

# Προσδιορισμός Του $G_{max}$ Με Χρήση Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων

## Measurement of $G_{max}$ Using Bender Elements

ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Β.Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Επικ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π.  
ΤΣΟΜΩΚΟΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εργασία αναφέρεται στον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης,  $G_{max}$ , με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο ήταν μίγματα άμμου με μαρμαρυγία. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων έγινε φανερό ότι η μέτρηση του μέτρου διάτμησης με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι μία ιδιαίτερα άμεση, γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδος. Σχετικά με την παρουσία του λεπτόκοκκου υλικού παρατηρήθηκε ότι ακόμα και σε μικρά ποσοστά επηρεάζει τη δομή και τη συμπεριφορά της άμμου. Με την παρουσία του μαρμαρυγία μειώθηκε η τιμή του μέτρου διάτμησης που προσδιορίζεται μέσω των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για όλο το εύρος των ενεργών τάσεων που εξετάστηκε.

**ABSTRACT:** In this paper the elastic shear modulus,  $G_{max}$ , is calculated with the use of bender elements. The soil materials used in the laboratory were mixtures of sand with mica. The results of the tests confirm that bender element testing is a quick and reliable method to obtain the elastic shear modulus. The presence of mica affected the fabric and hence the behaviour of the mixtures and this was reflected in the shear moduli measured for a range of effective stresses.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εργαστηριακές δοκιμές μονοτονικής φόρτισης δείχνουν ότι ένα ευρύ φάσμα εδαφικών υλικών εμφανίζει έντονα μη γραμμικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων με αποτέλεσμα η δυσμησία τους να μειώνεται σημαντικά (τουλάχιστον κατά 10 φορές) στην περιοχή των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις πρακτικές εφαρμογές υπό στατικές ή δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Στις πολύ μικρές παραμορφώσεις (<0.001%), όμως, μερικά υλικά εμφανίζουν σχεδόν σταθερή τιμή του μέτρου διάτμησης  $G$  υποδεικνύοντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Παρόμοιες μετρήσεις της εδαφικής δυσμησίας κατά τη διάρκεια ανακυκλικής και δυναμικής (π.χ. ταχείας ανακυκλικής) φόρτισης υποδεικνύουν ότι 'ελαστική' συμπεριφορά μπορεί να παρατηρηθεί για πολύ μικρές παραμορφώσεις (Alarcon-Guzman et al., 1989, Bolton and

Wilson, 1989, Tatsuoka and Shibuya, 1991). Με βάση τα ανωτέρω διαφαίνεται η σπουδαιότητα του υπολογισμού του αρχικού ελαστικού μέτρου διάτμησης ( $G_{max}$ ) στις πολύ μικρές παραμορφώσεις. Η τιμή  $G_{max}$  δεν φαίνεται να επηρεάζεται από το ρυθμό της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης ή τον τύπο της φόρτισης, μονοτονικής ή ανακυκλικής (Shibuya et al., 1992).

Η μέθοδος των καμπτικών στοιχείων (bender elements) είναι μία σχετικά απλή τεχνική που αναπτύχθηκε από τους Shirley and Hampton (1977) για τον υπολογισμό του μέτρου διάτμησης  $G_{max}$ . Τα πιεζοηλεκτρικά ή καμπτικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης  $V_s$  ενός διατμητικού κύματος μέσα σε ένα εδαφικό δοκίμιο. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια γεννήτριας συναρτήσεων εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό κύμα στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο-πομπός που βρίσκεται στην κορυφή του

δοκιμίου. Με βάση την ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, το στοιχείο-πομπός διεγείρεται, ταλαντώνεται, μεταδίδει την κίνηση του αυτή καθ' ύψος του δοκιμίου και το κύμα της ταλάντωσης φτάνει στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο-δέκτης που βρίσκεται στη βάση του δοκιμίου. Εφαρμόζοντας την αντίστροφη ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, καθώς το στοιχείο-δέκτης διεγείρεται μηχανικά, παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα. Τα ηλεκτρικά σήματα του στοιχείου-πομπού και του στοιχείου-δέκτη καταγράφονται σε παλμογράφο, αλλά και σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και στη συνέχεια συγκρίνονται ώστε τελικά να προκύψει ο χρόνος που χρειάζεται το διατμητικό κύμα να διαδοθεί. Το μέτρο διάτμησης  $G_{max}$  για μικρές παραμορφώσεις δίνεται από την σχέση (1):

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του εδάφους. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αντιπροσωπεύουν μία μη καταστροφική πειραματική τεχνική καθώς δεν επιβάλλουν μεγάλες παραμορφώσεις στο εξεταζόμενο εδαφικό δείγμα, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο στην τριαξονική συσκευή (π.χ. Dyvik and Madshus, 1985, Viggiani and Atkinson, 1995, Shibuya et al., 1997, Jovicic and Coop 1998) όσο και στο συμπιεσόμετρο (π.χ. Zend and Li, 1988, Porovic, 1995).

Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστούν τα χαρακτηριστικά αντοχής και θα προσδιορισθούν οι καμπύλες G-γ μιγμάτων άμμου με ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού και συγκεκριμένα μαρμαρυγία. Έμφαση θα δοθεί στον υπολογισμό του ελαστικού μέτρου διάτμησης  $G_{max}$  των μιγμάτων με τη βοήθεια πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Η επίδραση των λεπτόκοκκων προσμίξεων στην απόκριση της άμμου έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς είναι γνωστό ότι στη φύση σπάνια απαντάται καθαρή άμμος. Συνήθως οι άμμοι απαντώνται ως μίγματα με διάφορα λεπτόκοκκα υλικά όπως άργιλος, μαρμαρυγίας και ιλύς.

## 2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ - ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή (Bishop and Wesley, 1975) για τον προσδιορισμό της εδαφικής δυσμησίας υπό συνθήκες μονοτονικής φόρτισης και η συσκευή

του συμπιεσομέτρου (Dyvik and Madshus, 1985) εφοδιασμένη με ζεύγος πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διατμητικού κύματος μέσα στο δοκίμιο και κατά συνέπεια τον προσδιορισμό της τιμής  $G_{max}$  του μέτρου διάτμησης του δοκιμίου.

Για την εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στο συμπιεσόμετρο έγινε χρήση δύο πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, τα οποία τοποθετήθηκαν στον άνω και τον κάτω πορόλιθο του συμπιεσομέτρου, προεξέχοντας από αυτούς. Το άνω πιεζοηλεκτρικό στοιχείο χρησιμοποιήθηκε ως πομπός και το κάτω ως δέκτης. Σε καθένα από αυτά υπήρχε καλώδιο που τα συνέδεε με τον παλμογράφο. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου HM 1507-3.02 της Hameg, ενώ χρησιμοποιήθηκε, επιπλέον, μία γεννήτρια συναρτήσεων τύπου TG1304 της Thurlby Thandar Instruments (TTi).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Δοκιμίων.

Table 1. Specimen Characteristics.

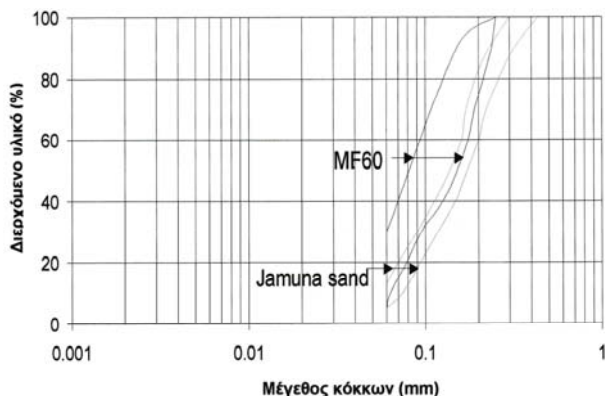
Πείραμα	Είδος δοκιμής	Ποσοστό πρόσμιξης (%)	Δείκτης πόρων e
SM0	C*	0	0.792
SM1	C	1	0.829
MSM1 <sup>1</sup>	C	1	0.802
SM25	C	2.5	0.895
MSM25 <sup>1</sup>	C	2.5	0.859
SM40	C	40	1.714
SM0	E*	0	0.797
SM1e	E	1	0.828
SM25e	E	2.5	0.895
SM10e	E	10	1.074
SM20e	E	20	1.341
SM40e	E	40	1.772
SM0	BE*	0	0.740
SM1	BE	1	0.770
SM25	BE	2.5	0.840
SM5	BE	5	0.880
SM10	BE	10	1.100
SM20	BE	20	1.520
SM40	BE	40	2.190

C\* = τριαξονική θλίψη, E\* = τριαξονικός εφελκυσμός, BE\* = καμπτικά στοιχεία

<sup>1</sup>επανάληψη πειραμάτων για ποσοστά 1 και 2.5%

Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη είναι μία λεπτόκοκκη άμμος, η άμμος Jamuna, μέσης διαμέτρου  $D_{50}=0.15\text{mm}$  και με ειδικό βάρος στερεών  $G_s=2.65$ . Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων (ή λόγος κενών) της άμμου είναι ίσος με  $e_{min}=0.537$  και  $e_{max}=0.885$ , αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση φαίνεται στο Σχήμα 1. Η πρόσμιξη που χρησιμοποιήθηκε

ήταν μαρμαρυγίας (μοσχοβίτης) με την εμπορική ονομασία MF60, ο οποίος διαθέτει μέγιστη διάσταση κόκκων μεγέθους άμμου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις.  
Figure 1. Grain size distribution curves.

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση στην τριαξονική συσκευή ήταν χαλαρά και παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της “απόθεσης ξηρής άμμου (air pluviation)” και στη συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία κορεσμού τους με τη χρήση CO<sub>2</sub>. Η εδαφική δυσμησία προσδιορίστηκε σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια με στόχο η διαδρομή τάσεων κατά τη φάση στερεοποίησης των δοκιμίων να ακολουθεί την ιστορία φόρτισης κατά τη στερεοποίηση των εδαφών στη φύση, η οποία είναι ανισότροπη. Στην περίπτωση των πειραμάτων στο συμπιεσόμετρο η εναπόθεση των μιγμάτων γινόταν από σταθερό ύψος μέσα στο δακτυλίδι, με το τελικό ύψος του δοκιμίου να μην υπερβαίνει το ύψος του δακτυλιδιού. Η διαδικασία φόρτισης που ακολουθούσε γινόταν εν ξηρώ. Λεπτομέρειες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων που εξετάστηκαν δίνονται στον Πίνακα 1.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Χαρακτηριστικά Αντοχής Και Παραμορφωσιμότητας Άμμου Jamuna Με Βάση Τριαξονικές Δοκιμές

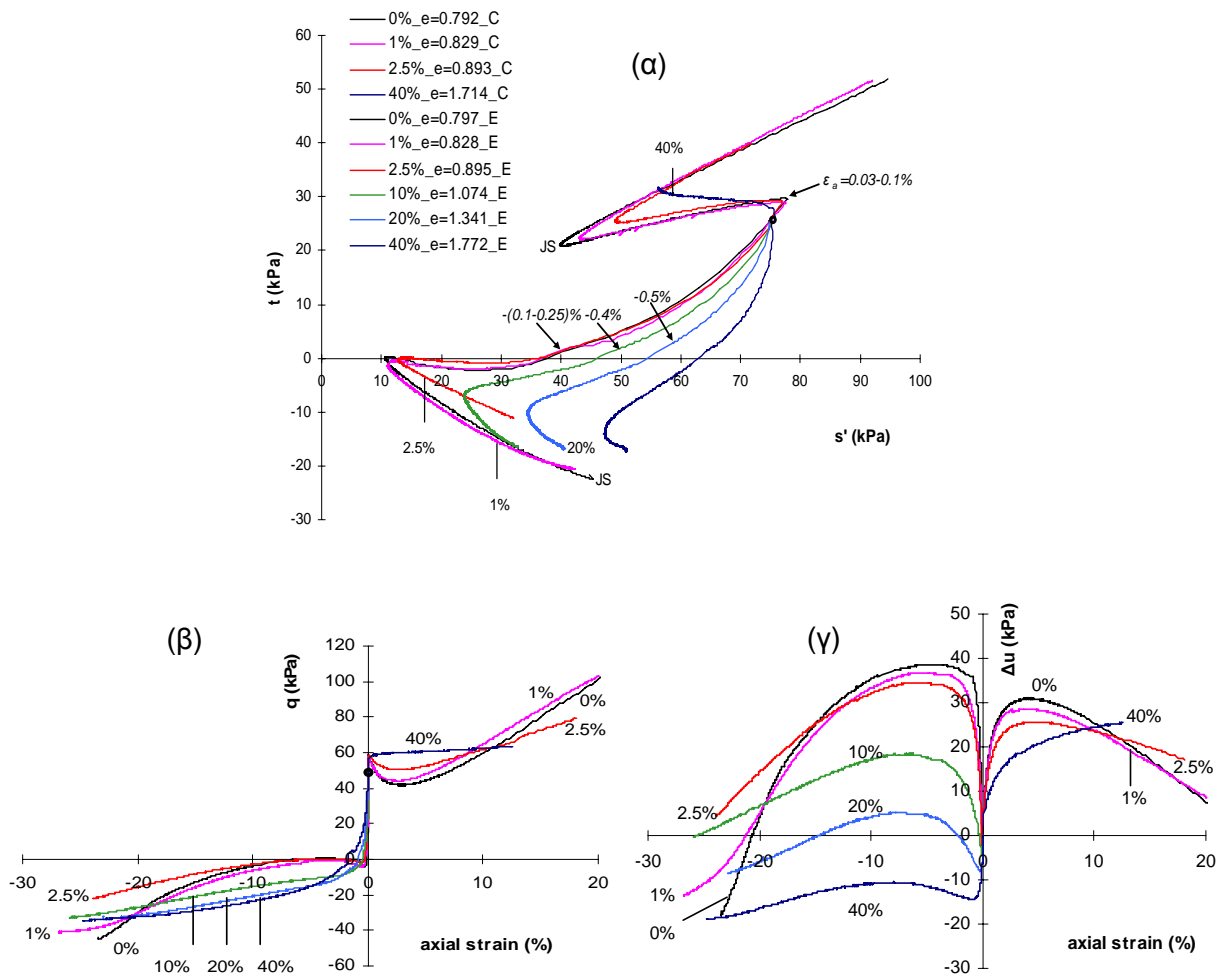
Στο Σχήμα 2 φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά αντοχής μιγμάτων της λεπτόκοκκης άμμου Jamuna με διαφορετικά ποσοστά μαρμαρυγία (MF60). Στην περιοχή τριαξονικής θλίψης φαίνεται ότι μικρά ποσοστά μαρμαρυγία ( $\leq 2.5\%$ ) επηρεάζουν λίγο και ευμενώς την συμπεριφορά της άμμου

(μειώνουν την τάση για ανάπτυξη θετικής υπερπίεσης του νερού των πόρων). Με την αύξηση του ποσοστού του μαρμαρυγία στο 40% η διατμητική αντοχή του μίγματος δεν εμφανίζει απομείωση (brittleness), συνεπώς απαλείφεται η ασταθής συμπεριφορά της άμμου. Στην περιοχή τριαξονικού εφελκυσμού και για ποσοστό μαρμαρυγία  $\leq 2.5\%$  τα δοκίμια εμφανίζουν μερική ρευστοποίηση, όμως για ποσοστά μεγαλύτερα του 10% η προσθήκη του μαρμαρυγία σταθεροποιεί την απόκριση της άμμου (Georgiannou, 2001).

Στο Σχήμα 3 έχουν σχεδιασθεί για όλα τα μίγματα οι καμπύλες G-γ. Η έντονα μη γραμμική συμπεριφορά των μιγμάτων είναι προφανής. Ο λόγος της εδαφικής δυσμησίας λ για παραμόρφωση ίση με 0.01% και 0.1% είναι ίσος με 0.12 για μίγμα άμμου με 2.5% μαρμαρυγία. Επίσης, όσο αυξάνει το ποσοστό μαρμαρυγία τόσο αυξάνει η συμπιεστότητα των δοκιμίων, όπως φαίνεται και από την μείωση της δυσμησίας τους. Στο ίδιο σχήμα έχουν σημειωθεί οι τιμές  $G_{max}$  που προσδιορίστηκαν μέσω των καμπυλικών στοιχείων στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων  $\varepsilon_s < 0.0002\%$ . Οι μετρήσεις αυτές έγιναν στο συμπιεσόμετρο σε δοκίμια με παρόμοιο δείκτη πόρων με εκείνα που υποβλήθηκαν σε τριαξονική θλίψη και για την ίδια μέση ενεργό τάση. Η μεταβολή που παρατηρείται στις καμπύλες G-γ λόγω της αύξησης του ποσοστού μαρμαρυγία κατά τη διάρκεια της μονοτονικής φόρτισης φαίνεται να ισχύει και για τις τιμές  $G_{max}$  οι οποίες υποπενταπλασιάζονται για ποσοστό μαρμαρυγία ίσο με 40%, ενώ είναι σχετικά μικρή για ποσοστά μαρμαρυγία μέχρι 2.5%. Θα πρέπει να τονισθεί ότι δεν γίνεται προσπάθεια να συγκριθούν μεταξύ τους οι τιμές δυσμησίας όπως ορίζονται από τις δύο διαφορετικές δοκιμές, απλώς εξετάζεται η επιρροή του ποσοστού μαρμαρυγία στη μετρούμενη δυσμησία των μιγμάτων.

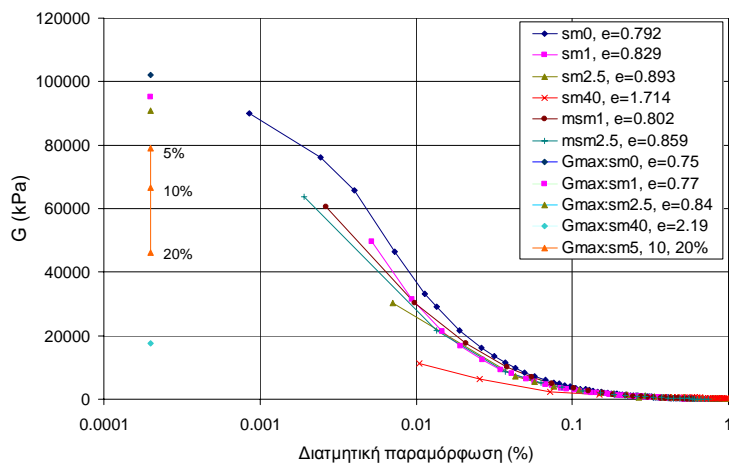
#### 3.2 Επίδραση Ενεργού Τάσης Στη $G_{max}$

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η επίδραση της ενεργού τάσης, η οποία δρα στο δοκίμιο, στο μέτρο διάτμησης  $G_{max}$ . Οι μετρήσεις έγιναν με τα καμπυλικά στοιχεία σε δοκίμια που φορτίστηκαν σε διαδοχικά αυξανόμενη τάση στο συμπιεσόμετρο (Μπιλέρης, 2002). Σε κάθε ενδιάμεση τάση μετά από χρόνο αναμονής ½ ώρας μετά το πέρας της στερεοποίησης έγινε η μέτρηση του  $G_{max}$  με προσδιορισμό της ταχύτητας διατμητικού κύματος ημιτονοειδούς



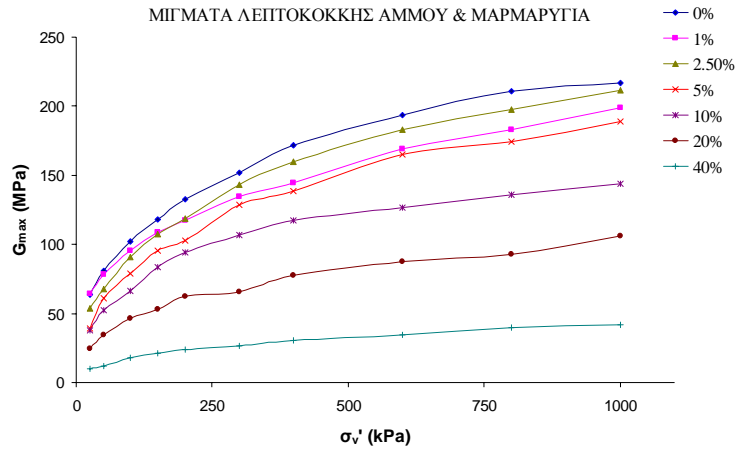
Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά αντοχής μιγμάτων της λεπτόκοκκης άμμου Jamuna με διαφορετικά ποσοστά μαρμαρυγία: (α) Διαδρομές τάσεων; (β) σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων; (γ) σχέσεις υπερπίεσης του νερού των πόρων-παραμορφώσεων.

Figure 2. Mixtures of Jamuna sand with various contents of mica: (a) Stress paths; (b) stress-strain curves; (c) excess pore water pressure-strain curves.

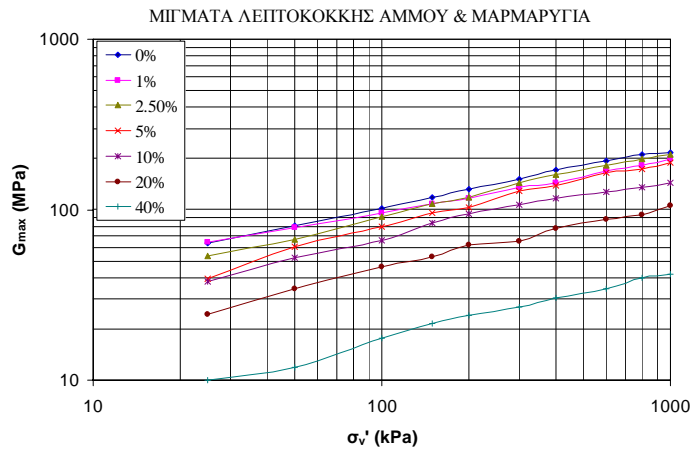


Σχήμα 3. Καμπύλες  $G$ - $\gamma$  για μίγματα άμμου Jamuna με διαφορετικά ποσοστά μαρμαρυγία. Τιμές  $G_{max}$  για τα ίδια μίγματα από μετρήσεις με καμπτικά στοιχεία.

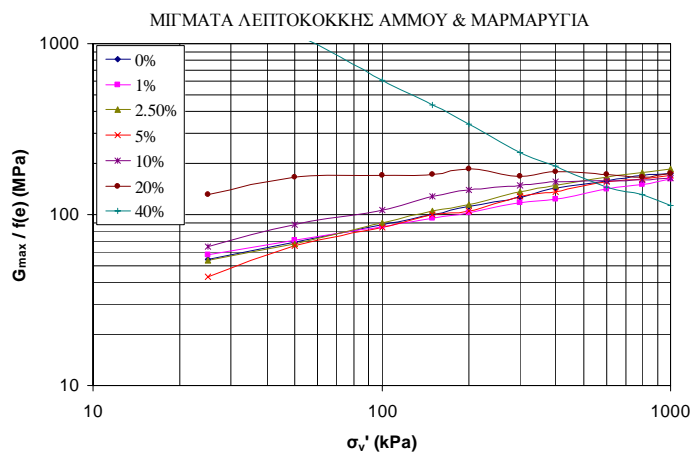
Figure 3.  $G$ - $\gamma$  curves for mixtures of Jamuna sand with various contents of mica. Values of  $G_{max}$  measured using bender elements.



Σχήμα 4. Καμπύλες  $G_{max}-\sigma'_v$ , φόρτιση στο συμπιεσόμετρο για μίγματα με διαφορετικά ποσοστά μαρμαρυγία (από Μπιλίρη, 2002).  
 Figure 4.  $G_{max}-\sigma'_v$  curves, oedometer tests on various mixtures of Jamuna sand with mica (after Biliris, 2002).



Σχήμα 5. Καμπύλες  $G_{max}-\sigma'_v$ , φόρτιση στο συμπιεσόμετρο.  
 Figure 5.  $G_{max}-\sigma'_v$  curves, oedometer tests.



Σχήμα 6. Κανονικοποίηση  $G_{max}$  ως προς τον δείκτη πόρων. Καμπύλες  $G_{max}-\sigma'_v$ .  
 Figure 6. Normalization of  $G_{max}$  with respect to void ratio.  $G_{max}-\sigma'_v$  curves.

μορφής συχνότητας 40kHz με περίοδο επαναφοράς 50Hz. Ενεργό μήκος ταξιδιού του διατμητικού κύματος θεωρήθηκε η απόσταση μεταξύ των άκρων των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Η άφιξη του κύματος στο άλλο άκρο του δοκιμίου αναγνωρίζεται ως το σημείο της πρώτης αλλαγής στην κατεύθυνση του κύματος. Η δυσστησία του υλικού αυξάνεται με την ενεργό τάση  $\sigma_v'$  και συνεπώς και με τη μέση ενεργό τάση  $p'$ . Επίσης, όσο αυξάνεται το ποσοστό του μαρμαρυγία τόσο μειώνεται το μέτρο  $G_{max}$  για όλο το εύρος των τάσεων που επιβλήθηκαν στα δοκίμια.

Στο Σχήμα 5 οι καμπύλες  $G_{max}-\sigma_v'$  έχουν σχεδιασθεί σε λογαριθμικούς άξονες. Όπως φαίνεται το μετρούμενο  $G_{max}$  ακολουθεί τη σχέση:  $G_{max}=A \cdot \sigma_v'^n$ , όπου  $\sigma_v'$  είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση και A, n σταθερές εξαρτώμενες από το κάθε υλικό. Για την περίπτωση π.χ. της καθαρής άμμου η σταθερά A είναι ίση με 21114 και η σταθερά n ίση με 0.3442. Στο Σχήμα 6 το μέτρο διάτμησης έχει κανονικοποιηθεί ως προς το δείκτη πόρων. Η συνάρτηση του δείκτη πόρων η οποία χρησιμοποιήθηκε στην κανονικοποίηση είναι:

$$f(e)=\frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}, \text{ (Hardin and Richart, 1963).}$$

Πολλοί ερευνητές έχουν δείξει ότι για άμμους οι διαφορετικές καμπύλες  $G_{max}-\sigma_v'$  για χαλαρά και πυκνά δοκίμια ενοποιούνται μετά την κανονικοποίηση. Στο Σχήμα 6 φαίνεται ότι οι καμπύλες για ποσοστά μαρμαρυγία  $\leq 5\%$  σχεδόν συμπίπτουν μετά την κανονικοποίηση. Για μεγαλύτερα, όμως, ποσοστά φαίνεται ότι οι διαφορές στο μετρούμενο  $G_{max}$  δεν οφείλονται στον διαφορετικό δείκτη πόρων, αλλά στη διαφορετική δομή των μιγμάτων τα οποία παύουν να συμπεριφέρονται ως άμμοι.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η επίδραση ενός λεπτόκοκκου υλικού στα χαρακτηριστικά δυσστησίας μίας λεπτόκοκκης άμμου. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης στην τριαξονική συσκευή, ενώ ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στον υπολογισμό του ελαστικού μέτρου διάτμησης  $G_{max}$  των μιγμάτων με τη βοήθεια πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων πρόκυψε ότι:

- Με την αύξηση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού μειώνεται η εδαφική δυσστησία. Οι μεταβολές είναι σχετικά μικρές για μικρά ποσοστά προσμίξεων

(<2.5%) και μεγιστοποιούνται με την αύξηση του ποσοστού π.χ. για μίγμα άμμου με 40% μαρμαρυγία οι τιμές  $G_{max}$  μειώνονται στο 1/4 της αντίστοιχης τιμής των μιγμάτων με ποσοστά <2.5%. Αντίστοιχη είναι η επιρροή του ποσοστού πρόσμιξης και στο 'ελαστικό' μέτρο διάτμησης  $G_{max}$  το οποίο προσδιορίζεται μέσω καμπυλικών στοιχείων.

- Η μεταβολή του μέτρου  $G_{max}$  με την κατακόρυφη ενεργό τάση είναι εκθετικής μορφής  $G_{max}=A \cdot \sigma_v'^n$ , όπου  $\sigma_v'$  είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση και A, n σταθερές εξαρτώμενες από το υλικό.
- Για όλο το εύρος των ενεργών τάσεων που εξετάστηκε η  $G_{max}$  μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού της λεπτόκοκκης πρόσμιξης μαρμαρυγία.
- Οι καμπύλες  $G_{max}-\sigma_v'$  για ποσοστά μαρμαρυγία  $\leq 5\%$  μπορούν να κανονικοποιηθούν ως προς τον δείκτη πόρων.

#### 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Ο.Α.Σ.Π.

#### 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alarcon-Guzman, A., Chameau, J. L., Leonards, G. A. and Frost, J. D. (1989), "Shear Modulus and Cyclic Undrained Behaviour of Sands", Soils and Foundations, Vol. 29, No. 4, pp. 105-119.
- Bishop, A. W. and Wesley, L. D. (1975), "A Hydraulic Triaxial Apparatus for Controlled Stress Path Testing", Geotechnique, Vol. 25, No. 4, pp. 657-670.
- Bolton, M. D. and Wilson, J. M. R. (1989), "An Experimental and Theoretical Comparison Between Static and Dynamic Torsional Shear Tests", Geotechnique, Vol. 39, No. 4, pp. 585-599.
- Dyvik, R. and Madshus, C. (1985), "Laboratory Measurements of  $G_{max}$  Using Bender Elements", Proceedings ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, Detroit, Michigan, pp. 186-196.
- Georgiannou, V. N. (2001), "Micaceous Sands: Stress-Strain Behaviour and Influence of Initial Fabric", Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials (eds Tatsuoka, Shibuya & Kuwano), Zwets & Zeitlinger Publishers Lisse, ISBN 9026518439, pp. 227-235.

- Hardin, B. O., and Richart, F. E. (1963), "Elastic Wave Velocities in Granular Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 89, No.1, pp. 33-65.
- Jovicic, V. and Coop, M. R. (1997), "Stiffness of Coarse-Grained Soils at Small Strains", *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 545-561.
- Μπιλίρης, Χ. (2002), "Προσδιορισμός του Μέτρου Διάτμησης,  $G_{max}$ , με Χρήση Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.
- Porovic, E. (1995), "Investigations of Soil Behaviour Using a Resonant Column Torsional Shear Hollow Cylinder Apparatus", Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
- Shibuya, S., Hwang, S. C. and Mitachi, T. (1997), "Elastic Shear Modulus of Soft Clays from Shear Wave Velocity Measurement", *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 593-601.
- Shibuya, S., Tatsuoka, F., Teachavorasinskun, S., Kong, X. J., Abe, F., Kim, Y.-S., and Park, C.-S. (1992), "Elastic Deformation Properties of Geomaterials", *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 3, pp. 26-46.
- Shirley, D. J. and Hampton, L. D. (1978), "Shear Wave Measurements in Laboratory Sediments", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 63, No. 2, pp. 607-613.
- Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991), "Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests", *Proceedings of 9<sup>th</sup> Asian Regional Conference on SMFE*, Vol. 2, pp. 101-170.
- Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995), "Interpretation of Bender Element Tests", *Geotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 149-154.
- Zend, X. and Li, B. (1988), "Application of Bender Element in Measuring  $G_{max}$  of Sand Under  $K_0$  Condition", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 21, No. 3, pp. 251-263.