Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΤΙΚΑ Θ.[1], ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ Α. [2] και ΧΑΤΖΗΘΕΟΔΩΡΟΥ Ν. [3]

[1]Αναπλ. καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., **e-mail: tika@civil.auth.gr**

[2] Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

[3] Πολιτικός Μηχανικός, MSc

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία παρουσιάζει τη μεθοδολογία και εφαρμογή της δοκιμής πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για τη μέτρηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων στο Εργαστήριο. Παρουσιάζονται αναλυτικά η διαδικασία της δοκιμής καθώς και τα αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε αμμώδη εδάφη. Η καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων αυτών με αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού καταδεικνύει τα πλεονεκτήματα της δοκιμής πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Λέξεις-Κλειδιά: διατμητικά κύματα, πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, στήλη-συντονισμού, άμμος, εργαστηριακές δοκιμές

1. Εισαγωγή

Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων, V_s, σε εδαφικές αποθέσεις αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους για τον χαρακτηρισμό του εδάφους σε πολλά προβλήματα της Γεωτεχνικής Μηχανικής, όπως είναι η σεισμική εδαφική απόκριση, η εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης, η αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων σταθεροποίησης του εδάφους, η ανίχνευση και μεταφορά ρυπαντών στο έδαφος, η εκτίμηση της ποιότητας καθώς και των αρχικών τάσεων σε κατάσταση ηρεμίας των εδαφικών δοκιμίων.

Η μέτρηση της V_s πραγματοποιείται είτε με γεωφυσικές κυρίως δοκιμές στο πεδίο, είτε με εργαστηριακές δοκιμές. Αν και οι δοκιμές πεδίου είναι πολύ χρήσιμες για την εκτίμηση της επιτόπου συμπεριφοράς του εδάφους, η επιτυχία τους εξαρτάται σημαντικά από την ακρίβεια του εξοπλισμού καθώς και την ορθή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους. Επιπλέον με τις δοκιμές αυτές δεν μπορεί να γίνει συστηματική μελέτη διαφόρων παραμέτρων, όπως της διατμητικής παραμόρφωσης, της συχνότητας φόρτισης, του αριθμού κύκλων φόρτισης, της περιβάλλουσας τάσης στη συμπεριφορά του εδάφους, κ.α.. Μια συστηματική μελέτη της επίδρασης των παραπάνω παραμέτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με εργαστηριακές δοκιμές. Ανάμεσα στις διάφορες εργαστηριακές μεθόδους η δοκιμή στήλης συντονισμού είναι ίσως η πλέον δημοφιλής μέθοδος για τη μέτρηση της V_s στα εδάφη, από πολύ μικρές έως ενδιάμεσες παραμορφώσεις. Η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender element method), η οποία αναπτύχθηκε από τους Shirley & Hampton (1978), τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για τη μέτρηση της V_s ταυτόχρονα με τις δοκιμές στον συμβατικό εργαστηριακό εξοπλισμό, όπως στις συσκευές συμπιεστότητας, τριαξονική και άμεσης διάτμησης. Η προσθήκη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στις συσκευές αυτές μετατρέπει τη μέτρηση της V_s σε μια διαδικασία ρουτίνας, εύκολη και άμεση.

Στην εργασία αυτή αρχικά περιγράφεται η διαδικασία της δοκιμής πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών για τη μέτρηση της V_s σε δύο

άμμους. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται στη συνέχεια με αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού.

2. Εργαστηριακές δοκιμές

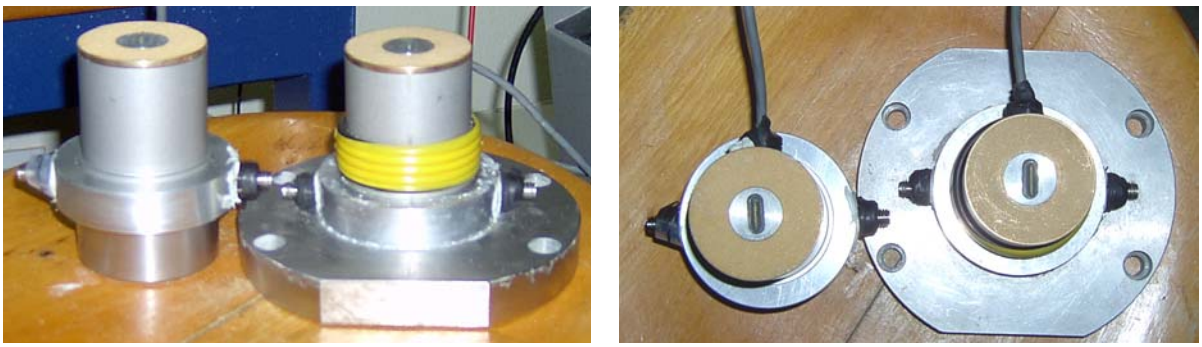
2.1 Δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Στη δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων δημιουργείται ένα ελαστικό διατμητικό κύμα από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (πομπό), τοποθετημένο στην κορυφή του δοκιμίου και η άφιξή του εντοπίζεται από ένα άλλο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (δέκτη), τοποθετημένο στη βάση του δοκιμίου. Μετράται η απόσταση των δύο στοιχείων, L, καθώς και ο χρόνος διάδοσης, t, και υπολογίζεται η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων , V_s, από την παρακάτω εξίσωση:

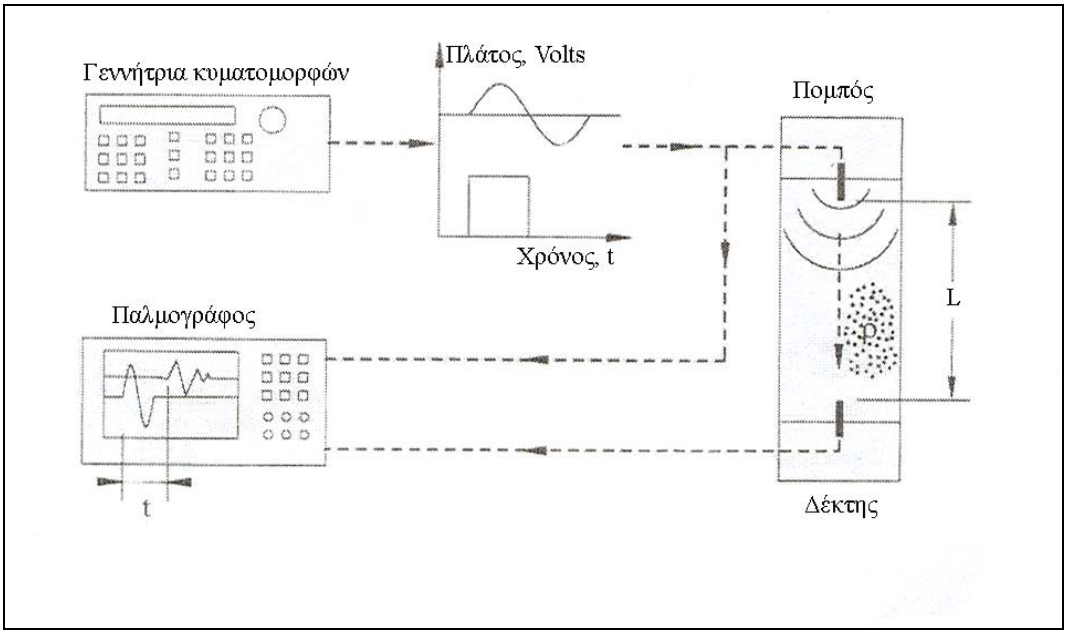
$$V_s = \frac{L}{t} \qquad (1)$$

Η λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων βασίζεται στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, στην ιδιότητα που έχουν ορισμένα κεραμικά υλικά να παράγουν μια ηλεκτρική τάση, όταν υποβάλλονται σε μηχανική παραμόρφωση και αντίστροφα. Η ενεργοποίηση της ιδιότητας του πιεζοηλεκτρισμού στα υλικά αυτά, η ηλεκτρική πόλωση, πραγματοποιείται με την έκθεσή τους για κάποιο χρονικό διάστημα σε έντονο ηλεκτρικό πεδίο και σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένα τυπικό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από δύο λεπτές πιεζοκεραμικές πλάκες άκαμπτα συνδεδεμένες σε μία κεντρική μεταλλική πλάκα. Στις εξωτερικές πλευρές των πιεζοκεραμικών πλακών συγκολλώνται δύο λεπτά ηλεκτρόδια. Κατά την εφαρμογή μιας τάσης στα ηλεκτρόδια, η προκαλούμενη ηλεκτρική πόλωση (στην ίδια κατεύθυνση για τον πομπό και σε αντίθετη κατεύθυνση για το δέκτη) επιφέρει την καμπτική παραμόρφωση των πιεζοκεραμικών πλακών (εφελκυσμό στην μια πλευρά με ταυτόχρονη συμπίεση στην άλλη). Ανάλογα με τον τρόπο της ηλεκτρικής σύνδεσης υπάρχουν δύο τύποι πιεζοηλεκτρικών στοιχείων: η σε σειρά (για το δέκτη), όπου η συνολική τάση είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των δύο στοιχείων και η παράλληλη (για τον πομπό), όπου η ίδια τάση εφαρμόζεται σε κάθε στοιχείο.

Το σύστημα πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή εγκαταστάθηκε στην τριαξονική συσκευή ανακυκλικής φόρτισης του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων & Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής ΑΠΘ (Παπαδοπούλου, 2007), Φωτογραφία 1. Κατασκευάστηκε ειδικά διαμορφωμένη βάση και άνω πλάκα φόρτισης του δοκιμίου για την ενσωμάτωση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Η ηλεκτρική τάση διέγερσης, η οποία παράγεται από γεννήτρια κυματομορφών (Agilent 33220A), επιβάλλεται στον πομπό στο άνω άκρο του δοκιμίου. Για τις δοκιμές της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε ένα ημιτονοειδές ελαστικό διατμητικό κύμα πλάτους 20Vp-p με συχνότητα 10kHz. Για την ευκρινή λήψη του σήματος απόκρισης οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε συχνότητες από 1 έως 20kHz με το ευκρινέστερο σήμα να εμφανίζεται στο εύρος από 3-10kHz. Το μεταδιδόμενο διαμέσου του εδαφικού δοκιμίου κύμα ανιχνεύεται από το δέκτη στο κάτω άκρο του δοκιμίου. Το ονομαστικό σήμα διέγερσης και το σήμα απόκρισης καταγράφονται και απεικονίζονται σε έναν παλμογράφο (Agilent 54642A). Η διάταξη του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε δίνεται στο Σχήμα 1.



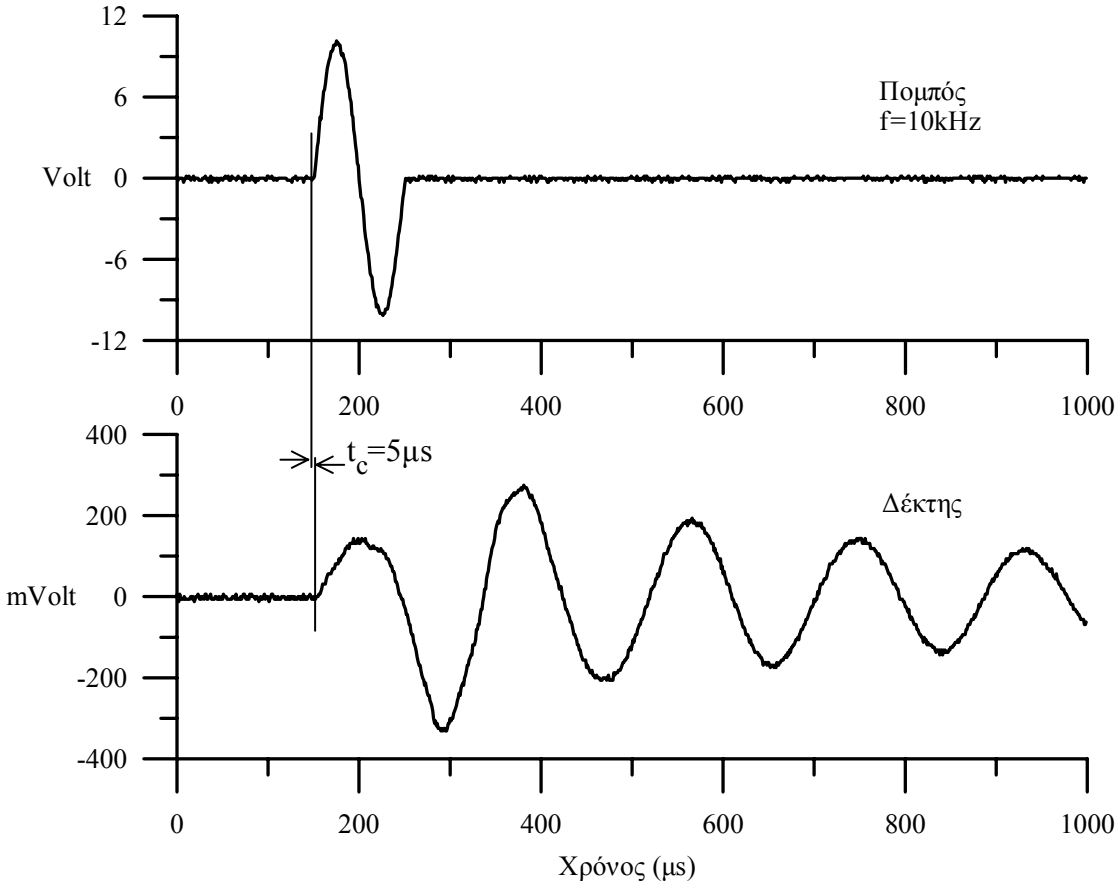
Φωτογραφία 1 Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ενσωματωμένα στη βάση και στην άνω πλάκα φόρτισης του δοκιμίου



Σχήμα 1 Διάταξη του εξοπλισμού στη δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Για τον προσδιορισμό του χρόνου διαδρομής του διατμητικού κύματος που οφείλεται στην καθυστέρηση του λόγω των ηλεκτρονικών συσκευών που παρεμβάλλονται, του υλικού των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, του στεγανωτικού υλικού που τα περιβάλλει και άλλων παραγόντων απαιτείται η βαθμονόμηση του όλου συστήματος, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ο χρόνος καθυστέρησης του κύματος. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται φέρνοντας σε επαφή τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και μετρώντας το χρονικό διάστημα από την επιβολή της ηλεκτρικής διέγερσης στον πομπό έως την πρώτη άφιξη του κύματος στο δέκτη, Φωτογραφία 2. Στο Σχήμα 2 δίνεται ο χρόνος καθυστέρησης του συστήματος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, όπως έχουν τοποθετηθεί στην τριαξονική συσκευή ανακυκλικής φόρτισης. Ο χρόνος καθυστέρησης (t_c=5 μs) αφαιρείται από τον χρόνο διαδρομής του κύματος που προκύπτει από τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Φωτογραφία 2 Βαθμονόμηση του συστήματος για τον προσδιορισμό του χρόνου καθυστέρησης στη διάδοση του διατμητικού κύματος



Σχήμα 2 Προσδιορισμός του χρόνου καθυστέρησης στη διάδοση του διατμητικού κύματος

Η εκτίμηση του χρόνου διαδρομής του διατμητικού κύματος μπορεί να γίνει είτε στο πεδίο του χρόνου (Brignoli et al., 1996), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είτε στο πεδίο των συχνοτήτων (Greening & Nash, 2004). Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι

παραπλήσια και η μέθοδος στο πεδίο του χρόνου είναι η απλούστερη και η περισσότερο χρησιμοποιούμενη. Στην παρούσα εργασία η πρώτη άφιξη του διατμητικού κύματος χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του χρόνου διαδρομής, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τυχόν επίδραση του κοντινού πεδίου.

2.2 Μελετηθέντα εδάφη και δοκιμές

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές σε δύο φυσικές καθαρές άμμους, η πρώτη στην άμμο M31 και η δεύτερη στην άμμο Toyoura. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις φυσικές ιδιότητες τους.

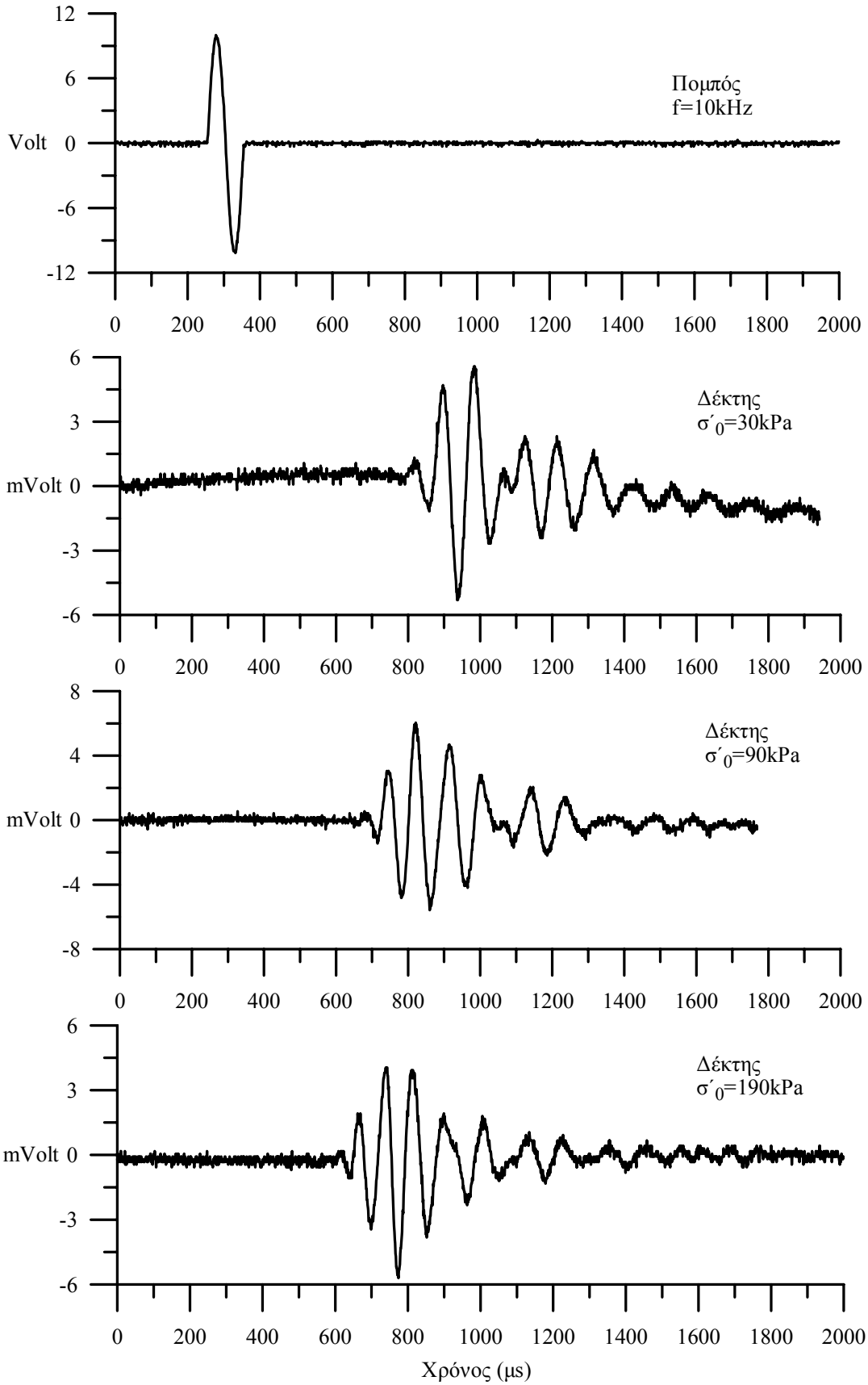
Πίνακας 1: Φυσικές ιδιότητες μελετηθέντων άμμων

Άμμος	G_s	D_{50} (mm)	C_u	e_{min}	e_{max}
M31	2.649	0.30	1.3	0.582	0.841
Toyoura	2.650	0.20	1.1	0.617	0.982

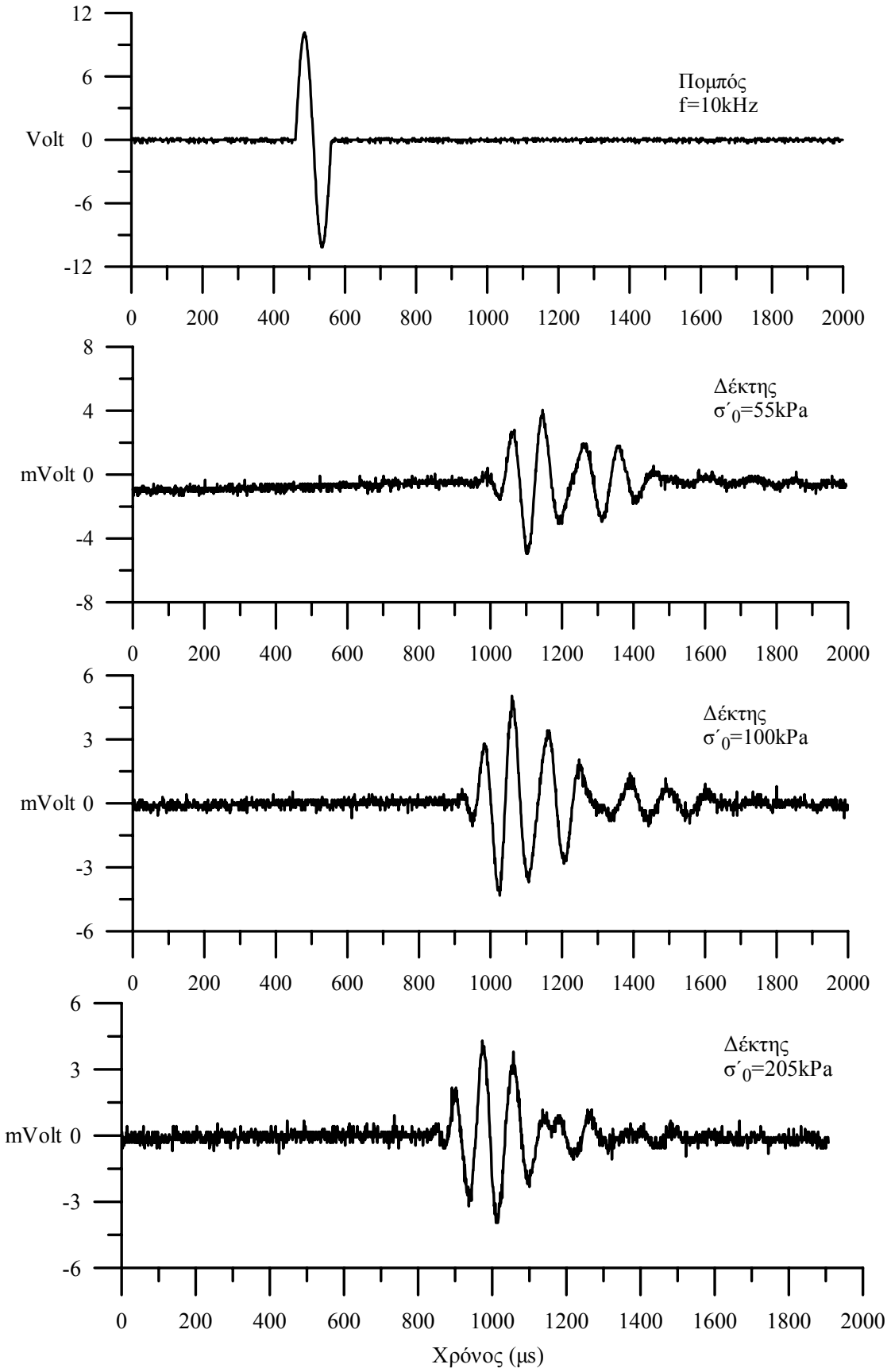
Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με ονομαστικές διαστάσεις: D_0=50mm και H_0=100mm. Το δοκίμιο της άμμου M31 προετοιμάσθηκε με τη μέθοδο της υγρής συμπύκνωσης με αρχική υγρασία 5%, ενώ για τα δοκίμιο της άμμου Toyoura χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εναπόθεσης στον αέρα. Μετά την προετοιμασία των δοκιμίων ακολούθησε ο κορεσμός τους με τη μέθοδο του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και της διαδοχικής αύξησης της πίεσης στην κυψέλη, σ_0, και της εσωτερικής πίεσης του ύδατος των πόρων, u_b, στη συνέχεια. Μετά την ολοκλήρωση και της διαδικασίας του κορεσμού, ακολούθησε η στερεοποίηση και στην συνέχεια η μέτρηση της V_s σε διάφορα επίπεδα ισότροπης τάσης (σ'_0=30-205kPa) για κάθε δοκιμή. Τα Σχήματα 3 και 4 παρουσιάζουν τις καταγραφές των δοκιμών στο πεδίο του χρόνου για τις άμμους M31 και Toyoura αντίστοιχα.

3. Αποτελέσματα δοκιμών και συζήτηση

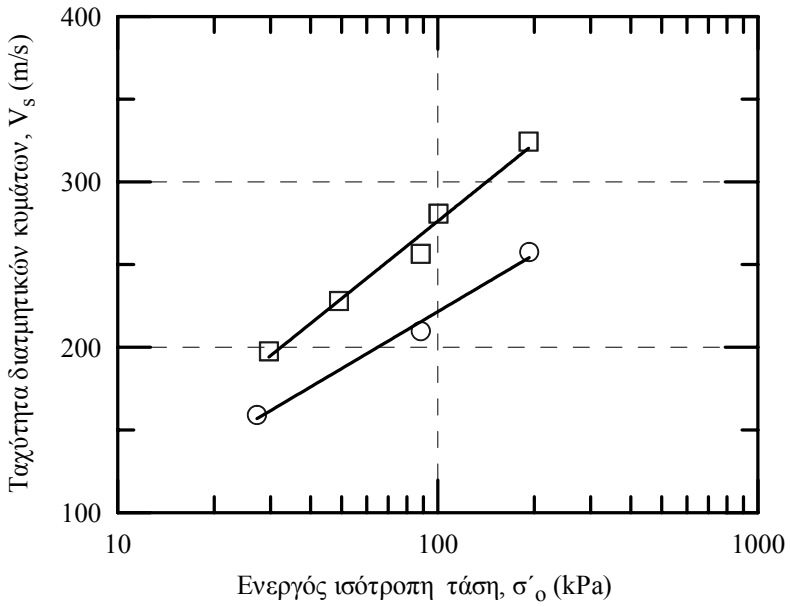
Τα Σχήματα 5 και 6 παρουσιάζουν τη μεταβολή της V_s με το επίπεδο της ενεργούς ισότροπης τάσης για τις άμμους M31 και Toyoura, όπως προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Στα παραπάνω Σχήματα παρουσιάζονται επίσης αντίστοιχα αποτελέσματα από δοκιμές στήλης συντονισμού που έχουν πραγματοποιηθεί στο Εργαστήριο στα ίδια εδάφη με την ίδια μέθοδο προετοιμασίας, στις ίδιες περίπου πυκνότητες και ενεργές τάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Καλλιόγλου, 2003, Ελευθεριάδης & Φουρουντζής, 2005). Στις δοκιμές στήλης συντονισμού τα δοκίμια είχαν ονομαστικές διαστάσεις: D_0=71.1mm και H_0=142.2mm και οι συχνότητες κατά τη μέτρηση της V_s ήταν f=89-143Hz και f=121-147Hz για τις άμμους M31 και Toyoura αντίστοιχα. Παρατηρείται μια καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων των δύο ειδών δοκιμών. Η παρατηρούμενη απόκλιση ενδεχομένως οφείλεται στη μικρή διαφορά της πυκνότητας των δοκιμίων, στις διαφορετικές διαστάσεις τους, στο διαφορετικό επίπεδο προκαλούμενης παραμόρφωσης στο δοκίμιο, και κυρίως στη διαφορά των συχνοτήτων (10kHz στις δοκιμές πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και 89-147 Hz στις δοκιμές στήλης συντονισμού).



Σχήμα 3 Καταγραφή της επιβαλλόμενης διέγερσης και της απόκρισης στη δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, στην άμμο M31, για διάφορα επίπεδα ενεργούς τάσης, σ'_0

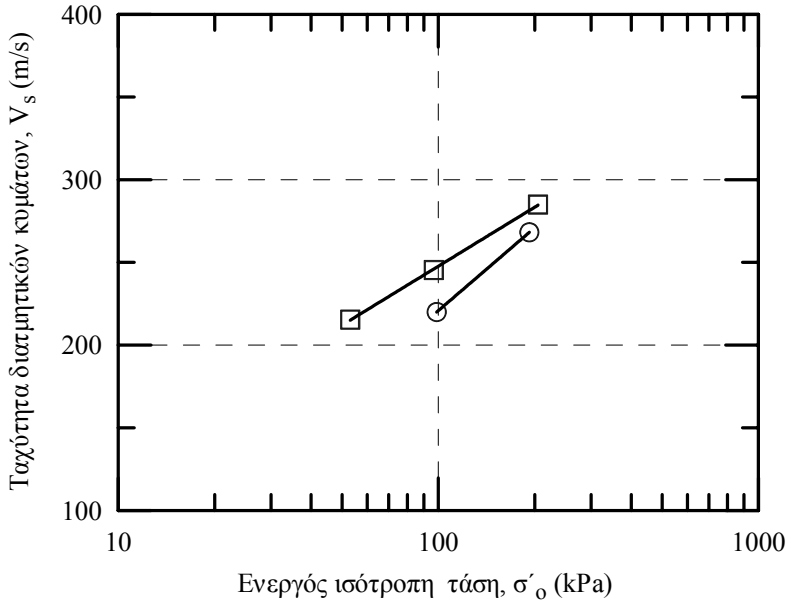


Σχήμα 4 Καταγραφή της επιβαλλόμενης διέγερσης και της απόκρισης στη δοκιμή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, στην άμμο Toyoura, για διάφορα επίπεδα ενεργούς τάσης, σ'_0



	Δοκιμή	Συχνότητα, f	Δείκτης πόρων, e
□	Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων	10 kHz	0.589-0.581
○	Στήλης Συντονισμού	89-143 Hz	0.622-0.611

Σχήμα 5 Μεταβολή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, V_s, με την ενεργό ισότροπη τάση, σ'_0, για την άμμο M31



	Δοκιμή	Συχνότητα, f	Δείκτης πόρων, e
□	Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων	10 kHz	0.764-0.759
○	Στήλης Συντονισμού	121-144 Hz	0.717-0.711

Σχήμα 6 Μεταβολή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, V_s, με την ενεργό ισότροπη τάση, σ'_0, για την άμμο Toyoura

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών από τη χρήση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στη τριαξονική συσκευή ανακυκλικής φόρτισης για τη μέτρηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε δύο άμμους. Η καλή σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με αντίστοιχα αποτελέσματα από δοκιμές στήλης συντονισμού στα ίδια εδάφη καταδεικνύει τα πλεονεκτήματα της δοκιμής πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που έγκεινται στην δυνατότητα εκτέλεσης της δοκιμής αυτής παράλληλα με άλλες εργαστηριακές δοκιμές σε εδαφικά δοκίμια, στο μικρό κόστος της καθώς και στην ταχύτητα, αμεσότητα και απλότητα των μετρήσεων.

5. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις ευχαριστίες τους προς το Κοινωφελές Ίδρυμα Α. Ωνάσης για τη χρηματοδότηση της εργαστηριακής έρευνας.

6. Βιβλιογραφία

Brignoli, E., Gotti, M. & Stokoe, K. (1996), "Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers", Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No. 4, 384-397.

Greening, P.D. & Nash, D.F.T. (2004), "Frequency domain determination of G_0 using bender elements", Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 3, 288-294.

Ελευθεριάδης, Κ. & Φουρουντζής, Ε. (2005), "Δυναμικές Ιδιότητες Άμμων", Διπλωματική Εργασία Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων & Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής Α.Π.Θ.

Καλλιόγλου, Π. (2003), "Μελέτη των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφών στη συσκευή στήλης συντονισμού", Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ..

Παπαδοπούλου, Α. (2007), "Μελέτη της συμπεριφοράς ιλυωδών άμμων σε συνθήκες μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης", Διδακτορική Διατριβή (υπό συγγραφή) Α.Π.Θ..

Shirley, D. J. & Hampton, L. D. (1978), "Shear-Wave Measurements in Laboratory Sediments", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 63, No.2.