



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Συσχέτιση της ταχύτητας εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων με
εδαφοτεχνικές παραμέτρους»*

ΧΑΤΖΗΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΕΥΓΕΝΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ (ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ - ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΕΞΑΛΑΚΤΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

XANIA

MΑΡΤΙΟΣ 2017

.....

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή την εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Στειακάκη Εμμανουήλ για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ και να εξοικειωθώ στο σύγχρονο περιβάλλον του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εμπειρία αυτή, μαζί με την καθοδήγησή του και τη συνεισφορά του κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας υπήρξαν πολύ σημαντικές.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κύριους Βαφείδη Αντώνιο και Εξαδάκτυλο Γεώργιο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Λαζαρόπουλο Αθανάσιο, υποψήφιο Διδάκτορα για την αμέριστη βοήθεια και στήριξή του σε όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας, αλλά κυρίως για την υπομονή που επέδειξε και τις τεχνικές γνώσεις τις οποίες μου μετέδωσε αυτό το διάστημα.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου Εύα, Ναταλί, Σοφία, Θοδωρή, Αλέξανδρο, Δημήτρη και Αθηνά για τα υπέροχα φοιτητικά χρόνια που μου χάρισαν.

Τέλος, την εργασία αυτή αφιερώνω στους γονείς μου ως ένα ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης για όσα μου προσέφεραν και συνεχίζουν να μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια με την αγάπη και τη στήριξή τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2. ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ	4
2.1 Ελαστικές σταθερές και ταχύτητες διάδοσης κυμάτων	5
2.2 Μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}).....	6
2.3 Παράγοντες επίδρασης του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max})	8
2.3.1 Επίδραση του λόγου κενών (e)	9
2.3.2 Επίδραση του λόγου προστερεοποίησης	9
2.3.3 Επίδραση της διαγένεσης.....	10
2.3.4 Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης	10
2.3.5 Άλλες παράμετροι επίδρασης του μέγιστου μέτρου διάτμησης	10
2.3.6 Επίδραση της Γήρανσης του εδάφους (<i>Aging Effect</i>)	11
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ	12
3.1 Μετρήσεις στο πεδίο με σεισμικές μεθόδους	12
3.2 Μέθοδος στήλης συντονισμού	13
3.3 Μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (<i>Bender Elements Test</i>)	15
4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	19
4.1 Σήματα διέγερσης.....	19
4.1.1 Σήμα ενός ημιτόνου.....	19
4.1.2 Σήμα ενός παλμού	20
4.1.3 Σήμα πεπερασμένου αριθμού παλμών	21
4.2 Τεχνικές υπολογισμού του χρόνου διάδοσης εγκαρσίου κύματος.....	21
4.2.1 Τεχνική <i>point to point</i>	23
4.2.2 Τεχνική <i>peak to peak</i>	25
4.2.3 Τεχνική της συσχέτισης (<i>Cross Correlation</i>).....	25
4.2.4 Μετρήσεις στο πεδίο της συχνότητας	27
4.3 Μειονεκτήματα της μεθόδου των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων	28
5.ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	29
5.1 Γεωτεχνική ταξινόμηση εδαφικού υλικού	30
5.1.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	30
5.1.2 Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας (LL).....	33

5.1.3 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας (PL).....	34
5.1.4 Ταξινόμηση Εδαφικού δείγματος.....	36
5.2 Παρασκευή εδαφικών δοκιμίων.....	38
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	41
6.1 Διάταξη και τεχνική των μετρήσεων	41
6.2 Εκτέλεση μετρήσεων	43
6.3 Εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων μέσω εμπειρικών σχέσεων.....	46
7. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ.....	47
7.1 Σχέση μεταξύ Ορίων Atterberg και ταχύτητας εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων.....	47
7.2 Σχέση μεταξύ ταχύτητας διάδοσης κυμάτων και περιεχόμενου ποσοστού αργίλου των εδαφικών δοκιμίων.....	51
7.2.1 Επίδραση της περιεχόμενης αργίλου στον λόγο V_P/V_S	53
7.3 Σχέση μεταξύ ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων.....	54
7.4 Σχέση μεταξύ ταχύτητας εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων και μέτρου ελαστικότητας, μέγιστου μέτρου διάτμησης και λόγου Poisson.	55
7.5 Διαφοροποίηση της ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων με την πάροδο του χρόνου.....	57
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η ταχύτητα διάδοσης εγκαρσίων (V_s) και διαμήκων (V_p) κυμάτων σε σχέση με φυσικές ιδιότητες και μηχανικές παραμέτρους εδαφικών σχηματισμών.

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων πραγματοποιήθηκε εργαστηριακά με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender elements) σε εδαφικά δοκίμια με διαφορετική κοκκομετρική σύσταση.

Αρχικά για κάθε εδαφικό δείγμα προσδιορίστηκαν τα όρια Atterberg και έγινε η ταξινόμησή του κατά το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS). Ακολούθησε ο προσδιορισμός της βέλτιστης υγρασίας συμπύκνωσης (OMC) και η διαμόρφωση των δοκιμίων. Μετά τον πλήρη κορεσμό και την στερεοποίηση τους σε τριαξονική κυψέλη τασικών διαδρομών πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της ταχύτητας V_s και V_p .

Διαπιστώθηκαν λογαριθμικές συσχετίσεις των ορίων Atterberg και των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων, από τις οποίες προκύπτει ότι οι τιμές των ορίων Atterberg μειώνονται με την αύξηση των ταχυτήτων V_s και V_p .

Προέκυψε ακόμη ότι το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος επηρεάζει καθοριστικά την ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα η έρευνα κατέδειξε ότι η αύξηση του αργιλικού κλάσματος οδηγεί σε μείωση των ταχυτήτων διάδοσης των εγκαρσίων (V_s) και διαμήκων (V_p) κυμάτων.

Τέλος η διερεύνηση της επίδρασης του χρόνου (φαινόμενο γήρανσης - Aging Effect) στην ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) και κατ' επέκταση στο μέτρο ακαμψίας υποδεικνύει αύξηση της ταχύτητας και του μέτρου ακαμψίας των γεωυλικών με την πάροδο του χρόνου δίνοντας τη δυνατότητα εκτίμησης της συμπεριφοράς των γεωτεχνικών έργων σε διάφορα στάδια της κατασκευής τους.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρουν οι ερευνητές Simons και Menzies το 2002, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 οι ερευνητές ήταν προβληματισμένοι λόγω της απόκλισης μεταξύ της ακαμψίας του εδάφους που προσδιοριζόταν στο εργαστήριο με τριαξονικές δοκιμές και αυτής που προέκυπτε από ανάστροφες αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε περιπτώσεις έργων, όπως θεμελιώσεις, τοίχοι αντιστήριξης και σήραγγες.

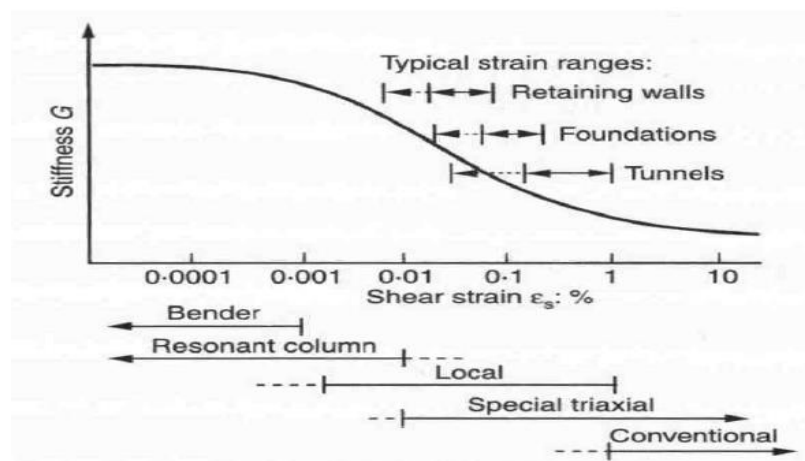
Λίγο αργότερα, το 1984 μία ομάδα ερευνητών διαπίστωσε ότι οι μετρήσεις της παραμόρφωσης στη συμβατική τριαξονική δοκιμή, περιλαμβάνουν σφάλματα κάμψης που αυξάνουν σημαντικά τη μετρούμενη παραμόρφωση, δίνοντας τεχνητά χαμηλές τιμές ακαμψίας.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η δυσκαμψία του εδάφους σε μικρές παραμορφώσεις μετρήθηκε στο εργαστήριο με τη χρήση συσκευής με δυναμική στήλη συντονισμού. Οι ερευνητές έμειναν έκπληκτοι από την ομοιότητα αυτών των δυναμικών μέτρων με τα στατικά μέτρα ακαμψίας όπως προέκυπταν από ανάστροφες αναλύσεις γύρω από κατασκευές όπως τοίχοι αντιστήριξης και εκσκαφές. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι διαφορές στα μέτρα που είχαν μετρηθεί στο παρελθόν με στατικές δοκιμές, (όπως η συμβατική τριαξονική), και δυναμικές δοκιμές, (όπως η στήλη συντονισμού), είχαν σχέση με το επίπεδο παραμόρφωσης.

Οι πρώτες μετρούσαν το μέτρο σε μικρή ανηγμένη παραμόρφωση ενώ οι δεύτερες το μέτρο σε μεγάλες ανηγμένες παραμορφώσεις. Η διαφορά δεν οφειλόταν στο γεγονός ότι η μία δοκιμή ήταν «δυναμική» και η άλλη «στατική» (βλέπε Σχήμα 1.1).

Το συμπέρασμα αυτό ενθάρρυνε τους ερευνητές να εξετάσουν και πάλι σεισμικές μεθόδους για τον προσδιορισμό της ακαμψίας του εδάφους με επιτόπου σεισμικές δοκιμές πεδίου (όπως η μέθοδος cross-hole, down-hole, MASW κ.ά) (Asslan, 2008).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, οι δοκιμές πεδίου χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}). Για την εκτίμηση όμως του μέτρου διάτμησης σε μεγαλύτερα μεγέθη ανηγμένης παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται οι εργαστηριακές δοκιμές.



Σχήμα 1.1: Αδρή κατηγοριοποίηση της τάξης μεγέθους των παραμορφώσεων σε σχέση με το μέτρο διάτμησης (Atkinson, 1993)

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική διερεύνηση της επίδρασης του αργιλικού κλάσματος στις ταχύτητες των εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων, σε εργαστηριακές συνθήκες, με τη χρήση εδαφικών δειγμάτων που περιέχουν διαφορετικά ποσοστά αργίλου.

Επιχειρείται ακόμα η διερεύνηση της συσχέτισης της ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων με διάφορες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των μελετώμενων δειγμάτων. Τέτοιες σχέσεις είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε μια αρχική εκτίμηση των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων με βάση άλλες ιδιότητες του εδάφους αλλά και να συμβάλλουν στην εκτίμηση του βαθμού συσχέτισης των εδαφικών παραμέτρων και τον τρόπο αλληλεξάρτησή τους.

Τέλος στην παρούσα εργασία επιχειρείται η διερεύνηση της διαφοροποίησης των ταχυτήτων διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) συναρτήσει της γήρανσης του γεωυλικού.

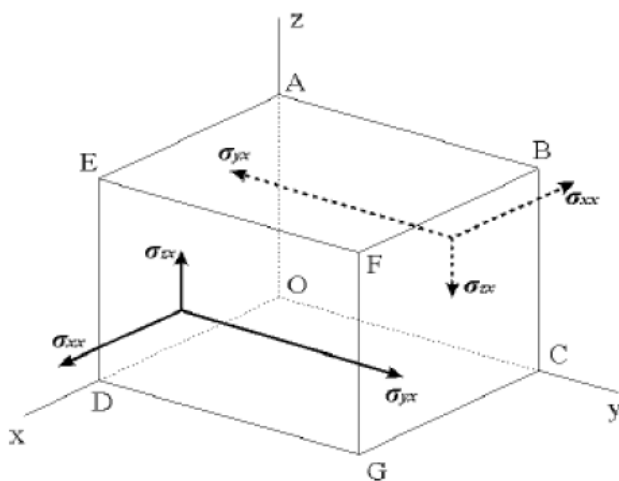
Το φαινόμενο της γήρανσης, η οποία διαφοροποιεί την κατάσταση του υλικού με την πάροδο του χρόνου, συνδέεται με σημαντική διαφοροποίηση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους. Αυτή η αλλαγή θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στον γεωτεχνικό σχεδιασμό. Η ένδειξη της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων αποτελεί ένα μέσο διερεύνησης του φαινομένου και της διαφοροποίησης της ακαμψίας του υλικού με το χρόνο.

2. ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

Για να εκφραστεί μια κατάσταση τάσης – παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται οι ελαστικές σταθερές. Αναλυτικότερα:

- Το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), εκφράζει την παραμόρφωση ενός μονοδιάστατου σώματος και ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος προς την μεταβολή του μήκους του. Το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) αντιπροσωπεύει την αντίσταση ενός σώματος στις παραμορφώσεις (Αγιουτάντης, 2011).
- Ο λόγος Poisson (ν), εκφράζει το μέτρο της γεωμετρικής μεταβολής στο σχήμα ενός ελαστικού σώματος. Ορίζεται από τον λόγο της εγκάρσιας ($-\epsilon_1$) προς την αξονική ($+\epsilon_2$) ανηγμένη παραμόρφωση σε μονοαξονική καταπόνηση (Αγιουτάντης, 2011).
- Το μέτρο μεταβολής του όγκου (K), εκφράζεται από τον λόγο της τάσης που ασκείται σε ένα σώμα λόγω μεταβολής της πίεσης προς την ανοιγμένη μεταβολή του όγκου του και δίδεται από τη σχέση (Αγιουτάντης, 2011) :

$$k = \frac{F/A}{\Delta V/V} = \frac{F \cdot V}{A \cdot \Delta V} \quad [2.1]$$



Σχήμα 2.2: Συνιστώσες της τάσης σε πλευρές κάθετες στον x άξονα (Sheriff and Geldart, 1995)

Βάσει των παραπάνω και όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες σ_{xx} , σ_{yy} και σ_{zz} , το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), όπως και ο λόγος Poisson (ν) ορίζονται από τις σχέσεις:

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{yy}} \quad [2.2]$$

και

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} = -\frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}} \quad [2.3]$$

Στην Σχέση 2.3 το αρνητικό πρόσημο εισάγεται για να προκύψει ο λόγος Poisson θετικός.

Για να εκφραστεί το μέτρο μεταβολής του όγκου (ή μέτρο διόγκωσης) (K), θεωρείται ένα μέσο στο οποίο εφαρμόζεται μόνο μία τάση P ως εξής:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -P \quad [2.4]$$

και

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0 \quad [2.5]$$

Η τάση P προκαλεί ελάττωση του όγκου ΔV και μία συστολή του όγκου $\Delta = \Delta V/V$. Ως K λοιπόν ορίζεται ο λόγος της τάσης που ασκείται, προς τη συστολή που προκαλεί αυτή, δηλαδή:

$$K = -\frac{P}{\Delta} \quad [2.6]$$

Όπου επίσης στη Σχέση 2.6 το αρνητικό πρόσημο εισάγεται για να παίρνει το μέτρο μεταβολής του όγκου (K) θετικές τιμές.

2.1 Ελαστικές σταθερές και ταχύτητες διάδοσης κυμάτων

Σύμφωνα με τους Timoshenko και Goodier (1951), οι ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που διέρχονται από ομογενή ισότροπα ελαστικά μέσα είναι δυνατόν να εκτιμώνται από την επίλυση εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας. Τόσο το μέτρο διάτμησης (G) όσο και το μέτρο μεταβολής του όγκου (K) προσεγγίζονται από την επίλυση των εν λόγω εξισώσεων οι οποίες βασίζονται στην θεωρία των ελαστικών μέσων (Pirrepoint, 1996).

Κατά την διάδοση κυμάτων σε ένα ελαστικό μέσο κάθε εξίσωση δυναμικής ισορροπίας αποδίδει μία μοναδική λύση για κάθε τύπο κύματος. Έτσι η εκτίμηση του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_0) που περιγράφεται από εξισώσεις δυναμικής ισορροπίας, περιορίζεται στην Σχέση 2.7.

Η Σχέση 2.7 αντιπροσωπεύει την διάδοση ενός κύματος (εγκάρσιου), με διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Pirrepoint, 1996).

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \rightarrow G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad [2.7]$$

Αντίστοιχα, το μέτρο μεταβολής του όγκου (K) περιορίζεται στην Σχέση 2.8 η οποία αντιπροσωπεύει ένα κύμα διαστολής ή συμπίεσης (διαμήκες) με διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων του μέσου παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Pirepoint, 1996).

$$V_p = \sqrt{\frac{K_0}{\rho}} \rightarrow K_0 = \rho \cdot V_p^2 \quad [2.8]$$

Όπου,

ρ : η πυκνότητα του μέσου διάδοσης του κύματος

G_0 : το μέγιστο μέτρο διάτμησης

K_0 : το μέτρο μεταβολής του όγκου ή συντελεστής συμπιεστότητας

V_p : η ταχύτητα διάδοσης των διμήκων κυμάτων και

V_s : η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων

Τα διαμήκη κύματα (P-κύματα) φθάνουν νωρίτερα στον δέκτη σε σχέση με τα εγκάρσια κύματα (S-κύματα). Αυτό πρακτικά μπορεί να αναπαρασταθεί από την σχέση μεταξύ του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_0 ή G_{\max}) και του μέτρου μεταβολής του όγκου (K) όπως φαίνεται στην Σχέση 2.9 παρακάτω (Pirepoint, 1996):

$$K_0 = \lambda + 2G_0 \quad [2.9]$$

Όπου, το λ είναι μία από τις σταθερές του Lamé και αναπαριστάται όπως φαίνεται στη Σχέση 2.12

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad [2.10]$$

Τέλος ο λόγος των ταχυτήτων διάδοσης των εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό του λόγου Poisson (ν) όπως φαίνεται από την Σχέση 2.11 (Pirepoint, 1996):

$$\nu = \frac{1 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{2 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 + 1} \quad [2.11]$$

2.2 Μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{\max})

Το αρχικό (μέγιστο) μέτρο διάτμησης (G_{\max}) είναι ένας σημαντικός και θεμελιώδης παράγοντας στις γεωτεχνικές εφαρμογές και λαμβάνεται υπόψιν σε δυναμικές αναλύσεις μικρών

παραμορφώσεων όπως στη συμπεριφορά του εδάφους ή στην αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους – κατασκευής (Sawangsurinya, 2012).

Το μέγιστο μέτρο διάτμησης, εκφράζει την αρχική ακαμψία του εδάφους και όπως όλα τα εδαφικά χαρακτηριστικά στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων είναι ανεξάρτητο του πλάτους παραμόρφωσης. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μια έμμεση ένδειξη των διαφόρων παραμέτρων του εδάφους, όπως της πυκνότητας και της διατάραξης του δείγματος (Καλλιόγλου, 2013).

Η εργαστηριακή μέτρηση του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) είναι σχετικά δυσχερής, καθότι αναφέρεται σε πολύ μικρές παραμορφώσεις. Η εν λόγω μέτρηση είναι εφικτή με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, προσαρμοσμένων στην τριαξονική συσκευή. Έτσι τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε μια τεχνική που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, προκειμένου να διερευνηθεί το (μικρών παραμορφώσεων) μέγιστο μέτρο διάτμησης, G_{max} (Καλλιόγλου, 2003).

Η τιμή του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) εξαρτάται από έναν πλήθος παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων του λόγου κενών, της αξονικής φόρτισης, της δομής του εδάφους, του βαθμού κορεσμού, της θερμοκρασίας, της ιστορίας φόρτισης και του χρόνου (Asslan, 2008).

Με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω (βλέπε ενότητα 2.1) το μέγιστο μέτρο διάτμησης υπολογίζεται με έμμεσο τρόπο μέσω των μετρήσεων της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) και της πυκνότητας (ρ) του προς μελέτη σχηματισμού ως εξής (Γεωργιανού, 2008):

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad [2.12]$$

Από την Σχέση 2.12 προκύπτει ότι οποιαδήποτε μεταβολή στην ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων μεταφράζεται σε μεταβολή της ακαμψίας τους εδάφους και αντίστροφα.

Ως εκ τούτου η ένδειξη της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) πρακτικά μπορεί να λαμβάνεται υπόψιν ως μία δυναμική ιδιότητα των εδαφικών σχηματισμών, απαραίτητη για την ερμηνεία γεωτεχνικών προβλημάτων και σεισμικών αναλύσεων (Troncoso and Garces, 2000).

Πολλοί ερευνητές τα τελευταία χρόνια βασιζόμενοι στην παραπάνω σχέση, αλλά και με την χρήση εμπειρικών τύπων προσπάθησαν με εργαστηριακές δοκιμές να καθορίσουν το εύρος της τιμής του

μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{\max}) για διάφορους τύπους εδαφών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Εύρος τιμών V_s και G_{\max} για διάφορους τύπους εδαφών (Τίκα & Μυλωνάκης, 2008).

Έδαφος	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	V_s (m/s)	G_{\max} (MPa)
Μαλακή άργιλος	1.600	40-90	2.6-13
Στιφρή άργιλος	1.680	65-140	7-33
Χαλαρή άμμος	1.680	130-280	28.4-131.7
Πυκνή άμμος και χάλικες	1.760	200-410	70.4-300

Τέλος, ως γενικό συμπέρασμα των εργαστηριακών μελετών από πολλούς ερευνητές, το μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{\max}) εξαρτάται από τους κάτωθι παράγοντες (Καλλιόγλου, 2003):

- την κατάσταση του εδάφους που εκφράζεται από το συνδυασμό του δείκτη πόρων του εδάφους και το μέγεθος των ενεργών τάσεων, και
- την εδαφική σύνθεση και την εδαφική δομή που αντανακλά τις συνθήκες κατά την εναπόθεση (διαδικασία ιζηματογένεσης) και έπειτα της εναπόθεσης (διαδικασία διαγένεσης, ανάπτυξης συγκολλητικών δεσμών κ.α.).

2.3 Παράγοντες επίδρασης του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{\max})

Μία από τις πρώτες εργαστηριακές μελέτες των παραμέτρων που επηρεάζουν τις δυναμικές ιδιότητες του εδάφους είναι αυτή των Hardin & Richart (1963), οι οποίοι χρησιμοποιώντας τη συσκευή στήλης συντονισμού, υπολόγισαν τις ταχύτητες διάδοσης διαμήκων και διατμητικών κυμάτων αμμοδών εδαφών σε μικρά πλάτη παραμόρφωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στην εκτίμηση του μέτρου διάτμησης (Καλλιόγλου, 2003).

Οι Hardin & Richart (1963) παρατήρησαν ότι το μέγιστο μέτρο διάτμησης, G_{\max} , εξαρτάται άμεσα από την ισότροπη ενεργή τάση στερεοποίησης (σ'_0), και το δείκτη πόρων (e) ενώ το μέγεθος των κόκκων, η κοκκομετρία και η σχετική πυκνότητα επιδρούν έμμεσα μεταβάλλοντας το δείκτη πόρων.

Με την διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών, κατέληξαν πως το μέτρο διάτμησης εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων όπως η ενεργή ισότροπη τάση στερεοποίησης, ο δείκτης πόρων, το περιβάλλον τάσεων, η ιστορία δυναμικής φόρτισης, ο βαθμός κορεσμού, η σύνθεση του εδάφους (μέγεθος και σχήμα κόκκων, κοκκομετρία και ορυκτολογική σύσταση), και η εδαφική δομή, πλάτος και συχνότητα επιβαλλόμενης δυναμικής διέγερσης, ο χρόνος πρωτεύουσας στερεοποίησης και δευτερεύουσας συμπίεσης, η θερμοκρασία και η γήρανση (Κάλλιογλου, 2003).

2.3.1 Επίδραση του λόγου κενών (e)

Όπως αναφέρει ο Asslan (2008), οι ερευνητές Hardin & Richart το 1963 μέτρησαν την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων σε διάφορες άμμους, με τη χρήση της μεθόδου στήλης συντονισμού. Ελήφθησαν τιμές των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων για διάφορα δείγματα με διαφορετικούς λόγους κενών για διάφορες τιμές αξονικής φόρτισης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης τους η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων βρέθηκε να μεταβάλλεται γραμμικά με το λόγο κενών και ανεξάρτητα από το μέγεθος των κόκκων, τη διαβάθμιση και τη σχετική πυκνότητα.

Οι ερευνητές Hardin & Richart (1963) πρότειναν μια σχέση μεταξύ του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) και του λόγου κενών, έπειτα από μετρήσεις της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων:

$$G_{max} = \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \quad \text{για στρογγυλεμένους κόκκους άμμου (} e < 0,80 \text{)} \quad [2.13]$$

$$G_{max} = \frac{(2.97-e)^2}{1+e} \quad \text{για γωνιώδεις κόκκους άμμου (} e < 0,60 \text{)} \quad [2.14]$$

2.3.2 Επίδραση του λόγου προστερεοποίησης

Σε συνεκτικά εδάφη το μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}) αυξάνει με τον λόγο προστερεοποίησης. Σύμφωνα με τον Asslan (2008) οι ερευνητές Hardin & Black (1968) προτείνουν την ακόλουθη εμπειρική γενική σχέση:

$$G_{max} = f \cdot [(OCR)^K] \quad [2.15]$$

όπου, K είναι μια παράμετρος που κυμαίνεται μεταξύ 0 για άμμο και 0,5 για υψηλής πλαστικότητας αργίλους. Όπως διαπίστωσαν οι ερευνητές η τιμή του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) σε μια συγκεκριμένη τάση φόρτισης αυξάνει με τον λόγο προστερεοποίησης.

2.3.3 Επίδραση της διαγένεσης

Η διαγένεση αναφέρεται στην αλλαγή της υφής των σωματιδίων και το σχηματισμό διασωματιδιακών δεσμών, ως αποτέλεσμα αυξημένης θερμοκρασίας, πίεσης και χρόνου (Soga, 2005).

Η διαγενετική διαδικασία μεταβάλλει την ακαμψία των εδαφών με το χρόνο. Οι πιο σημαντικές επιδράσεις της διαγένεσης είναι η τσιμέντωση και η γήρανση, οι οποίες ορίζονται ως μια αλλαγή σε διάφορες μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν από συμπίεση κάτω από ένα σταθερό φορτίο.

Ο όρος «γήρανση» περιγράφει την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους με το χρόνο, κάτω από συνεχή εξωτερική τάση. Η μεταβολή αυτή παρατηρείται στους ιλυώδεις και αργιλικούς σχηματισμούς, αλλά και σε αμμώδη και χαλικώδη σχηματισμούς (Asslan, 2008).

Η επίδραση του φαινομένου της γήρανσης στο μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}) και κατά συνέπεια στην ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) αποτελεί αντικείμενο έρευνας στην παρούσα εργασία και παρακάτω επιχειρείται η εκτενέστερη ανάλυση του.

2.3.4 Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης

Σύμφωνα με τον Asslan (2008) σε εργαστηριακές μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι το μέγιστο μέτρο διάτμησης αυξάνεται με τον ρυθμό φόρτισης. Έχει εκτιμηθεί επίσης σε συνεκτικά εδάφη πως η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης αυξάνει με τον δείκτη πλαστικότητας (PI).

2.3.5 Άλλες παράμετροι επίδρασης του μέγιστου μέτρου διάτμησης

Οι Hardin & Richart (1963) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο στήλης συντονισμού για να διερευνήσουν την ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων σε αμμώδη δείγματα. Συνέκριναν τις ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων, μεταξύ δειγμάτων άμμου από στρογγυλεμένους κόκκους και δειγμάτων άμμου από γωνιώδεις άμμους.

Διαπίστωσαν ότι σε χαμηλές αξονικές φορτίσεις η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων είναι υψηλότερη στις γωνιώδεις άμμους, απ' ότι σε άμμους με στρογγυλεμένους κόκκους. Καθώς

αυξάνεται η αξονική φόρτιση, οι ταχύτητες των δύο υλικών προσεγγίζουν η μία την άλλη (Asslan, 2008).

Η μέση διάμετρος των κόκκων και η κατανομή του μεγέθους των κόκκων έχουν επίσης επίδραση στο μέγιστο μέτρο διάτμησης. Οι Iwasaki & Tatsouka (1977) ανέφεραν 10% έως και 25% μείωση του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) σε καλά διαβαθμισμένη άμμο, σε σύγκριση με ελάχιστα διαβαθμισμένη άμμο (Asslan, 2008).

2.3.6 Επίδραση της Γήρανσης του εδάφους (Aging Effect)

Οι αλλαγές οι οποίες παρατηρούνται στα γεωυλικά, καθώς και η τροποποίηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους με την πάροδο του χρόνου οφείλονται στο φαινόμενο της γήρανσης των εδαφών (aging effect) (Mounir and Tarek, 2011).

Πιο συγκεκριμένα, στους λεπτόκοκκους εδαφικούς σχηματισμούς και κυρίως στους αργιλικούς σχηματισμούς η συμπεριφορά των εδαφών μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου ως συνέπεια της στερεοποίησης, των τασικών συνθηκών που επικρατούν, των χημικών και βιολογικών μεταβολών και άλλων παραγόντων με αποτέλεσμα την μεταβολή της ακαμψίας του εδάφους με την πάροδο του χρόνου (Soga, 2005).

Η μακροπρόθεσμη μεταβολή των εδαφικών ιδιοτήτων εξαιτίας της γήρανσης έχει μελετηθεί εις βάθος από πολλούς ερευνητές, ενώ είναι και ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπ όψη στις γεωτεχνικές μελέτες (Mounir and Tarek, 2011).

Έρευνες για την επίδραση της γήρανσης στο μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}) των εδαφών έχουν διεξαχθεί εργαστηριακά και έχουν στηριχθεί κυρίως σε μετρήσεις με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε διάστημα χρόνου από μερικές ημέρες έως και μερικές εβδομάδες.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s), σε εδαφικές αποθέσεις, αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους της συμπεριφοράς του εδάφους σε πολλά προβλήματα της Γεωτεχνικής Μηχανικής, όπως την σεισμική απόκριση, την εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης κ.α. Η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) πραγματοποιείται είτε στο πεδίο με γεωφυσικές δοκιμές, είτε εργαστηριακά.

Αν και οι δοκιμές πεδίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την εκτίμηση της επιτόπου συμπεριφοράς του εδάφους, η επιτυχία τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια του εξοπλισμού καθώς και την ορθή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους (Τίκα και Κάλλιογλου, 2008).

Επιπλέον με τις δοκιμές αυτές δεν μπορεί να διεξαχθεί συστηματική έρευνα της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s), όπως είναι η διατμητική παραμόρφωση, η συχνότητα φόρτισης, ο αριθμός κύκλων φόρτισης κ.α..

Μια συστηματική μελέτη της επίδρασης των παραπάνω παραμέτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με εργαστηριακές δοκιμές. Ανάμεσα στις διάφορες εργαστηριακές μεθόδους η δοκιμή στήλης συντονισμού για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) από πολύ μικρές έως ενδιάμεσες παραμορφώσεις και η δοκιμή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Bender Elements Test) που αναπτύχθηκε από τους Shirley και Hampton (1978), είναι οι πιο διαδεδομένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια, μετατρέποντας τη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) σε μία εύκολη διαδικασία (Τίκα και Κάλλιογλου, 2008).

3.1 Μετρήσεις στο πεδίο με σεισμικές μεθόδους

Πρόκειται για δοκιμές που πραγματοποιούνται στο πεδίο, στην περιοχή όπου βρίσκονται οι προς εξέταση εδαφικοί σχηματισμοί και πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο. Η αρχή λειτουργίας των γεωφυσικών μεθόδων στηρίζεται στην παραγωγή κυμάτων, με τη χρήση μίας ακολουθίας πομποδεκτών κατά μήκος της εξεταζόμενης επιφάνειας του εδάφους (Simons, 2002). Οι Σεισμικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων μέσα από το έδαφος (κύματα συμπίεσης (P) κύματα διάτμησης (S), και επιφανειακά κύματα, τα οποία περιλαμβάνουν τα κύματα Rayleigh (R)). Τα κύματα διαδίδονται με ταχύτητες συνάρτησε της πυκνότητας και των ελαστικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Σε ένα ισοτροπικό ελαστικό μέσο, η ταχύτητα του διαμήκου κύματος V_p δίνεται από τη σχέση:

$$V_p = \left(\frac{K + 4/3 \cdot G}{\rho} \right)^{1/2} \quad [3.1]$$

Ενώ η ταχύτητα διάδοσης εγκαρσίου κύματος δίνεται από την σχέση:

$$V_s = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{1/2} \quad [3.2]$$

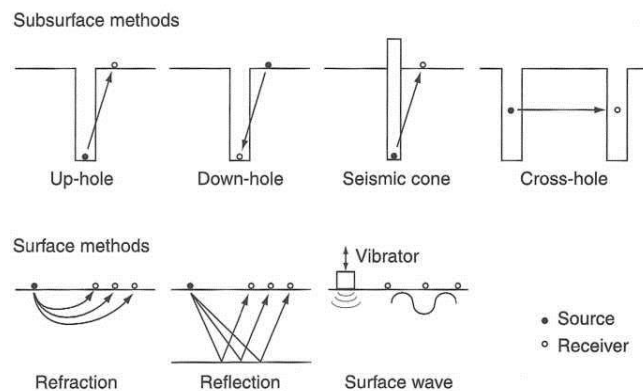
Όπου το μέτρο διάτμησης G και το μέτρο μεταβολής του όγκου K δίδονται από τις σχέσεις:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad [3.3]$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad [3.4]$$

Όπου ν είναι ο λόγος του Poisson.

Ετσι το μέτρο διάτμησης (G) μπορεί να εκτιμάται από τις μετρήσεις της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) μόνο. Ωστόσο οι μετρήσεις των ταχυτήτων διάδοσης των εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων V_s και V_p αντίστοιχα, είναι απαραίτητες προκειμένου να προσδιορισθούν το μέτρο ελαστικότητας (E), το μέτρο μεταβολής του όγκου (K) και ο λόγος Poisson (ν). Με τις επιτόπου σεισμικές δοκιμές πεδίου, όπως είναι η μέθοδος cross-hole, down-hole, MASW κ.α. (Βλέπε Σχήμα 3.1) προσδιορίζεται η ακαμψία του εδάφους (Asslan, 2008).

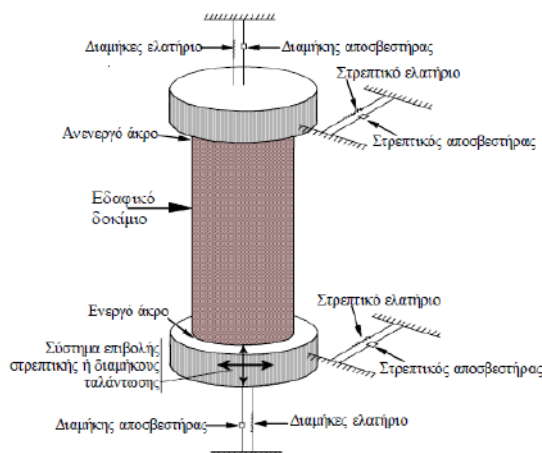


Σχήμα 3.1: Επι τόπου σεισμικές δοκιμές για την εκτίμηση της ακαμψίας του εδάφους

3.2 Μέθοδος στήλης συντονισμού

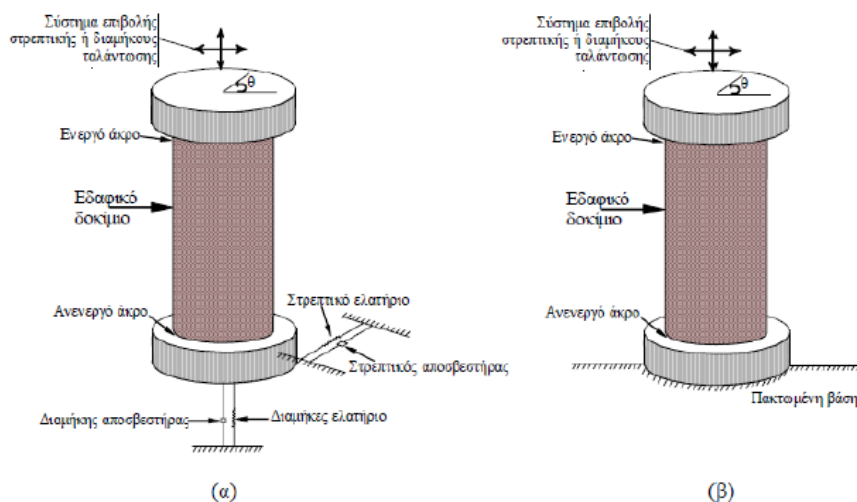
Η συσκευή στήλης συντονισμού χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων πολλών γεωϋλικών από το 1930, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει συμβάλλει ουσιαστικά στη μελέτη

της δυναμικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή των μικρών ($\gamma < 10^{-5} \%$) και μεσαίων παραμορφώσεων ($10^{-5} \% < \gamma < 10^{-3} \%$) (Κάλλιογλου, 2003)



Σχήμα 3.2: Γενικές οριακές συνθήκες στη συσκευή στήλης συντονισμού (Καλλιογλου, 2003)

Οι συσκευές στήλης συντονισμού χρησιμοποιούν σύστημα επιβολής αξονικής ή / και στρεπτικής δυναμικής διέγερσης και γενικά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τις συνθήκες στήριξης των άκρων του δοκιμίου (βλέπε Σχήμα 3.3) : (α) τύπου «ελεύθερο – ελεύθερο άκρο», και (β) τύπου «πακτωμένο – ελεύθερο άκρο».



Σχήμα 3.3: Συσκευή στήλης συντονισμού, τύπου «ελεύθερο – ελεύθερο» (α), και «πακτωμένο – ελεύθερο» (β) (Κάλλιογλου, 2003)

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δοκίμια ξηρά, μερικώς κορεσμένα και πλήρως κορεσμένα. Το δοκίμιο καλύπτεται με ελαστική μεμβράνη, τοποθετείται στην κυψέλη που πληρώνεται με νερό και υποβάλλεται σε ισότροπη τάση, σ'ο, και αύξηση της πίεση του νερού των πόρων. Έπειτα

επιβάλλεται στο δοκίμιο ηλεκτρομαγνητική διέγερση δια μέσου ειδικής πλάκας, που φέρει το μηχανισμό διέγερσης αποτελούμενο από ένα σύστημα πηνίων και μαγνητών που συνδέεται με το άνω άκρο του δοκιμίου (ενεργό άκρο) μέσω μιας δεύτερης μεταλλικής πλάκας (top cap) (Κάλλιογλου, 2003).

Απλή αρμονική αξονική ή στρεπτική ταλάντωση, εφαρμόζεται στο άνω άκρο του δοκιμίου δημιουργώντας διαμήκη ή διατμητικά κύματα, αντίστοιχα, τα οποία διαδίδονται ως το άλλο άκρο του δοκιμίου (παθητικό άκρο), όπου ανακλώνται. Η συχνότητα διέγερσης μεταβάλλεται έως ότου επέλθει συντονισμός στην πρώτη ιδιόμορφη ταλάντωση. Αυτό συμβαίνει όταν η διέγερση είναι σε γωνία φάσης 180° με την ταχύτητα στο ενεργό άκρο του δοκιμίου. Μετρούνται η συχνότητα συντονισμού, το μέγεθος της διέγερσης (δύναμη ή ροπή) καθώς κι η επιτάχυνση στο ενεργό άκρο του δοκιμίου (διαμήκης ή στρεπτική όταν επιβάλλεται δύναμη ή ροπή αντίστοιχα).

Οι τιμές αυτές σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου (γεωμετρία και μάζα) και τα χαρακτηριστικά της συσκευής (μάζα και ακαμψία του ενεργού άκρου) χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών και διαμηκών κυμάτων V_s και V_p αντίστοιχα, του μέτρου ελαστικότητας (E), του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) και της αξονικής διατμητικής παραμόρφωσης ϵ και γ αντίστοιχα (Κάλλιογλου, 2003).

3.3 Μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Bender Elements Test)

Η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Bender elements test) είναι μία σχετικά απλή τεχνική που αναπτύχθηκε από του Shirley και Hampton (1977) με σκοπό την εκτίμηση του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}). Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά δημιουργούνται από ορισμένα κεραμικά υλικά με την έκθεσή τους για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο και υψηλές θερμοκρασίες. Ανάλογα με τις απαιτήσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πομποί ή σαν δέκτες.

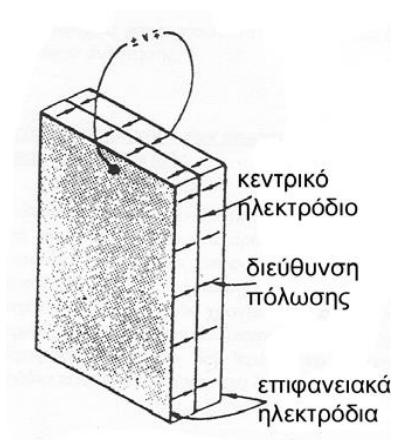
Η λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων βασίζεται στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, δηλαδή στην ιδιότητα που έχουν ορισμένα κεραμικά υλικά να παράγουν μια ηλεκτρική τάση, όταν υποβάλλονται σε μηχανική παραμόρφωση και αντίστροφα.

Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια γεννήτριας εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό κύμα στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο-πομπός που βρίσκεται στην κορυφή του δοκιμίου.

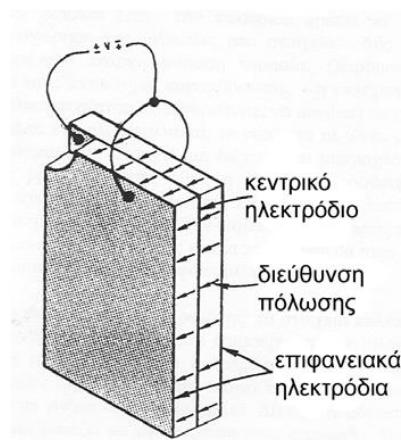
Με βάση την ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, το στοιχείο πομπός διεγείρεται, ταλαντώνεται, μεταδίδει την κίνησή του αυτή κατά ύψος του δοκιμίου και το κύμα ταλάντωσης φτάνει στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο-δέκτης που βρίσκεται στη βάση του δοκιμίου.

Εφαρμόζοντας την αντίστροφη ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου καθώς το στοιχείο δέκτης διεγείρεται μηχανικά παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα.

Τα ηλεκτρικά σήματα του στοιχείου πομπού και του στοιχείου δέκτη καταγράφονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και στη συνέχεια συγκρίνονται ώστε τελικά να προκύψει ο χρόνος που χρειάζεται το εγκάρσιο κύμα για να διαδοθεί μέσα στο δοκίμιο (Γεωργιανού & Τσομώκος, 2006).



Σχήμα 3.4: Συνδεσμολογία πομπού



Σχήμα 3.5: Συνδεσμολογία δέκτη

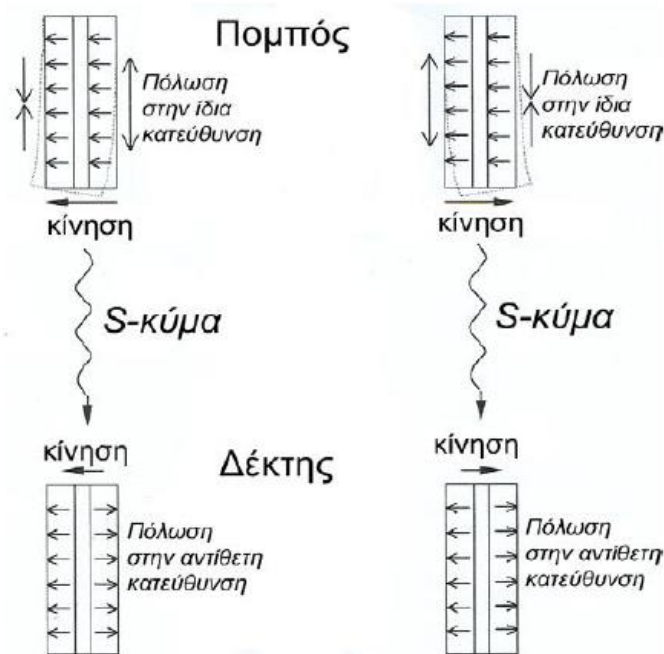
Όταν το αισθητήριο χρησιμοποιείται ως πομπός (Σχήμα 3.4) εφαρμόζεται θετική τάση στο κεντρικό ηλεκτρόδιο και αρνητική στα δυο εξωτερικά ή το αντίστροφο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται ομόρροπη πόλωση και στα δυο κεραμικά πλακίδια που προκαλεί την στρέψη τους προς συγκεκριμένη φορά (θεωρώντας ότι το πάνω άκρο παραμένει σταθερό) (GDS BES manual, 2013).

Στο Σχήμα 3.6 δίνεται σχηματική διάταξη της λειτουργίας αυτών των αισθητηρίων. Στο αριστερό μέρος, ο πομπός κάμπτεται προς τα αριστερά και παράγει εγκάρσιο κύμα (S) το οποίο ανιχνευόμενο από τον δέκτη τον κινεί προς τα αριστερά παράγοντας στα εξωτερικά ηλεκτρόδια ηλεκτρική τάση.

Στον πομπό, η πόλωση των κεραμικών πλακιδίων είναι προς την ίδια κατεύθυνση, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται στο αριστερό μέρος σύνθλιψη και στο δεξιό εφελκυσμός. Στον δέκτη, η διέγερσή του προς τα αριστερά, προκαλεί στα πλακίδια αντίρροπη πόλωση και εμφάνιση τάσης συγκεκριμένης πολικότητας στα εξωτερικά ηλεκτρόδια.

Στο δεξιό μέρος του σχήματος, η εφαρμοζόμενη τάση έχει αντίθετη πολικότητα σε σχέση με πριν. Αυτή τη φορά με ομόρροπη πολικότητα, στο αριστερό τμήμα του πομπού παρουσιάζεται εφελκυσμός και στο δεξιό σύνθλιψη.

Το διαδιδόμενο εγκάρσιο κύμα διεγείρει τον δέκτη προς τα δεξιά με αποτέλεσμα να εμφανίζεται στα εξωτερικά του ηλεκτρόδια τάση αντίθετης πολικότητας σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση (GDS BES manual, 2013).

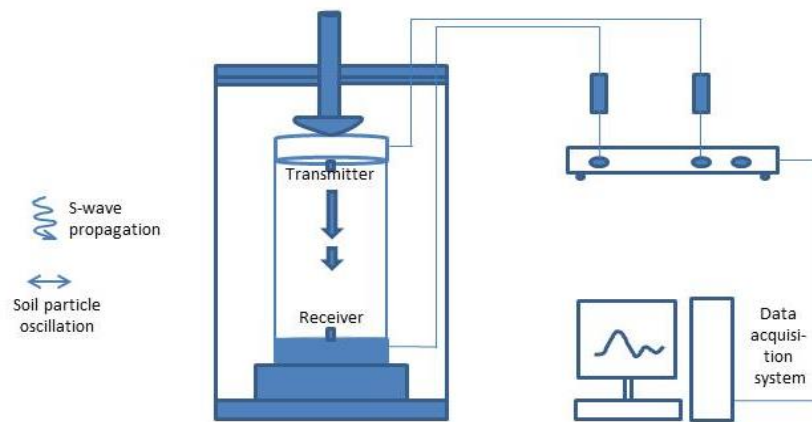


Σχήμα 3.6: Σχηματική διάταξη λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για την παραγωγή εγκάρσιων κυμάτων

Η εναλλαγή ανάμεσα σε εγκάρσια ή διαμήκη κύματα επιτυγχάνεται με αλλαγή του τρόπου σύνδεσης των αισθητηρίων και κατάλληλη πολικότητα στις τροφοδοσίες των πομπών. Χάρη στην σύγχρονη τεχνολογία, η προαναφερθείσα εναλλαγή επιτυγχάνεται αυτόματα μέσω της γεννήτριας του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που είναι και το κέντρο ελέγχου της διάταξης.

Η μελέτη της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων σε εδαφικά δείγματα, αποτελεί μια ακόμη παράμετρο έρευνας των ιδιοτήτων του εδάφους. Η διαδικασία μέτρησης με P κύματα είναι παρόμοια με αυτή των S κυμάτων (GDS BES manual, 2013).

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίον τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τοποθετούνται στο εδαφικό δοκίμιο εντός της συσκευής. Επίσης παρουσιάζεται η διάταξη του εξοπλισμού με τον οποίον πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 3.6: Διάταξη του εξοπλισμού στη δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή των σημάτων διέγερσης του πομπού και των τεχνικών υπολογισμού του χρόνου διάδοσης του εγκάρσιου κύματος, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας με την χρήση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια εξειδικευμένου λογισμικού της εταιρίας GDS Instruments το οποίο σε συνδυασμό με τον κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό (βλέπε Σχήμα 3.6) αφενός δημιουργούν το σήμα διέγερσης του πομπού και αφετέρου ανιχνεύουν και απεικονίζουν το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης.

Ο χειρισμός της μέτρησης και ο υπολογισμός του χρόνου διάδοσης γίνεται αυτόματα από την οθόνη υπολογιστή, όπως έγινε σε αυτήν την εργασία.

4.1 Σήματα διέγερσης

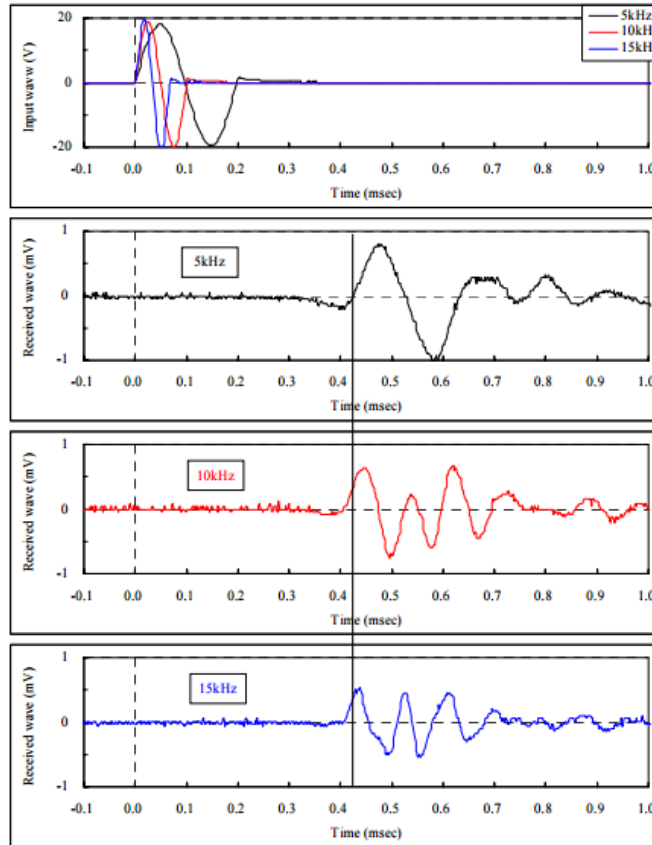
Προκειμένου να ανιχνευθούν τα εγκάρσια κύματα τα οποία παράγονται καθώς τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία υποβάλλονται σε μηχανική ταλάντωση, απαιτούνται σήματα διέγερσης σημαντικής ισχύος.

4.1.1 Σήμα ενός ημιτόνου

Πρόκειται για τον πιο συνηθισμένο τρόπο παραγωγής κύματος, με τη διέγερση του πομπού από ένα και μοναδικό ημίτονο. Η επιλογή του ημιτόνου είναι η συνηθέστερη περίπτωση και κρίνεται ως η καλύτερη επιλογή. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται κυματομορφές του σήματος διέγερσης του πομπού και του σήματος που ανιχνεύει ο δέκτης, για συγκεκριμένο εδαφικό δοκίμιο.

Οι πεπερασμένες διαστάσεις του μετρούμενου εδαφικού δοκιμίου σε σύγκριση με το μήκος κύματος του παλμού που διαδίδεται, δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες ανακλάσεων στα πλευρικά τοιχώματα του δοκιμίου. Η δημιουργία τέτοιων ανακλάσεων επηρεάζει τον πραγματικό χρόνο άφιξης του εγκάρσιου κύματος στον δέκτη και οδηγεί σε λάθος εκτιμήσεις.

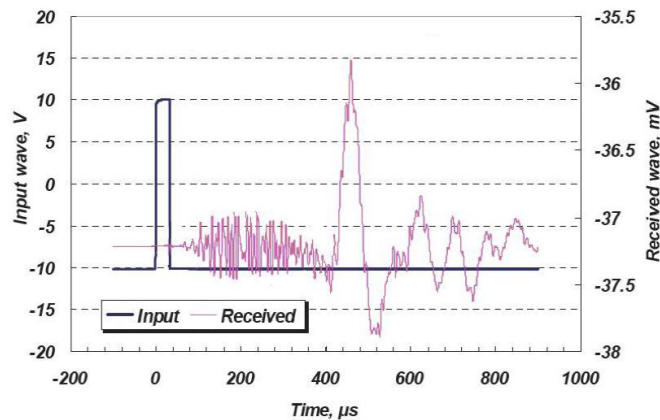
Για τους παραπάνω λόγους, η επιλογή ενός μοναδικού παλμού, ο οποίος είναι συνήθως ένα ημίτονο κρίνεται ως η καλύτερη λύση και χρησιμοποιείται κατά κόρον σε τέτοιες μετρήσεις.



Σχήμα 4.1: Παραδείγματα σημάτων διέγερσης – ανίχνευσης πομπού και δέκτη αισθητηρίων bender elements (Yamashita, 2003)

4.1.2 Σήμα ενός παλμού

Για την παραγωγή εγκάρσιου κύματος ενίοτε χρησιμοποιείται τετραγωνικός παλμός συγκεκριμένης διάρκειας ή διέγερση μορφής παλμού μοναδιαίου βήματος.



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα τετραγωνικού παλμού διέγερσης και σήματος ανίχνευσης δέκτη (Yamashita, 2003)

4.1.3 Σήμα πεπερασμένου αριθμού παλμών

Σε κάποιες περιπτώσεις στη βιβλιογραφία, συναντάται η τεχνική παραγωγής εγκαρσίων κυμάτων με περισσότερους από έναν παλμούς, συνήθως ημιτονοειδούς μορφής. Στον δέκτη εμφανίζονται διαδοχικοί ημιτονοειδείς παλμοί αυξανόμενου πλάτους που φτάνουν σε κάποια μέγιστη τιμή και έπειτα αρχίζουν να φθίνουν (Yamashita, 2003)

4.2 Τεχνικές υπολογισμού του χρόνου διάδοσης εγκαρσίου κύματος

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) είναι συνάρτηση του χρόνου διάδοσης. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) στο πεδίο του χρόνου λαμβάνουν υπ' όψη το φαινόμενο επίδραση του κοντικού πεδίου (Near Field Effect), ενός φαινομένου που παρατηρήθηκε να επηρεάζει τις μετρήσεις χρόνου με τη μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

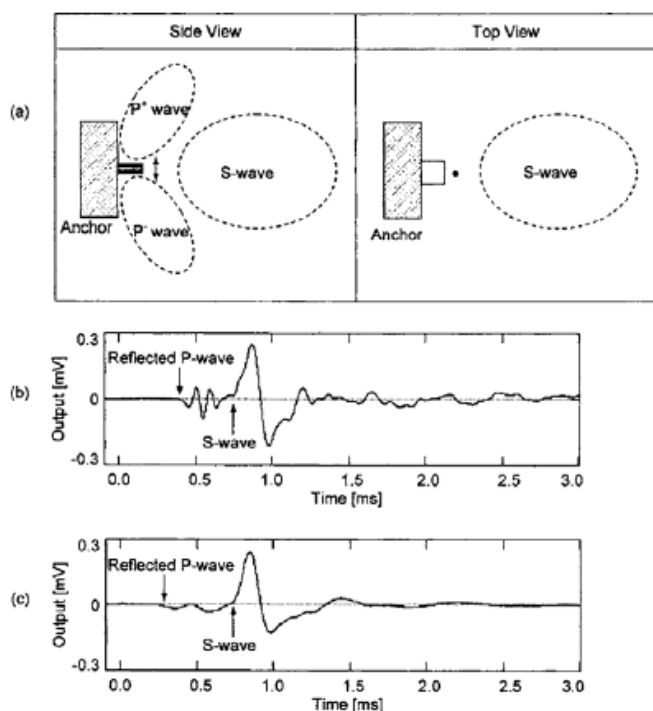
Η πρώτη άφιξη στο σήμα που ανιχνεύει ο δέκτης είναι πιθανό να μην αντιπροσωπεύει την άφιξη του εγκάρσιου κύματος (S), αλλά την άφιξη του επονομαζόμενου near-field στοιχείου το οποίο διαδίδεται με ταχύτητα διαμήκους κύματος (P). Πρόκειται για ένα φαινόμενο που επηρεάζει τις μετρούμενες τιμές του χρόνου και λαμβάνεται πλέον υπ' όψη κατά τη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (Lee and Santamarina, 2005).

Οι πεπερασμένες διαστάσεις του δείγματος το οποίο τοποθετείται στην κυψέλη, καθώς και η γεωμετρία της διάταξής του με τα αισθητήρια δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την εμφάνιση διαμήκους κύματος (P). Τμήμα του αισθητήρα που βρίσκεται βυθισμένο μέσα στο δείγμα, ταλαντώνεται σε κατακόρυφη διεύθυνση. Η κίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διαμήκους κύματος (P) προκαλώντας πυκνώσεις και αραιώσεις στις περιοχές του δείγματος γύρω από το αισθητήριο. Έπειτα από διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα του δοκιμίου, τα κύματα αυτά φτάνουν στον δέκτη.

Όπως γίνεται αντιληπτό, το πότε τα κύματα συμπίεσης θα φτάσουν στον δέκτη είναι θέμα μείζονος σημασίας για την σωστή εκτίμηση του χρονικού σημείου άφιξης του εγκάρσιου κύματος. Αν το διαμήκες κύμα φτάσει αργότερα από την άφιξη του επιθυμητού εγκάρσιου κύματος δεν θεωρείται ιδιαίτερο πρόβλημα, καθώς η αρχική διέγερση που φαίνεται στον δέκτη αντιπροσωπεύει το εγκάρσιο κύμα και η εκτίμηση του σημείου άφιξης είναι εύκολη. Αν όμως τα δυο κύματα φτάσουν

σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή, ο δέκτης θα ανιχνεύσει το «άθροισμα» των δυο κυμάτων και η εκτίμηση του σημείου άφιξης του εγκάρσιου κύματος γίνεται δύσκολη υπόθεση (Lee and Santamarina, 2005).

Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται παραδείγματα της επίδρασης του NFE. Η αρχική διέγερση του δέκτη δεν αντιπροσωπεύει σε καμία από τις δύο περιπτώσεις την άφιξη του εγκάρσιου κύματος, πριν από την άφιξη του ανακλώμενου κύματος συμπίεσης. Έτσι, το εγκάρσιο κύμα εκτιμάται ότι φτάνει αργότερα στον δέκτη.



Σχήμα 4.3: Δημιουργία και επίδραση του Near Field Effect (Lee and Santamarina, 2005)

Η πιθανότητα της εμφάνισης του NFE είναι δύσκολα προβλέψιμη. Εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Το μήκος του δοκιμίου και η διάμετρός του είναι οι γεωμετρικοί παράγοντες που προσδιορίζουν το μήκος της διαδρομής που θα κάνει ένα διαμήκες κύμα μέχρι να φτάσει στον δέκτη. Επίσης η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων συμπίεσης, μπορεί να μεταβάλλεται συναρτήσει της τάσης στην οποία υποβάλλεται το δοκίμιο. Όσο περισσότερο συμπιέζεται το δείγμα τόσο μικραίνει ο χρόνος διάδοσης του διαμήκες (P) κύματος, διότι αυξάνεται η συνοχή του μέσου διάδοσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε μια μέτρηση η επίδραση του NFE να μεταβάλλεται, καθώς η τάση στο δοκίμιο αλλάζει (Lee and Santamarina, 2005).

Οι Viggiani & Atkinson (1995), μελετώντας το φαινόμενο για διαφορετικές συνθήκες μέτρησης (μήκος δοκιμίου, συχνότητα σήματος διέγερσης), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η εμφάνιση του «near field effect» είναι έντονη όταν το μήκος του δοκιμίου είναι εντός της περιοχής $0.25 \cdot \lambda - 4 \cdot \lambda$ (όπου λ το μήκος κύματος).

Το μήκος κύματος (λ) που ορίστηκε προηγουμένως, μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση:

$$\lambda = \frac{V_s}{f} \quad [4.1]$$

όπου, V_s η ταχύτητα διάδοσης του εγκάρσιου κύματος και f , η μέση συχνότητα του σήματος που ανιχνεύεται στον δέκτη. Η παραπάνω εκτίμηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται το μήκος του δοκιμίου τόσο μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης του NFE.

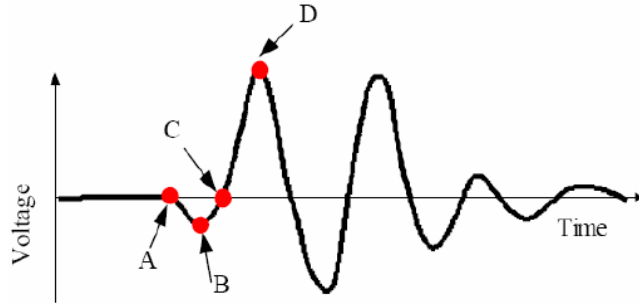
Με δεδομένες όμως τις ιδιαιτερότητες της μεθόδου των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν μεγάλου μήκους δείγματα. Επομένως, κατά την εκτίμηση του χρόνου διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων είναι χρήσιμο να λαμβάνεται υπόψιν ο παράγοντας του NFE προς αποφυγή λανθασμένων εκτιμήσεων (Lee and Santamarina, 2005).

4.2.1 Τεχνική point to point

Χρησιμοποιώντας κάποιον από τους τρόπους καταγραφής και απεικόνισης των σημάτων πομπού και δέκτη που αναλύθηκαν παραπάνω, η εκτίμηση του χρόνου διάδοσης σε ότι αφορά την τεχνική point to point, βασίζεται στην επιλογή των χρονικών σημείων αποστολής και άφιξης του εγκάρσιου κύματος.

Με σήμα διέγερσης παλμό ενός ημιτόνου συγκεκριμένης συχνότητας, ως έναρξη του χρόνου διάδοσης θεωρείται η αρχή του ημιτόνου, η οποία εύκολα προσδιορίζεται (GDS BES manual, 2013).

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα σήματος που καταγράφει ο δέκτης, για διέγερση του πομπού από ένα ημίτονο.



Σχήμα 4.4: Η επιλογή του χρονικού σημείου άφιξης (GDS BES manual, 2013)

Τα σημεία A, B, C και D είναι αυτά γύρω από τα οποία εστιάζεται η επιλογή του πραγματικού σημείου άφιξης του εγκάρσιου κύματος. Με την σειρά που παρουσιάζονται, το σημείο A αναφέρεται ως το σημείο της πρώτης παρεκτροπής, το σημείο B ως το σημείο του πρώτου ελάχιστου, το C ως το σημείο του πρώτου μηδενικού μετά την πρώτη διέγερση και το D ως το σημείο του πρώτου μεγίστου.

Με πιθανή την επίδραση του NFE, το σημείο A είναι συνήθως το σημείο άφιξης των κυμάτων συμπίεσης και όχι του εγκάρσιου κύματος.

Το σημείο B μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο πιθανή επιλογή για σημείο άφιξης, καθώς λίγο μετά αρχίζουν να παρατηρούνται μεγάλες τιμές πλάτους που υποδηλώνουν στοιχεία εγκάρσιου κύματος.

Το πρώτο μηδενικό μετά το πρώτο ελάχιστο, το σημείο C δηλαδή, μπορεί να θεωρηθεί εξίσου με το B σαν πιθανή επιλογή για σημείο άφιξης, προτείνεται όμως από μερικούς ερευνητές να γίνει μία διορθωτική εκτίμηση για την επιλογή του σημείου C.

Ως τελευταία επιλογή στην παραπάνω εικόνα δίνεται το σημείο D. Η διαφορά με τα υπόλοιπα σημεία είναι ότι για το συγκεκριμένο, ως χρονικό σημείο αποστολής του κύματος, θεωρείται το μέγιστο του ημιτόνου διέγερσης του πομπού. Με απλά λόγια, πρόκειται για μέτρηση από μέγιστο σε μέγιστο του σήματος του πομπού και του σήματος του δέκτη (GDS BES manual, 2013).

Η επιλογή αυτή δίνει σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τα σημεία B και C. Ωστόσο, είναι μια ακόμη εκτίμηση για τον υπολογισμό του χρόνου διάδοσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω ανάλυση, δεν υπάρχει μοναδική λύση για τον προσδιορισμό του πραγματικού σημείου άφιξης του εγκάρσιου κύματος. Χαρακτηριστικό είναι ότι και οι τέσσερις περιπτώσεις έχουν εφαρμοστεί σε πειραματικές μετρήσεις από ερευνητές. Ωστόσο, η επιλογή του σημείου B ή του σημείου C είναι οι πιο συνηθισμένες και περισσότερο αποδεκτές, ως χρονικό σημείο άφιξης του εγκάρσιου κύματος στον δέκτη (GDS BES manual, 2013).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η τεχνική point to point χρησιμοποιείται ευρέως στην μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Είναι μια εύκολη διαδικασία, καθώς δεν χρειάζεται μαθηματική ανάλυση και δίνει αποτελέσματα με την απευθείας μέτρηση του χρόνου διάδοσης του σήματος.

Ωστόσο, η δυσκολία στην εκτίμηση του πραγματικού χρονικού σημείου άφιξης οφείλεται, όχι μόνο στην πιθανή επίδραση του near field effect, αλλά και στον έντονο θόρυβο που μαζί με το ωφέλιμο σήμα ανιχνεύει ο δέκτης.

Με βάση τα κριτήρια αυτά η τεχνική point to point μπορεί να χαρακτηριστεί ως εύκολη και γρήγορη εκτίμηση του χρόνου διάδοσης, αλλά όχι ως η πλέον αξιόπιστη.

4.2.2 Τεχνική peak to peak

Η τεχνική peak to peak (Viggiani & Atkinson 1995) βασίζεται στην υπόθεση ότι το λαμβανόμενο σήμα φέρει μια υψηλή ομοιότητα με το μεταδιδόμενο. Ο χρόνος μεταξύ της κορυφής του μεταδιδόμενου σήματος και της πρώτης μεγάλης κορυφής του λαμβανόμενου σήματος, λαμβάνεται ως χρόνος διάδοσης του εγκάρσιου κύματος.

Όπως και με την τεχνική point to point, η τεχνική αυτή επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα των λαμβανόμενων σημάτων.

4.2.3 Τεχνική της συσχέτισης (Cross Correlation)

Πρόκειται για μια μαθηματική διεργασία, η οποία χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε μετρητικές διατάξεις που στελεχώνονται από πομπό και δέκτη και έχουν στόχο την μέτρηση του χρόνου διάδοσης ενός κύματος από τον πομπό στον δέκτη.

Αντικειμενικός σκοπός της μεθόδου είναι να υπολογίσει τον βαθμό συσχέτισης – ομοιότητας μεταξύ των δύο σημάτων.

Η φυσική σημασία του θεωρήματος της συσχέτισης είναι να προκύψει μια ακολουθία τιμών συναρτήσει του χρόνου, η οποία να εμφανίζει μέγιστες εξάρσεις του σήματος γύρω από τα σημεία στα οποία και οι δύο αρχικές ακολουθίες σημάτων εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές (Yamashita, 2003).

Ο χρόνος που προκύπτει με την τεχνική της συσχέτισης είναι λίγο μεγαλύτερος από αυτόν της τεχνικής point to point. Μια ερμηνεία που θα μπορούσε να δοθεί είναι ότι οφείλεται στο NFE. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική point to point επιλέγει το χρονικό σημείο άφιξης με κανόνα την εμφάνιση έξαρσης του σήματος του δέκτη.

Αν δεν υπάρχει μεγάλη επίδραση του NFE η επιλογή αυτή είναι αντικειμενική, αν όμως έχουμε επίδραση του NFE, τότε το σημείο που επιλέγει έχει περισσότερες πιθανότητες να είναι η άφιξη του P κύματος και όχι του S (Yamashita, 2003).

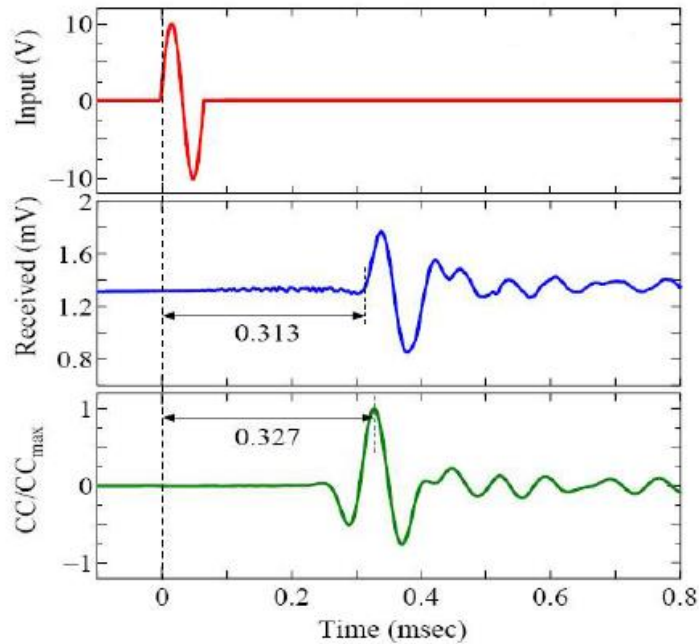
Από την άλλη, η τεχνική της συσχέτισης θα επιλέξει ως σημείο άφιξης αυτό που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη διακύμανση, η οποία φυσικά θα παρατηρηθεί όταν φτάσει το εγκάρσιο κύμα (S) στο δέκτη.

Η συνέλιξη επομένως θα προσπελάσει την άφιξη του διαμήκους κύματος (P), λόγω του μικρού πλάτους του σε σχέση με το εγκάρσιο κύμα (S), και θα εστιάσει στην μεγάλη διακύμανση που εμφανίζεται από την άφιξη του εγκάρσιου κύματος.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η τεχνική της συσχέτισης είναι πιο αξιόπιστη από την point to point. Αποτελεί επίσης ένα τρόπο αντιμετώπισης του φαινομένου επίδρασης κοντινού πεδίου (NFE).

Τέλος, αναφέρεται ότι σε πολλές μετρήσεις η συσχέτιση των δυο σημάτων παράγει περισσότερα από ένα μέγιστα. Στις περιπτώσεις αυτές ως σημείο άφιξης του εγκάρσιου κύματος θεωρείται το πρώτο μέγιστο της καμπύλης (Yamashita, 2003).

Συμπερασματικά η τεχνική του θεωρήματος της συσχέτισης εκφράζει την ομοιότητα των 2 κυμάτων. Δεν είναι ο πραγματικός χρόνος αλλά η διαφορά των 2 σημάτων, δηλαδή ο χρόνος διαδρομής από τον πομπό στον δέκτη.



Σχήμα 4.5: Παράδειγμα εφαρμογής του θεωρήματος της συσχέτισης στα σήματα πομπού και δέκτη (Yamashita, 2003)

4.2.4 Μετρήσεις στο πεδίο της συχνότητας

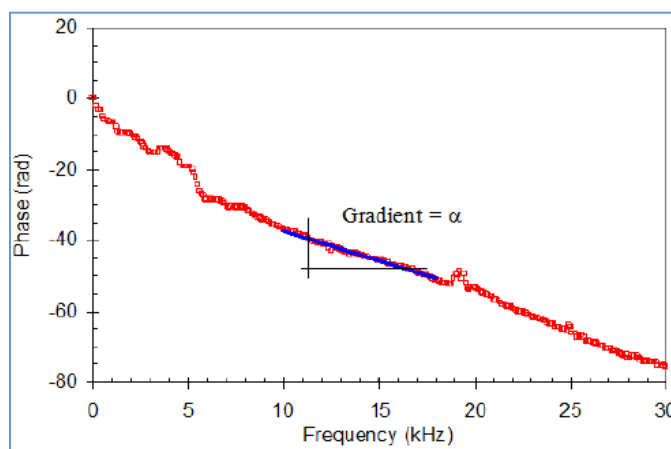
Η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας γίνεται με μετασχηματισμούς Fourier (Fast Fourier Transformation ή FFT).

θα πρέπει να αναφερθεί πως ένα και μοναδικό ημίτονο αποτελείται από την επαλληλία αρκετών ημιτόνων γύρω από αυτή την συχνότητα, γεγονός που φαίνεται και στην συχνοτική ανάλυση του σήματος του πομπού (Jovicic et al., 1996).

Από την φασματική ανάλυση του σήματος στο δέκτη παρατηρείται ότι οι περισσότερες φασματικές συνιστώσες είναι γύρω από την περιοχή της συχνότητας του σήματος διέγερσης όπως είναι αναμενόμενο. Επίσης είναι ευδιάκριτη η παρουσία θορύβου από τις φασματικές συνιστώσες που εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συχνότητες (Jovicic et al., 1996).

Η φυσική σημασία της παραπάνω ανάλυσης είναι ότι σε κάθε μέτρηση υπάρχει πάντα μια συχνοτική περιοχή όπου η διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος του πομπού και του σήματος του δέκτη μεταβάλλεται με σχεδόν σταθερό ρυθμό. Εκτός της περιοχής αυτής, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 4.6, ο ρυθμός μεταβάλλεται ακανόνιστα συναρτήσει της συχνότητας.

Η γραμμική μεταβολή της φάσης του λαμβανόμενου σήματος είναι ισοδύναμη σε χρονική καθυστέρηση άρα η κλίση της γραμμής που περιγράφει την φάση είναι ανάλογη της χρονικής καθυστέρησης (Yilmaz, 1987). Οι τιμές που προκύπτουν από την τεχνική αυτή είναι λίγο μεγαλύτερες και από την μέθοδο point to point και από την μέθοδο της συνέλιξης.



Σχήμα 4.5: Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος στο πεδίο της συχνότητας
(Yamashita, 2003)

4.3 Μειονεκτήματα της μεθόδου των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων με τη μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες, αποτελεσματικές, αξιόπιστες και μη καταστρεπτικές εργαστηριακές μεθόδους. Κατά την εφαρμογή της όμως και παρά το γεγονός ότι πλεονεκτεί σε πάρα πολλά ζητήματα συγκριτικά με άλλες μεθόδους προσδιορισμού της διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων, η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα.

Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της μεθόδου, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, ως εξής: προβλήματα που προκύπτουν κατά την ερμηνεία των δεδομένων (π.χ. το φαινόμενο κοντινού πεδίου), προβλήματα που προκύπτουν στην ανάλυση των δεδομένων λόγω των συχνοτήτων διάδοσης των κυμάτων και μία τελευταία πιο γενική κατηγορία όπου συμπεριλαμβάνονται κάποια μειονεκτήματα που έχουν σημειωθεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου (π.χ. προβλήματα που προκύπτουν σχετικά με τους χρόνους καθυστέρησης μεταξύ πομπού και δέκτη) (Chang, 2005).

5.ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να προσδιορισθούν οι γεωτεχνικές παράμετροι των εδαφικών δοκιμών.

Με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της περιεχόμενης αργίλου στους εδαφικούς σχηματισμούς παρασκευάστηκαν πέντε εδαφικά δοκίμια με διαφορετικό ποσοστό περιεχόμενης αργίλου στο κάθε ένα (βλέπε Πίνακα 5.1).

Επίσης προκειμένου να διερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων (V_s) και διαμήκων (V_p) κυμάτων με τις γεωτεχνικές παραμέτρους, τα πέντε εδαφικά δοκίμια, συμπυκνώθηκαν κατά την βέλτιστη υγρασία τους (OMC).

Οι μετρήσεις των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων (V_s) και διαμήκων (V_p) κυμάτων πραγματοποιήθηκαν με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (Bender Elements) και βάση αυτών εκτιμήθηκαν το μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}), το μέτρο ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν).

Οι τιμές των ταχυτήτων που προέκυψαν, συσχετίστηκαν με τις γεωτεχνικές παραμέτρους (G , E , και ν), τα όρια Atterberg και το ποσοστό της περιεχόμενης αργίλου.

Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν από ανάμειξη άμμου και αργίλου και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 : Ποσοστό περιεχόμενης άμμου και αργίλου σε κάθε δοκίμιο

Δοκίμιο	Ποσοστό Αργίλου (%)	Ποσοστό Άμμου (%)
E2	30	70
E3	50	50
E6	60	40
E4	70	30
E5	90	10

5.1 Γεωτεχνική ταξινόμηση εδαφικού υλικού

Για την γεωτεχνική ταξινόμηση του υλικού, έγινε αρχικά κοκκομετρική διαβάθμισή και ο προσδιορισμός των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας. Έπειτα, βάσει των αποτελεσμάτων αυτών των εργαστηριακών δοκιμών πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση του εξεταζόμενου υλικού, σύμφωνα με το Ενοποιημένο Σύστημα (USCS).

5.1.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση έγινε με:

- 1) Την μηχανική μέθοδο (κοσκίνιση), για κλάσμα με διάμετρο κόκκων > 0.075 mm.
- 2) Την υδρομετρική μέθοδο (αραιομέτρηση – καθίζηση σε υγρό περιβάλλον) για κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο No. 200 (< 0.0075 mm) και μέχρι διαμέτρου 0.001 mm περίπου.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση έγινε με την τεχνική της υγρής κοσκίνισης. Η διαδικασία είναι ίδια με αυτήν της κοσκίνισης εν ξηρώ, με μόνη διαφορά ότι γίνεται σε υγρό περιβάλλον.

Πιο αναλυτικά λαμβάνεται ποσότητα αντιπροσωπευτικού δείγματος ξηρού εδάφους, σύμφωνα με τις προδιαγραφές E105-86. Το δείγμα ζυγίζεται και διέρχεται από μια σειρά κοσκίνων που είναι διαβαθμισμένα από τα μεγαλύτερα προς τα μικρότερα μεγέθη. Τελευταίο τοποθετείται πάντα το κόσκινο No. 200 και κάτω από αυτό ο συλλέκτης του κλάσματος που διέρχεται από αυτό.

Καθώς τα εδαφικά δείγματα διέρχονται από τα κόσκινα, διαβρέχονται και δονούνται για προκειμένου να διαχωριστεί το χονδρόκοκκο από το λεπτόκοκκο κλάσμα. Στη συνέχεια ξηραίνονται και ζυγίζεται το κλάσμα που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο.

Το άθροισμα των επιμέρους κλασμάτων συγκρίνεται με το αρχικό βάρος του δείγματος που κοσκινίστηκε, προκειμένου να εξακριβωθεί αν υπήρξε απώλεια υλικού κατά την διάρκεια της διαδικασίας.

Για την κοκκομετρική διαβάθμιση του λεπτόκοκκου κλάσματος, χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα (περίπου 40 g) ξηρού εδαφικού δείγματος, που διέρχεται από το κόσκινο No. 200, όπως ορίζεται από τις προδιαγραφές ASTM D422. Η ποσότητα αυτή αναμιγνύεται με 125 ml διαλύματος αντικροκιδωτικού υλικού 5% κ.β. Το μείγμα ανακατεύεται καλά και αφήνεται τουλάχιστον 16 ώρες για εμποτισμό. Στη συνέχεια τοποθετείται σε ογκομετρικό κύλινδρο ο οποίος πληρούται με απιονισμένο νερό μέχρι τα 1000 ml. Η καθίζηση των εδαφικών κόκκων του πολφού

που προκύπτει, μετά από ανάδευση είναι πιθανό να διαρκέσει πολλές ώρες ή ακόμα και ημέρες. Με την έναρξη της καθίζησης των εδαφικών κόκκων τοποθετείται το αραιόμετρο έτσι ώστε να επιπλέει στο "εν ηρεμία" διάλυμα.

Το ποσοστό w_d (%) των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται (σε δεδομένη χρονική στιγμή) εν αιωρήσει στο διάλυμα, υπολογίζεται από την Σχέση 5.1:

$$W_d = \frac{R \cdot 100}{w_d} \quad [5.1]$$

όπου w_d η μάζα (g) του ξηρού δείγματος που βρίσκεται στο διάλυμα.

Το μέγεθος των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται εν αιωρήσει, προσδιορίζεται με βάση την ταχύτητα καθίζησης των κόκκων όπως ορίζεται από τον Νόμο του Stokes:

$$u = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{1800 \cdot \eta} \quad [5.2]$$

Όπου,

d : η διάμετρος των εδαφικών κόκκων (mm),

ρ_s : η πυκνότητα των εδαφικών κόκκων (g/cm^3),

ρ_f : η πυκνότητα του υγρού μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η καθίζηση (g/cm^3) (επειδή πρόκειται για απιονισμένο νερό θεωρείται ίση με 1 g/cm^3), και

η : το ιξώδες του διαλύματος ($\text{poise} \approx \text{g} \cdot \text{s/cm}^2$) το οποίο προσδιορίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας

Στις αρχικές ενδείξεις (R_0) του αραιομέτρου θα πρέπει να γίνουν τρεις διορθώσεις:

- "διόρθωση μηνίσκου", C_M (g),
- "διόρθωση θερμοκρασίας", C_T (g), και
- "διόρθωση παράγοντα διασποράς", C_D (g)

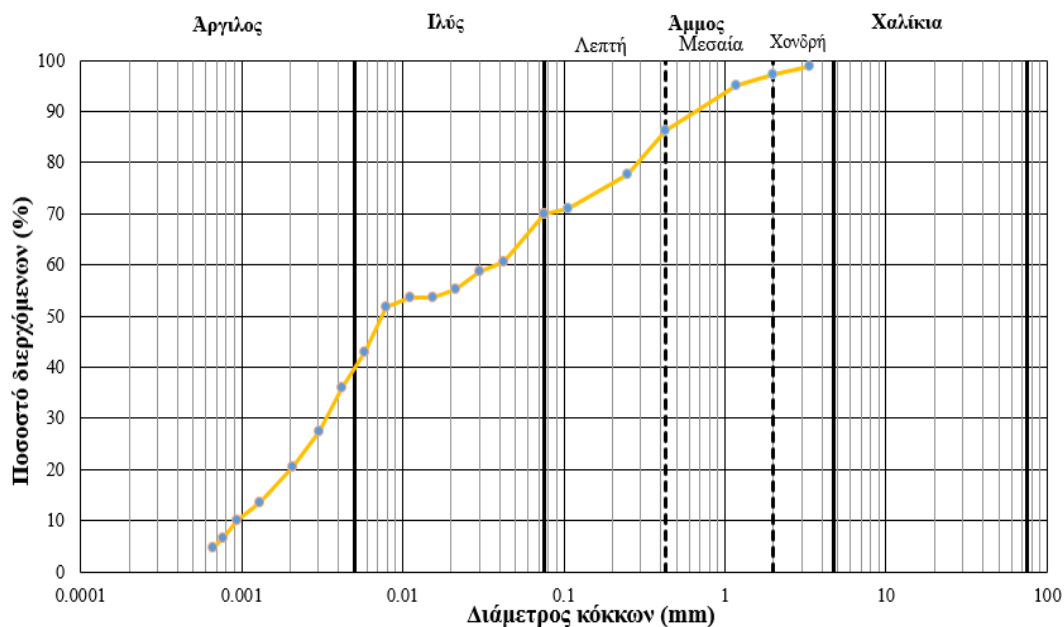
Με βάση τις παραπάνω διορθώσεις, η πραγματική ένδειξη του υδρομέτρου (R σε g) δίνεται από τη σχέση:

$$R = R_0 + C_M + C_T + C_D \rightarrow R = R_0 + 0.31 \cdot T - 11.77 \quad [5.2]$$

Τα ποσοστά των εν αιωρήσει κόκκων (w_d) που προκύπτουν από τις μετρήσεις του αραιομέτρου αντιστοιχούν στην μάζα εδάφους "διερχόμενου" από κόσκινο. Αυτά δε τα ποσοστά είναι αντιπροσωπευτικά για τη μάζα του δείγματος που έχει διέλθει από το κόσκινο No. 200.

Προκειμένου λοιπόν να αναχθούν σε ποσοστά (%) επί της συνολικής ποσότητας του εδαφικού δείγματος (w) θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν με το ποσοστό του δείγματος που διήλθε από το κόσκινο No. 200.

Με βάση τα παραπάνω, σχεδιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1 ενδεικτικά για το δοκίμιο E5.



Σχήμα 5.1: Κοκκομετρική καμπύλη του δοκιμίου

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης για κάθε δοκίμιο που εξετάστηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση δειγμάτων

ΔΟΚΙΜΙΟ	E2	E3	E6	E4	E5
Ποσοστό (%)					
Χαλίκια	2	3	4	4	6
Χονδρόκοκκη Άμμος	4	2	2	1	2
Μεσόκοκκη Άμμος	33	15	17	14	11
Λεπτόκοκκη Άμμος	34	28	27	22	16
Ιλύς	17	33	35	31	29
Άργιλος	10	19	16	28	36

5.1.2 Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας (LL)

Η διαδικασία προσδιορισμού του ορίου υδαρότητας που ακολουθήθηκε, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D4318-83, έχει ως εξής:

Λαμβάνεται δείγμα μάζας τουλάχιστον 200 g από εδαφικό δείγμα, που έχει αναμιχθεί καλά και διέρχεται από το κόσκινο ανοίγματος No. 40 (425 μm). Το υλικό τοποθετείται σε κάψα, προστίθεται μικρή ποσότητα νερού και αναμειγνύεται καλά με σπάτουλα, μέχρις ότου δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη, παχύρρευστη μάζα (πάστα). Το υλικό εφόσον έχει αναμειχθεί καλά μένει για 24 περίπου ώρες καλυμμένο σε δοχείο.

Το δείγμα τοποθετείται στο κύπελλο της συσκευής Casagrande, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα στρώμα με ομαλή επιφάνεια. Το μέγιστο πάχος του στρώματος πρέπει να είναι περίπου 1 cm.

Το εδαφικό δείγμα χωρίζεται σε δυο ίσα μέρη σύροντας το εργαλείο αυλάκωσης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κυπέλλου. Περιστρέφεται ο χειροκίνητος στρόφαλος της συσκευής με ρυθμό 2 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο και μετρώνται οι πτώσεις που απαιτούνται, έως ότου οι δυο πλευρές του δείγματος ενωθούν στην βάση της χαραγής και σε μήκος 12,7 mm.

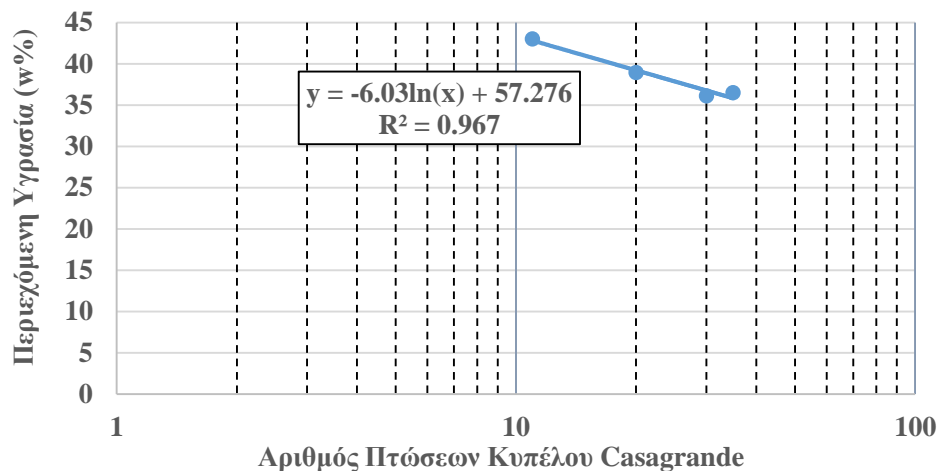
Εάν ο αριθμός των περιστροφών, που απαιτούνται, είναι μεταξύ 5 και 40, λαμβάνεται με τη σπάτουλα ποσότητα δείγματος από την περιοχή της επαφής (της κλειστής πλέον αύλακας). Η ποσότητα αυτή τοποθετείται σε γυάλινο υποδοχέα, μετά τις απαραίτητες ζυγίσεις, και στο ξηραντήριο για την εκτίμηση της υγρασίας.

Στη συνέχεια, μεταβάλλεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, είτε προσθέτοντας νερό στο ίδιο ή σε άλλο δείγμα, το οποίο παρασκευάζεται ανάλογα.

Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μέχρις ότου προσδιοριστεί ένας αριθμός τουλάχιστον τεσσάρων τιμών περιεκτικότητας σε νερό, για τις οποίες ο αριθμός των πτώσεων του κυπέλλου, που απαιτούνται για να κλείσει η αύλακα, είναι μεταξύ 5 και 40.

Μετά από 24 ώρες οι υποδοχείς αφαιρούνται από το ξηραντήριο και καταγράφονται οι ξηρές τους μάζες. Η απώλεια μάζας αναφέρεται σαν μάζα ύδατος (υγρασία).

Το όριο υδαρότητας (LL) κάθε δοκιμίου προσδιορίστηκε με βάση ημιλογαριθμικό διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα υπολογισμού ορίου υδαρότητας (LL%) (δείγμα E5).

Βάση του παραπάνω ημιλογαριθμικού διαγράμματος, τα όρια υδαρότητας (LL%) που αντιστοιχούν σε κάθε εδαφικό δοκίμιο προσδιορίστηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα προσδιορισμού ορίων υδαρότητας.

Εδαφικό Δοκίμιο	Όριο υδαρότητας LL (%)
E2	16
E3	19
E6	23
E4	29
E5	38

5.1.3 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας (PL)

Η διαδικασία, που ακολουθήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D4318-83, έχει ως εξής:

Ελήφθη μία ποσότητα περίπου 20 γραμμαρίων εδαφικού υλικού που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από το κόσκινο Νο. 40.

Το δείγμα τοποθετείται μέσα σε κάψα και προστίθεται νερό, ενώ αναμειγνύεται με τη σπάτουλα, ώστε να αποκτήσει πλαστικότητα.

Η μάζα κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και μιας ομαλής επιφάνειας με την απαιτούμενη πίεση, ώστε να σχηματισθεί μικρή ράβδος ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της, διαμέτρου περίπου 3 mm.

Εάν το έδαφος είναι πολύ ξηρό και δεν είναι δυνατή η διαμόρφωση μικρής ράβδου διαμέτρου 3 mm, το δείγμα αναπλάθεται προσθέτοντας περισσότερο νερό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Εάν το έδαφος διαμορφώνει ραβδίσκο με διάμετρο μικρότερη των 3 mm, αναπλάθεται σε βόλο και η διαδικασία κυλίνδρωσης επαναλαμβάνεται σε ομαλή επιφάνεια, που καλύπτεται με τραχείας υφής χαρτί.

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, προσεγγίζεται τελικά μια περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία ο ραβδίσκοι, κυλινδρούμενος προκειμένου να μειωθεί η διάμετρός του κάτω από 3 mm, θρυμματίζεται.

Τα θρύμματα τοποθετούνται σε υποδοχέα (δοχείο Petri) μετά τις απαραίτητες ζυγίσεις, στο ξηραντήριο για την εκτίμηση της υγρασίας.

Μετά από 24 ώρες οι υποδοχείς αφαιρούνται από το ξηραντήριο και καταγράφονται οι ξηρές τους μάζες. Η απώλεια μάζας αναφέρεται σαν μάζα ύδατος (υγρασία).

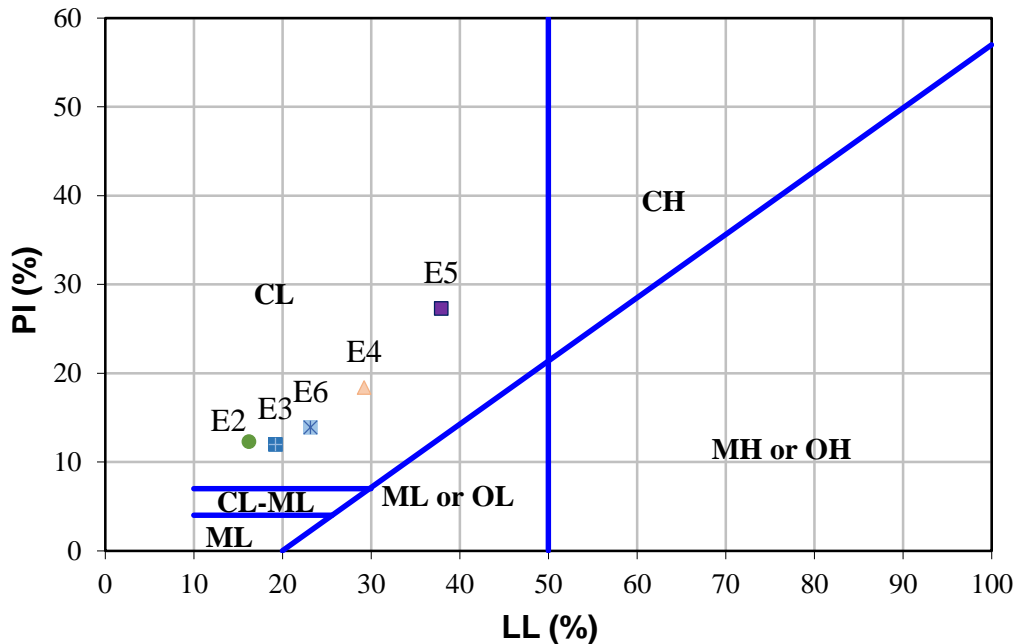
Τελικά, το όριο πλαστικότητας (PL) των προς μελέτη εδαφικών δοκιμίων υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των μετρήσεων του ποσοστού της υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%) όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα προσδιορισμού ορίων πλαστικότητας.

Εδαφικό Δοκίμιο	Όριο πλαστικότητας PL (%)
E2	4
E3	7
E6	9
E4	11
E5	11

5.1.4 Ταξινόμηση Εδαφικού δείγματος

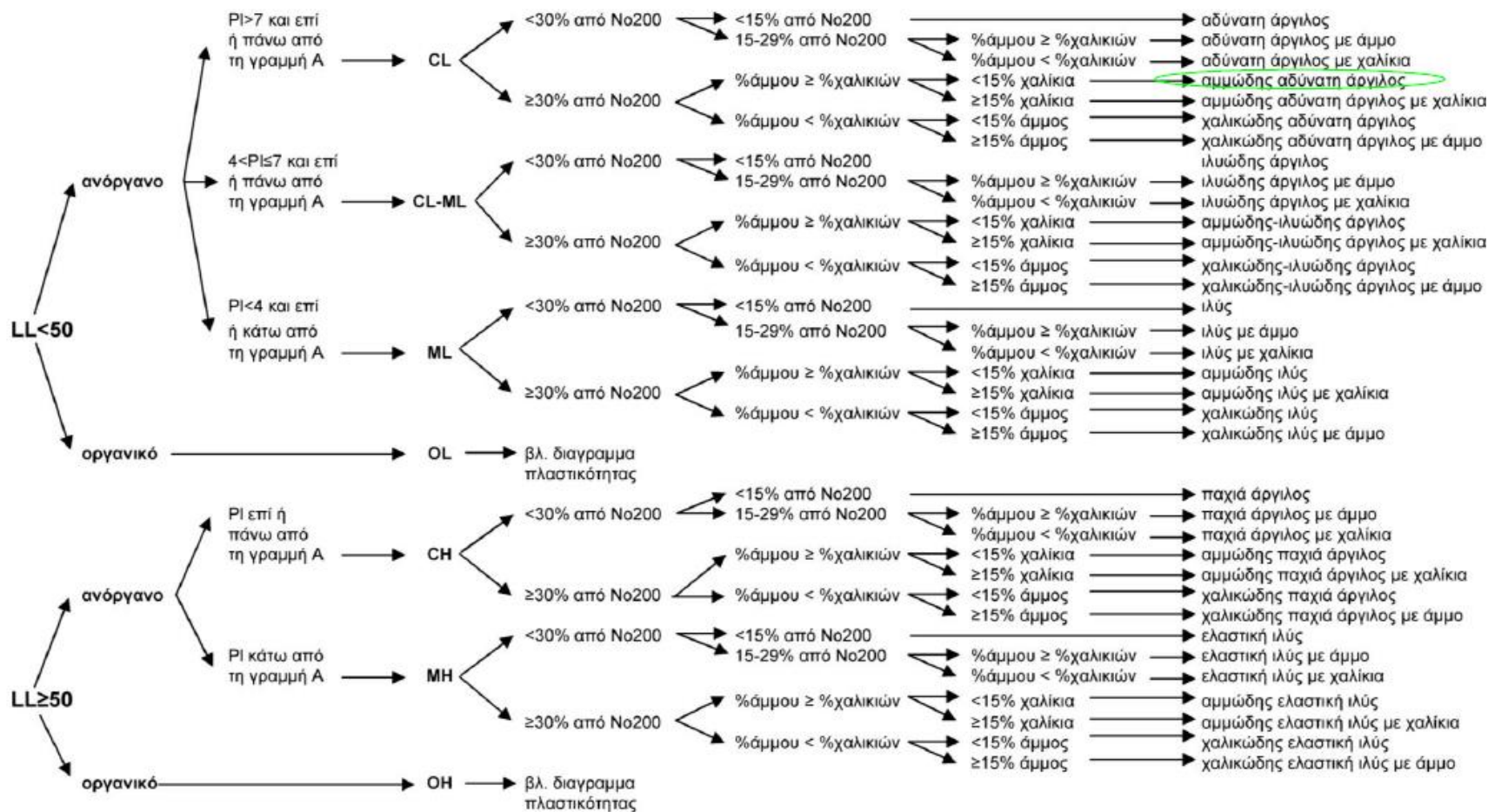
Η ταξινόμηση του εξεταζόμενου εδαφικού δείγματος έγινε αρχικά για το λεπτόκκοκο κλάσμα του δείγματος από το «Διάγραμμα Πλαστικότητας Casagrande» (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Θέση των εξεταζόμενων εδαφικών δοκιμίων στο διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande

Από την προβολή των εδαφικών δοκιμίων στο «Διάγραμμα Πλαστικότητας Casagrande» τα εδαφικά δοκίμια ταξινομούνται και χαρακτηρίζονται βάσει της πλαστικότητας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3 ως «CL».

Τέλος, βάσει των αποτελεσμάτων και σύμφωνα με το «Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης» (βλέπε Σχήμα 5.4), όπου ενδεικτικά έχει σημειωθεί ο χαρακτηρισμός για το δοκίμιο E3, τα εξεταζόμενα εδαφικά δοκίμια ταξινομούνται όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.5.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ροής του Ενοποιημένου Συστήματος Ταξινόμησης (USCS) για λεπτόκοκκο έδαφος (≥ 50% διέρχεται από το κόσκινο No. 200)

Πίνακας 5.5: Ταξινόμηση εδαφικών δοκιμίων βάση του USCS

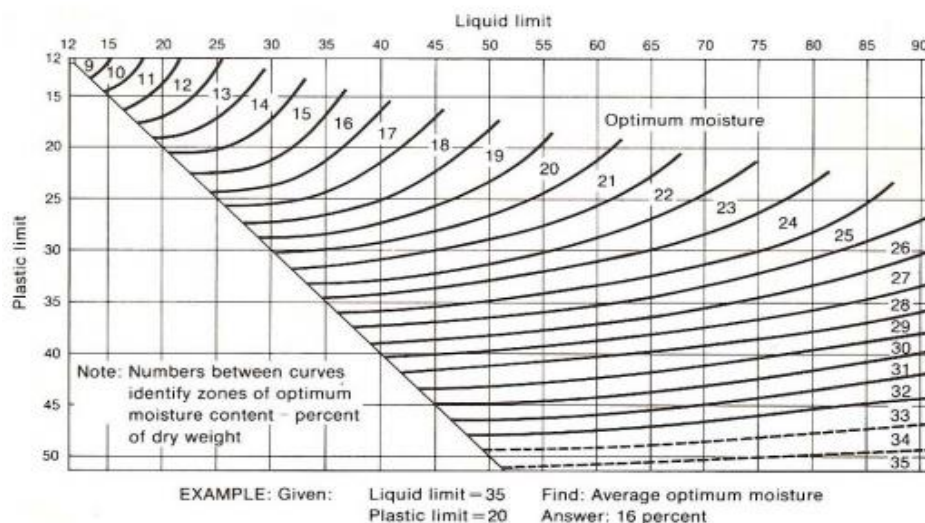
Εδαφικό Δοκίμιο	Χαρακτηρισμός
E2	Αδύνατη άργιλος με άμμο
E3	Αμμώδης αδύνατη άργιλος
E6	Αμμώδης αδύνατη άργιλος
E4	Αδύνατη άργιλος με άμμο
E5	Αδύνατη άργιλος με άμμο

5.2 Παρασκευή εδαφικών δοκιμίων

Ύστερα από την ταξινόμηση των εδαφικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε η συμπίκνωση κάθε δοκιμίου με την μέθοδο mini Proctor.

Κατά την διαδικασία της συμπίκνωσης, λήφθηκε αρχικά επαρκής ποσότητα αντιπροσωπευτικού δείγματος (περίπου 700 γραμμάρια) διερχόμενο από το κόσκινο Νο.40. Το χονδρόκοκκο υλικό που συγκρατήθηκε απορρίφθηκε.

Στη συνέχεια προστέθηκε επαρκής ποσότητα νερού έτσι ώστε το προς συμπίκνωση υλικό να αποκτήσει υγρασία περίπου όσο η βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης (OMC) από το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας (OMC) ενός εδάφους χρησιμοποιώντας την πρότυπη δοκιμή συμπίκνωσης. (Στειακάκης, 2012 από Bowels, 1986)

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι τιμές της βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 5.6: Βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης (OMC) κάθε εδαφικού δοκιμίου

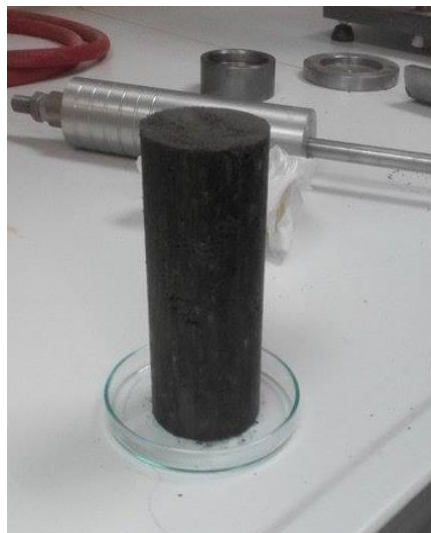
Εδαφικό Δοκίμιο	OMC (%)
E2	10
E3	11
E6	14
E4	14
E5	17

Το υλικό αναμειγνυόταν καλά με το νερό και έμενε για 24 ώρες τουλάχιστον σε κλειστό δοχείο για εμποτισμό.

Κατά την συμπίκνωση, εντός επιλεγμένης μήτρας τοποθετούνται ίσες στρώσεις υλικού ενώ κάθε στρώση συμπυκνώνονταν με 30 κατανεμημένες πτώσεις του εμβόλου της συσκευής mini Proctor.

Τα εδαφικά δοκίμια ήταν διαμέτρου περίπου 50 mm το καθένα και ύψους από 100 mm έως 120 mm (ύψους προς διάμετρο 2.5).

Η επιλογή των παραπάνω γεωμετρικών χαρακτηριστικών καθορίστηκε από το μέγεθος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.



Φωτογραφία 5.1: Ένα εκ των πέντε εδαφικών δοκιμίων αργίλου και άμμου που κατασκευάστηκε στην παρούσα εργασία

Τέλος τα εδαφικά δοκίμια τοποθετήθηκαν στην τριαξονική κυψέλη προκειμένου να ακολουθήσει η διαδικασία της στερεοποίησης.

Μετά την ολοκλήρωση της πρωτεύουσας στερεοποίησης διάρκειας πέντε ημερών τα εδαφικά δοκίμια εξακολούθησαν να υποβάλλονται σε φόρτιση ενεργής τάσης 230 kPa για ακόμη τρεις μέρες ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των ταχυτήτων διάδοσης των εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων υπό λογαριθμική κλίμακα.

Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμίων καθώς και κάποιες φυσικές παράμετροι που εκτιμήθηκαν κατά την παρασκευή των δοκιμίων (λόγος κενών, πυκνότητα κ.α.).

Πίνακας 5.7: Παράμετροι δοκιμίων

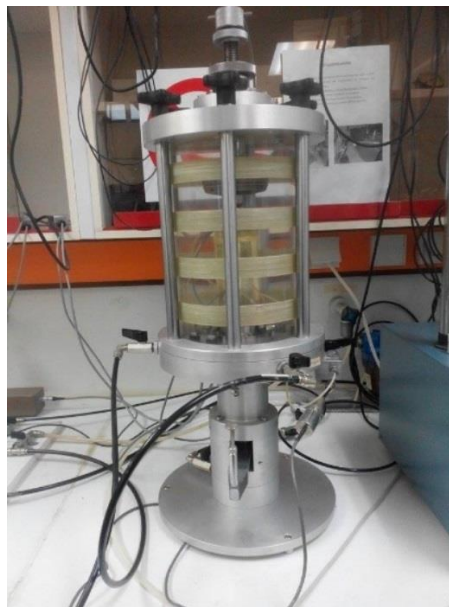
ΔΟΚΙΜΙΟ	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Πυκνότητα (g/cm³)	Περιεχόμενη Υγρασία (%)	Ειδικό βάρος κόκκων (Gs)	Λόγος κενών	Βαθμός Κορεσμού (%)
E2	105	50	2.2	10.7	2.69	0.355	28.7
E3	114	50	2.2	9.8	2.69	0.342	26.2
E6	100	50	2.2	14.5	2.68	0.424	28.9
E4	116	50	2.0	11.0	2.68	0.452	29.4
E5	121	50	2.2	19.5	2.67	0.408	38.9

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

6.1 Διάταξη και τεχνική των μετρήσεων

Κατά τον προσδιορισμό των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων (V_s) και διαμήκων (V_p) κυμάτων με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε σταθερές συνθήκες φόρτισης. Το δοκίμιο που τοποθετείται στην τριαξονική συσκευή όπως φαίνεται στη Φωτογραφία 6.1 υποβάλλεται στις επιθυμητές συνθήκες πίεσης, μέσω συστήματος ελεγκτών πίεσης.

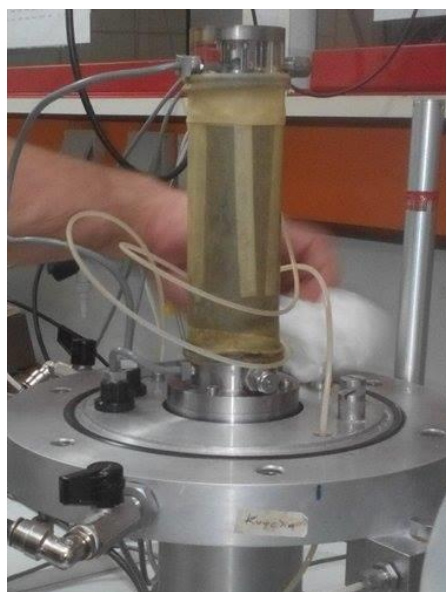
Ο χειρισμός και ο έλεγχος των συσκευών γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή που συνδέεται με διατάξεις αισθητήρων, οι οποίοι δίνουν πληροφορίες για την εφαρμοζόμενη δύναμη, την πίεση, και άλλες παραμέτρους.



Φωτογραφία 6.1: Εδαφικό δοκίμιο μέσα στην τριαξονική κυψέλη

Η συμπίεση του δείγματος γίνεται με την βοήθεια νερού που διοχετεύεται από υδραυλικό σύστημα μέσα στην κυψέλη.

Το σχήμα του δοκιμίου είναι κυλινδρικό και μέσω μεμβράνης (Φωτογραφία 6.2), στεγανοποιείται από τον υπόλοιπο θάλαμο που κατακλύζεται από νερό.



Φωτογραφία 6.2: Εδαφικό δοκίμιο μέσα στη μεμβράνη πριν την δοκιμή

Στο άνω άκρο του δοκιμίου τοποθετείται ο πομπός, στο κάτω άκρο ο δέκτης ώστε το εγκάρσιο κύμα να διαδίδεται κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου.

Έπειτα από την απαραίτητη προετοιμασία, το εδαφικό δοκίμιο τοποθετείται ανάμεσα στα δύο πιεζοηλεκτρικά αισθητήρια, τα άκρα των οποίων συνδέονται με τα συστήματα παραγωγής και καταγραφής των σημάτων διέγερσης.

Συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό σήμα που διεγείρει τον πομπό και δημιουργεί το εγκάρσιο κύμα παράγεται από μια γεννήτρια συχνοτήτων, το σήμα αυτό καταγράφεται στο ένα κανάλι της, ενώ στο δεύτερο κανάλι καταγράφεται το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης στο κάτω μέρος του δείγματος (βλέπε Κεφ.3, Σχήμα 3.6)

Η γεννήτρια στέλνει το σήμα διέγερσης, το οποίο συνήθως είναι ένας παλμός. Ο πομπός παράγει το εγκάρσιο κύμα, το οποίο διαδίδεται κατά μήκος του εδαφικού δοκιμίου και έπειτα από χρόνο t φτάνει στον δέκτη. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγει ο δέκτης καθώς διεγείρεται από το εγκάρσιο κύμα καταγράφεται και παρουσιάζεται στην οθόνη του υπολογιστή.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής εμφανίζεται στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή ο χρόνος που χρειάστηκε για να διαδοθεί το εγκάρσιο κύμα (μέσω κυματομορφών). Για δεδομένο μήκος L_0

του δοκιμίου υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης V_s του εγκάρσιου κύματος στο εδαφικό δείγμα από την Σχέση 6.1.

$$V_s = \frac{L_0}{t} \quad [6.1]$$

6.2 Εκτέλεση μετρήσεων

Χρησιμοποιώντας τη «διάταξη δοκιμής», ο χρήστης μπορεί να εισάγει όλες τις παραμέτρους της δοκιμής.

- Ύψος Δείγματος (σε mm)
- Συχνότητα δειγματοληψίας (σε χιλιάδες δείγματα ανά δευτερόλεπτο ή kHz)
- Χρόνος δειγματοληψίας (σε ms)
- Κυματομορφή (ημιτονοειδής, τετραγωνική)
- Περίοδο $T = 1/f$ (σε ms)
- Ενεργοποίηση καταγραφής (Trigger) – (χειροκίνητη, αυτόματη, με καθυστέρηση δευτερόλεπτα μεταξύ λήψεων)

Η οθόνη εκτέλεσης της δοκιμής εμφανίζει γραφικά τα αποτελέσματα και επιτρέπει στο χρήστη να δει τη κυματομορφή της πηγής και την καταγραφή στον δέκτη, στο ίδιο διάγραμμα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει γραφικά το σημείο στο οποίο το κύμα ξεκίνησε από την πηγή και το σημείο στο οποίο το κύμα έφτασε στο δέκτη.

Η επιλογή των χρόνων άφιξης του κύματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση της ταχύτητας, οπότε κρίνεται απαραίτητο να μπορεί ο χρήστης να προσδιορίσει το φαινόμενο του κοντινού πεδίου (Near Field Effect) και τυχόν παρεμβολές κατά την μέτρηση.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι μετρήσεις όπως αυτές πραγματοποιήθηκαν με την χρήση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, χρησιμοποιώντας τεχνικές τόσο στο πεδίο του χρόνου (point to point = 1st arrival, peak to peak και θεωρήματος της συσχέτισης) όσο και στο πεδίο της συχνότητας (Frequency).

Το λογισμικό GDS BES δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει το μήκος κύματος (λ) καθώς υπολογίζεται και ο λόγος L_0/λ (όπου L_0 το μήκος του δοκιμίου) ο οποίος πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 3,33 διότι κάτω από αυτή την τιμή υπάρχει επίδραση του κοντινού πεδίου (NFE) (Sanchez-Saliner, 1986 από Uma Maheswari, 2010).

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά για το δοκίμιο E5 οι τιμές των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων (V_S) και διαμήκων (V_P) κυμάτων όπως αυτές υπολογίστηκαν. Επίσης δίδεται ο συντελεστής συσχετισμού (R^2) της περιοχής του σήματος που προσαρμόζεται γραμμικά. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα καταγραφής των χρόνων διάδοσης των κυμάτων με τις τέσσερις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα. Τέλος το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), ο λόγος Poisson (ν) και το μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{\max}) υπολογίστηκαν με τις παρακάτω σχέσεις.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του Young (E) χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$E = 2 \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \nu) \quad [6.2]$$

όπου, ρ η πυκνότητα, V_S η ταχύτητα των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων, και ν ο λόγος Poisson.

Για τον υπολογισμό του λόγου Poisson (ν) χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$\nu = \frac{0.5 \cdot \left[\left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1 \right]}{\left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1} \quad [6.3]$$

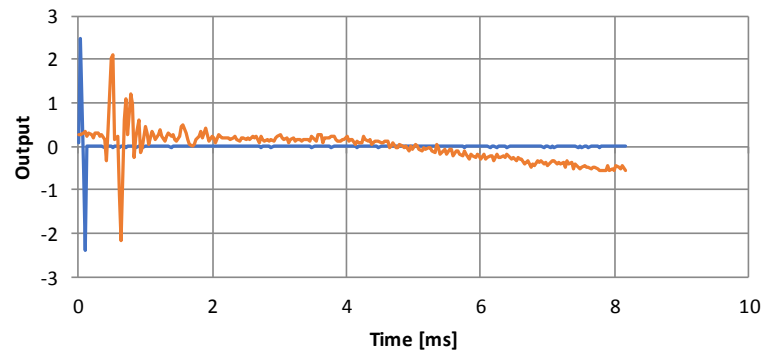
όπου, V_P η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων.

Για τον υπολογισμό του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{\max}) χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

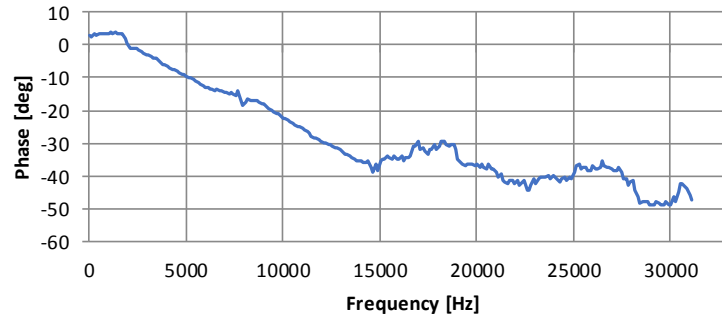
$$G = \rho \cdot V_S^2 \quad [6.4]$$

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα μετρήσεων ταχυτήτων διάδοσης κυμάτων με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων ενδεικτικά για το δοκίμιο E5

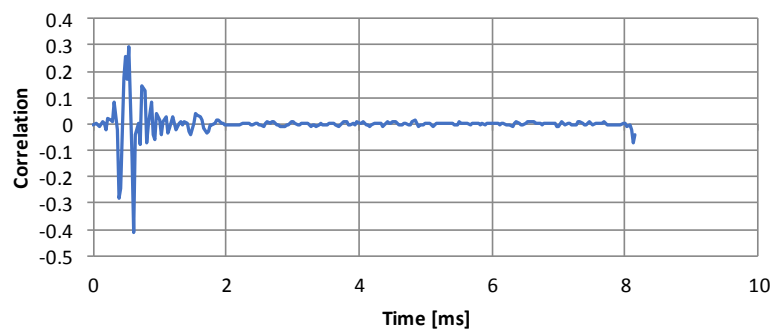
Τεχνική	Χρόνος διάδοσης κύματος (ms)	Ταχύτητα Vs (m/s)	Ταχύτητα Vp (m/s)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G_{max} (MPa)
1st arrival	0.448	270	1484	0.483	46.7	15.7
peak to peak	0.467	259		0.484	43.0	14.5
cross - correlation	0.543	223		0.488	32.0	10.7
Frequency	0.553	219		0.489	30.8	10.4



Σήμα εισόδου και εξόδου πομπού και δέκτη



Εκτίμηση χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο των συχνοτήτων (μετασχηματισμός Fourier)



Εκτίμηση του χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο cross – correlation

6.3 Εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων μέσω εμπειρικών σχέσεων

Οι Patel και Singh (2009) στην προσπάθειά τους να διερευνήσουν την συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) και των εδαφικών παραμέτρων δημιούργησαν ένα μοντέλο υπολογισμού της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s).

Στο μοντέλο αυτό λήφθηκαν ως παράμετροι ο δείκτης πλαστικότητας PI , ο λόγος κενών (e), το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού (F_c) και η περιεχόμενη υγρασία (w) όπως φαίνεται και στη Σχέση 6.5.

$$V_s = 140PI^{-0.4} + A \cdot F(e) \quad [6.5]$$

Όπου

$$F(e) = (3 - e)^2 / (1 + e) \quad [6.6]$$

$$A = 0.2 \cdot F_c + 0.4 \cdot PI - 0.3 \cdot w \quad [6.7]$$

Πίνακας 6.2: Αποκλίσεις ταχυτήτων διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων μεταξύ μετρούμενων με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και υπολογιζόμενων από το μοντέλο των Patel & Singh, 2009.

Δοκίμιο	Μετρήσεις από Bender		Μετρούμενες παράμετροι				Patel & Singh, 2009	Αποκλίσεις (%)
	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Λόγος κενών (e)	w (%)	PI (%)	F_c (%)	V_s (m/s)	
E2	350	1654.8	0.355	10.7	12.3	29.11	324	7.5
E3	360	1624.3	0.342	9.8	12	53.64	327	9.1
E4	294	1541.3	0.452	11	18.4	62.81	276	6.2
E5	270	1484.2	0.408	19.5	27.3	69.86	236	12.7
E6	320	1589	0.424	14.5	14	56.43	307	3.9

Τα αποτελέσματα της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων όπως αυτές μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία με χρήση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, προσαρμόστηκαν στο μοντέλο των Patel και Singh (2009) δίνοντας σχετικά μικρές αποκλίσεις.

Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται οφείλονται σε τυχόν σφάλματα τα οποία εμπεριέχονται σε υπολογισμούς των παραμέτρων κατά την εργαστηριακή μελέτη (π.χ προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας) ή προέκυψαν κατά την διαδικασία. Ωστόσο όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.2 οι αποκλίσεις βρίσκονται σε ένα εύρος αξιοπιστίας συμπεραίνοντας πως οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας εξυπηρετούν το μοντέλο των Patel και Singh (2009).

7. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ

Οι ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων (V_s) και (V_p) αντίστοιχα είναι κρίσιμες παράμετροι για τον χαρακτηρισμό των εδαφικών σχηματισμών και των γεωτεχνικών ιδιοτήτων τους. Εργαστηριακές έρευνες, έχουν δείξει πως η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) είναι ευαίσθητη στις μεταβολές της λιθολογίας και των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους συγκριτικά με την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (V_p) η οποία χαρακτηρίζεται από ένα μικρό εύρος τιμών.

Κατά γενική ομολογία, η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του εδαφικού σχηματισμού σε άργιλο, από την πυκνότητα των εδαφικών υλικών, το πορώδες, την περιεχόμενη υγρασία καθώς και από τον λόγο κενών.

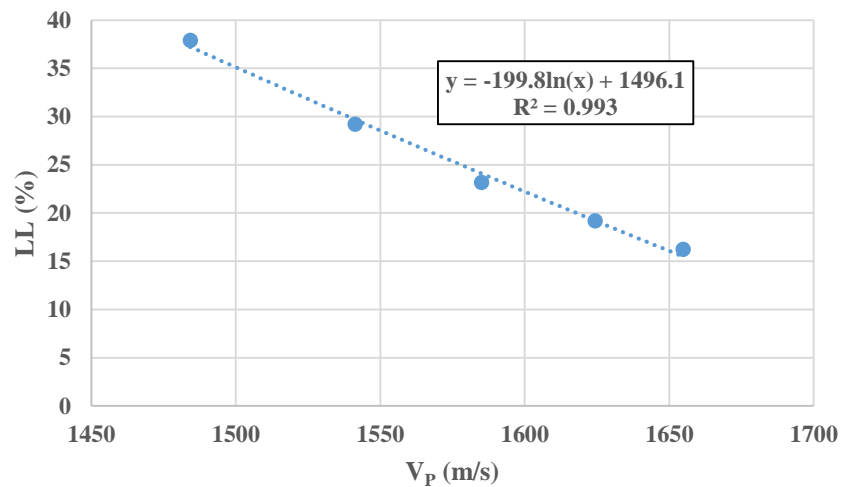
Η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (V_p) από την άλλη επηρεάζεται κυρίως από την περιεχόμενη υγρασία του εδάφους. Σύμφωνα με τον Woods (1991), η διάδοση των διαμήκων κυμάτων εξαρτάται κυρίως από το πορώδες του σχηματισμού και τον βαθμό κορεσμού, έτσι με την αύξηση της υγρής πυκνότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς αυξάνεται και η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων ενώ με την μείωση του πορώδους παρατηρείται και ανάλογη μείωση της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (V_p) (Ayres and Theilen 1999).

7.1 Σχέση μεταξύ Ορίων Atterberg και ταχύτητας εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων

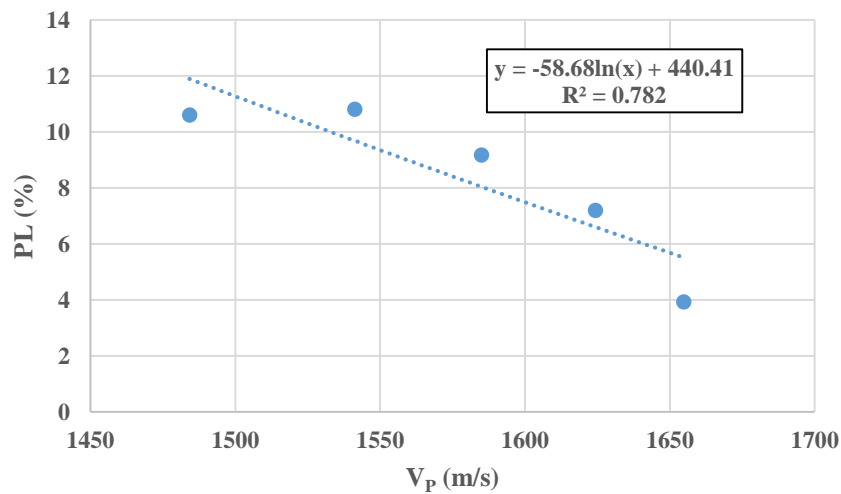
Οι Fener και Kahraman (2005) μελέτησαν εργαστηριακά την ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων (V_p) σε αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα διαφόρων τύπων στη προσπάθειά τους να ερμηνεύσουν την συσχέτιση που προκύπτει ανάμεσα στην ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων και του ορίου πλαστικότητας (PL), του ορίου υδαρότητας (LL) και του δείκτη πλαστικότητας (PI). Σκοπός της μελέτης των παραπάνω ερευνητών ήταν πέραν των συσχετίσεων που προκύπτουν, να διεξάγουν μία ταχεία μέθοδο εκτίμησης των ορίων Atterberg μέσω των ενδείξεων της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των Fener και Kahraman (2005), έδειξαν για κάθε τύπο εδαφικού δείγματος που εξετάστηκε τα όρια υδαρότητας (LL), πλαστικότητας (PL) και τον δείκτη πλαστικότητας (PI) να μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων ακολουθώντας λογαριθμική συσχέτιση.

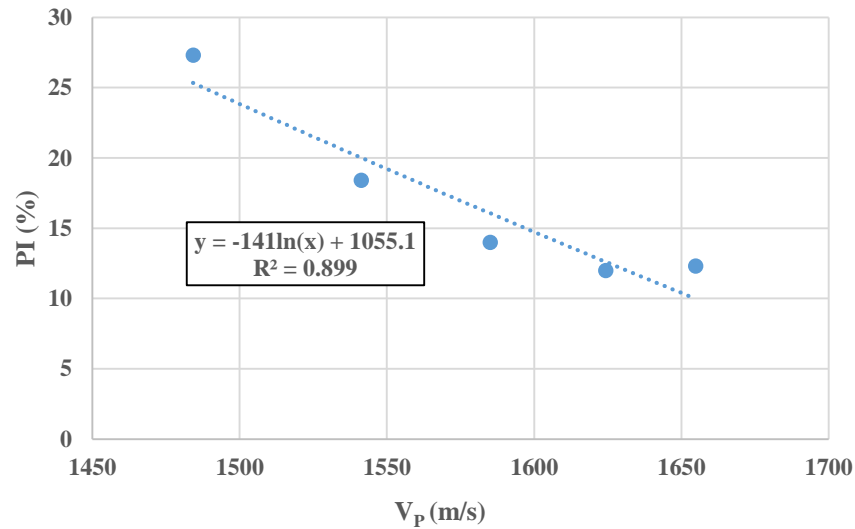
Στην παρούσα εργασία όπως φαίνεται παρακάτω επαληθεύεται το συμπέρασμα των ερευνητών. Με την μείωση των τιμών του ορίου υδαρότητας (LL), πλαστικότητας (PL) και του δείκτη πλαστικότητας (PI) η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων (V_P) αυξάνεται για όλα τα εδαφικά δοκίμια που εξετάστηκαν.



Σχήμα 7.1: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης διαμηκών κυμάτων συναρτήσει του ορίου υδαρότητας

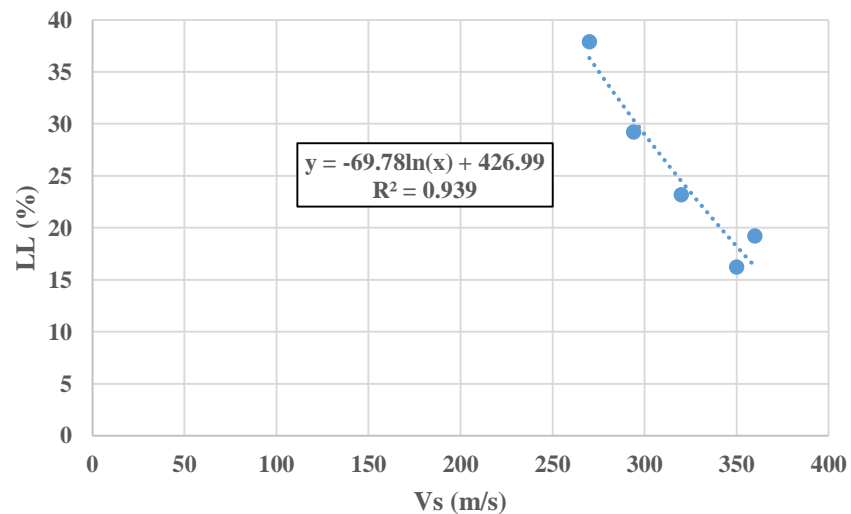


Σχήμα 7.2: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης διαμηκών κυμάτων συναρτήσει του ορίου πλαστικότητας

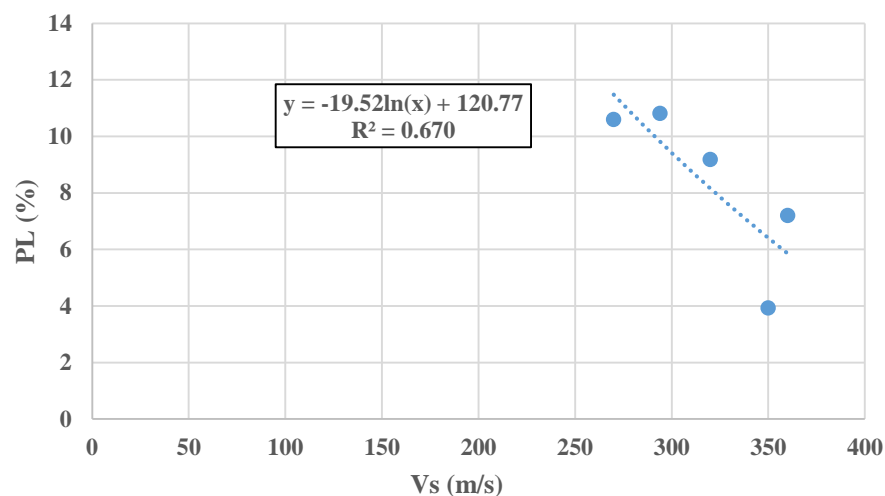


Σχήμα 7.3: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης διαμηκών κυμάτων συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας

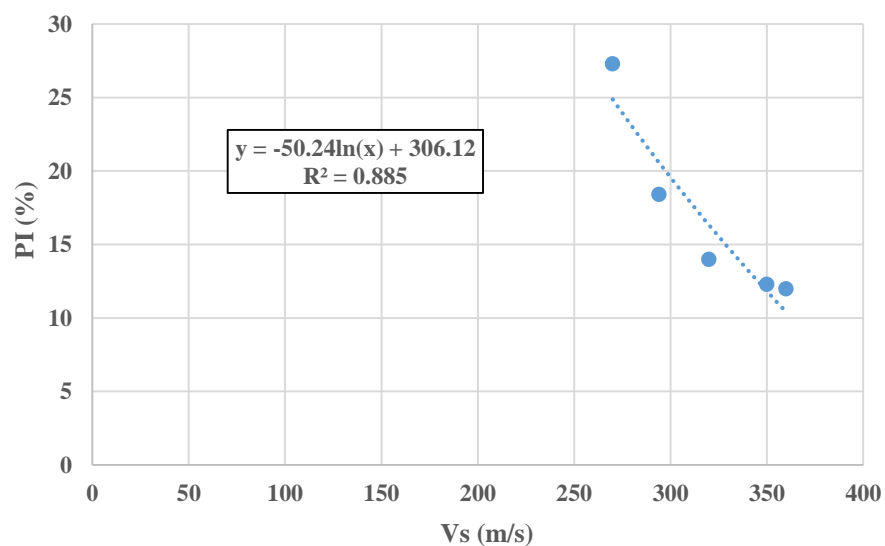
Από το Σχήμα 7.3, προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο δείκτης πλαστικότητας μειώνεται, η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων αυξάνεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα που εκτιμήθηκαν στην παρούσα εργασία εφαρμόζουν στο μοντέλο των Fener και Kahraman (2005) και αποδίδουν συγκρίσιμα αποτελέσματα.



Σχήμα 7.4: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων συναρτήσει του ορίου υδαρότητας



Σχήμα 7.5: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων συναρτήσει του ορίου πλαστικότητας



Σχήμα 7.6: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας

Όπως και στο διάγραμμα μεταξύ του δείκτη πλαστικότητας και της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων, τόσο και στο διάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.6, η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων αυξάνεται όσο μειώνεται ο δείκτης πλαστικότητας.

7.2 Σχέση μεταξύ ταχύτητας διάδοσης κυμάτων και περιεχόμενου ποσοστού αργίλου των εδαφικών δοκιμίων

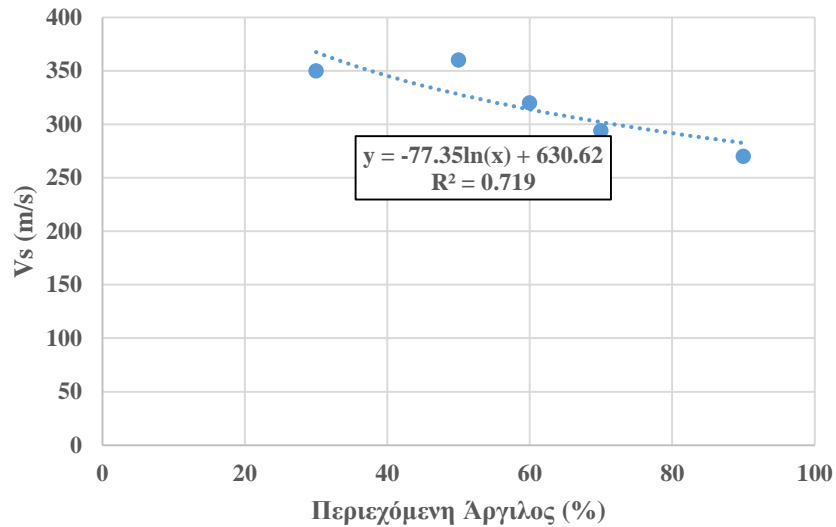
Οι Kuster και Toksoz (1974) επιχείρησαν να μελετήσουν τις επιπτώσεις της περιεχόμενης αργίλου στις ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων στους εδαφικούς σχηματισμούς δημιουργώντας ένα πλήθος εδαφικών δοκιμίων με διάφορες περιεκτικότητες σε άργιλο στο κάθε ένα.

Παρατήρησαν πως με την παρουσία αργίλου στα εδαφικά δοκίμια οι ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων (V_s) και (V_p) μειώνονται σημαντικά σε σχέση με τα «καθαρά» εδαφικά δοκίμια (δηλαδή τα δοκίμια που δεν περιείχαν ποσότητα αργίλου στη μάζα τους).

Παρά το γεγονός ότι οι εργαστηριακές έρευνες περιορίζονται κάθε φορά σε μερικά μόνο δείγματα, παρατηρείται συνολικά ευδιάκριτη μείωση των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων στα εδάφη με την αύξηση του ποσοστού της αργίλου αλλά και σε σχέση με το πορώδες του εδαφικού δείγματος ανεξάρτητα από την πίεση.

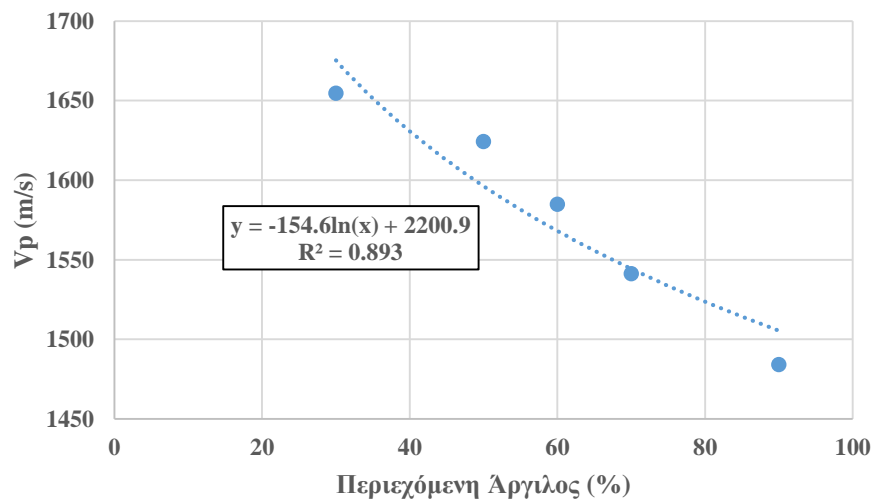
Η επίδραση της αργίλου στις ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων αποδίδεται στο ότι η άργιλος, η οποία αποτελείται συνήθως από λεπτομερείς κόκκους οι οποίοι πληρώνουν τα κενά των εδαφικών σχηματισμών με αντίκτυπο στις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων (De-hua Han & Nur 1986).

Σύμφωνα με τις μετρήσεις των ταχυτήτων διάδοσης των εγκαρσίων (V_s) και διαμηκών (V_p) κυμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, παρατηρήθηκε μείωση των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων με την αύξηση του ποσοστού της περιεχόμενης αργίλου στα εδαφικά δοκίμια που εξετάστηκαν.



Σχήμα 7.7: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων συναρτήσει του ποσοστού της αργίλου

Από το διάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.7 συμπεραίνεται ότι όσο το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα η επίδραση του ποσοστού της αργίλου στην ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων παρατηρείται εντονότερα στα εδαφικά δοκίμια των οποίων το αργιλικό κλάσμα καταλαμβάνει ποσοστό περισσότερο από το 50%.



Σχήμα 7.8: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων συναρτήσει του ποσοστού της αργίλου

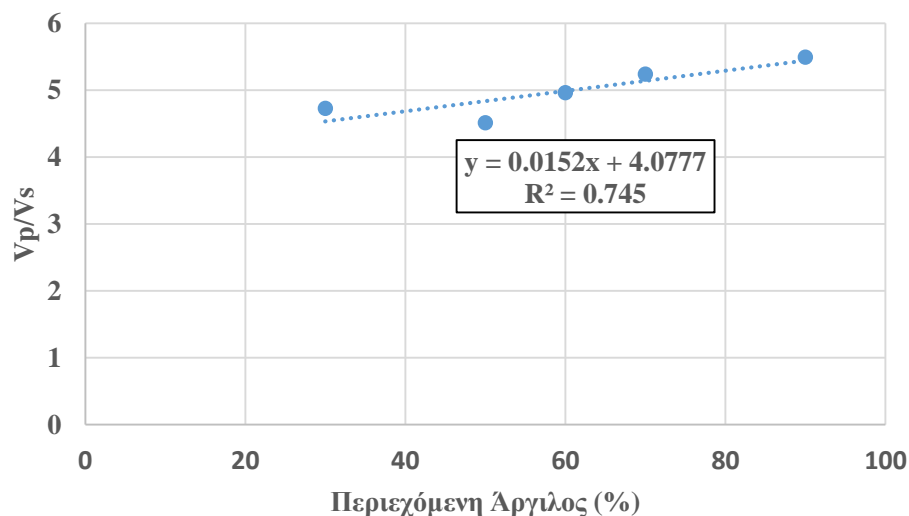
Στο Σχήμα 7.8 παρατηρείται μείωση της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων όσο το ποσοστό της περιεχόμενης αργίλου αυξάνεται. Όπως ήταν αναμενόμενο να συμβεί τόσο η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων όσο και των διαμήκων κυμάτων μειώνονται με την αύξηση του αργιλικού κλάσματος. Η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων φαίνεται να επηρεάζεται λιγότερο σε σχέση με την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων.

7.2.1 Επίδραση της περιεχόμενης αργίλου στον λόγο V_P/V_S

Ο λόγος V_P/V_S είναι μία χρήσιμη παράμετρος για την ερμηνεία των εδαφικών ιδιοτήτων. Σχετίζεται άμεσα με την λιθολογία, το πορώδες καθώς και με την περιεχόμενη υγρασία του εδάφους.

Η τιμή του λόγου V_P/V_S εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο (ή αργιλικά ορυκτά) καθώς όσο η περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η τιμή του λόγου. Το περιεχόμενο ποσοστό της αργίλου στο έδαφος επιδρά ισχυρότερα στην ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_S) ενώ λιγότερο στην ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (V_P) (De-hua Han & Nur 1986).

Στο Σχήμα 7.9 παρακάτω φαίνεται η αύξηση του λόγου συναρτήσει με την αύξηση του ποσοστού της αργίλου των προς μελέτη εδαφικών δοκιμίων.



Σχήμα 6.9: Μεταβολή του λόγου V_P/V_S συναρτήσει του ποσοστού της περιεχόμενης αργίλου

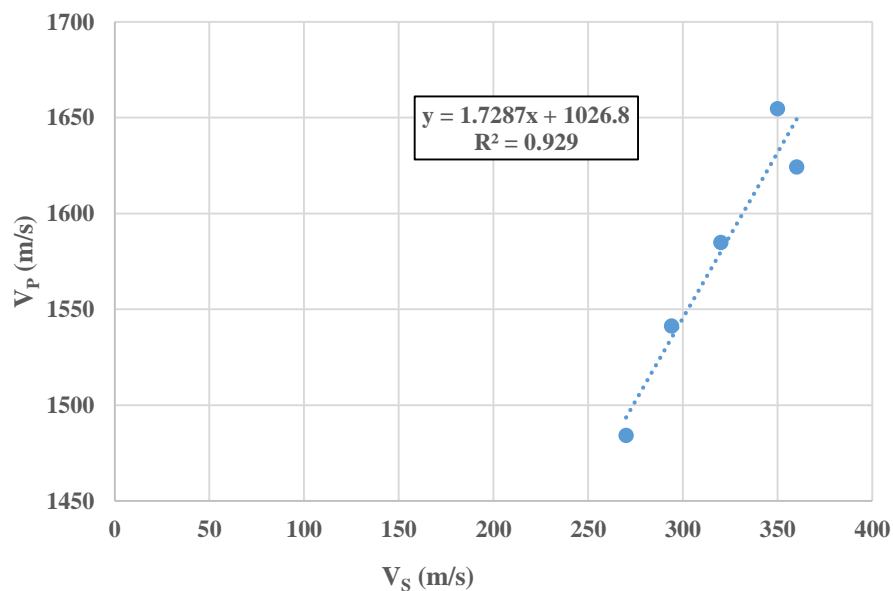
7.3 Σχέση μεταξύ ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων

Οι Kassab και Weller (2014) επιχείρησαν να μελετήσουν τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_S) και της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων (V_P), εξετάζοντας ένα πλήθος κορεσμένων και μη εδαφικών δειγμάτων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν πως η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_S) συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων (V_P).

Πιο συγκεκριμένα τόσο στα ξηρά όσο και στα δείγματα με περισσότερη περιεχόμενη υγρασία, λόγω της ισχυρής γραμμικής συσχέτισης που προκύπτει μεταξύ των δύο ταχυτήτων είναι δυνατό να προσεγγιστεί η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_S) βάση των ενδείξεων της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων (V_P) (Kassab and Weller, 2014)

Σύμφωνα με τις τιμές των ταχυτήτων των διατμητικών και διαμηκών κυμάτων που ελήφθησαν με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στην παρούσα εργασία, παρατηρείται μία ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.10.

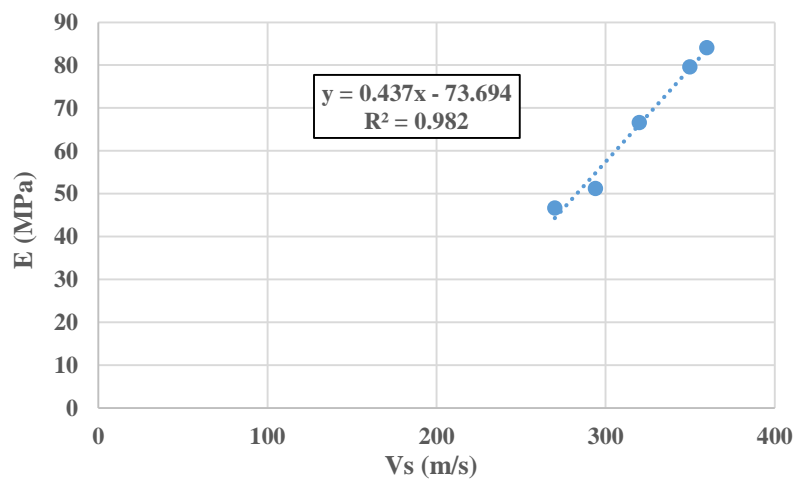


Σχήμα 7.10: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων

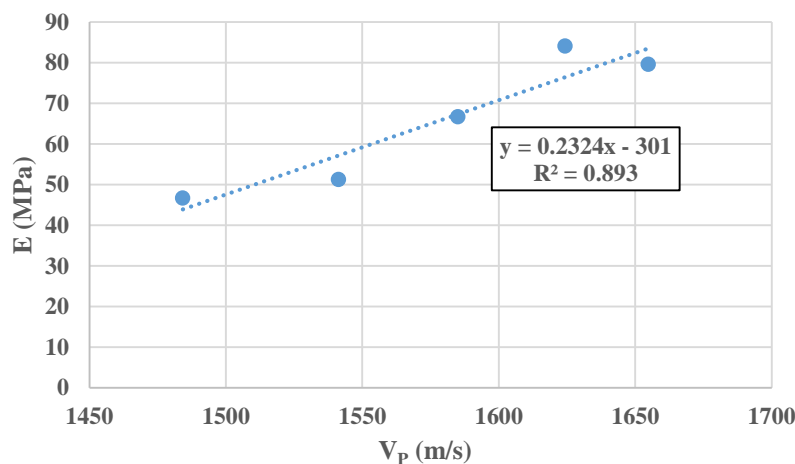
7.4 Σχέση μεταξύ ταχύτητας εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων και μέτρου ελαστικότητας, μέγιστου μέτρου διάτμησης και λόγου Poisson.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), το μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{\max}), τον λόγο Poisson (ν) και κατά συνέπεια τις ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων και διατμητικών κυμάτων στους εδαφικούς σχηματισμούς είναι το ποσοστό της περιεχόμενης αργίλου, ο βαθμός κορεσμού, η περιεχόμενη υγρασία καθώς το βάθος και η ηλικία του.

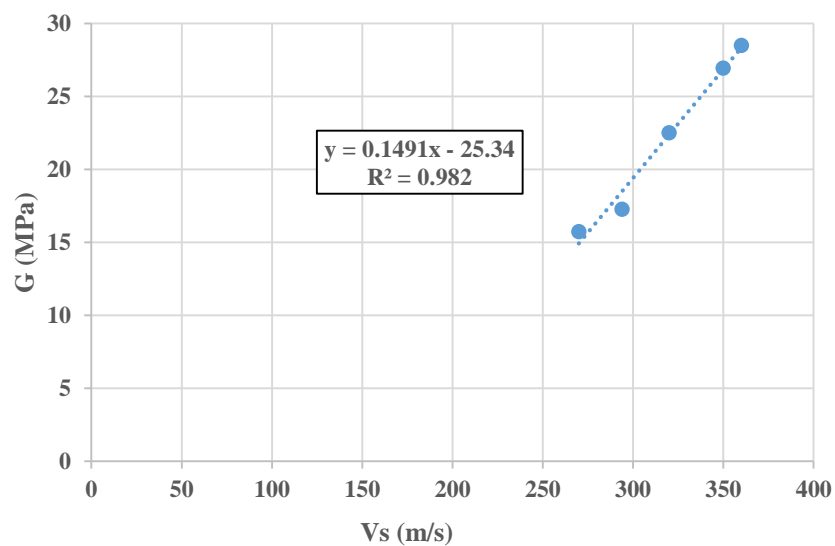
Έτσι από τις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων, συναρτήσει των τριών παραπάνω ελαστικών παραμέτρων προκύπτουν πολύ καλές συσχετίσεις, όπως φαίνεται και από τις μετρούμενες τιμές τις παρούσας εργασίας παρακάτω (Paoletti, 2014).



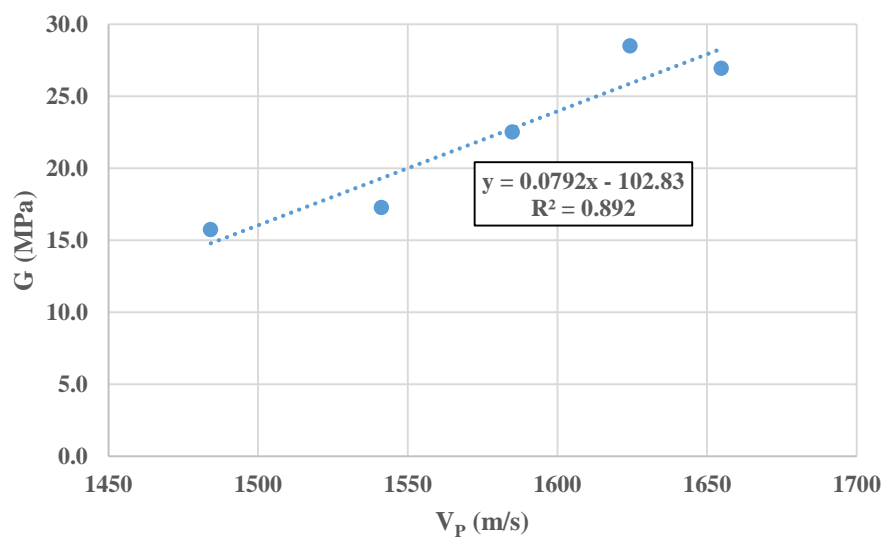
Σχήμα 7.11: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων



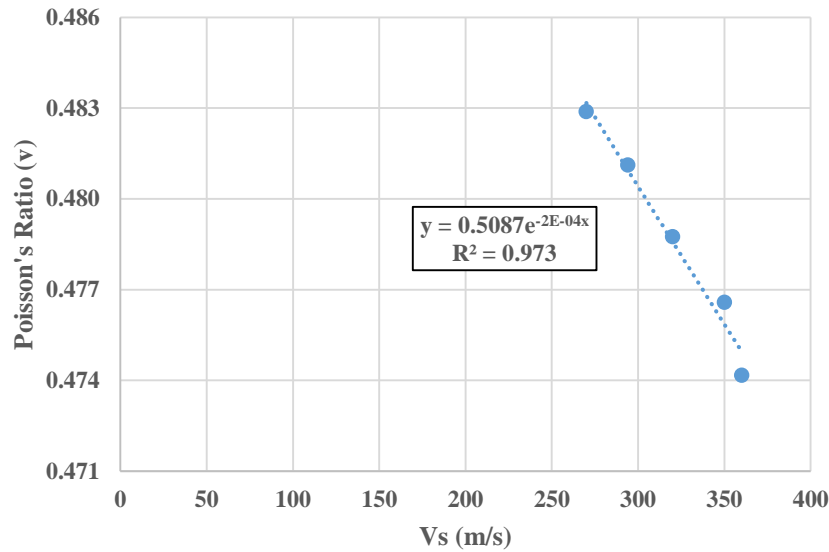
Σχήμα 7.12: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων



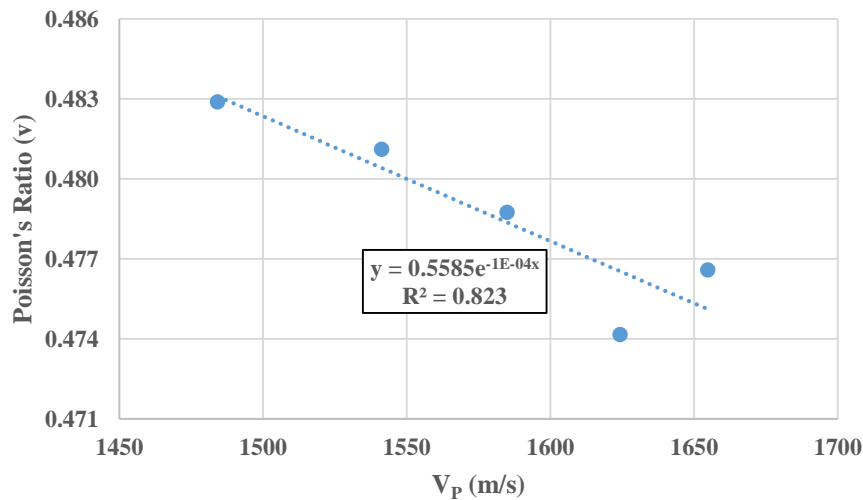
Σχήμα 7.13: Μεταβολή του μέγιστου μέτρου διάτμησης συναρτήσει της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων



Σχήμα 7.14: Μεταβολή του μέγιστου μέτρου διάτμησης συναρτήσει της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων



Σχήμα 7.15: Μεταβολή του λόγου Poisson συναρτήσει της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων



Σχήμα 7.16: Μεταβολή του λόγου Poisson συναρτήσει της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων

7.5 Διαφοροποίηση της ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων με την πάροδο του χρόνου

Η πάροδος του χρόνου προκαλεί σημαντικές μεταβολές στο μέγιστο μέτρο διάτμησης G_{\max} όπως έχει προαναφερθεί στην παρούσα εργασία. Στο επίπεδο των εργαστηριακών μελετών οι εν λόγω μεταβολές του μέγιστου μέτρου διάτμησης, μεταφράζονται ως μεταβολές στις μετρούμενες τιμές της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) βάση της Σχέσης 7.1 (Troncoso and Garces, 2000):

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad [7.1]$$

Οι επιπτώσεις του φαινομένου της γήρανσης (Aging Effect) στο έδαφος που κατά καιρούς πολλοί ερευνητές έχουν εξετάσει, εκτιμώνται συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων και κατ'επέκταση του μέγιστου μέτρου διάτμησης.

Βάσιμες προβλέψεις για την μεταβολή του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) με την πάροδο του χρόνου είναι απαραίτητες για τον σχεδιασμό κατασκευών ή δομών στα εδάφη. Αυτό συμβαίνει γιατί το μέγιστο μέτρο διάτμησης αναπαριστά τις μεταβολές στην ακαμψία του εδάφους (Troncoso and Garces, 2000).

Οι Anderson και Stokoe (1978), στην προσπάθειά τους να μελετήσουν τις επιπτώσεις της γήρανσης στα εδάφη καθώς και την εκτίμηση της μακροπρόθεσμης επίδρασής στο μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}) πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις (Sawangsurriya, 2012):

$$I_G = \Delta G / \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad [7.2]$$

και

$$N_G = \frac{I_G}{G_{1000}} \quad [7.3]$$

Όπου:

I_G : ο συντελεστής αύξησης του μέγιστου μέτρου διάτμησης με την πάροδο του χρόνου

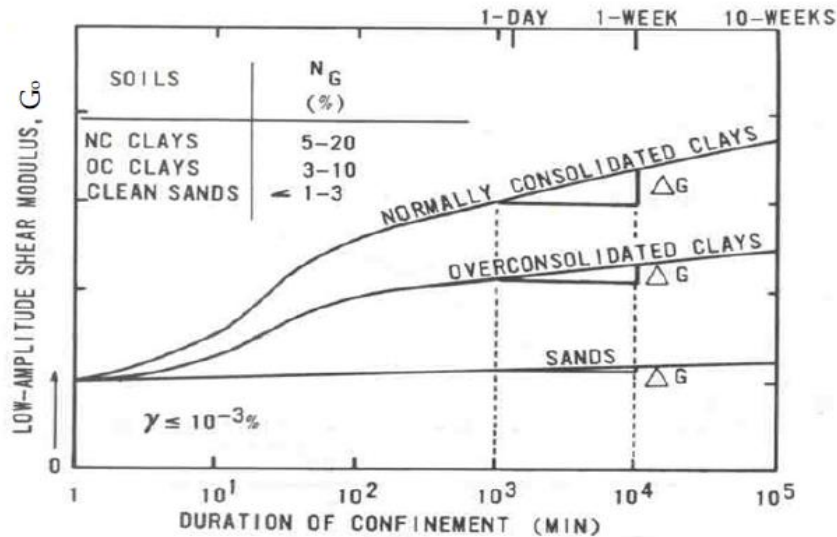
t_1 : ένας χρονικό σημείο αναφοράς μετά την πρωτεύουσα στερεοποίηση

t_2 : ένας χρονικό σημείο ενδιαφέροντος έπειτα από το t_1

ΔG : η μεταβολή του μέγιστου μέτρου διάτμησης στο χρονικό περιθώριο από t_1 έως t_2

G_{1000} : η μετρούμενη τιμή του μέγιστου μέτρου διάτμησης 1000 λεπτά έπειτα από την άσκηση σταθερής τάσης, που συμβαίνει έπειτα από την ολοκλήρωση της πρωτεύουσας στερεοποίησης

N_G : ο συντελεστής που αντιπροσωπεύει την κανονικοποίηση της αύξησης του μέγιστου μέτρου διάτμησης με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 7.17: Η επίδραση της γήρανσης στο μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}) (Sawangsurriya, 2012 από Anderson and Stokoe 1978)

Οι Anderson και Stokoe (1978), με την ανάπτυξη των παραπάνω σχέσεων, κατάφεραν να ενσωματώνουν την μακροπρόθεσμη επίδραση του χρόνου στις μεταβολές του μέγιστου μέτρου διάτμησης.

Μεγάλη αύξηση της ακαμψίας του εδάφους εκπροσωπείται με μεγάλη τιμή των συντελεστών I_G , ΔG , ενώ γενικότερα όσο ο δείκτης πλαστικότητας του εδάφους αυξάνεται τόσο περισσότερο η επίδραση της γήρανσης γίνεται αισθητή (Sawangsurriya, 2012).

Στην παρούσα εργασία, επιχειρήθηκε η θεωρητική πρόβλεψη της ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων έπειτα από το πέρας κάποιων ημερών ή εβδομάδων.

Οι Σχέσεις 7.4, 7.5 όπως και οι σχέσεις που πρότειναν οι Anderson και Stokoe (1978) αποσκοπούν στην μελέτη της επίδρασης της γήρανσης στην ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο, ανάγοντας όμως τις σταθερές που παραπάνω αφορούσαν τις μεταβολές του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}), σε σταθερές που αφορούν την μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$I_{VS} = \frac{\Delta V_S}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad [7.4]$$

Και

$$NV_S = \frac{IV_S}{V_{S1000}} \quad [7.5]$$

όπου,

I_{Vs} : ο συντελεστής αύξησης της ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων με την πάροδο του χρόνου

t_1 : ένας χρονικό σημείο αναφοράς μετά την πρωτεύουσα στερεοποίηση

t_2 : ένας χρονικό σημείο ενδιαφέροντος έπειτα από το t_1

ΔV_s : η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιου κύματος στο χρονικό περιθώριο από t_1 έως t_2

V_{S1000} : η μετρούμενη τιμή της ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιου κύματος 1000 λεπτά έπειτα από την άσκηση σταθερής τάσης, που συμβαίνει έπειτα από την ολοκλήρωση της πρωτεύουσας στερεοποίησης

N_{Vs} : ο συντελεστής που αντιπροσωπεύει την κανονικοποίηση της αύξησης της ταχύτητας διάδοσης του εγκάρσιου κύματος με την πάροδο του χρόνου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και βάση των προηγούμενων σχέσεων, στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι προβλέψεις που αφορούν την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων σε διάφορες χρονικές περιόδους.

Πίνακας 7.1: Πρόβλεψη ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων με το μοντέλο των Anderson και Stokoe(1978)

Δοκίμιο	Bender Elements Test	Προβλέψεις σύμφωνα με το μοντέλο των Anderson και Stokoe, 1978	
	Ταχύτητα V_s (m/s)	Ταχύτητα V_s (m/s) έπειτα από 5 ημέρες	Ταχύτητα V_s (m/s) έπειτα από 20 ημέρες
E2	350	458.3	473.2
E3	360	394.5	418.7
E6	320	338.2	348.2
E4	294	301.9	303.6
E5	270	288.2	299.8

Επίσης υπολογίστηκαν και οι αποκλίσεις μεταξύ των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) όπως αυτές μετρήθηκαν με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία με τις ταχύτητες διάδοσης

των εγκαρσίων κυμάτων όπως υπολογίστηκαν θεωρητικά με το μοντέλο των Anderson και Stokoe, 1987. Οι αποκλίσεις φαίνονται στον Πίνακα 7.2

Πίνακας 7.2: Αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής προσέγγισης και εργαστηριακών μετρήσεων με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία

Δοκίμιο	Αποκλίσεις (%)
E2	1.3
E3	1.0
E6	1.4
E4	3.1
E5	1.6

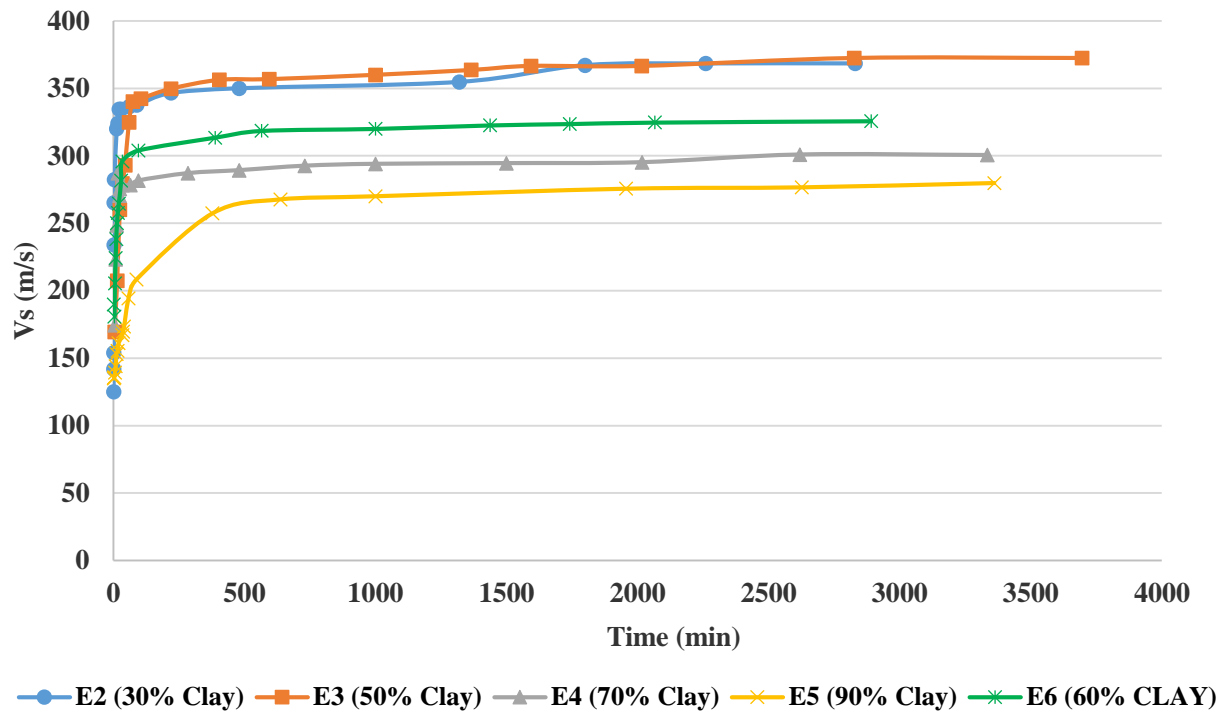
Τέλος, στο συγκεντρωτικό διάγραμμα που προκύπτει για τις ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων των δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου (βλέπε Σχήμα 7.18) είναι εμφανές πως η πάροδος του χρόνου επηρεάζει τις ταχύτητες διάδοσης. Ακόμα και σε αυτό το μικρό χρονικό περιθώριο κατά το οποίο μελετήθηκε η επίδραση του φαινομένου της γήρανσης σε κάθε δοκίμιο, η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

Συγχρόνως από το συγκεντρωτικό διάγραμμα του Σχήματος 7.18 μπορούμε να συμπεράνουμε πως η περιεκτικότητα του εδαφικού δοκιμίου σε άργιλο είναι καθοριστικής σημασίας για την τιμή της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s).

Το ποσοστό της αργίλου στους εδαφικούς σχηματισμούς επιδρά σημαντικά στην πυκνότητα και κατά συνέπεια στις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων. Έτσι θα μπορούσε να επιτευχθεί ένας διαχωρισμός μεταξύ των εδαφικών σχηματισμών βάση της περιεκτικότητάς τους σε άργιλο.

Με τον διαχωρισμό αυτό προκύπτει πως ταχύτητες των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) μειώνονται όσο το ποσοστό της περιεχόμενης αργίλου αυξάνεται.

Με την πρόβλεψη της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) σύμφωνα με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω, γίνεται αντιληπτό το πώς επιδρά η πάροδος του χρόνου (Aging Effect) σε αυτές και κατ' επέκταση στην απόκριση των εδαφικών σχηματισμών.



Σχήμα 7.18: Ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων συναρτήσει του χρόνου

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η εργαστηριακή έρευνα με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (Bender Elements) έχει τη δυνατότητα εκτίμησης του μέτρου ακαμψίας, προσομοιάζοντας τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.
- Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την δοκιμή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Bender Elements) ταιριάζουν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εμπειρικές σχέσεις των Patel & Singh (2009)
- Οι συσχετίσεις της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων με γεωτεχνικές παραμέτρους μπορούν να χρησιμοποιηθούν έμμεσα για την εκτίμηση του μεγέθους της ταχύτητας χωρίς ιδιαίτερες τεχνικές και κόστος.
- Η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού της αργίλου, ιδιαίτερα μετά το 50%.
- Η τιμή της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων και κατ' επέκταση το μέτρο ακαμψίας των εδαφικών σχηματισμών αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα αποτελέσματα ακολουθούν τη σχέση πρόβλεψης των Anderson & Stokoe (1987).

Περαιτέρω έρευνα απαιτείται για την καλύτερη τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Arthur Ayres and Friedrich Theilen, (1999), «Relationship between P- and S-wave velocities and geological properties of near-surface sediments of the continental slope of the Barents Sea», *Geophysical Prospecting*, 47, 431–441

Asslan M., (2008), «Factors Influencing Small-Strain Stiffness of soils and its Determination», Bauhaus-Universität Weimar.

Atkinson J., (1993), «An introduction to the mechanics of soils and foundations through critical state of soil mechanics», McGraw Hill, London.

Auckpath Sawangsuriya, (2014), «Wave Propagation Methods for Determining Stiffness of Geomaterials», Bureau of Road Research and Development Department of Highways, Thailand

Chang, (2005) «The Relationship Between Void Ratio And Shear Wave Velocity Of Gold Tailings», University of Pretoria

De-hua Han, A. Nur, and Dale Morgani, (1986), «Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones», *GeoScienceWorld*, DOI: 10.1190/1.1442062 Published on November 1986

Fernandez, A.I. and Santamarina, J.C., (2001), «Effect of cementation on the small-strain parameters of sands», *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, pp. 191-199

GDS BES Hardware and Software Manual, (2013), The GDS Bender Element System Handbook, GDS Instruments Ltd.

Hasan Ghasemzadeh n, Amir Ali Abounour, (2013) «Compressional and shear wave intrinsic attenuation and velocity in partially saturated soils», Civil Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, No. 1346 Valiasr Street, 19697-Tehran, Iran

J.H. Troncoso, E. GarceÂs, (2000), «Ageing effects in the shear modulus of soils», Pontificia Universidad CatoÂlica de Chile, Alameda 340, Casilla 144-D, Santiago, Chile

Jong-Sub Lee and J. Carlos Santamarina, (2005) «Bender Elements: Performance and Signal Interpretation», *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, September 1, ASCE, ISSN 1090-0241/2005/9-1063–1070

Jovicic V, Coop MR, Simic M., (1996), “Objective criteria for determining Gmax from bender element tests”. *Geotechnique*, 46(2):357–62.

M. Santagata, Y.I. Kang, (2006), «Effects of geologic time on the initial stiffness of clays», School of Civil Engineering, Purdue University, Engineering Geology 89 (2007) 98–111

Mari J.L., Arens G., Chapellier D., Gaudiani P., (1998) «Geophysics of Reservoir and Civil Engineering», Institute Francais du Petrole Publications, ISBN : 9782710807575

Mohamed A. Kassab, Andreas Weller, (2014) «Study on P-wave and S-wave velocity in dry and wet sandstones of Tushka region, Egypt», Egyptian Petroleum Research Institute, 11727, El Zohour Region, Naser City, Cairo, Egypt Institute of Geophysics, Clausthal University of Technology, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany.

Mounir L., Tarek A., Jean Paul Tisot (2011), «Effects of Soil Aging on Mechanical and Hydraulic Properties of a Silty Soil», Geotech Geol Eng (2014) 32:1101–1108, DOI 10.1007/s10706-014-9784-1.

Mustafa Fener, Sair Kahraman, Yakup Bay, and Osman Gunaydin, (2013), «Correlations between P-wave velocity and Atterberg limits of cohesive soils», Can. Geotech. J. 42: 673–677

Paoletti, V., (2014) «Remarks on factors influencing shear wave velocities and their role in evaluating susceptibilities to earthquake-triggered slope instability: case study for the Campania area (Italy)», Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 2147–2158, 2012

Patel A., Singh D. N., (2009) «A generalized relationship for estimating shear wave velocity in soils», International Journal of Geotechnical Engineering (2009) 3:(343-351), DOI 10.3328/IJGE 2009.03.03.343.351

Pirepoint N.D., (1996) «The prediction and back analysis of excavation behaviour in Oxford clay», University of Sheffield, Western Bank, United Kingdom.

Sanchez-Salinero, I., Roesset, J. M., and Stokoe, K. H. (1986), «Analytical studies of body wave propagation and attenuation», Report GR 86-15, University of Texas, Austin, TX

Sheriff, R. E., Geldart, L. P., (1995), «Exploration Seismology», 2nd Edition, Cambridge University Press, ISBN 0-521-46282-7.

Simons N., Menzies B., and Matthews M., (2002), «A short course in Geotechnical site investigation», Great Britain, ISBN: 07277 2948 9.

Soga K., (2005), «Lecture 3: Time Effects Observed in Granular Materials», University of Cambridge

Susan L.M. Miller and Robert R. Stewart, (1991), «The relationship between elastic-wave velocities and density in sedimentary rocks: A proposal», University of Houston

Uma Maheswari R., Boominathan A., Dodagoudar G.R. (2010), «Use of Surface Waves in Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance of Chennai Soils», *Geotech Geol Eng* 28:119–137. DOI 10.1007/s10706-009-92

Viggiani G, and Atkinson JH., (1995), «Interpretation of bender element tests», *Geotechnique*, 45(1):149–54.

Yamashita, Fujiwara, Kawaguchi, Mikami, Nakata, Shibuya, « International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements» Organized by TC-29” Japanese Domestic Committee for TC-29.

Yilmaz O., (1987) «Seismic Data Processing», Society of exploration Geophysics

Αγιουτάντης Ζ., (2011), «Στοιχεία Γεωμηχανικής Μηχανική Πετρωμάτων», Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών πόρων, Χανιά

Γεωργιάννου, Β.Ν. και Τσομώκος, Α., (2006), «Measurement of Gmax Using Bender Elements», 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη

Καλλιόγλου Π., (2003), «Μελέτη των δυναμικών ιδιοτήτων εδαφών στη συσκευή στήλης – συντονισμού», Διδακτορική διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Στειακάκης Ε., (2012), «Εργαστηριακές ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας -Εδαφομηχανικής», Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά

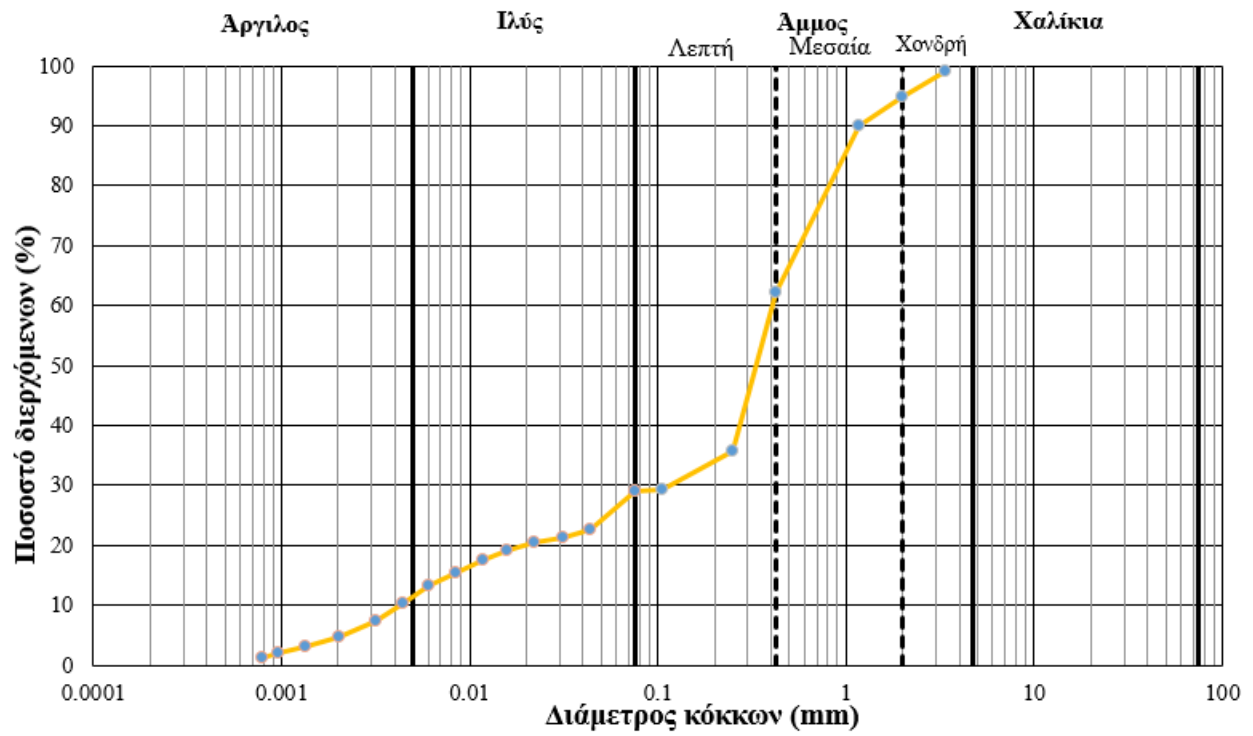
Τίκα Θ., Παπαδοπούλου Α., Λαόπουλος Θ., Θεόπουλος Α. & Καλλιόγλου Π, (2008), «The measurement of shear waves velocity with the bender element method», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Άρθρο 1841

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

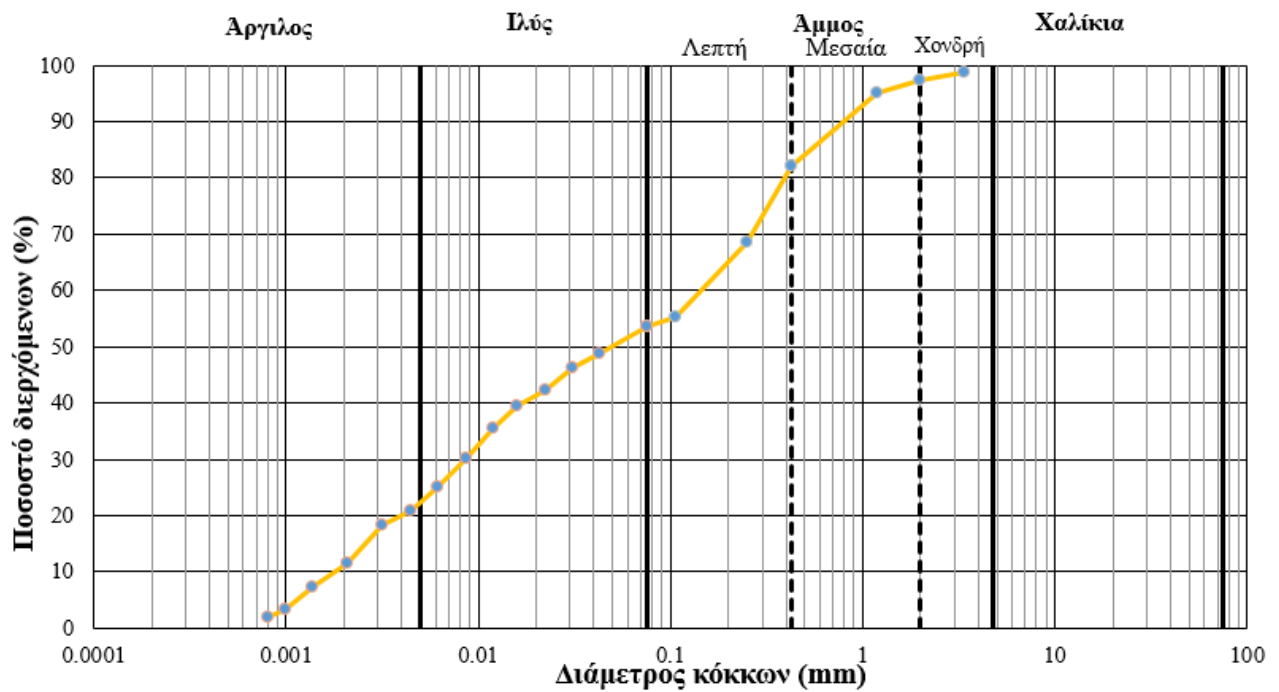
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Κοκκομετρική ανάλυση

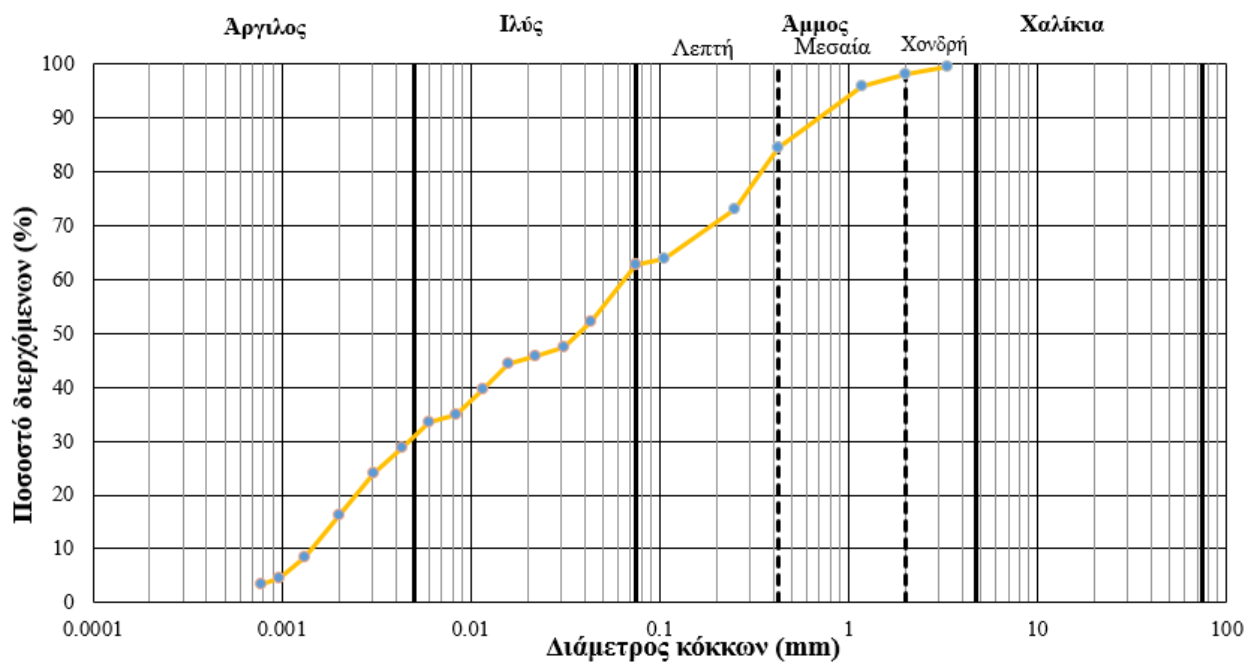
ΔΟΚΙΜΙΟ Ε2



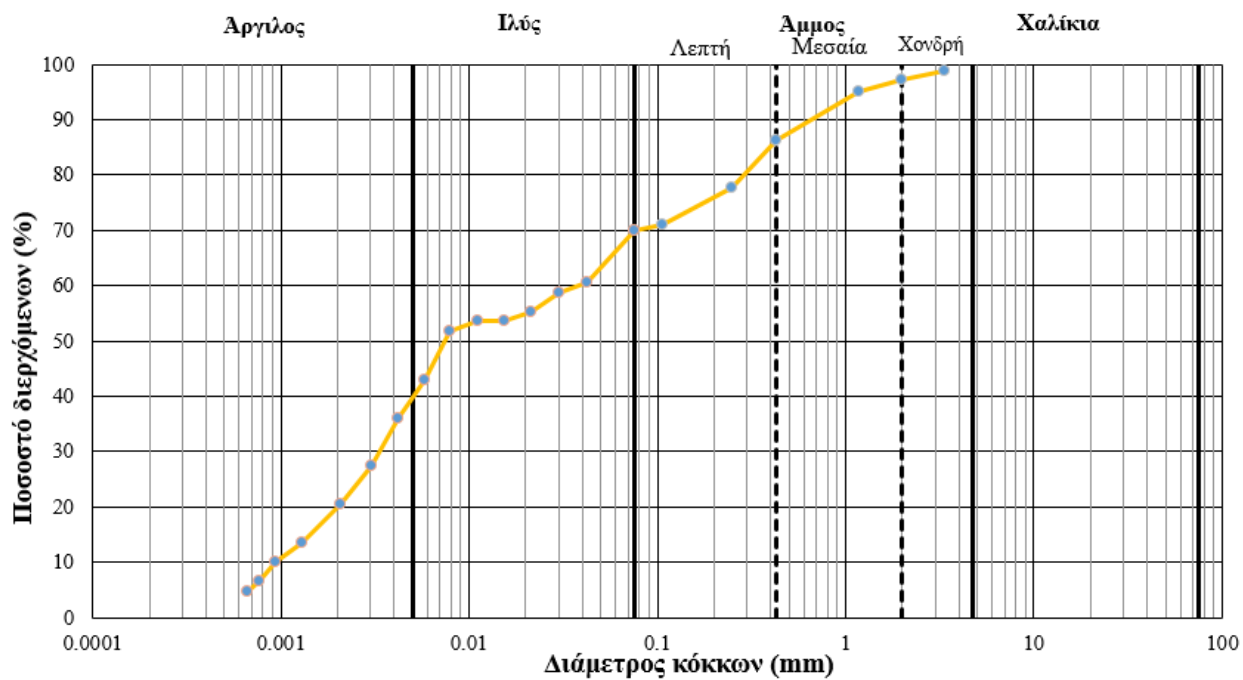
ΔΟΚΙΜΙΟ Ε3



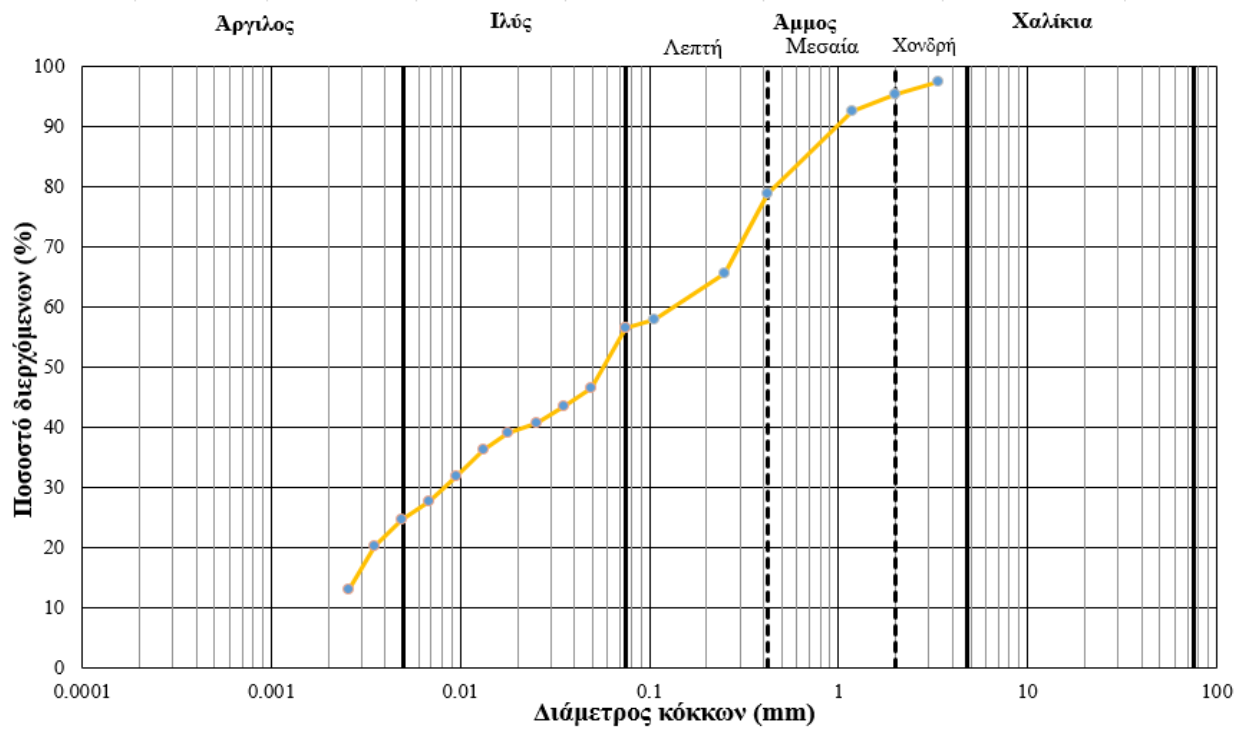
ΔΟΚΙΜΙΟ Ε4



ΔΟΚΙΜΙΟ Ε5



ΔΟΚΙΜΙΟ Ε6



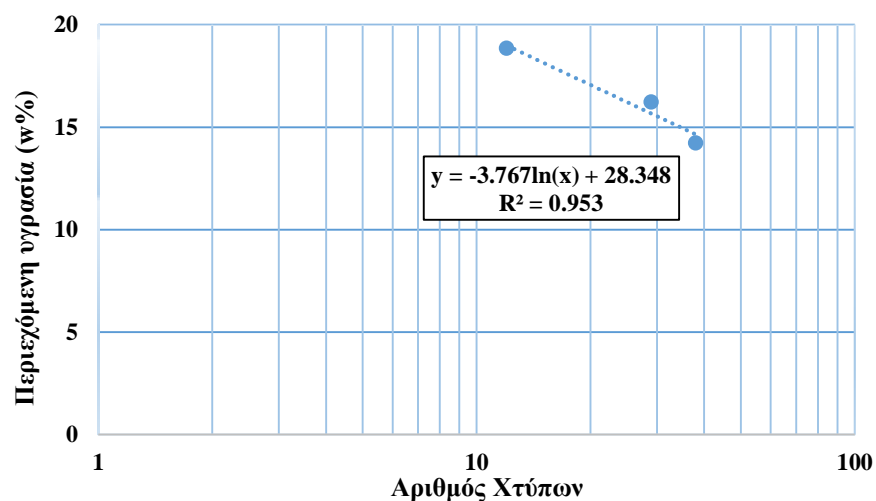
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Προσδιορισμός Ορίων Atterberg

Προσδιορισμός ορίου Υδαρότητας (LL%)

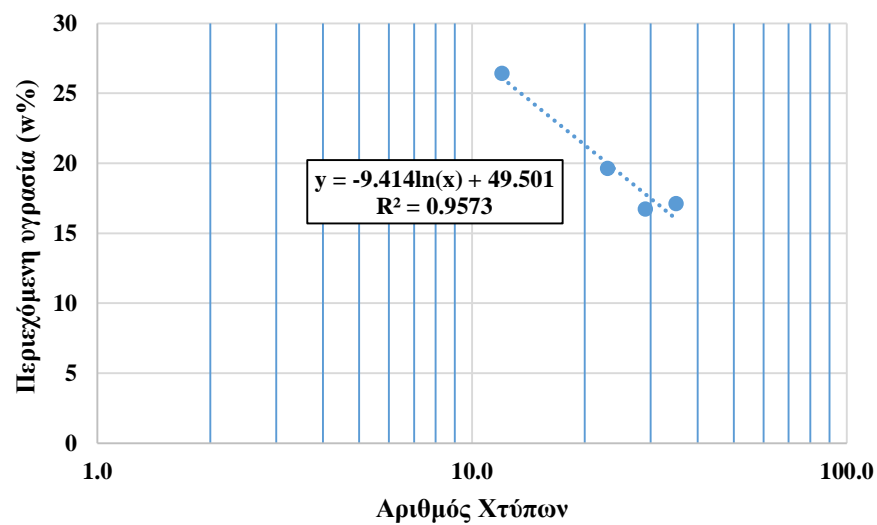
ΔΟΚΙΜΙΟ Ε2

Αριθμός Χτύπων	Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος Υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος υγρού δείγματος (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
38	40.4	52.9	51.3	12.5	10.9	1.6	14
29	43.8	57.3	55.4	13.5	11.6	1.9	16
12	41.7	61.1	58.0	19.4	16.3	3.1	19



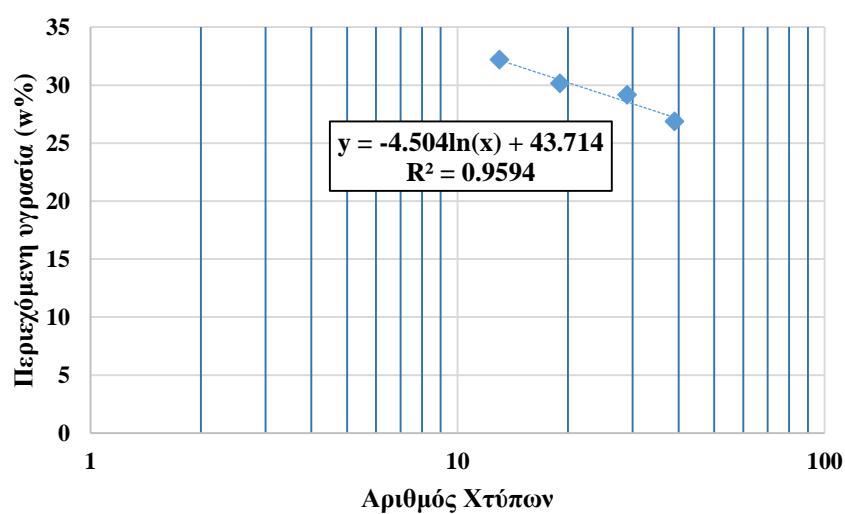
ΔΟΚΙΜΙΟ Ε3

Αριθμός Χτύπων	Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος Υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος υγρού δείγματος (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
35.0	41.9	54.2	52.4	12.3	10.5	1.8	17
23.0	42.9	53.7	51.9	10.8	9.0	1.8	20
12.0	42.9	57.9	54.8	15.0	11.9	3.1	26



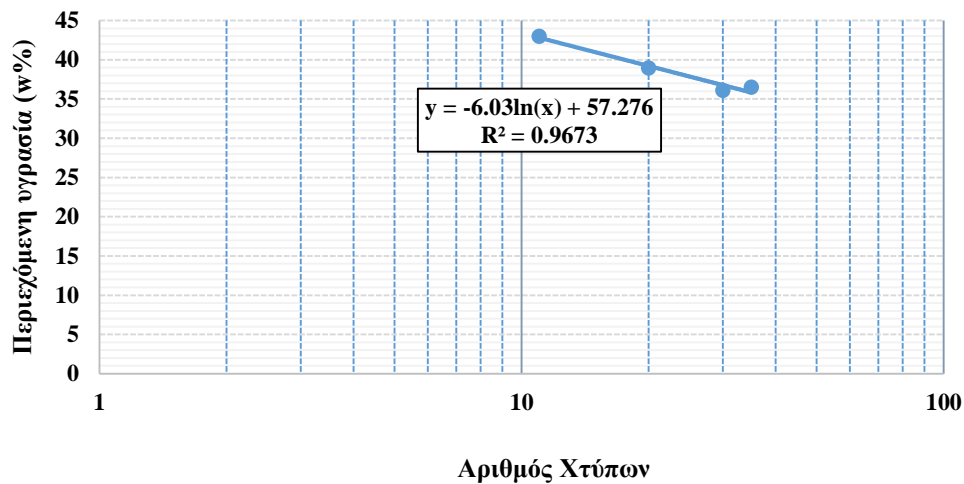
ΔΟΚΙΜΙΟ Ε4

Αριθμός Χτύπων	Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος Υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος Υγρού δείγματος (g)	Βάρος Ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
39	51.19	60.73	58.71	9.54	7.52	2.02	27
29	52.22	61.21	59.18	8.99	6.96	2.03	29
19	42.58	51.04	49.08	8.46	6.50	1.96	30
13	40.27	51.81	49.00	11.54	8.73	2.81	32



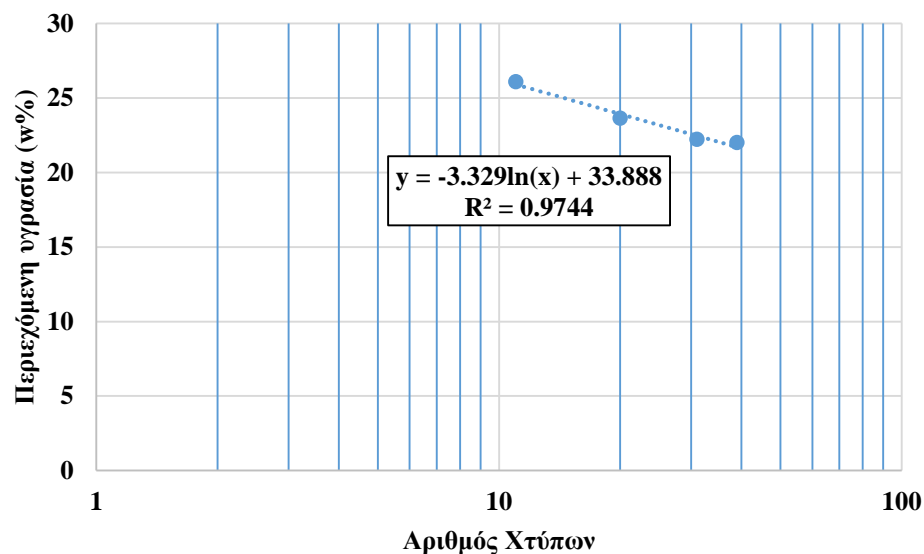
ΔΟΚΙΜΙΟ Ε5

Αριθμός Χτύπων	Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος Υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος υγρού δείγματος (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
35	42.9	51.7	49.3	8.7	6.4	2.3	36
30	43.9	52.4	50.1	8.4	6.2	2.2	36
20	43.4	54.5	51.4	11.1	8.0	3.1	39
11	42.9	51.4	48.8	8.5	6.0	2.6	43



ΔΟΚΙΜΙΟ Ε6

Αριθμός Χτύπων	Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος Υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος Υγρού δείγματος (g)	Βάρος Ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
39	42.56	47.16	46.33	4.6	3.77	0.83	22
31	42.91	50.17	48.85	7.26	5.94	1.32	22
20	43.91	50.5	49.24	6.59	5.33	1.26	24
11	41.83	49.03	47.54	7.2	5.71	1.49	26



Προσδιορισμός ορίου Πλαστικότητας (PL%)

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε2

Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος Υγρού δείγματος (g)	Βάρος Ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
44.09	44.75	44.72	0.66	0.63	0.03	5
41.38	42.28	42.25	0.90	0.87	0.03	3
44.08	44.95	44.92	0.87	0.84	0.03	4

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε3

Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος Υγρού δείγματος (g)	Βάρος Ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
43.1	44.3	44.2	1.1	1.1	0.1	6
42.7	43.7	43.6	0.9	0.9	0.0	5
43.9	45.1	45.0	1.1	1.1	0.1	7

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε4

Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος Υγρού δείγματος (g)	Βάρος Ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
42.86	43.58	43.51	0.72	0.65	0.07	11
41.67	42.29	42.23	0.62	0.56	0.06	11
41.26	42.04	41.96	0.78	0.70	0.08	11
43.15	43.79	43.73	0.64	0.58	0.06	10

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε5

Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος Υγρού δείγματος (g)	Βάρος Ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
41.8	42.6	42.5	0.7	0.6	0.1	10
42.9	43.7	43.6	0.8	0.7	0.1	10
42.7	43.4	43.3	0.7	0.6	0.1	11
43.1	43.9	43.8	0.8	0.7	0.1	12

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε6

Βάρος Υποδοχέα (g)	Βάρος Υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Βάρος Υγρού δείγματος (g)	Βάρος Ξηρού δείγματος (g)	Απώλεια Υγρασίας (g)	Ποσοστό Υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%)
41.66	42.78	42.68	1.12	1.02	0.1	10
44.06	44.92	44.85	0.86	0.79	0.07	9
44.32	45.18	45.11	0.88	0.76	0.12	9

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Αρχικές Παράμετροι Δοκιμίων

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				Ε2	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				30% Περιεκτικότητα σε άργιλο	
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (mm)				ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	
Αρχικό ύψος	105.13	105.02	105.14	Εμβαδόν (mm ²)	1966.9
Μέσο ύψος L ₀	105			Όγκος (cm ³)	206.7
Αρχική διάμετρος	50.05	50.01	50.07	Μάζα δοκιμίου (g)	454.4
Μέση διάμετρος	50			Πυκνότητα (g/cm ³)	2.2
				Περιεχόμενη υγρασία w(%)	10.7
ΒΑΡΗ		ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	Βαθμός Κορεσμού S(%)	28.69
Υποδοχέας(g)		40.41	42.85		
Υγρό δείγμα & Υποδοχέας(g)		45.6	54.35	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	21.6
Μάζα υγρού δείγματος (g)		5.19	11.5		
Ξηρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		45.1	52.99	Ειδικό Βάρος κόκκων G _s	2.69
Μάζα ξηρού δείγματος (g)		4.69	10.14		
Υγρασία (g)		0.107	0.13	Λόγος κενών e	0.355
Ποσοστό Υγρασίας (%)		10.7	13.4		

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				Ε3	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				50% Περιεκτικότητα σε άργιλο	
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (mm)				ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	
Αρχικό ύψος	113.75	114.09	113.56	Εμβαδόν (mm ²)	1983.4
Μέσο ύψος L ₀	113.8			Όγκος (cm ³)	225.7
Αρχική διάμετρος	50.51	50.24	50.01	Μάζα δοκιμίου (g)	495.5
Μέση διάμετρος	50.3			Πυκνότητα (g/cm ³)	2.2
				Περιεχόμενη υγρασία w(%)	9.75
ΒΑΡΗ		ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	Βαθμός Κορεσμού S(%)	26.17
Υποδοχέας (g)		40.14	42.84		
Υγρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		48.81	63.76	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	21.5
Μάζα υγρού δείγματος (g)		8.67	20.92		
Ξηρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		48.04	61.34		
Μάζα ξηρού δείγματος (g)		7.9	18.5	Ειδικό βάρος κόκκων G _s	2.69
Υγρασία (g)		0.097	0.131		
Ποσοστό Υγρασίας (%)		9.75	13%	Λόγος κενών e	0.342

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				Ε4	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				70% Περιεκτικότητα σε άργιλο	
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (mm)				ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	
Αρχικό ύψος	116.68	116.34	116.09	Εμβαδόν (mm ²)	1970.8
Μέσο ύψος L ₀	116			Όγκος (cm ³)	229.3
Αρχική διάμετρος	50.11	50.11	50.06	Μάζα δοκιμίου (g)	469.5
Μέση διάμετρος	50			Πυκνότητα (g/cm ³)	2.0
				Περιεχόμενη υγρασία w(%)	10.99
ΒΑΡΗ		ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	Βαθμός κορεσμού S(%)	29.44
Υποδοχέας (g)		43.91	43.78		
Υγρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		54.11	51.92	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	20.1
Μάζα υγρού δείγματος (g)		10.2	8.14		
Ξηρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		53.1	50.92	Ειδικό βάρος κόκκων G _s	2.68
Μάζα ξηρού δείγματος (g)		9.19	7.14		
Υγρασία (g)		0.110	0.140	Λόγος κενών e	0.452
Ποσοστό υγρασίας (%)		10.99	14%		

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				Ε5	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				90% Περιεκτικότητα σε άργιλο	
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (mm)				ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	
Αρχικό ύψος	120.9	120.8	121	Εμβαδόν (mm ²)	1966.9
Μέσο ύψος L ₀	121			Όγκος (cm ³)	237.8
Αρχική διάμετρος	50.05	50.07	50.01	Μάζα δοκιμίου (g)	513.38
Μέση διάμετρος	50.0			Πυκνότητα (g/cm ³)	2.2
				Περιεχόμενη Υγρασία w(%)	19.51
ΒΑΡΗ		ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	Βαθμός κορεσμού S(%)	52.16
Υποδοχέας (g)		42.87	42.84		
Υγρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		53.16	63.76	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	21.2
Μάζα υγρού δείγματος (g)		10.29	20.92		
Ξηρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		51.48	61.34	Ειδικό βάρος κόκκων G _s	2.67
Μάζα ξηρού δείγματος (g)		8.61	18.5		
Υγρασία (g)		0.195	0.131	Λόγος κενών e	0.480
Ποσοστό Υγρασίας (%)		19.51	13%		

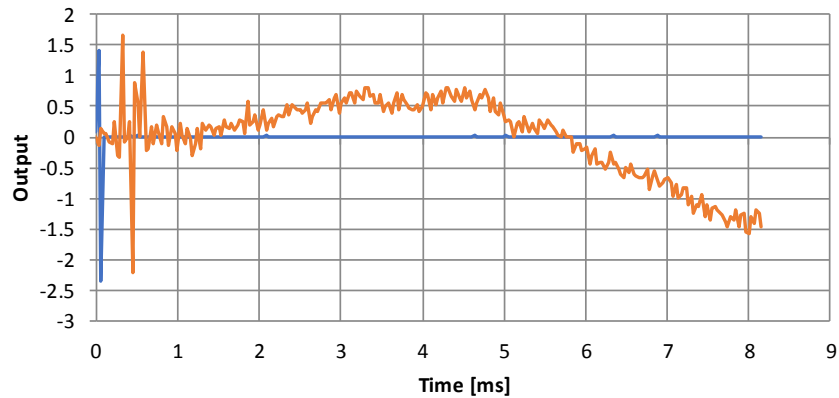
ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				Ε6	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				60% Περιεκτικότητα σε άργιλο	
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (mm)				ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	
Αρχικό ύψος	100	100.4	99.9	Εμβαδόν (mm ²)	1995.0
Μέσο ύψος L ₀	100			Όγκος (cm ³)	199.7
Αρχική διάμετρος	50.6	50.4	50.2	Μάζα δοκιμίου (g)	430.64
Μέση διάμετρος	50			Πυκνότητα (g/cm ³)	2.2
				Περιεχόμενη Υγρασία w(%)	14.51
ΒΑΡΗ		ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	Βαθμός κορεσμού S(%)	38.92
Υποδοχέας (g)		43.79	42.54		
Υγρό δείγμα & Υποδοχέας (g)		53.18	50.42	Μοναδιαίο βάρος, γ (kN/m ³)	21.2
Μάζα υγρού δείγματος (g)		9.39	7.88		
Ξηρό δείγμα & Υποδοχέας(g)		51.99	49.42	Ειδικό βάρος κόκκων G _s	2.68
Μάζα ξηρού δείγματος (g)		8.2	6.88		
Υγρασία (g)		0.145	0.145	Λόγος κενών e	0.424
Ποσοστό Υγρασίας (%)		14.51	14.53		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

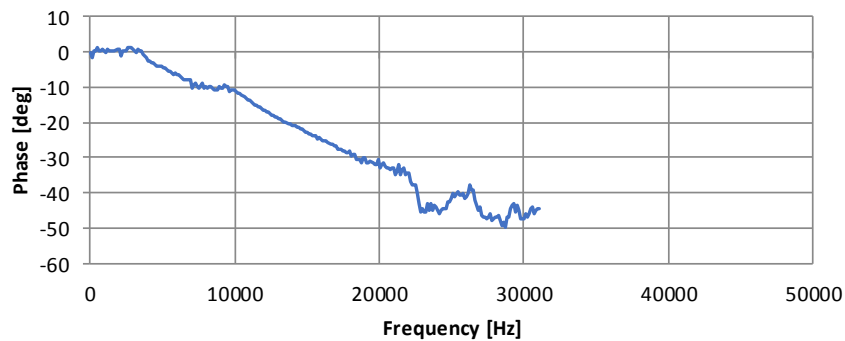
**Αποτελέσματα δοκιμής πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Bender
Elements test)**

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε2

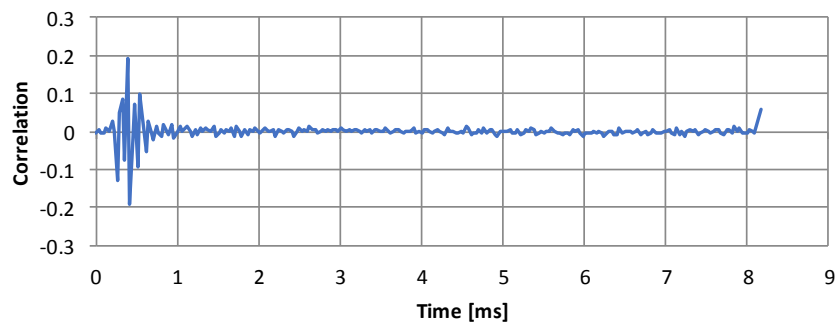
Τεχνική	Χρόνος διάδοσης κύματος (ms)	Ταχύτητα Vs (m/s)	Ταχύτητα Vp (m/s)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G_{\max} (MPa)
1st arrival	0.300	350	1654	0.477	79.6	27.0
peak to peak	0.310	338.9		0.478	74.7	25.3
cross - correlation	0.378	277.8		0.485	50.4	17.0
Frequency	0.388	270.8		0.486	48.0	16.1



Σήμα εισόδου και εξόδου πομπού και δέκτη



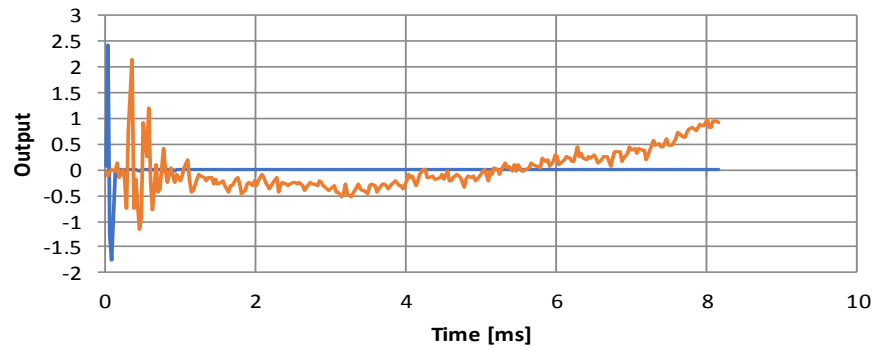
*Εκτίμηση χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο των συχνοτήτων
(μετασχηματισμός Fourier)*



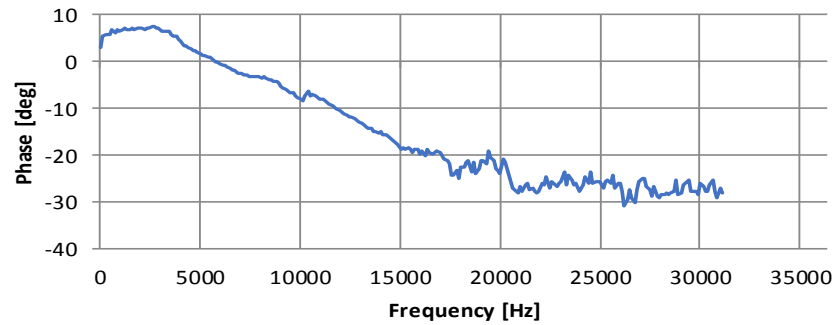
Εκτίμηση του χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο cross – correlation

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε3

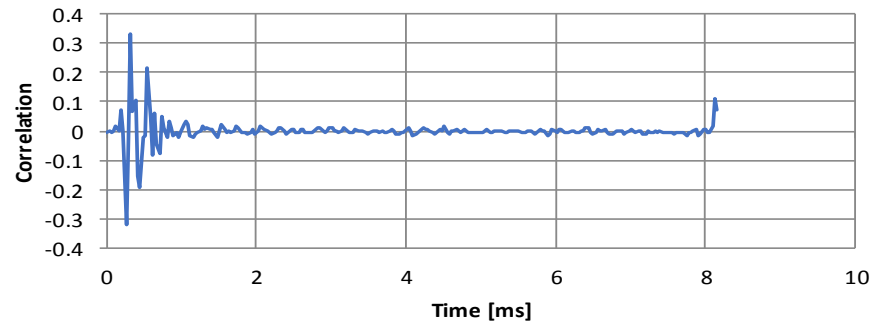
Τεχνική	Χρόνος διάδοσης κύματος (ms)	Ταχύτητα Vs (m/s)	Ταχύτητα Vp (m/s)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G_{\max} (MPa)
1st arrival	0.317	360	1624	0.474	84.1	28.5
peak to peak	0.336	338.9		0.477	74.7	25.3
cross - correlation	0.309	369.0		0.473	88.2	30.0
Frequency	0.421	270.8		0.486	47.9	16.1



Σήμα εισόδου και εξόδου πομπού και δέκτη



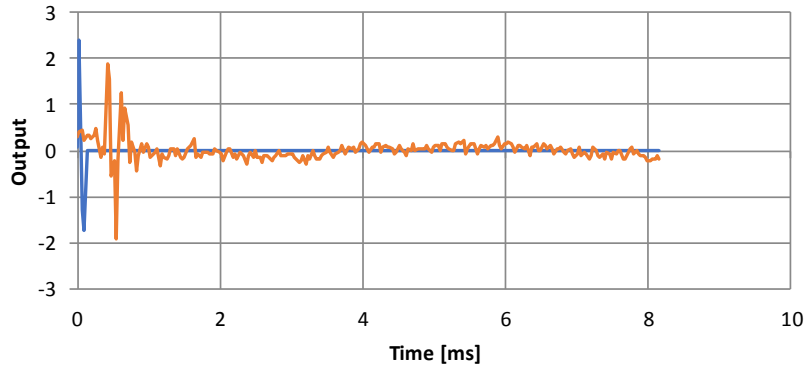
Εκτίμηση χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο των συχνοτήτων (μετασχηματισμός Fourier)



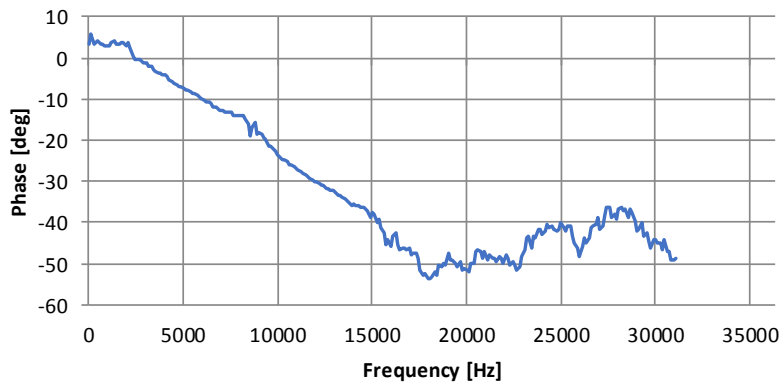
Εκτίμηση του χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο cross – correlation

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε4

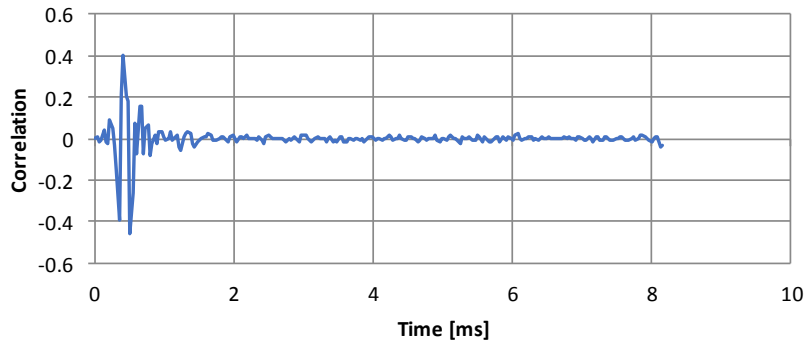
Τεχνική	Χρόνος διάδοσης κύματος (ms)	Ταχύτητα Vs (m/s)	Ταχύτητα Vp (m/s)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G_{\max} (MPa)
1st arrival	0.395	294	1541	0.481	51.2	17.3
peak to peak	0.407	285.0		0.482	48.2	16.2
cross - correlation	0.406	286.0		0.482	48.5	16.4
Frequency	0.655	177.0		0.493	18.7	6.3



Σήμα εισόδου και εξόδου πομπού και δέκτη



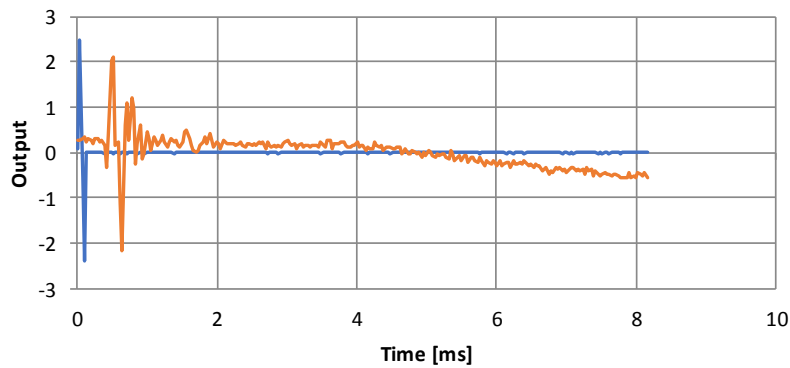
*Εκτίμηση χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο των συχνοτήτων
(μετασχηματισμός Fourier)*



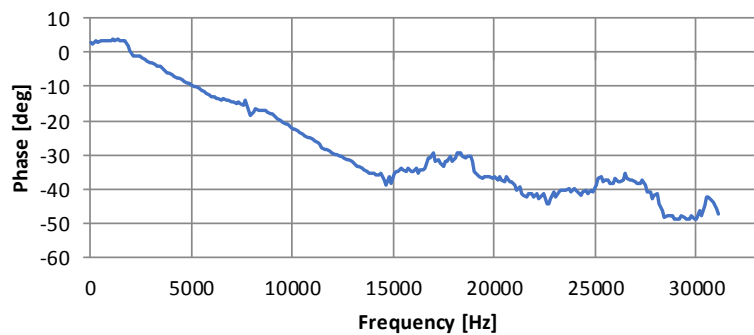
Εκτίμηση του χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο cross – correlation

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε5

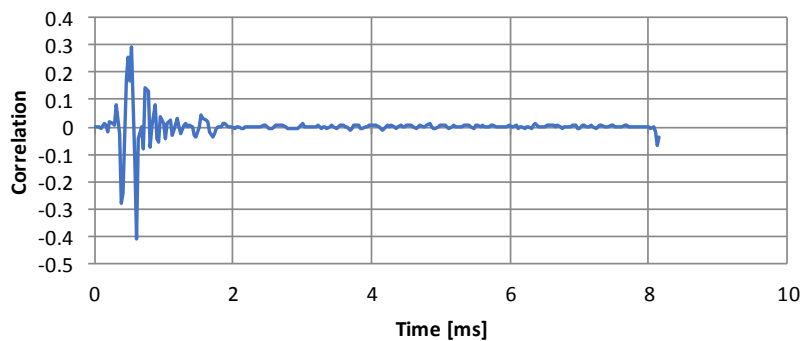
Τεχνική	Χρόνος διάδοσης κύματος (ms)	Ταχύτητα Vs (m/s)	Ταχύτητα Vp (m/s)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G_{\max} (MPa)
1st arrival	0.448	270	1484	0.483	46.7	15.7
peak to peak	0.467	259		0.484	43.0	14.5
cross - correlation	0.543	223		0.488	32.0	10.7
Frequency	0.553	219		0.489	30.8	10.4



Σήμα εισόδου και εξόδου πομπού και δέκτη



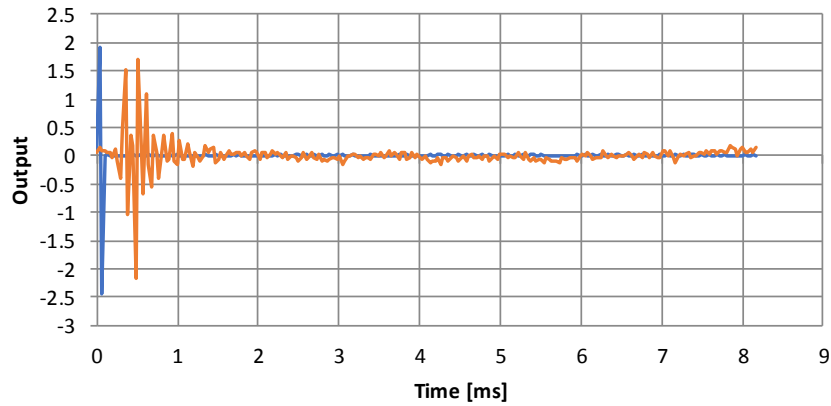
*Εκτίμηση χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο των συχνοτήτων
(μετασχηματισμός Fourier)*



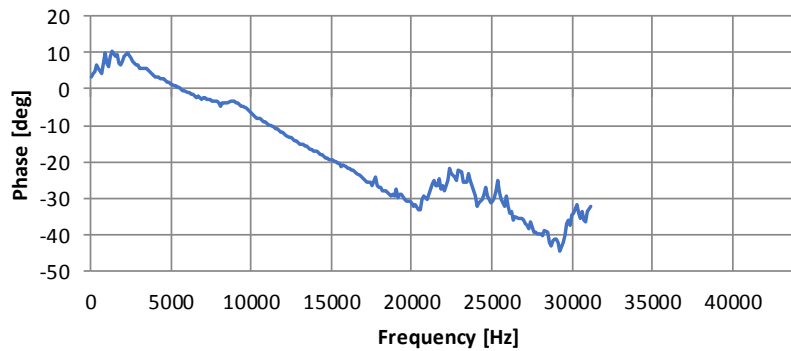
Εκτίμηση του χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο cross – correlation

ΔΟΚΙΜΙΟ Ε6

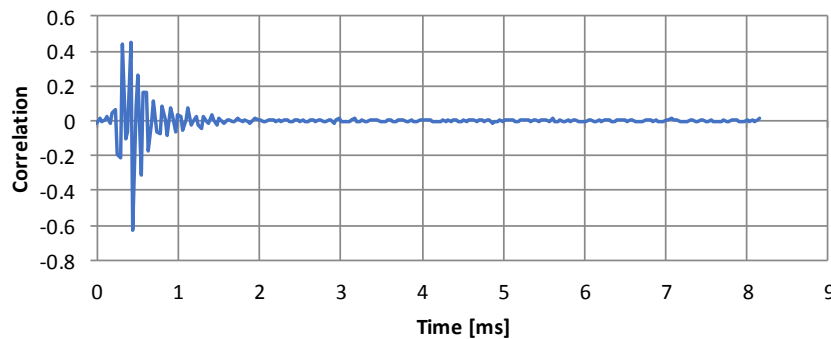
Τεχνική	Χρόνος διάδοσης κύματος (ms)	Ταχύτητα Vs (m/s)	Ταχύτητα Vp (m/s)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G_{max} (MPa)
1st arrival	0.313	320	1589	0.479	66.6	22.5
peak to peak	0.325	308		0.480	61.8	20.9
cross - correlation	0.410	244		0.488	39.0	13.1
Frequency	0.442	226		0.490	33.5	11.2



Σήμα εισόδου και εξόδου πομπού και δέκτη



*Εκτίμηση χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο των συχνοτήτων
(μετασχηματισμός Fourier)*



Εκτίμηση του χρόνου διάδοσης του κύματος με τη μέθοδο cross – correlation

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V

**Συγκεντρωτικός πίνακας γεωτεχνικών και φυσικών παραμέτρων
δοκιμίων**

ΔΟΚΙΜΙΟ	Ποσοστό περιεχόμενης αργίλου (%)	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Ταχύτητα διάδοσης διτμητικών κυμάτων Vs (m/s)	Ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων Vp (m/s)	Όρια Atterberg		
						LL (%)	PL (%)	PI (%)
E2	30	105	50	350	1654.8	16	4	12
E3	50	114	50	360	1624.3	19	7	12
E4	70	116	50	294	1541.3	29	11	18
E5	90	121	50	270	1484	38	11	27
E6	60	100	50	320	1585	23	9	14

ΔΟΚΙΜΙΟ	Ποσοστό περιεχόμενης αργίλου (%)	Λόγος κενών	Βαθμός Κορεσμού (%)	Μοναιαίο Βάρος (kN/m ³)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Ειδικό βάρος κόκκων (Gs)	Περιεχόμενη Υγρασία (%)
E2	30	0.355	28.7	21.6	2.2	2.69	11
E3	50	0.342	26.2	21.5	2.2	2.69	10
E4	70	0.452	29.4	20.1	2.0	2.68	11
E5	90	0.408	52.2	21.1	2.2	2.67	19
E6	60	0.424	38.9	21.2	2.2	2.68	14

