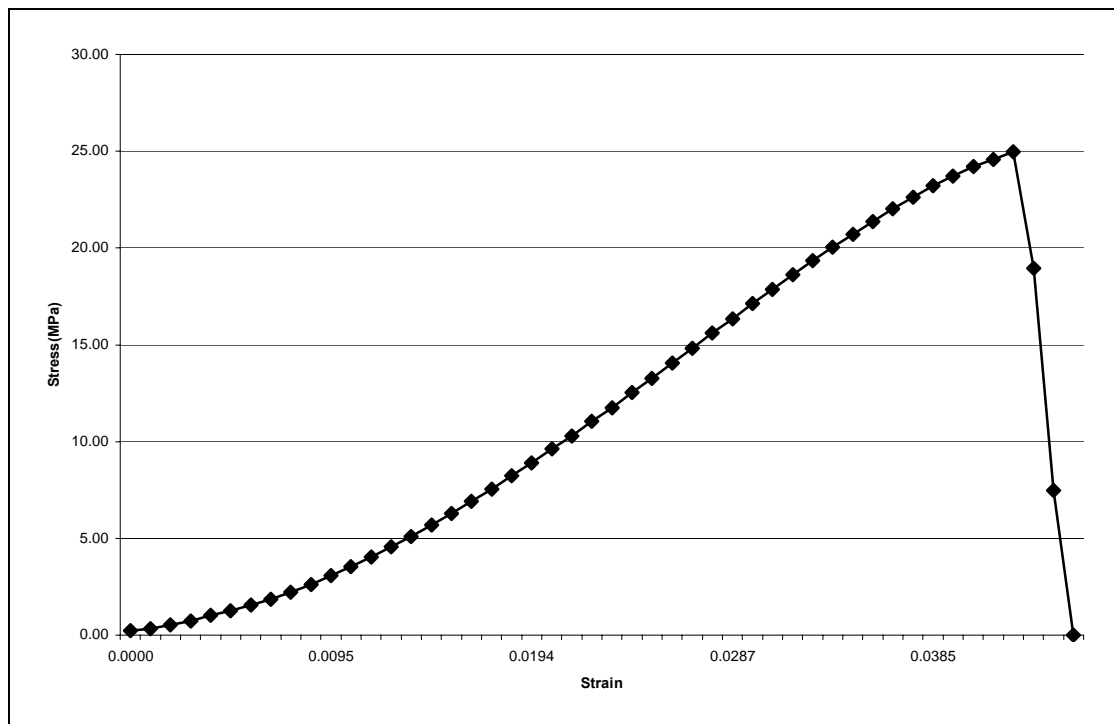
Σχήμα Α9. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 2D1.



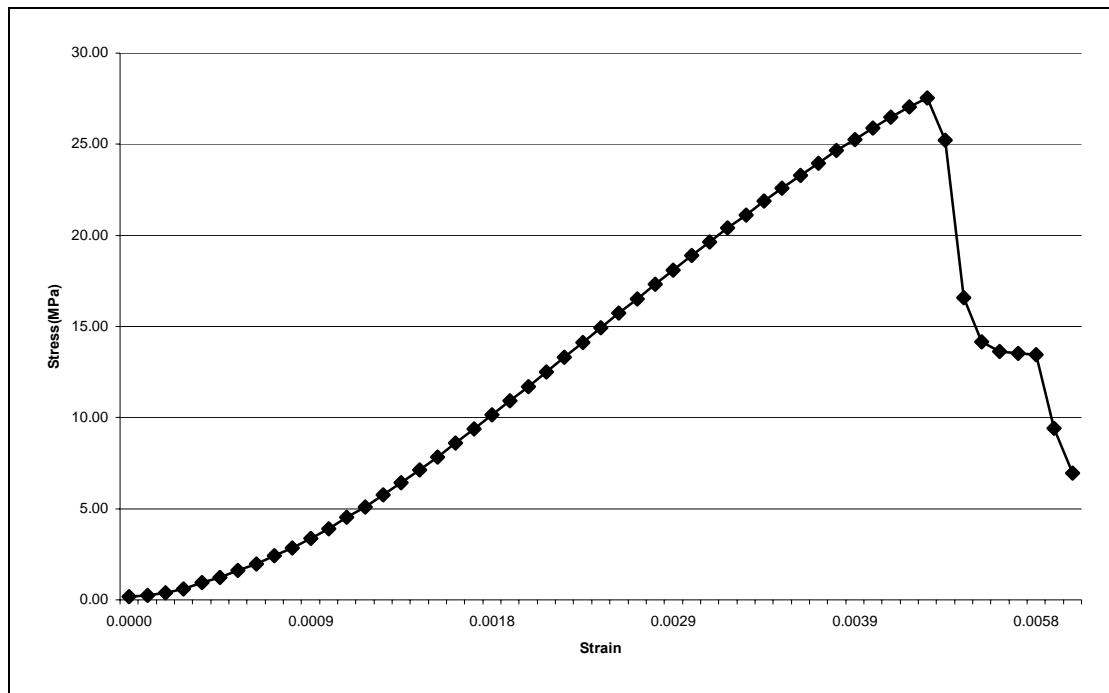
Σχήμα Α10. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 2D2.



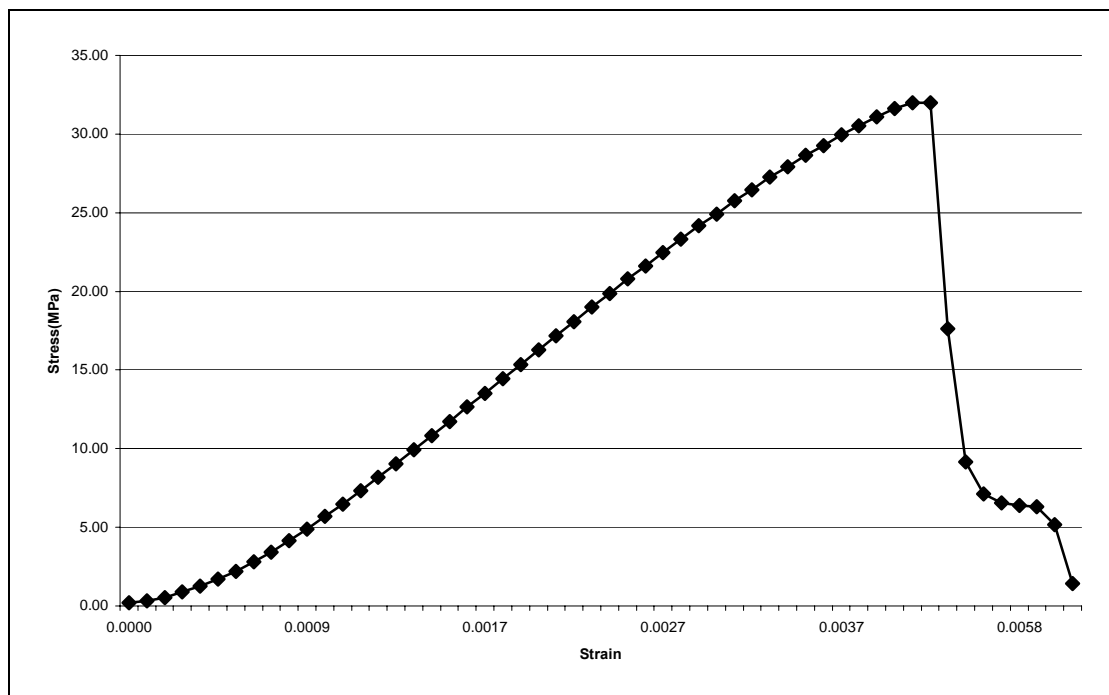
Σχήμα Α11. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 3B1.



Σχήμα Α12. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 3B2.

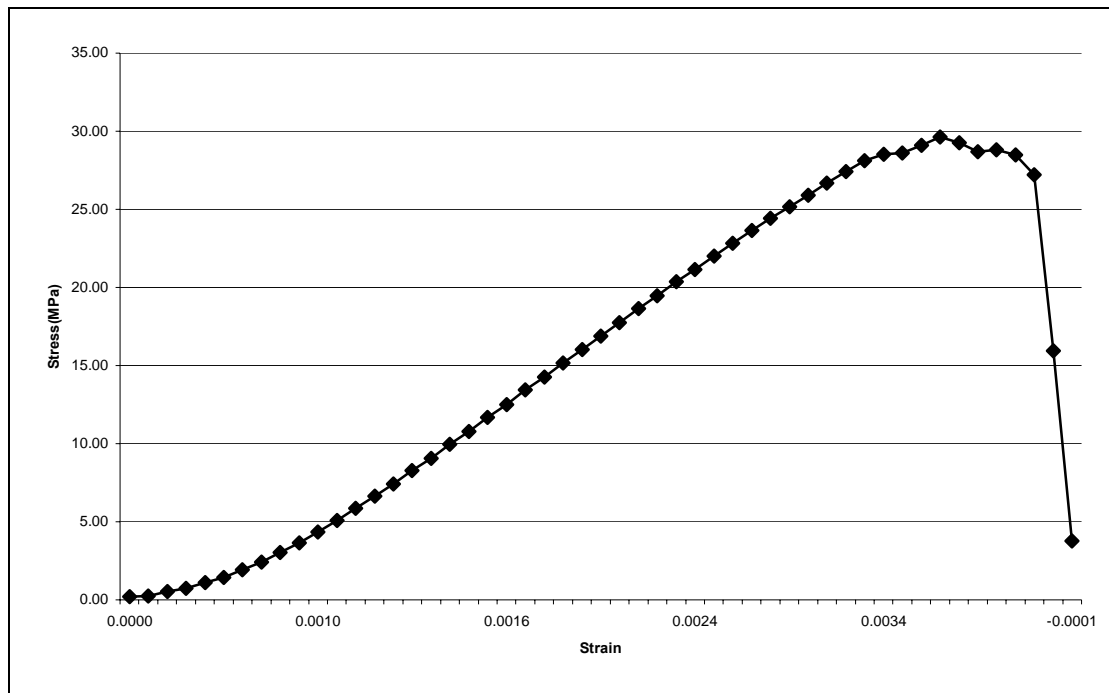


Σχήμα Α13. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 3C1.

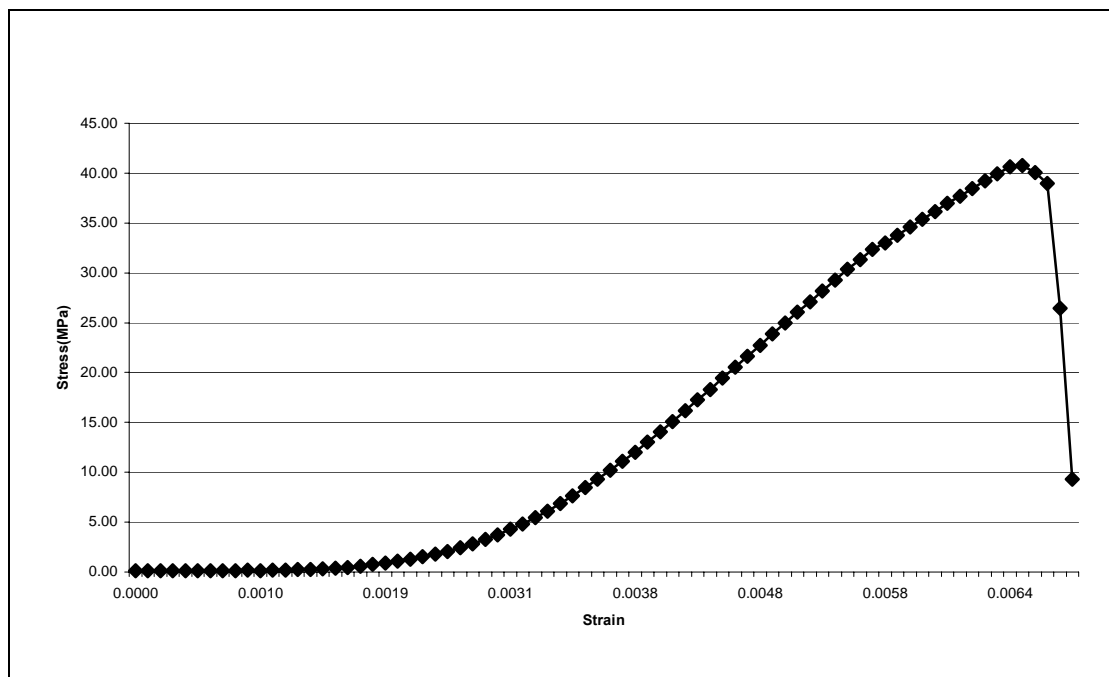


Σχήμα Α13. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 3C2.

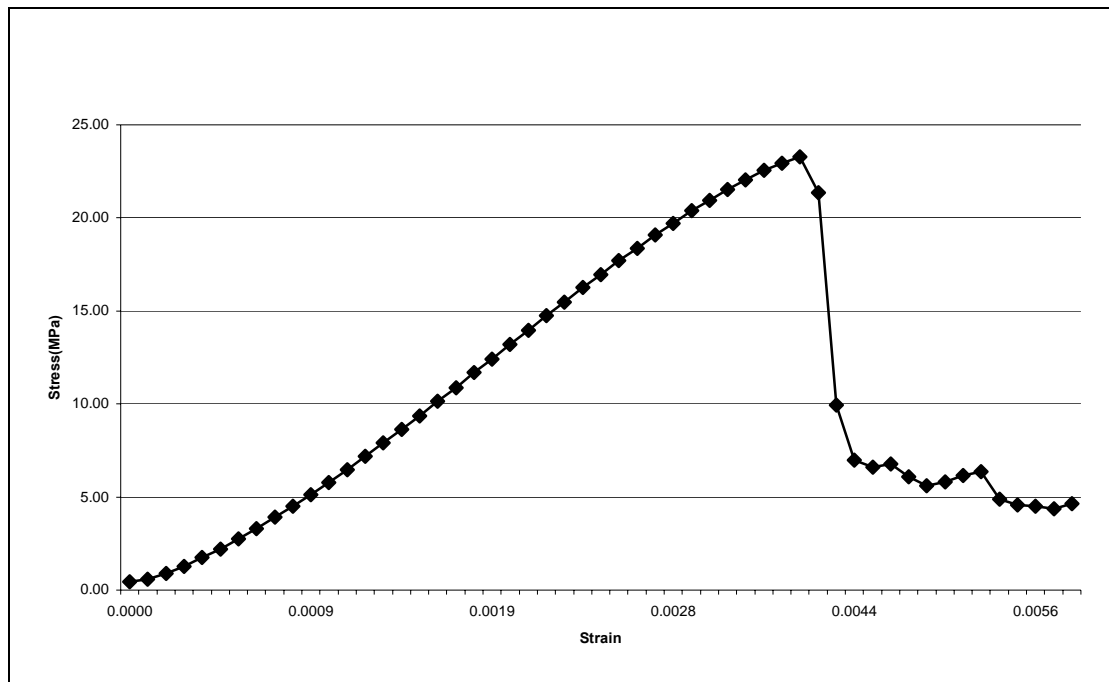




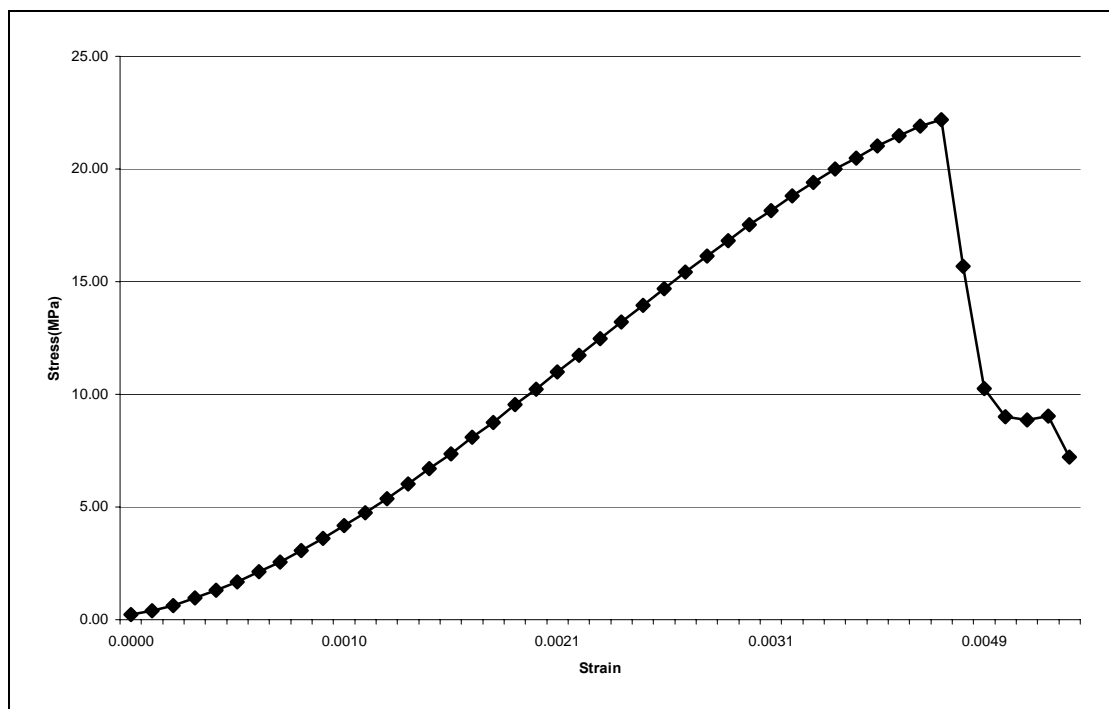
Σχήμα Α14. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 3D1.



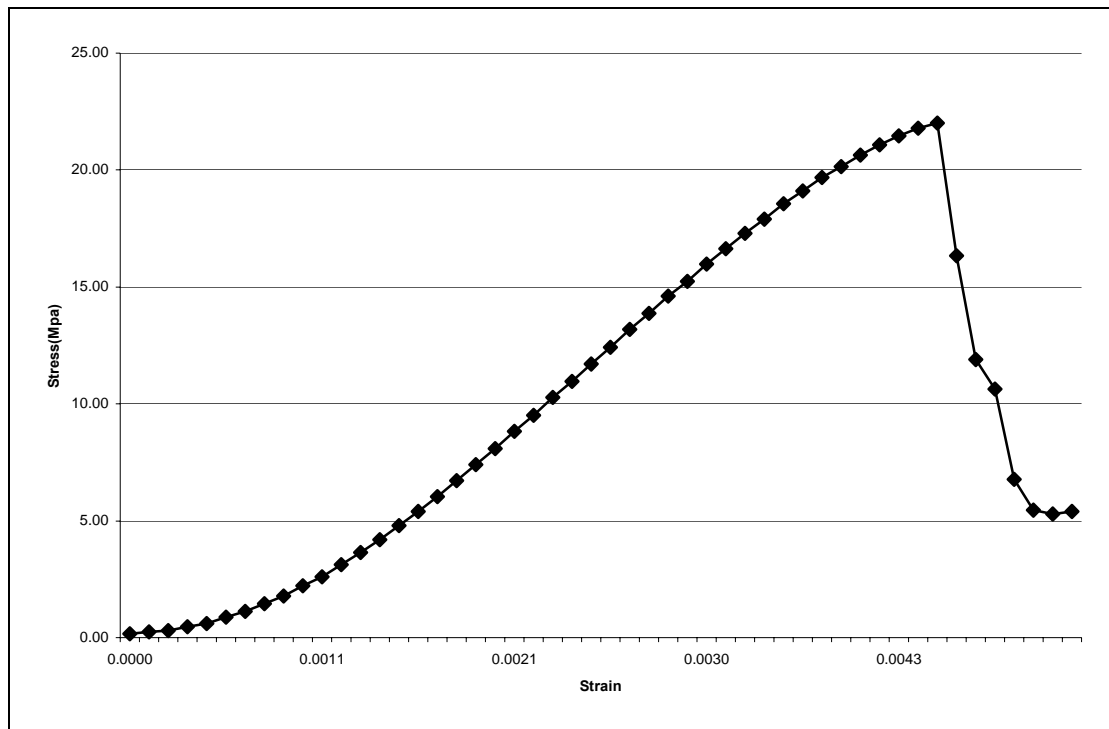
Σχήμα Α15. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 3D2.



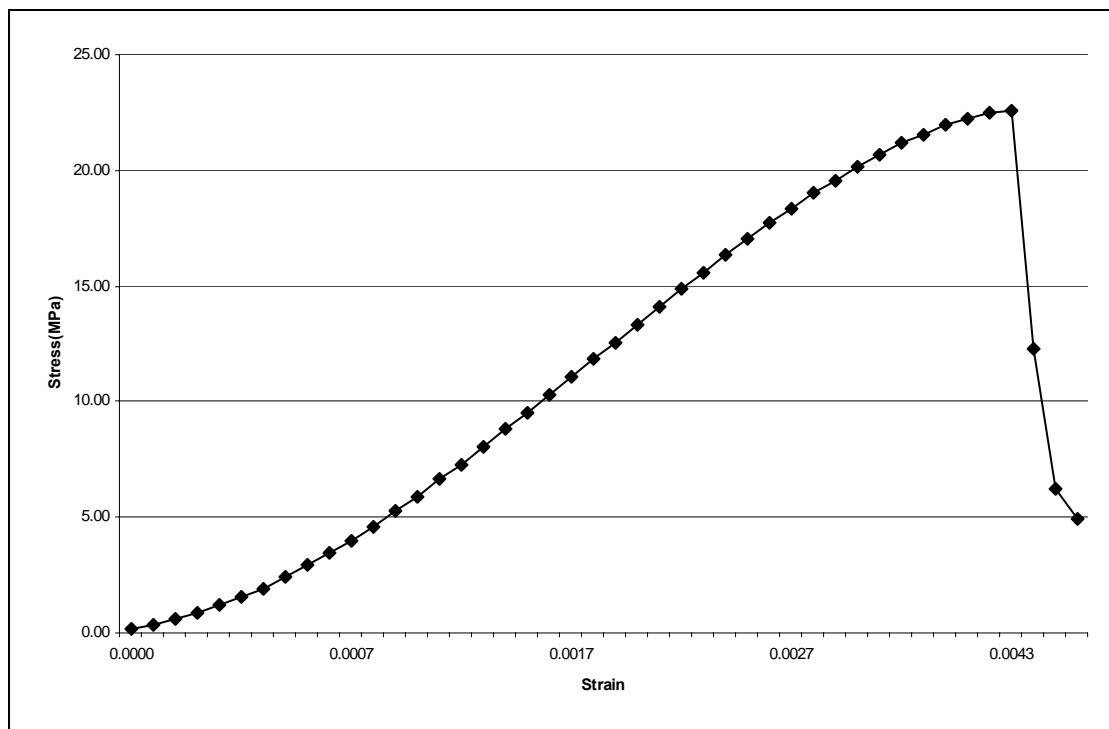
Σχήμα Α16. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 4B1.



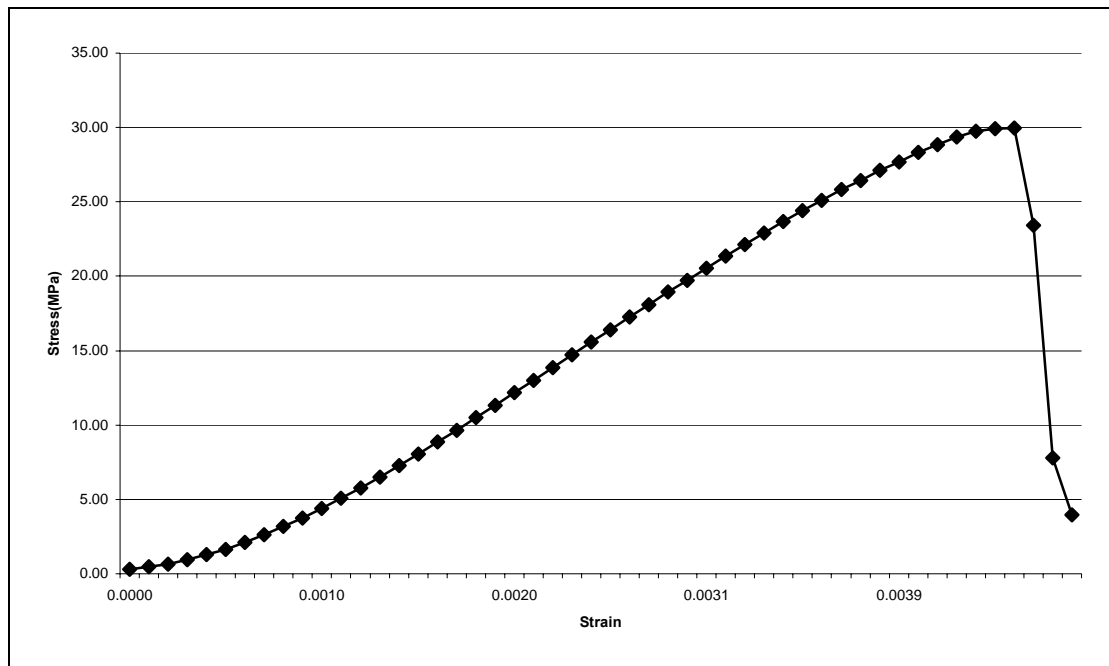
Σχήμα Α17. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 4B2.



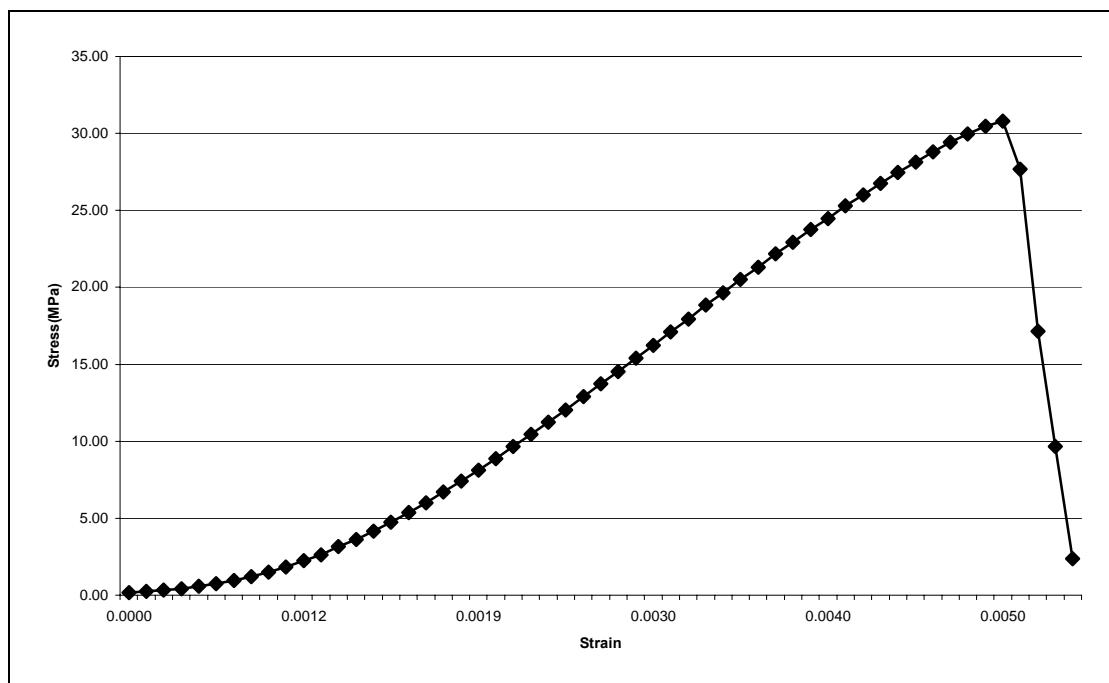
Σχήμα Α18. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 5B1.



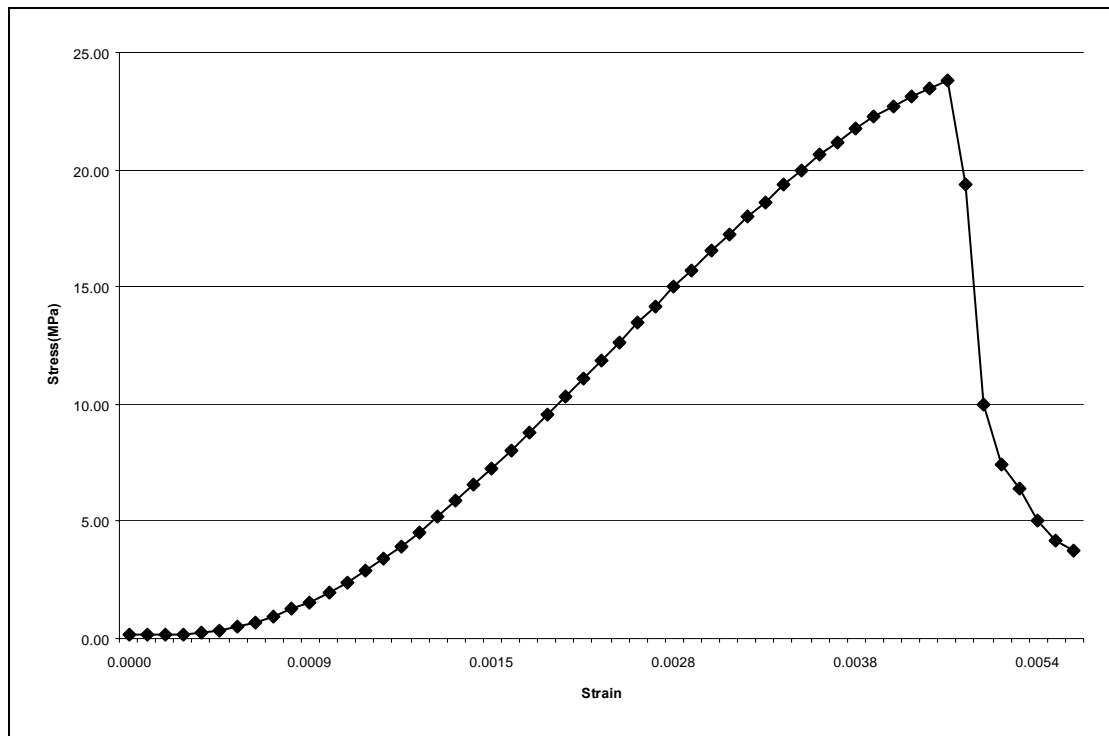
Σχήμα Α19. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 5B2.



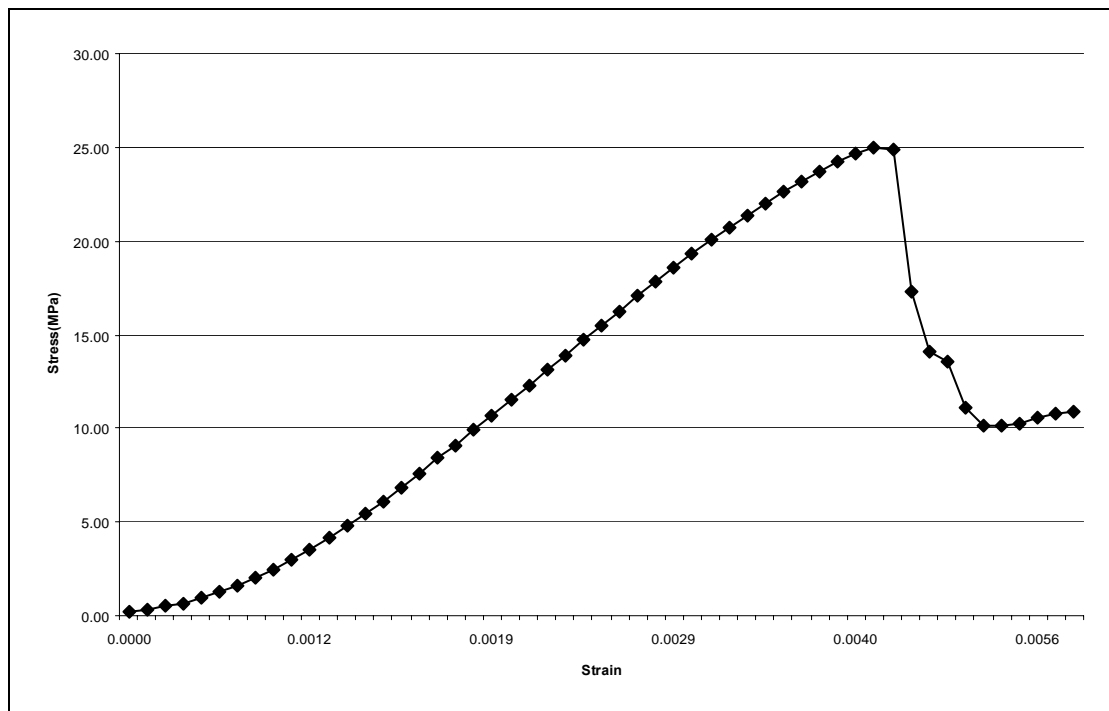
Σχήμα Α20. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 5C1.



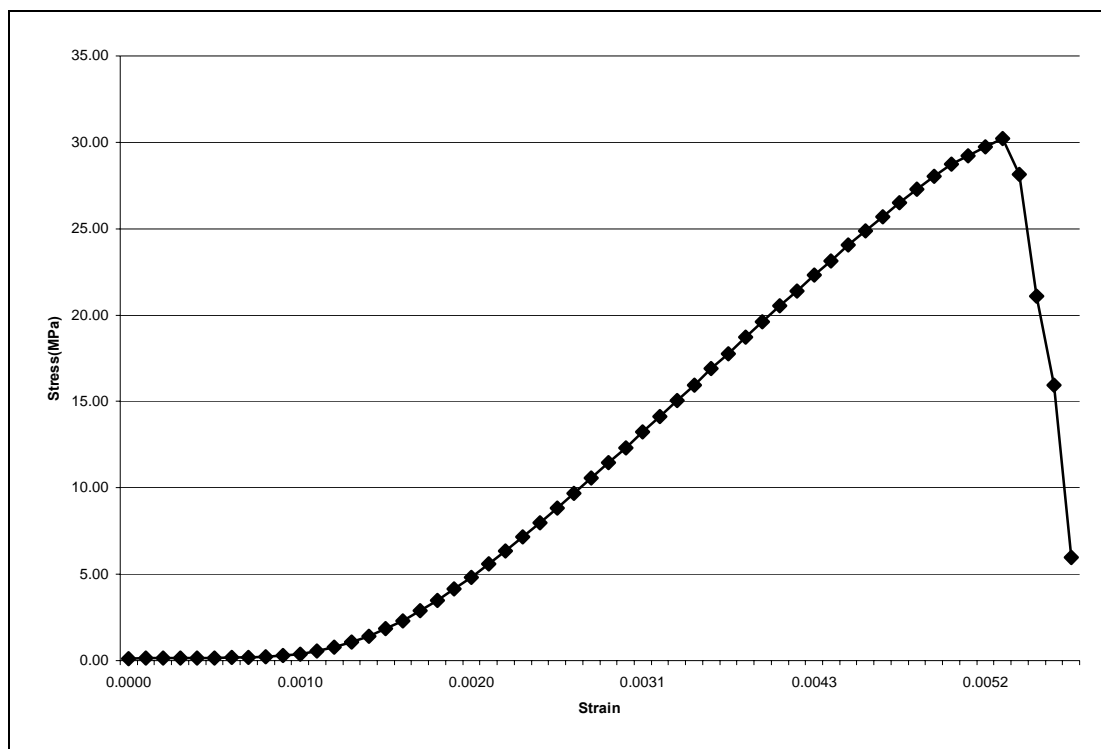
Σχήμα Α21. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 5C2.



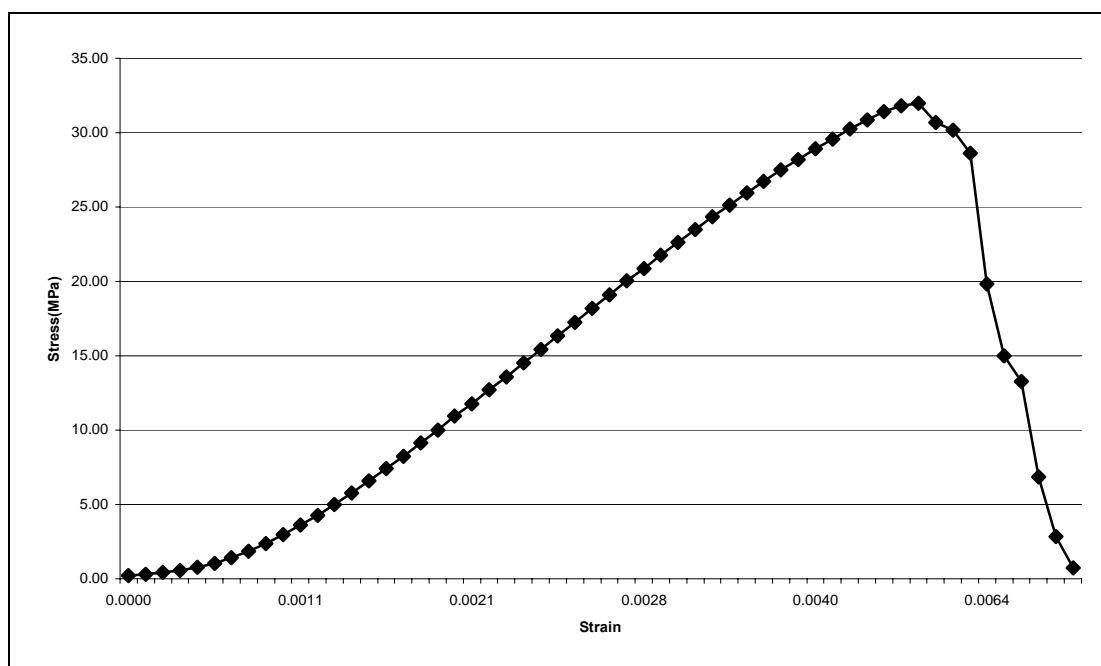
Σχήμα Α22. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 6B1.



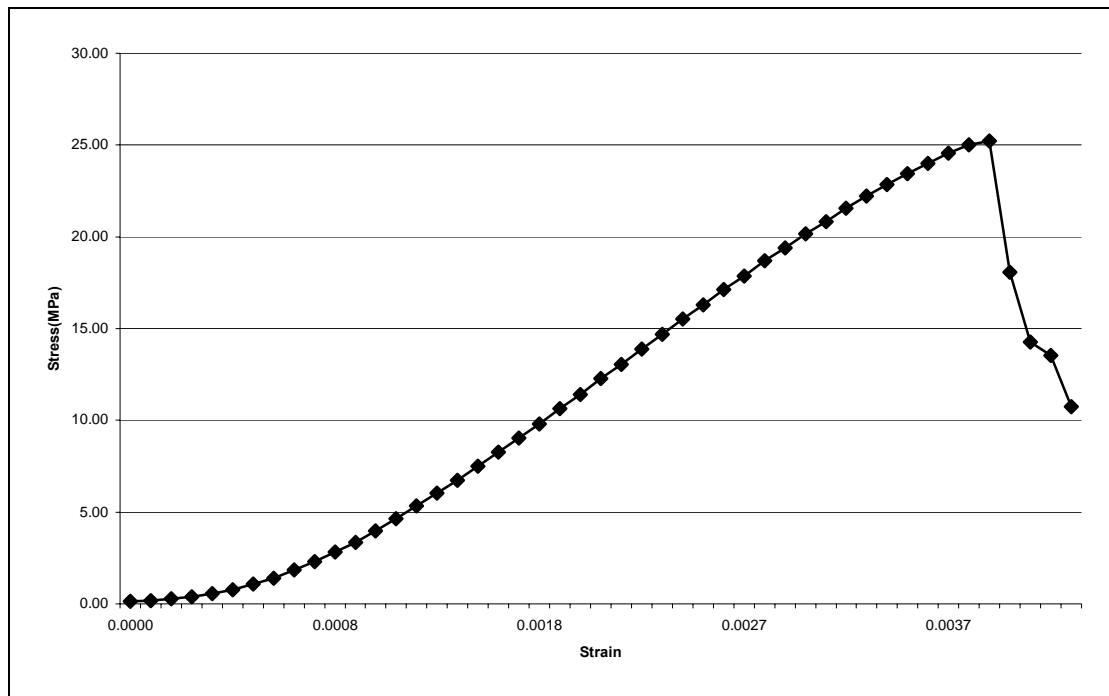
Σχήμα Α23. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 6B2.



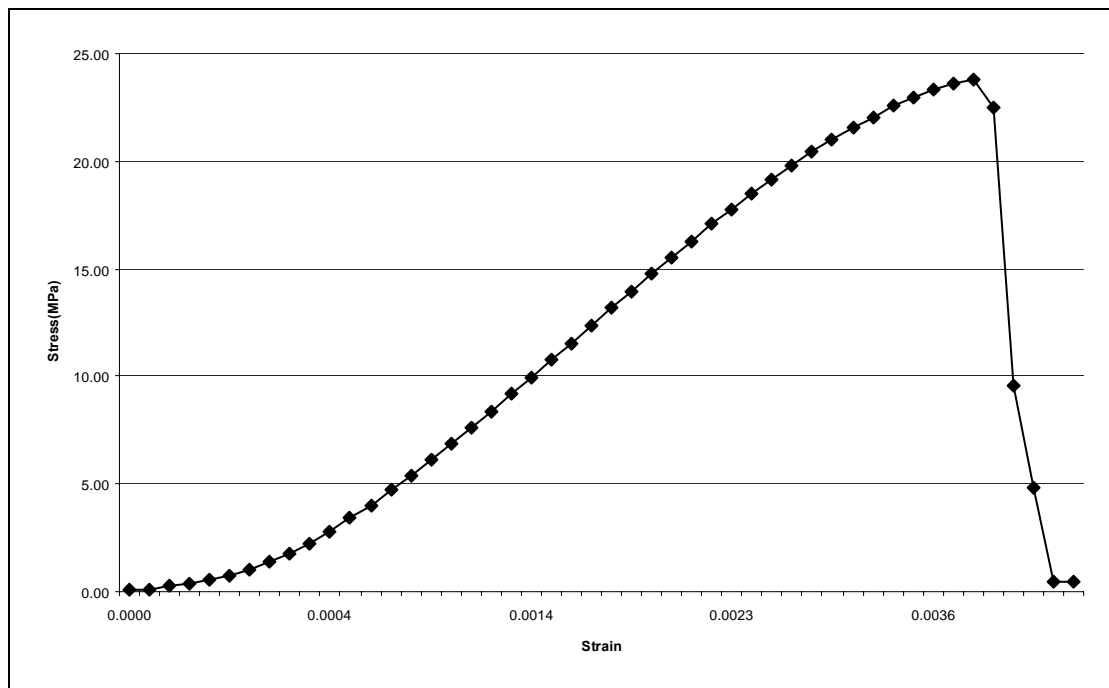
Σχήμα Α24. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 6C1.



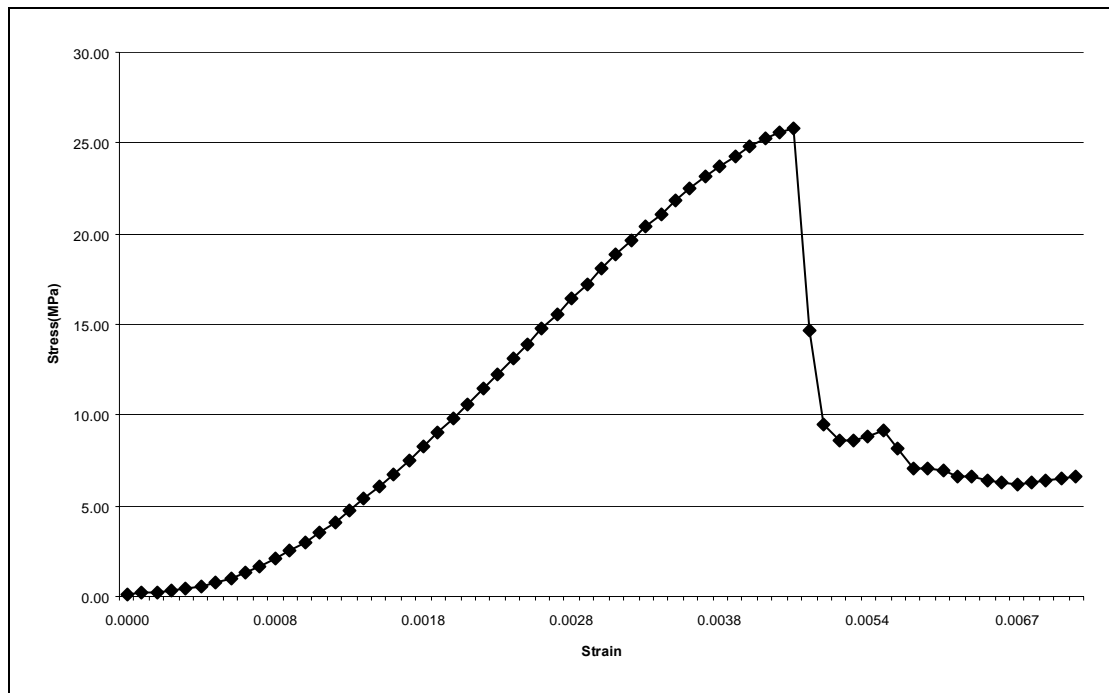
Σχήμα Α25. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 6C2.



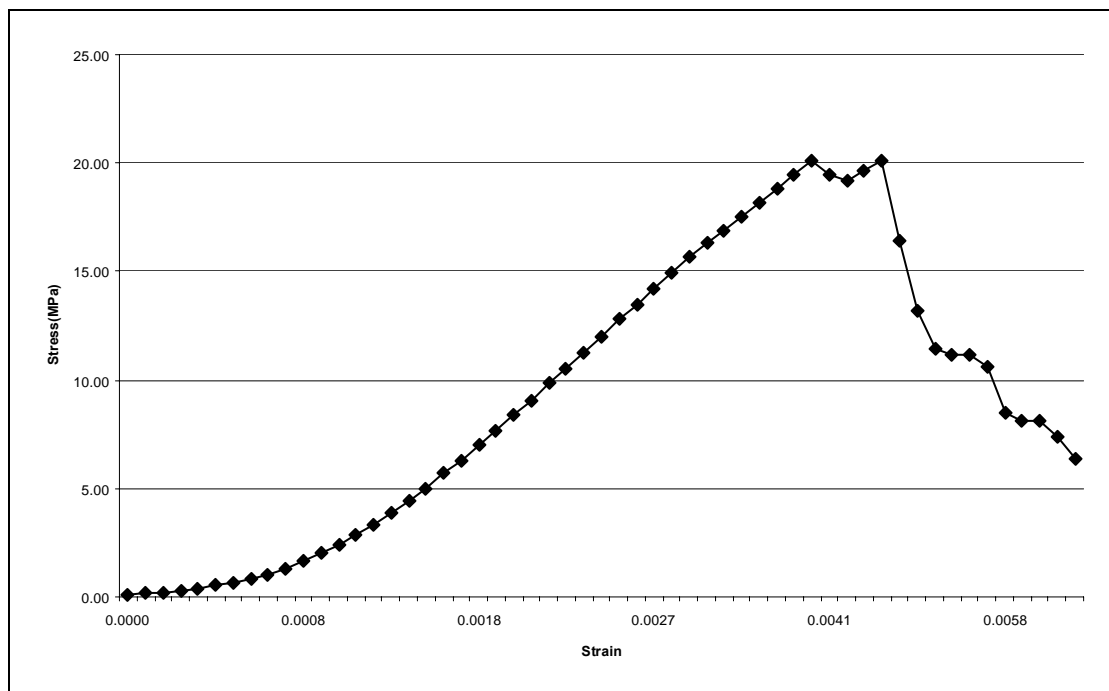
Σχήμα A26. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 8B1.



Σχήμα A27. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 8B2.



Σχήμα Α28. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 9B1.

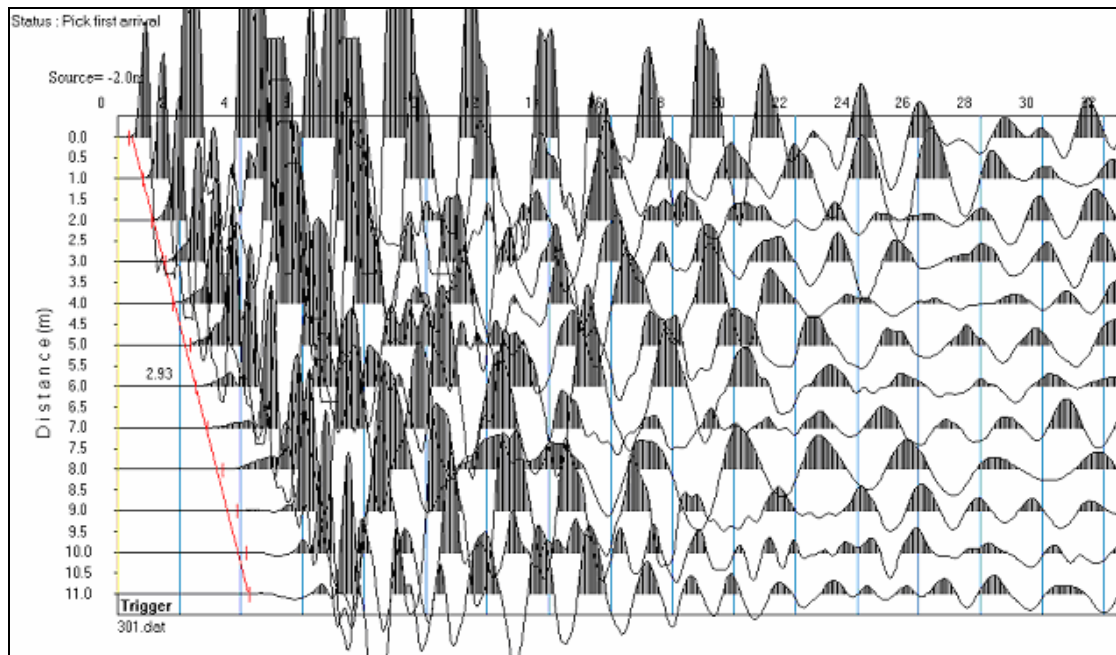


Σχήμα Α29. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης, Δοκίμιο 9B2.

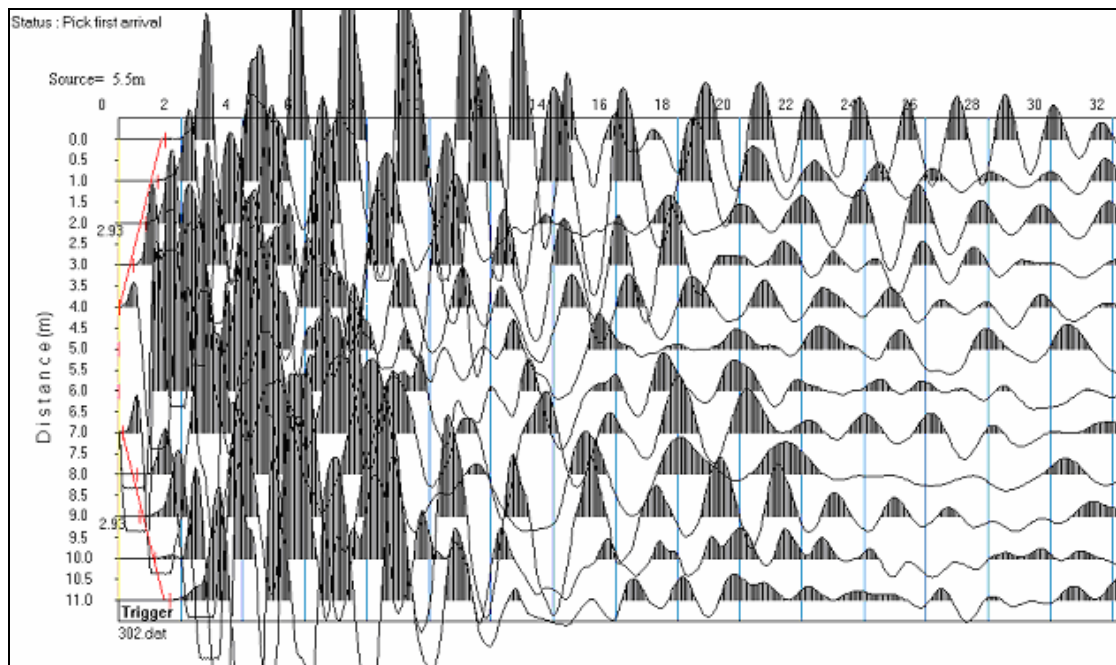


# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

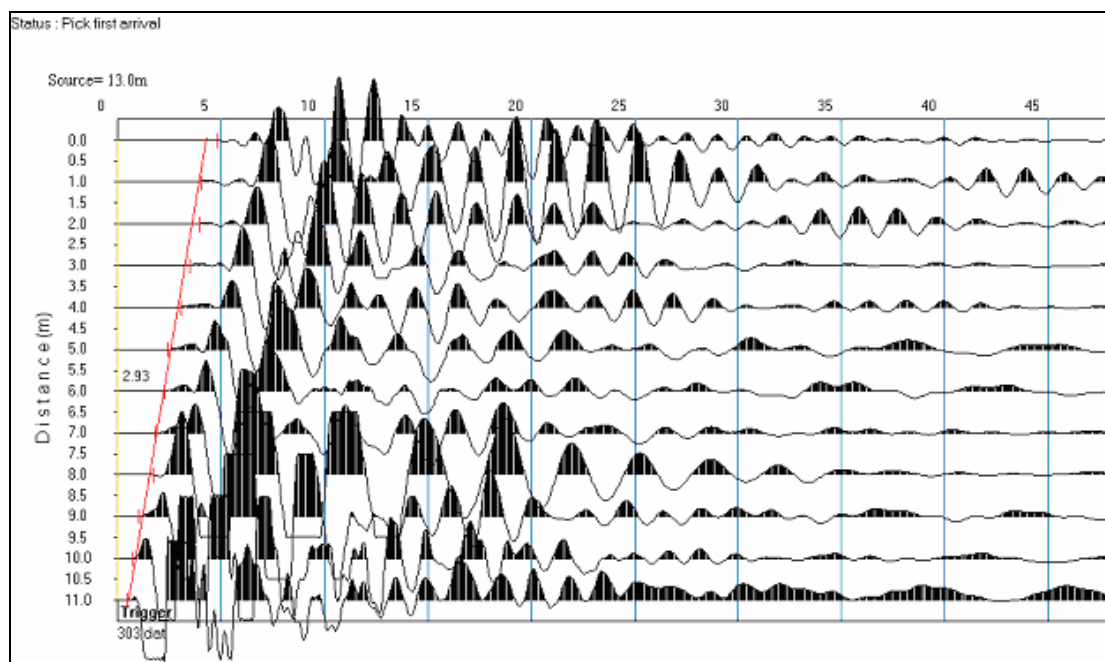
## Σεισμικές καταγραφές



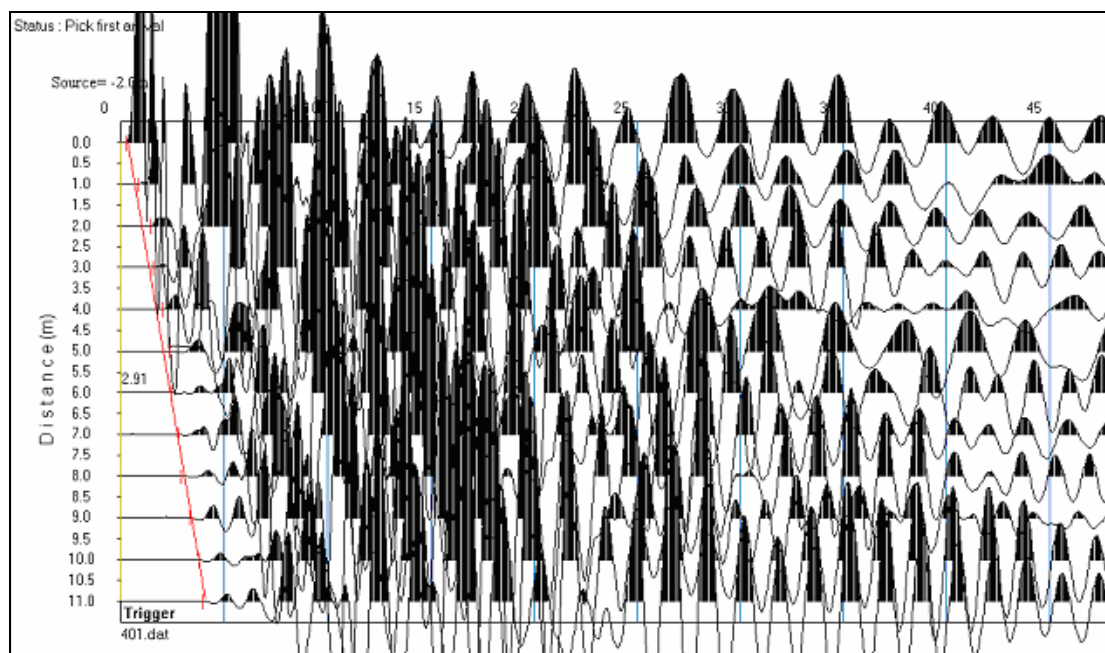
**Σχήμα B1.** Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 01. Καταγραφή 301.



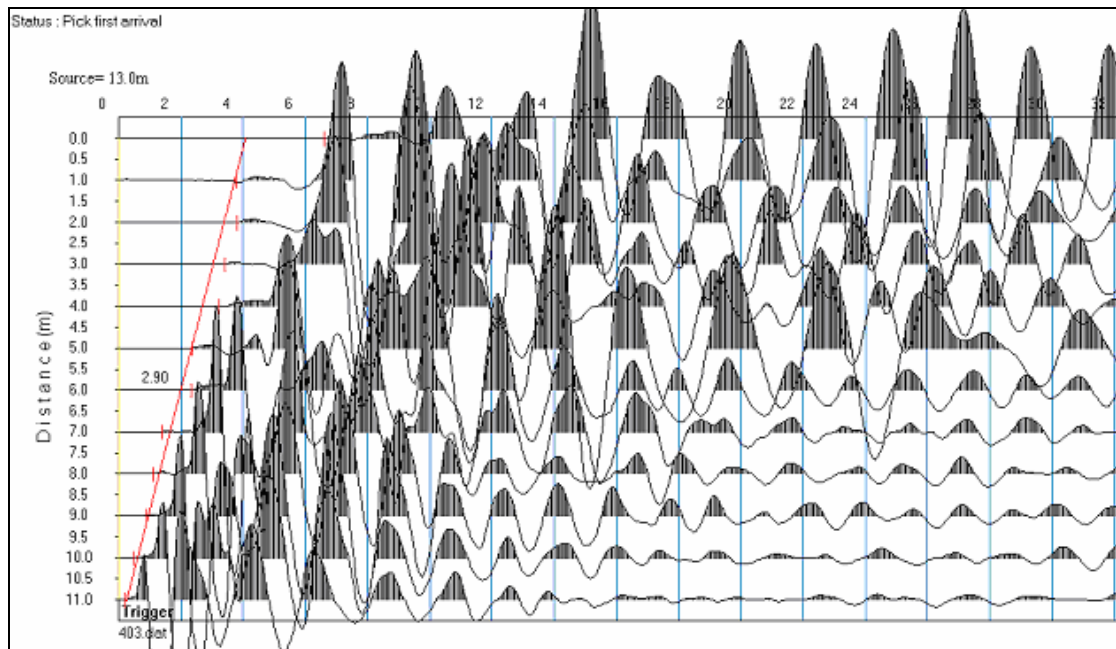
**Σχήμα B2.** Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 02. Καταγραφή 302.



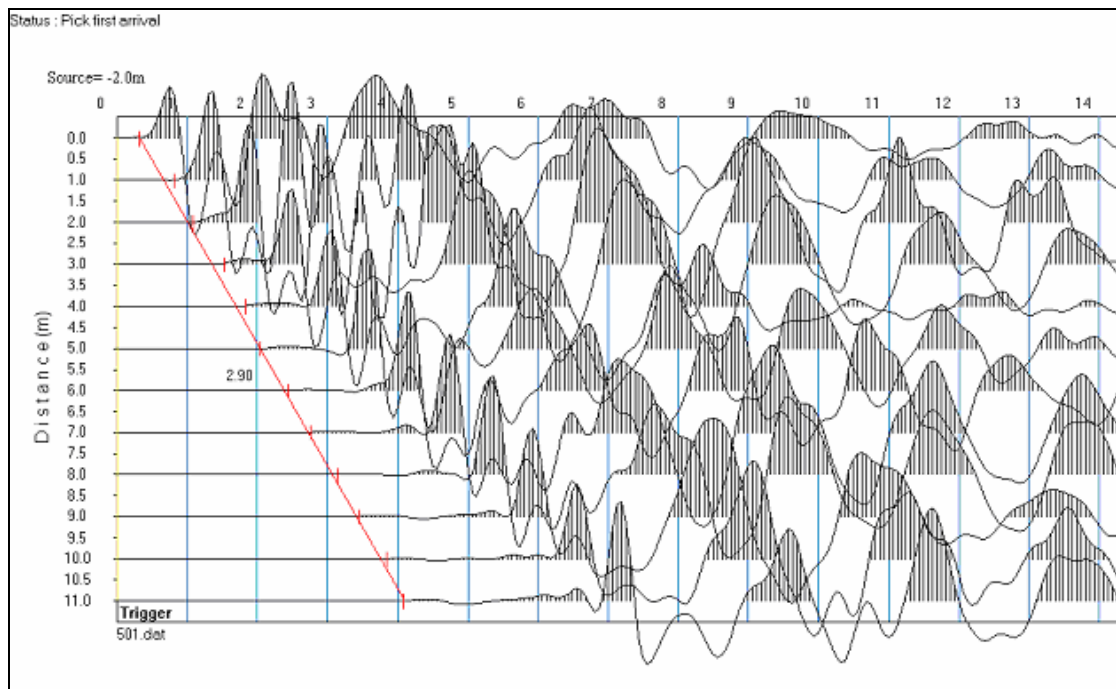
Σχήμα Β3. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 03. Καταγραφή 303.



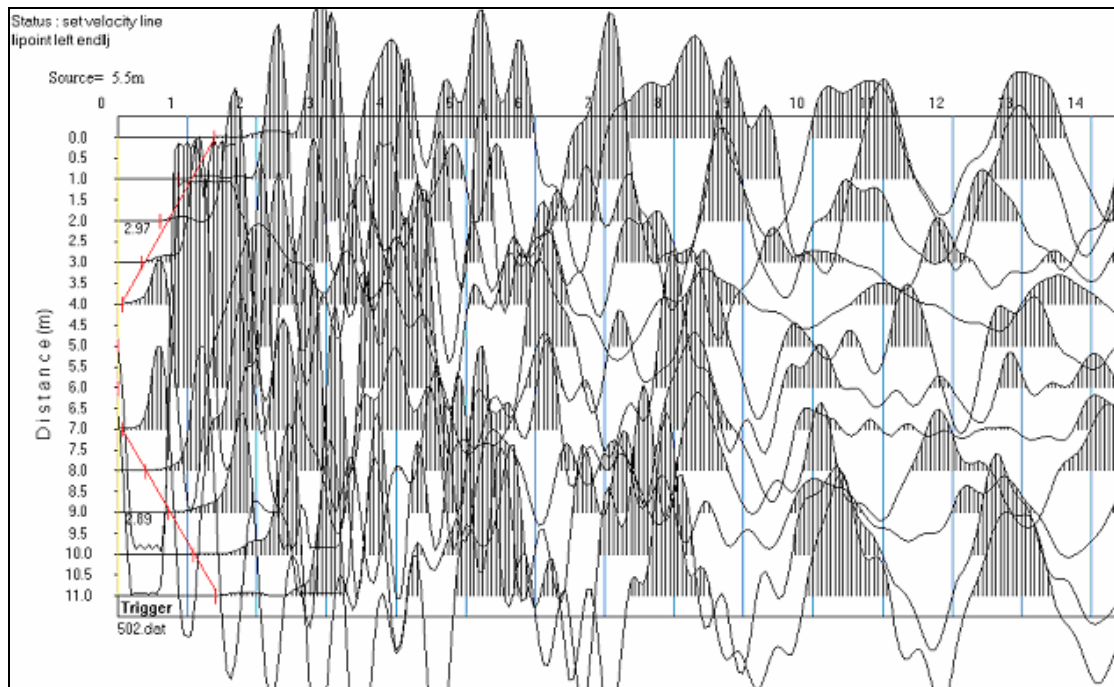
Σχήμα Β4. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 4, θέση πηγής 01. Καταγραφή 401.



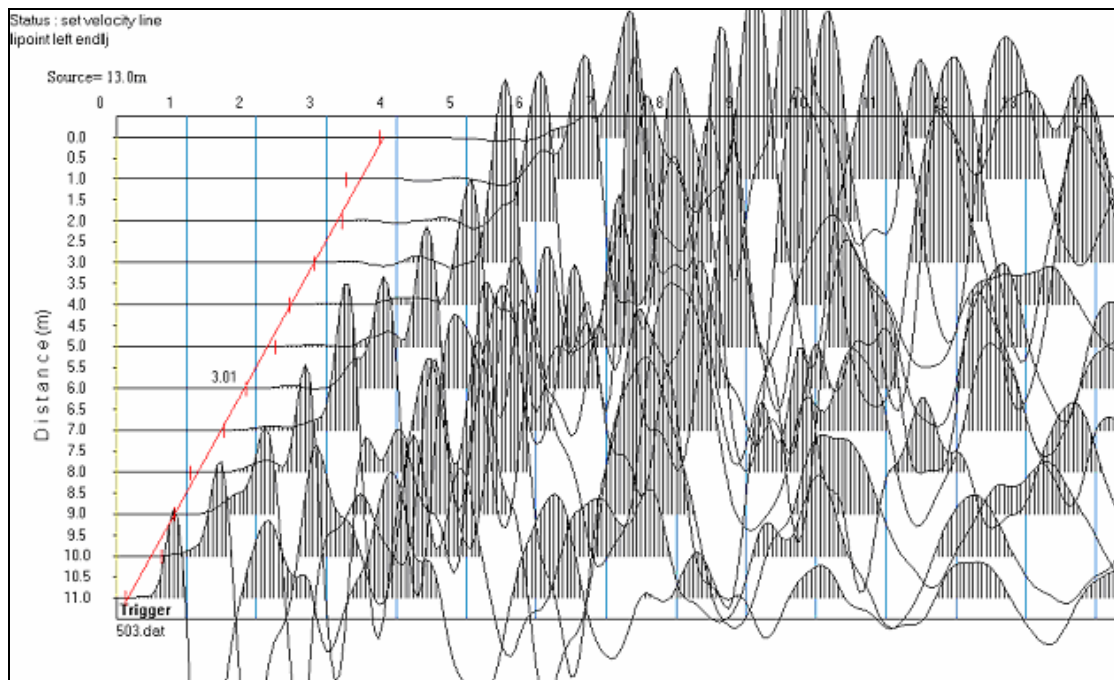
Σχήμα B5. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 4, θέση πηγής 03. Καταγραφή 403.



Σχήμα B6. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 5, θέση πηγής 01. Καταγραφή 501.

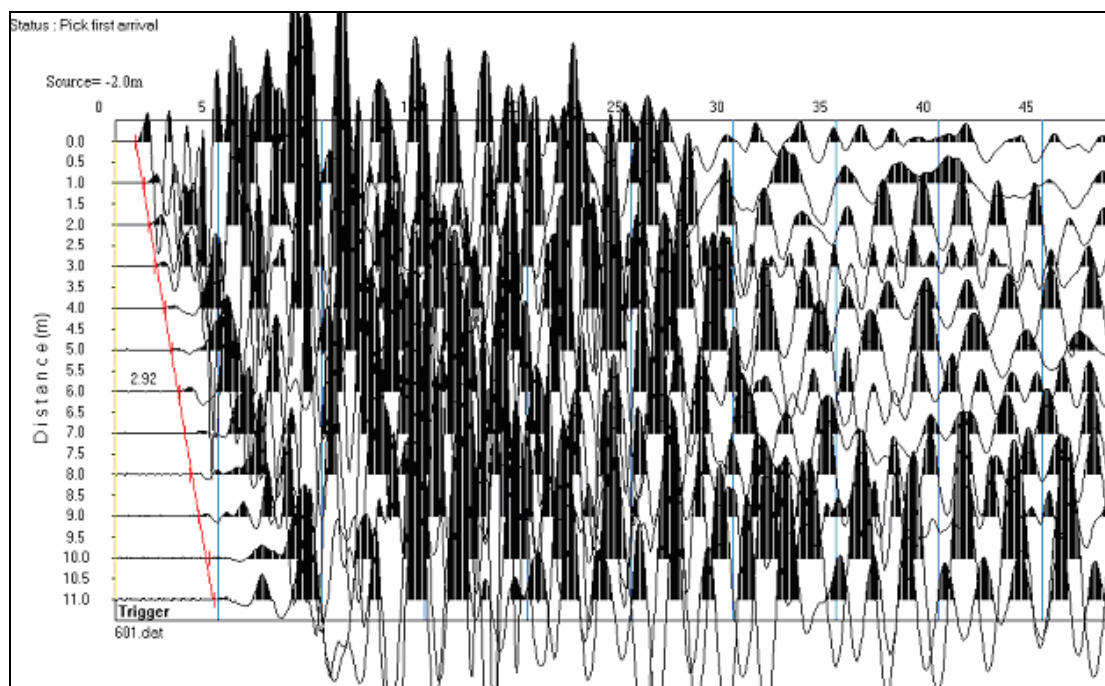


Σχήμα Β7. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 5, θέση πηγής 02. Καταγραφή 502.

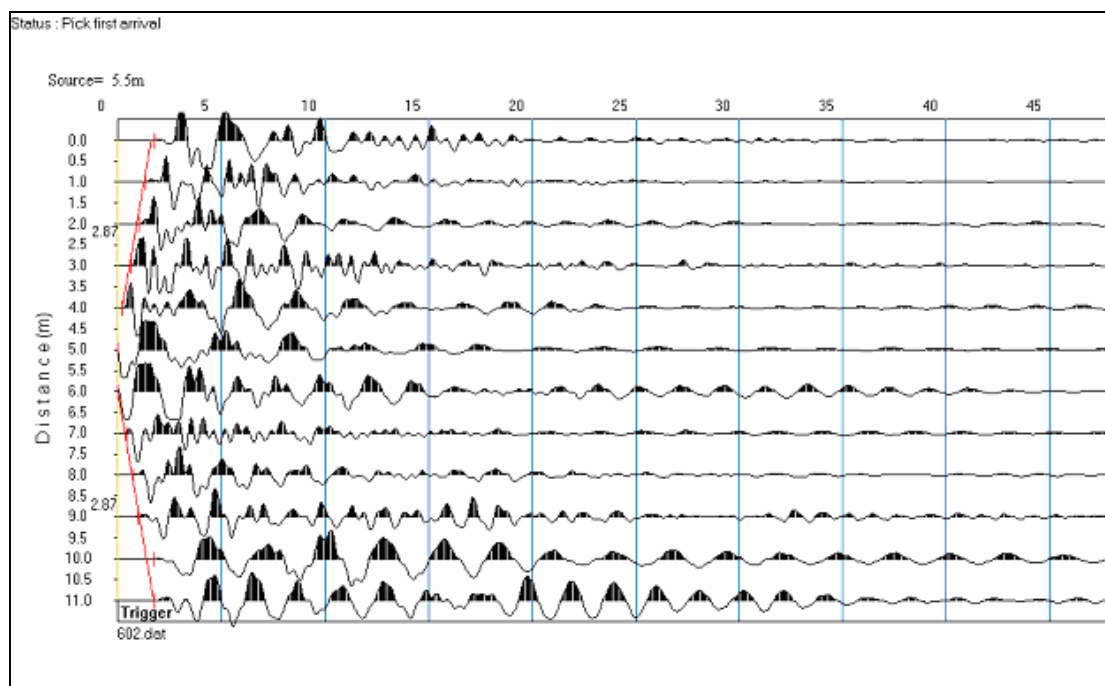


Σχήμα Β8. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 5, θέση πηγής 03. Καταγραφή 503.

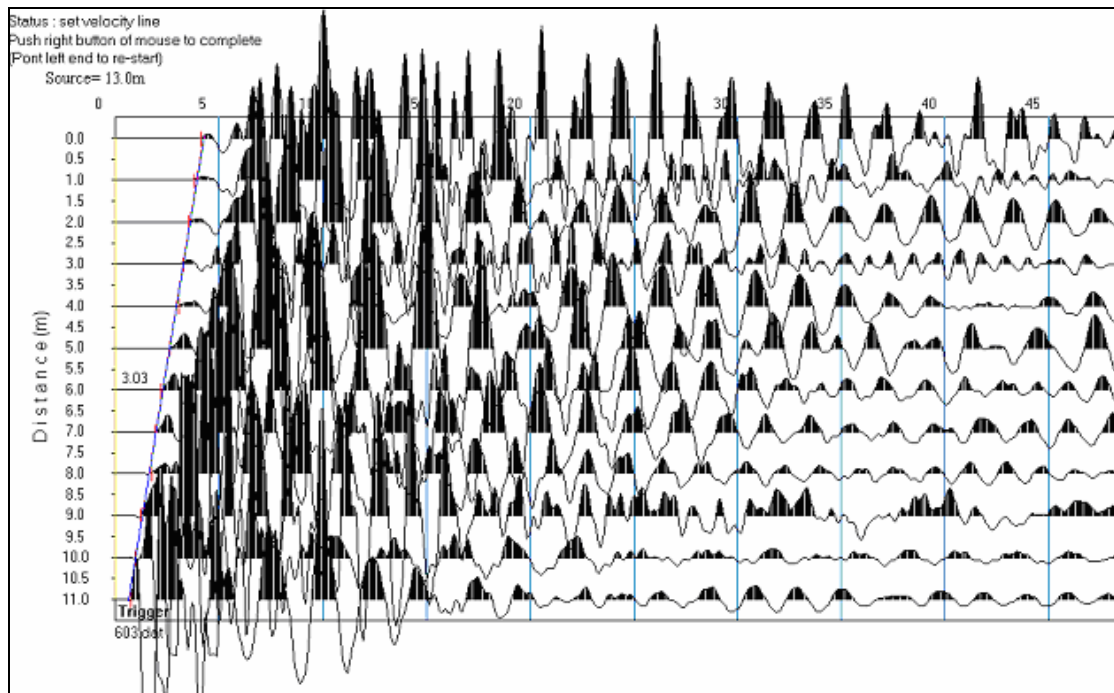




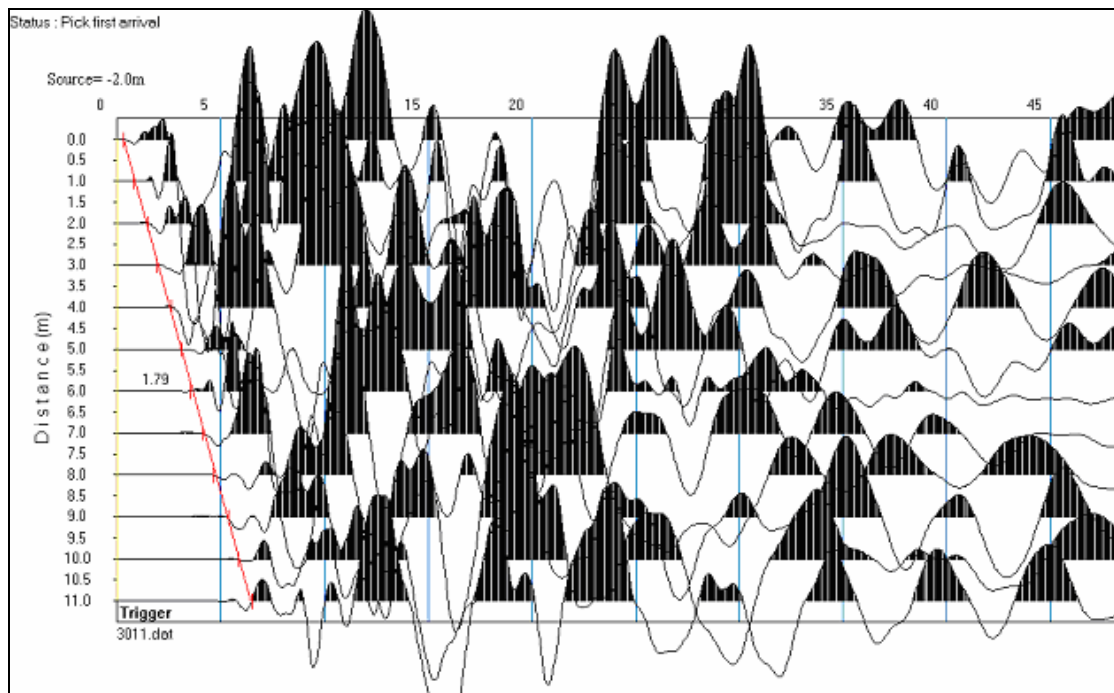
Σχήμα Β9. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 6, θέση πηγής 01. Καταγραφή 601.



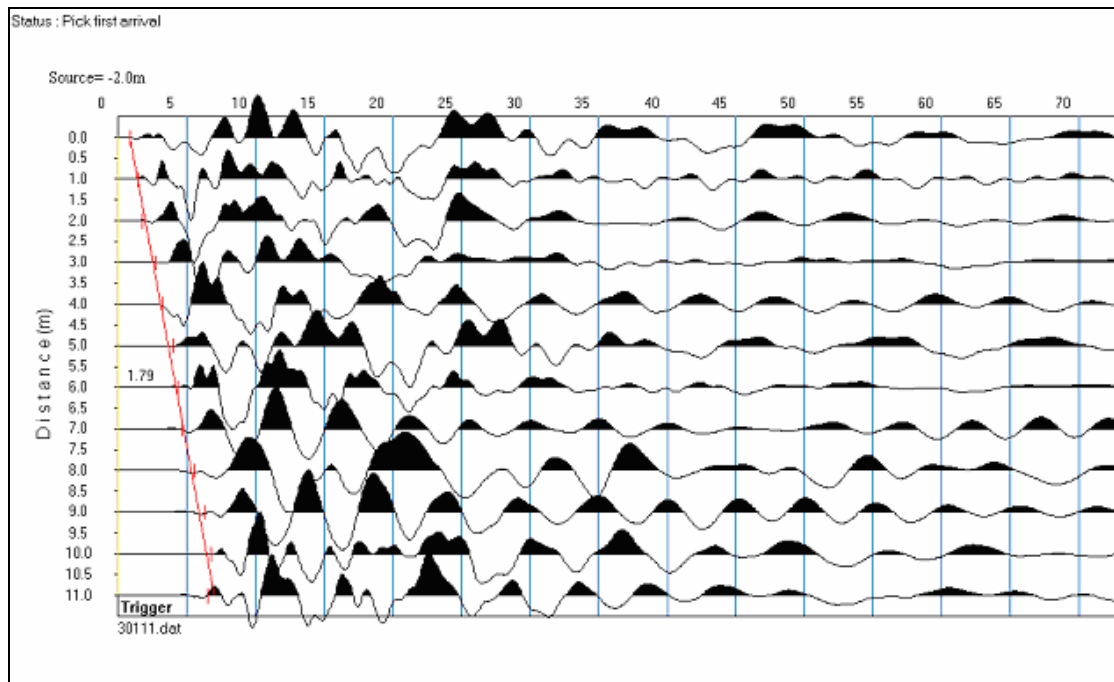
Σχήμα Β10. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 6, θέση πηγής 02. Καταγραφή 602.



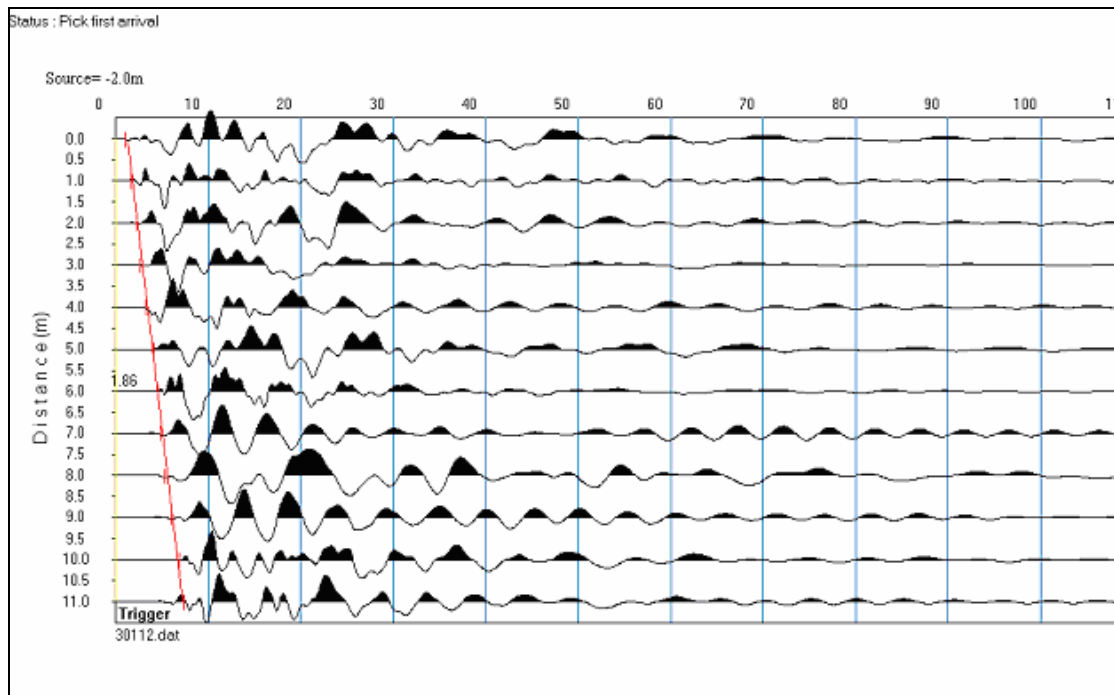
Σχήμα B11. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 6, θέση πηγής 03. Καταγραφή 603.



Σχήμα B12. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 011. Καταγραφή 3011.

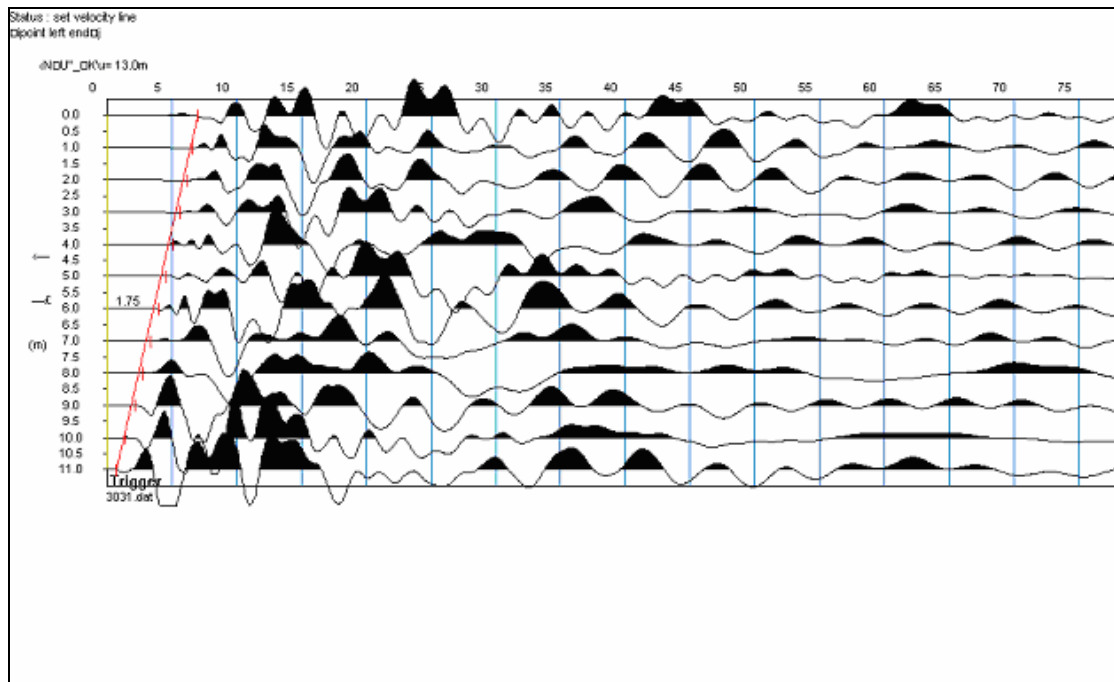


Σχήμα B13. Καταγραφή εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 011. Καταγραφή 30111.

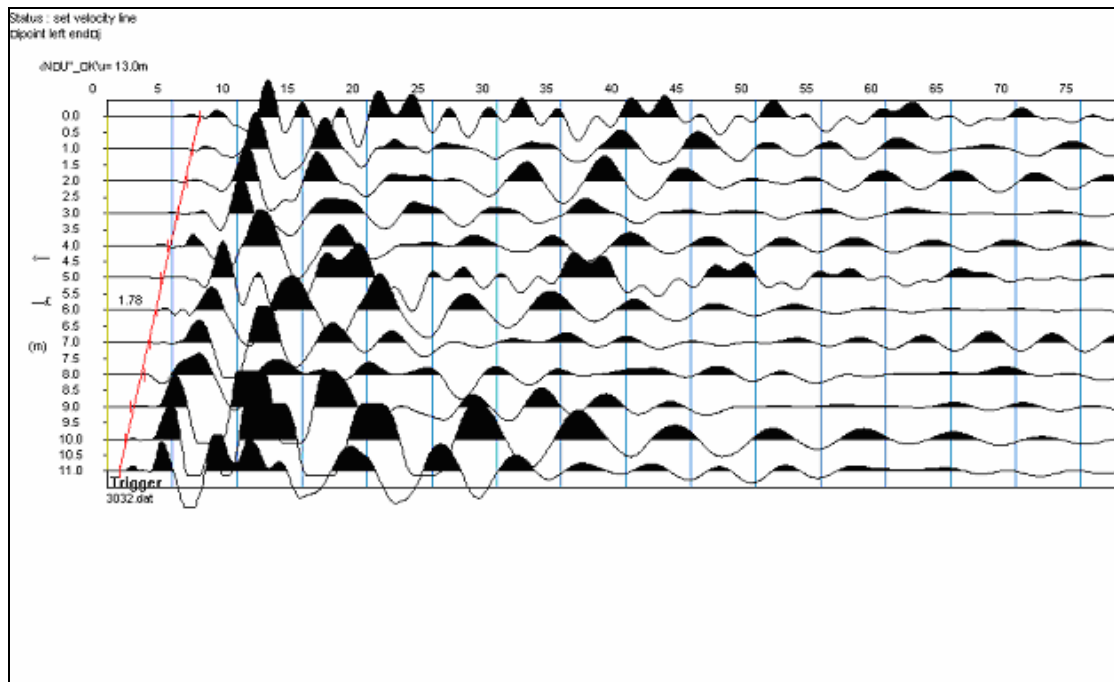


Σχήμα B14. Καταγραφή εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 012. Καταγραφή 30112.

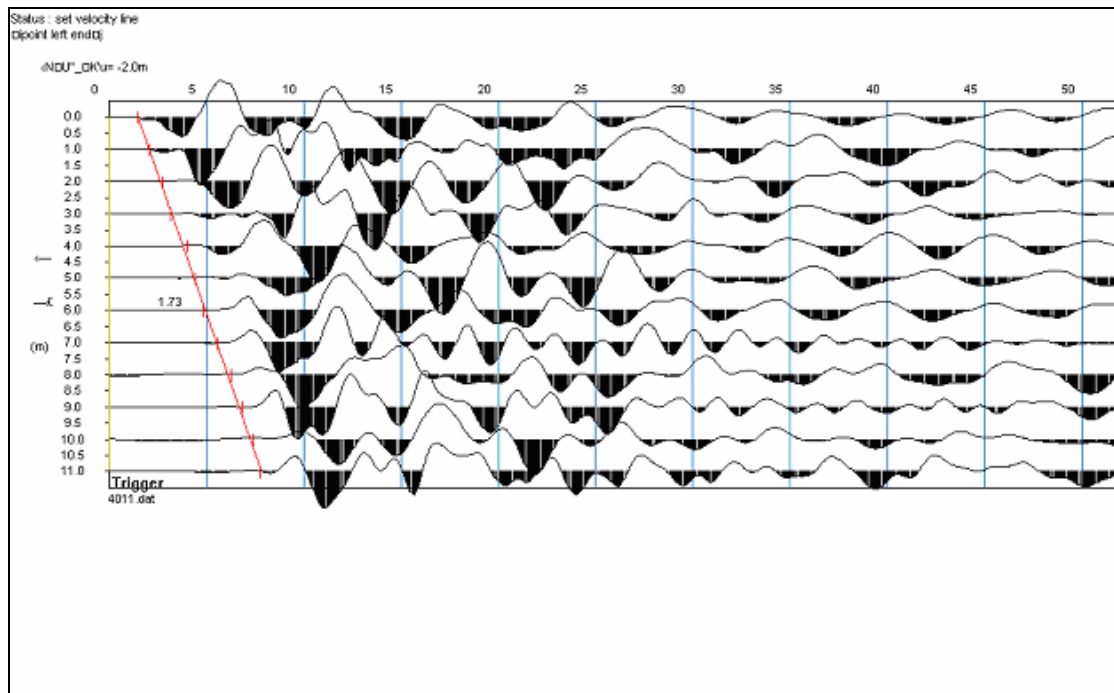




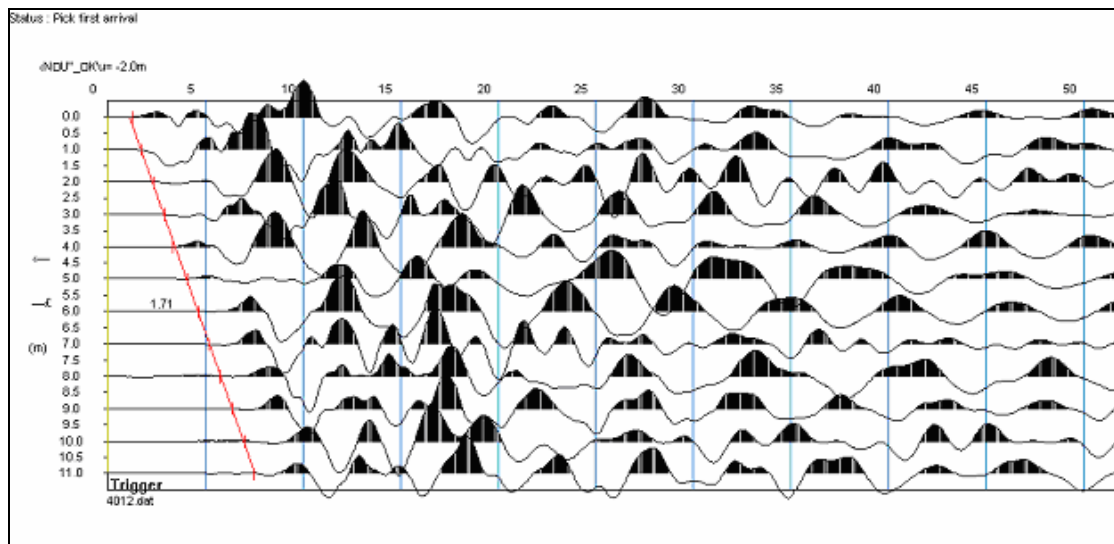
Σχήμα B15. Καταγραφή εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 031. Καταγραφή 3031.



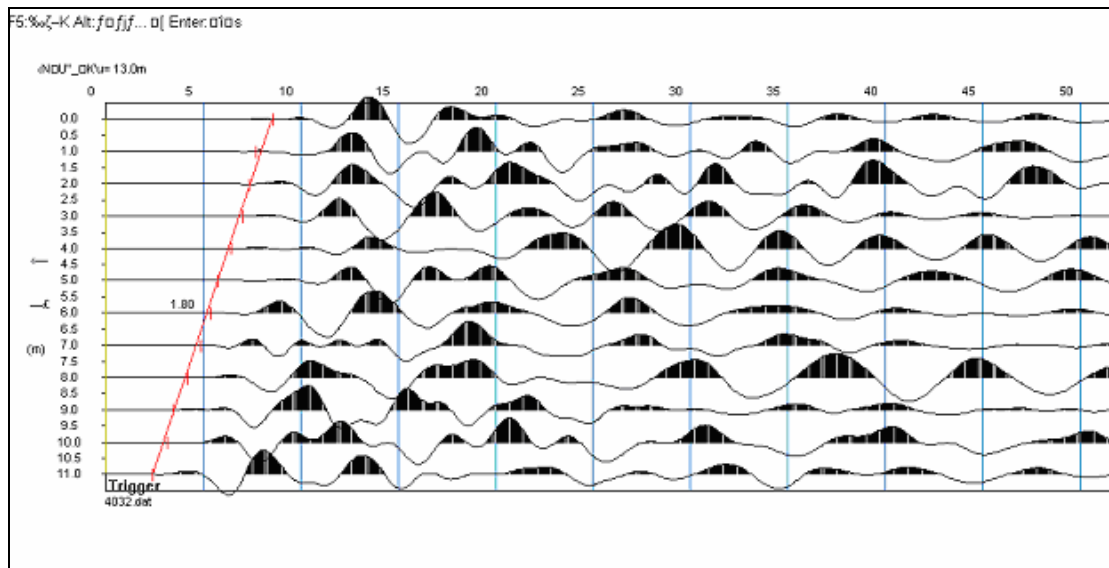
Σχήμα B16. Καταγραφή εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 3, θέση πηγής 032. Καταγραφή 3032.



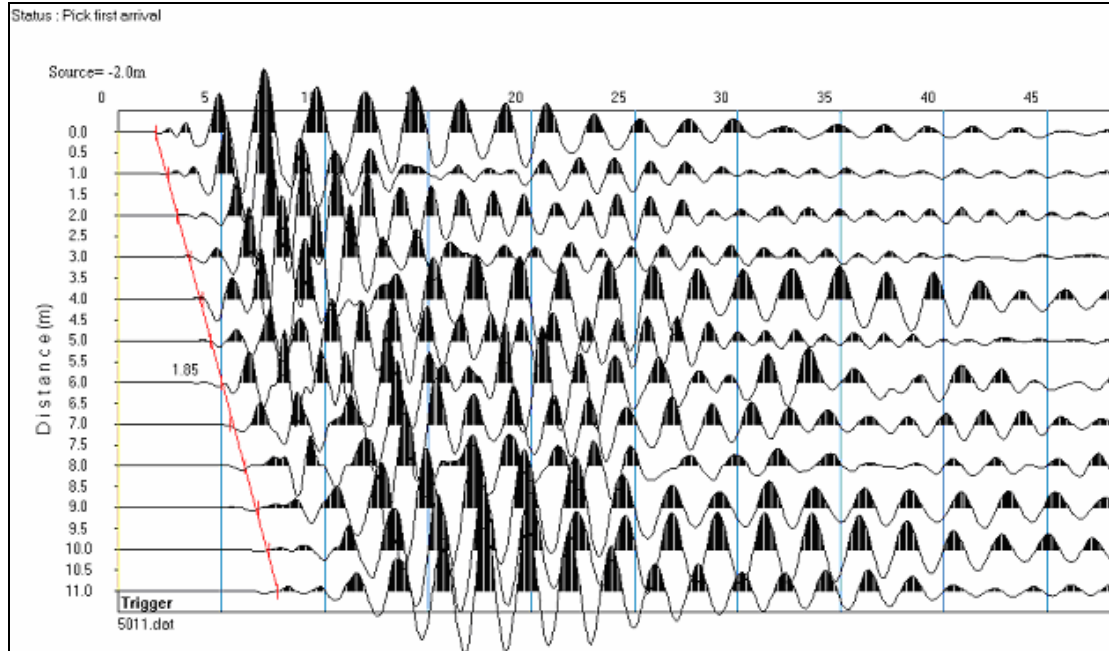
Σχήμα B17. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 4, θέση πηγής 011. Καταγραφή 4011.



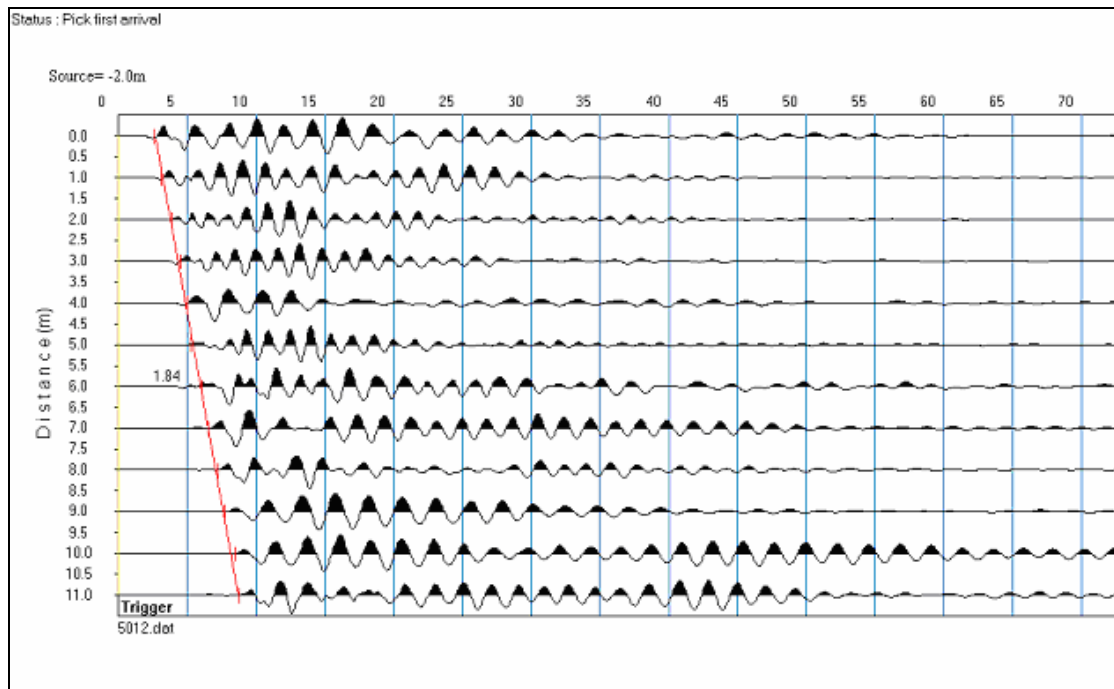
Σχήμα B18. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 4, θέση πηγής 012. Καταγραφή 4012.



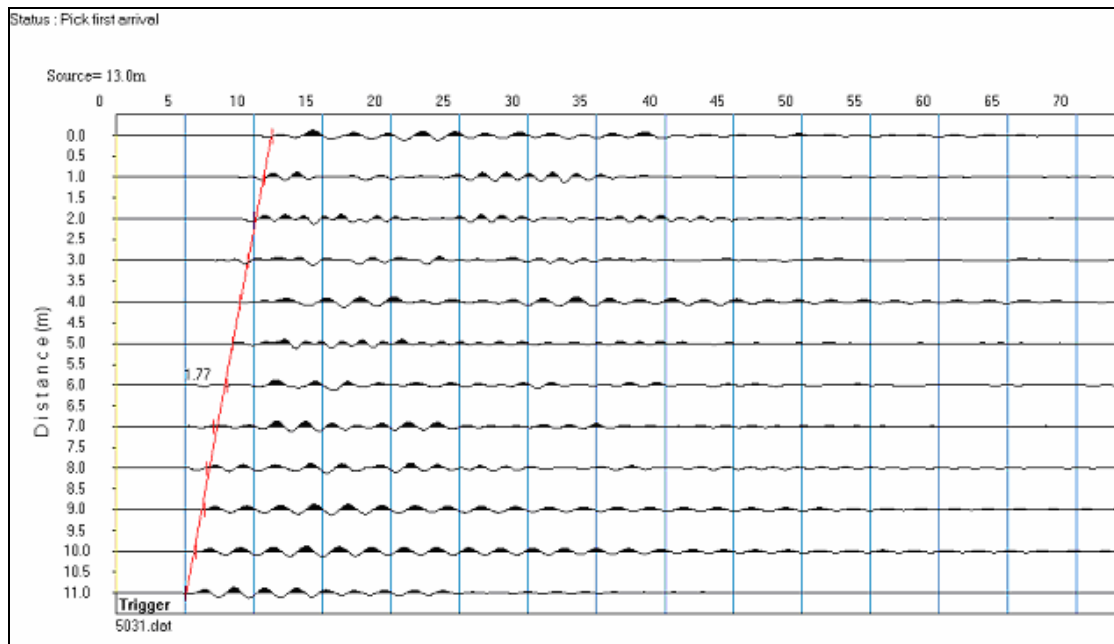
Σχήμα B19. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 4, θέση πηγής 032. Καταγραφή 4032.



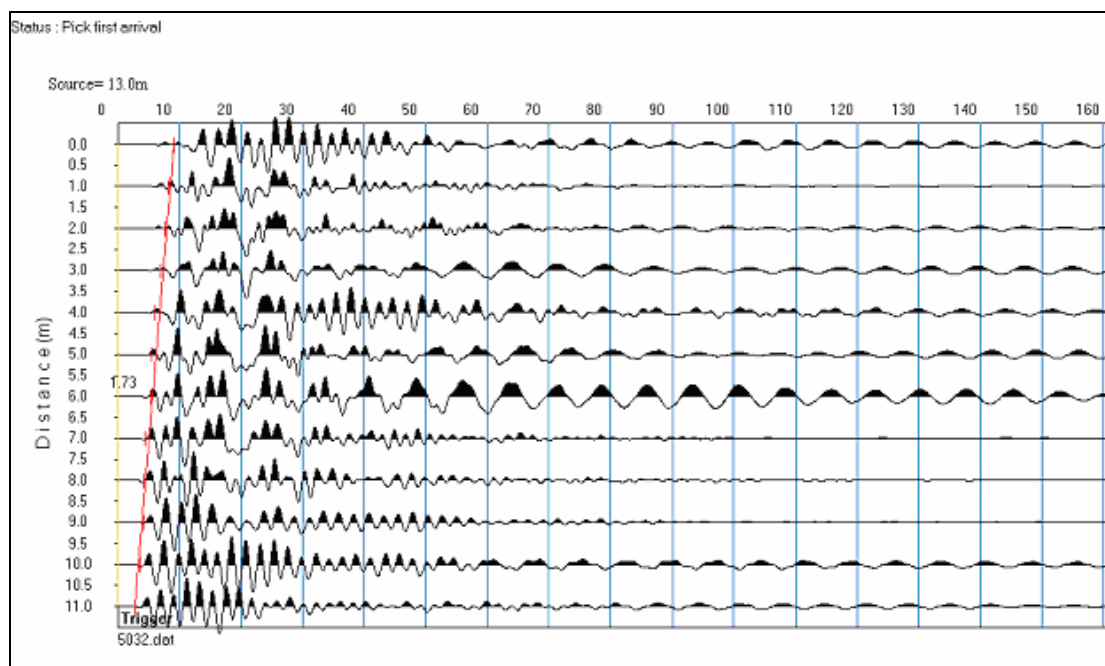
Σχήμα B20. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 5, θέση πηγής 011. Καταγραφή 5011.



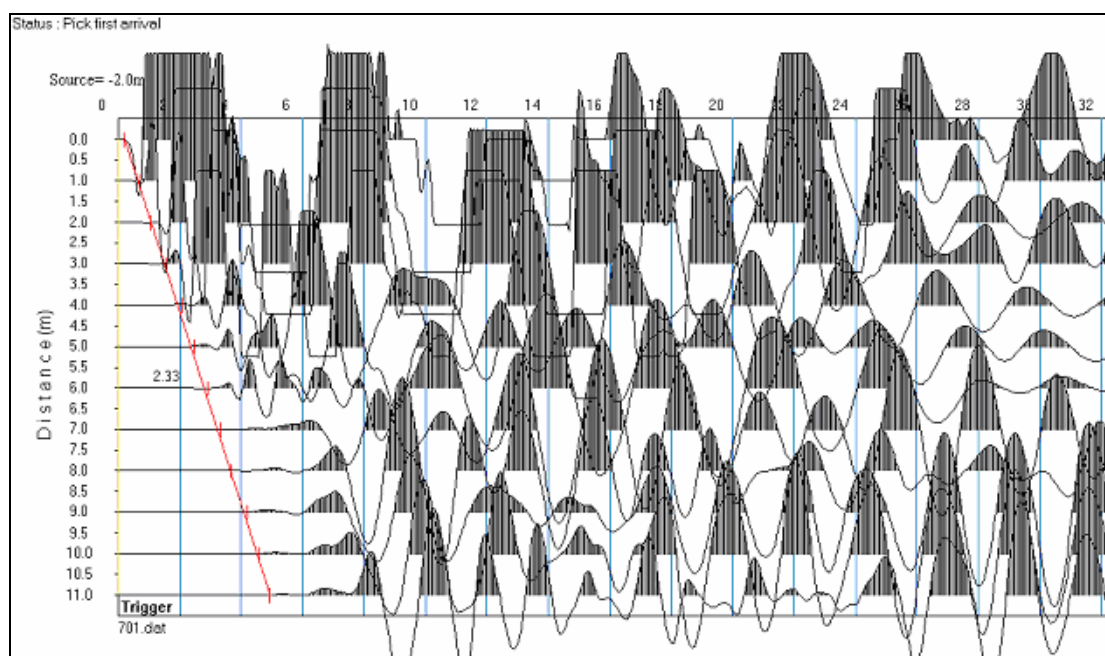
Σχήμα B21. Καταγραφή εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 5, θέση πηγής 012. Καταγραφή 5012.



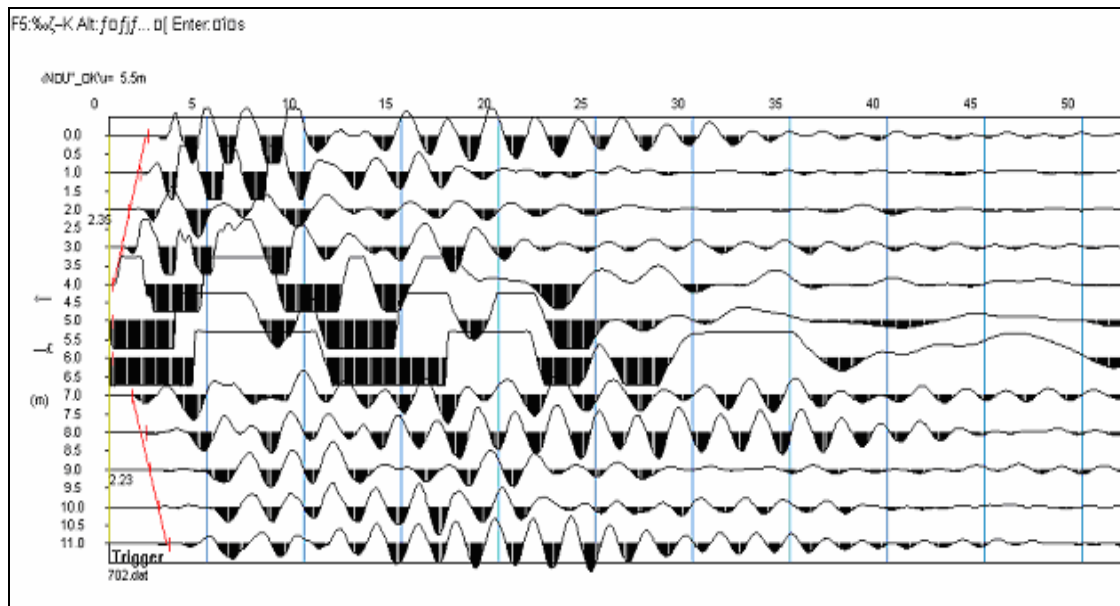
Σχήμα B22. Καταγραφή εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 5, θέση πηγής 031. Καταγραφή 5031.



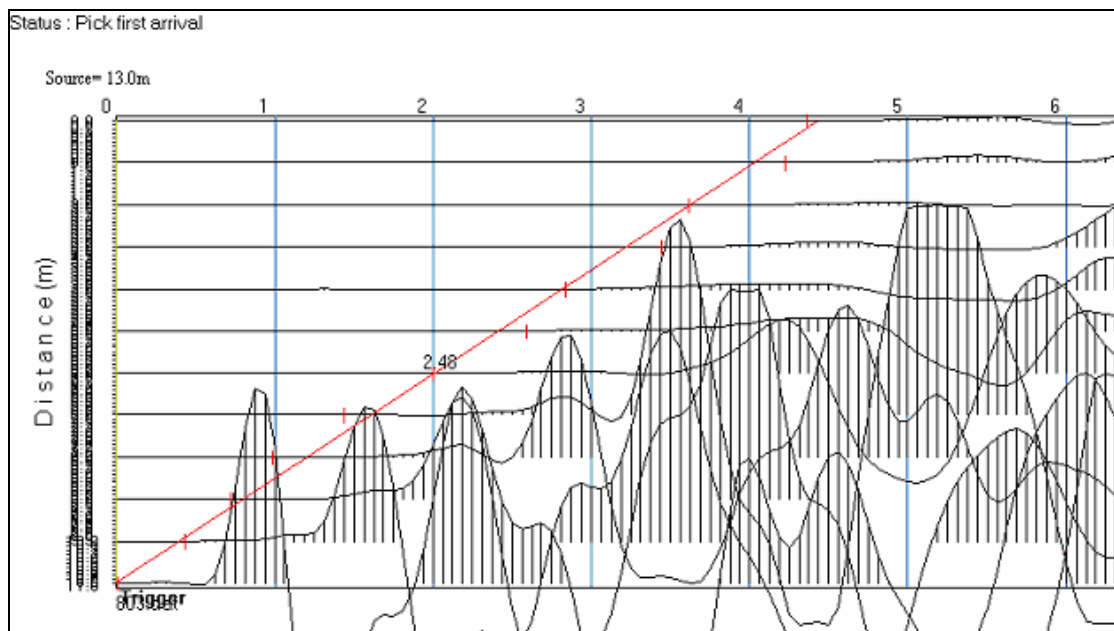
Σχήμα B23. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 5, θέση πηγής 032. Καταγραφή 5032.



Σχήμα B24. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 7, θέση πηγής 01. Καταγραφή 701.

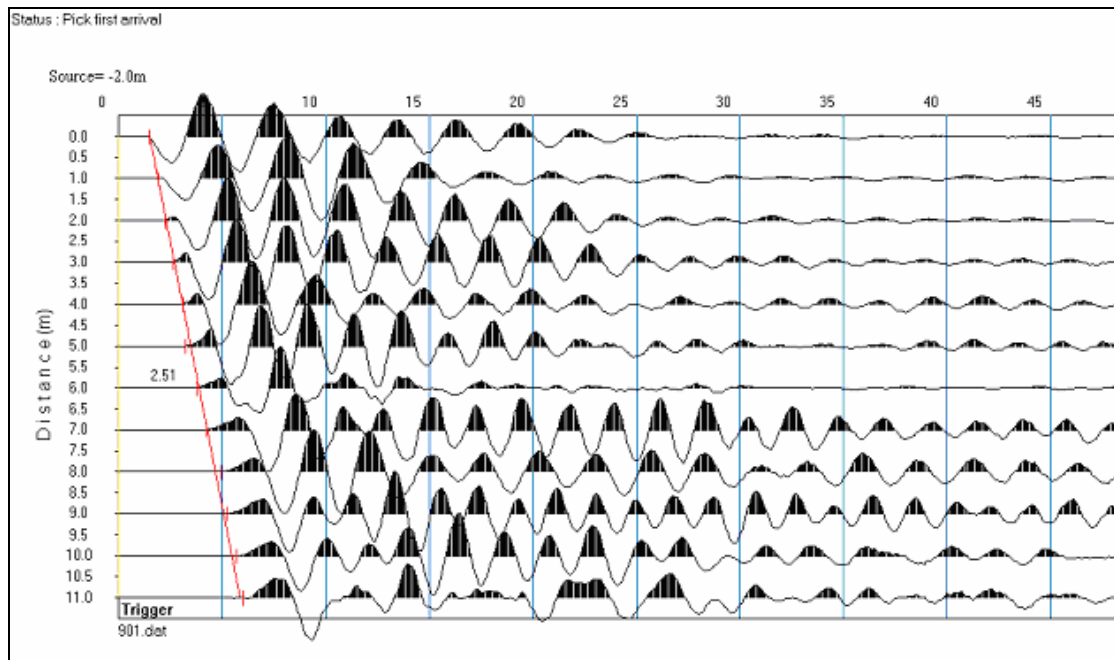


Σχήμα B25. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 7, θέση πηγής 02. Καταγραφή 702.

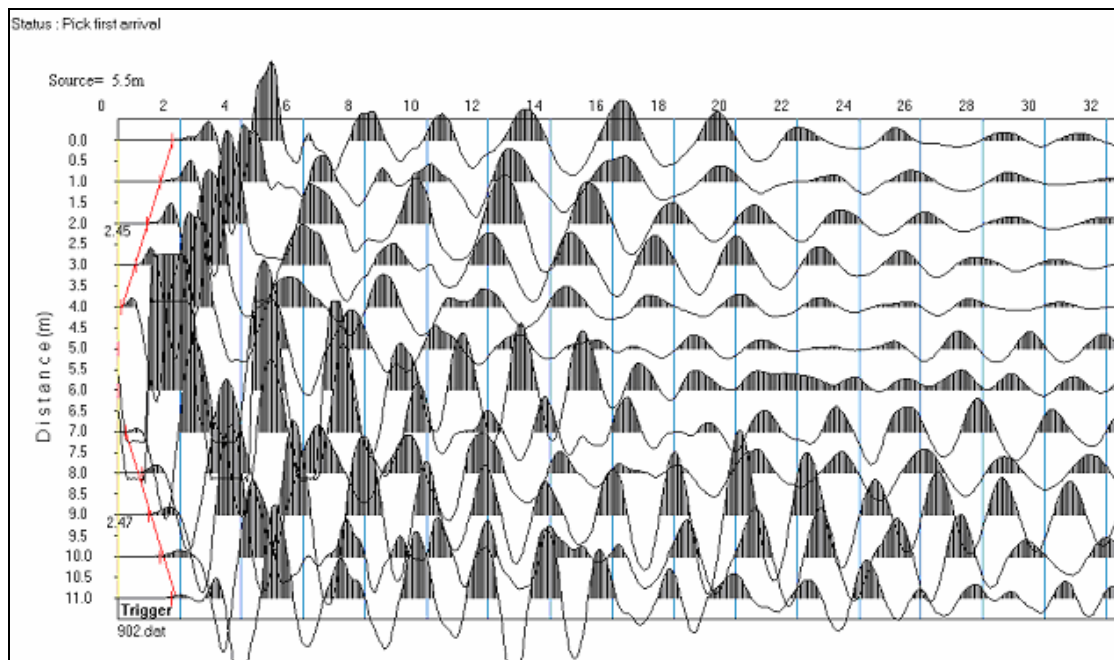


Σχήμα B26. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 8, θέση πηγής 03. Καταγραφή 803.

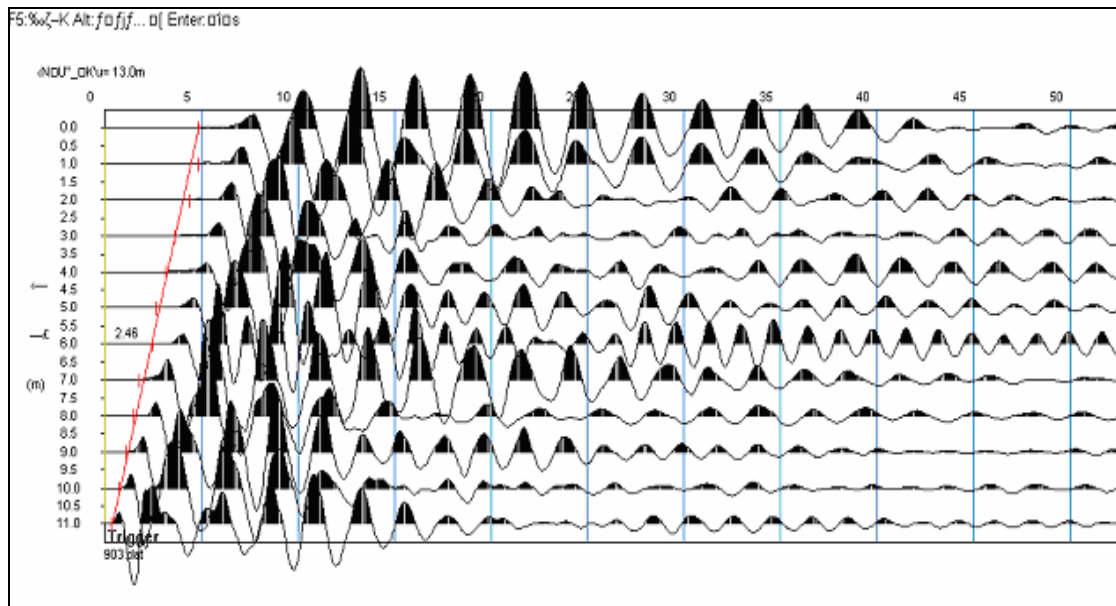




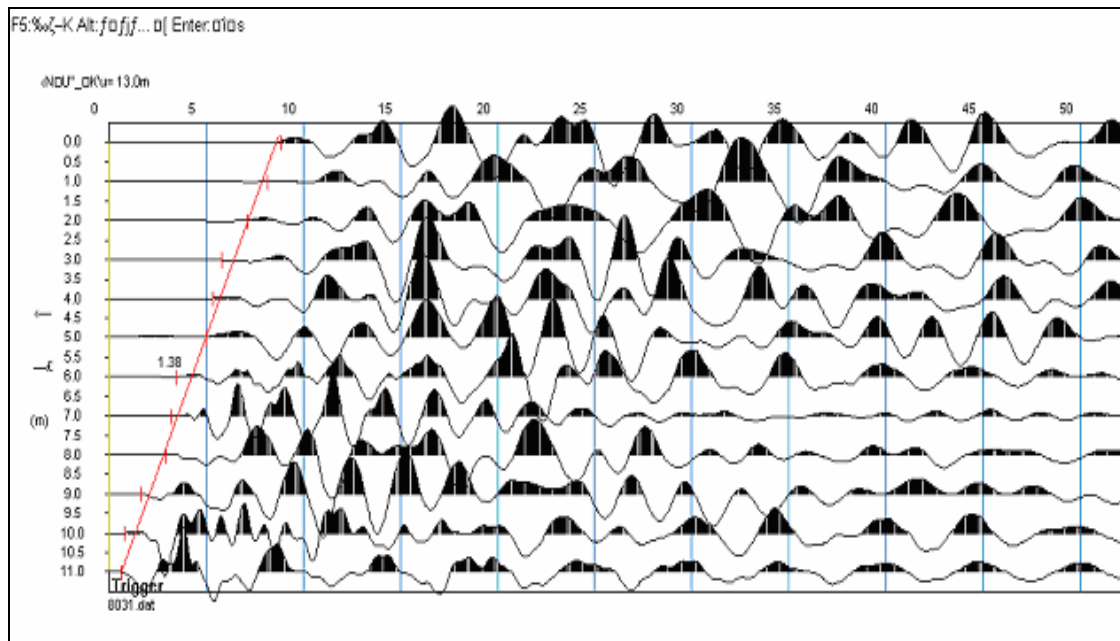
Σχήμα B27. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 9, θέση πηγής 01. Καταγραφή 901.



Σχήμα B28. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 9, θέση πηγής 02. Καταγραφή 902.

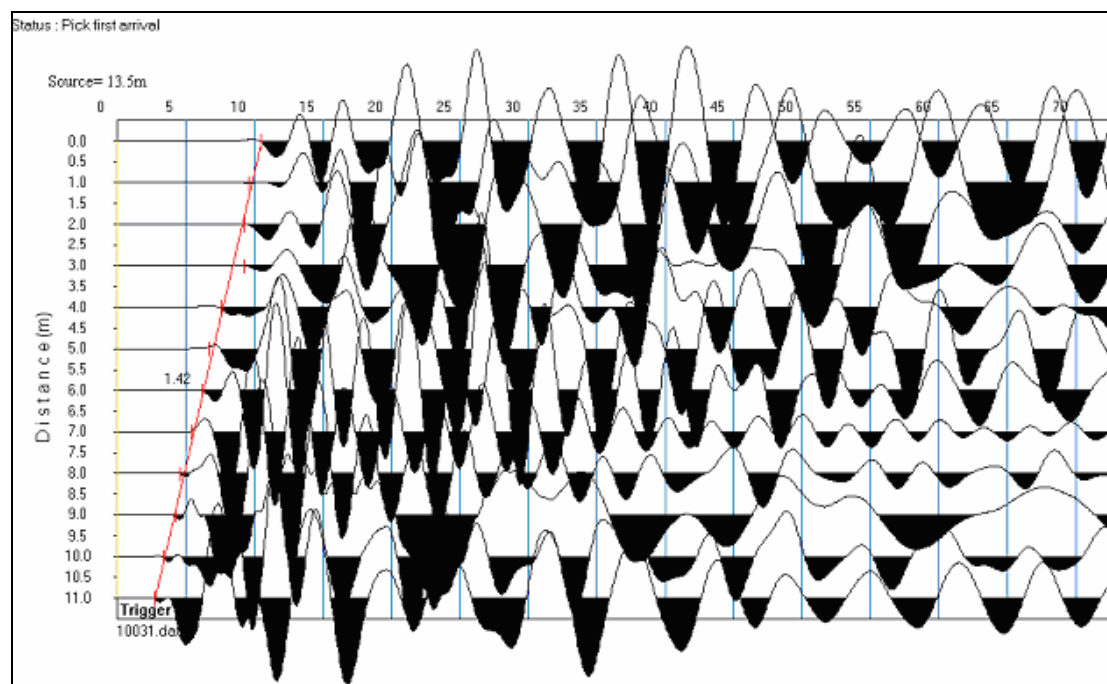


Σχήμα B29. Καταγραφή διαμήκων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 9, θέση πηγής 03. Καταγραφή 903.



Σχήμα B30. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 8, θέση πηγής 031. Καταγραφή 8031.





Σχήμα Β31. Καταγραφή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων κάτω διαζώματος, γραμμή μελέτης 10, θέση πηγής 031. Καταγραφή 10031.