



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

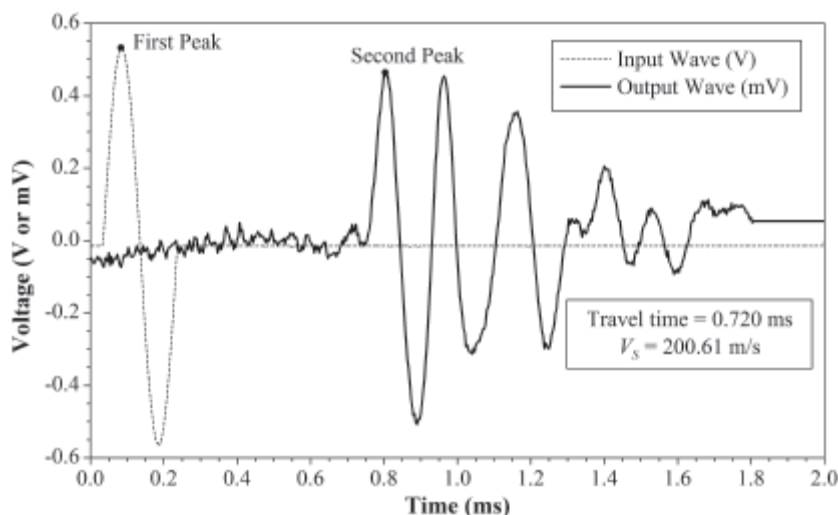
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής

Εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής

## Προσδιορισμός δυστημσίας σε καθαρή άμμο και μείγματα άμμου και ιλύος με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία

### Measurement of stiffness of sand and mixtures of sand and silt using bender elements



Διπλωματική Εργασία

Αλέξανδρος Λουκάς

01111029

Επιβλέπουσα: Βασιλική Γεωργιαννού, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

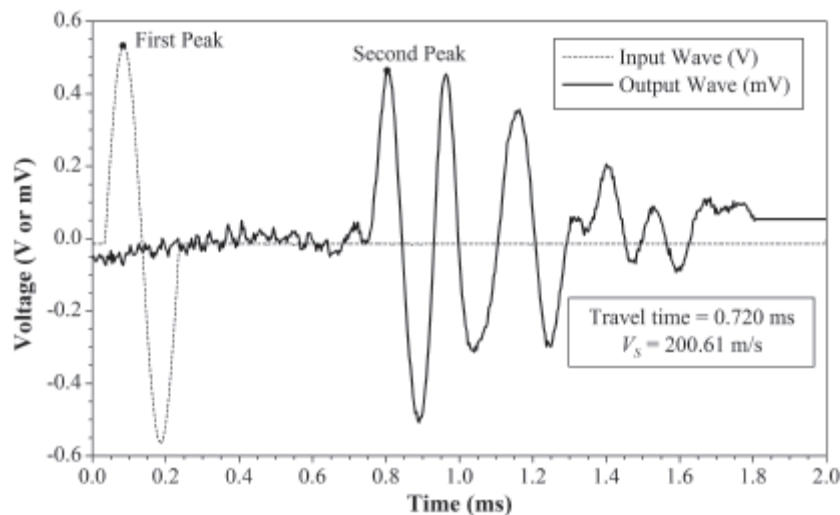
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής

Εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής

## Προσδιορισμός δυστημσίας σε καθαρή άμμο και μείγματα άμμου και ιλύος με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία

### Measurement of stiffness of sand and mixtures of sand and silt using bender elements



Διπλωματική Εργασία

Αλέξανδρος Λουκάς

01111029

Επιβλέπουσα: Βασιλική Γεωργιαννού, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Copyright © Αλέξανδρος Λουκάς, 2016  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Alexandros Loukas, 2016  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

Αλέξανδρος Λουκάς (2016)  
**Προσδιορισμός δυσστησίας σε καθαρή άμμο και μείγματα άμμου και ιλύος με  
πιεζοηλεκτρικά στοιχεία**  
Διπλωματική Εργασία 01111029

Alexandros Loukas (2016)  
Diploma Thesis 01111029  
Measurement of stiffness of sand and mixtures of sand and silt using bender elements

## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτή την προσπάθεια καθοριστική υπήρξε η συμβολή, η καθοδήγηση και η στήριξη ορισμένων ανθρώπων που βρέθηκαν δίπλα μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Βασιλική Γεωργιάννου, αναπληρώτρια καθηγήτρια του τομέα Γεωτεχνικής του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε τη δυνατότητα να διεκπεραιώσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή της δείχνοντας εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου. Η συστηματική καθοδήγηση και οι ποιοτικές παρατηρήσεις της διαδραμάτισαν σπουδαίο ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Παναγιώτη Τριαντάφυλλο, Στέλιο Τσεντίδης, για τη σημαντική βοήθειά τους στην επίλυση αποριών αλλά και για το χρόνο που μου διέθεσαν μέχρι να ολοκληρωθεί η εργασία. Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να σταθώ και στα πρόσωπα που με στηρίζουν καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Παναγιώτη και Όλγα, την αδερφή μου, Ελένη, και τους συμφοιτητές και φίλους μου για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής  
Εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
01111029

**Προσδιορισμός δυσμησίας σε καθαρή άμμο και μείγματα άμμου και ιλύος με  
πιεζοηλεκτρικά στοιχεία  
Αλέξανδρος Λουκάς**

Επιβλέπουσα: Βασιλική Γεωργιαννού, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

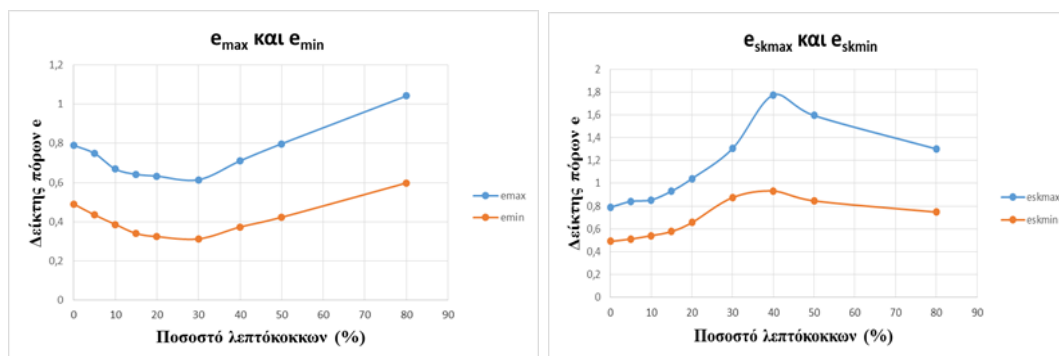
**Εκτενής περίληψη και συμπεράσματα**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση του ποσοστού ιλύος, σε μείγματα άμμου με διαφορετικά ποσοστά ιλύος, στο μέτρο διάτμησης. Για την καλύτερη εποπτεία αυτής της σχέσης πρέπει να λάβουμε υπόψιν και άλλους παράγοντες όπως η σύσταση των υλικών, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, ο δείκτης πόρων  $e$ , ο σκελετικός δείκτης πόρων  $e_{sk}$ , η ενεργός τάση και η σχετική πυκνότητα της άμμου και των μειγμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται μια εκτενής αναφορά σε βιβλιογραφικές αναφορές σχετικές με το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, τους δείκτες πόρων  $e$  και  $e_{sk}$ , τα κύματα και τις εφαρμογές τους για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται μελέτες άλλων ερευνητών σχετικές με τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης, τα αποτελέσματα των οποίων στη συνέχεια συγκρίνονται με αυτά της παρούσας διπλωματικής. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στους ορισμούς των διαφόρων δεικτών πόρων και τότε πρέπει να χρησιμοποιείται ο καθένας με βάση τον συσχετισμό άμμου και ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού στα διάφορα μείγματα. Επιπλέον γίνεται αναφορά στα κύματα που παράγονται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (P και S) καθώς και στο φαινόμενο που οφείλεται στην διαφορά της ταχύτητάς τους δηλαδή το εγγύς πεδίο. Τέλος γίνεται αναφορά στις διάφορες μεθόδους υπολογισμού του μέτρου διάτμησης και στις διαφορές τους.

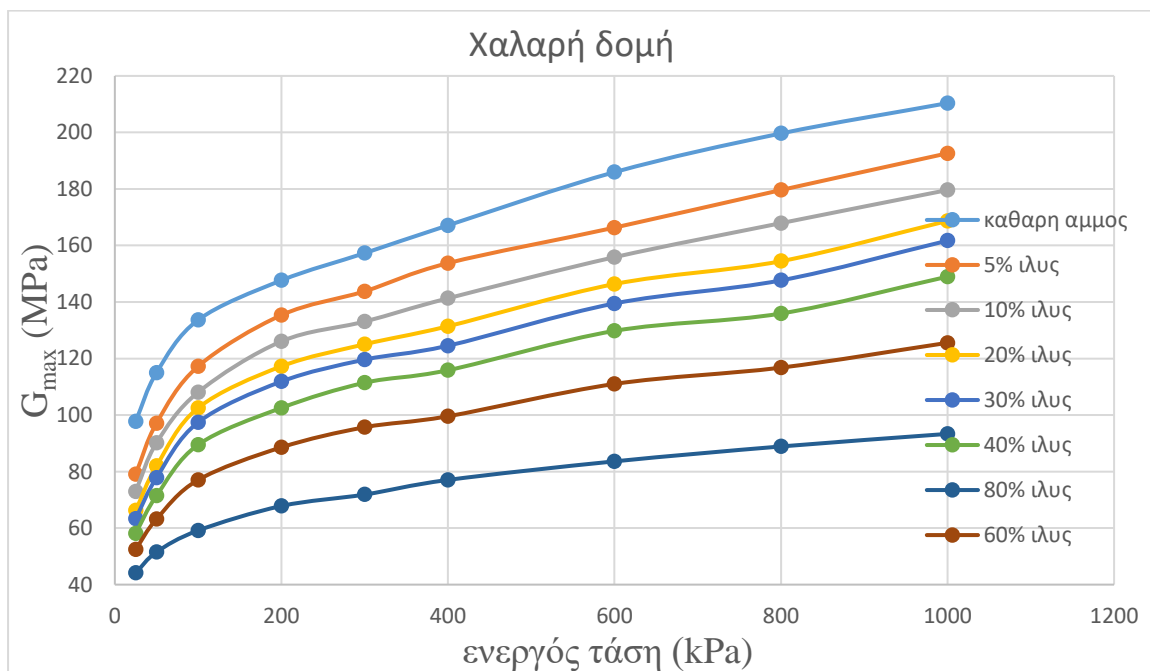
Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά αποτελέσματα που βασίζονται σε διαφόρους μεθόδους μέτρησης από την βιβλιογραφία και στην συνέχεια οι αντίστοιχες επιλογές που έγιναν στην παρούσα διπλωματική. Οι διαφορές των μεθόδων μέτρησης αναφέρονται στον προσδιορισμό του σημείου άφιξης, την συχνότητα του κύματος, το ενεργό ύψος του δοκιμίου και την μορφή του κύματος. Σχετικά με τον προσδιορισμό του σημείου άφιξης στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος των μεγίστων κορυφών (peak-to-peak), σχετικά με την συχνότητα του κύματος επιλέχθηκε η συχνότητα 40kHz, ως προς το ενεργό ύψος επιλέχθηκε το ύψος από την άκρη του ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μέχρι την άκρη του άλλου και τέλος σχετικά με την μορφή του κύματος επιλέχθηκε ημιτονοειδές.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα οποία είναι η άμμος M31 και η ιλύς D6. Επίσης παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέγιστου και του ελάχιστου δείκτη πόρων  $e$  για κάθε ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού στο μείγμα άμμου-ιλύος (Σχήμα 1) και στη συνέχεια αυτά συγκρίνονται με την αντίστοιχη βιβλιογραφία. Τέλος παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον σκελετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  (Σχήμα 1).



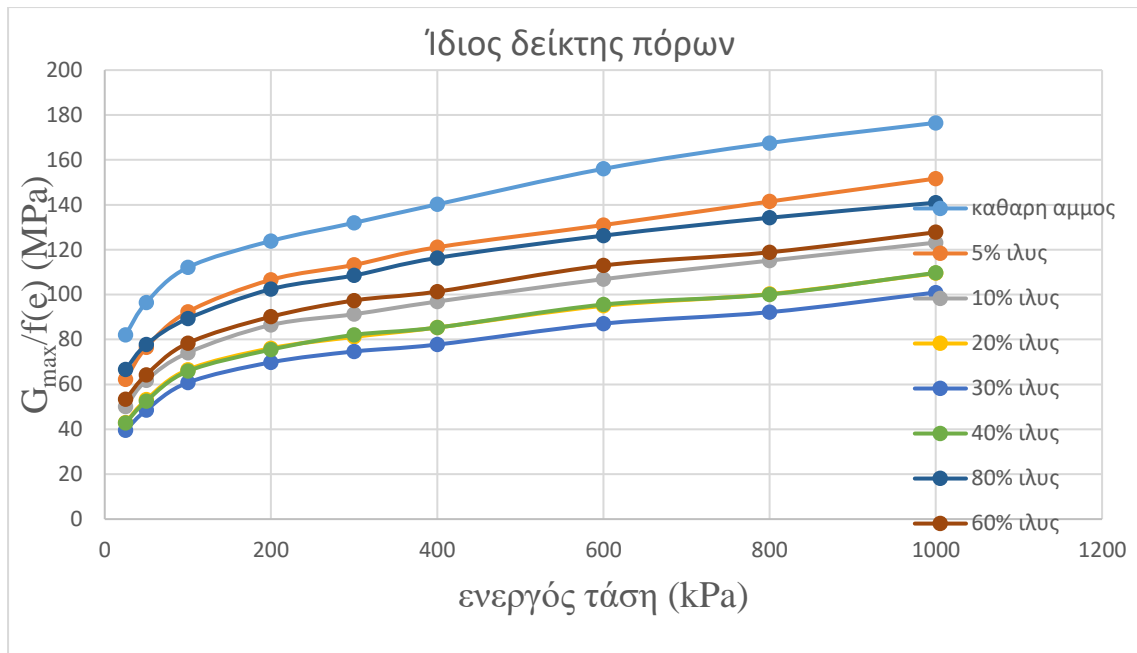
Σχήμα 1 Καμπύλες  $e_{max}$ ,  $e_{min}$ ,  $e_{skmax}$  και  $e_{skmin}$  για μείγματα άμμου M31 και ιλύος D6

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος παρασκευής των δοκιμών και παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που εφαρμόστηκε στην παρούσα διπλωματική. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια ενδεικτικά διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής bender element (Σχήμα 2, 3 και 4). Από τα σχήματα προκύπτει ότι για σταθερή σχετική πυκνότητα όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο μειώνεται το μέτρο διάτμησης. Επίσης, φαίνεται ότι για σταθερό δείκτη πόρων  $e$  η αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκων μέχρι μια χαρακτηριστική τιμή συνδέεται από μείωση του μέτρου διάτμησης, ενώ για αύξηση του ποσοστού ιλύος πέρα από την χαρακτηριστική τιμή (περίπου 30%) παρατηρείται αύξηση του μέτρου διάτμησης. Τέλος για σταθερό σκελετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  καθαρή άμμος και τα μείγματα με ποσοστό ιλύος 5% και 10% έχουν ίδιο μέτρο διάτμησης.

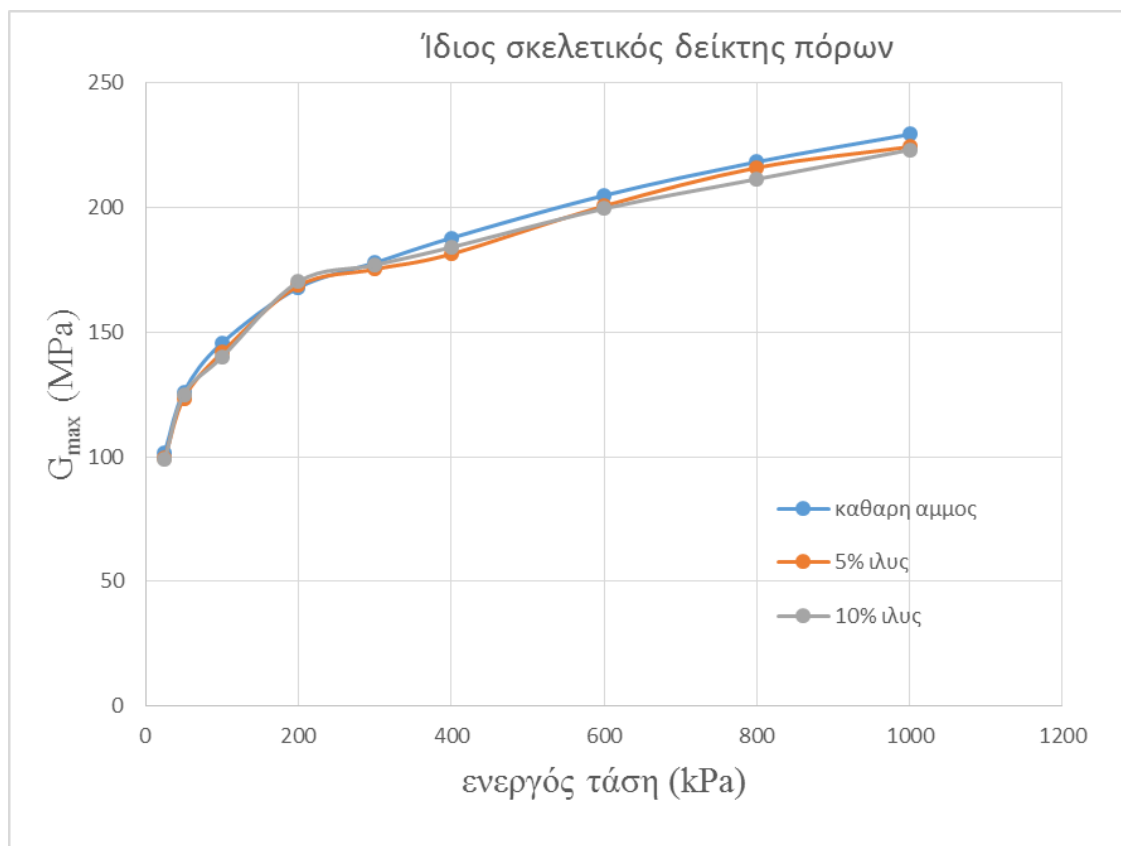


Σχήμα 2 Μεταβολή του  $G_{max}$  με προσθήκη ιλύος για χαλαρά μίγματα ίδιας σχετικής πυκνότητας





Σχήμα 3 Κανονικοποίηση ως προς  $f(e)$  για χαλαρή δομή



Σχήμα 4 Μεταβολή  $G_{max}$  με προσθήκη ιλύος για σταθερό  $e_{sk}$

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια σύγκριση της συμπεριφοράς της άμμου και των μειγμάτων της αφενός σε σχέση με το μέτρο διάτμησης τους και αφετέρου σε σχέση με την αντοχή τους. Ελέγχεται η επίδραση της ενεργού τάσης, της μεταβολή του δείκτη πόρων, της σχετικής πυκνότητας, του δείκτη πόρων  $e$  και του σκελετικού δείκτη πόρων  $e_{sk}$  στην απόκριση της άμμου και των μειγμάτων.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
SOIL MECHANICS LABORATORY

DIPLOMA THESIS  
01111029

**Measurement of stiffness of sand and mixtures of sand and silt using bender elements**

**Alexandros Loukas**

Supervisor: Vasiliki Georgiannou, Associate Professor N.T.U.A.

**Abstract**

This Diploma Thesis studies the effect of silt content in sand-silt mixtures, on their respective shear moduli. The shear modulus is measured in bender element tests and is found to depend on number of factors such as the composition of the materials, their gradation, the void ratio  $e$ , the skeletal void ratio  $e_{sk}$ , the effective stress level and the relative density of the sand and mixtures.

The first chapter of the Thesis is a comprehensive study of bibliographic references on the phenomenon of piezoelectricity, the expression of void ratio  $e$  and  $e_{sk}$ , the waves used for measurement of shear modulus. Furthermore, the results of studies in the literature concerned with the determination of the shear modulus are presented, which are subsequently compared with those of the present Diploma Thesis. Reference is made to the definitions of the various void ratios and their applicability depending on the relative proportions of sand and fines. Particular attention is paid to the waves generated by a piezoelectric element (P and S) and the near field effect. Finally, reference is made to the different methods of calculating the shear modulus and their differences.

In the second chapter a review of the measuring methods from the literature is presented together with the method adopted in this thesis. The latter include details regarding the determination of the arrival point, the frequency of the emitted wave and its waveform and the effective height of the test. The arrival point is selected using the peak-to-peak method, the waveform selected is sinusoidal with frequency of 40 kHz and the effective height is taken as the height from the tip of one piezoelectric element to the edge of the other and the end on the waveform selected sinusoidal.

In the third chapter reference is made to the materials used in this study which are the M31 sand and silt D6. The graphs in Figure 1 show the evolution of the maximum

and minimum void ratio  $e$  as the fines content increases in the sand-silt mixtures. The graphs are compared with the corresponding literature. Finally, the corresponding diagrams for the skeletal void ratio  $e_{sk}$  are also included in Figure 1.

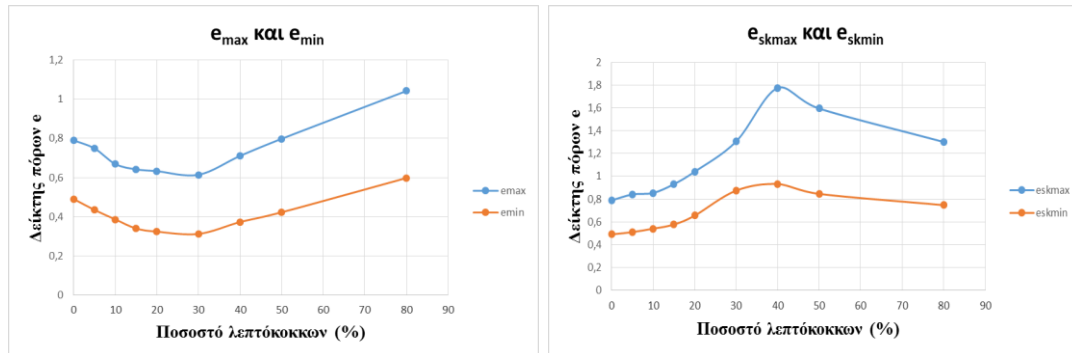


Figure 1 Curves  $e_{max}$ ,  $e_{min}$ ,  $e_{skmax}$  και  $e_{skmin}$  for sand M31 and silt D6 mixtures

The fourth chapter describes the specimen's preparation method and presents the experimental procedure used in this diploma thesis. Representative test results are shown in Figure 2, 3 and 4. These indicate that at constant relative density the shear modulus decreases with increasing silt content. On the other hand, it appears that for a fixed void ratio  $e$  as the percentage of fines increases up to a threshold value the shear modulus decreases and as the silt content is increased above the threshold value the shear modulus increases. However, at the same skeletal void ratio  $e_{sk}$  clean sand and mixtures of 5% and 10% silt content have the same shear modulus.

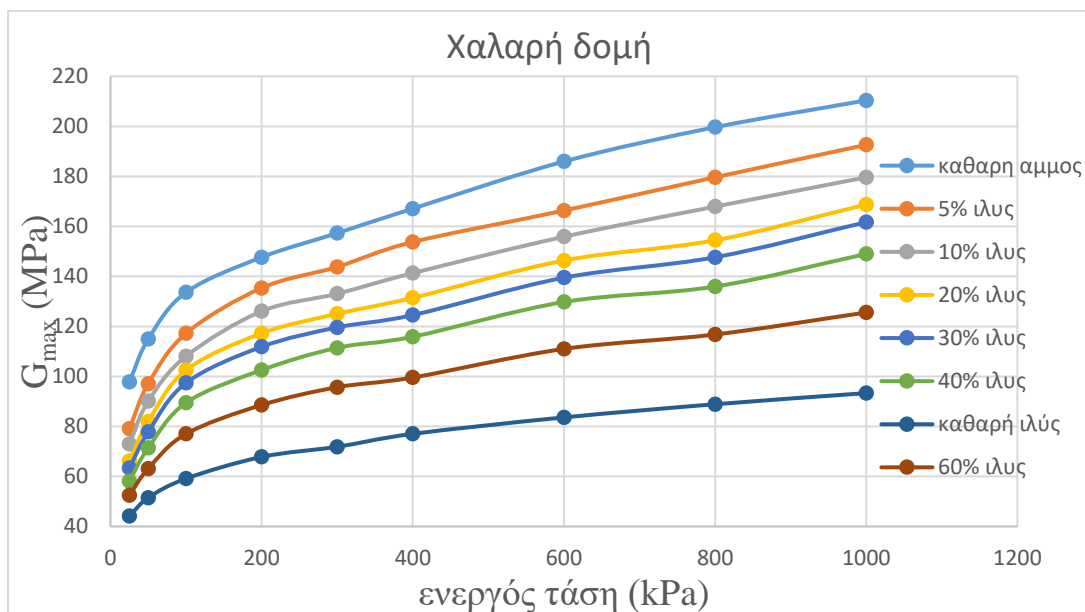


Figure 2 Change in  $G_{max}$  adding silt for loose mixtures

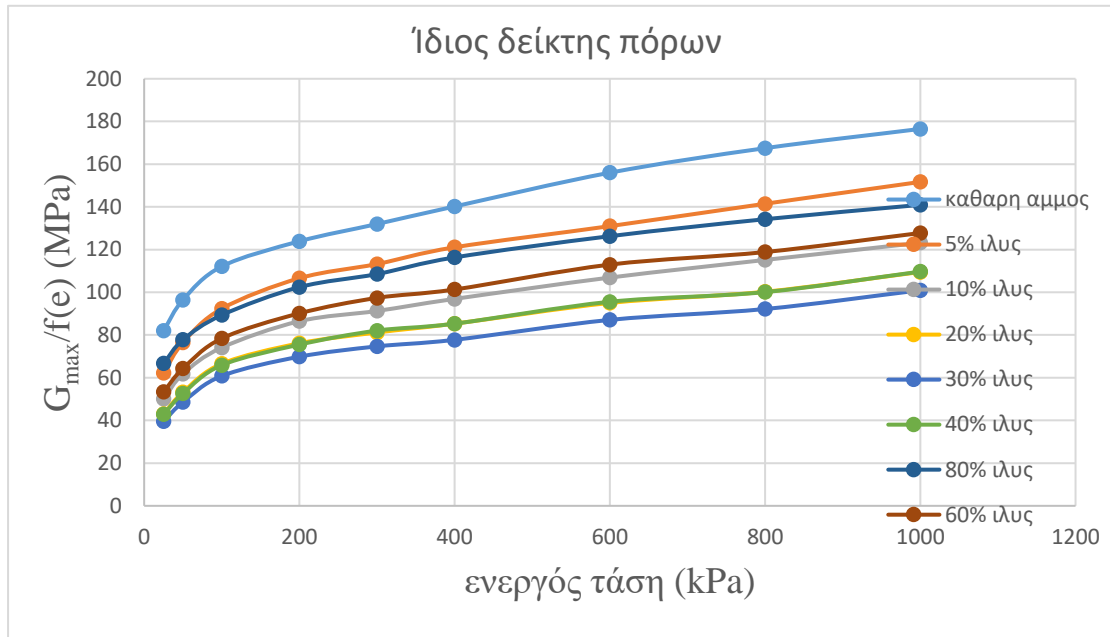


Figure 3 Normalized to  $f(e)$  for a loose structure

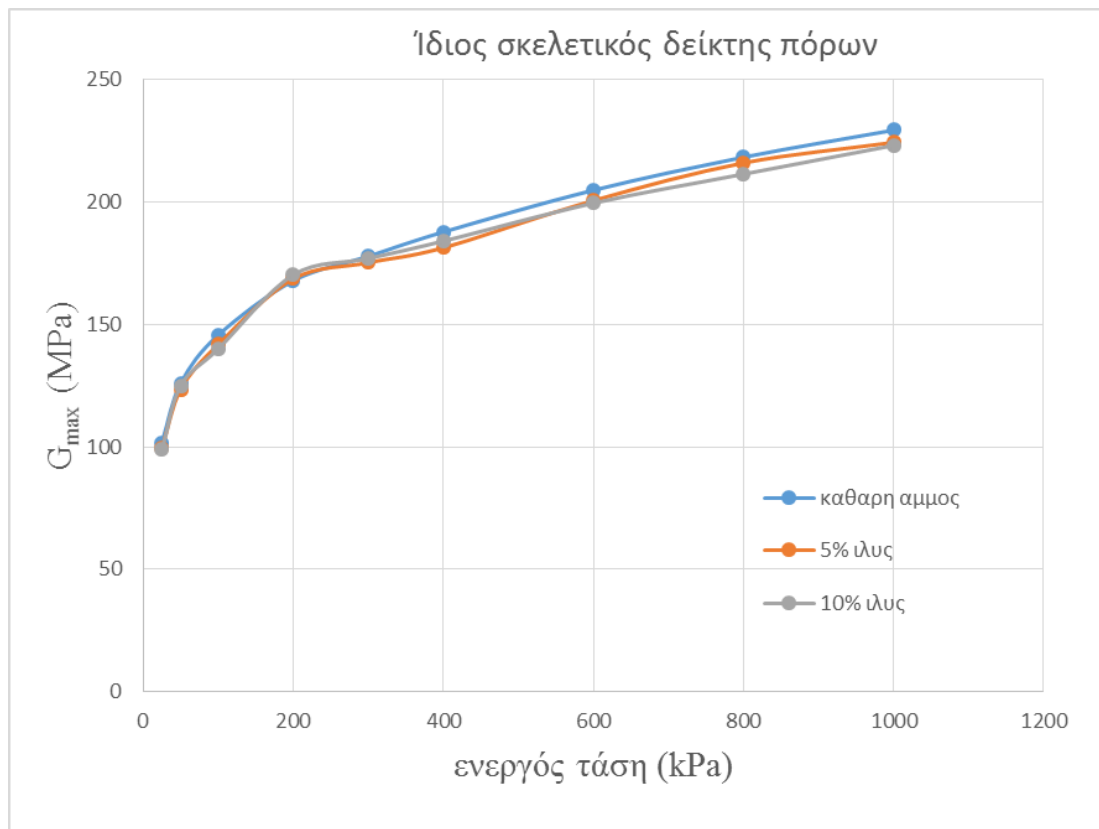


Figure 4 Change  $G_{max}$  adding silt for stable  $e_{sk}$

In the fifth chapter the behavior of the mixtures with respect to shear modulus is compared with their behavior with respect to their strength the effect of effective

stress, void ratio, relative density and skeletal void ratio  $e_{sk}$  on the response of the mixtures is examined.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1° .....	1
Βιβλιογραφικές αναφορές .....	1
1.1 Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο .....	2
1.1.1 Πιεζοηλεκτρισμός.....	2
1.1.2 Κατηγορίες πιεζοηλεκτρικών υλικών.....	2
1.1.3 Ιδιότητες πιεζοηλεκτρικών υλικών.....	3
1.1.4 Βιβλιογραφία .....	4
1.2 Δείκτης πόρων .....	4
1.2.1 Εισαγωγή .....	4
1.2.2 Κατηγορίες μικροδομής .....	5
1.2.3 Δείκτες πόρων για μείγματα.....	7
1.2.4 Καμπύλες $\epsilon_{\max}$ , $\epsilon_{\min}$ .....	9
1.2.5 Βιβλιογραφία.....	11
1.3 Κύματα .....	11
1.3.1 P και S κύματα .....	11
1.3.2 Εγγύς πεδίο.....	14
1.3.3 Άλλα είδη κυμάτων .....	16
1.3.4 Κυματικές ιδιότητες .....	18
1.3.5 Βιβλιογραφία.....	20
1.4 Μέτρο διάτμησης G.....	21
1.4.1 $G_{\max}$ .....	21
1.4.2 Μέθοδοι μέτρησης του G .....	23
1.4.3 Βιβλιογραφία.....	26
1.5 Μετρήσεις μέτρου διάτμησης.....	27
1.5.1 Μετρήσεις από βιβλιογραφία .....	27
1.5.2 Βιβλιογραφία.....	38
Κεφάλαιο 2° .....	41
Μέθοδοι μέτρησης.....	41
2.1 Μέθοδοι μέτρησης στην βιβλιογραφία.....	42
2.1.1 Εισαγωγή .....	42
2.1.2 Χρόνος άφιξης.....	42
2.1.3 Συχνότητα.....	51
2.1.4 Μορφή κύματος.....	57
2.1.5 Ύψος δοκιμίου.....	58

2.1.6 Βιβλιογραφία.....	59
2.2 Μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία .....	60
2.2.1 Είδος κύματος.....	60
2.2.2 Σημείο άφιξης.....	60
2.2.3 Συχνότητα.....	60
2.2.4 Ύψος δοκιμίου.....	61
Κεφάλαιο 3°.....	63
Υλικά.....	63
3.1 Ιδιότητες υλικών.....	64
3.1.1 Εισαγωγή.....	64
3.1.2 Άμμος M13.....	64
3.1.3 Ιλύς D6 .....	65
3.2 Κοκκομετρία υλικών.....	67
3.3 Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων $e_{max}$ και ελάχιστου δείκτη πόρων $e_{min}$ .....	70
3.5 Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων $e_{skmax}$ και ελάχιστου δείκτη πόρων $e_{skmin}$ .....	73
Κεφάλαιο 4°.....	77
Αποτελέσματα πιεζοηλεκτρικών στοιχείων .....	77
4.1 Εισαγωγή.....	78
4.2 Δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων .....	78
4.3 Προετοιμασία μειγμάτων .....	82
4.4 Πειραματική διαδικασία.....	82
4.5 Παρατηρήσεις σχετικά με την πειραματική διαδικασία.....	83
4.6 Περιγραφή πειραμάτων και αποτελεσμάτων .....	83
Κεφάλαιο 5°.....	95
Σύγκριση συμπεριφοράς μέτρου διάτμησης και αντοχής .....	95
5.1 Εισαγωγή.....	96
5.2 Μεταβολή ενεργού τάσης.....	96
5.3 Μεταβολή δείκτη πόρων $e$ ή $e_{sk}$ .....	99
5.4 Σταθερό $D_R$ .....	101
5.5 Σταθερός δείκτης πόρων $e$ .....	103
5.6 Σταθερός δείκτης πόρων $e_{sk}$ .....	105
5.7 Βιβλιογραφία.....	107
6° Κεφάλαιο.....	109
Συμπεράσματα.....	109





Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>  
Βιβλιογραφικές αναφορές

## 1.1 Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο

### 1.1.1 Πιεζοηλεκτρισμός

Η ανακάλυψη του πιεζοηλεκτρισμού έγινε το 1880 από τους Jacques και Pierre Curie. Στα τέλη της δεκαετίας του χίλια εννιακόσια σαράντα διάφορες μελέτες ανακάλυψαν ότι ένα κεραμικό υλικό μπορεί να πολωθεί και να παράγει πιεζοηλεκτρισμό. Πλέον γνωρίζουμε ότι η πολικότητα που χρειάζεται για να δώσουμε, σε ένα ισότροπο πολυκρυσταλλικό κεραμικό, πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες μπορεί να δοθεί εφαρμόζοντας προσωρινά ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Η έλλειψη συμμετρίας των κρυστάλλων ή η ηλεκτρική πολική φύση τους προκαλεί τον πιεζοηλεκτρισμό. Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο όταν επιβάλουμε είναι μηχανικό φορτίο σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, το πλέγμα παραμορφώνει την διπολική στιγμή των κρυστάλλων και παράγεται τάση. Όσο πιο ασύμμετρος είναι ο κρύσταλλος τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς της τάσης. Μια πολύ σημαντική παράμετρος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι η θερμοκρασία Curie, στην οποία τα οι κρύσταλλοι χάνουν την πόλωσή τους και συνεπώς τις ιδιότητές τους. Ορίζεται επίσης ως η θερμοκρασία πάνω από την οποία η συνεχής μόνωση μεγιστοποιείται.

### 1.1.2 Κατηγορίες πιεζοηλεκτρικών υλικών

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα σκληρά πιεζοηλεκτρικά υλικά και τα μαλακά πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Η πρώτη κατηγορία έχει κατασκευαστεί σε υψηλές θερμοκρασίες Curie άνω των 300°C και δεν πολώνονται εύκολα εκτός και αν βρεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχουν καλή γραμμικότητα, χαμηλό δείκτη υστέρησης και μικρή παραμόρφωση για την διαφορά δυναμικού που ασκούμε

Η δεύτερη κατηγορία έχει κατασκευαστεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες Curie (κάτω από 200°C) και πολώνεται εύκολα σε συνθήκες δωματίου ασκώντας ισχυρά ηλεκτρικά πεδία. Έχουν χειρότερη γραμμικότητα, υψηλότερο δείκτη υστέρησης ενώ έχουν μεγαλύτερη παραμόρφωσή για την διαφορά δυναμικού που τους ασκείται. Τέλος οι μεγάλες ηλεκτρικές απώλειες που έχουν με την μορφή θερμότητας δεν επιτρέπει την εφαρμογή υψηλών συχνοτήτων.

### 1.1.3 Ιδιότητες πιεζοηλεκτρικών υλικών

Οι βασικότερες ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι οι εξής:

- i) Ερπυσμός, είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν παρατηρείται αλλαγή στις διαστάσεις όταν αλλάζουμε την διαφορά δυναμικού. Παρατηρείται σε όλα τα πιεζοηλεκτρικά υλικά.
- ii) Υστέρηση, είναι η διαφορά στην παραμόρφωση που εμφανίζεται όταν πλησιάζουμε σε μια διαφορά δυναμικού από χαμηλότερη ή υψηλότερη διαφορά δυναμικού. Παρατηρείται σε όλα τα πιεζοηλεκτρικά υλικά.
- iii) Ενδοτικότητα, είναι η αλλαγή στις διαστάσεις του υλικού όταν επιβάλλεται τάση . Παρατηρείται σε όλα τα πιεζοηλεκτρικά υλικά.
- iv) Δείκτης γήρανσης, τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία με την πάροδο του χρόνου χάνουν με λογαριθμικό ρυθμό τις ιδιότητες τους. Αυτός ο ρυθμός είναι αρκετά σημαντικός στα μαλακά πιεζοηλεκτρικά υλικά εν αντιθέσει με τα σκληρά που είναι αρκετά μικρός. Ωστόσο η εφαρμογή μεγάλης διαφοράς δυναμικού μπορεί να επαναφέρει τις ιδιότητές τους.
- v) Γραμμικότητα, αφορά τη σχέση μεταξύ της διαφοράς δυναμικού και της παραμόρφωσης η οποία δεν είναι πάντα γραμμική. Η μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση της πραγματικής καμπύλης από την βέλτιστη γραμμική σχέση είναι το μέτρο της μη-γραμμικότητας. Στα σκληρά πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι της τάξης του 1% ενώ στα μαλακά 2-10%.
- vi) Θερμοκρασιακές ιδιότητες, τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για θερμοκρασίες κάτω από την θερμοκρασία Curie έχουν αρκετά αξιόπιστη συμπεριφορά . Κοντά στις θερμοκρασίες Curie, το υλικό χάνει την πόλωσή του και κατά συνέπεια τις πιεζοηλεκτρικές του ιδιότητες.

Κατασκευαστικά ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι ένας δύστροπος πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας που αποτελείται από δυο αγώγιμα εξωτερικά ηλεκτρόδια, δύο πιεζοκεραμικά φύλλα και ένα αγώγιμη μεταλλική σφήνα στο κέντρο (σχήμα). Υπάρχουν δυο είδη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, σε σειρά και παράλληλα. Στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε σειρά οι πολικές διευθύνσεις των δυο πιεζοηλεκτρικών στρώσεων είναι απέναντι η μία με την άλλη και το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι συνδεδεμένο στα εξωτερικά ηλεκτρόδια (σχήμα). Στα παράλληλα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία οι δυο πιεζοηλεκτρικές στρώσεις έχουν την ίδια πολική διεύθυνση (σχήμα),

το εδαφικό καλώδιο ακουμπάει και στα δυο εξωτερικά ηλεκτρόδια και το σκληρό καλώδιο είναι συνδεδεμένο με την ενδιάμεση μεταλλική σφήνα. Για την ίδια τάση η παράλληλη σύνδεση παρέχει διπλάσια μετακίνηση από την σύνδεση σε σειρά. Γι' αυτό οι κατασκευαστές προτείνουν τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία με παράλληλη σύνδεση για πομπό και τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε σειρά για δέκτη.

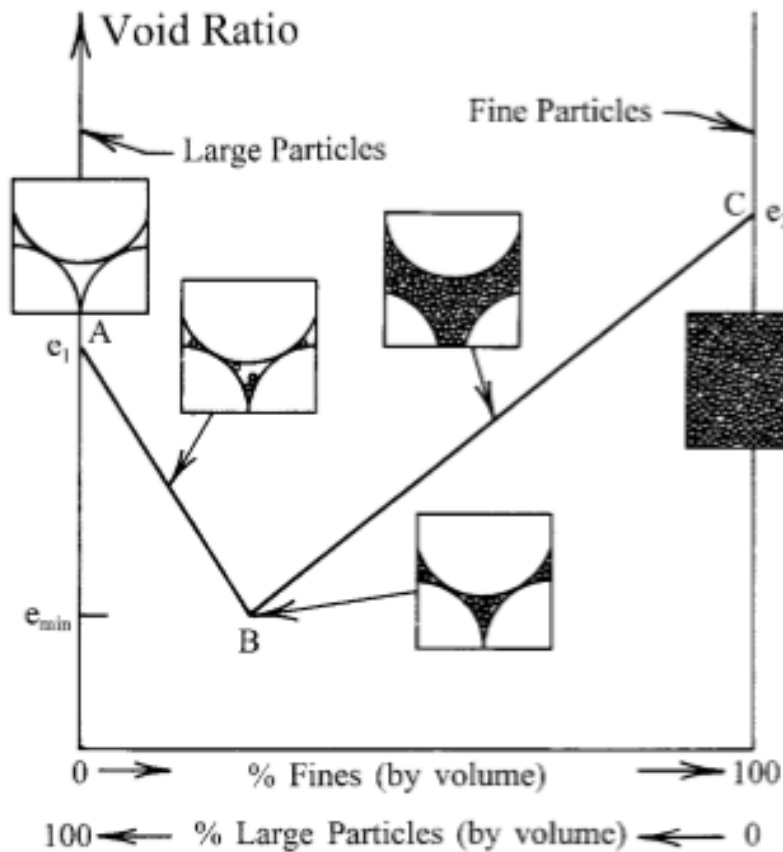
#### 1.1.4 Βιβλιογραφία

- 1) Jong-Sub Lee, J. Carlos Santamarina, “Bender Elements: Performance and signal interpretation”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005
- 2) Dr Markys G Cain, Dr Mark Stewart and Dr Mark Gee, “Degradation of Piezoelectric Materials”, NPL report CMMT (A) 148, 1999
- 3) T.L. Jordan, Z. Ounaies, “Piezoelectric Ceramics Characterization”, NASA/CR-2001-211225 ICASE Report No. 2001-28, 2001
- 4) “Piezoelectric Ceramics (PIEZOTITE) Sensors”, muRata

## 1.2 Δείκτης πόρων

### 1.2.1 Εισαγωγή

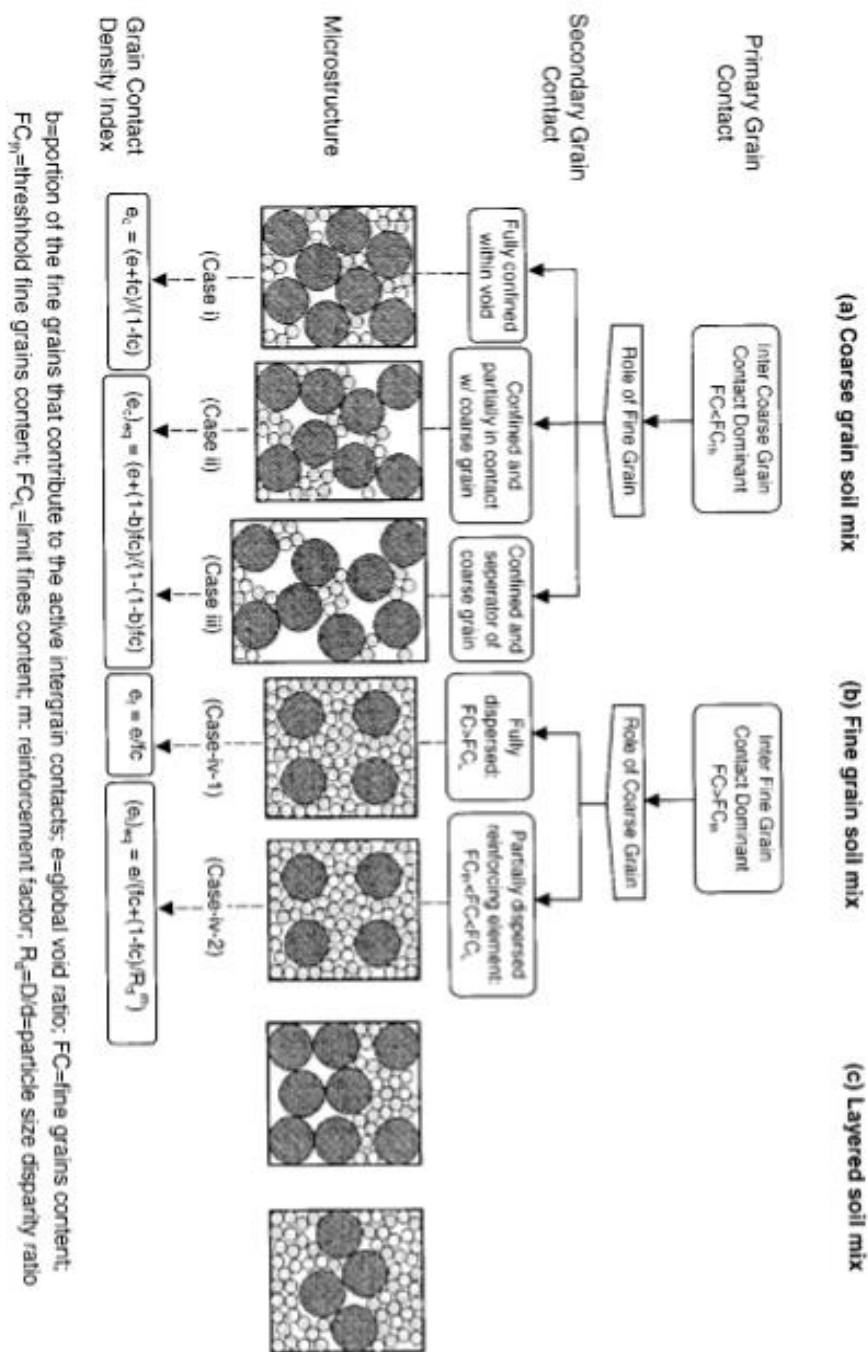
Η μηχανική συμπεριφορά ενός φυσικού εδάφους εξαρτάται από την ορυκτολογία, το μέγεθος, το σχήμα, η διάταξη των σωματιδίων, οι δεσμοί των σωματιδίων, και η αλληλεμπλοκή τους. Ο βαθμός της αλληλεμπλοκής, το μέγεθος και το είδος των κόκκων μέσα στο έδαφος επηρεάζει τον τρόπο μετάδοσης των δυνάμεων εντός του εδάφους. Και κατεπέκταση την συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης και την αντοχή του εδάφους. Για λύση του προβλήματος οι γεωτεχνικοί χώρισαν τα εδάφη σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τα λεπτόκοκκα και τα χονδρόκοκκα. Επιπλέον ο δείκτης πόρων και η σχετική πυκνότητα χρησιμοποιούνται ως δείκτης για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς. Αυτή η κατηγοριοποίηση ήταν πολύ χρήσιμη για τα χονδρόκοκκα σε στατικές ή συνθήκες αργής φόρτισης καθώς και στα λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη σε συνθήκες γρήγορης φόρτισης. Ωστόσο αυτή η κατηγοριοποίηση έχει πρόβλημα σε ιλυώδη άμμο και αμμώδη ιλύ σε σεισμικές συνθήκες. Η σχέση του δείκτη πόρων με το ποσοστό λεπτόκοκκων καθώς και η μικροδομή του μείγματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 1.1 Τύποι μικροδομής για διαφορετικά ποσοστά ιλύος. (Yamaturo et al (2001))

### 1.2.2 Κατηγορίες μικροδομής

Η μικροδομή ενός κοκκώδους μείγματος μπορεί να αποτελείται από επαφές κόκκων διαφόρων ειδών που οδηγούν σε διαφορετική αστράγγιστη διατμητική απόκριση. Τα τρία είδη συνδέσεων ενός κοκκώδους μίγματος είναι α) τα χονδρόκοκκα σε κύρια σύνδεση, β) τα λεπτόκοκκα σε κύρια σύνδεση και γ) η δημιουργία είτε λεπτόκοκκης είτε χονδρόκοκκης στρώσης και φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:



b=proportion of the fine grains that contribute to the active intergrain contacts; e=global void ratio; FC=fine grains content;  $FC_{cr}$ =threshold fine grains content;  $FC_c$ =limit fines content; m: reinforcement factor;  $R_p=D/d$ =particle size disparity ratio

Σχήμα 1.2 Κατάταξη κοκκώδων εδαφών (Thevanayagam et al (2002))

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα η πρώτη κατηγορία χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες. Στην πρώτη τα λεπτόκοκκα βρίσκονται στα κενά που δημιουργούν τα χονδρόκοκκα και βοηθούν σε μικρό βαθμό την σκελετική δομή (περίπτωση 1) στην

δεύτερη υποκατηγορία υπάρχει μερική υποστήριξη του κυρίου σκελετού των χονδρόκοκκων (περίπτωση 2) και στην τρίτη τα λεπτόκοκκα διαχωρίζουν τους χονδρόκοκκους κόκκους (περίπτωση 3). Η δεύτερη κατηγορία χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες, στην πρώτη τα χονδρόκοκκα είναι πλήρως διασκορπισμένα μέσα στα λεπτόκοκκα (περίπτωση 4) ενώ στην δεύτερη είναι μερικώς διασκορπισμένα (περίπτωση 5). Στην τρίτη κατηγορία το στρώμα αποτελείται είτε μόνο από χονδρόκοκκα είτε μόνο από λεπτόκοκκα.

Η πρώτη περίπτωση ισχύει όταν η διάμετρος  $d$  των λεπτόκοκκων είναι πολύ μικρότερη από τα κενά της σκελετικής δομής των χονδρόκοκκων και τα κενά αυτά δεν έχουν γεμίσει με λεπτόκοκκα. Η πρώτη περίπτωση θεωρείται πολύ σπάνια ενώ η δεύτερη και η τρίτη περίπτωση είναι πιο συνηθισμένες. Μια μικρή διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων δυο και τρία είναι ότι στην τρίτη περίπτωση τα λεπτόκοκκα συμμετέχουν ενεργά στην εσωτερική αλυσίδα δυνάμεων διαχωρίζοντας τα χονδρόκοκκα. Στην τέταρτη περίπτωση το ποσοστό λεπτόκοκκων  $FC$  είναι πολύ μεγάλο. Στον ίδιο δείκτη πόρων η μετάβαση από την περίπτωση 1 στην περίπτωση 4 μπορεί να συμβεί φυσικά αυξάνοντας το ποσοστό λεπτόκοκκων πέρα από το όριο  $threshold$ . Συνεπώς για  $FC < FC_{th}$  στην συμπεριφορά του εδάφους τα χονδρόκοκκα έχουν πιο ενεργό ρόλο, ενώ για  $FC > FC_{th}$  τα λεπτόκοκκα καθορίζουν την συμπεριφορά του εδάφους μιας και οι δεσμοί των χονδρόκοκκων αρχίζουν να σπάνε και να διαχωρίζονται. Ένα σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκων είναι το  $FC_L$ , πάνω από αυτό το όριο τα λεπτόκοκκα καθορίζουν την συμπεριφορά του μείγματος. Συνεπώς υπάρχει ένα διάστημα από το  $FC_{th}$  μέχρι το  $FC_L$  όπου η συμπεριφορά του μείγματος εξαρτάται και από τα λεπτόκοκκα και από τα χονδρόκοκκα. Ο δείκτης πόρων ενός μείγματος ( $e$ ) είναι ίσος με  $e = V_v / V_s$  όπου  $V_v$  είναι ο όγκος κενών και  $V_s$  ο όγκος των κενών. Ο δείκτης πόρων χρησιμοποιείται συνήθως σε ομοιογενή εδάφη ενώ δεν μπορεί να χαρακτηρίσει αποτελεσματικά την μηχανική συμπεριφορά των μειγμάτων. Ακόμα και στον ίδιο δείκτη πόρων διαφορές όπως το μέγεθος των κόκκων προκαλούν διαφορές στη μηχανική συμπεριφορά.

### 1.2.3 Δείκτες πόρων για μείγματα

Ο Thevanayagam (1994) ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να προσδιορίσει τον δείκτη πόρων σε μείγμα λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων. Συγκεκριμένα όρισε δυο δείκτες τον  $e_f$  για μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων και τον  $e_c$  για μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων.



$$e_c = \frac{e + f_c}{1 - f_c}$$

Όπου για  $f_c=0$  προκύπτει ο κλασικός δείκτης πόρων για χονδρόκοκκο υλικό.

$$e_f = \frac{e}{f_c}$$

Ενώ για  $f_c=1$  προκύπτει ο κλασικός δείκτης πόρων για λεπτόκοκκο υλικό.

Για  $FC < FC_{th}$  κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει την εξίσωση  $e_c$  θεωρώντας ότι τα λεπτόκοκκα δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του μίγματος. Ωστόσο η μηχανική συμπεριφορά ενός μείγματος για μια τιμή  $e_c$  αναμένεται να είναι καλύτερη από το χονδρόκοκκο για την ίδια τιμή του  $e_c$ . Συνεπώς ο Thevanayagam πρότεινε την εξίσωση:

$$e_{eq} = \frac{e + (1 - b)f_c}{1 - (1 - b)f_c}$$

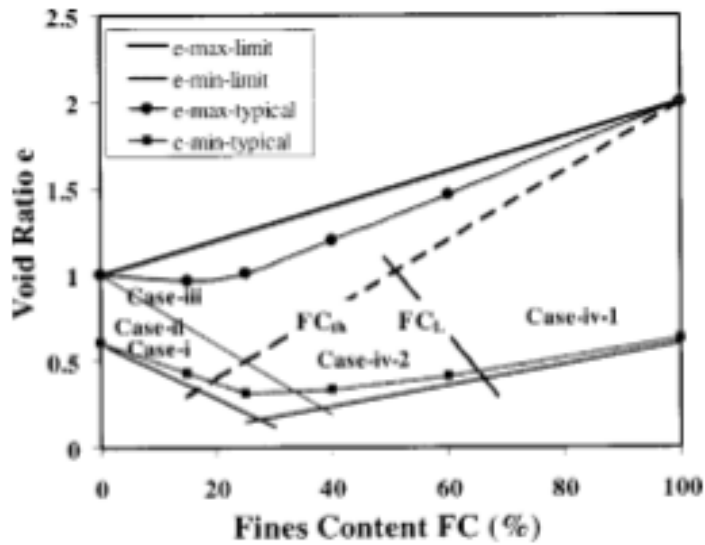
Όπου  $f_c = FC/100$ , το  $b$  υποδηλώνει πόσα λεπτόκοκκα κάνουν καλύτερη την μηχανική συμπεριφορά του μείγματος, πιο ανθεκτικό. Όταν  $b=0$  κανένα από τα λεπτόκοκκα δεν ενισχύει την συμπεριφορά του μείγματος, ενώ όταν  $b=1$  όλα τα λεπτόκοκκα ενισχύουν το μείγμα. Η σημασία του  $b$  εξαρτάται από την ανισότητα του μεγέθους των κόκκων  $R_d$  και τα χαρακτηριστικά των κόκκων.

Επίσης για  $FC_{th} < FC < FC_L$  παρότι κάποιος θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει την εξίσωση  $e_f$  εφόσον τα λεπτόκοκκα είναι σε πλήρη επαφή μεταξύ τους πρέπει να λάβουμε υπόψιν την ενίσχυση που προσφέρουν τα χονδρόκοκκα. Συνεπώς ο Thevanayagam πρότεινε την χρήση της εξίσωσης:

$$e_{feq} = \frac{e}{f_c + \frac{1 - f_c}{(R_d)^m}} < e_f$$

Όπου ο συντελεστής  $m$  εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κόκκων και την διάταξη των λεπτόκοκκων και παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1.

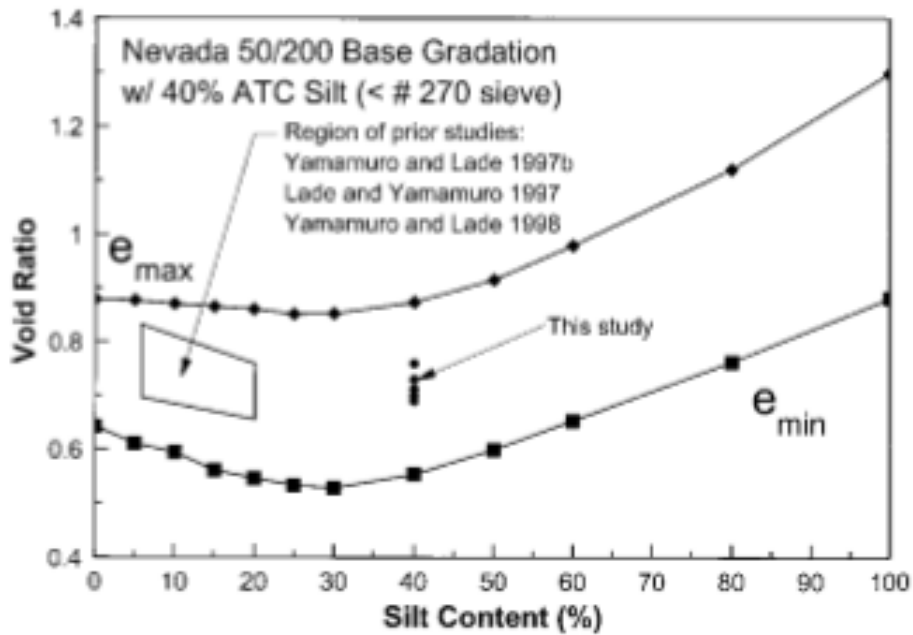
Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τις περιοχές που χαρακτηρίζουν τις περιπτώσεις της μικροδομής ένα έως τέσσερα με τα γραμμικά όρια  $FC_{th}$  και  $FC_L$  καθώς και τις καμπύλες  $e_{max}$  και  $e_{min}$ .



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα προσδιορισμού της κάθε περίπτωσης μικροδομής (Thevanayagam et al (2002)).

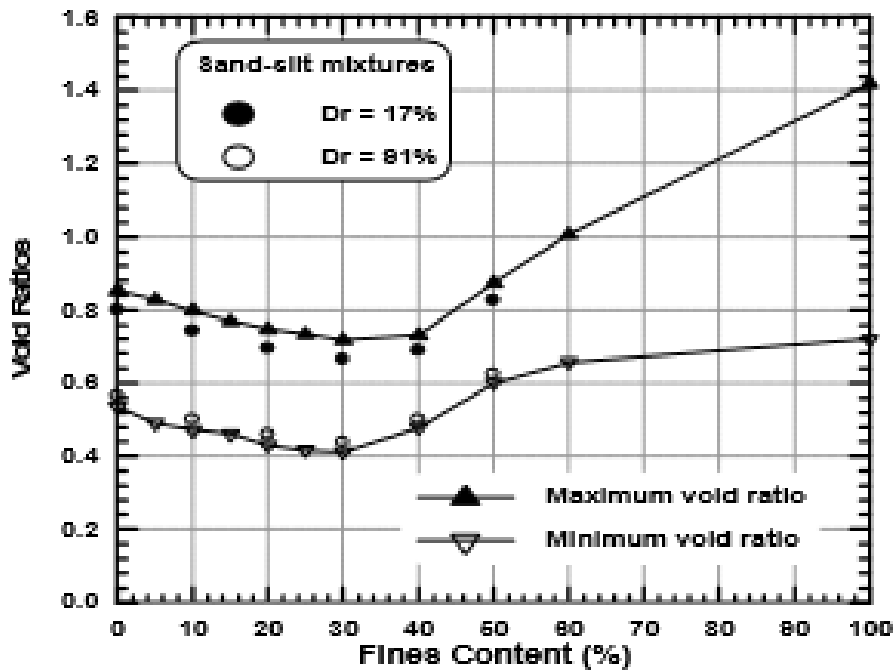
#### 1.2.4 Καμπύλες $e_{max}$ , $e_{min}$

Μετά από πειράματα που έκαναν οι Yamamuro et al (2002) για τον προσδιορισμό του μέγιστου και του ελάχιστου δείκτη πόρων για ποσοστά ιλύος από 0-100% σε άμμο Nevada 50/200 και ιλύ ATC η οποία πέρασε από το κόσκινο No270 προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Το ποσοστό που τα λεπτόκοκκα γεμίζουν πλήρως τα κενά των πόρων (threshold) φαίνεται να είναι κοντά στο 30%.



Σχήμα 1.4 Καμπύλες  $e_{max}$  και  $e_{min}$  (Yamamuro et al (2002))

Μια άλλη ομάδα μελετητών που έκαναν πειράματα για τον προσδιορισμό του μέγιστου και του ελάχιστου δείκτη πόρων ήταν οι M. Belkhatir et al (2010), οι οποίοι έκαναν πειράματα σε μείγματα άμμου και ιλύος και τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.5 το ποσοστό λεπτόκοκκων που χρειάζεται για να γεμίσουν πλήρως τα κενά των πόρων είναι κοντά στο 30%, όπως είχε προκύψει και από τα πειράματα των Arroyo et al (2001).



Σχήμα 1.5 Καμπύλες  $e_{max}$  και  $e_{min}$  (Belkhatir et al 2010)

### 1.2.5 Βιβλιογραφία

- 1) S. Thevanayagam, T. Shenthan, S. Mohan, J. Liang, “Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands and Sandy Silts”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2002
- 2) Jerry A. Yamamuro, Kelly M. Covert, “Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001
- 3) M. Belkhatir, A. Arab, N. Della, H. Missoum, T. Schanz, “Effect of grading characteristics on the undrained shear strength of sand-silt mixtures”, SICZS, 2010

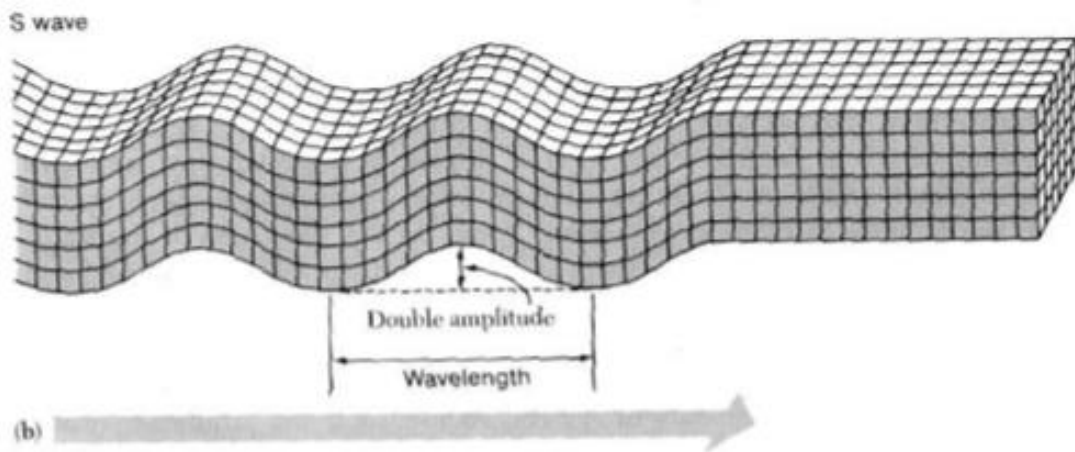
## 1.3 Κύματα

### 1.3.1 P και S κύματα

Πρωτογενώς σε ένα συνεχές μέσο αναπτύσσονται τα S και P κύματα.

Τα S κύματα ονομάζονται εγκάρσια ή διατμητικά και πήραν το όνομά τους από την εγκάρσια διεύθυνση της κίνησης που εκτελούν τα υλικά σημεία σε σχέση με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα S κύματα στο χώρο αναλύονται σε δυο

συνιστώσες, την SH και την SV. Στην SH η διεύθυνση κίνησης των υλικών σημείων είναι κάθετη στη διατομή του κατακόρυφου επιπέδου. Αντίθετα στην SV η διεύθυνση κίνησης είναι εντός του επιπέδου. Όταν ένα SH κύμα φτάσει σε κάποιο σύνορο, τότε και το ανακλώμενο και το διαθλώμενο κύμα που προκύπτει είναι S, ενώ όταν ένα SV κύμα φτάσει σε κάποιο σύνορο προκύπτουν δυο ανακλώμενα (ένα P και ένα S) και δυο διαθλώμενα (ένα P και ένα S).

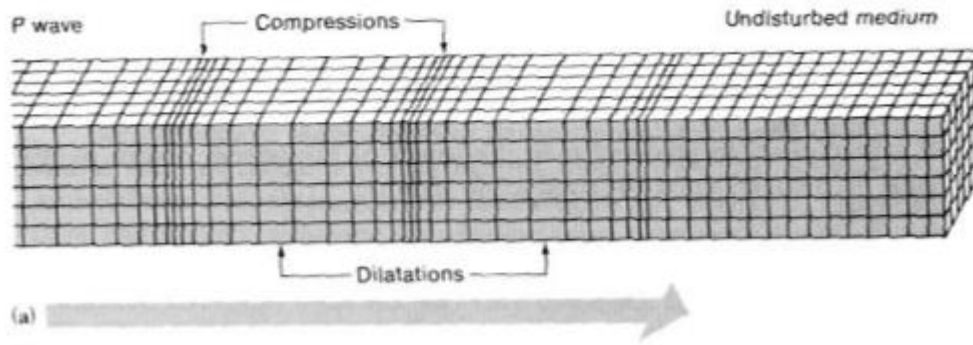


Σχήμα 1.6 Χαρακτηριστική μορφή S κύματος (Sungsoo Yoon (2005))

Εκτός από τα S κύματα υπάρχουν και τα P κύματα τα οποία ονομάζονται διαμήκη ή διαστολικά. Πήραν το όνομά τους από την παράλληλη διεύθυνση κίνησης των υλικών σημείων στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα P κύματος είναι η διάδοση του ήχου. Η ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων προκύπτει από την σχέση:

$$V_p = \left( \frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \right)^{0.5}$$

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας και ν ο λόγος Poisson.



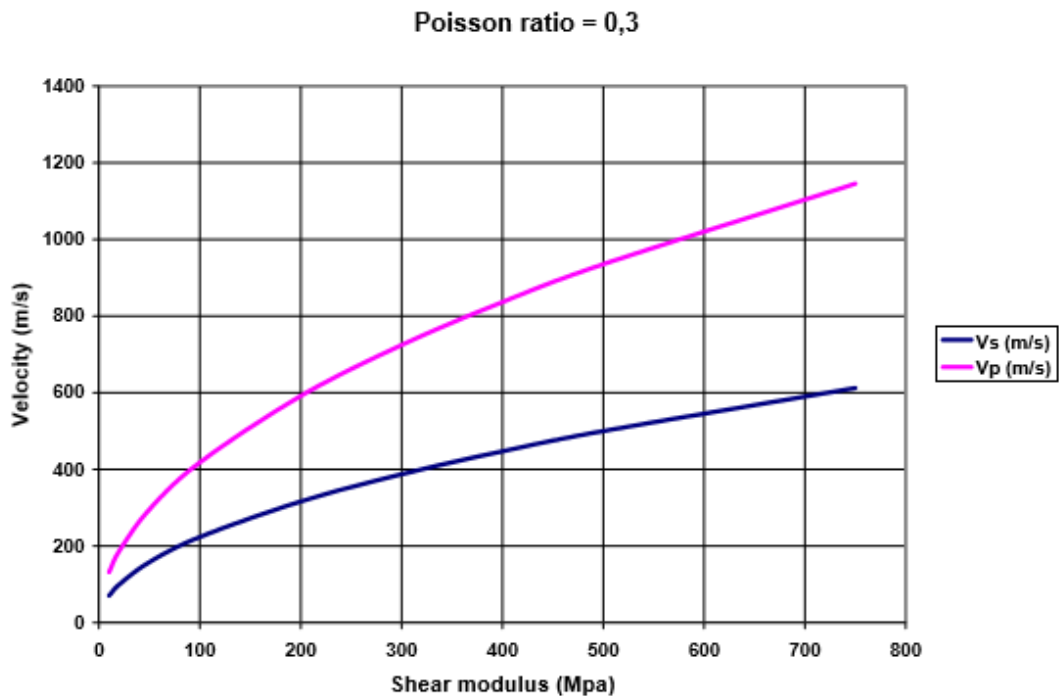
Σχήμα 1.7 Χαρακτηριστική μορφή P κύματος (Sungsoo Yoon (2005))

Διαφορά μεταξύ P και S κυμάτων

Η σχέση ταχυτήτων μεταξύ P και S κυμάτων προκύπτει από την σχέση:

$$\frac{V_p}{V_s} = \left( \frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu} \right)^{0.5}$$

Γραφικά η διαφορά των ταχυτήτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.8 Σχέση ταχυτήτων P και S κυμάτων (Arroyo et al (2001))

### 1.3.2 Εγγύς πεδίο

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των πειραμάτων των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι το φαινόμενο του εγγύς πεδίου. Από τους πρώτους που αναφέρθηκε στο φαινόμενο του εγγύς πεδίου ήταν ο Sanches-Salinerο (1986) ο οποίος έκανε μια σειρά πειραμάτων σε έναν πολλαπλό δέκτη. Πραγματοποίησαν μια συστηματική ανάλυση της αναπαραγωγής ενός ημιτονοειδούς κύματος σε ένα ισότροπο ελαστικό πεδίο. Το φαινόμενο του εγγύς πεδίου οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα των P κυμάτων τα οποία καλύπτουν την στιγμή άφιξης των πιο αργών S κυμάτων. Η επίδραση του εγγύς πεδίου είναι έντονη όταν το μήκος του δοκιμίου είναι 0,25-4 μήκη κύματος. Το μήκος κύματος μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο  $\lambda = v_s/f$  όπου f η συχνότητα του κύματος σε Hz. Οι M. Coop et al (1996) βασιζόμενοι στις εξισώσεις του Sanches-Salinerο όρισαν την εξίσωση της εγκάρσιας κίνησης S ως:

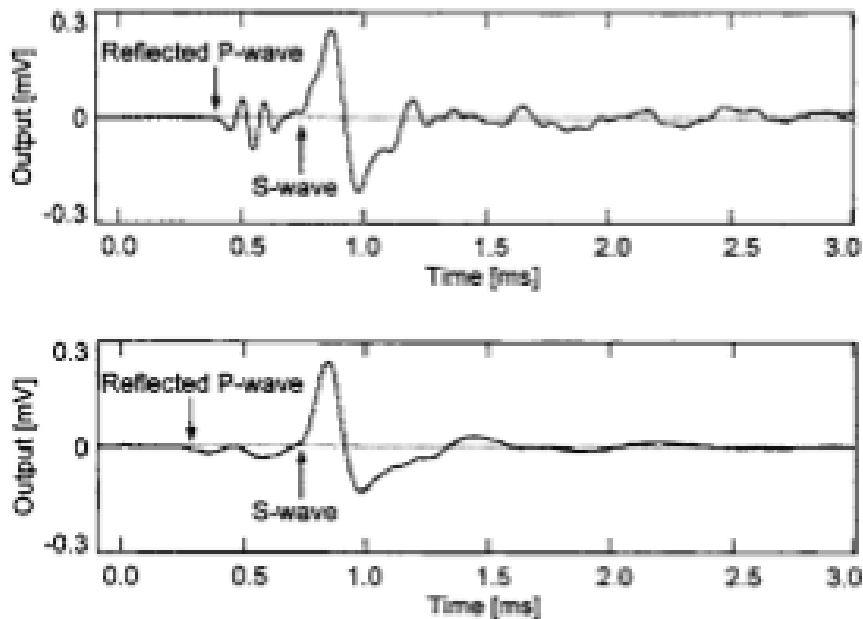
$$S = \frac{\Gamma}{(4\pi\rho v_s^2)}$$

Όπου η σταθερά  $\Gamma$  δίνεται από τον τύπο:

$$\Gamma = \frac{1}{d} e^{-i(\omega d/v_s)} + \left( \frac{1}{i \frac{\omega d^2}{v_p}} - \frac{1}{\frac{\omega^2 d^3}{v_p^2}} \right) e^{-i(\omega d/v_s)} - \left( \frac{v_s}{v_p} \right)^2 \left( \frac{1}{i \frac{\omega d^2}{v_p}} - \frac{1}{\frac{\omega^2 d^3}{v_p^2}} \right) e^{-i(\omega d/v_p)}$$

Όπου d η διανύμενη απόσταση,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $v_s$  η ταχύτητα των S κύματος και  $v_p$  η ταχύτητα των P κυμάτων. Η παραπάνω εξίσωση αποτελείται από τρία ζευγάρια συνιστωσών. Και οι τρεις συνιστώσες αναφέρονται στην εγκάρσια κίνηση ωστόσο οι 2 πρώτες εξαρτώνται από την ταχύτητα των S κυμάτων ενώ η Τρίτη από την ταχύτητα των P κυμάτων. Επιπλέον η πρώτη συνιστώσα αναφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις ενώ η δεύτερη και η τρίτη συνιστώσα αναφέρεται στις κοντινές αποστάσεις. Αρχικά ο Sanches-Salinerο εξέφρασε τα αποτελέσματα του με τον λόγο  $d/\lambda$  τον οποίο στην συνέχεια οι M. Coop et al (1996) ονόμασαν  $R_d$ . Η σταθερά  $R_d$  μέσω της παραπάνω

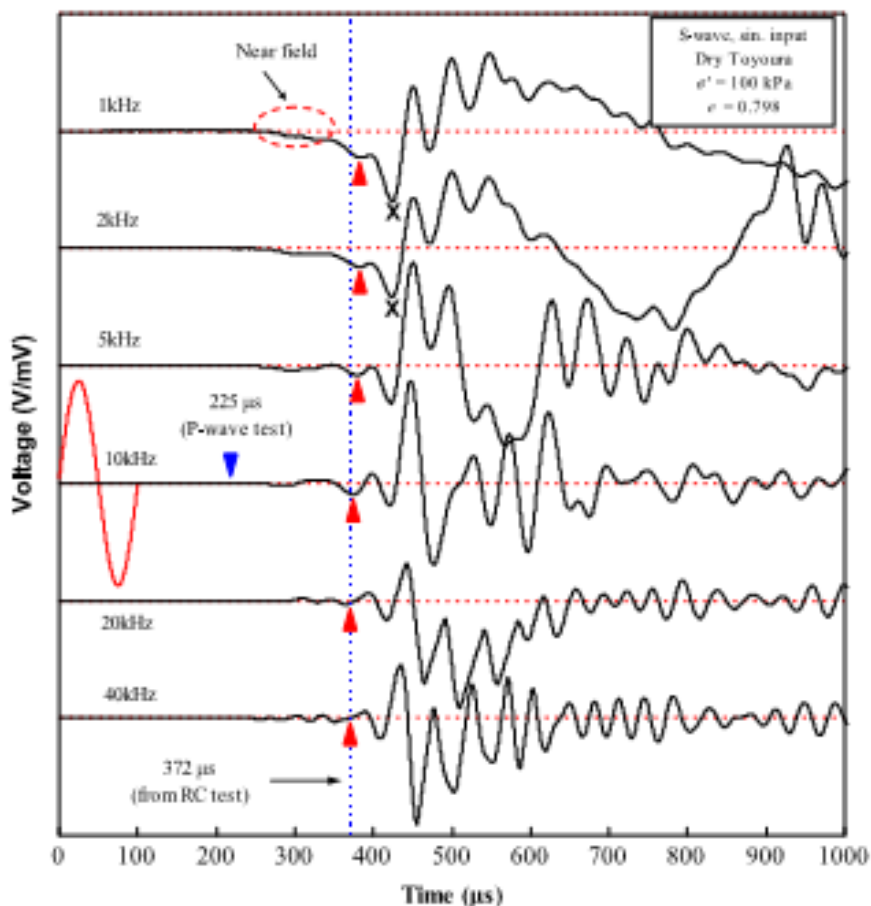
εξίσωσης και των συνιστωσών καθορίζει την μορφή του λαμβανόμενου κύματος. Και οι δυο παρατήρησαν ότι για μικρές τιμές του  $R_d$  το φαινόμενο του εγγύς πεδίου ήταν έντονο, ενώ για μεγάλες τιμές του  $R_d$  το φαινόμενο εξασθενούσε. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται δυο παραδείγματα λαμβανόμενων κυμάτων στα οποία είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε το σημείο άφιξης του διατμητικού κύματος λόγω του φαινομένου του εγγύς πεδίου:



Σχήμα 1.9 Διαφορά στην άφιξη των P και S κυμάτων (Jong-Sub Lee et al (2005))

Τέλος ένα επίσης χαρακτηριστικό παράδειγμα εγγύς πεδίου φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, η οποία είναι από πειράματα των Xiaoliang Gu et al (2013) σε άμμο Τογούρα:





Σχήμα 1.10 Χαρακτηριστικό παράδειγμα εγγύς πεδίου (Xiaoqiang Gu et al (2013))

### 1.3.3 Άλλα είδη κυμάτων

Από τον συνδυασμό των P και S κυμάτων προκύπτουν όλα τα υπόλοιπα κύματα . Μια βασική κατηγορία κυμάτων είναι τα επιφανειακά. Τα πιο γνωστά επιφανειακά κύματα είναι τα κύματα Rayleigh και Love.

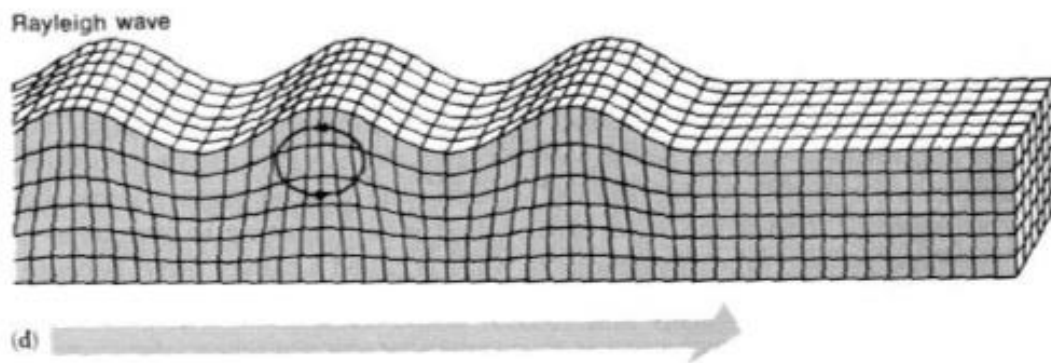
Τα κύματα Rayleigh ταξιδεύουν κατά μήκος του εδάφους και δεν διαδίδονται στην γη.

Οι μετακινήσεις που προκαλούν προκύπτουν από τους τύπους:

$$u = iAN \left[ -\exp\left\{-\frac{q}{N}(zN)\right\} + \frac{2\frac{q}{N} \frac{s}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} \exp\left\{-\frac{s}{N}(zN)\right\} \right] \exp\{i(\omega t)Nx\}$$

$$w = iAN \left[ \frac{2\frac{q}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} \exp\left\{-\frac{s}{N}(zN)\right\} - \frac{q}{N} \exp\left\{-\frac{q}{N}(zN)\right\} \right] \exp\{i(\omega t)Nx\},$$

Η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh είναι λίγο μικρότερη από την ταχύτητα των S κυμάτων. Όσο μεγαλύτερη περίοδο έχουν τα κύματα Rayleigh τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης έχουν, ενώ όσο μικρότερη περίοδο έχουν τόσο μικρότερη ταχύτητα διάδοσης έχουν.



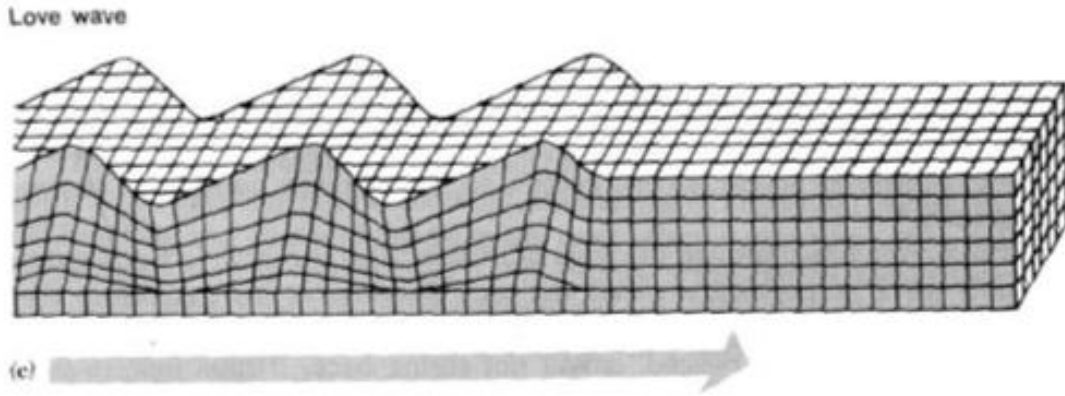
Σχήμα 1.11 Χαρακτηριστική μορφή κύματος Rayleigh (Sungsoo Yoon (2005))

Τα κύματα Love είναι ένα άλλο είδος επιφανειακών κυμάτων που εμφανίζονται όταν ένας ελαστικός ημίχωρος καλύπτεται από ένα μαλακό στρώμα.

Οι μετακινήσεις που προκαλούν προκύπτουν από τους τύπους:

$$u_1 = \{A \exp(is_1 z) + B \exp(-is_1 z)\} \exp(-iqy) \exp(i\omega t)$$

$$u_2 = C \exp(-is_2 z) \exp(-iqy) \exp(i\omega t),$$

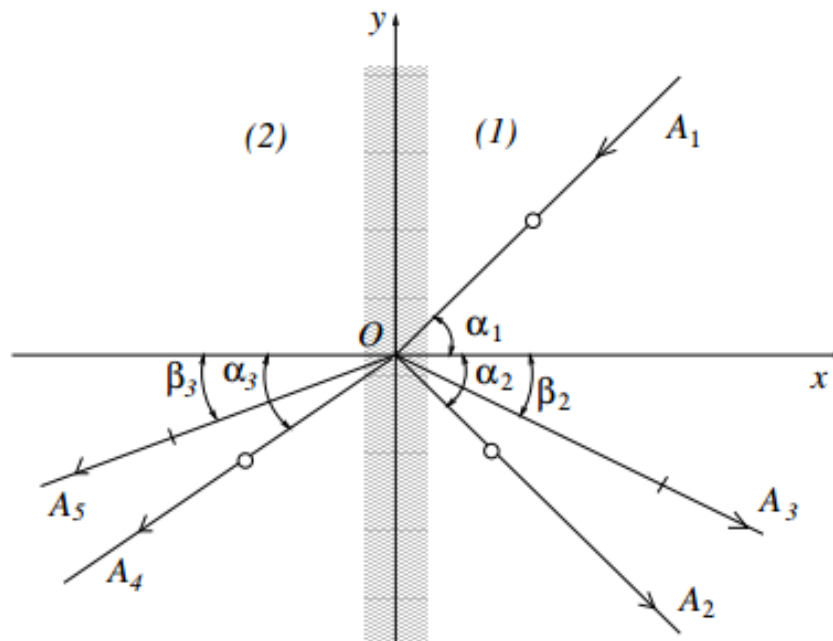


Σχήμα 1.12 Χαρακτηριστική μορφή κύματος Love (Sungsoo Yoon (2005))

### 1.3.4 Κυματικές ιδιότητες

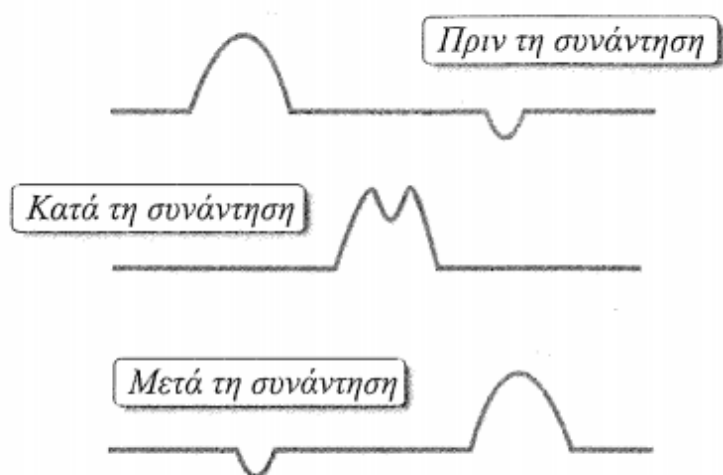
Οι σημαντικότερες ιδιότητες των κυμάτων που διαδίδονται στο χώρο είναι οι εξής:

A) Ανάκλαση και διάθλαση, είναι το φαινόμενο κατά το οποίο όταν ένα κύμα, που διαδίδεται σε κάποιο μέσο, συναντήσει την επιφάνεια που διαχωρίζει το μέσο διάδοσης με κάποιο άλλο στο οποίο διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα τότε ένα μέρος του κύματος ανακλάται και παραμένει στο ίδιο μέσο και ένα μέρος διαθλάται και περνάει στο άλλο μέσο με διαφορετική πορεία.



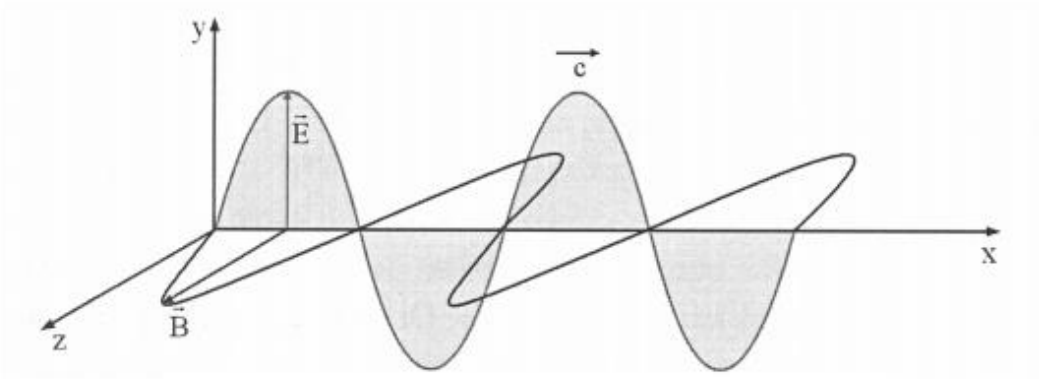
Σχήμα 1.13 Ανάκλαση και διάθλαση κυμάτων (Ευταξιώπουλος (2012))

Β) Συμβολή, είναι το φαινόμενο κατά το οποίο όταν δυο ή περισσότερα κύματα διαδίδονται ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή κάθε σημείο απομακρύνεται από την θέση ισορροπίας του. Αυτή η απομάκρυνση προκύπτει από την αρχή της επαλληλίας ως άθροισμα των επιμέρους μετατοπίσεων.



Σχήμα 1.14 Συμβολή κυμάτων

Γ) Πόλωση, είναι χαρακτηριστικό μόνο των εγκάρσιων κυμάτων που διαδίδονται στο χώρο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πόλωση αναφέρεται στον προσανατολισμό του επιπέδου της διαταραχής. Συνεπώς ένα πολωμένο κύμα διαταράσσεται σε μοναδικό επίπεδο και το αντίστροφο.



Σχήμα 1.15 Ηλεκτρομαγνητικό πολωμένο κύμα (Πρελορέτζος)

Δ) Περίθλαση, είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα κύμα αλλοιώνεται από κάποιο εμπόδιο, το οποίο ονομάζεται σκεδαστής. Στην περιοχή κοντά στον σκεδαστή έχουμε δημιουργία δευτερευουσών πηγών λόγω της ενέργειας που μεταφέρεται παράλληλα στο εμπόδιο. Η κατανομή της περίθλασης εξαρτάται από το μέγεθος και την μορφή του σκεδαστή, αλλά είναι ανεξάρτητη από την φύση του.

### 1.3.5 Βιβλιογραφία

- 1) Ikuro Towhata, “Geotechnical Earthquake Engineering”, Springer, 2008
- 2) Jong-Sub Lee, J. Carlos Santamarina, “Bender Elements: Performance and signal interpretation”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005
- 3) Marcos Arroyo, “Pulse tests in soil samples”, Department of Civil Engineering, 2001
- 4) Muhammad E. Rahman, Vikram Pakrashi, Subhadeep Banerjee, Trevor Orr, “Suitable Waves for Bender Element Tests: Interpretations, Errors and Modelling Aspects”, *Revista Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2016
- 5) Δ. Ευταξίουπουλος, “Διάδοση κυμάτων στα υλικά”, 2012
- 6) Sungsoo Yoon, “Array-Based Measurements of Surface Wave Dispersion and Attenuation Using Frequency-Wavenumber Analysis”, Georgia Institute of Technology, 2005
- 7) Α. Πρελορέτζος, “Πόλωση του φωτός”

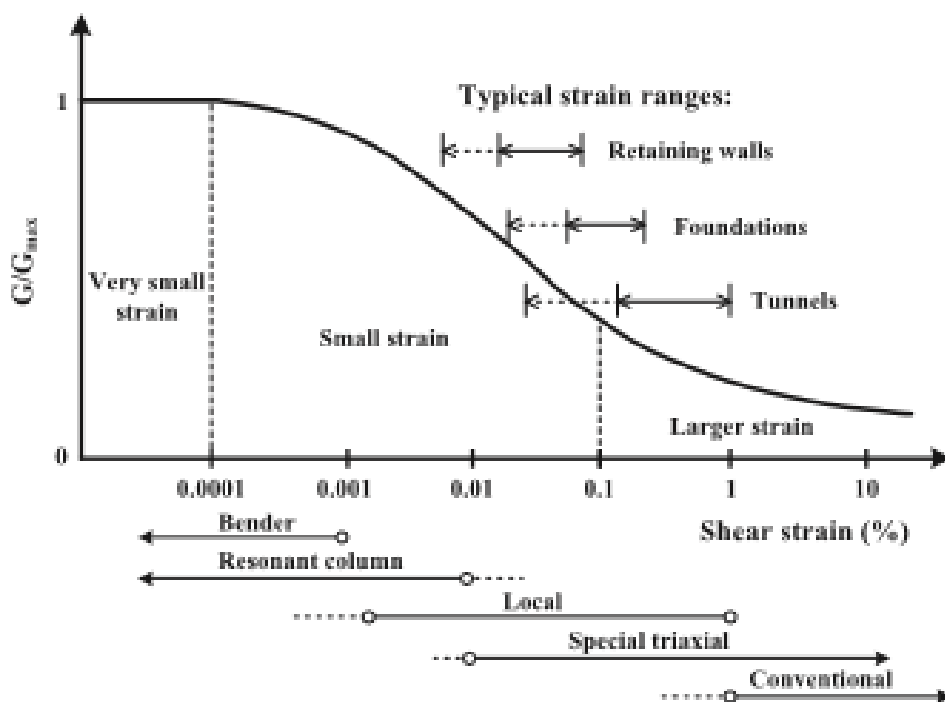
8) Μιχάλης Ε. Καραδημητρίου, “Συμβολή κυμάτων”, 2011

9) Xiaoliang Gu, Jun Yang, Maosong Huang, “Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element”, Soil and Foundations, 2013

## 1.4 Μέτρο διάτμησης G

### 1.4.1 G<sub>max</sub>

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά του εδάφους είναι γενικά μη γραμμική και πλαστική στη φύση. Ωστόσο όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί για παραμορφώσεις κάτω του 0,001% η συμπεριφορά του εδάφους θεωρείται ελαστική και γραμμική και οι αντίστοιχες ιδιότητες αναφέρονται σαν ελαστικές ιδιότητες. Οι ελαστικές ιδιότητες παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλά γεωτεχνικά προβλήματα όπως η ανάλυση της σεισμικής εδαφικής απόκρισης και η πιθανότητα ρευστοποίησης. Μια σημαντική ελαστική ιδιότητα του εδάφους είναι το ελαστικό μέτρο διάτμησης ( $G_0$ ).



Σχήμα 1.16 Κατάταξη του μέτρου διάτμησης με βάση την διατμητική παραμόρφωση (Suched Likitlersuang et al (2013))

Υπάρχουν δυο γενικές μορφές εμπειρικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέτρου διάτμησης στην άμμο. Η πρώτη αναπτύχθηκε από τους Hardin (1978), Hardin and Richart (1963) και Roesler (1979). Οι Hardin and Richart (1963)

πραγματοποιώντας μια σειρά από πειράματα resonant column σε κυκλική και γωνιώδη Ottawa sand κατέληξαν στην ακόλουθη εμπειρική σχέση για το ( $G_0$ ):

$$G_{max} = \frac{C_g(P_A)^{(1-n_g)}(e_g - e)^2(\sigma'_m)^{n_g}}{(1 + e)}$$

Όπου  $C_g$ ,  $e_g$  και  $n_g$  είναι σταθερές παλινδρόμησης που εξαρτώνται αποκλειστικά από το υλικό,  $\sigma'_m$  είναι η ενεργός τάση,  $P_A$  είναι η τάση, πρέπει να έχει ίδιες μονάδες με την ενεργό τάση και  $e$  είναι ο δείκτης πόρων.

Ο Roesler (1979) ανέπτυξε την σχέση του από μετρήσεις της ταχύτητας των S-κυμάτων. Η σχέση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$G_{max} = C P_A^{1-n-m} \sigma'_a^n \sigma'_p^m$$

Όπου  $\sigma'_a$  η ενεργός τάση καταμήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος,  $\sigma'_p$  η ενεργός τάση κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος και  $m$ ,  $n$  και  $C$  κατάλληλες παράμετροι.

Μια άλλη μορφή της σχέσης του Hardin προτάθηκε από τον Jamiolkowski (1991):

$$G_{max} = C_g(P_A)^{1-n_g} e^{a_g} (\sigma'_m)^{n_g}$$

Όπου  $a_g$  μια σταθερά παλινδρόμησης

Μια πιο πρόσφατη σχέση βασισμένη σε αυτή των Hardin και Richart (1963) είναι αυτή των Iwasaki και Tatsuoka (1977) οι οποίοι μελέτησαν καθαρή άμμο, φυσική άμμο με λεπτόκοκκα και τεχνητή άμμο με λεπτόκοκκα.

$$G_{max} = \frac{C(\gamma)B(2,17 - e)^2}{1 - e} (P_A)^{1-m\gamma} (\sigma'_m)^{m(\gamma)}$$

Όπου  $C(\gamma)$  και  $m(\gamma)$  είναι κατάλληλες παράμετροι που εξαρτώνται από τον βαθμό καταπόνησης της δοκιμής και το  $B$  είναι μια κατάλληλη παράμετρος που εξαρτάται από την διατμητική πίεση  $\gamma$ , τον δείκτη πόρων  $e$  και την οριακή τάση  $\sigma'_m$ .

Για την δοκιμή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων το μέτρο διάτμησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$G_{max} = \rho(V_s)^2$$

Όπου  $\rho$  είναι η ολική πυκνότητα και  $V_s$  η ταχύτητα του διατμητικού κύματος.

#### 1.4.2 Μέθοδοι μέτρησης του G

Αρκετές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί στον γεωτεχνικό τομέα για την μέτρηση του μέτρου διάτμησης από διάφορους ερευνητές. Αυτές οι τεχνικές αφορούν είτε μετρήσεις στο πεδίο είτε στο εργαστήριο. Το πιο βασικό θετικό στοιχείο των μετρήσεων στο πεδίο είναι ότι πραγματοποιούνται σε πραγματικές συνθήκες. Αντίθετα οι εργαστηριακές μετρήσεις έχουν ως θετικό την δυνατότητα αλλαγής των συνθηκών του εδάφους.

Οι μετρήσεις στο πεδίο μπορούν να γίνουν είτε με γεώτρηση είτε με επιφανειακές μετρήσεις. Γενικά η δεύτερη μέθοδος είναι πιο οικονομική. Οι πιο γνωστές μετρήσεις με γεώτρηση είναι η Crosshole μέθοδος (Stokoe and Woods 1972) και η Downhole μέθοδος (Patel 1981). Και στις δυο μεθόδους μια γεννήτρια παραγωγής κυμάτων και ένας δέκτης κυμάτων τοποθετούνται εντός της γεώτρησης. Από τις επιφανειακές μεθόδους η πιο γνωστή είναι η μέθοδος Continuous Surface Method (CSM) (Matthews 1996, Kramer 1996) η οποία χρησιμοποιεί έναν δονητή ελεγχόμενης συχνότητας σαν πηγή ενέργειας.

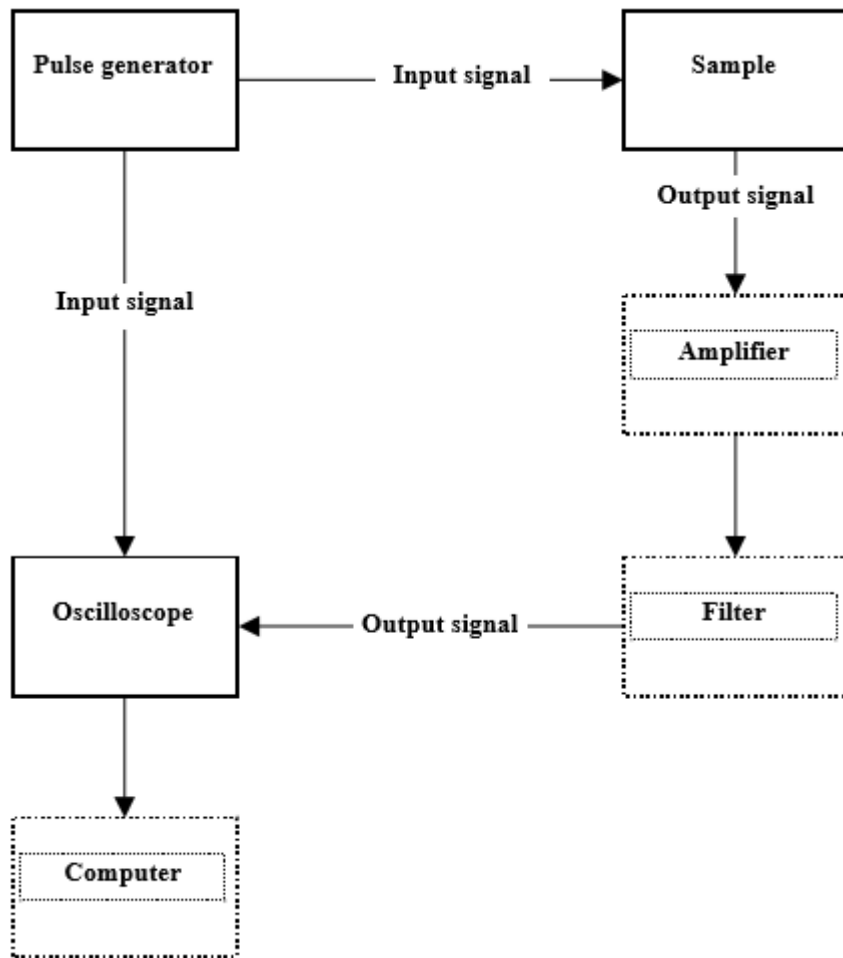
Οι σημαντικότερες μέθοδοι μέτρησης του G στο εργαστήριο είναι η μέθοδος resonant column (Hardin and Richart 1963, Cascante 1998), η μέθοδος πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender elements) (Brignoli 1996, Nakagawa 1997, Murillo 2011) και η μέθοδος οιωνοί στατικής φόρτισης με μετρήσεις υψηλής ανάλυσης (Kokusho 1980 , Ezaoui and Di Benedetto 2009).

#### Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (bender elements)

Η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι μια μη-καταστροφική εργαστηριακή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ελαστικού μέτρου διάτμησης του εδάφους. Σε αυτή την μέθοδο ένα διατμητικό κύμα παράγεται στην μια άκρη του δείγματος και η άφιξή του ανιχνεύεται στην άλλη άκρη. Η ταχύτητα του διατμητικού κύματος υπολογίζεται από το μήκος του δείγματος και τον χρόνο ταξιδιού του κύματος. Το ελαστικό μέτρο διάτμησης υπολογίζεται από την ταχύτητα του διατμητικού κύματος μέσα στο δοκίμιο από τον τύπο ( $G=\rho V^2$ ). Ένα σημαντικό θετικό στοιχείο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι ότι, ένα τριαξονικό πείραμα μπορεί να



πραγματοποιηθεί στο ίδιο δοκίμιο που μετρήθηκε η διατμητική ταχύτητα μέσω των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Αυτό έκανε την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων αρκετά διαδεδομένη για την μέτρηση του  $G_0$ . Ωστόσο υπάρχουν διάφορες δυσκολίες που μπορεί να αντιμετωπίσει κάποιος κατά την διεξαγωγή του πειράματος όπως το φαινόμενο του εγγύς πεδίου, ανάμιξη ακτινοβολίας από διαμήκη και διατμητικά κύματα και αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του σημείου άφιξης.



Σχήμα 1.17 Διαδικασία πειράματος *bender element* (Arroyo et al (2016))

### Resonant Column

Η δοκιμή resonant column δίνει την δυνατότητα μέτρησης του μέτρου διάτμησης σε κυλινδρικό δοκίμιο. Το ένα άκρο του δοκιμίου διατηρείται σταθερό ενώ το άλλο άκρο διεγείρεται από μια μικρή ημιτονοειδή περιστροφική μετατόπιση. Η διέγερση σαρώνει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων προσδιορίζοντας έτσι την συχνότητα στην οποία

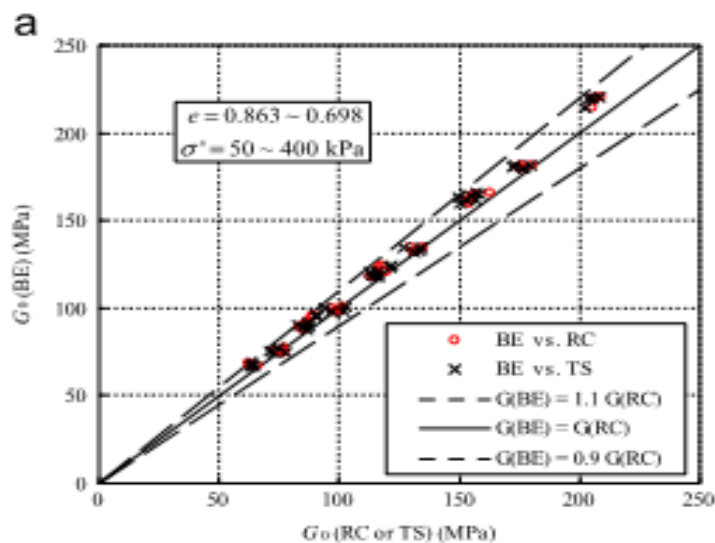
εμφανίζεται συντονισμός. Από την γνώση του δείγματος και της συχνότητας συντονισμού προκύπτει η ταχύτητα του διατμητικού κύματος και κατ' επέκταση το μέτρο διάτμησης.

#### Quasi-static loading

Με αυτή την μέθοδο η καταπόνηση μετριέται κατευθείαν όταν στο δείγμα επιβάλλεται μια μικρή αύξηση φορτίου. Στη συνέχεια το μέτρο διάτμησης προκύπτει από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

#### Σύγκριση μεθόδου πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με άλλες μεθόδους

Συγκρίνοντας το μέτρο διάτμησης της μεθόδου των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με αυτό των μεθόδων resonant column και torsional shear προκύπτει ότι το μέτρο διάτμησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι μεγαλύτερο από αυτό των δυο άλλων μεθόδων. Πιθανοί λόγοι αυτής της διαφοράς είναι ότι ο βαθμός καταπόνησης στη μέθοδο πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι μικρότερος από των άλλων δυο μεθόδων και ότι οι μέθοδοι resonant column και torsional shear μετράνε την δυσκαμψία ολόκληρου του δοκιμίου ενώ η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων μετράει τοπική δυσκαμψία στην περιοχή που περνάει το κύμα. Στο Σχήμα 1.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραμάτων πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, resonant column και torsional shear σε άμμο Toyoura τα οποία αρχικά συγκρίνονται μεταξύ τους και στη συνέχεια με δεδομένα από την βιβλιογραφία.



Σχήμα 1.1 Σύγκριση της δυσκαμψίας της άμμου Toyoura από μετρήσεις bender element, resonant column και torsional shear (Xiaoqiang Gu (2013))

#### 1.4.3 Βιβλιογραφία

- 1) Xiaoqiang Gu, Jun Yang, Maosong Huang, “Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element”, Soil and Foundations, 2013
- 2) R. Salgado, P. Bandini, A. Karim, “Shear Strength and Stiffness of silty sand”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000
- 3) Bjarni Bessason and Sigurður Erlingsson, “Shear wave velocity in surface sediments”, Faculty of Civil and Environmental Engineering, 2011
- 4) Suched Likitlersuang, Supot Teachavorasinskun, Chanaton Surarak, Erwin Oh, Arumugam Balasubramaniam, “Small strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok clays”, Soils and Foundations, 2013
- 5) Marcos Arroyo, “Pulse tests in soil samples”, Department of Civil Engineering, 2001
- 6) Jong-Sub Lee, J. Carlos Santamarina, “Bender Elements: Performance and signal interpretation”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005

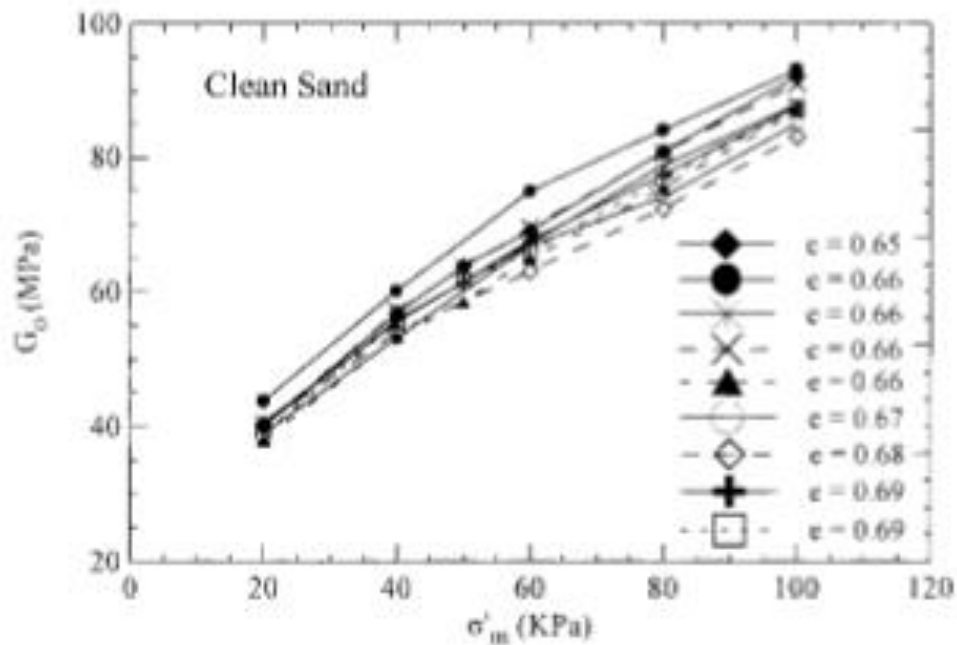
## 1.5 Μετρήσεις μέτρου διάτμησης

### 1.5.1 Μετρήσεις από βιβλιογραφία

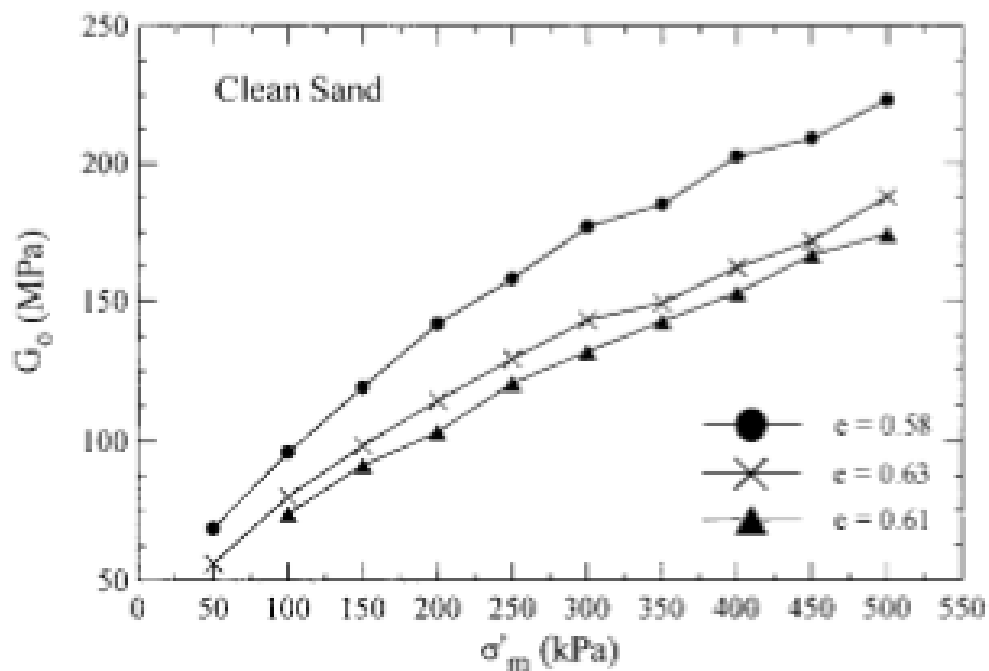
Στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί θα παρατεθούν τα αποτελέσματα και η διαδικασία που ακολούθησαν διάφοροι μελετητές για τον υπολογισμό του μέτρου διάτμησης.

Οι Salgado et al (2000) πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων σε καθαρή άμμο Ottawa και μείγματα της άμμου με ιλύ με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της αλλαγής του μέτρου διάτμησης με προσθήκη ποσοστών ιλύος στην καθαρή άμμο. Τα ποσοστά ιλύος στα οποία μετρήθηκε η δυσστησία των δοκιμίων είναι 0%, 5%, 10%, 15% και 20%. Η δοκιμή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων πραγματοποιήθηκε στην τριαξονική συσκευή αφού ολοκληρώθηκε η στερεοποίηση σε μια δεδομένη τάση. Το ενεργό μήκος του δοκιμίου θεωρείται το μήκος από την άκρη του ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μέχρι την άκρη του άλλου πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Το σημείο άφιξης του διατμητικού κύματος θεωρείται η πρώτη σημαντική αντιστροφή του λαμβανόμενου κύματος.

Αρχικά, στο Σχήμα 1.19 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέτρου διάτμησης σε σχέση με τον δείκτη πόρων για χαμηλή ενεργό τάση (20 με 100kPa) σε δοκίμια άμμου. Ακολούθως στο Σχήμα 1.20 παρουσιάζεται η ίδια σχέση με το Σχήμα 1.19 αλλά για μεγαλύτερη ενεργό τάση (50 με 500kPa). Στο Σχήμα 1.19 βλέπουμε ότι η σχέση του δείκτη πόρων με το μέτρο διάτμησης είναι αντίστροφη, δηλαδή η αύξηση του δείκτη πόρων οδηγεί σε μείωση του μέτρου διάτμησης. Ωστόσο στο Σχήμα 1.20 παρότι για δείκτη πόρων 0,58 το μέτρο διάτμησης είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι για δείκτη πόρων 0,61 και 0,63 (κάτι που συμφωνεί με το Σχήμα 1.19), το δοκίμιο με δείκτη πόρων 0,61 έχει μικρότερο μέτρο διάτμησης από το δοκίμιο με δείκτη πόρων 0,63. Φαίνεται ότι για μικρές μεταβολές του δείκτη πόρων η ακρίβεια των μετρήσεών του είναι περιορισμένη και οι τιμές δυσστησίας μπορούν να θεωρηθούν παρόμοιες.

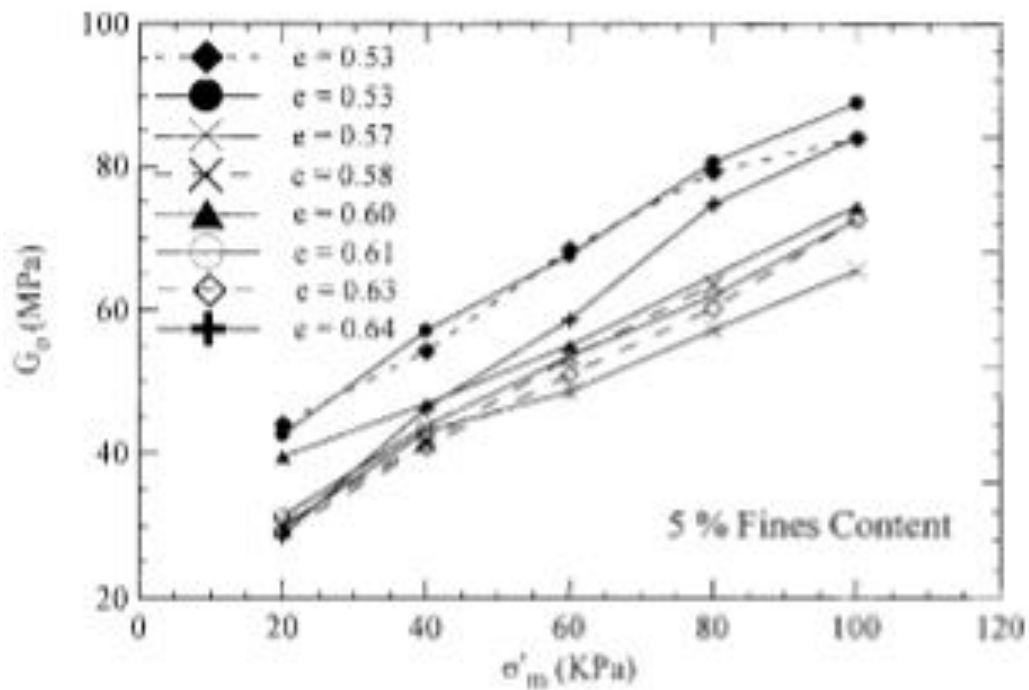


Σχήμα 1.19 Αποτελέσματα *bender element* σε δοκίμια καθαρής άμμου με διαφορετικό  $e$  σε χαμηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

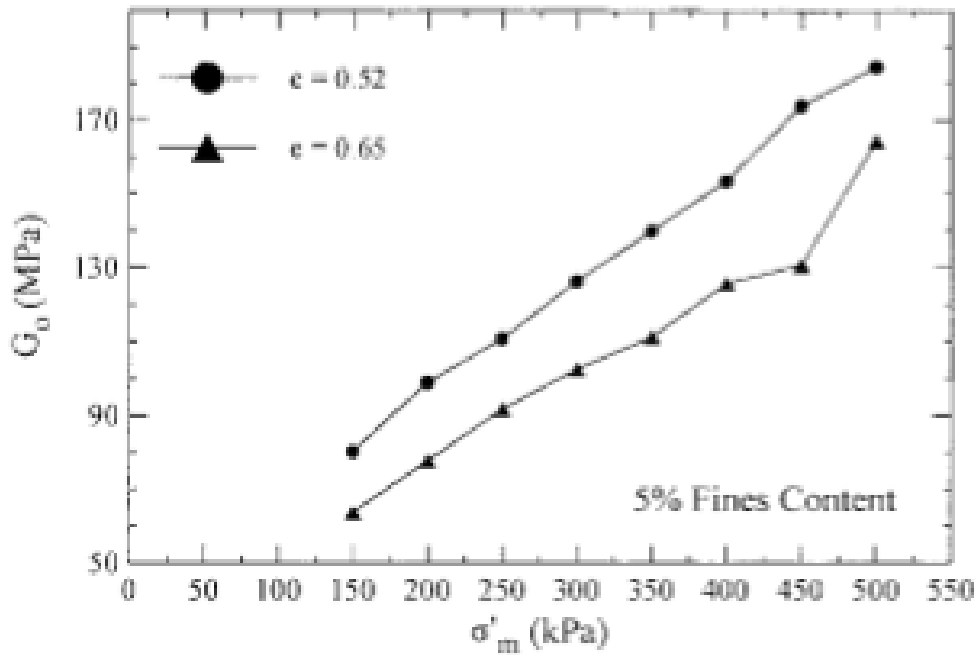


Σχήμα 1.20 Αποτελέσματα *bender element* σε δοκίμια καθαρής άμμου με διαφορετικό  $e$  σε υψηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

Στη συνέχεια στα Σχήματα 1.21 και 1.22 παρουσιάζεται η σχέση του δείκτη πόρων με το μέτρο διάτμησης σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 5% για μικρή ενεργό τάση (20 μέχρι 100 kPa) και υψηλή ενεργό τάση (50 μέχρι 500 kPa). Από το Σχήμα 1.21 προκύπτει ότι στο μείγμα ιλύος 5% το μέτρο διάτμησης μειώνεται με την αύξηση του δείκτη πόρων για μικρή ενεργό τάση. Κάτι που φαίνεται και στο σχήμα 1.22 για υψηλή ενεργό τάση.

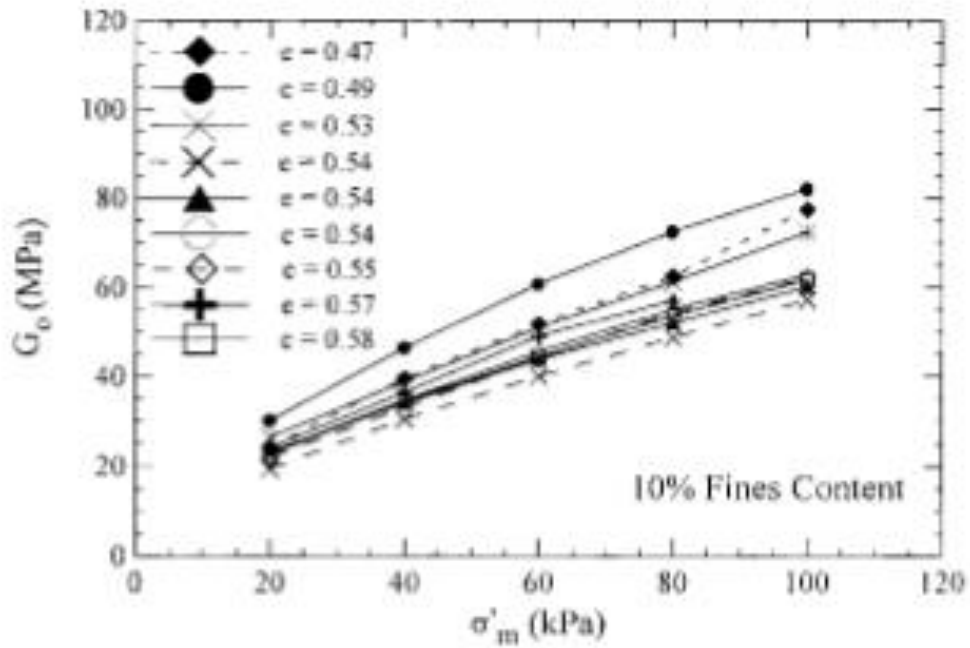


Σχήμα 1.21 Αποτελέσματα *bender element* σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 5% με διαφορετικό  $e$  σε χαμηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

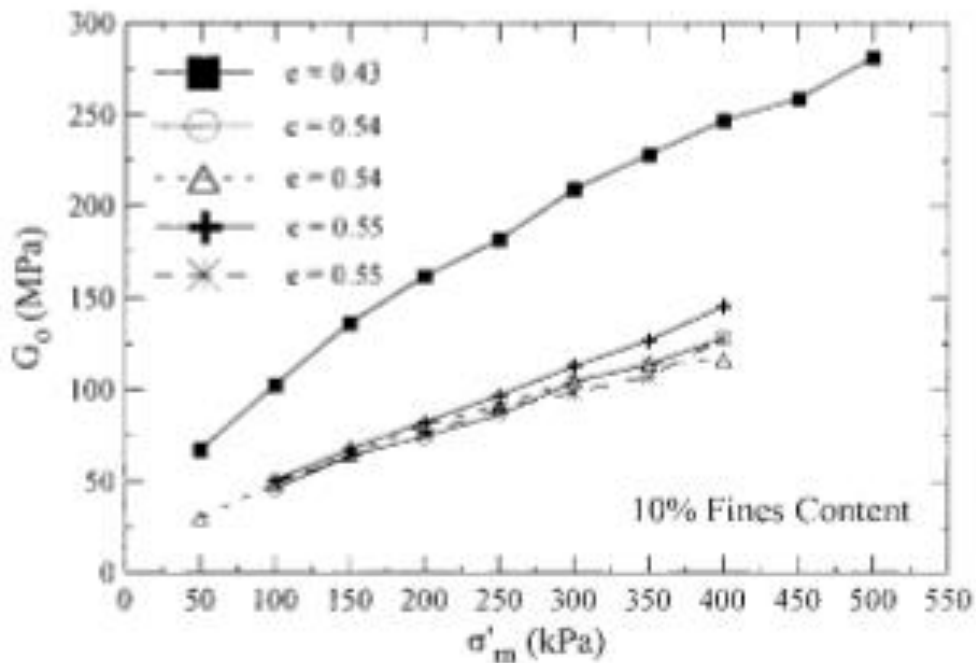


Σχήμα 1.22 Αποτελέσματα bender element σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 5% με διαφορετικό  $e$  σε υψηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

Ακολουθώντας στα Σχήματα 1.23 και 1.24 φαίνεται η σχέση του δείκτη πόρων με το μέτρο διάτμησης για μίγμα με ποσοστό ιλύος 10% για μικρή ενεργό τάση (20 μέχρι 100 kPa) και υψηλή ενεργό τάση (50 μέχρι 500 kPa). Από το Σχήμα 1.23 φαίνεται ότι ενώ για δείκτη πόρων 0,47 και 0,49 το μέτρο διάτμησης είναι μεγαλύτερο απ' ό τι για δείκτη πόρων 0,53 μέχρι 0,58, το μίγμα με δείκτη πόρων 0,47 έχει μικρότερο μέτρο διάτμησης από το δοκίμιο με δείκτη πόρων 0,49. Επίσης τα δοκίμια με δείκτες πόρων από 0,58 μέχρι 0,64 έχουν σχεδόν ίδιο μέτρο διάτμησης. Έπειτα στο Σχήμα 1.24 φαίνεται ότι το δοκίμιο με δείκτη πόρων 0,43 έχει μεγαλύτερο μέτρο διάτμησης από τα δοκίμια με δείκτες πόρων 0,54 και 0,55.



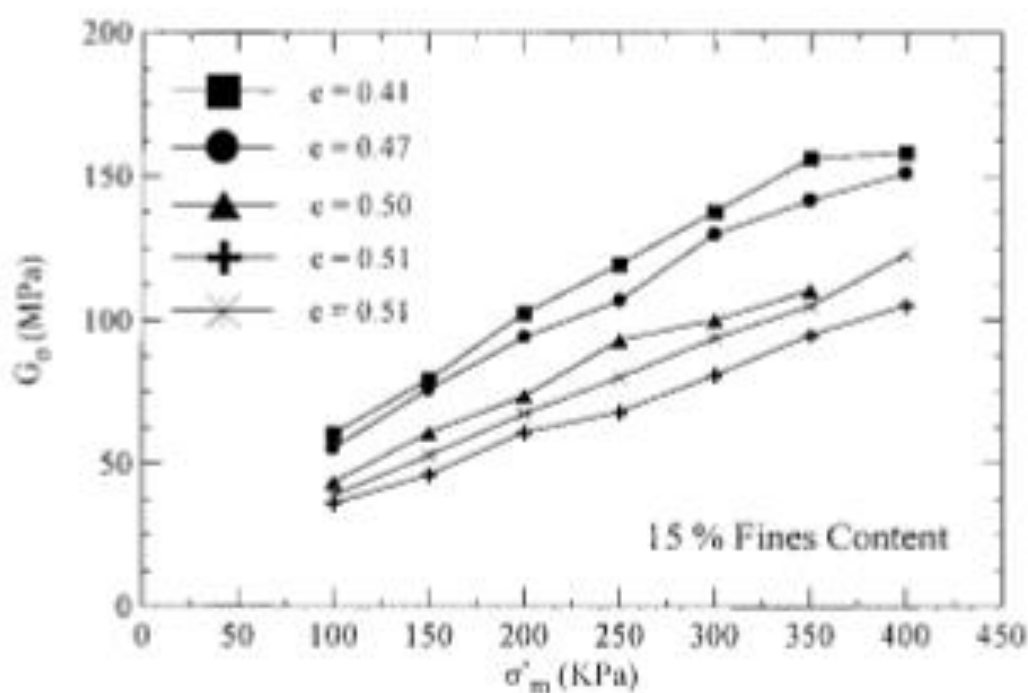
Σχήμα 1.23 Αποτελέσματα bender element σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 10% με διαφορετικό  $e$  σε χαμηλές τάσεις (Salgado et al (2000))



Σχήμα 1.24 Αποτελέσματα bender element σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 10% με διαφορετικό  $e$  σε υψηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

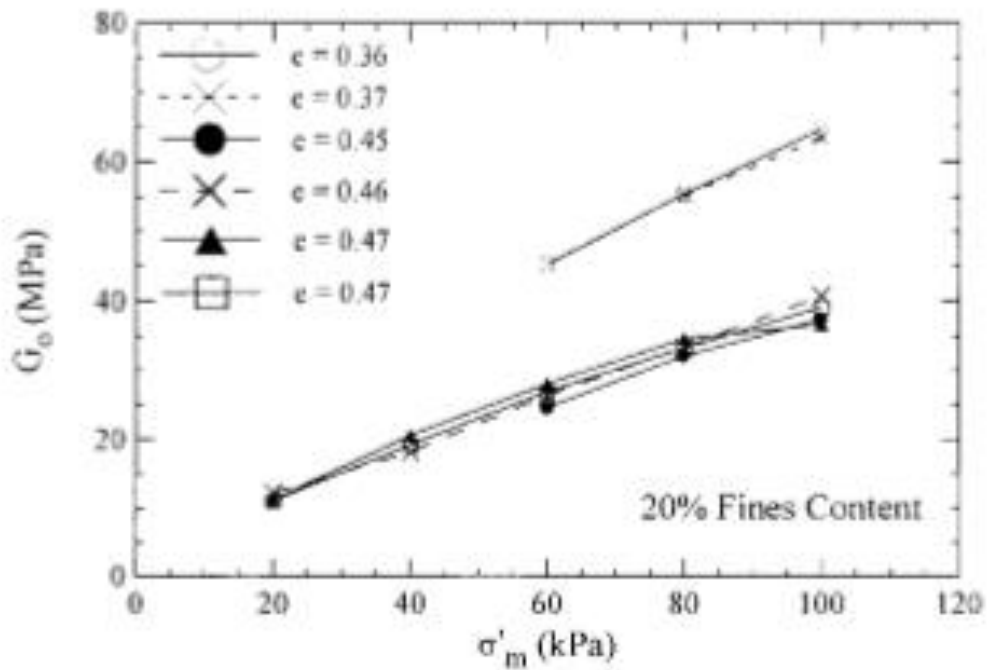


Στο Σχήμα 1.25, φαίνεται η σχέση μεταξύ δείκτη πόρων και του μέτρου διάτμησης για μείγμα με ποσοστό ιλύος 15% και για ενεργό τάση από 100 μέχρι 400 kPa. Η σχέση μεταξύ του δείκτη πόρων και του μέτρου διάτμησης είναι η αναμενόμενη, δηλαδή η αύξησης του δείκτη πόρων οδηγεί σε μείωση του μέτρου διάτμησης.

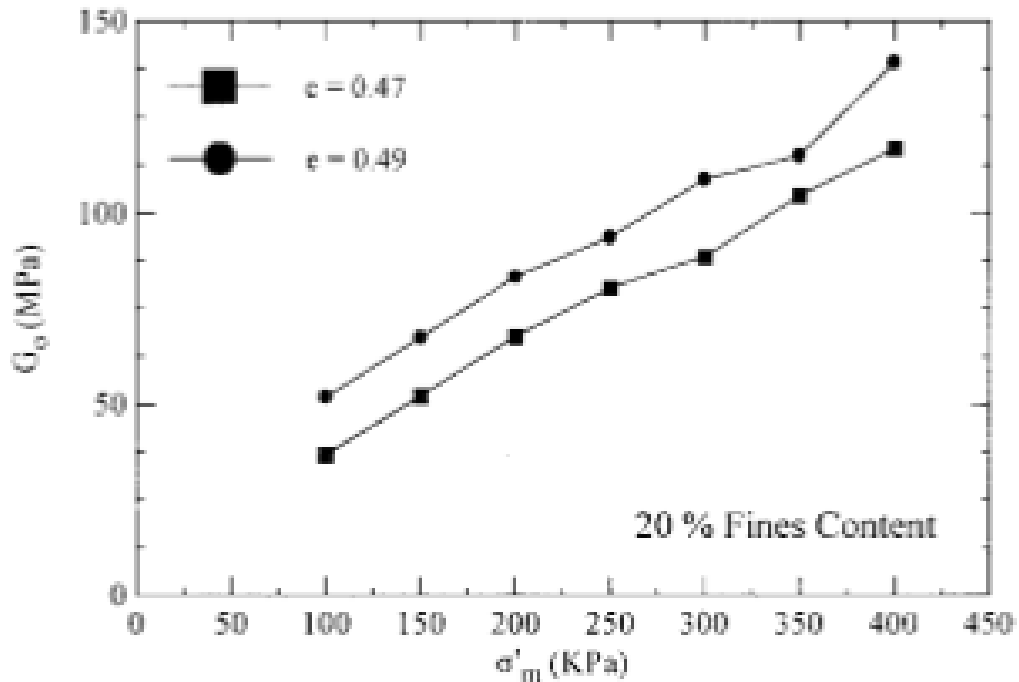


Σχήμα 1.25 Αποτελέσματα bender element σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 15% με διαφορετικό  $e$  σε υψηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

Τελος στα Σχήματα 1.26 και 1.27 έχουμε την σχέση του δείκτη πόρων με το μέτρο διάτμησης για μείγματα με ποσοστό ιλύος 20%, για μικρή ενεργό τάση (20 μέχρι 100 kPa) και υψηλή ενεργό τάση (100 μέχρι 400 kPa). Στο Σχήμα 1.26 φαίνεται ότι τα δοκίμια με μικρότερο δείκτη πόρων (0.36 και 0.37) έχουν μεγαλύτερο μέτρο διάτμησης από τα δοκίμια με μεγαλύτερο δείκτη πόρων (0.45, 0.46 και 0.47). Ενώ στο Σχήμα 1.27 το δοκίμιο με τον μεγαλύτερο δείκτη πόρων (0,49) έχει και μεγαλύτερο μέτρο διάτμησης.



Σχήμα 1.26 Αποτελέσματα bender element σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 20% με διαφορετικό  $e$  σε χαμηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

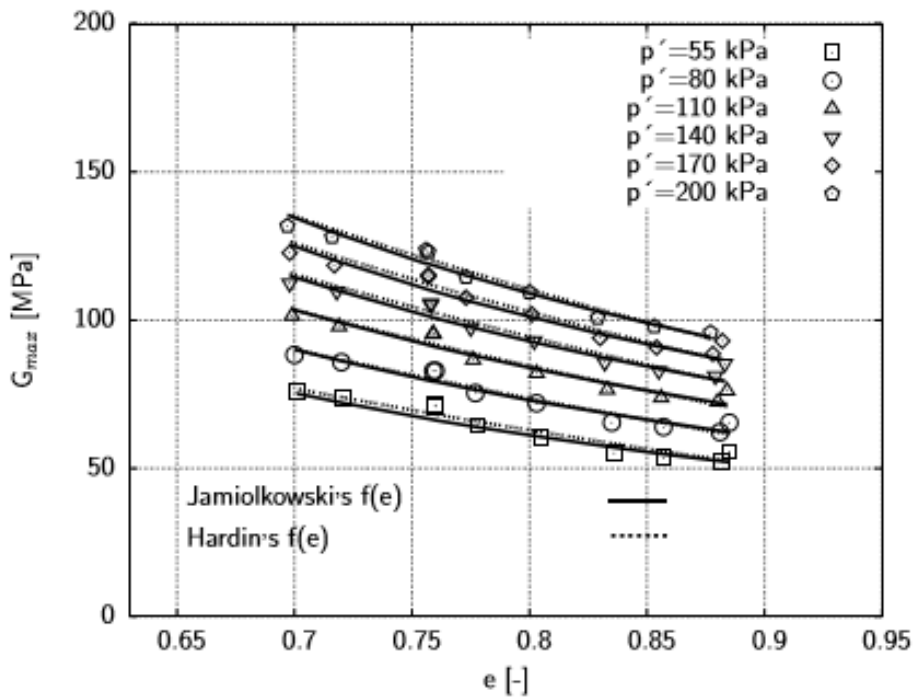


Σχήμα 1.27 Αποτελέσματα bender element σε μείγματα με ποσοστό ιλύος 20% με διαφορετικό  $e$  σε υψηλές τάσεις (Salgado et al (2000))

Συμπερασματικά προκύπτει ότι το μέτρο διάτμησης ενός δοκιμίου άμμου με 5% ιλύ, για ίδια σχετική πυκνότητα και ίδια ενεργό τάση, παρουσιάζει σημαντική πτώση σε σχέση με την καθαρή άμμο. Επίσης παρατηρήθηκε ότι παρότι το μέτρο διάτμησης μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού ιλύος η γωνία διατμητικής αντοχής που μετρήθηκε σε δοκιμές ελεύθερης στράγγισης αυξάνεται τόσο ως προς τη μέγιστη τιμή της όσο και ως προς την τιμή της σε συνθήκες κρίσιμης κατάστασης. Αυτό αιτιολογείται διότι αρχικά τα λεπτόκοκκα σωματίδια δεν είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρουν ιδανικούς συνδέσμους και η διατμητική καταπόνηση επιβάλλεται στο έδαφος με μεγαλύτερη ευκολία. Καθώς η διάτμηση προχωράει τα λεπτόκοκκα φτάνουν σε πιο σταθερές θέσεις και ουσιαστικά αυξάνεται η διόγκωση, η διατμητική δύναμη και η σύμπλεξη.

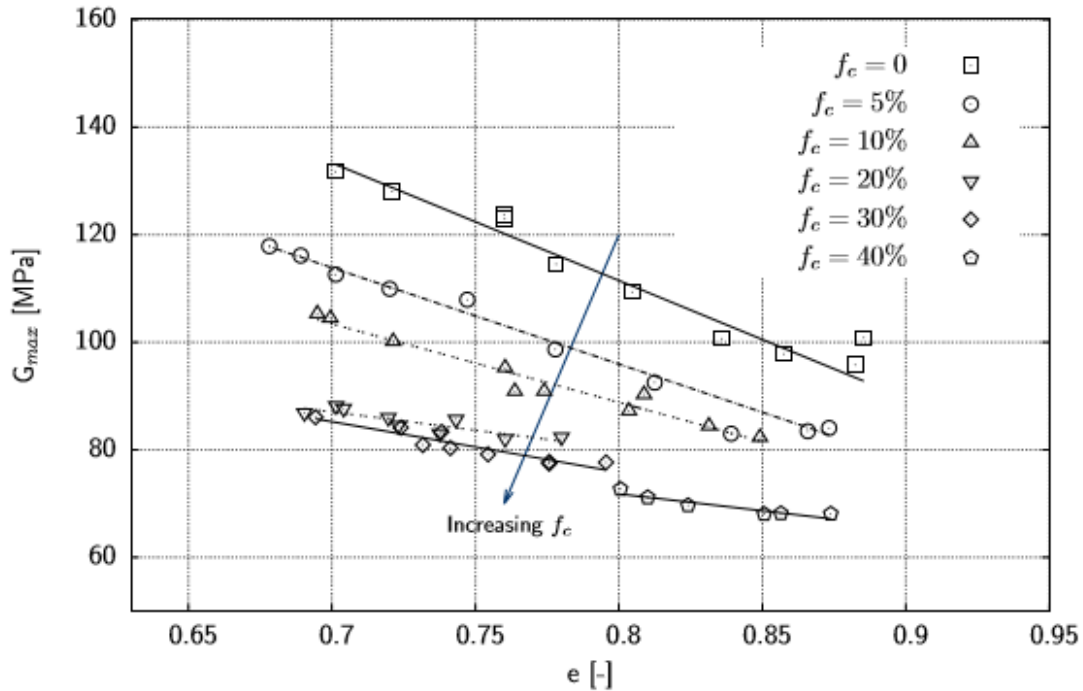
Οι M.Goudarzy et al πραγματοποίησαν πειράματα σε καθαρή άμμο και μίγματα άμμου με ιλύ. Χρησιμοποιήθηκε καθαρή άμμος Hostun περνώντας την κανονική άμμο Hostun από το κόσκινο No.200. Τα μείγματα στα οποία έγιναν μετρήσεις είχαν ποσοστό λεπτόκοκκων 5%, 10%, 20%, 30% και 40%. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η resonant column και το μέτρο διάτμησης προέκυψε από την σχέση ( $G=(2\pi Lf_R/a)^2 \cdot \rho$ ), το  $a$  είναι ίσο με  $\omega^*L/v_s$  όπου  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $v_s$  η ταχύτητα διατμητικού κύματος,  $\rho$  η πυκνότητα του δείγματος,  $f_R$  η συχνότητα συντονισμού και  $L$  το ύψος του δοκιμίου. Τα δείγματα στερεοποιήθηκαν σε ισοτροπική πίεση στα 55, 80, 110, 140, 170 και 200 kPa και είχαν σχετική πυκνότητα 40%-90%. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα φαίνονται στα Σχήματα που ακολουθούν.

Αρχικά στο Σχήμα 1.28 φαίνεται η σχέση του μέτρου διάτμησης με τον δείκτη πόρων και με την ενεργό τάση σε δοκίμια καθαρής άμμου Hostun. Ο δείκτης πόρων της άμμου αυξάνεται σταδιακά από 0,70 μέχρι 0,88 και όπως φαίνεται και από το σχήμα όσο αυξάνεται ο δείκτης πόρων τόσο μειώνεται το μέτρο διάτμησης. Η ενεργός τάση αυξάνεται από τα 55 kPa μέχρι τα 200 kPa και όσο αυξάνεται η ενεργός τάση τόσο αυξάνεται και το μέτρο διάτμησης της άμμου.



Σχήμα 1.28 Αποτελέσματα resonant column σε δοκίμιο καθαρής άμμου Hostun για διαφορετική ενεργό τάση και δείκτη πόρων

Στη συνέχεια στο Σχήμα 1.29 φαίνεται η επιρροή του προκαλεί η αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκων στην άμμο Hostun για ενεργό τάση 200kPa σε σχέση με τον δείκτη πόρων. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα όσο το ποσοστό λεπτόκοκκων αυξάνεται από το 0% μέχρι το 40% τόσο το μέτρο διάτμησης μειώνεται για σταθερό δείκτη πόρων  $e$ . Επίσης φαίνεται ότι η μεγαλύτερη πτώση του μέτρου διάτμησης γίνεται στην αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων από 0% σε 5% ενώ για ποσοστά ιλύος πάνω από 20% οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν.



Σχήμα 1.29 Διάγραμμα  $G_{max}-e$  για ενεργό τάση 200 kPa

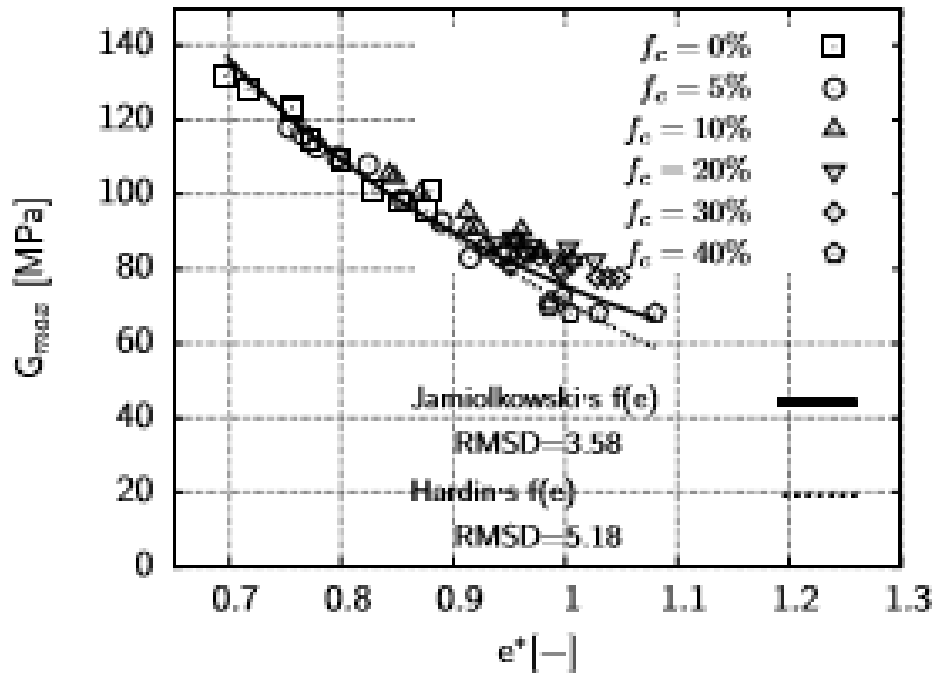
Στο Σχήμα 1.30 παρουσιάζεται πάλι η επιρροή του ποσοστού λεπτόκοκκων στο μέτρο διάτμησης αλλά αυτή την φορά σε σχέση με τον δείκτη πόρων  $e_{sk}$ . Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα η αύξηση του δείκτη πόρων  $e_{sk}$  οδηγεί σε μείωση του μέτρου διάτμησης. Επίσης φαίνεται ότι για σταθερό  $e_{sk}$  η αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων δεν προκαλεί αισθητή μείωση του μέτρου διάτμησης. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα το  $e_{sk}$  υπολογίστηκε από τον τύπο των Thevanayagan et al (2002).

$$e_{sk} = \frac{e + (1 + b)f_c}{1 - (1 - b)f_c}$$

Όπου το b παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και προκύπτει από την εξίσωση:

$$b = \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\mu\left(\frac{f_c}{f_{thr}}\right)^{nb}}{k}\right) \right] \left(\frac{rf_c}{f_{thr}}\right)^r$$

Και οι παράμετροι  $\mu$  και  $n_b$  εξαρτώνται από το υλικό



Σχήμα 1.30 Διάγραμμα  $G_{max}-e_{sk}$  για ενεργό τάση 200 kPa

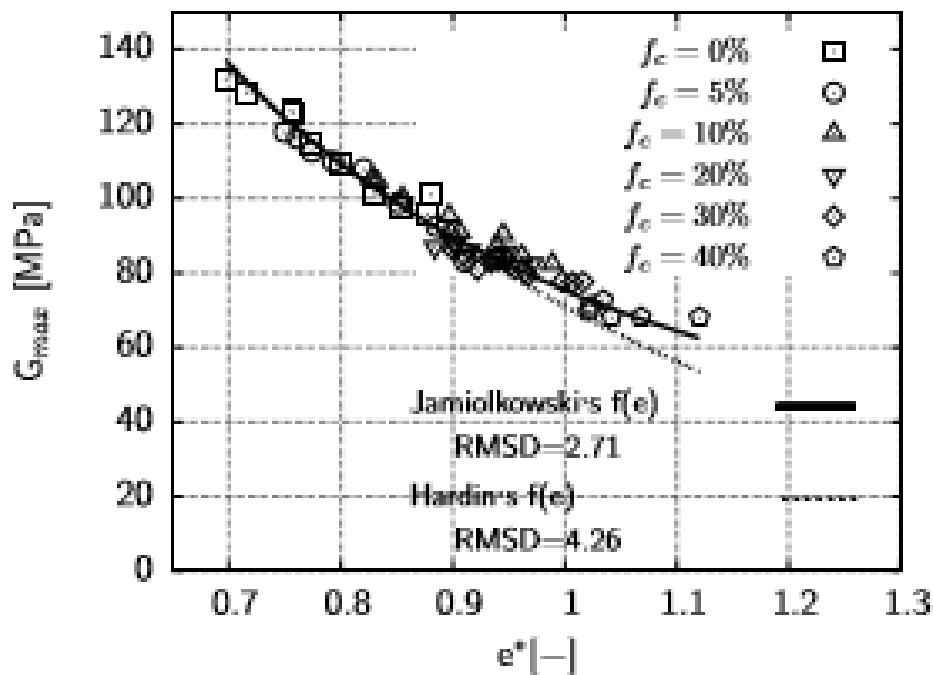
Και τέλος στο σχήμα 1.31 παρουσιάζεται πάλι η επιρροή του ποσοστού λεπτόκοκκων στο μέτρο διάτμησης αλλά αυτή την φορά σε σχέση με τον δείκτη πόρων  $e_{sk}$ . Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα η αύξηση του δείκτη πόρων  $e_{sk}$  οδηγεί σε μείωση του μέτρου διάτμησης. Επίσης φαίνεται ότι για σταθερό  $e_{sk}$  η αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων δεν προκαλεί αισθητή μείωση του μέτρου διάτμησης. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα το  $e_{sk}$  υπολογίστηκε από τον τύπο των Thevanayagan et al (2002):

$$e_{sk} = \frac{e + (1 + b)f_c}{1 - (1 - b)f_c}$$

Όπου το  $b$  παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και προκύπτει από την εξίσωση:

$$b = \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\mu\left(\frac{f_c}{f_{thr}}\right)^{nb}}{k}\right) \right] \left(\frac{rf_c}{f_{thr}}\right)^r$$

Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση η παράμετρος  $\mu$  προκύπτει από back analysis.



Σχήμα 1.31 Διάγραμμα  $G_{\max}$ - $e_{sk}$  για ενεργό τάση 200 kPa

Συμπερασματικά προκύπτει ότι η αύξηση του δείκτη πόρων οδηγεί σε μείωση του μέτρου διάτμησης ενώ η αύξηση της ενεργού τάσης οδηγεί στην αύξηση του μέτρου διάτμησης. Η αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων στο μείγμα οδήγησε σε μείωση του  $G_0$ . Ένα μείγμα με άμμο και λεπτόκοκκα έχει δυο διαφορετικές μικροδομές, Στην πρώτη μικροδομή το λεπτόκοκκο είναι μερικώς ενεργό μέσα στους κόκκους της άμμου και στην δεύτερη περίπτωση η άμμος επιπλέει μέσα στους κόκκους του λεπτόκοκκου. Ο δείκτης πόρων  $e$  δεν μπορεί να παρουσιάσει αυτή την σχέση σε αντίθεση με τον δείκτη πόρων  $e_{sk}$  όπου μπορεί να παρουσιάσει καλύτερα αυτή την κατάσταση.

### 1.5.2 Βιβλιογραφία

1) R. Salgado, P. Bandini, A. Karim, “Shear Strength and Stiffness of silty sand”, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000

2) Meisam Goudarzy, M. Mizanur Rahman, Diethard Konig, Tom Schanz, ‘‘Influence of non-plastic fines content on maximum shear modulus of granular materials’’, Soils and Foundations





## Κεφάλαιο 2°

### Μέθοδοι μέτρησης

## 2.1 Μέθοδοι μέτρησης στην βιβλιογραφία

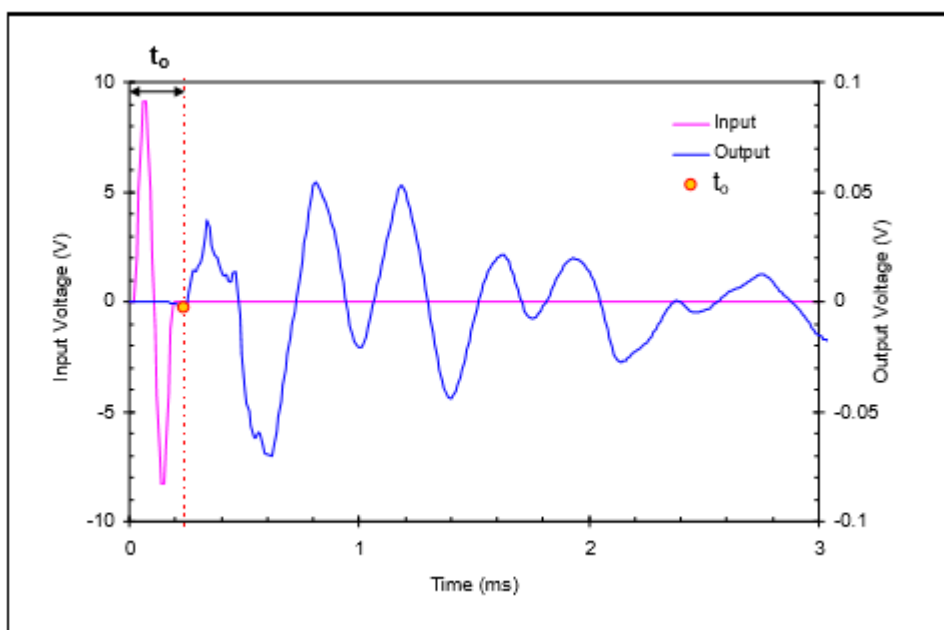
### 2.1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων αναπτύχθηκε από τους Shirley and Hampton το 1977. Πρόκειται για μια εύκολη τεχνική μέσω της οποίας προκύπτει με ελαστικό μέτρο διάτμησης (Gmax) μετρώντας την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων. Τα κυριότερα προβλήματα αυτής της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός του χρόνου άφιξης, η μορφή του κύματος που θα χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση του δοκιμίου, η συχνότητα του κύματος και το ύψος του δοκιμίου.

### 2.1.2 Χρόνος άφιξης

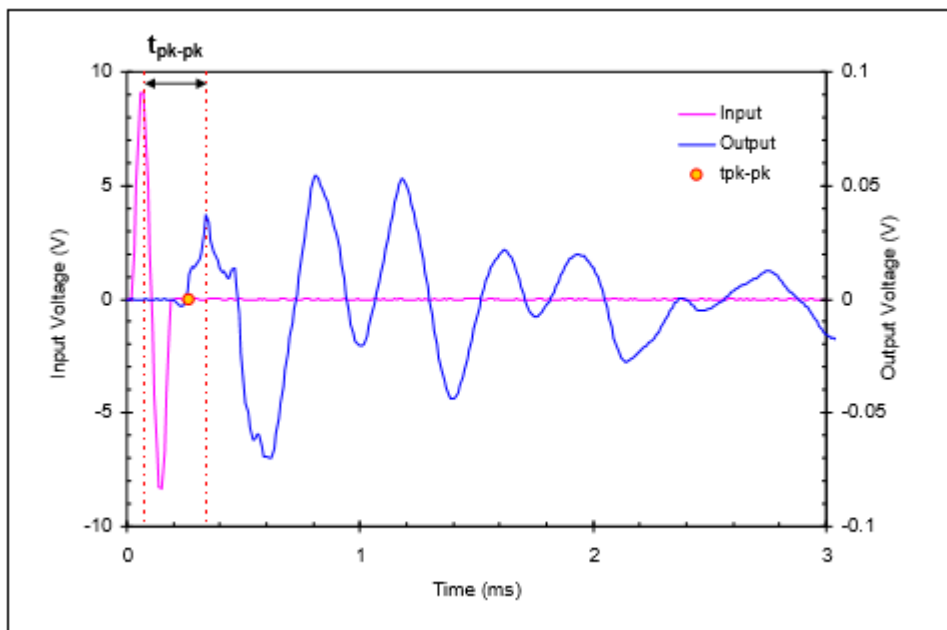
Οι πιο γνωστές μέθοδοι υπολογισμού του χρόνου άφιξης είναι 4. Η μέθοδος οπτικού προσδιορισμού της πρώτης ανάστροφης κορυφής (visual picking), η μέθοδος προσδιορισμού της πρώτης έντονης κορυφής (first major peak-to-peak), η μέθοδος cross-correlation και η μέθοδος cross-spectrum.

- 1) Visual picking: Είναι η πιο συχνά εφαρμοζόμενη μέθοδος ερμηνείας κατά την οποία η πρώτη σημαντική αντιστροφή στο λαμβανόμενο κύμα θεωρείται ο χρόνος άφιξης του διατμητικού κύματος. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί από αρκετούς μελετητές (Viggiani and Atkinson (1995), Jovicic et al (1996), Lings and Greening (2001) Kawaguchi et al (2001)) και είναι τόσο δημοφιλής λόγω της αμεσότητας της. Η πρώτη αντιστροφή του κύματος μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική ανάλογα με την διεύθυνση και την πολικότητα των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Για να γίνει πιο εύκολος ο εντοπισμός του σημείου αντιστροφής οι μελετητές Teachavorasinskun and Amornwithayalax (2002), Teachavorasinskun and Lukkanaprasit (2008) εφάρμοσαν ζευγάρι από σήματα με αντίστροφες πολικότητες. Ωστόσο αυτή η αντιστροφή στην πολικότητα προκαλεί αντιστροφή όλου του κύματος συμπεριλαμβανομένων και των στοιχείων του εγγύς πεδίου που δυσκολεύουν τον εντοπισμό του πραγματικού χρόνου άφιξης. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αβεβαιότητα όταν το λαμβανόμενο σήμα δεν δημιουργεί ένα ευδιάκριτο σημείο αντιστροφής. Επίσης το σημείο άφιξης του κύματος πολλές φορές καλύπτεται από το φαινόμενο του εγγύς πεδίου ή άλλες παρεμβολές όπως εξωτερικοί θόρυβοι. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται ένα παράδειγμα προσδιορισμού του σημείου άφιξης με την μέθοδο visual picking.



Σχήμα 2.1 Προσδιορισμός χρόνου άφιξης με την μέθοδο του οπτικού προσδιορισμού (visual picking) (Chee-Ming Chan (2010))

- 2) First major peak-to-peak: Η μέθοδος αυτή είναι βασισμένη στην θεώρηση ότι το λαμβανόμενο κύμα μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με το εκπεμπόμενο κύμα. Ο χρόνος άφιξης θεωρείται η χρονική διαφορά μεταξύ της πρώτης κορυφής του εκπεμπόμενου κύματος και της πρώτης κορυφής του λαμβανόμενου κύματος. Λόγω της διασποράς που δημιουργείται από την γεωμετρία του δοκιμίου και την φύση του εδάφους το λαμβανόμενο κύμα έχει πολλές κορυφές καθώς εξασθενεί με την απόσταση. Σε αυτή την περίπτωση ο προσδιορισμός της πρώτης κορυφής ανάμεσα σε κορυφές με κοντινό εύρος είναι πιο δύσκολος. Τέλος όπως η μέθοδος visual picking έτσι και αυτή επηρεάζεται από την ποιότητα του λαμβανόμενου κύματος. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ο προσδιορισμός του χρόνου άφιξης με την μέθοδο first major peak-to-peak.



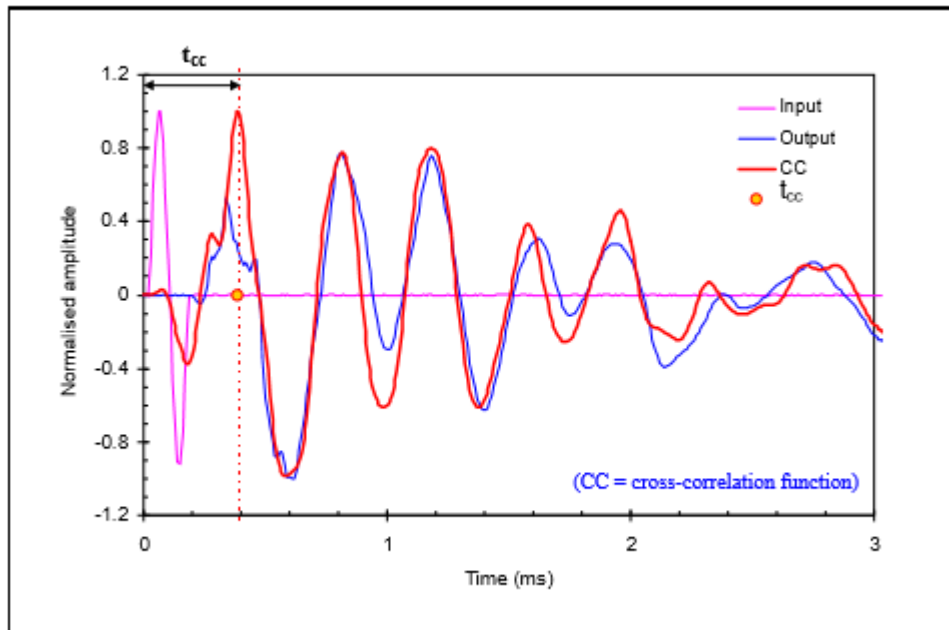
Σχήμα 2.2 Προσδιορισμός χρόνου άφιξης με την μέθοδο *first major peak-to-peak* (Chee-Ming Chan (2010))

- 3) Cross-correlation: Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε πρώτη φορά από τους Viggiani and Atkinson (1995). Αυτή η μέθοδος μετράει τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ δυο σημάτων, του εκπεμπόμενου  $T(t)$  και του λαμβανόμενου  $R(t)$  μέσω της σταθεράς cross-correlation  $CCTR(t_s)$ .

$$CCTR(t_s) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \int_{T_r} T(t+t_s)R(t)dt$$

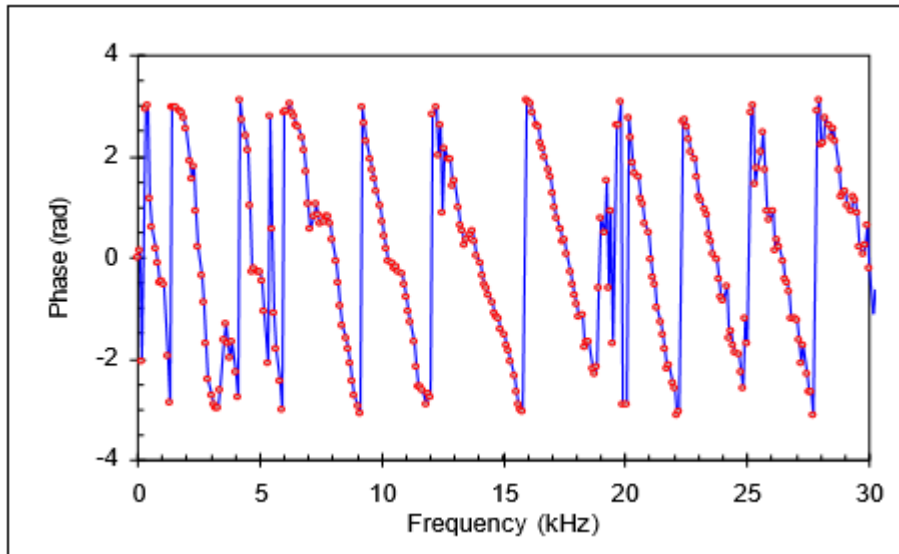
Όπου  $T_r$  είναι ο χρόνος καταγραφής και  $t_s$  η χρονική διαφορά μεταξύ των δυο σημάτων. Για να εφαρμοστεί αυτή την μέθοδο πρέπει να μετατραπεί ο χρονικός κλάδος σε κλάδο συχνοτήτων όπου η αποσύνδεση του σήματος παράγει ομάδες αρμονικών κυμάτων με γνωστή συχνότητα και εύρος. Ένας γνωστός αλγόριθμος για αυτή την μετατροπή είναι ο Fast Fourier Transform, μέσω του οποίου μετατρέπεται το σήμα σε γραμμικό φάσμα. Στη συνέχεια η πολυσύνθετη κλίση του γραμμικού φάσματος του μεταδιδόμενου κύματος υπολογίζεται και προκύπτει η σταθερά cross-power των δυο σημάτων. Αυτή η μέθοδος μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα από τις δυο προηγούμενες μόνο αν τα δυο

σήματα έχουν αρκετές ομοιότητες στον κλάδο συχνοτήτων. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται ο προσδιορισμός του χρόνου άφιξης με την μέθοδο cross-correlation.

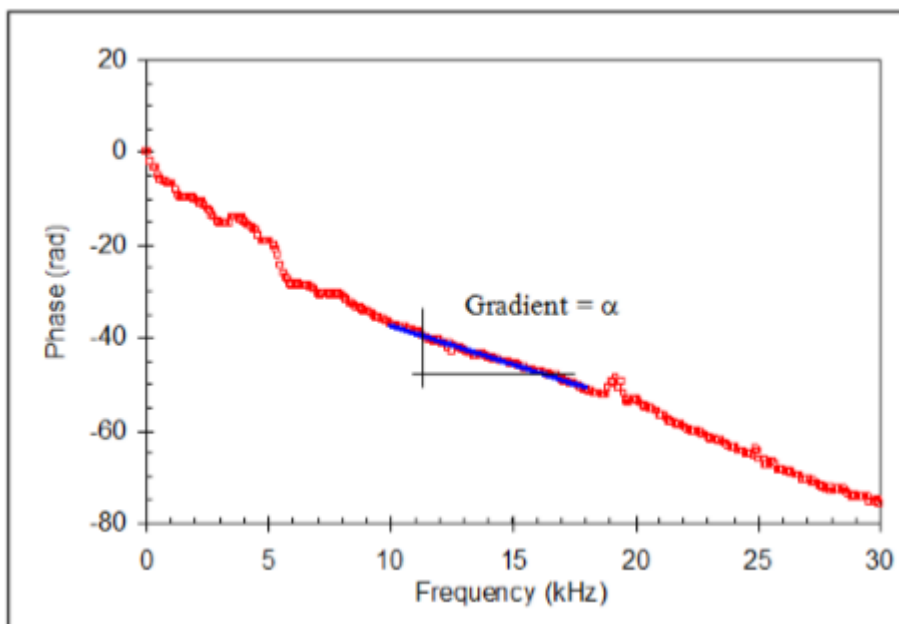


Σχήμα 2.3 Προσδιορισμός χρόνου άφιξης με την μέθοδο cross-correlation (Chee-Ming Chan (2010))

- 1) Cross-spectrum: Όπως η μέθοδος cross-correlation έτσι και η μέθοδος cross-spectrum εφαρμόστηκε πρώτη φορά από τους Viggiani and Atkinson (1995). Είναι πρακτικά μια επέκταση της μεθόδου cross-correlation όπου το φάσμα συχνοτήτων του σήματος επεξεργάζεται ακόμα περισσότερο ώστε να προκύψει το απόλυτο φάσμα cross-power. Ένας “ξετυλιγμένος” αλγόριθμος εφαρμόζεται στο cross-power φάσμα λαμβάνοντας υπόψιν τους χαμένους κύκλους, δημιουργώντας ένα μονοτονικό σχέδιο που εκφρασμένο στο απόλυτο cross-power φασματικό διάγραμμα. Στο Σχήμα 2.5 έχουν σχεδιαστεί τα σημεία όπου το εκπεμπόμενο και λαμβανόμενο σήμα είναι σε φάση καθώς η συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος αυξάνεται διαρκώς. Η κλίση του διαγράμματος δίνει τον χρόνο άφιξης του διατμητικού κύματος.
- 2)



Σχήμα 2.4 “Τυλιγμένο” διάγραμμα φάσης (Chee-Ming Chan (2010))

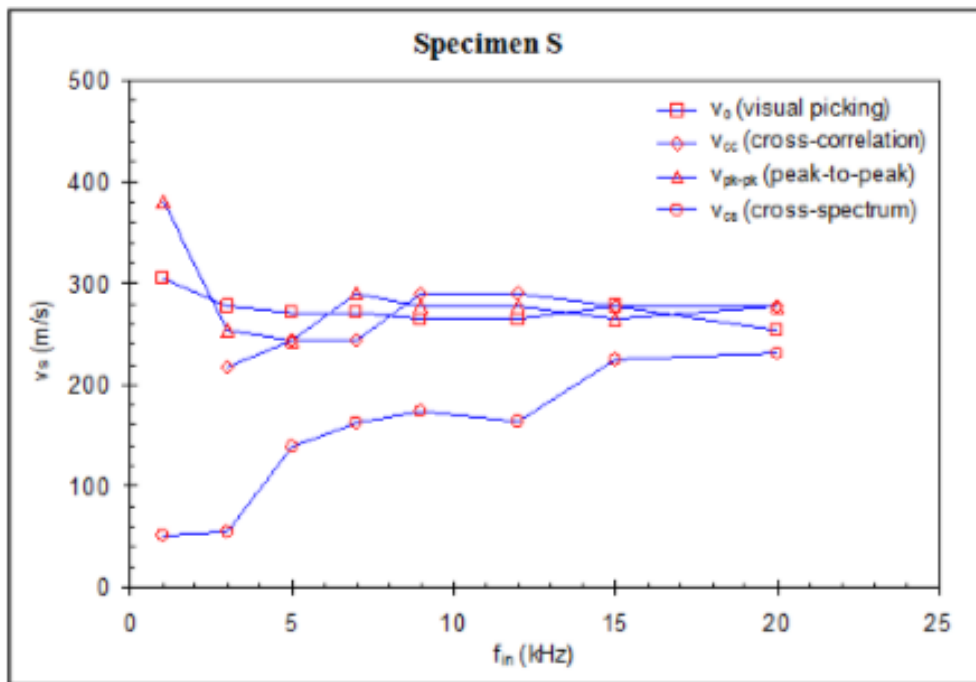


Σχήμα 2.5 “Έυτυλιγμένο” διάγραμμα φάσης (Chee-Ming Chan (2010))

### Σύγκριση μεθόδων

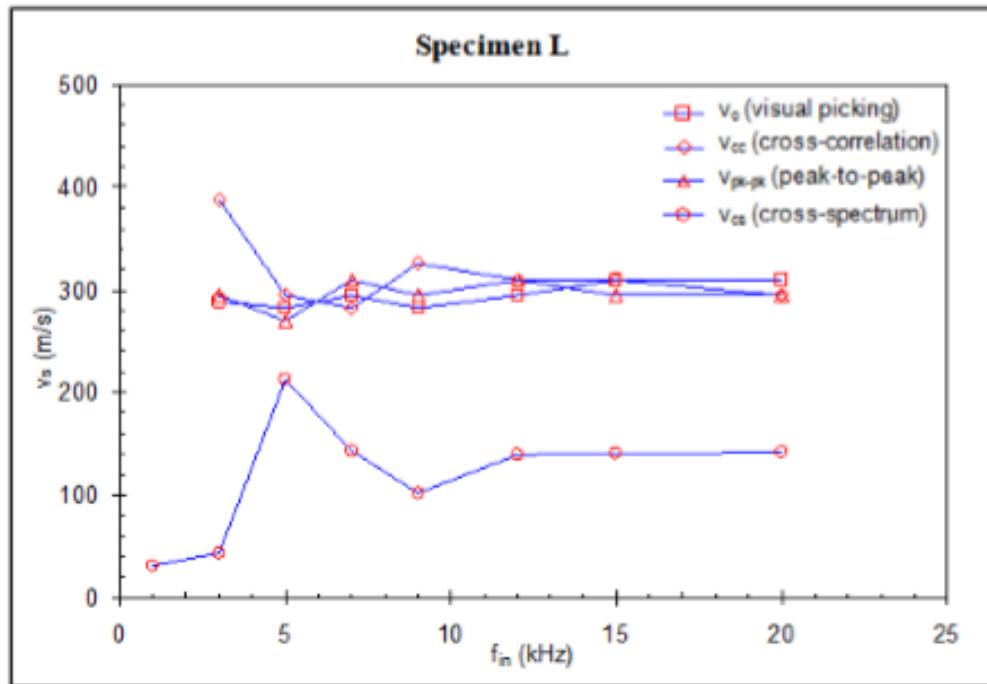
Για την σύγκριση των μεθόδων πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων από τον Chee-Ming Chan σε δυο δείγματα. Το πρώτο δείγμα (specimen S) έχει ύψος 80mm και διάμετρο 76mm, ενώ το δεύτερο δείγμα (specimen L) έχει ύψος 80mm και διάμετρο 114mm. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε και στα δυο δοκίμια είναι καολινίτης. Τα

αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα φαίνονται στα δυο σχήματα που ακολουθούν. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η σχέση της διατμητικής ταχύτητας με την συχνότητα για το δείγμα S. Επίσης φαίνεται το πώς επηρεάζεται η διατμητική ταχύτητα από την μέθοδο εύρεσης του χρόνου άφιξης. Αντίστοιχα στο Σχήμα 2.7 φαίνεται η σχέση της διατμητικής ταχύτητας με την συχνότητα για το δείγμα L και η επιρροή της μεθόδου προσδιορισμού του χρόνου άφιξης στην διατμητική ταχύτητα.



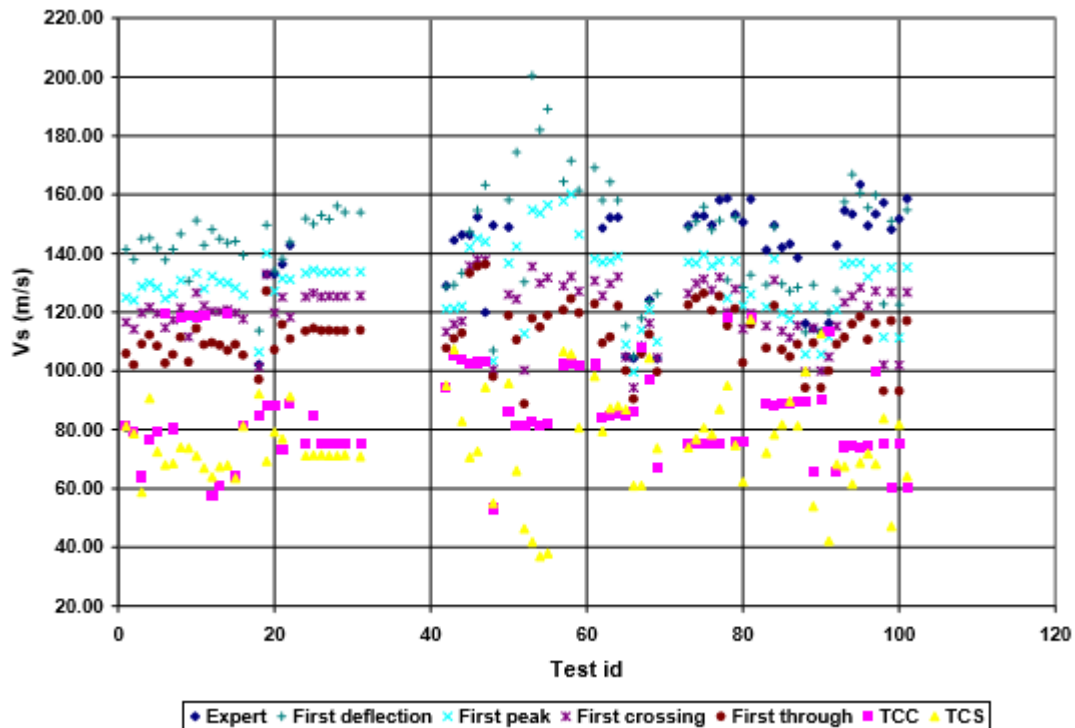
Σχήμα 2.6 Η διατμητική ταχύτητα για διάφορες συχνότητες στο δείγμα S (Chee-Ming Chan (2010))





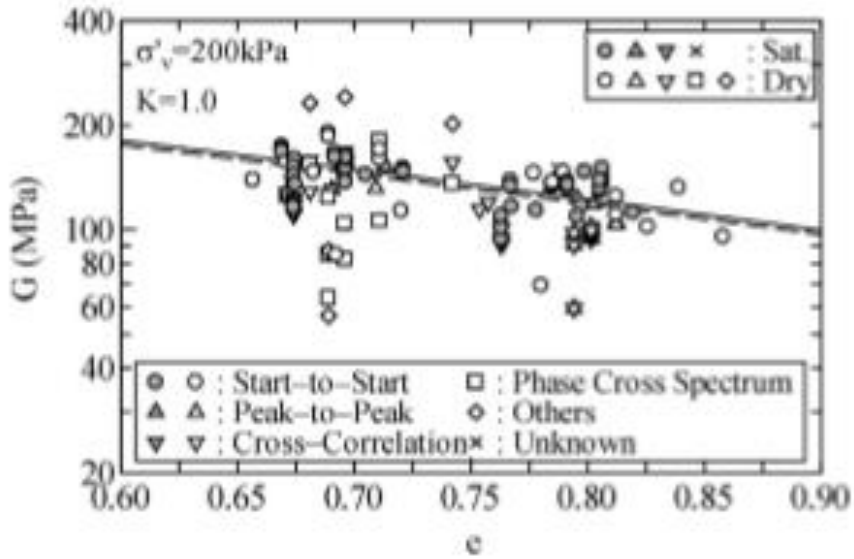
Σχήμα 2.7 Η διατμητική ταχύτητα για διάφορες συχνότητες στο δείγμα L (Chee-Ming Chan (2010))

Όπως βλέπουμε από τα διαγράμματα, οι ταχύτητες που προκύπτουν από τις μεθόδους visual picking, peak-to-peak και cross-correlation συγκλίνουν για μεγάλες τιμές της συχνότητας, επίσης οι τιμές της ταχύτητας με την μέθοδο cross-spectrum είναι συνεχώς μικρότερες από τις τιμές των τριών άλλων μεθόδων. Αυτή η παρατήρηση για την τιμή της ταχύτητας της μεθόδου cross-spectrum επαληθεύεται και από την μελέτη των Arroyo et al (2001).

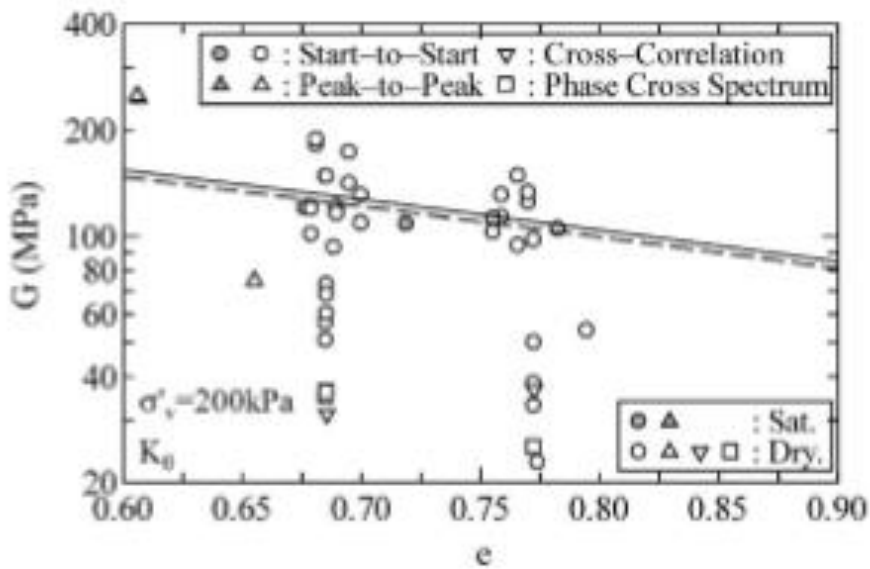


Σχήμα 2.8 Η διατημητική ταχύτητα ανάλογα με την μέθοδο προσδιορισμού του χρόνου άφιξης (Arroyo et al (2001))

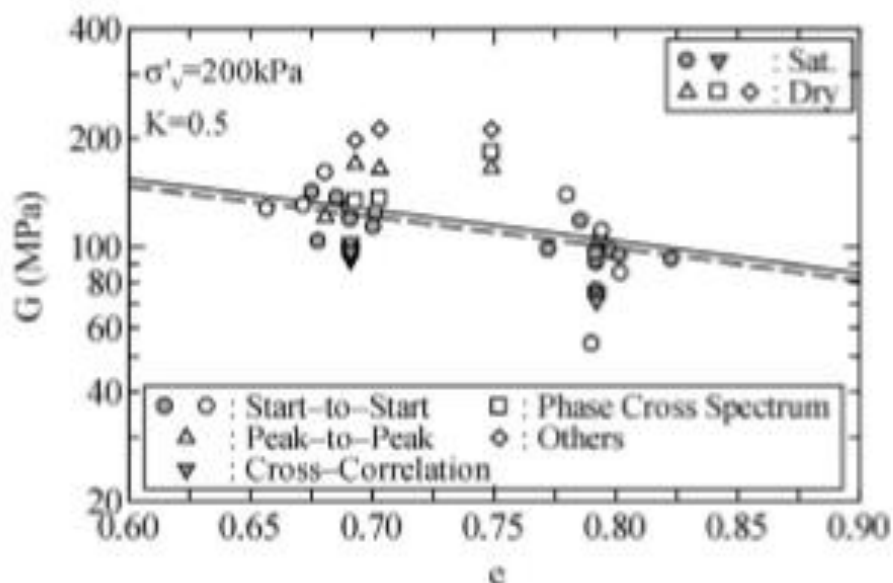
Ωστόσο από την μελέτη των Arroyo et al (2001) προκύπτει και ότι ο χρόνος άφιξης με την μέθοδο visual picking είναι μικρότερος από την μέθοδο cross-correlation κάτι που ωστόσο δεν επαληθεύεται σε αυτή τη μελέτη. Ο Yamashita (2009) έκανε μια σειρά πειραμάτων σε δοκίμια κορεσμένης και ξηρής άμμου για  $\sigma' = 200 \text{ KPa}$ ,  $K=1$ ,  $K=0,5$  και  $K_0$ , για τις μεθόδους start-to-start, peak-to-peak, cross-correlation και cross-spectrum .



Σχήμα 2.9 Επιρροή της μεθόδου προσδιορισμού του χρόνου άφιξης στο μέτρο διάτμησης για  $K=1$  (Yamashita et al (2009))



Σχήμα 2.10 Επιρροή της μεθόδου προσδιορισμού του χρόνου άφιξης στο μέτρο διάτμησης για  $K_0$  (Yamashita et al (2009))



Σχήμα 2.11 Επιρροή της μεθόδου προσδιορισμού του χρόνου άφιξης στο μέτρο διάτμησης για  $K=0.5$  (Yamashita et al (2009))

Από τα πειράματά του προέκυψε ότι ο χρόνος άφιξης με την μέθοδο cross-spectrum είναι σημαντικά μικρότερος από τον χρόνο άφιξης με την μέθοδο visual picking. Επίσης οι χρόνοι άφιξης των μεθόδων cross-correlation και cross-spectrum είναι σχεδόν ίδιοι σε κορεσμένο δοκίμιο ενώ σε ξηρό δοκίμιο παρατηρείται διαφορά μεταξύ των δυο μεθόδων.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος visual picking είναι η πιο υποκειμενική, επηρεάζεται από την ποιότητα και των δυο κυμάτων (εκπεμπόμενο και λαμβανόμενο) καθώς και από την επίδραση του εγγύς πεδίου. Η μέθοδος peak-to-peak μπορεί να αποφεύγει την επίδραση του εγγύς πεδίου, ωστόσο επηρεάζεται από την υποκειμενικότητα στην επιλογή της πρώτης κορυφής όταν δεν είναι ευδιάκριτη. Η μέθοδος cross-correlation αν και έχει μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία υπολογισμού του χρόνου άφιξης, επηρεάζεται αρκετά από την ποιότητα του σήματος.

### 2.1.3 Συχνότητα

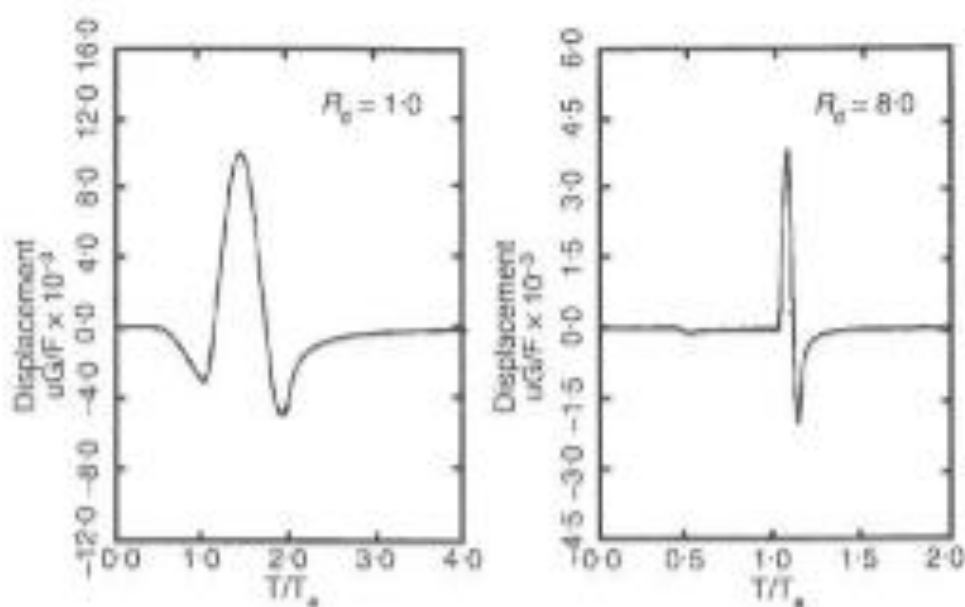
Η συχνότητα του κύματος είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ποιότητα της καταγραφής. Οι Sanches-Salinerio et al (1986) ανέπτυξαν μια

αναλυτική λύση για την χρονική καταγραφή διεγείροντας ένα ημιτονοειδές κύμα σε ένα ισότροπο ελαστικό μέσο. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ο λόγος  $d/\lambda$  (τον οποίο ονόμασαν  $R_d$ ) μπορεί να ελέγξει το σχήμα του λαμβανόμενου σήματος. Η σταθερά  $R_d$  είναι ίση με:

$$R_d = d/\lambda = df/\lambda$$

$$R_d = \frac{d}{\lambda} = \frac{df}{\lambda}$$

Όπου  $d$  είναι η απόσταση που διανύει το κύμα,  $f$  η συχνότητα του κύματος και  $v_s$ . Δυο κύματα με διαφορετικό  $R_d$  φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.

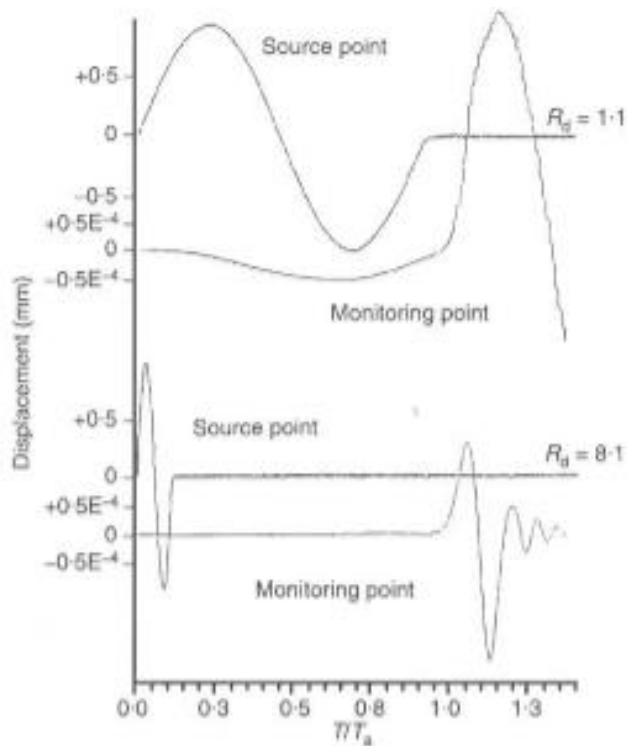


Σχήμα 2.12 Η μορφή δυο κυμάτων για διαφορετικό  $R_d$  (Coop et al (1996))

Για μικρές τιμές του  $R_d$  υπάρχει μια αρχική εκτροπή του σήματος πριν το διατμητικό κύμα φτάσει. Αυτή η εκτροπή οφείλεται στο φαινόμενο του εγγύς πεδίου. Για μεγαλύτερες τιμές του  $R_d$  το φαινόμενο του εγγύς πεδίου σχεδόν απουσιάζει. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η τιμή του  $R_d$  και κατ' επέκταση η ένταση του εγγύς πεδίου δεν εξαρτάται μόνο από την συχνότητα αλλά και από την διατμητική ταχύτητα. Συνεπώς το εγγύς πεδίο θα είναι πιο έντονο στα πυκνά υλικά.

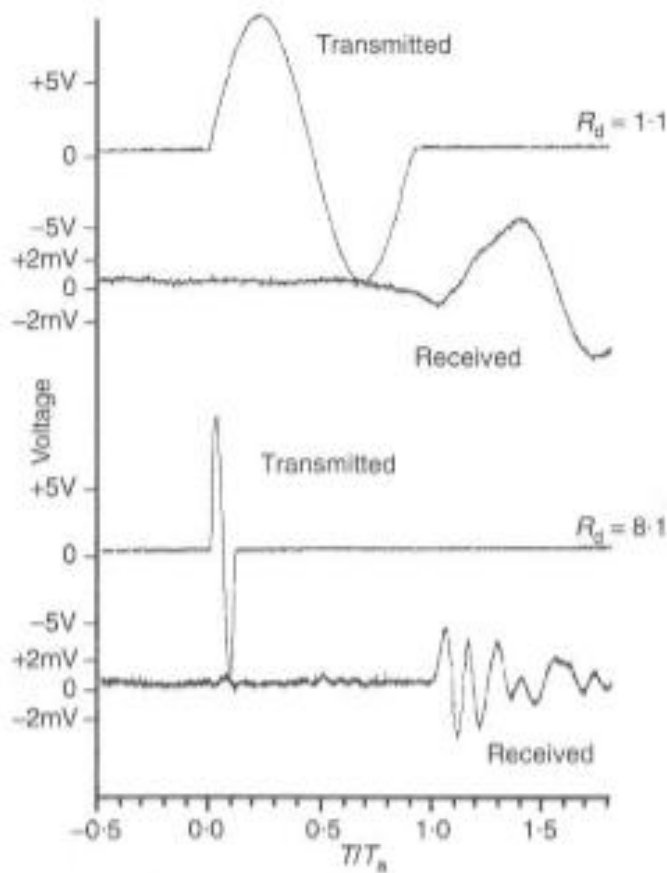
Ακολούθως οι Coop και Jovicic (1996) πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που ήταν ενσωματωμένα στην τριαξονική συσκευή. Το υλικό

ήταν καολινίτης, σε ελαστικές και αστράγγιστες συνθήκες με μέτρο ελαστικότητας  $E=118 \text{ MPa}$  και  $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$  και ενεργό τάση  $200 \text{ KPa}$ . Στο Σχήμα 2.13 που ακολουθεί φαίνεται η σχέση χρόνου-μετατόπισης για δυο διαφορετικές τιμές του  $R_d$ :



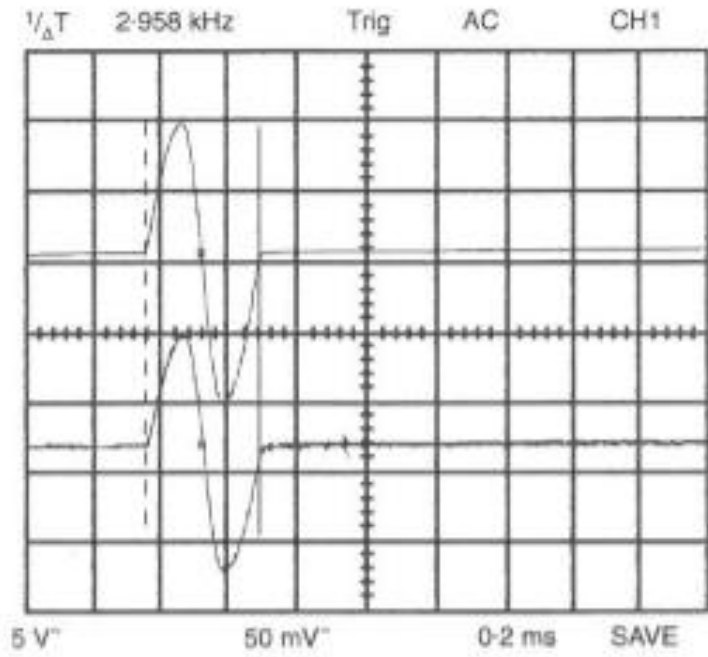
Σχήμα 2.13 Η μορφή του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου κύματος από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για διαφορετικές τιμές του  $R_d$  (Coop et al (1996))

Όπως φαίνεται για μικρές τιμές του  $R_d$  το φαινόμενο του εγγύς πεδίου είναι πιο έντονο απ' ότι για μεγάλες τιμές του  $R_d$ . Το αντίστοιχο σχήμα που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία είναι το Σχήμα 2.14.

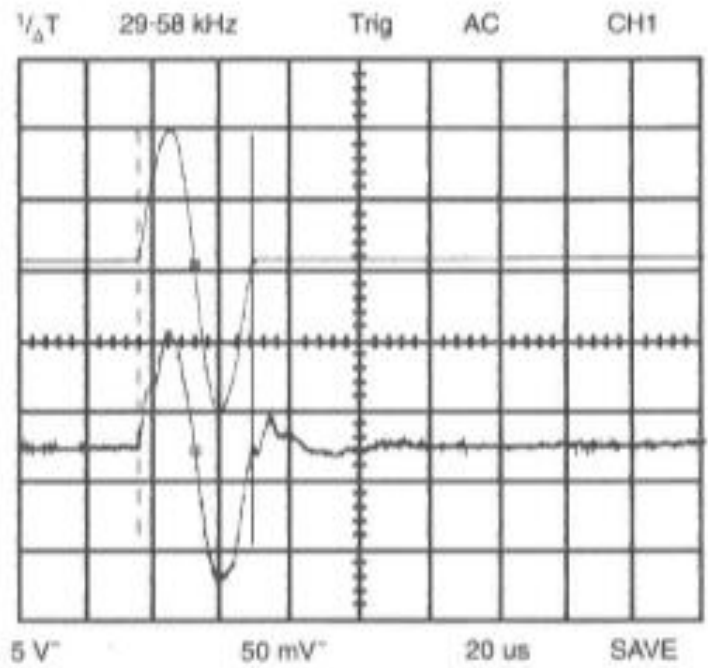


Σχήμα 2.14 Η μορφή του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου κύματος από πειραματική διαδικασία για διαφορετικές τιμές του  $R_d$  (Coop et al (1996))

Από τα σχήματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μεγαλύτερος είναι ο όρος  $R_d$  και κατεπέκταση καλύτερη η ποιότητα του σήματος. Ωστόσο όταν σε ένα πυκνό υλικό επιβάλουμε υψηλή συχνότητα είναι μεγάλη η πιθανότητα να συμβεί over-shooting. Παραδείγματος χάριν στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα πειραμάτων που εκτέλεσε ο Schulteiss (1982) σε ενισχυμένο κοκκώδη μαλακό βράχο με  $G_{\max}$  ίσο με 2,5 GPa και ενεργό τάση 200 kPa αρχικά για συχνότητα 2,96 kHz και στην συνέχεια για 29,6 kHz.



(a)



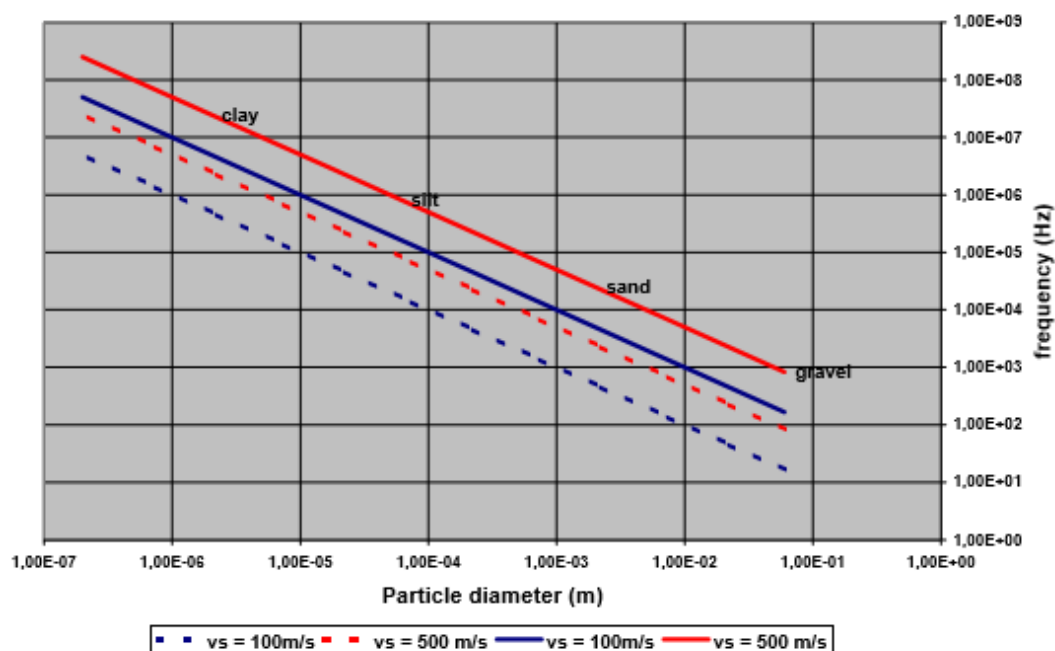
(b)

Σχήμα 2.15 Καταγραφή για (α) συχνότητα 2,96 kHz και (β) 29,6 kHz (Coop et al (1996))

Όπως φαίνεται ενώ στην πρώτη περίπτωση με συχνότητα 2,96 kHz το δοκίμιο ακολουθεί ιδανικά το εκπεμπόμενο κύμα, στην δεύτερη περίπτωση με συχνότητα 29,6

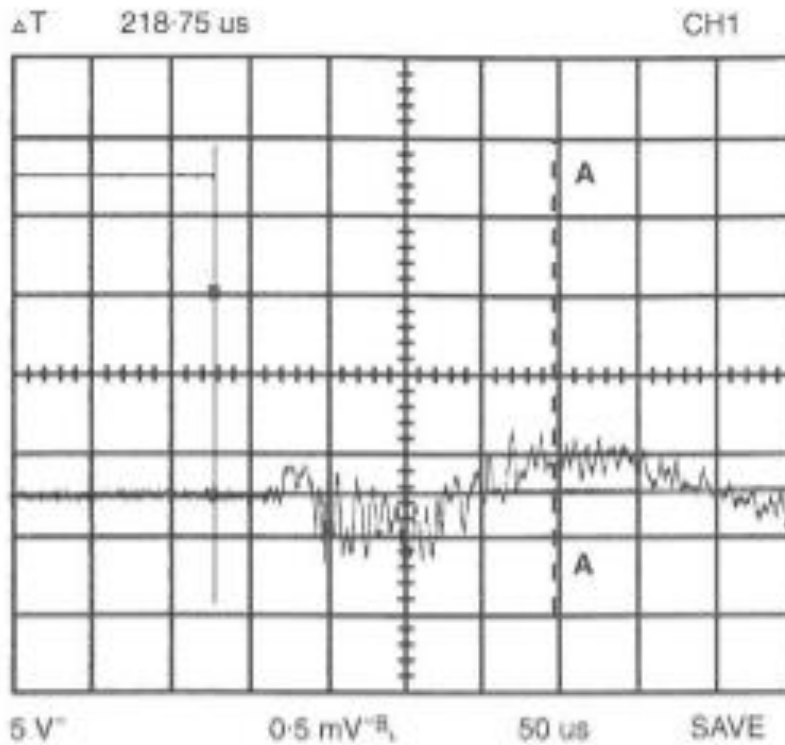


kHz παρατηρούνται κάποιες ασυνέχειες οι οποίες οφείλονται στο overshooting. Η συχνότητα πάνω από την οποία εμφανίζεται το φαινόμενο του overshooting δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια ενώ εξαρτάται από την φύση του δοκιμίου. Οι Arroyo et al (2001) είχαν προσπαθήσει να προσδιορίσουν αυτή την συχνότητα και τα αποτελέσματα την μελέτης του φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.16 Οριακή συχνότητα για αποφυγή του overshooting για υλικά (Arroyo et al (2001))

Επίσης το πρόβλημα είναι πιο έντονο όταν το κύμα διέγερσης είναι τετραγωνικό διότι ο χρόνος αύξησης του κύματος που τείνει στο μηδέν οδηγεί σε άπειρη συχνότητα. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται το σήμα ενός λαμβανόμενου κύματος που προέρχεται από τετραγωνικό κύμα στο ίδιο δοκίμιο μαλακού βράχου που φορτίστηκε πριν με ημιτονοειδές κύμα:



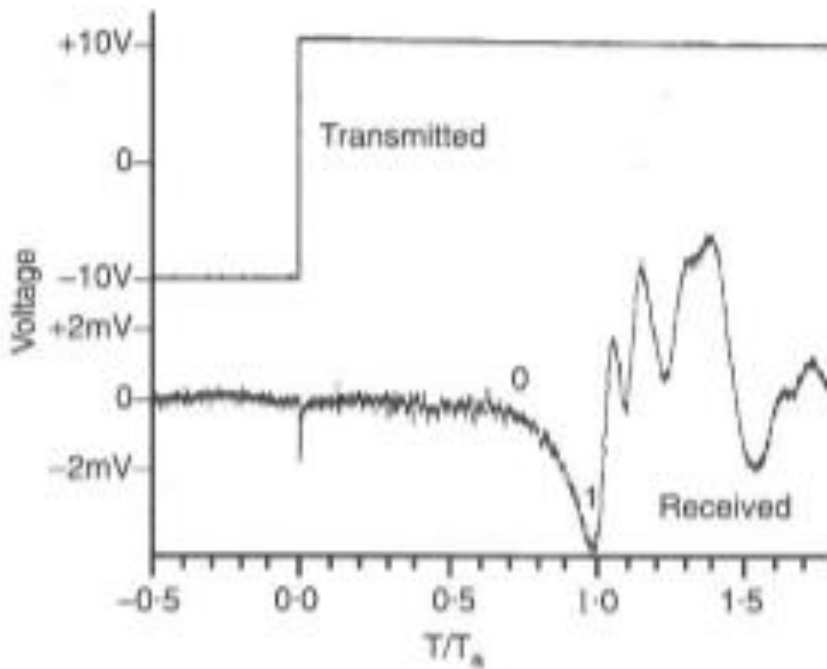
Σχήμα 2.17 Φαινόμενο overshooting σε τετραγωνικό κύμα (Coop et al (1996))

Όπως φαίνεται ο σωστός χρόνος άφιξης που είναι στην ευθεία Α-Α' έχει χαθεί μέσα στον θόρυβο του overshooting.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε ότι η συχνότητα του κύματος είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των μετρήσεων. Όταν η συχνότητα είναι μικρή οι μετρήσεις επηρεάζονται από το φαινόμενο του εγγύς πεδίου ενώ όταν η συχνότητα είναι μεγάλη από το φαινόμενο του overshooting.

#### 2.1.4 Μορφή κύματος

Ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό του σημείου άφιξης του διατμητικού κύματος είναι η μορφή του κύματος διέγερσης. Αρχικά τα κύματα τετραγωνικής μορφής χρησιμοποιούνταν πιο συχνά από τα υπόλοιπα κύματα. Ένα τυπικό τετραγωνικό κύμα φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.18 Καταγραφή τετραγωνικού κύματος στην συσκευή *bender element* (Coop *et al* (1996))

Η πολυπλοκότητα του τετραγωνικού κύματος οφείλεται κυρίως στις πολλές συχνότητες από τις οποίες αποτελείται. Οι πρώτοι που άλλαξαν το είδος του κύματος διέγερσης ήταν οι Viggiani και Atkinson (1995) οι οποίοι προσπαθώντας να μειώσουν την υποκειμενικότητα στην ερμηνεία των πειραμάτων *bender element* άλλαξαν το πολύπλοκο τετραγωνικό κύμα με το απλούστερο ημιτονοειδές. Αυτή η αλλαγή οδήγησε στην μείωση της αβεβαιότητας στον χρόνο άφιξης κατά 7%. Επίσης όπως προέκυψε από την μελέτη των Jovicic και Coop (1996) στο τετραγωνικό κύμα είναι πιο έντονο το φαινόμενο του overshooting.

### 2.1.5 Ύψος δοκιμίου

Τα δυο σημαντικότερα ερωτήματα σχετικά με το ύψος του δοκιμίου είναι πρώτον αν υπάρχει κάποιο βέλτιστο ύψος δοκιμίου και δεύτερον ποιο είναι το ενεργό μήκος του δοκιμίου.

Στο πρώτο ερώτημα προσπάθησαν να απαντήσουν οι Greening, Rio, Arroyo και David Muir Wood οι οποίοι μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων FLAC (1997)

και της εξίσωσης  $S(\omega, x) = e^{i k x}$ ,  $k = \omega / V_s$  όπου  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα,  $K$  είναι ο αριθμός κυμάτων και  $x$  είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Από τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων έφτασαν στο συμπέρασμα ότι δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός της επίδρασης του ύψους στο σφάλμα του μέτρου διάτμησης. Τέλος αυτό το σφάλμα είναι αρκετά σημαντικό στον προσδιορισμό της ακριβούς τιμής του μέτρου διάτμησης ωστόσο αν κρατήσουμε σταθερό το ύψος του δοκιμίου μπορούμε να πάρουμε ασφαλή γενικά συμπεράσματα.

Στο δεύτερο ερώτημα οι περισσότεροι μελετητές συμφωνούν ότι το ενεργό ύψος του δοκιμίου είναι από την κορυφή του πομπού μέχρι την κορυφή του δέκτη. Όπως για παράδειγμα η Viggiani (1992).

#### 2.1.6 Βιβλιογραφία

- 1) Matthew Coop, Vojkan Jovicic, “Objective criteria for determining  $G_{max}$  from bender element tests”, 1996
- 2) Chee-Ming Chan, “Bender element test in soil specimens: Identifying the shear wave arrival time”, EJGE, 2010
- 3) Marcos Arroyo, “Pulse tests in soil samples”, Department of Civil Engineering, 2001
- 4) Satori Yamashita, Takayuki Kawaguchi, Yukio Nakata, Takeko Mikami, Teruyuki Fujiwara, Satoru Shibuya, “Interpretation of international parallel test on the measurement of  $G_{max}$  using bender element”, Soils and Foundations, 2009
- 5) G. Viggiani and J. H. Atkinson, “Interpretation of bender element tests”, Geotechnique 45, 1995
- 6) P. D. Greening, Marcos Arroyo, Joao Rico, David Muir Wood, “Effects of sample size on bender-based axial  $G_0$  measurements”, Geotechnique 56, 2006
- 7) G. Viggiani, “SMALL STRAIN STIFFNESS OF FINE GRAINED SOILS”, 1992

## 2.2 Μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία

### 2.2.1 Είδος κύματος

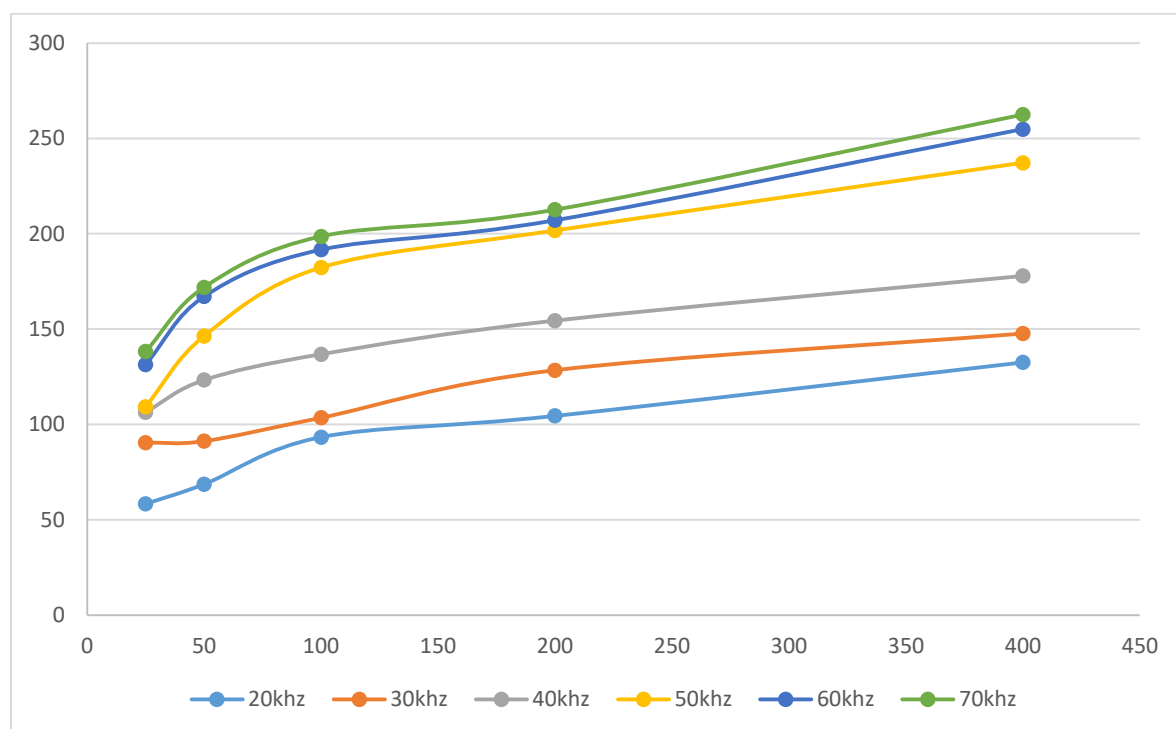
Στην παρούσα διπλωματική ως κύμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε το ημιτονοειδές κύμα, για να αποφύγουμε το φαινόμενο του overshooting αλλά και για ευκολότερη σύγκριση του σήματος που εκπέμπουμε με το σήμα που λαμβάνουμε (το ημιτονοειδές κύμα έχει πολύ κοντινή μορφή με το λαμβανόμενο σήμα).

### 2.2.2 Σημείο άφιξης

Για τον προσδιορισμό του σημείου άφιξης αρχικά έγιναν δοκιμές με τις μεθόδους visual picking και peak-to-peak. Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και με τις δυο μεθόδους καταλήξαμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο peak-to-peak καθώς η επιρροή του εγγύς πεδίου ήταν μικρότερη.

### 2.2.3 Συχνότητα

Για την επιλογή της κατάλληλης συχνότητας αρχικά χρησιμοποιήσαμε τις συχνότητες 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 και 80 kHz σε ένα δοκίμιο άμμου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 2.19 Αποτελέσματα bender element για διαφορετικές συχνότητες

Εκτός από το διάγραμμα για την επιλογή της συχνότητας χρησιμοποιήθηκε και η σταθερά  $R_d$  που για να μην είναι έντονη η επίδραση του εγγύς πεδίου πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του δυο. Επίσης στην επιλογή συχνότητας λάβαμε υπόψιν το φαινόμενο του overshooting από το Σχήμα 2.16.

Συνεπώς από τα παραπάνω διαγράμματα και από τον τύπο  $R_d = d f/V_s$  όπου  $d$  είναι περίπου 15mm και το  $V_s$  της τάξης των 300 m/sec η συχνότητα που προέκυψε και χρησιμοποιήθηκε είναι 40 kHz.

#### 2.2.4 Ύψος δοκιμίου

Τέλος σχετικά με ύψος του δοκιμίου, χρησιμοποιήσαμε το ύψος που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι μελετητές, δηλαδή από την κορυφή του πρώτου πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μέχρι την κορυφή του δεύτερου πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Υλικά



### 3.1 Ιδιότητες υλικών

#### 3.1.1 Εισαγωγή

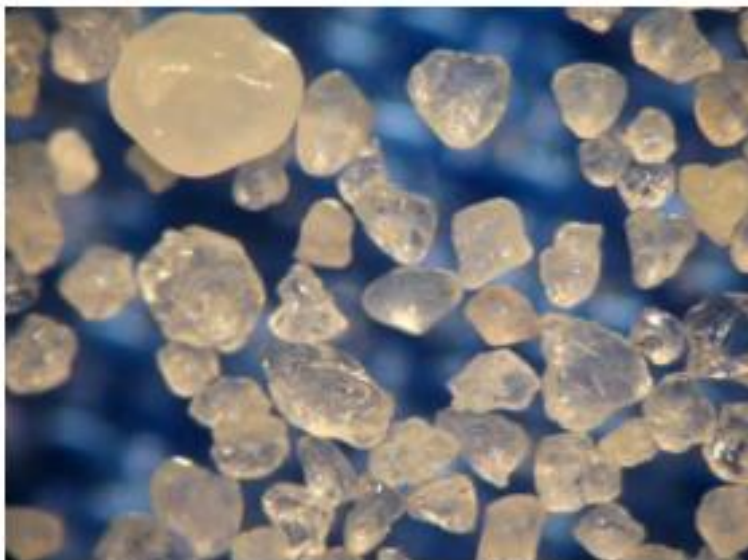
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και οι ιδιότητές τους. Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι η άμμος M31 και η ιλύς D6.

#### 3.1.2 Άμμος M13

Η άμμος M31 είναι μια χαλαζιακή άμμος από το Βέλγιο. Πρόκειται για μια αρκετά καθαρή άμμο με σχετικά ομοιόμορφα στιλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα, όπως φαίνεται τις εικόνες που ακολουθούν:



*Σχήμα 3.1 Σχήμα και μορφή άμμου M31*

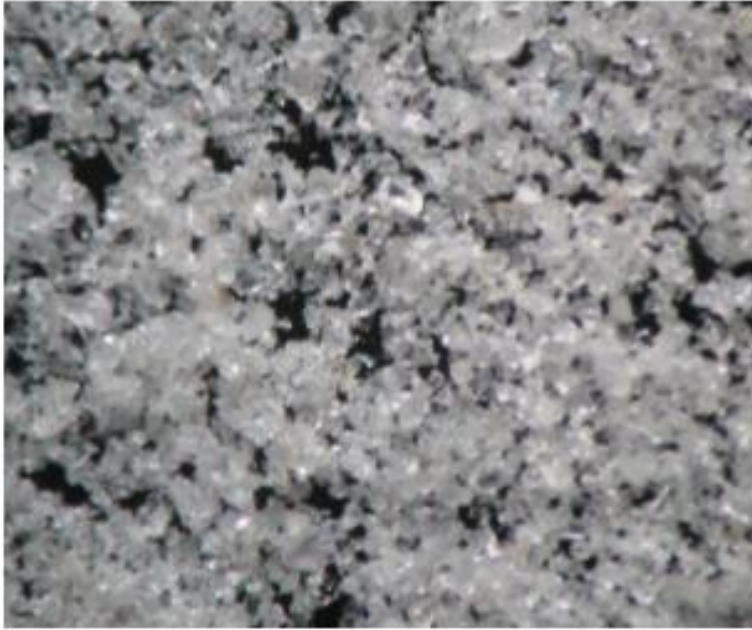


*Σχήμα 3.2 Σχήμα και μορφή άμμου M31*

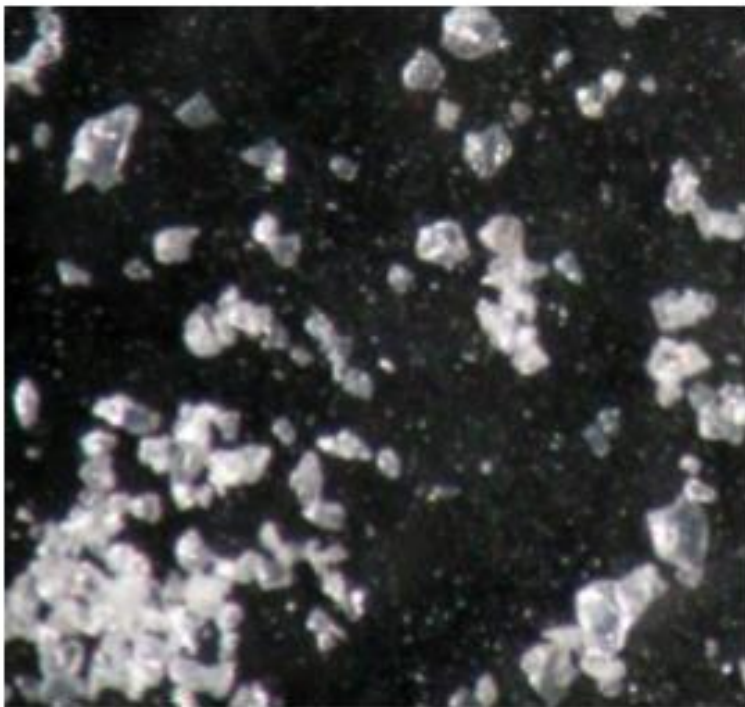
Η άμμος αυτή είναι κατά 99% οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) ενώ μπορεί να περιέχει και άλλες προσμίξεις. Έχει ανοιγμένο ειδικό βάρος στερεών κόκκων  $G_s=2.66 \text{ gr/cm}^3$ .

### 3.1.3 Ιλύς D6

Ως λεπτόκοκκο υλικό χρησιμοποιήθηκε η ιλύς D6. Πρόκειται για προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου με πολύ μικρή ποσότητα μαύρων κόκκων που ίσως ωφελείται σε ανθρώπινη επιμόλυνση. Οι κόκκοι της ιλύος D6 είναι διαυγείς σε αντίθεση με την άμμο M31, εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στιλπνότητα κάτι που οφείλεται στην κογχώδη θραύση. Επίσης η ιλύς D6 είναι μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερη ενεργό οξύτητα. Η μορφή των κόκκων της ιλύος D6 φαίνεται στα Σχήματα 3.3 και 3.4 που ακολουθούν:



*Σχήμα 3.3 Σχήμα και μορφή κόκκων ιλύος D6*



*Σχήμα 3.4 Σχήμα και μορφή κόκκων ιλύος D6*

### 3.2 Κοκκομετρία υλικών

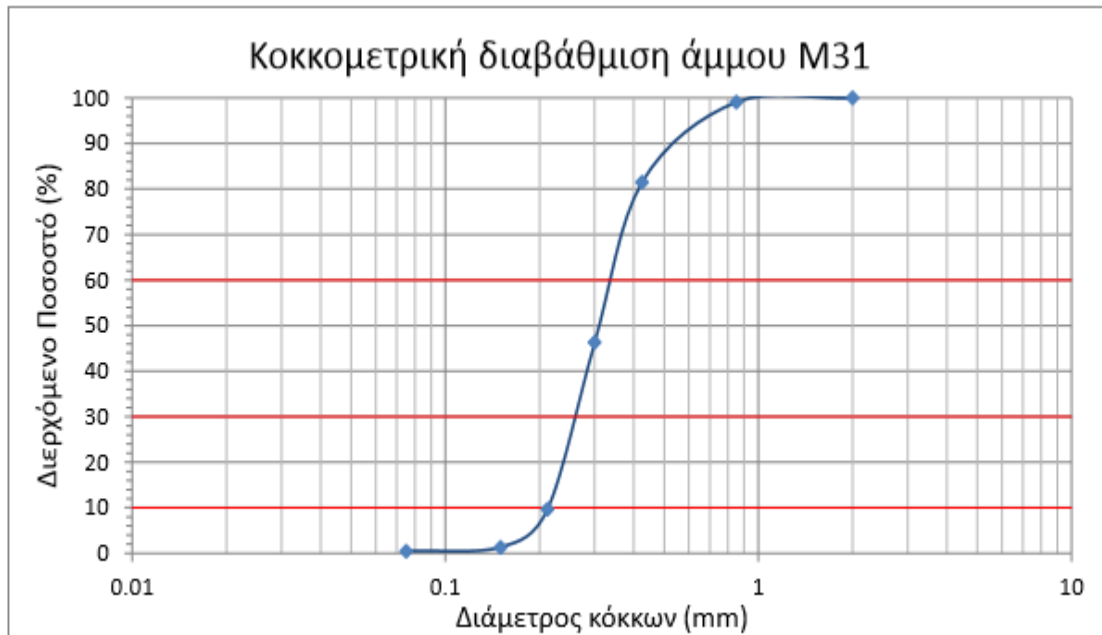
#### Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31

Το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων μιας άμμου επηρεάζουν σημαντικά την μηχανική συμπεριφορά της. Γι 'αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον προσδιορισμό της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Για τον προσδιορισμό της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης χρησιμοποιήθηκαν κόσκινα διαφορετικής διαμέτρου οπής σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στα British Standards 1377. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η ονομασία και η διάμετρος των κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο:

Ονομασία κοσκίνου	Διάμετρος οπής κοσκίνου (mm)
No 10	2.000
No 20	0.850
No 40	0.425
No 50	0.300
No 70	0.212
No 100	0.150
No 200	0.075

*Πίνακας 3.1 Ονομασία και διάμετρος κοσκίνων εργαστηρίου*

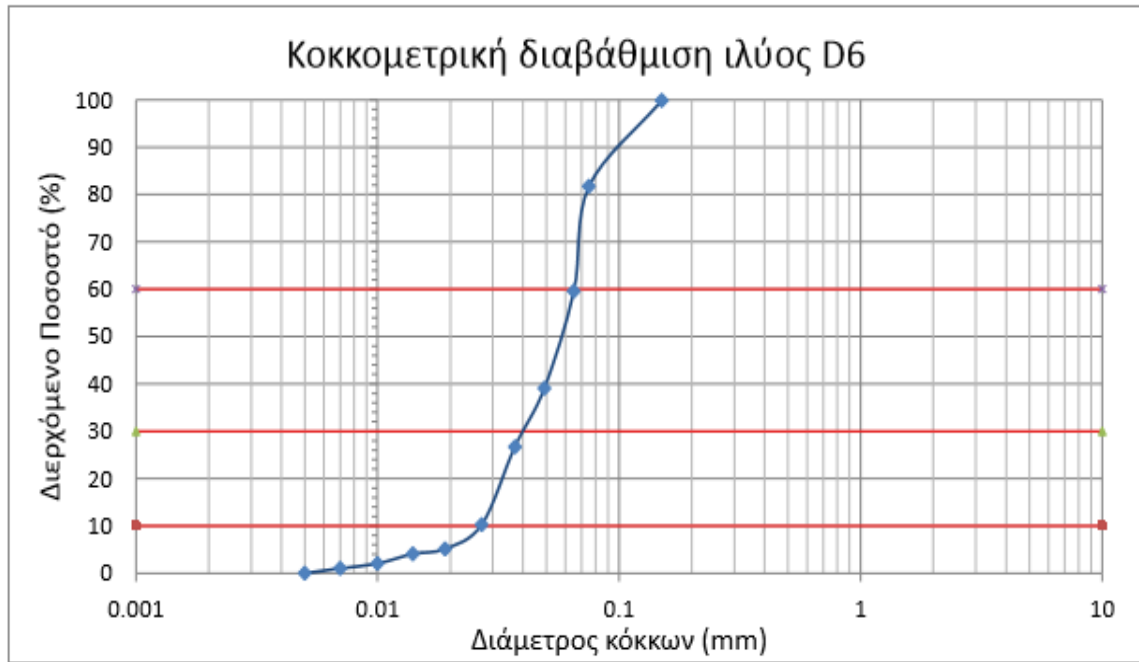
Ενώ στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου M31 που προέκυψε από το εργαστήριο:



Σχήμα 3.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31

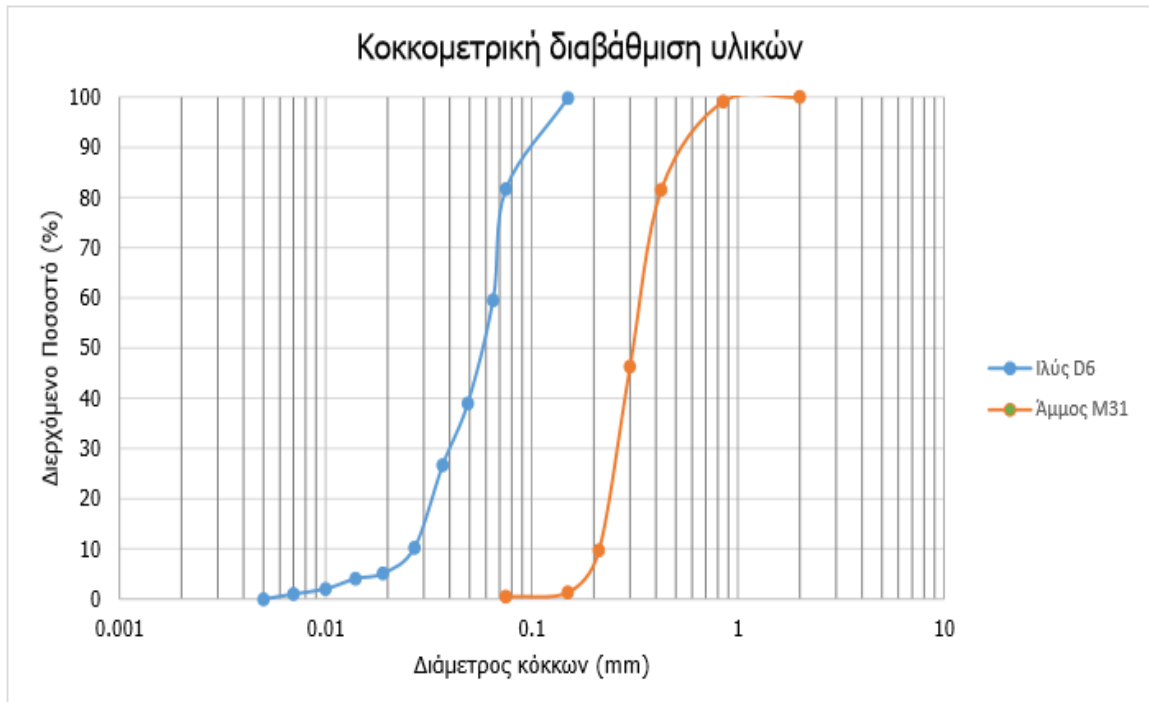
#### Κοκκομετρική διαβάθμιση ιλύος D6

Για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης της ιλύος D6 χρησιμοποιήθηκε από την παρακάτω διαδικασία μόνο το κόσκινο N<sub>o</sub>200. Το ποσοστό ιλύος που πέρασε από το κόσκινο N<sub>o</sub>200 διαβαθμίστηκε με την βοήθεια πυκνομέτρου. Η τελική καμπύλη της ιλύος όπως προέκυψε πειραματικά στο εργαστήριο φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση ιλύος D6

Τέλος στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις της άμμου (M31) και της ιλύος (D6):



Σχήμα 3.4 Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31 και ιλύος D6

### 3.3 Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων $e_{max}$ και ελάχιστου δείκτη πόρων $e_{min}$

Ο μέγιστος δείκτης πόρων  $e_{max}$ , δηλαδή η χαλαρότερη δομή για το μείγμα προσδιορίστηκε από την μέθοδο Kolbuszewski (1948b). Η διαδικασία για τον προσδιορισμό του  $e_{max}$  σύμφωνα με αυτή την μέθοδο είναι η ακόλουθη:

- i) Σε γυάλινο δοκιμαστικό σωλήνα χωρητικότητας 1lt αποτίθενται περίπου 300gr μίγματος.
- ii) Στο ελεύθερο άκρο του δοκιμαστικού σωλήνα τοποθετείται ελαστικό κάλυμμα.
- iii) Στη συνέχεια ανακατεύουμε τον σωλήνα μαζί με το μίγμα μερικές φορές. Ακολούθως με μια απότομη κίνηση αναποδογυρίζεται και πάλι ο σωλήνας για να επιστρέψει στην κανονική του θέση όπου και μετράμε τον όγκο του μίγματος με την βοήθεια της ένδειξης του δοκιμαστικού σωλήνα.

- iv) Τέλος μέσου του όγκου του δοκιμίου, του  $G_s$  και του βάρους του μίγματος υπολογίζεται ο μέγιστος δείκτης πόρων  $e_{max}$ .

Για την άμμο M31 ο μέγιστος δείκτης πόρων προέκυψε ίσος με 0,79.

Για τον προσδιορισμό του  $e_{max}$  των μειγμάτων θεωρήθηκε ότι η άμμος περιέχει 100% χονδρόκοκκο υλικό ενώ η ιλύς 80% λεπτόκοκκο και 20% χονδρόκοκκο. Το ποσοστό λεπτόκοκκων των μειγμάτων ήταν 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50% και 80%. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για αυτά τα μείγματα μετά από κατάλληλη επεξεργασία παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.8 Καμπύλη  $e_{max}$  για μείγματα άμμου και ιλύος

Ο ελάχιστος δείκτης πόρων  $e_{min}$ , δηλαδή η πυκνότερη δομή του μίγματος προσδιορίστηκε από την ακόλουθη διαδικασία:

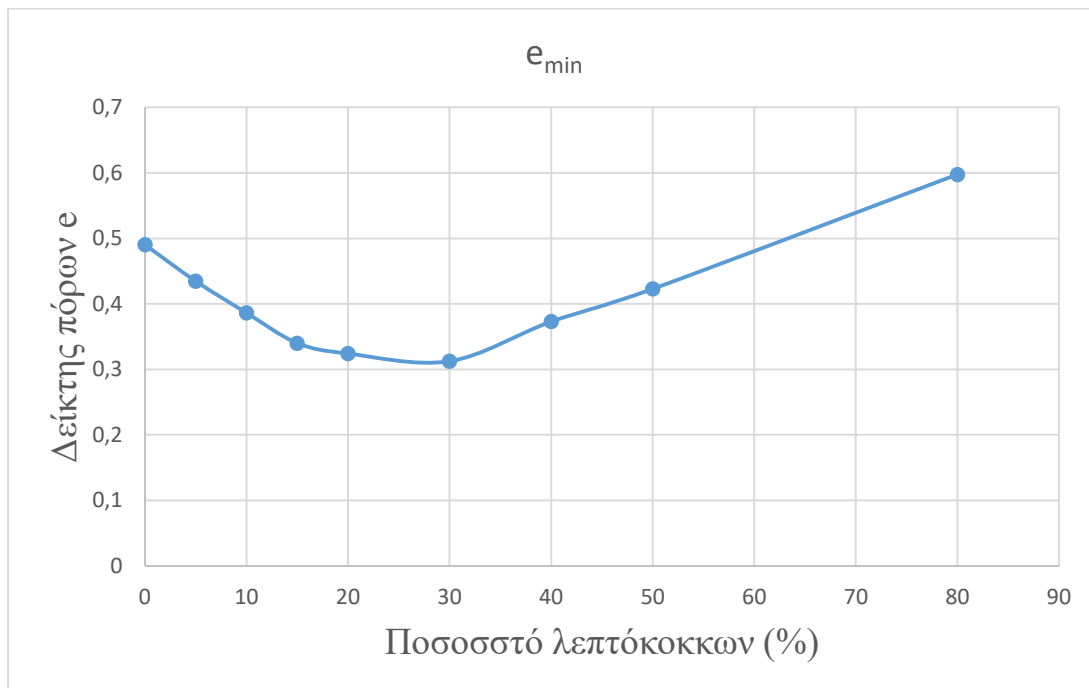
- i) Σε ειδικό δοχείο κυλινδρικού σχήματος τοποθετείται σε 5 στρώσεις το εξεταζόμενο μίγμα.
- ii) Στη συνέχεια συμπυκνώνεται κάθε στρώση μέσω συνεχόμενων χτυπημάτων από ειδικό όργανο.
- iii) Ακολούθως υπολογίζεται το ύψος του δοχείου που είναι κενό και η μάζα του μίγματος.



- iv) Αφαιρώντας από τον συνολικό όγκο του δοχείου τον κενό όγκο προκύπτει ο όγκος του μείγματος. Σε συνδυασμό με το  $G_s$  και το βάρος προκύπτει ο ελάχιστος δείκτης πόρων.

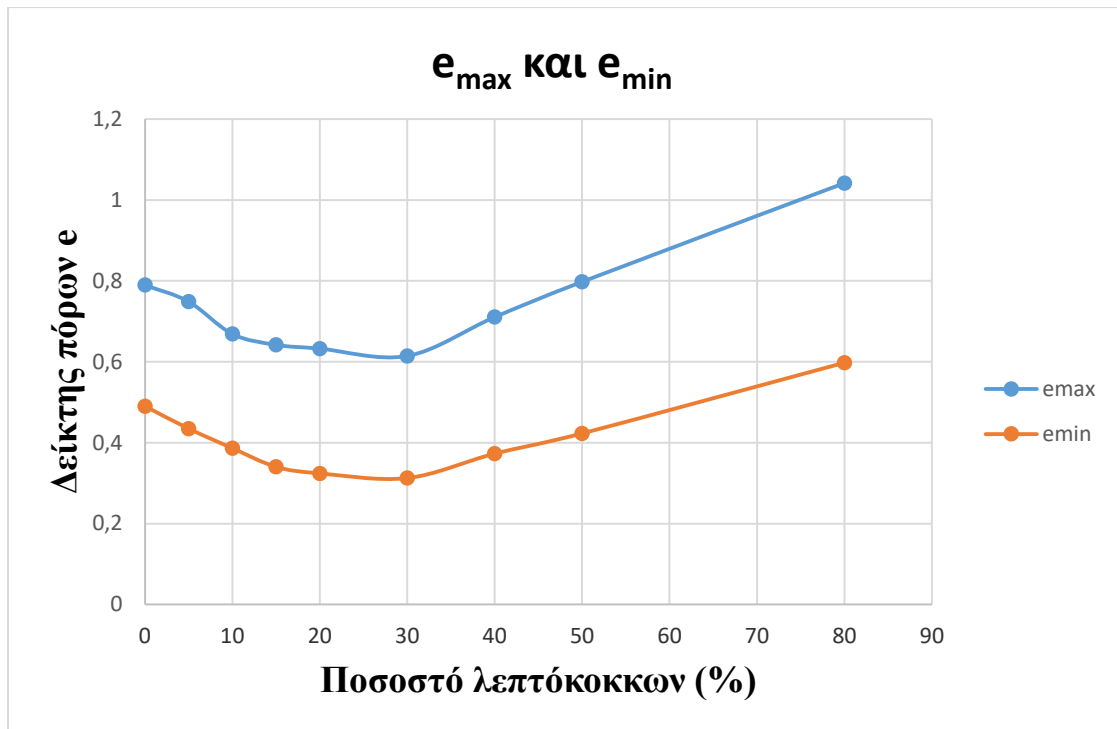
Με βάση την παραπάνω διαδικασία προέκυψε το  $e_{min}$  της άμμου ίσο με 0,49.

Για τον προσδιορισμό του ελάχιστου δείκτη πόρων για τα μείγματα έγινε η ίδια θεώρηση με τον μέγιστο δείκτη πόρων, δηλαδή ότι η άμμος περιέχει 100% χονδρόκοκκο υλικό ενώ η ιλύς 80% λεπτόκοκκο και 20% χονδρόκοκκο. Τα μείγματα στα οποία υπολογίστηκε ο ελάχιστος δείκτης πόρων είχαν ποσοστό λεπτόκοκκων 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50% και 80%. Η καμπύλη που προέκυψε μετά από επεξεργασία είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 3.9 Καμπύλη  $e_{min}$  για μείγματα άμμου και ιλύος

Τέλος στο Σχήμα 3.10 που ακολουθεί φαίνονται οι δυο προηγούμενες καμπύλες στο ίδιο διάγραμμα:



Σχήμα 3.10 Καμπύλες  $e_{max}$  και  $e_{min}$  για μείγματα άμμου και ιλύος

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω καμπύλες, όταν στη καθαρή άμμο προστεθεί ένα μικρό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, το λεπτόκοκκο γεμίζει τα κενά με αποτέλεσμα η δομή του μίγματος να γίνεται πιο πυκνή. Αυτό παρατηρείται μέχρι το ποσοστό των λεπτόκοκκων να φτάσει το 30%. Μετά από αυτό το ποσοστό η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων κάνει το μίγμα πιο αραιό. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κόκκοι του χονδρόκοκκου υλικού χάνουν την επαφή μεταξύ τους και πλέον το πρωτεύον υλικό είναι το λεπτόκοκκο. Τέλος η μορφή που έχουν οι καμπύλες στο Σχήμα 3.10 καθώς και το οριακό ποσοστό (threshold) επιβεβαιώνονται και από τα πειράματα των Yamamuro et al (2002) (σχήμα 1.4) και Belkhatir et al (2010) (βλ. Σχήμα 1.5).

### 3.5 Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων $e_{skmax}$ και ελάχιστου δείκτη πόρων $e_{skmin}$

Με την χρήση των δεδομένων των ίδιων πειραμάτων, αλλά με διαφορετική επεξεργασία μπορούν να προκύψουν τα διαγράμματα  $e_{skmax}$  και  $e_{skmin}$ . Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό αυτών των καμπυλών είναι οι ακόλουθοι:

$$e_c = \frac{e + f_c}{1 - f_c}$$

Όπου  $f_c$  το ποσοστό λεπτόκοκκων

Αυτός ο τύπος ισχύει όταν πρωτεύον υλικό στο μίγμα είναι το χονδρόκοκκο, άρα χρησιμοποιείται μέχρι το ποσοστό λεπτόκοκκου 30%. Όπως φαίνεται από τον τύπο για μηδενικό ποσοστό λεπτόκοκκων ο σκελετικός δείκτης πόρων είναι ίσος με τον δείκτη πόρων της καθαρής άμμου. Ο δεύτερος τύπος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο:

$$e_f = \frac{e}{f_c}$$

όπου επίσης  $f_c$  είναι το ποσοστό λεπτόκοκκων

Αυτός ο τύπος ισχύει όταν πρωτεύον υλικό στο μίγμα είναι το λεπτόκοκκο, άρα χρησιμοποιείται για ποσοστό λεπτόκοκκου 30% και μετά. Όπως φαίνεται από τον τύπο για ποσοστό λεπτόκοκκων 100% ο σκελετικός δείκτης πόρων είναι ίσος με τον δείκτη πόρων της ιλύος.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο μέγιστος δείκτης πόρων των μιγμάτων σε όρους εδαφικού σκελετού:



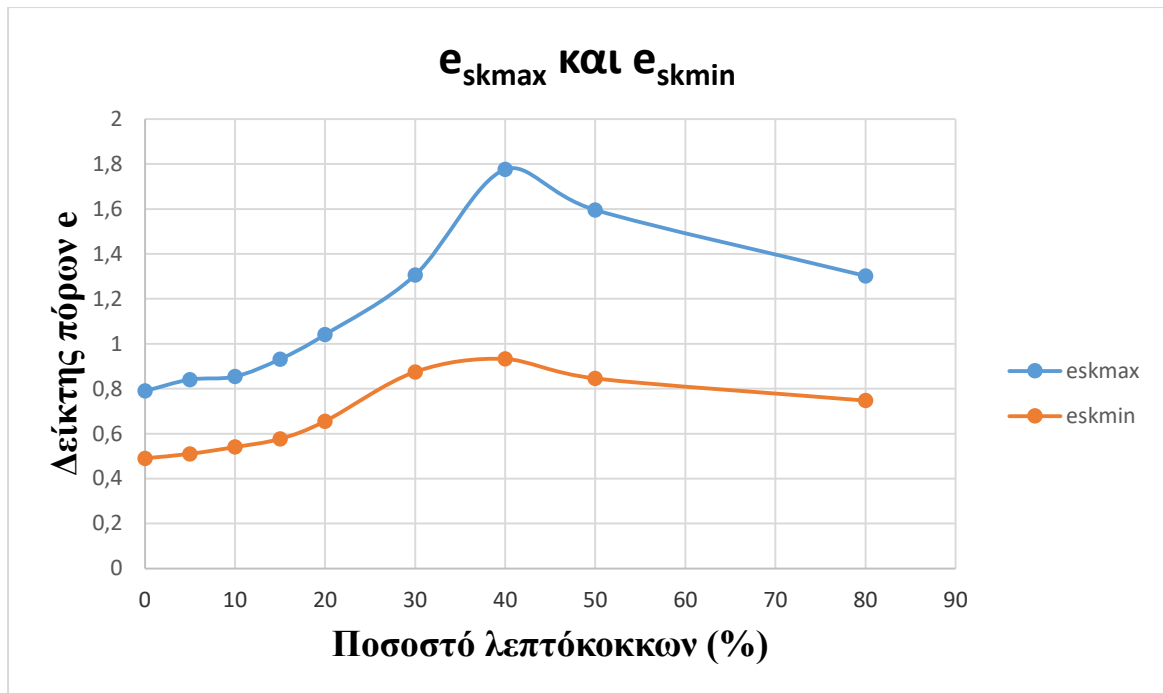
Σχήμα 3.11 Καμπύλη  $e_{skmax}$  για μίγματα άμμου και ιλύος

Και στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο ελάχιστος δείκτης πόρων των μιγμάτων σε όρους skeleton:



Σχήμα 3.12 Καμπύλη  $e_{skmin}$  για μίγματα άμμου και ιλύος

Τέλος στο παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 3.13 φαίνονται και ο μέγιστος και ο ελάχιστος δείκτης πόρων  $e_{sk}$ :



Σχήμα 3.13 Καμπύλες  $e_{skmax}$  και  $e_{skmin}$  για μείγματα άμμου και ιλύος

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι ενώ ο δείκτης πόρων  $e$  μειώνεται μέχρι το threshold όσο αυξάνεται το ποσοστό λεπτόκοκκων και στην συνέχεια αυξάνεται, ο δείκτης πόρων  $e_{sk}$  έχει την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά. Επίσης στην καμπύλη του δείκτη πόρων  $e$  το threshold εμφανίζεται για ποσοστό κοντά στο 30%, στην καμπύλη του  $e_{sk}$  το λεπτόκοκκο φαίνεται να επιδρά περισσότερο στην συμπεριφορά του μείγματος κοντά στο ποσοστό 40%.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Αποτελέσματα πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

## 4.1 Εισαγωγή

Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης  $G$  με την χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender element) σε άμμο, ιλυώδη άμμο, αμμώδη ιλύ και ιλύ. Επειδή η δοκιμή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων προκαλεί παραμορφώσεις της τάξης του  $10^{-6}$  το μέτρο διάτμησης που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί ελαστικό ( $G_{max}$ ). Το μέτρο διάτμησης  $G_{max}$  είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος που χρησιμοποιείται σε αρκετές γεωτεχνικές αναλύσεις.

Η άμμος στη φύση περιέχει διάφορα ορυκτά τα οποία ποικίλουν σε μέγεθος και κοκκομετρία. Το ποσοστό και η σύσταση των ορυκτών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά της άμμου. Στη φύση τα λεπτόκοκκα που εμφανίζονται πιο συχνά με την άμμο είναι η ιλύς και η άργιλος τα οποία ακόμα και σε πολύ μικρά ποσοστά επηρεάζουν την συμπεριφορά της άμμου και την αντοχή της.

## 4.2 Δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Για την πραγματοποίηση πειραμάτων με την χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων χρειάζεται:

- i) Μια γεννήτρια συναρτήσεων
- ii) Ένας παλμογράφος
- iii) Δυο πιεζοηλεκτρικά στοιχεία
- iv) Ένα καταγραφικό
- v) Ένα μηκυνσιόμετρο
- vi) Ένα συμπιεσόμετρο

Η γεννήτρια συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας Thurlby Thandar Instruments (M/N: TG1304) (Εικόνα 4.1). Η γεννήτρια αυτή μπορεί να παράγει κύματα με συχνότητα μέχρι και 13MHz. Έχει δυο γεννήτριες, μια κύρια και μια δευτερεύουσα. Η κύρια γεννήτρια έχει εύρος συχνοτήτων από 10mHz μέχρι 13MHz ενώ η βοηθητική γεννήτρια από 5mHz μέχρι 50kHz. Τα είδη κυμάτων που μπορούν να παράξουν οι γεννήτριες είναι ημιτονοειδές, τετραγωνικό και συνδυασμός δυο η παραπάνω κυμάτων και το εύρος των τάσεων είναι από 2mV μέχρι 20V σε κάθε κορυφή.

Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδές κύμα συχνότητας 50kHz και τάσης 10V από κορυφή σε κορυφή. Επίσης επιλέχθηκε συχνότητα επαναφοράς 50Hz.

Ο παλμογράφος είναι της εταιρίας Hameg (M/N: HM 1597-3) (Εικόνα 4.2) και διαθέτει δυο κανάλια. Στο ένα συνδέθηκε η γεννήτρια συναρτήσεων και ο πομπός και στο άλλο ο δέκτης (Εικόνα 4.3). Ο λόγος που η γεννήτρια και ο πομπός είναι στο ίδιο κανάλι είναι για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που κάνει το κύμα να πάει από την γεννήτρια στον πομπό. Ο παλμογράφος έχει δυο κανάλια. Έχει την δυνατότητα απεικόνισης της τάσης στον κατακόρυφο άξονα και τον χρόνο στον οριζόντιο άξονα. Η τάση σε κάθε υποδιαίρεση της οθόνης (div) κυμαίνεται από 1 mV μέχρι 20 V. Αντίστοιχα η κλίμακα του χρόνου μπορεί να κυμαίνεται από 50 ns μέχρι 500 ms για κάθε υποδιαίρεση της οθόνης. Έχει την δυνατότητα λειτουργίας και σε αναλογική μορφή και σε ψηφιακή μορφή. Επιπλέον διαθέτει τη δυνατότητα ταυτόχρονης απεικόνισης δυο σημάτων με διαφορετική κλίμακα τάσης, κάτι που μας δίνει την δυνατότητα να βρούμε την χρονική διαφορά μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου κύματος.

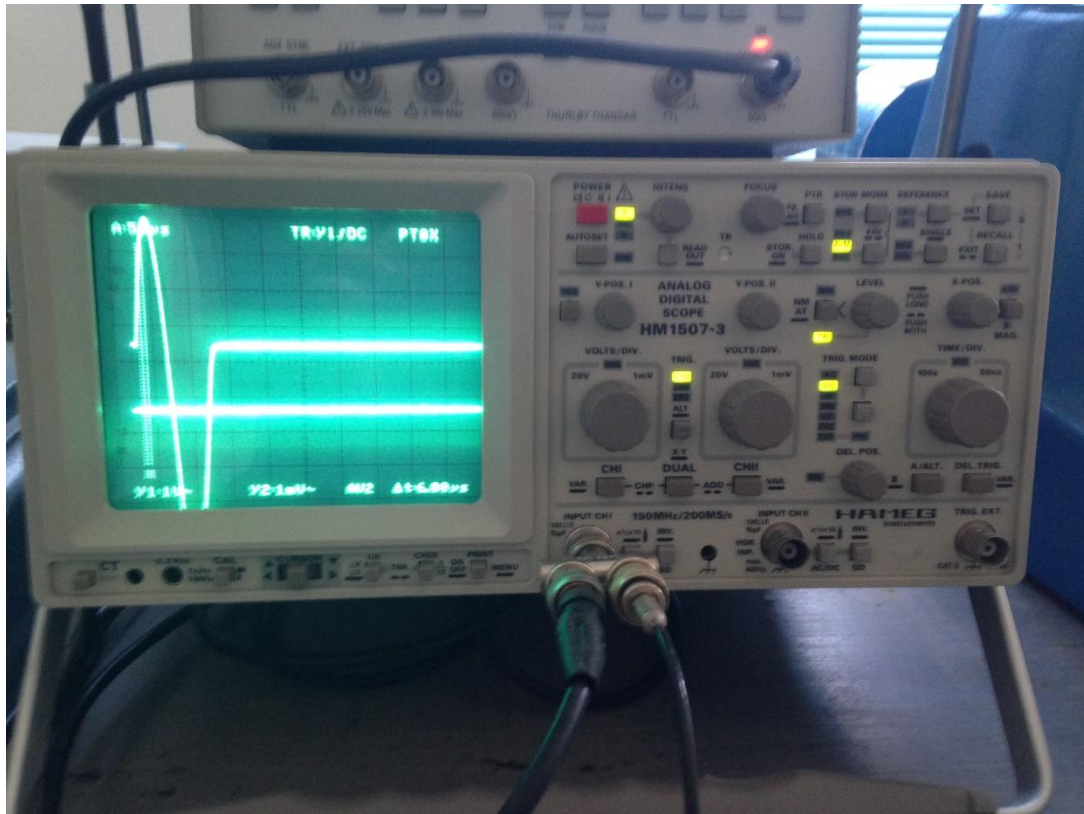
Η άντληση των δεδομένων έγινε με την βοήθεια ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή ο οποίος συνδέθηκε με τον παλμογράφο μέσω ενός καλωδίου τύπου RS-232. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της σύνδεσης παλμογράφου-υπολογιστή είναι το πρόγραμμα SP 107 το οποίο διευκόλυνε σε μεγάλο βαθμό την χρήση υπολογιστή.

Το συμπιεσόμετρο αποτελείται από μια κυψέλη διαμέτρου 75mm στο οποίο έχουν προσαρτηθεί δυο δίμορφα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξέχουν 3mm το καθένα μέσα στο δείγμα. Ενώ το υπόλοιπο τμήμα τους είναι στερεωμένο μέσα στη μάζα των πωρολίθων με την βοήθεια εποξειδικών ρητινών. Στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να εφαρμοστούν διαφορές δυναμικού μέσω δυο οπών στη βάση και στο κάλυμμα αλουμινίου μέσα από τις οποίες περνούν καλώδια που ενώνονται με την επιφάνεια των στοιχείων. Μέσω αυτών των καλωδίων έχουμε την δυνατότητα να στείλουμε τον ηλεκτρικό σήμα από τον πομπό και να το καταγράψουμε από τον δέκτη. Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένας δακτύλιος διαμέτρου 75mm και ύψους 19mm.

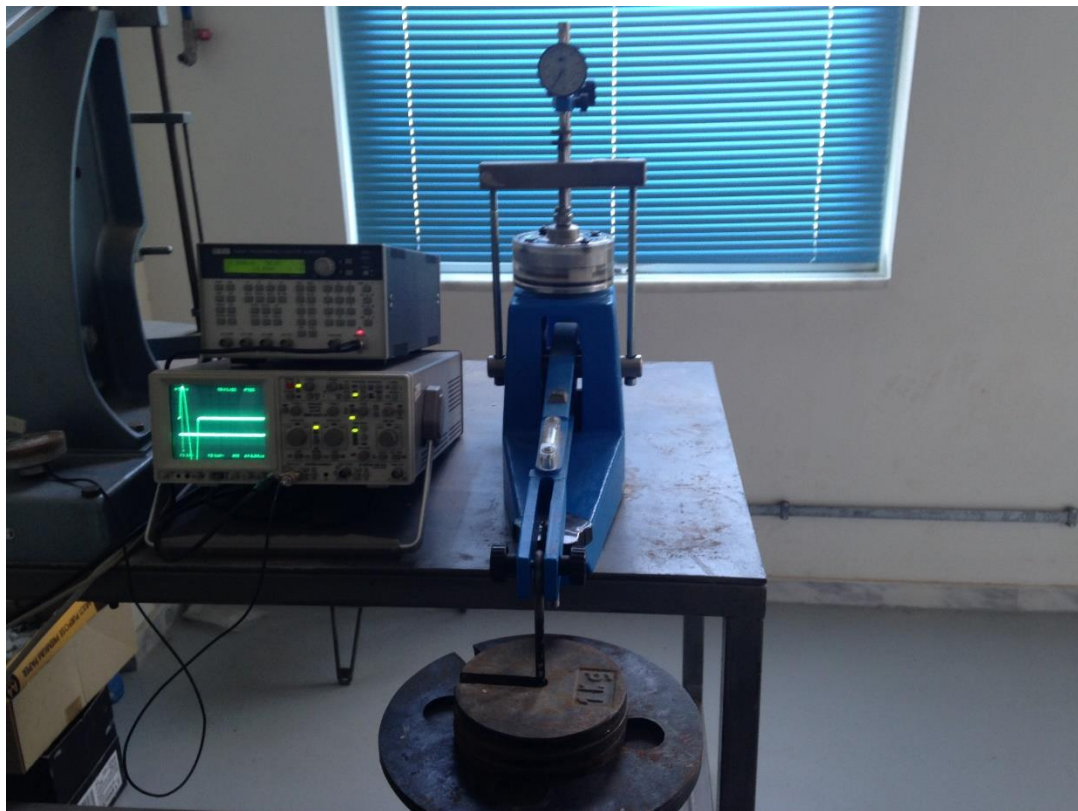




*Εικόνα 4.1 Γεννήτρια συναρτήσεων Thurlby Thandar Instruments (M/N: TG1304)*



Εικόνα 4.2 Παλμογράφος Hameg (Μ/Ν: ΗΜ 1597-3)



Εικόνα 4.3 Συνολική διάταξη συσκευής

### 4.3 Προετοιμασία μειγμάτων

Αρχικά υπολογίζουμε και ζυγίζουμε τις κατάλληλες ποσότητες άμμου και ιλύος για το κάθε μίγμα. Στη συνέχεια η άμμος και η ιλύς τοποθετούνται σε ένα πήλινο δοχείο στο οποίο ανακατεύονται μέχρι το μίγμα να γίνει ομοιογενές. Από τα μίγματα που κατασκευάστηκαν ιδιαίτερη δυσκολία στο να γίνουν ομοιογενή παρουσίασαν αυτά με ποσοστό ιλύος κοντά στο 50%.

Αρκετά σημαντική ήταν και η τοποθέτηση του μίγματος στην συσκευή bender elements ώστε να πετύχουμε την δομή που θέλαμε για το μίγμα (χαλαρή ή πυκνή). Για να πετύχουμε χαλαρή δομή υπολογίζαμε την μάζα που έπρεπε να έχει το μίγμα και στην συνέχεια με την βοήθεια ενός χωνιού ρίχναμε το μίγμα στο δακτύλιο του συμπιεσομέτρου από απόσταση περίπου 10cm. Για τα πετύχουμε πυκνή δομή γεμίζαμε σιγά σιγά τον δακτύλιο και κάθε φορά που βάζαμε κάποια ποσότητα δονούσαμε το μίγμα για να συμπτυκνωθεί.

### 4.4 Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι η ακόλουθη:

- i) Ζυγίζονται οι απαραίτητες ποσότητες άμμου και ιλύος για την παραγωγή του κάθε μίγματος και στην συνέχεια τοποθετούνται στο πήλινο δοχείο στο οποίο ανακατεύονται μέχρι να γίνει ομοιογενές το μίγμα.
- ii) Μεταφορά του μίγματος από το δοχείο στο χωνί και από εκεί στο δακτύλιο του συμπιεσομέτρου.
- iii) Στρώσιμο του μίγματος στην κορυφή του ώστε να είναι επίπεδο.
- iv) Τοποθέτηση του κελιού του συμπιεσομέτρου και μέτρηση της αρχικής τιμής του μηκυνσιομέτρου.
- v) Επιβολή ενεργού τάσης στο μίγμα και καταγραφή της τιμής του μηκυνσιομέτρου.
- vi) Ενεργοποίηση της γεννήτριας και άσκηση τάσης στο μίγμα.
- vii) Καταγραφή του σήματος που προκύπτει με την βοήθεια του καταγραφικού μηχανήματος και του ηλεκτρονικού υπολογιστή.
- viii) Επιβολή νέας ενεργού τάσης και επανάληψη της διαδικασίας από το βήμα 5.

- ix) Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων μεταφέρεται το μίγμα στην ζυγαριά και μετριέται η μάζα του.

#### 4.5 Παρατηρήσεις σχετικά με την πειραματική διαδικασία

- 1) Όλα τα πειράματα διεξήχθησαν για ημιτονοειδές κύμα συχνότητας 40 kHz.
- 2) Το ύψος των δοκιμίων ήταν περίπου 19 cm.
- 3) Ένα αρκετά δύσκολο σημείο της διαδικασίας ήταν η παρασκευή χαλαρών δοκιμίων και η κατά το δυνατόν μικρότερη συμπύκνωσή τους όταν κάναμε επίπεδη την κορυφή του δοκιμίου.
- 4) Μεγάλη προσοχή επίσης δόθηκε στην τοποθέτηση του στοιχείου πομπός ώστε πρώτιστος να υπάρχει καλή επαφή με το μίγμα και κατεπέκταση να είναι καλύτερη η μετάδοση του κύματος αλλά και να μην επιβάλλεται ένταση στο μίγμα ή να αυξάνεται η πυκνότητά του.
- 5) Κάθε φορά που τοποθετούσαμε κιλά στο συμπιεσόμετρο ως ενεργό τάση για το δοκίμιο περιμέναμε μέχρι να ολοκληρωθεί η καθίζηση και να πάρουν οι κόκκοι του μίγματος την τελική τους διάταξη. Για να καταλάβουμε πότε είχε ολοκληρωθεί η καθίζηση παρατηρούσαμε πότε σταματούσε να αυξάνεται η μέτρηση του μηκυνσιομέτρου. Όσο μεγαλύτερο ήταν το ποσοστό ιλύος τόσο πιο συμπιεστό ήταν το μίγμα και κατεπέκταση τόσοσ περισσότερος χρόνος χρειαζόταν μέχρι να ολοκληρωθεί η καθίζηση.

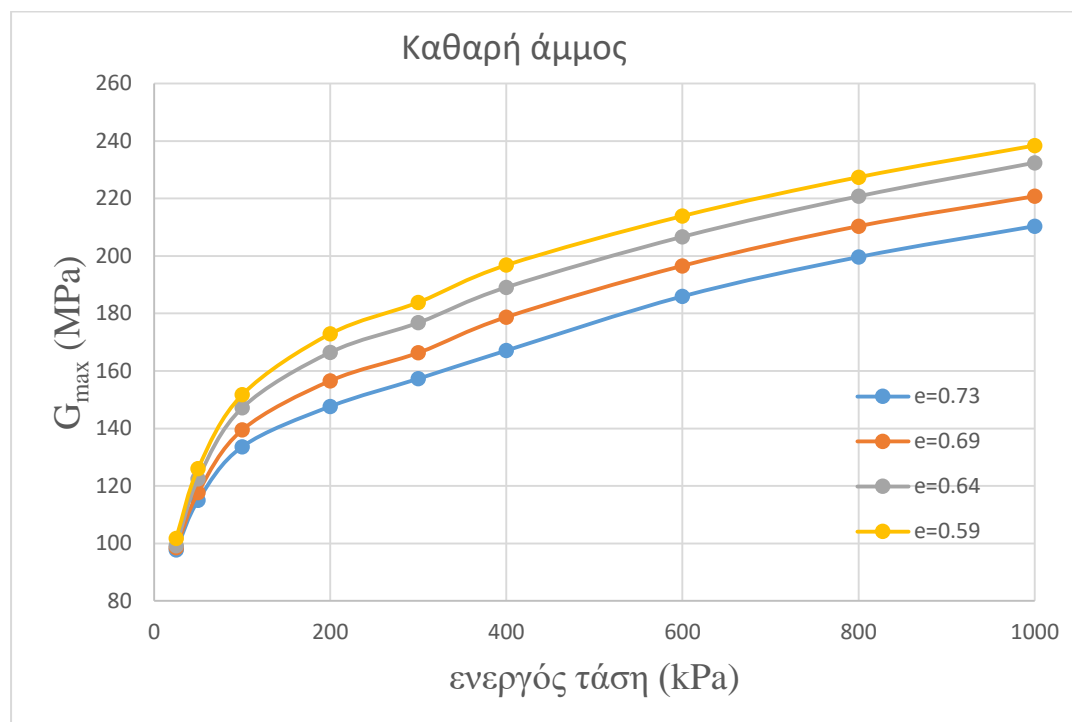
#### 4.6 Περιγραφή πειραμάτων και αποτελεσμάτων

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν πειράματα σε μίγματα άμμου και ιλύος για διαφορετική σχετική πυκνότητα, δείκτη πόρων και ενεργό τάση. Τα μίγματα άμμου και ιλύος στα οποία μετρήθηκε η διατμητική αντοχή είχαν ποσοστό ιλύος 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 60% και καθαρή ιλύς. Όλα τα πειράματα έγιναν για ενεργό τάση 25, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800 και 1000 kPa.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται σε διαγράμματα μεταβολής του  $G_{max}$  σε σχέση με την ενεργό τάση  $\sigma'_v$ .

Τα πρώτα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν σε δοκίμια καθαρής άμμου με διαφορετικό δείκτη πόρων. Τα δοκίμια άμμου είχαν δείκτη πόρων 0.73, 0.69, 0.64 και

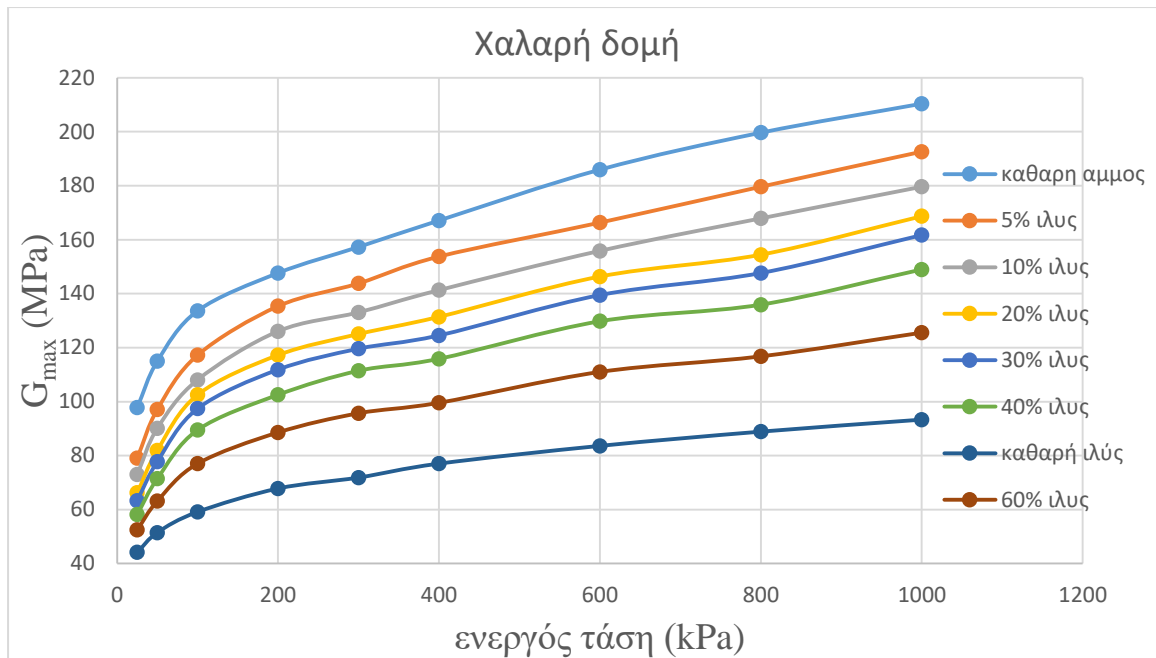
0.6. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.1 και όπως βλέπουμε όσο ο δείκτης πόρων αυξάνεται από το 0,6 στο 0,73 το μέτρο διάτμησης μειώνεται. Αυτή η σχέση του δείκτη πόρων με το μέτρο διάτμησης επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα των R.Salgado et al (2000) (Σχήματα 1,19 και 1,20) και M.Goudarzy et al (Σχήμα 1,28).



Σχήμα 4.1 Καθαρή άμμος M31 για διάφορους δείκτες πόρων

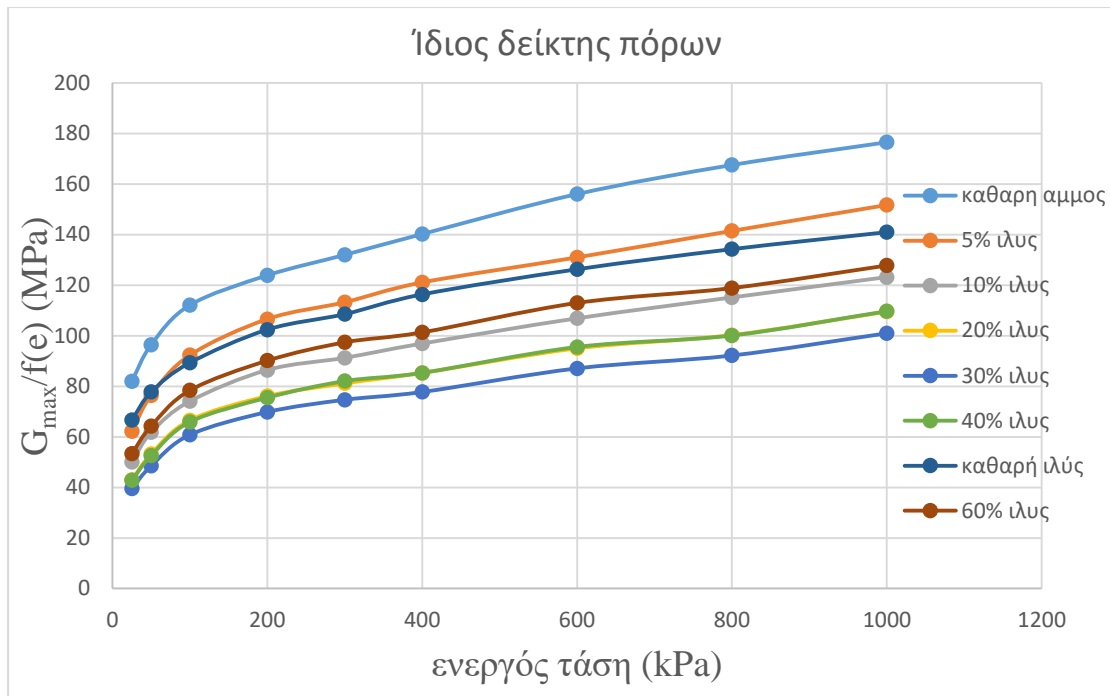
Στη συνέχεια στο Σχήμα 4.2 περιγράφονται τα πειράματα σε μίγματα άμμου και ιλύος σε χαλαρή δομή. Τα μίγματα είχαν  $D_r$  (όπου  $D_r = (e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min})$ ) από 6 μέχρι 19 % και δείκτη πόρων από 0,58 μέχρι 1,01. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η παρουσία του λεπτόκοκκου υλικού, ακόμα και σε ποσοστό 5%, προκαλεί μεγάλη μείωση στο μέτρο διάτμησης της τάξης του 10%. Στη συνέχεια όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο μειώνεται στο μέτρο διάτμησης, με την καθαρή ιλύ να έχει το μικρότερο για δοκίμιο χαλαρής δομής. Η συμπεριφορά αυτή των μιγμάτων επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα των M.Goudarzy et al και το Σχήμα 1.29.





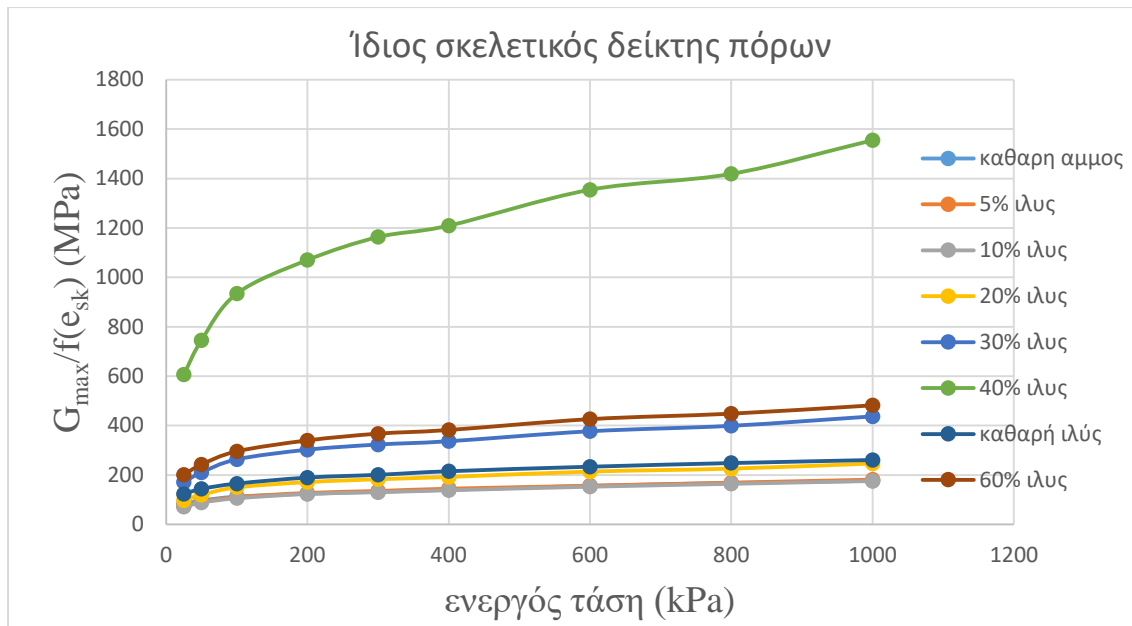
Σχήμα 4.2 Μεταβολή του  $G_{max}$  με προσθήκη ιλύος για χαλαρά μίγματα

Στην συνέχεια για να δούμε την συμπεριφορά των μιγμάτων απαλλαγμένη από την επίδραση του δείκτη πόρων με την βοήθεια την εξίσωσης  $f(e)=(2,17-e)^2/(1+e)$ , όπου  $e$  ο δείκτης πόρων του κάθε μίγματος, κανονικοποιήσαμε τις καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 4.3. Στο παρόν διάγραμμα φαίνεται ότι η άμμος έχει την μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος μέχρι το 30% η διατμητική αντοχή μειώνεται. Μετά το 30% παρουσιάζεται αύξηση της διατμητικής αντοχής μέχρι την καθαρή ιλύ, με την καθαρή ιλύ ωστόσο να έχει μικρότερη αντοχή από το μίγμα με ποσοστό ιλύος 5%. Ιδιαίτερη σημαντικό στο Σχήμα 4.3 είναι ότι το ποσοστό 30% μετά το οποίο αλλάζει η συμπεριφορά των μιγμάτων προς το καλύτερο είναι ποσοστό του threshold όπως φαίνεται και από τις καμπύλες του προηγούμενου κεφαλαίου. Επίσης στο Σχήμα 1.29 η συμπεριφορά του μίγματος για προσθήκη λεπτόκοκκων μέχρι το ποσοστό 40% (που έγιναν πειράματα) έχει την ίδια συμπεριφορά.



Σχήμα 4.3 Κανονικοποίηση ως προς  $f(e)$  για χαλαρή δομή

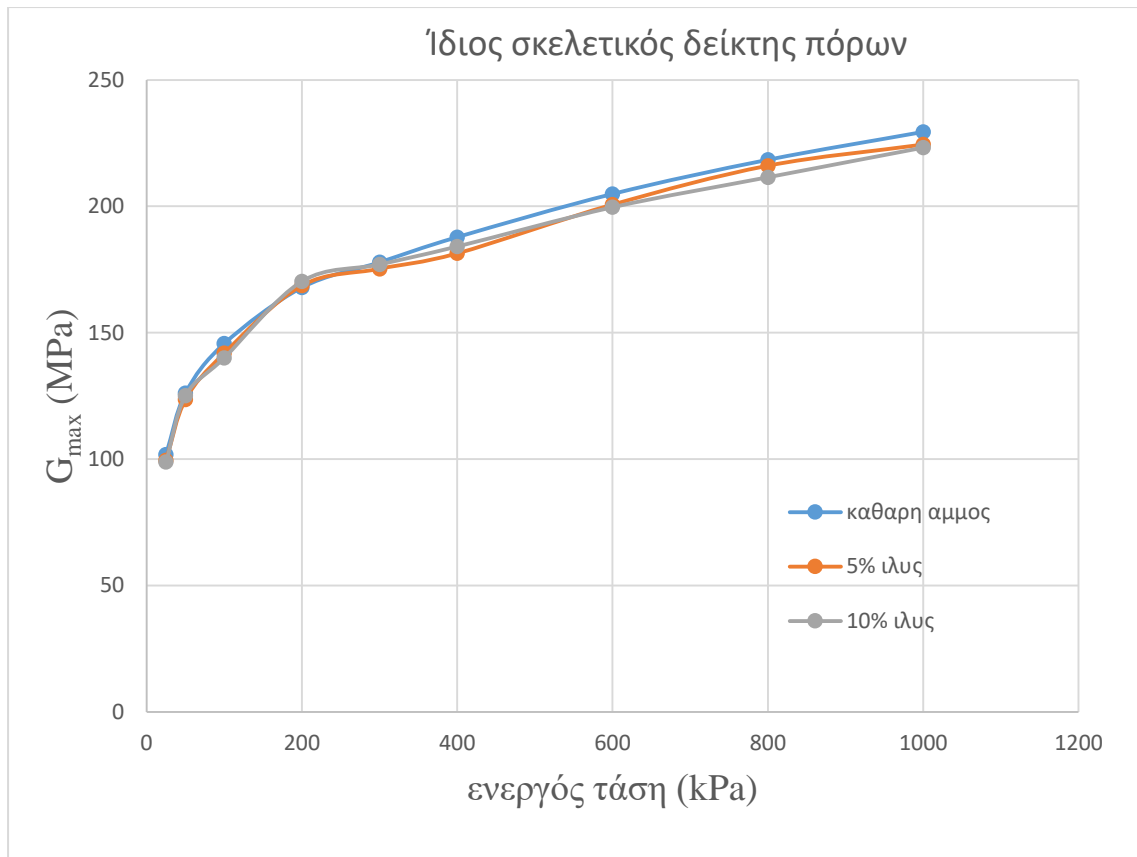
Ακολουθώς χρησιμοποιήσαμε στην εξίσωση  $f$  αλλά αυτή την φορά αντί να κανονικοποιήσαμε ως προς τον δείκτη πόρων  $f(e)$ , κανονικοποιήσαμε ως προς τον σκελετικό δείκτη πόρων  $f(e_{sk})$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 4.4. Σε αυτό φαίνεται ότι η άμμος και τα μίγματα με ποσοστό ίλυος 5 και 10 % έχουν σχεδόν το ίδιο μέτρο διάτμησης και στην συνέχεια για ποσοστό ίλυος από 20 μέχρι 40% έχουμε μια μη ρεαλιστική αύξηση και μετά το 40% το μέτρο διάτμησης μειώνεται. Ένας πιθανός λόγος αυτής την μη ρεαλιστικής αλλαγής του μέτρου διάτμησης είναι ότι η εξίσωση του σκελετικού δείκτη πόρων  $e_{sk} = (e + fc) / (1 + fc)$  δεν ισχύει κοντά στην περιοχή του threshold ούτε σε μεγαλύτερα ποσοστά (Thevanayagam 2002, Yamamuro 2001).



Σχήμα 4.4 Κανονικοποίηση ως προς  $f(e_{sk})$  για χαλαρή δομή

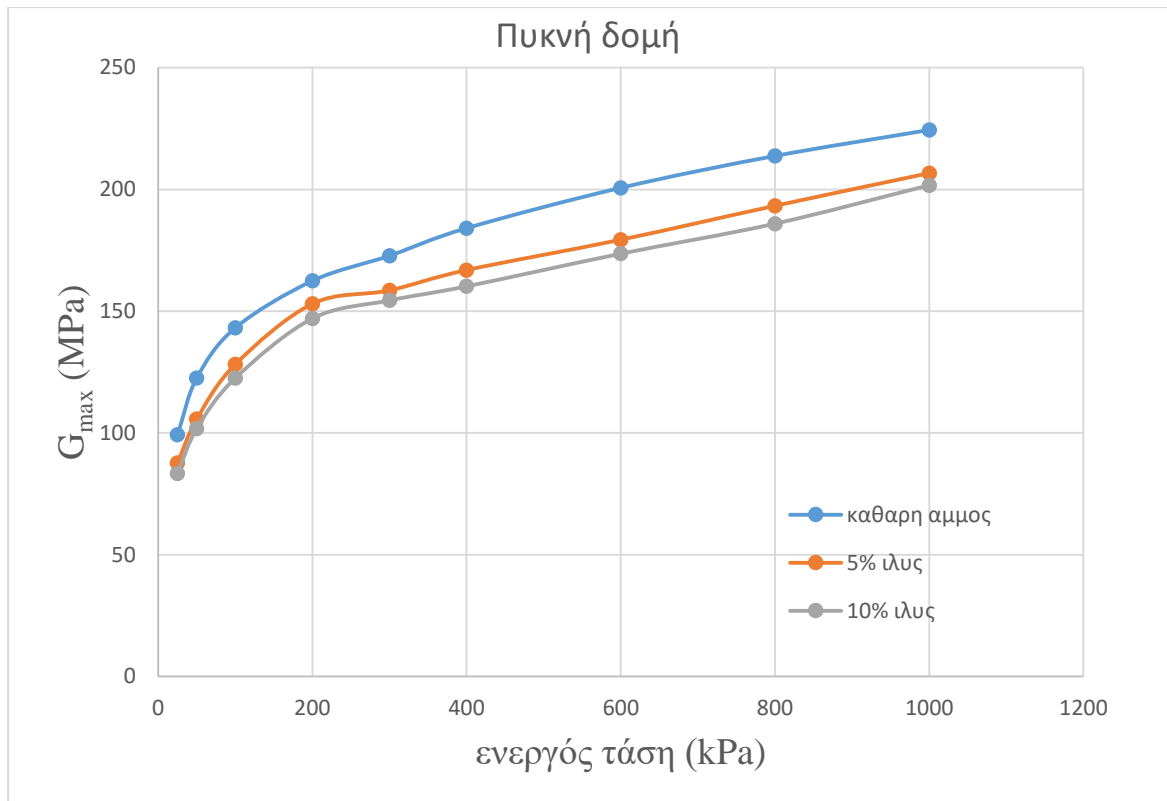
Η κανονικοποίηση ως προς τον σκελετικό δείκτη δείχνει ότι για χαμηλά ποσοστά ιλύος μέχρι 30% τα λεπτόκοκκα παραμένουν ανενεργά μέσα στα κενά των πόρων και εμφανίζουν ίδια απόκριση για τον ίδιο σκελετικό δείκτη πόρων. Για την επαλήθευση του διαγράμματος, του Σχήματος 4.4 όσον αφορά την σχέση μεταξύ καθαρής άμμου και μιγμάτων 5 και 10 % ιλύος προσπαθήσαμε να κατασκευάσουμε τρία μίγματα με αυτά τα ποσοστά ιλύος και ίδιο σκελετικό δείκτη πόρων. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών δοκιμών με σκελετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}=0.6$ . Όπως φαίνεται η μορφή του σχήματος 4.5 είναι ίδια με αυτή του Σχήματος 4.5 και οι καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης προς την ενεργό τάση συμπίπτουν επαληθεύοντας τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης.





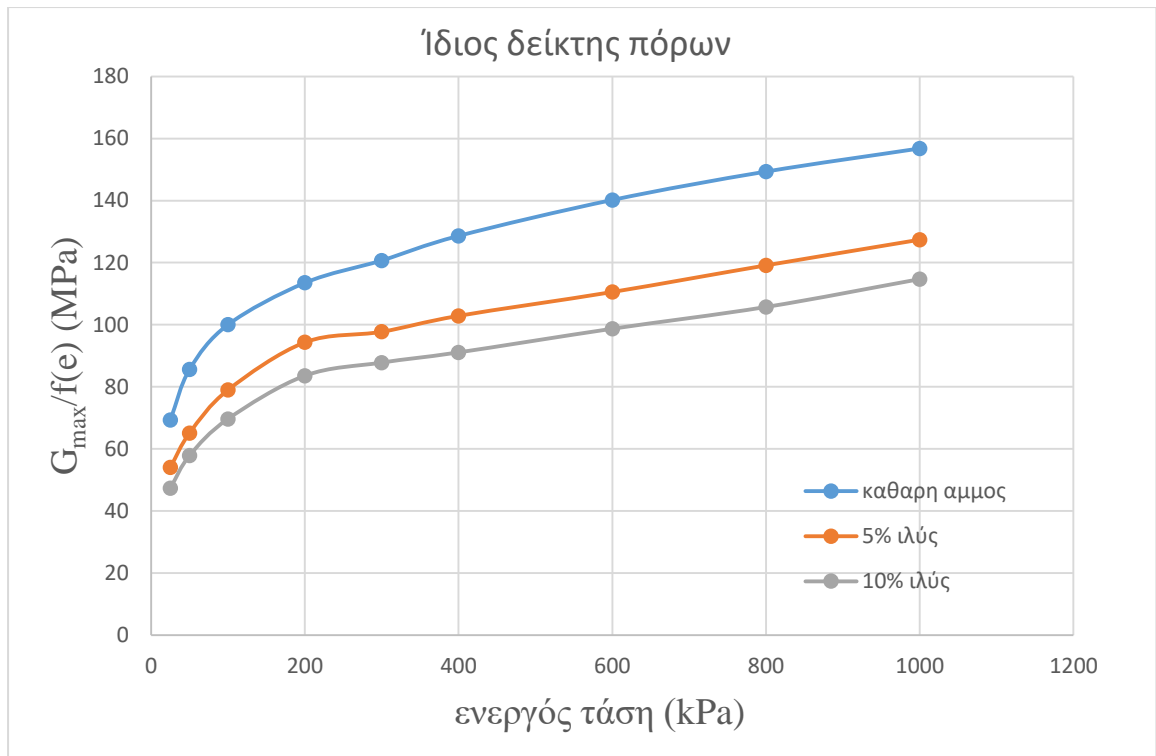
Σχήμα 4.5 Μεταβολή  $G_{max}$  με προσθήκη ιλύος για σταθερό  $e_{sk}$

Στη συνέχεια για να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά που έχουν τα μίγματα πιο πυκνής δομής κατασκευάσαμε δυο μίγματα με σχετική πυκνότητα περίπου 50% για ποσοστό ιλύος 5 και 10 % και σε συνδυασμό με την καθαρή άμμο με  $e=0.64$  από το Σχήμα 4.1 που είχε σχετική πυκνότητα 50% προέκυψε το Σχήμα 4.6. Σε αυτό φαίνεται ότι η συμπεριφορά των υλικών είναι κοινή με αυτή των χαλαρών μιγμάτων (δηλαδή η αύξηση του ποσοστού ιλύος οδηγεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής), ωστόσο φαίνεται ότι η εκάστοτε μείωση της διατμητικής αντοχής είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή των χαλαρών δοκιμίων.



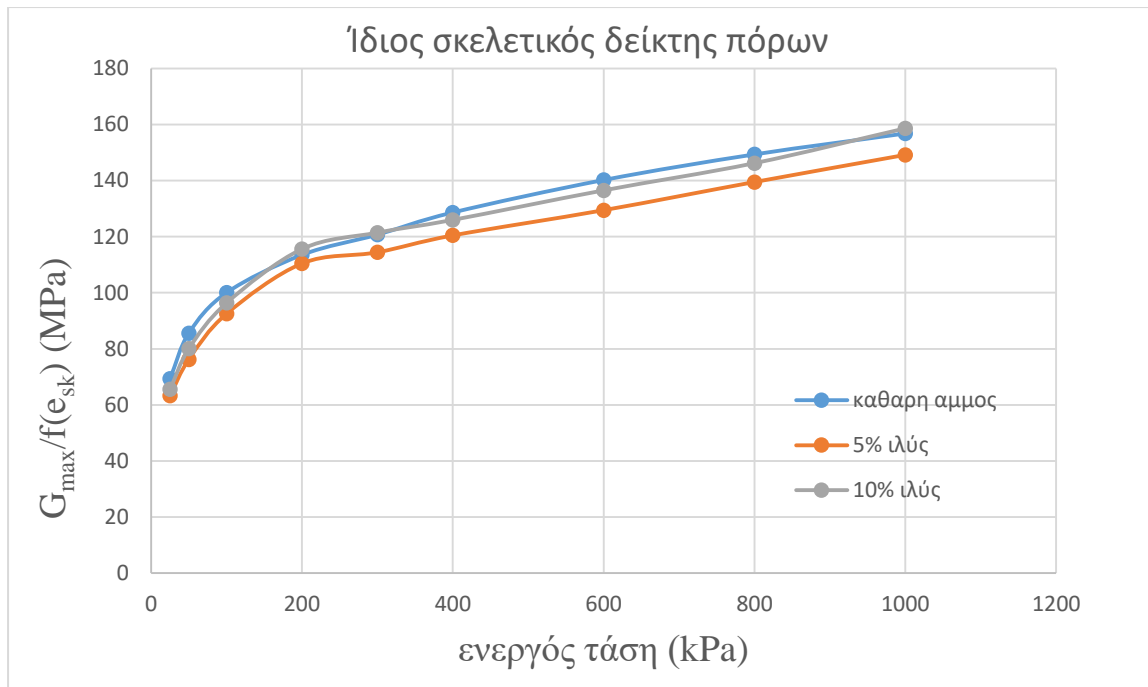
Σχήμα 4.6 Μεταβολή  $G_{max}$  με προσθήκη ιλύος για πυκνή δομή στην ίδια σχετική πυκνότητα

Ακολούθως στο Σχήμα 4.7 φαίνεται η κανονικοποίηση του Σχήματος 4.6, για πυκνά δοκίμια, ως προς  $f(e)$ . Οι καμπύλες του Σχήματος 4,7 παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες του Σχήματος 4.3. Με την μόνη διαφορά, ότι η αποστάσεις των καμπυλών στα πυκνά δοκίμια είναι μικρότερες από αυτές στα χαλαρά δοκίμια.



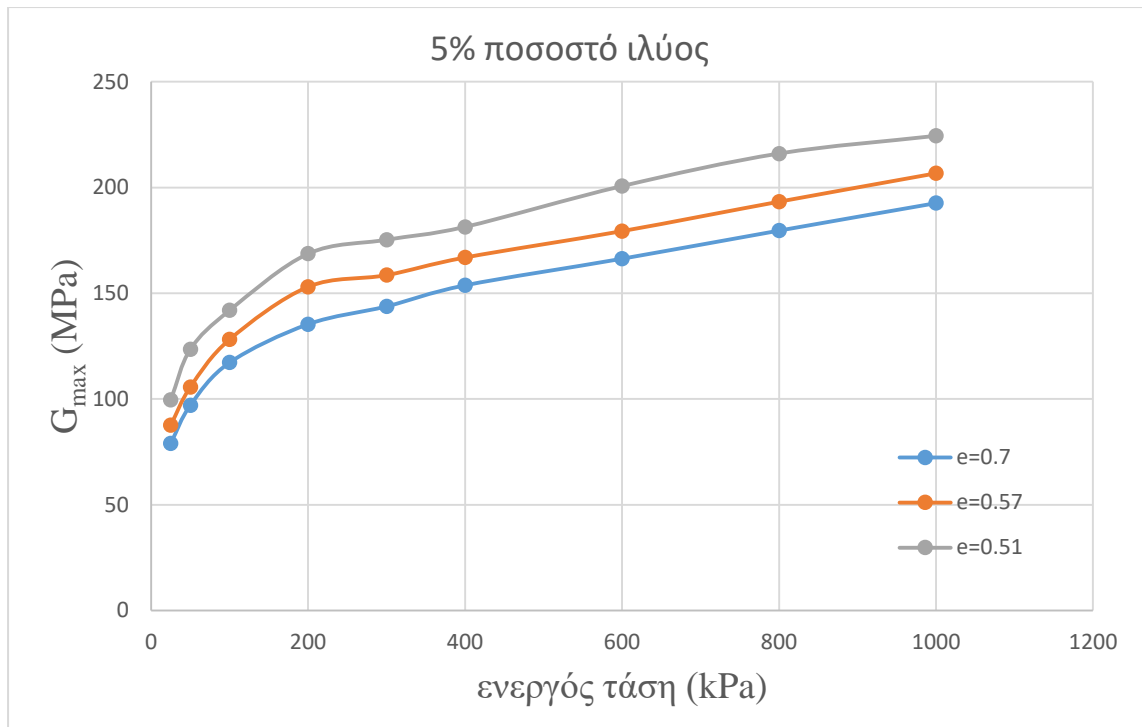
Σχήμα 4.7 Κανονικοποίηση ως προς  $f(e)$  για πυκνή δομή

Έπειτα κανονικοποιώντας το Σχήμα 4.6 ως προς τον σκελετικό δείκτη πόρων  $f(e_{sk})$  προέκυψε το σχήμα 4.8. Σε αυτό ενώ η καμπύλη της καθαρής άμμου και του μίγματος με ποσοστό ιλύος 10% είναι σχεδόν μαζί (όπως και στο Σχήμα 4.12 για χαλαρά δοκίμια), η καμπύλη για ποσοστό ιλύος 5% παρουσιάζει μια μικρή πτώση σε σχέση με τις άλλες δυο.



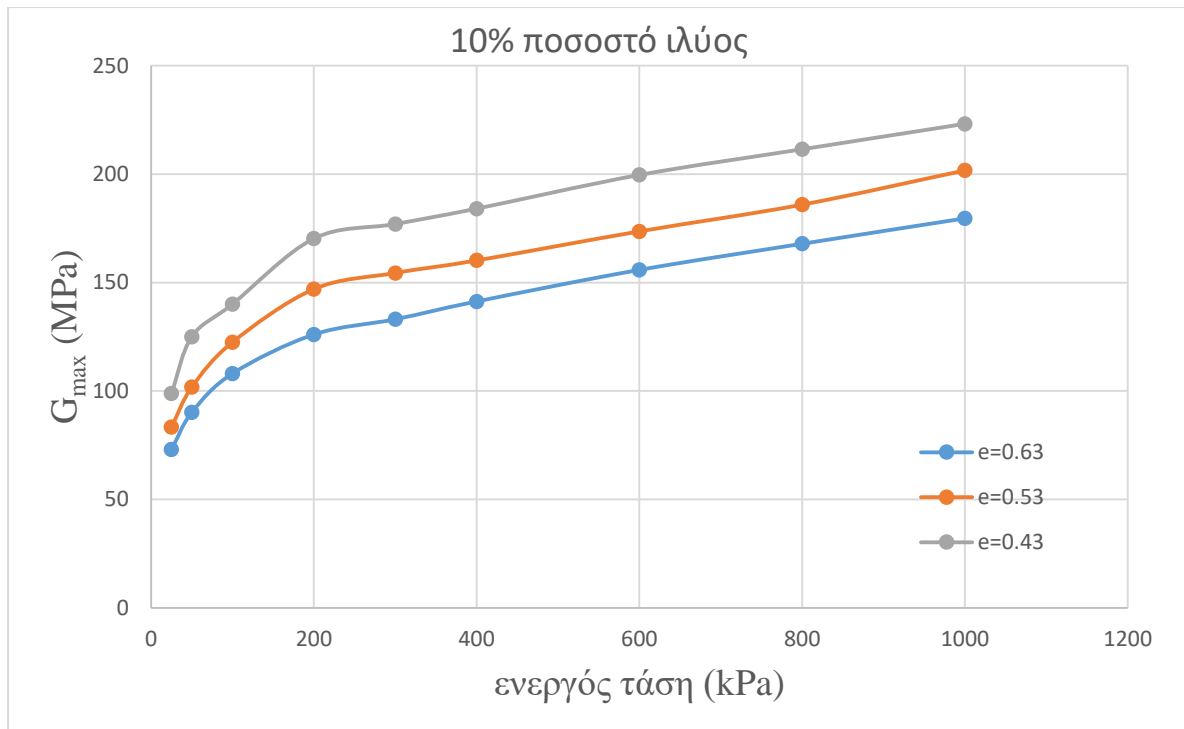
Σχήμα 4.8 Κανονικοποίηση ως προς  $f(e_{sk})$  για πυκνή δομή

Τέλος από τα πειράματα που έχουν γίνει προέκυψαν και δυο ακόμα διαγράμματα. Αρχικά το Σχήμα 4.9 όπου παρουσιάζει την συμπεριφορά του μίγματος με ποσοστό ιλύος 5% για διαφορετικό δείκτη πόρων. Τα τρία μίγματα έχουν δείκτη πόρων 0.7, 0.57 και 0.51. Όπως φαίνεται στο σχήμα η αύξηση του δείκτη πόρων από 0.51 μέχρι 0.7 προκαλεί μείωση του μέτρου διάτμησης. Αυτή η συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα των Salgado et al (2000) (Σχήματα 1,21 και 1,22).



Σχήμα 4.9 Μίγματα με ποσοστό ιλύος 5% για διάφορους δείκτες πόρων

Στη συνέχεια το Σχήμα 4.10 όπου επίσης παρουσιάζει την επιρροή του δείκτη πόρων στο μέτρο διάτμησης αλλά αυτή την φορά για μίγμα με ποσοστό ιλύος 10%. Οι δείκτες πόρων των μιγμάτων είναι 0.63, 0.53 και 0.43. Και σε αυτή την περίπτωση η αύξηση του δείκτη πόρων προκαλεί την μείωση του μέτρου διάτμησης. Αυτή η συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα των Salgado et al (2000) (Σχήματα 1.23 και 1.24).



Σχήμα 4.10 Μείγματα με ποσοστό ιλύος 10% για διάφορους δείκτες πόρων



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Σύγκριση συμπεριφοράς μέτρου διάτμησης και αντοχής

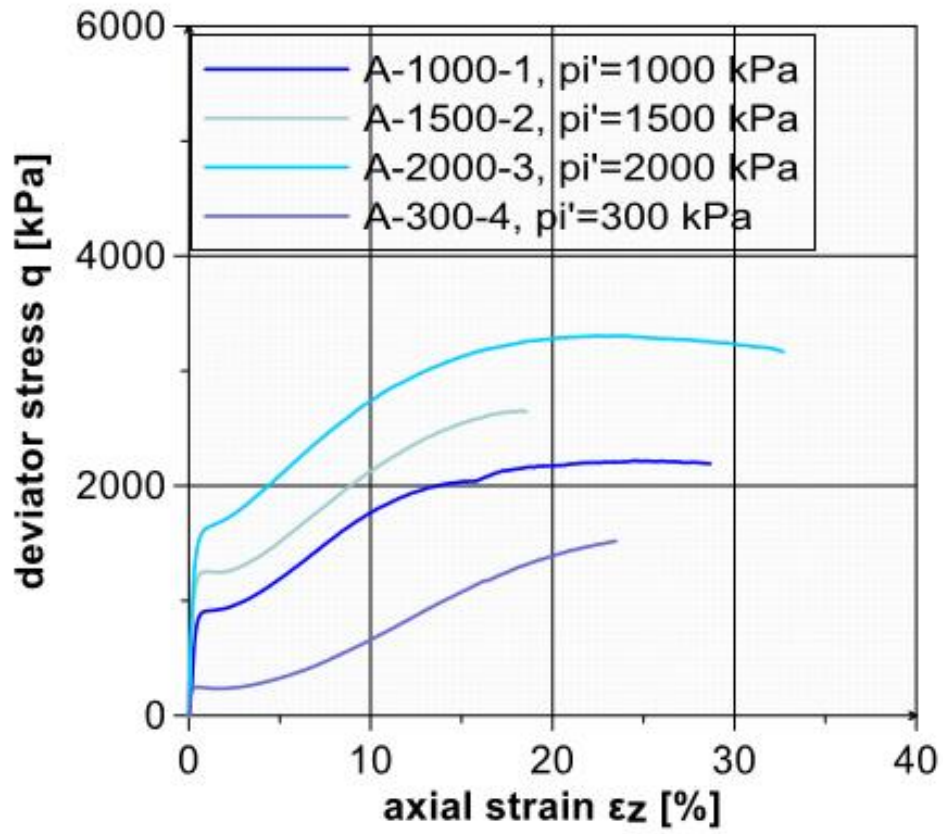


## 5.1 Εισαγωγή

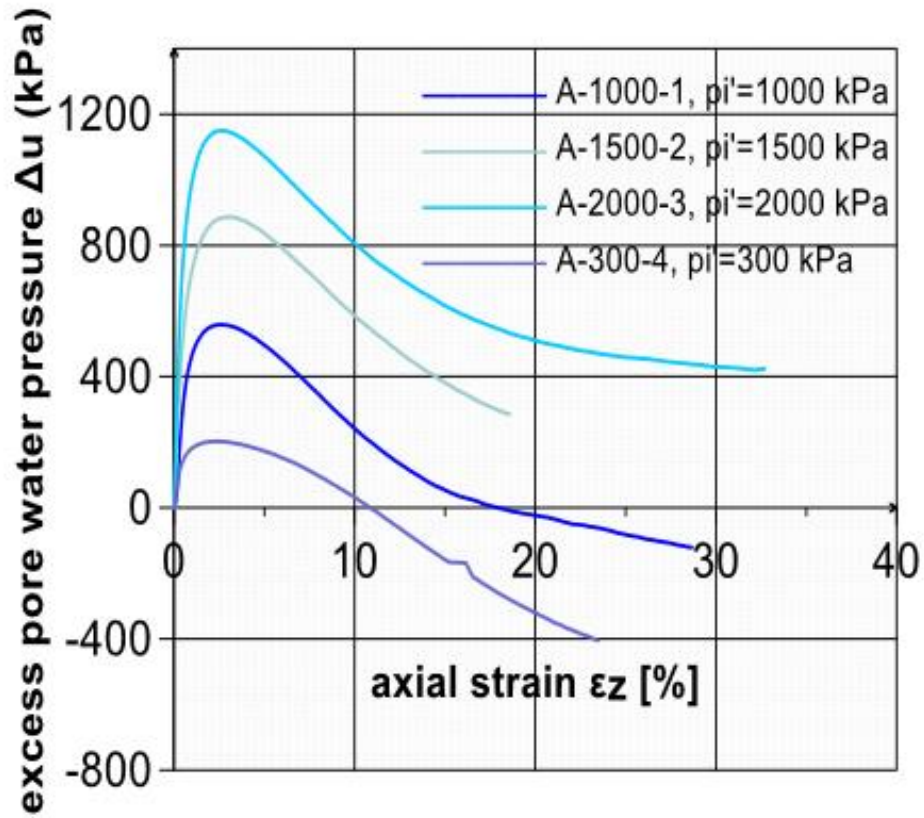
Με βάση τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί στην συσκευή bender element φαίνεται ότι το μέτρο διάτμησης επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ενεργός τάση, ο δείκτης πόρων  $e$  και ο δείκτης πόρων  $e_{sk}$ .

## 5.2 Μεταβολή ενεργού τάσης

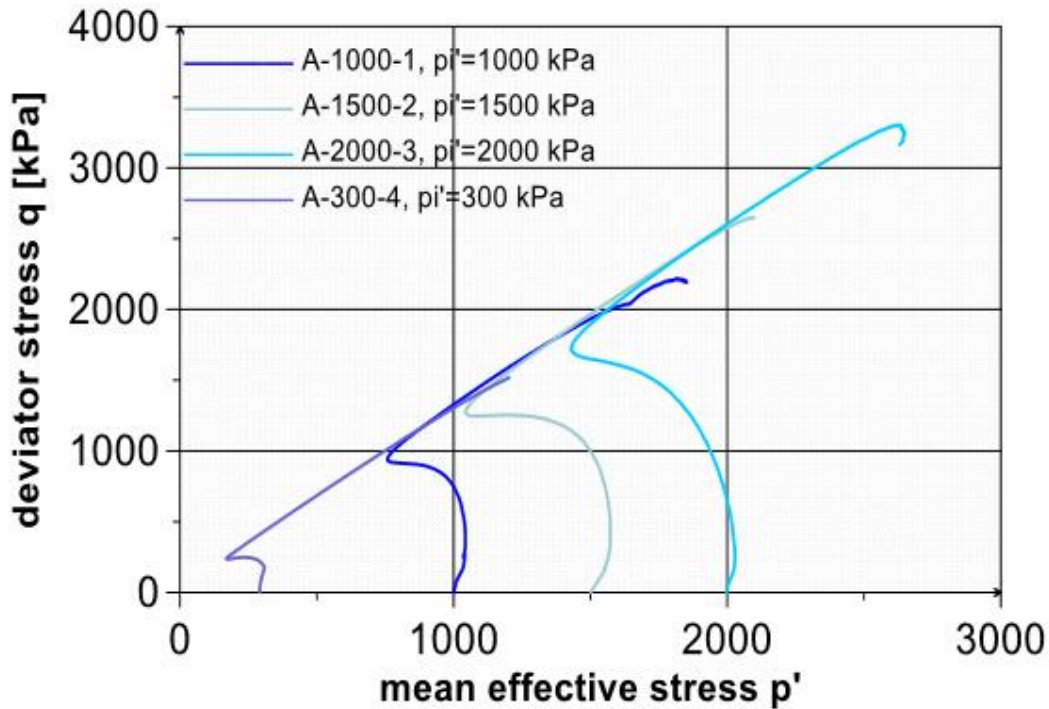
Η αύξηση της ενεργού τάση επηρεάζει το μέτρο διάτμησης θετικά, δηλαδή όσο αυξάνεται η ενεργός τάση τόσο αυξάνεται το μέτρο διάτμησης. Η ενεργός τάση επηρεάζει θετικά το μέτρο διάτμησης γιατί όσο αυξάνεται τόσο βελτιώνονται οι επαφές μεταξύ των κόκκων κάτι που αυξάνει την ταχύτητα με την οποία το διατμητικό κύμα περνάει από τον ένα κόκκο στον άλλο, συνεπώς μέσω της σχέσης  $G=\rho V_s^2$  αυξάνεται και το μέτρο διάτμησης. Αυτή η βελτίωση στις επαφές των κόκκων είναι ανεξάρτητη του είδους των κόκκων και της πυκνότητας των δοκιμίων, κάτι που επαληθεύεται και από τα πειράματα που έγιναν και φαίνονται στα Σχήματα 4.1 (καθαρή άμμος), 4.9(5% ιλύς), 4.10 (10% ιλύς), 4.2(χαλαρή δομή) και 4.8 (πυκνή δομή). Αυτή η σχέση του μέτρου διάτμησης με την ενεργό τάση διαφέρει από την σχέση που έχει η ενεργός τάση με την αντοχή έναντι ρευστοποίησης. Όπως φαίνεται και από πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο σε μείγματα άμμου με ιλύ στην συσκευή hollow cylinder για ενεργή τάση 50kPa, 100kPa και 300kPa. Από τα πειράματα προέκυψαν τα Σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3.



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  άμμου M31 (Παυλοπούλου (2015))



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα υπερπίεσης ύδατος πόρων-αξονικών παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  άμμου M31 (Παυλοπούλου (2015))



Σχήμα 5.3 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$  άμμου M31 (Παυλοπούλου (2015))

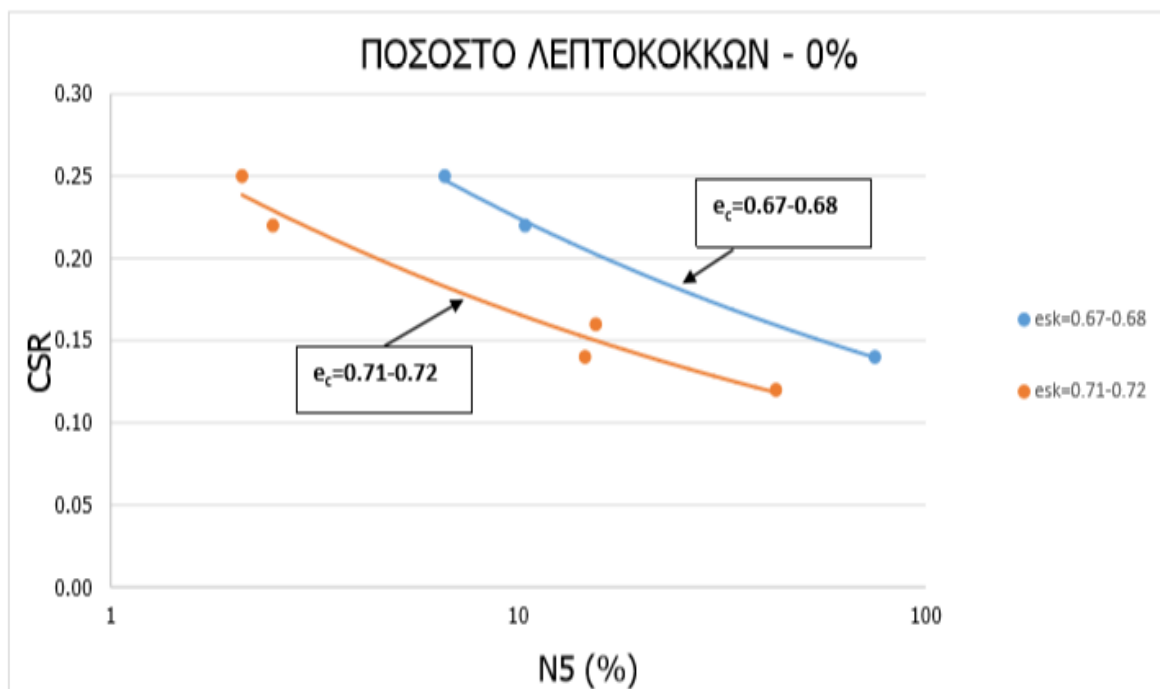
Επίσης, από τα Σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η ενεργός τάση (από 300kPa μέχρι 2000kPa) η αντοχή της άμμου βελτιώνεται.

### 5.3 Μεταβολή δείκτη πόρων $e$ ή $e_{sk}$

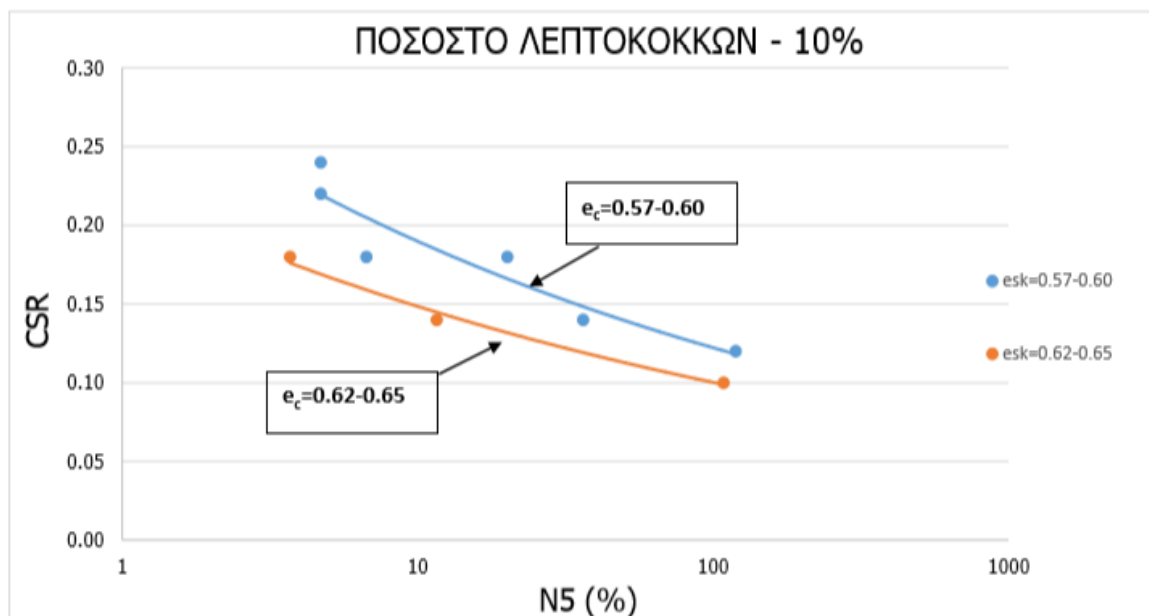
Η αύξηση του δείκτη πόρων επηρεάζει αρνητικά το μέτρο διάτμησης. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση του δείκτη πόρων σημαίνει ότι στο μείγμα αυξάνεται ο όγκος των κενών και κατεπέκταση η δομή του μίγματος είναι πιο χαλαρή. Η αύξηση των κενών στο μείγμα κάνει την έλευση του διατμητικού κύματος δυσκολότερη, κάτι που έχει ως συνέπεια την αύξηση του χρόνου άφιξης και κατ' επέκταση την μείωση της διατμητικής ταχύτητας και του μέτρου διάτμησης. Αυτή η σχέση του δείκτη πόρων με το μέτρο διάτμησης είναι ανεξάρτητη του είδους των κόκκων κάτι που φαίνεται και από τα Σχήματα 4.1 (καθαρή άμμος), 4.9 (5% ιλύς) και 4.10 (10% ιλύς).

Αντίστοιχα από τα πειράματα που έγιναν στην hollow cylinder για ανακυκλική φόρτιση φαίνεται ότι η μείωση του δείκτη πόρων έχει θετική επίδραση στην αντοχή έναντι

ρευστοποίησης. Αυτή η επίδραση είναι ανεξάρτητη του είδους των κόκκων και φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται ότι όταν ο δείκτης πόρων αυξάνεται από 0,67-0,68 σε 0,71-0,72 η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα δεξιά συνεπώς στους ίδιους κύκλους φόρτισης τα δοκίμια με δείκτη πόρων 0,71-0,72 έχουν μεγαλύτερη διατμητική παραμόρφωση άρα χειρότερη συμπεριφορά.



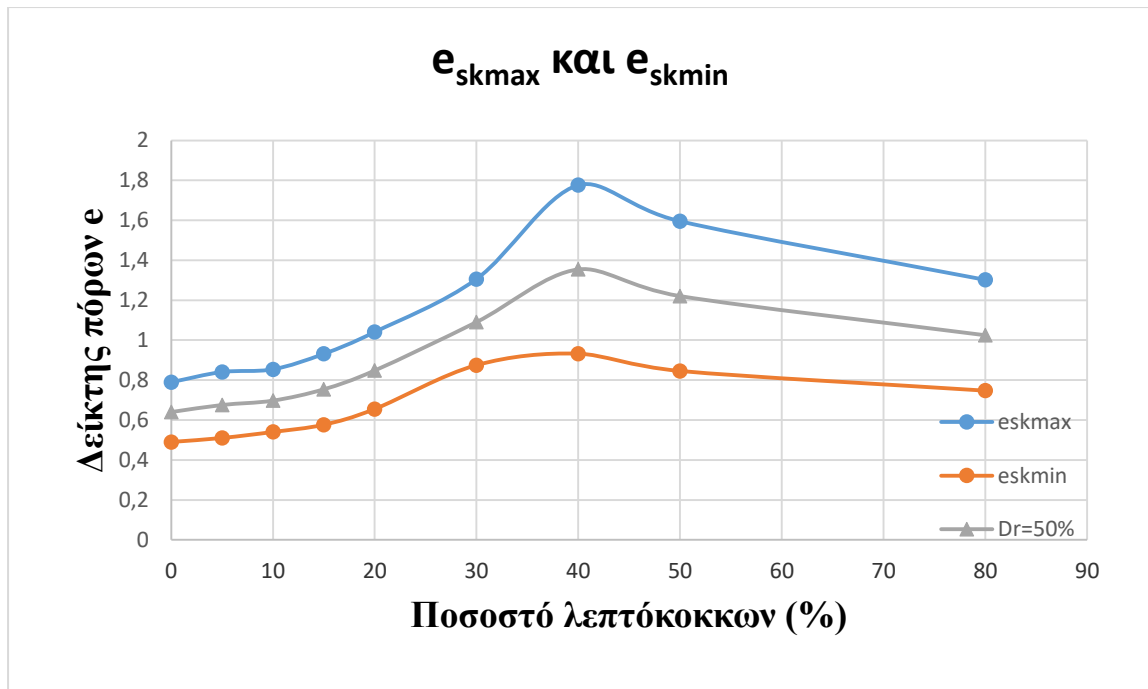
Σχήμα 5.4 Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$  σε δοκίμια καθαρής άμμου για διαφορετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  (Παπαδόπουλος (2015))



Σχήμα 5.5 Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$  σε δοκίμια με ποσοστό ιλύος 10% για διαφορετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  (Παπαδόπουλος (2015))

#### 5.4 Σταθερό $D_R$

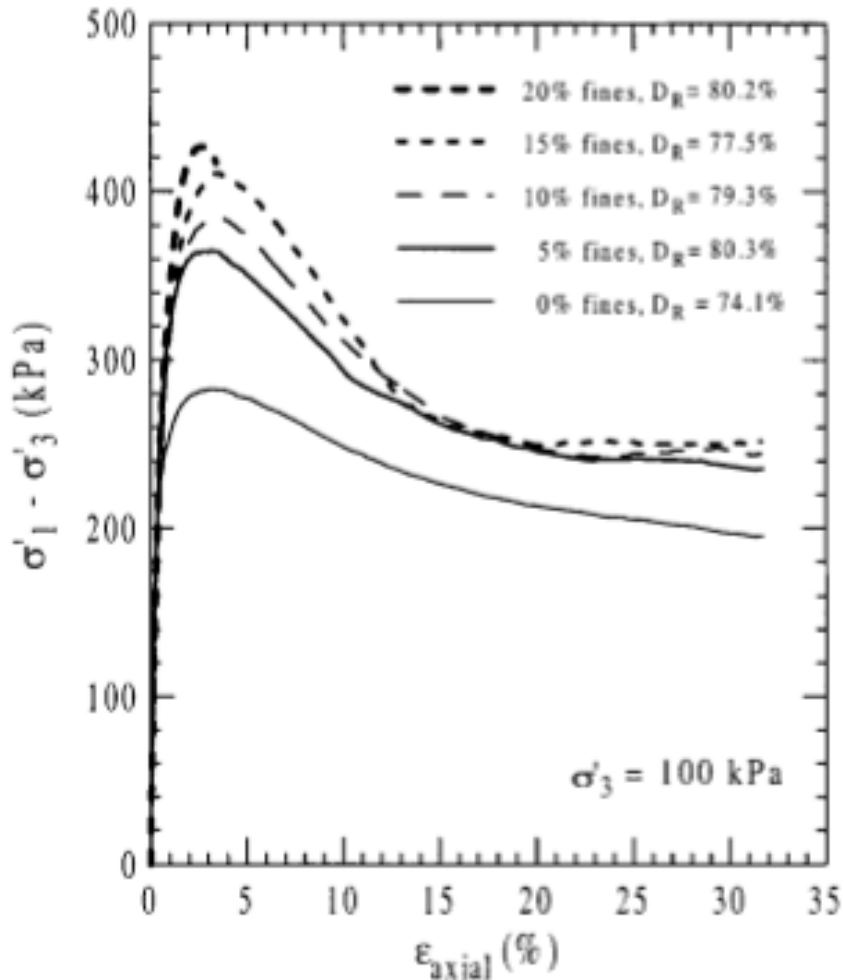
Για σταθερό  $D_R$  τα δοκίμια με διαφορετικό ποσοστό λεπτόκοκκων έχουν ίδια δομή (χαλαρή-μέσης πυκνότητας-πυκνή). Παραδείγματος χάριν όταν κάποια δοκίμια με διαφορετικό ποσοστό λεπτόκοκκων έχουν ίδιο  $D_R=50\%$  αυτό σημαίνει ότι στο διάγραμμα  $e_{sk}-f_c$  η καμπύλη αυτών των δοκιμίων θα ισαπέχει από τις δυο ακραίες καταστάσεις (καμπύλη  $e_{skmax}$  και  $e_{skmin}$ ) άρα όλα τα δοκίμια θα έχουν μια δομή μέσης πυκνότητας. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5.6 Καμπύλη σχετικής πυκνότητας 50% σε σχέση με τις καμπύλες  $e_{max}$  και  $e_{min}$

Συνεπώς εφόσον όλα τα δοκίμια έχουν την ίδια πυκνότητα για σταθερή ενεργό τάση και εφόσον έχουμε ελαστικές παραμορφώσεις, το μέτρο διάτμησής εξαρτάται κυρίως από την συμπεριφορά των κόκκων. Οι κόκκοι της άμμου έχουν μεγαλύτερο σκληρότητα από τους κόκκους της ιλύος κάτι που φαίνεται και από την διαφορά στο  $G_s$  των δυο υλικών ( $G_{s\text{άμμου}}=2,66$ ,  $G_{s\text{ιλύος}}=2,62$ ). Συνεπώς η ταχύτητα με την οποία περνάει το διατμητικό κύμα μέσα από τους κόκκους της άμμου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που περνάει μέσα από τους κόκκους της ιλύος. Συνεπώς για σταθερό  $D_R$  όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο μειώνεται το μέτρο διάτμησης. Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται και στα Σχήματα 4.2 και 4.8.

Οι Salgado et al (2000) έκαναν πειράματα σε Ottawa άμμο στην τριαξονική συσκευή για μονοτονική φόρτιση με ελεύθερη στράγγιση και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.7 που ακολουθεί:



Σχήμα 5.7 Μεταβολή στην αντοχή, όσο αλλάζει το ποσοστό λεπτόκοκκων (Salgado et al (2000))

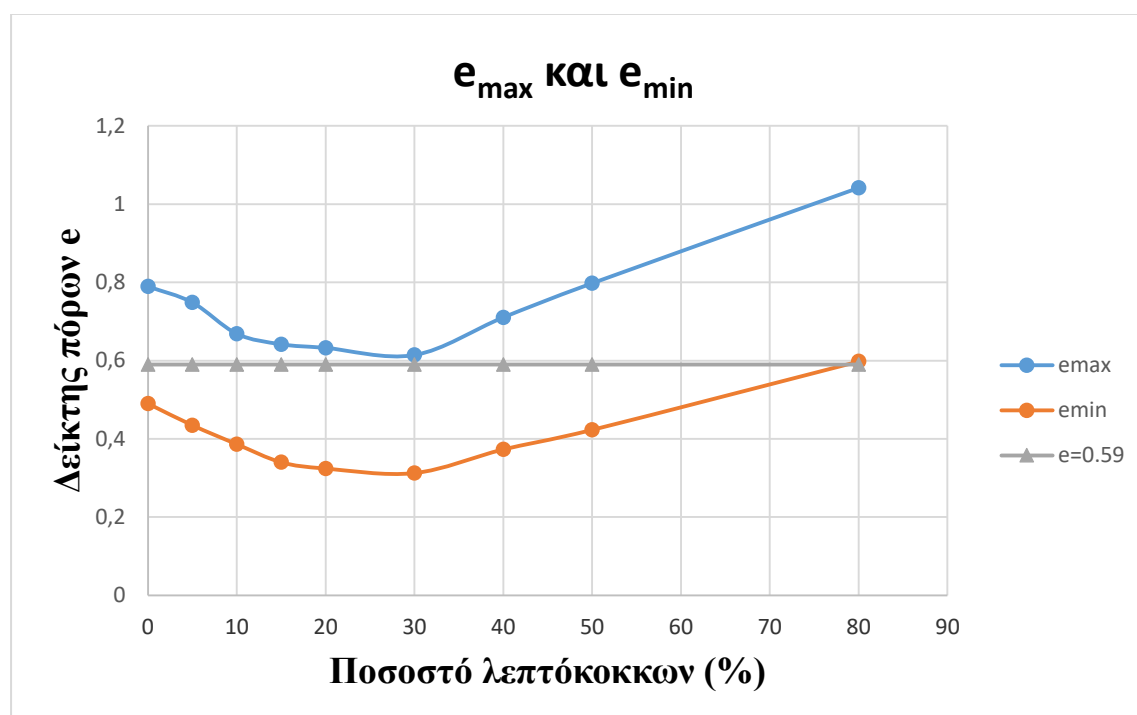
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, όσο αυξάνεται το ποσοστό λεπτόκοκκων μέχρι το 20% τόσο αυξάνεται και η αντοχή, το αντίθετο δηλαδή από αυτό που συμβαίνει στο μέτρο διάτμησης. Αυτή η αύξηση της αντοχής όσο αυξάνεται το ποσοστό λεπτόκοκκων ίσως να οφείλεται στην μεγαλύτερη τραχύτητα του λεπτόκοκκου που χρησιμοποιήθηκαν σε σχέση με την άμμο. Πιο συγκεκριμένα η άμμος Ottawa είναι μια αρκετά στρογγυλή και μη γωνιάδης άμμος, ενώ το λεπτόκοκκο που χρησιμοποιήθηκε είναι θραυσμένη άμμος που λογικά θα έχει μεγαλύτερη τραχύτητα. Συνεπώς η αύξηση της ποσότητας του λεπτόκοκκου (όπου η κόκκοι του είναι πιο τραχείς) οδηγεί στην αύξηση της διαστολικότητας. Συνεπώς για σταθερό  $D_R$  η αντοχή εξαρτάται κυρίως από την διαστολικότητα.

### 5.5 Σταθερός δείκτης πόρων $e$

Για να καταλάβουμε την συμπεριφορά που έχουν τα μείγματα με διαφορετικό ποσοστό ιλύος αλλά ίδιο δείκτη πόρων πρέπει να ανάγουμε τον δείκτη πόρων σε σχετική πυκνότητα δοκιμίου. Παραδείγματος χάριν για δείκτη πόρων  $e=0.59$  όπως φαίνεται



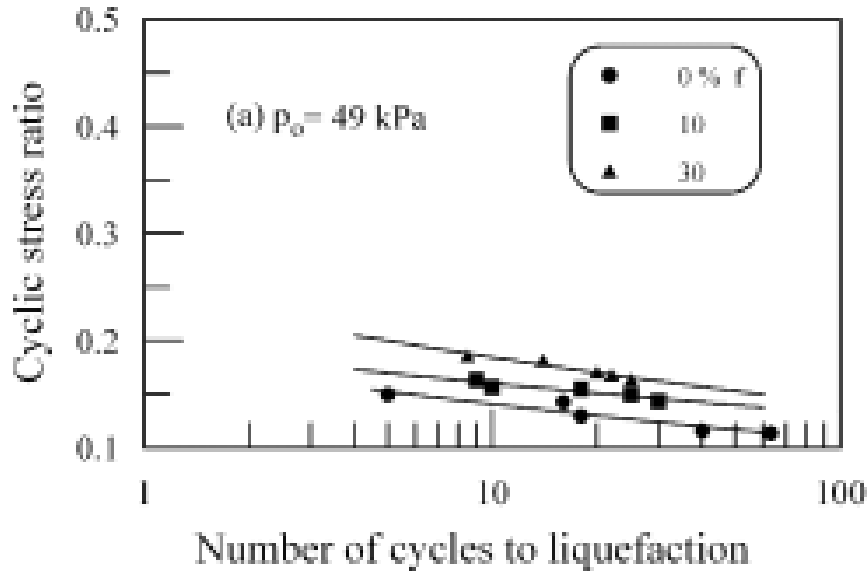
από το Σχήμα 5.8 το κάθε ποσοστό ιλύος απέχει περισσότερο η λιγότερο από την καμπύλη του  $e_{max}$  ή του  $e_{min}$ .



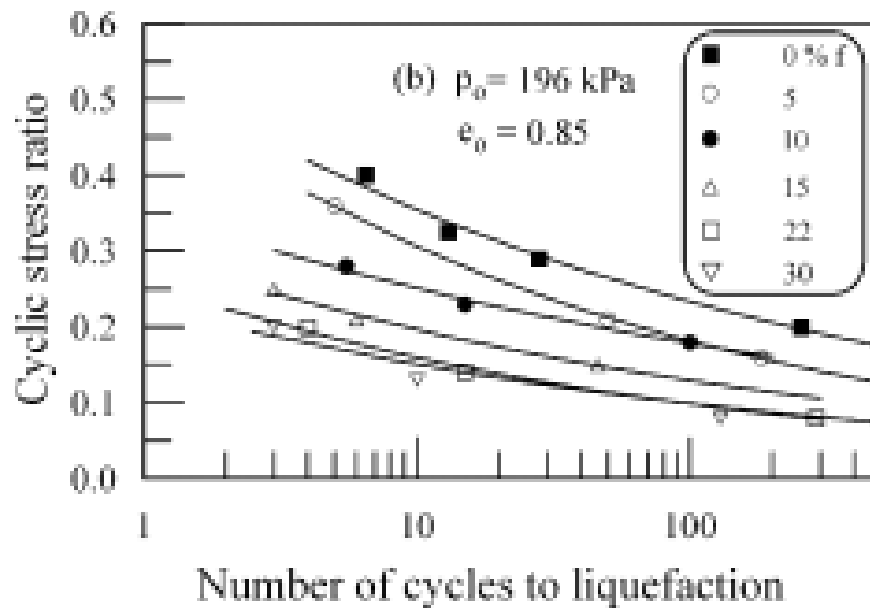
Σχήμα 5.8 Καμπύλη σταθερού δείκτη πόρων  $e$  σε σχέση με τις καμπύλες  $e_{max}$  και  $e_{min}$

Συνεπώς για σταθερό δείκτη πόρων όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος μέχρι το threshold τόσο πιο χαλαρό γίνεται το μείγμα (πιο κοντά στην καμπύλη  $e_{max}$ ), ενώ μετά το threshold όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο πιο πυκνό γίνεται το μείγμα (πιο κοντά στην καμπύλη  $e_{min}$ ). Συνεπώς μέχρι το threshold όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος το μέτρο διάτμησης μειώνεται για δυο λόγους, πρώτον λόγω της σκληρότητας των κόκκων και δεύτερον επειδή όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο πιο χαλαρό γίνεται το μείγμα. Ενώ μετά το threshold όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος το μέτρο διάτμησης μειώνεται λόγω του hardness των κόκκων και αυξάνεται διότι τα μείγματα γίνονται πιο πυκνά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 (το οποίο έχει προκύψει κανονικοποιώντας το Σχήμα 4.2 ως προς  $f(e)$ ) μέχρι το threshold η απόσταση των καμπυλών σε σχέση με το Σχήμα 4.2 μεγαλώνει. Ενώ μετά το threshold φαίνεται ότι η επιρροή που έχει στο μέτρο διάτμησης η αύξηση της πυκνότητας είναι μεγαλύτερη από την επιρροή του hardness των κόκκων γι' αυτό και αυξάνεται το μέτρο διάτμησης.

Όσον αφορά την αντοχή για σταθερό δείκτη πόρων, όπως φαίνεται από τα πειράματα των Μπουκοβάλας, Παπαδημητρίου και Ανδριανόπουλος (Σχήματα 5.9 και 5.10) για μικρή ενεργό τάση όσο αυξάνεται το ποσοστό λεπτόκοκκων τόσο αυξάνεται η αντοχή για ποσοστό λεπτόκοκκων μέχρι 30%. Ενώ για μεγαλύτερη ενεργό τάση όσο αυξάνεται το ποσοστό λεπτόκοκκων τόσο μειώνεται η αντοχή για ποσοστό λεπτόκοκκων μέχρι 30%.



Σχήμα 5.9 Μεταβολή της αντοχής όσο αλλάζει το ποσοστό λεπτόκοκκων για μικρή ενεργό τάση και σταθερό δείκτη πόρων  $e$  (Bouckovalas et al (2003))

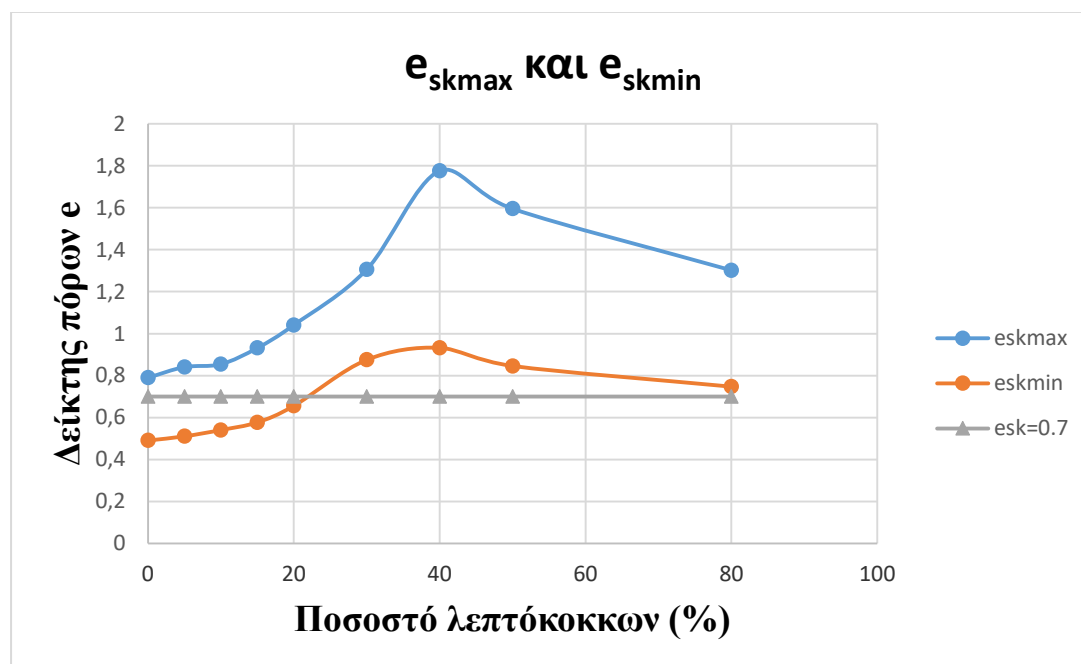


Σχήμα 5.10 Μεταβολή της αντοχής όσο αλλάζει το ποσοστό λεπτόκοκκων για μεγάλη ενεργό τάση και σταθερό δείκτη πόρων  $e$  (Bouckovalas et al (2003))

### 5.6 Σταθερός δείκτης πόρων $e_{sk}$

Για να καταλάβουμε την συμπεριφορά που έχουν τα μείγματα με διαφορετικό ποσοστό ιλύος αλλά ίδιο δείκτη πόρων  $e_{sk}$  πρέπει να ανάγουμε τον δείκτη πόρων σε σχετική πυκνότητα δοκιμίου. Παραδείγματος χάριν για δείκτη πόρων  $e_{sk}=0.7$  όπως φαίνεται

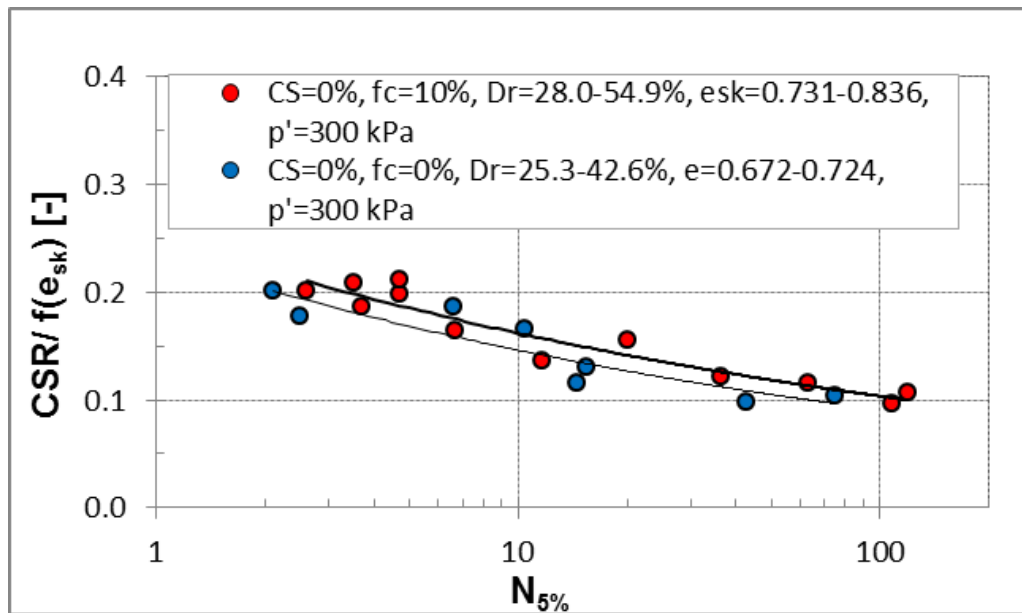
στο Σχήμα 5.11 το κάθε ποσοστό ιλύος απέχει περισσότερο η λιγότερο από την καμπύλη του  $e_{skmax}$  ή του  $e_{skmin}$ .



Σχήμα 5.11 Καμπύλη σταθερού δείκτη πόρων  $e_{sk}$  σε σχέση με τις καμπύλες  $e_{max}$  και  $e_{min}$

Συνεπώς για σταθερό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  όσο αυξάνεται το ποσοστό λεπτόκοκκων μέχρι το ποσοστό 10% τόσο πιο πυκνό γίνεται το μείγμα. Συνεπώς με την αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων από την μια λόγω του hardness των κόκκων το μέτρο διάτμησης μειώνεται και από την άλλη εφόσον το μείγμα γίνεται πιο πυκνό το μέτρο διάτμησης αυξάνεται. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.4 και 4.5 η αντίθετη επίδραση αυτών των δυο παραγόντων κρατάει σταθερό το μέτρο διάτμησης.

Παρομοίως η αντοχή για σταθερό σκελετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  όπως φαίνεται και από πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο σε μείγματα άμμου και ιλύος για  $D_R=25\%-55\%$  φαίνεται να έχει μια μικρή μόνο βελτίωση όταν αυξάνεται το ποσοστό ιλύος από 0% σε 10%. Τα δοκίμια είχαν αρκετά μεγάλη ενεργό τάση (300kPa). Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.12 που ακολουθεί:



Σχήμα 5.12 Μεταβολή της αντοχής όσο αλλάζει το ποσοστό λεπτόκοκκων για σταθερό  $e_{sk}$  (Π. Τριαντάφυλλος (2015))

## 5.7 Βιβλιογραφία

- 1) R. Salgado, P. Bandini, A. Karim, “Shear Strength and Stiffness of silty sand”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000
- 2) George D. Bouckovalas, Achilleas G. Papadimitriou, Konstantinos Andrianopoulos, “A critical state interpretation for the cyclic liquefaction resistance of silty sands”, Soils Dynamics and Earthquake Engineering, 2003
- 3) Παναγιώτης Τριαντάφυλλος, “Ανακυκλικές δοκιμές σταθεροποιημένων εδαφών”, 2015
- 4) Δ. Παπαδόπουλος, Χ. Πολυδώρου, “ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΜΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΜΜΟΥ-ΙΛΥΟΣ ΣΕ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ”, 2015
- 5) Ελένη-Μαρία Ε. Παυλοπούλου, Ευφροσύνη Β. Τσίβου, “ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ”, 2015



## 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι τα ακόλουθα:

- Η αύξηση της ενεργού τάσης οδηγεί σε αύξηση του μέτρου διάτμησης, ανεξάρτητα από το ποσοστό ιλύος.
- Η αύξηση την πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση του μέτρου διάτμησης, ανεξάρτητα από το ποσοστό ιλύος.
- Για σταθερή σχετική πυκνότητα και χαλαρή δομή, όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο μειώνεται το μέτρο διάτμησης.
- Για σταθερό δείκτη πόρων  $e$  όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος μέχρι το ποσοστό 30% (threshold) το μέτρο διάτμησης μειώνεται. Όσο το ποσοστό ιλύος αυξάνεται μετά το 30% το μέτρο διάτμησης αυξάνεται.
- Για σταθερό σκελετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  η καθαρή άμμος και τα μείγματα με ποσοστό ιλύος 5% και 10% έχουν ίδιο μέτρο διάτμησης.
- Για σταθερή σχετική πυκνότητα και πυκνή δομή η αύξηση του ποσοστού ιλύος οδηγεί σε μείωση του μέτρου διάτμησης, ωστόσο η μείωση είναι μικρότερη από εκείνη που παρατηρήθηκε στην χαλαρή δομή.
- Για σταθερή σχετική πυκνότητα, ενώ το μέτρο διάτμησης μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος, η αντοχή αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος.
- Για σταθερό δείκτη πόρων  $e$  ενώ το μέτρο διάτμησης μειώνεται όσο το ποσοστό ιλύος αυξάνεται μέχρι το threshold, η αντοχή έχει την ίδια συμπεριφορά για μεγάλη ενεργό τάση ενώ για μικρή ενεργό η αύξηση του ποσοστού ιλύος αυξάνει την αντοχή του μείγματος.
- Για σταθερό σκελετικό δείκτη πόρων  $e_{sk}$  η αντοχή της καθαρής άμμου είναι μικρότερη από την αντοχή του μείγματος με ποσοστό ιλύος 10%, σε αντίθεση με το μέτρο διάτμησης όπου είναι σχεδόν ίσο.