

Εργαστηριακός Προσδιορισμός Δυναμικών Ιδιοτήτων Υλικών ΧΥΤΑ

Laboratory Evaluation of Dynamic Properties of Municipal Solid-Waste

ΖΕΚΚΟΣ, Δ. Π. Πολιτικός Μηχανικός, MSc, PhD, GeoSyntec Consultants, Oakland, ΗΠΑ.

BRAY, J. D. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, University of California at Berkeley, ΗΠΑ

RIEMER, M. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής, University of California at Berkeley, ΗΠΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζονται αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων υλικού στερεών αστικών αποβλήτων προερχόμενου από το ΧΥΤΑ Tri-Cities της περιοχής San Francisco Bay Area. Προσδιορίζονται οι τιμές του δυναμικού μέτρου διάτμησης για μικρές παραμορφώσεις, G_{max} , και οι καμπύλες $G/G_{max}-\gamma_c$, και $D-\gamma_c$ (D =λόγος απόσβεσης) με δοκιμές κυκλικής τριαξονικής φόρτισης μεγάλου δοκιμίου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών – που θεωρούνται αντιπροσωπευτικά για βάθη μέχρι 20 m – αξιοποιούνται για τη διερεύνηση της επίδρασης της σύστασης των δειγμάτων, της διάρκειας της ισότροπης συμπίεσης του δοκιμίου, του ειδικού βάρους του υλικού, και της συχνότητας φόρτισης στις προσδιοριζόμενες δυναμικές ιδιότητες.

ABSTRACT : Results of laboratory tests are presented for the evaluation of dynamic properties of Municipal Solid-Waste (MSW) from the Tri-Cities landfill in the San Francisco Bay Area. Values of low amplitude shear modulus, G_{max} , and the curves $G/G_{max}-\gamma_c$, and $D-\gamma_c$ (D =damping ratio) are determined from large-scale cyclic triaxial tests. The test results – which are considered representative for depths up to 20 m – are used for establishing the dependence of dynamic properties of material on specimen composition, duration of confinement, unit weight of material, and loading frequency.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατα την τελευταία δεκαετία διεθνώς οι χώροι απόθεσης απορριμμάτων έχουν εξελιχθεί από Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ) σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) με αυστηρές προδιαγραφές σχεδιασμού, λειτουργίας και τελικής σφράγισης. Επιπλέον, σε περιοχές όπου ο σεισμικός κίνδυνος είναι υπαρκτός, επιβάλλεται η μελέτη της σεισμικής απόκρισης των ΧΥΤΑ κατά τη διάρκεια λειτουργίας, αλλά και μετά τη σφράγισή τους. Για τη διεξαγωγή δυναμικών αναλύσεων των ΧΥΤΑ, είναι καθοριστικής σημασίας η επιλογή τιμών για τις χρησιμοποιούμενες ιδιότητες των στερεών αστικών αποβλήτων και πιο συγκεκριμένα για:

α) Το ειδικό βάρος του υλικού γ .

β) Την ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων μικρού πλάτους, V_{so} ή το αντίστοιχο δυναμικό μέτρο διάτμησης, G_{max} .

γ) Τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης (G/G_{max}) και του λόγου απόσβεσης του υλικού D ως συνάρτηση της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης, γ_c .

Το ειδικό βάρος των στερεών αστικών αποβλήτων έχει μελετηθεί στο παρελθόν (π.χ. Kavazanjian et al., 1995). Πρόσφατα οι Zekkos et al. (2005) και Zekkos (2005), χρησιμοποιώντας δεδομένα επιτόπου δοκιμών προσδιορισμού του υγρού ειδικού βάρους των στερεών αστικών αποβλήτων και εργαστηριακά αποτελέσματα σε δείγματα στερεών αστικών αποβλήτων μεγάλων διαστάσεων, πρότειναν μια μεθοδολογία για την εκτίμηση

του υγρού ειδικού βάρους των στερεών αστικών αποβλήτων ως συνάρτηση του βάθους του ΧΥΤΑ. Η σχέση ειδικού βάρους των στερεών αστικών αποβλήτων και βάθους εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του καθημερινού εδαφικού καλύμματος, την ενέργεια συμπύκνωσης κατά την απόθεση των στερεών αστικών αποβλήτων καθώς και τη σύσταση του υλικού.

Το μέτρο διάτμησης μικρών παραμορφώσεων G_{max} σχετίζεται με την αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων V_{so} και την πυκνότητα του υλικού ρ , με τη σχέση:

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

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων V_{so} μπορεί να προσδιοριστεί επιτόπου με σεισμικές μεθόδους. Η Μέθοδος Φασματικής Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων (SASW) (Athanasopoulos and Pelekis, 1997) είναι ιδιαίτερα δημοφιλής σε ΧΥΤΑ λόγω του γεγονότος ότι δεν απαιτείται η εκτέλεση γεωτρήσεων. Αν και ο επιτόπου προσδιορισμός της ταχύτητας V_{so} είναι ιδιαίτερα σημαντικός, οι Kavazanjian et al. (1996) έχουν προτείνει χαρακτηριστικές τιμές της διατμητικής ταχύτητας των στερεών αστικών αποβλήτων ως συνάρτηση του βάθους.

Καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης του υλικού ως συνάρτηση της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης για τα στερεά αστικά απόβλητα έχουν προταθεί από αρκετούς ερευνητές (π.χ. Idriss et al., 1995, Matasovic and Kavazanjian, 1998, Augello et al., 1998, Elgamal et al., 2004). Όλες όμως οι καμπύλες είναι σχεδόν αποκλειστικά βασισμένες σε αντίστροφες αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης του ΧΥΤΑ ΟΙΙ στην περιοχή του Los Angeles, ΗΠΑ, στον οποίο έχουν εγκατασταθεί από το 1987 δύο επιταχυνσιογράφοι. Ο ΧΥΤΑ ΟΙΙ αποτελεί όμως ιδιαίτερη περίπτωση ΧΥΤΑ καθώς περιλαμβάνει μεγάλες ποσότητες εδαφικού υλικού καθώς και απόβλητα μη-αστικής προέλευσης. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι οι προτεινόμενες καμπύλες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Πολύ περιορισμένες εργαστηριακές διερευνήσεις έχουν πραγματοποιηθεί σε στερεά απόβλητα, λόγω των δυσκολιών εκτέλεσης δοκιμών σε τέτοιου είδους υλικά καθώς και της ανάγκης πραγματοποίησης δοκιμών σε δοκίμια μεγάλου μεγέθους. Οι Matasovic and Kavazanjian (1998) πραγματοποίησαν δοκιμές απλής διάτμησης

μεγάλης διαμέτρου (457 mm) σε στερεά απόβλητα από το ΧΥΤΑ ΟΙΙ, αλλά τα δεδομένα τους περιορίζονται σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες του $10^{-2}\%$. Επίσης, περιορισμένα αποτελέσματα για διατμητικές παραμορφώσεις ίσες περίπου με 0.3% πραγματοποίησαν οι Towhata et al. (2004).

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Στη δημοσίευση αυτή παρουσιάζεται μέρος των αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών κυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε δοκίμια μεγάλου μεγέθους (διάμετρος 300 mm, ύψος 600-630 mm) σε στερεά αστικά απόβλητα ηλικίας 2 έως 15 ετών που συλλέχθηκαν από τον ΧΥΤΑ Tri-Cities της περιοχής San Francisco Bay Area. Εκτελέστηκαν περισσότερες από 80 σειρές κυκλικών δοκιμών με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της σύστασης των δειγμάτων, του μεγέθους και της διάρκειας ισότροπης συμπίεσης, του ειδικού βάρους, και της συχνότητας φόρτισης στο μέτρο διάτμησης μικρών παραμορφώσεων (G_{max}), καθώς και στις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης (G/G_{max}) και στο λόγο απόσβεσης του υλικού D , ως συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία αφορούν δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κάτω από ισότροπη περιβάλλουσα τάση κυμαινόμενη από 25 έως 90 kPa και εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι αντιπροσωπευτικά της δυναμικής απόκρισης στερεών αστικών αποβλήτων που βρίσκονται σε βάθος μέχρι 20 m περίπου.

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Πληροφορίες σχετικά με τις πραγματοποιηθείσες επιτόπου δοκιμές, τις γεωτρητικές εργασίες και τον χαρακτηρισμό των στερεών αστικών αποβλήτων του ΧΥΤΑ Tri-Cities δίνονται από τον Zekkos (2005).

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε τριαξονική συσκευή διαμέτρου δοκιμίου 300 mm και ύψους 600-630 mm. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δυο ευαίσθητοι ψηφιακοί αισθητήρες μεταβολής μήκους (LVDT) που τοποθετήθηκαν απευθείας στην κορυφή του δοκιμίου σε αντιδιαμετρικές θέσεις και επέτρεψαν τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης για πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις ($\gamma_c = 3 \cdot 10^{-4}\%$) και την εκτίμηση

του μέτρου διάτμησης μικρών παραμορφώσεων.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε υλικό που συλλέχθηκε από τρεις ομάδες δειγμάτων του ΧΥΤΑ Tri-Cities. Χαρακτηριστικά των ομάδων δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η ομάδα A3 αποτελείται από υλικό που προέρχεται από μεγάλο σχετικά βάθος και ήταν ηλικίας περίπου 15 ετών όταν πραγματοποιήθηκαν οι γεωτρήσεις. Η ομάδα C6 αποτελείται από υλικό που προέρχεται από μικρό βάθος και ήταν περίπου 3 ετών. Η ομάδα C3 αποτελείται από υλικό που προέρχεται από μικρό βάθος και ήταν περίπου 1 έτους. Η ομάδα C3 επιλέχθηκε με βάση το χαρακτηρισμό των συλλεχθέντων δειγμάτων από το ΧΥΤΑ Tri-Cities ως η πιο διαφορετική ομάδα σε σύγκριση με τις ομάδες A3 και C6 στις οποίες είχαν ήδη πραγματοποιηθεί δοκιμές. Όπως αναφέρεται παρακάτω, τα αποτελέσματα ως προς τις δυναμικές ιδιότητες των τριών ομάδων ήταν σε πολύ καλή συμφωνία.

Τα δείγματα παρασκευάστηκαν στο εσωτερικό χαλύβδινης κυλινδρικής μήτρας σε 8-9 στρώσεις χρησιμοποιώντας την πτώση ειδικά κατασκευασμένης σφύρας βάρους 100 kN περίπου από σταθερό ύψος στην επιφάνεια του υλικού, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό ειδικό βάρος δείγματος ή η επιθυμητή ενέργεια συμπίκνωσης, ανάλογα με το σκοπό της δοκιμής. Από το μέτρο διάτμησης μικρών παραμορφώσεων που εκτιμήθηκε μέσω των κυκλικών τριαξονικών δοκιμών, το ειδικό βάρος του κάθε δείγματος και τη σχέση (1), υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων των δειγμάτων η οποία βρέθηκε να είναι συγκρίσιμη με τις τιμές που προέκυψαν από τις επί-τόπου δοκιμές με τη μέθοδο SASW.

Για κάθε ομάδα δειγμάτων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε παρασκευασμένα δείγματα διαφορετικής σύστασης. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δείγματα με 100% υλικό μεγέθους σωματιδίου μικρότερο των 19 mm, και στη συνέχεια δοκιμές με 62-76% και 8-25% κατά βάρος υλικό μεγέθους σωματιδίου μικρότερο των 19 mm. Η διαίρεση του υλικού σε κλάσματα μέγεθους σωματιδίου μικρότερου και μεγαλύτερου των 19 mm βασίζεται στη μεθοδολογία χαρακτηρισμού των στερεών αστικών αποβλήτων που παρουσιάζεται αναλυτικά από τον Zekkos (2005). Συνοπτικά, τα υλικά με μέγεθος σωματιδίων μικρότερο των 19 mm αποτελούνται κυρίως από εδαφικό υλικό με

προσμίξεις («εδαφοειδές»), σε αντίθεση με το υλικό μεγέθους σωματιδίων μεγαλύτερο των 19 mm που περιλαμβάνει απορρίμματα. Όπως προκύπτει από τον χαρακτηρισμό του υλικού, το >19 mm υλικό αποτελείται κυρίως από χαρτί, πλαστικό, ξύλο και μικρές σχετικά ποσότητες χαλίκων. Κατά συνέπεια, το >19 mm υλικό αποτελείται κυρίως από στοιχεία ινώδους μορφής και χαμηλού ειδικού βάρους. Με βάση τον χαρακτηρισμό του υλικού, εκτιμάται ότι τα αποτιθέμενα υλικά στο ΧΥΤΑ Tri-Cities αποτελούνται κατά 50-75% από υλικό < 19 mm.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά ομάδων δειγμάτων στερεών αστικών αποβλήτων

Table 1: Characteristics of tested MSW sample groups.

	A3	C6	C3
Γεώτρηση	BH-2	BH-1	BH-2
Βάθος, m	25.6-26.2	7.6-9.6	3.5-4.5
% υγρασία	12	13	23
% οργανικά	15-30	10-16	20-36
Ηλικία	15 έτη	2 έτη	<1 έτη

4. ΜΕΤΡΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ G_{max}

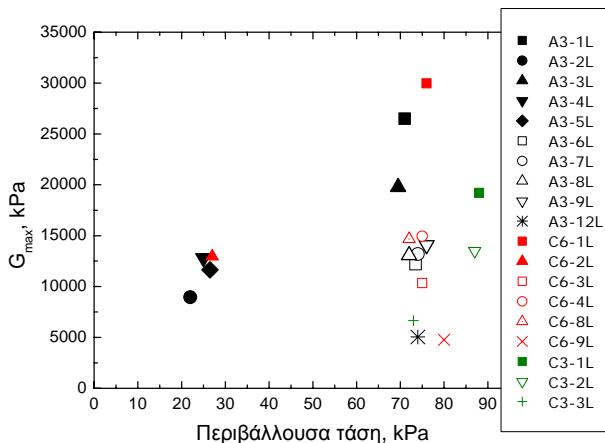
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η επίδραση α) της σύστασης των δειγμάτων, β) της χρονικής διάρκειας δράσης της περιβάλλουσας τάσης, γ) του ειδικού βάρους, και δ) της συχνότητας φόρτισης στο μέτρο διάτμησης, G_{max} , του υλικού των αποβλήτων.

4.1 Επίδραση της Σύστασης του Δείγματος

Η επίδραση της σύστασης του δείγματος είναι σημαντική. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται αποτελέσματα σε δείγματα από τις 3 ομάδες δειγμάτων. Όλες οι δοκιμές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 πραγματοποιήθηκαν με συχνότητα φόρτισης 1 Hz, και για χρόνο έκθεσης 24 hr σε σταθερή μέση περιβάλλουσα τάση. Για δείγματα με υλικό 100% < 19 mm που σημειώνονται με πλήρες σύμβολο, το G_{max} αυξάνεται από περίπου 12.5 MPa για μέση περιβάλλουσα τάση 25 kPa, σε 25 MPa για μέση περιβάλλουσα τάση 75 kPa περίπου.

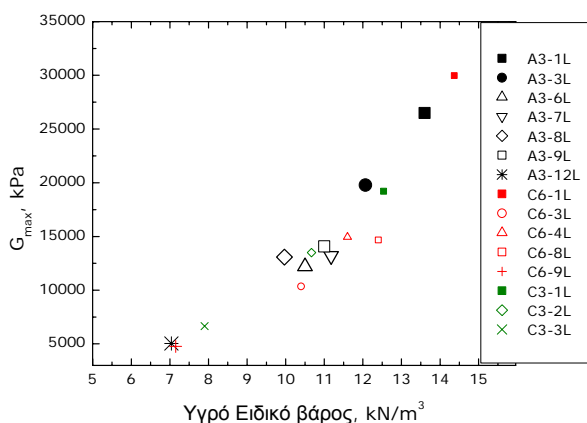
Καθώς η περιεκτικότητα του δείγματος σε υλικά μεγέθους σωματιδίων >19 mm αυξάνει, για την ίδια ενέργεια συμπίκνωσης, το ειδικό βάρος του δείγματος και το G_{max} μειώνεται. Για μέση περιβάλλουσα τάση 75 kPa περίπου, το G_{max} μειώνεται από 25 MPa για δείγματα με

100% < 19 mm υλικό σε περίπου 14 MPa και 5 MPa για δείγματα με 62-76% και 5-25% υλικό < 19 mm, αντίστοιχα. Η μείωση αυτή οφείλεται στη μείωση του υγρού ειδικού βάρους του δείγματος όταν προστίθενται συστατικά με μέγεθος > 19 mm τα οποία έχουν μικρότερο ειδικό βάρος από τα εδαφοειδή συστατικά μεγέθους σωματιδίων < 19 mm, αλλά και στην ινώδη φύση των συστατικών μεγέθους > 19 mm που αποτελούνται κυρίως από χαρτί, πλαστικό και ξύλο.



Σχήμα 1. G_{max} ως συνάρτηση της περιβάλλουσας τάσης για δείγματα στερεών αστικών αποβλήτων

Figure 1. G_{max} vs. Confining stress for MSW specimens.



Σχήμα 2. G_{max} ως συνάρτηση του ολικού ειδικού βάρους δείγματος για περιβάλλουσα τάση ίση με 75 kPa

Figure 2. G_{max} vs. total unit weight for confining stress of 75 kPa.

4.2 Επίδραση του Υγρού Ειδικού Βάρους

Η σχετική διασπορά των τιμών του G_{max} του Σχήματος 1 για δείγματα κάτω από μέση περιβάλλουσα τάση ίση με 75 kPa περίπου, οφείλεται κυρίως στην επίδραση του ειδικού βάρους του δείγματος. Στο Σχήμα 2

παρουσιάζεται το G_{max} ως συνάρτηση του υγρού ειδικού βάρους του δείγματος για μέση περιβάλλουσα τάση περίπου ίση με 75 kPa. Καθώς το υγρό ειδικό βάρος του δείγματος μειώνεται, παρατηρείται μείωση και του G_{max} . Δείγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υλικό > 19 mm παρουσιάζουν μείωση του ειδικού βάρους και του G_{max} . Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι και οι τρεις ομάδες δειγμάτων που συλλέχθηκαν από το ΧΥΤΑ Tri-Cities συμφωνούν ως προς τη συσχέτιση G_{max} -ειδικό βάρος.

4.3 Επίδραση της Διάρκειας Συμπίεσης

Η τιμή του G_{max} που εκτιμήθηκε από τις τριαξονικές κυκλικές δοκιμές αυξάνεται σημαντικά ως συνάρτηση της χρονικής διάρκειας επιβολής της περιβάλλουσας τάσης. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κυκλικής τριαξονικής φόρτισης για διάρκεια συμπίεσης μεγαλύτερη των 30 ημερών. Επίσης, προσδιορίστηκε η τιμή του G_{max} από μετρήσεις της ταχύτητας V_{so} χρησιμοποιώντας ζεύγος μικρού μεγέθους επιταχυνσιομέτρων προσαρμοζόμενων σε διάφορες καθ' ύψος θέσεις του δείγματος. Τα αποτελέσματα από αυτή τη μέθοδο βρέθηκαν σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ο λόγος της τιμής του G_{max} σε χρόνο t προς την τιμή του G_{max} σε χρόνο ίσο με 24 hrs ως συνάρτηση του χρόνου έκθεσης t στη μέση περιβάλλουσα τάση. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια και των τριών ομάδων δειγμάτων. Η σχέση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\frac{G_{max}(t)}{G_{max}(t=24hrs)} = 0.32 \cdot \log(t) + 0.63 \quad (2)$$

όπου: $G_{max}(t)$ είναι το μέτρο διάτμησης μικρών παραμορφώσεων για χρόνο έκθεσης στην περιβάλλουσα τάση ίσο με t σε ώρες, $G_{max}(t=24 hrs)$, είναι το μέτρο διάτμησης μικρών παραμορφώσεων για χρόνο έκθεσης στην περιβάλλουσα τάση ίσο με 24 hrs.

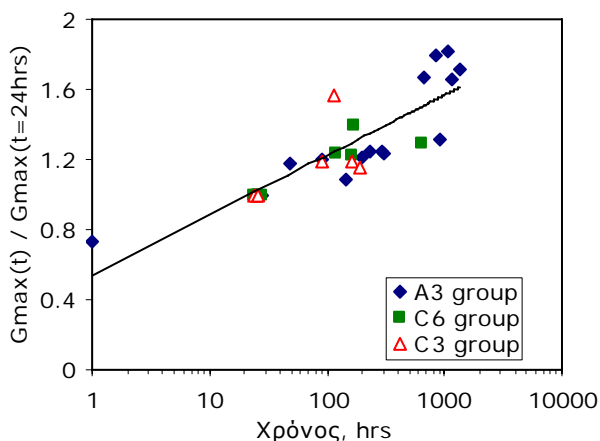
4.4 Επίδραση της Συχνότητας Φόρτισης

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δείγματα με διαφορετική σύσταση (100%, 62-76%, 5-25% < 19 mm) και από τις τρεις ομάδες δειγμάτων

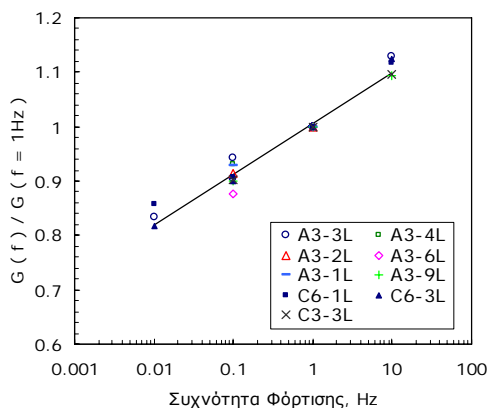
με συχνότητες φόρτισης 0.01, 0.1, 1, και 10 Hz. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Η τιμή του G_{max} αυξάνεται γραμμικά με το λογάριθμο της συχνότητας φόρτισης για συχνότητες μεταξύ 0.01 και 10 Hz, ανεξαρτήτως της σύστασης του δείγματος, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\frac{G(f)}{G(f=1Hz)} = 0.092 \cdot \log(f) + 1.0 \quad (3)$$

όπου: $G(f)$ είναι η τιμή του μέτρου διάτμησης μικρών σχετικά παραμορφώσεων με συχνότητα φόρτισης f , $G(f=1Hz)$ είναι η τιμή του μέτρου διάτμησης μικρών σχετικά παραμορφώσεων με συχνότητα φόρτισης 1 Hz.



Σχήμα 3. Μεταβολή του μέτρου διάτμησης μικρών παραμορφώσεων ως συνάρτηση του χρόνου έκθεσης στην περιβάλλουσα τάση
Figure 3. Change of small-strain shear modulus as a function of time under confinement.



Σχήμα 4. Επίδραση της συχνότητας φόρτισης στην εκτιμώμενη τιμή του μέτρου διάτμησης
Figure 4. Effect of loading frequency on the shear modulus.

5. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ G/G_{max} ΚΑΙ ΛΟΓΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Τα πειραματικά αποτελέσματα επέτρεψαν επίσης τη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης G/G_{max} και του λόγου απόσβεσης υλικού D . Από όλες τις παραμέτρους που μελετήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι η σύσταση του δείγματος είναι η πλέον σημαντική και ακολουθεί η επίδραση της μέσης περιβάλλουσας τάσης. Η διάρκεια επιβολής της περιβάλλουσας τάσης, το ειδικό βάρος, και η συχνότητα φόρτισης (για συχνότητες φόρτισης 0.1 και 1 Hz) δεν είχαν σημαντική επίδραση στις καμπύλες.

5.1 Επίδραση της Σύστασης του Δείγματος

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δείγματα και από τις τρεις ομάδες δειγμάτων με 100%, 62-76% και 8-25% κατά βάρος περιεκτικότητα σε εδαφοειδές υλικό <19 mm. Τα αποτελέσματα των τριών ομάδων δειγμάτων ήταν σε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5 ως συνάρτηση της κατά βάρος περιεκτικότητας σε εδαφοειδές υλικό <19 mm.

Παρατηρείται ότι καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα σε εδαφοειδές υλικό <19 mm, οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης G/G_{max} μετακινούνται σημαντικά προς τα δεξιά, δηλαδή το υλικό παρουσιάζει περισσότερο ελαστική συμπεριφορά (Σχήμα 5α). Η παρατηρούμενη μετακίνηση των καμπυλών οφείλεται στην ινώδη φύση των υλικών μεγέθους >19 mm καθώς και στο μέγεθος των ινών. Οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης δεν διαφέρουν μεταξύ των ομάδων δειγμάτων παρά το γεγονός ότι τα δείγματα προέρχονταν από διαφορετικά βάθη στο ΧΥΤΑ και είχαν διαφορετικές ηλικίες. Στα αποτελέσματα προσαρμόστηκε, με βάση τη σύστασή τους, υπερβολική καμπύλη με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_c}{a}\right)^b} \quad (4)$$

όπου: G_{max} είναι το μέτρο διάτμησης μικρών παραμορφώσεων,
 G είναι το απομειωμένο μέτρο διάτμησης για διατμητική παραμόρφωση γ_c ,

α και β είναι δυο παράμετροι της υπερβολής των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από τη σύσταση του δείγματος.

Προσαρμογή των αποτελεσμάτων στην Εξίσωση 4, έχει ως αποτέλεσμα τις τιμές των α και β που δίνονται στον Πίνακα 2 ως συνάρτηση της σύστασης του δείγματος και της περιβάλλουσας τάσης. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης R^2 της προσαρμοζόμενης υπερβολής.

Η μεταβολή του λόγου απόσβεσης υλικού με τη διατμητική παραμόρφωση εξαρτάται επίσης από τη σύσταση του δείγματος (Σχήμα 5β). Η σημαντικότερη επίδραση παρατηρείται σε μεγάλες παραμορφώσεις ($>10^{-2}\%$): Για συγκεκριμένη διατμητική παραμόρφωση, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υλικό μεγέθους >19 mm, παρατηρείται μείωση του λόγου απόσβεσης, δηλαδή παρατηρείται και πάλι περισσότερο ελαστική συμπεριφορά. Η παρατηρούμενη μείωση του λόγου απόσβεσης είναι σε συμφωνία με τη μικρότερη απομείωση του μέτρου διάτμησης που παρατηρείται για δείγματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε υλικό >19 mm. Για μικρές παραμορφώσεις (περίπου $<5 \cdot 10^{-3}\%$) τα εργαστηριακά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο λόγος απόσβεσης δεν μειώνεται σημαντικά, αλλά παραμένει σχεδόν σταθερός με τιμές 3-4%. Η παρατήρηση αυτή υποστηρίζεται επίσης από μη δημοσιευμένα εργαστηριακά αποτελέσματα σε δοκιμές συντονισμού που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος από το University of Texas at Austin. Επίσης, για μικρές διατμητικές παραμορφώσεις ($<10^{-3}\%$), καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υλικό μεγέθους σωματιδίων >19 mm, παρατηρείται μικρή αύξηση του λόγου απόσβεσης. Οι προτεινόμενες τιμές του λόγου απόσβεσης του υλικού D ως συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης και της σύστασης του δείγματος δίνονται στον Πίνακα 3.

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα συγκρίνονται με παλαιότερες προτεινόμενες καμπύλες στο Σχήμα 6. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6α τα εργαστηριακά αποτελέσματα της απομείωσης του μέτρου διάτμησης βρίσκονται στα αριστερά της προτεινόμενης καμπύλης από τους Augello et al. (1998) για $100\% < 19$ mm και μετακινούνται προς τα δεξιά μέχρι την προτεινόμενη καμπύλη των Matasovic and Kavazanjian (1998) για στερεά αστικά

απόβλητα με μεγάλες ποσότητες υλικού >19 mm. Τα εργαστηριακά δεδομένα του λόγου απόσβεσης D ως συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης διακρίνονται στο Σχήμα 6β μαζί με παλαιότερες προτεινόμενες καμπύλες. Τα εργαστηριακά δεδομένα της παρούσας διερεύνησης βρίσκονται για μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις μεταξύ των προτεινόμενων καμπυλών από τους Augello et al. (1998) και τους Matasovic and Kavazanjian (1998) εκτός από τα δείγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε υλικό >19 mm, τα οποία παρουσιάζουν μικρότερες τιμές λόγου απόσβεσης σε μεγάλες παραμορφώσεις. Τα δεδομένα της παρούσας διερεύνησης είναι σε καλή συμφωνία και με τα περιορισμένα εργαστηριακά δεδομένα από προηγούμενες διερευνήσεις: Τα εργαστηριακά δεδομένα κυκλικής απλής διάτμησης σε δοκίμια μεγάλου μεγέθους στερεών αστικών αποβλήτων από το ΧΥΤΑ OII (Matasovic and Kavazanjian, 1998) που περιλάμβαναν $>80\%$ κατα βάρους υλικό <19 mm παρουσιάζουν παρόμοιες και λίγο υψηλότερες τιμές λόγου απόσβεσης υλικού από τις τιμές που μετρήθηκαν για δείγματα με $100\% < 19$ mm από το ΧΥΤΑ Tri-Cities. Επίσης, στο Σχήμα 6β παρουσιάζονται αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών τριαξονικής φόρτισης των Towhata et al. (2004) σε στερεά αστικά απόβλητα από τη Γερμανία. Όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε 0.3% διατμητική παραμόρφωση περίπου, οι υψηλότερες τιμές προέκυψαν για δοκίμια που περιλάμβαναν μόνο το εδαφοειδές κλάσμα, ενώ οι χαμηλότερες τιμές λόγου απόσβεσης υπολογίστηκαν για δοκίμια που περιλάμβαναν και πλαστικές ίνες. Τα αποτελέσματα των Towhata et al. (2004) είναι σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης με τις υψηλότερες τιμές του λόγου απόσβεσης να συμφωνούν με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας για δείγματα με $100\% < 19$ mm και τις χαμηλότερες να συμφωνούν με τα αποτελέσματα για δείγματα με $8-25\%$ και $62-76\% < 19$ mm.

Βασικό πλεονέκτημα της οικογένειας καμπυλών που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα είναι ότι ο μελετητής μπορεί, με βάση τον χαρακτηρισμό των στερεών αστικών αποβλήτων του υπό μελέτη ΧΥΤΑ, να επιλέξει το κατάλληλο ζεύγος καμπυλών G/G_{max} και λόγου απόσβεσης, D. Για παράδειγμα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο ΧΥΤΑ Tri-Cities εκτιμήθηκε ότι τα αποτιθεμένα υλικά αποτελούνται κατά $50-75\%$ από υλικό <19

mm. Επομένως για την πραγματοποίηση δυναμικών αναλύσεων του συγκεκριμένου ΧΥΤΑ, θα επιλέγονταν οι καμπύλες για 62-76% < 19 mm.

Πίνακας 2. Παράμετροι προσαρμογής της υπερβολής στα εργαστηριακά αποτελέσματα ως συνάρτηση του % < 19 mm (για βάθη μέχρι 20 m)

Table 2. Hyperbolic parameters of the regressed cyclic triaxial data as a function of the % < 19 mm material (for depths up to 20 m).

	% < 19 mm		
	100	62-76	8-25
α	0.118	0.265	0.697
b	0.886	0.819	0.925
R^2	0.972	0.978	0.981

Πίνακας 3. Προτεινόμενες τιμές λόγου απόσβεσης υλικού συναρτήσει του % < 19 mm. (για βάθη μέχρι 20 m)

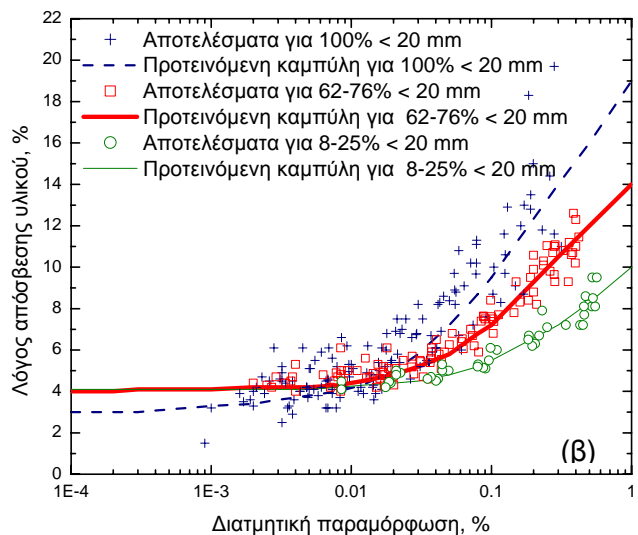
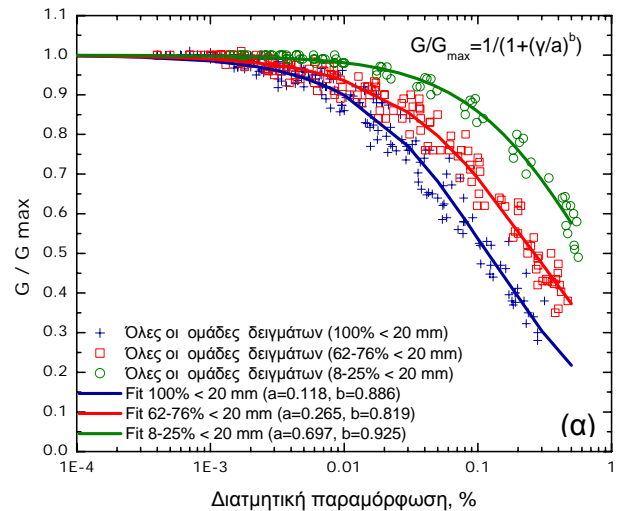
Table 3. Recommended material damping ratio values as a function of the % < 19 mm material (for depths up to 20 m).

	% < 19 mm		
γ_c (%)	100	62-76	8-25
0.0001	3	4	4.1
0.0002	3	4	4.1
0.0003	3	4.1	4.1
0.001	3.3	4.1	4.1
0.002	3.4	4.2	4.1
0.003	3.6	4.2	4.1
0.005	3.8	4.2	4.1
0.008	4	4.3	4.2
0.012	4.3	4.5	4.3
0.02	5	4.8	4.4
0.03	5.8	5.2	4.5
0.05	7.2	5.8	4.8
0.08	8.7	6.8	5.2
0.1	9.5	7.2	5.5
0.3	14	10.5	7.2
0.5	16	12	8.3
1.0	19	14	10

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκαν αποτελέσματα δοκιμών κυκλικής τριαξονικής φόρτισης μεγάλου δοκιμίου σε τρεις ομάδες δειγμάτων στερεών αστικών αποβλήτων από το ΧΥΤΑ Tri-Cities. Από τις παραμέτρους που μελετήθηκαν, τη σημαντικότερη επίδραση στις δυναμικές ιδιότητες είχε η σύσταση του υλικού. Προτείνονται καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης

του υλικού ως συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης βασισμένες στη σύσταση του δείγματος. Οι καμπύλες αυτές προτείνονται για δυναμικές αναλύσεις των ΧΥΤΑ και θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για στερεά αστικά απόβλητα μέχρι βάθους 20 m περίπου.



Σχήμα 5. Αποτελέσματα δοκιμών κυκλικής τριαξονικής φόρτισης για όλες τις ομάδες δειγμάτων των στερεών αστικών αποβλήτων: α) Απομείωση του μέτρου διάτμησης, β) Λόγος απόσβεσης υλικού D , ως συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης

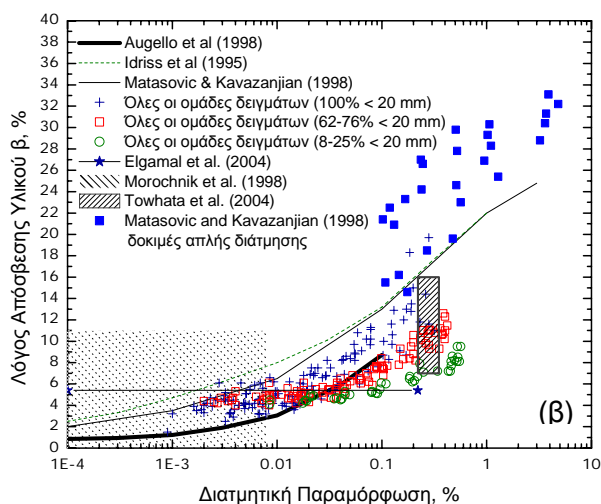
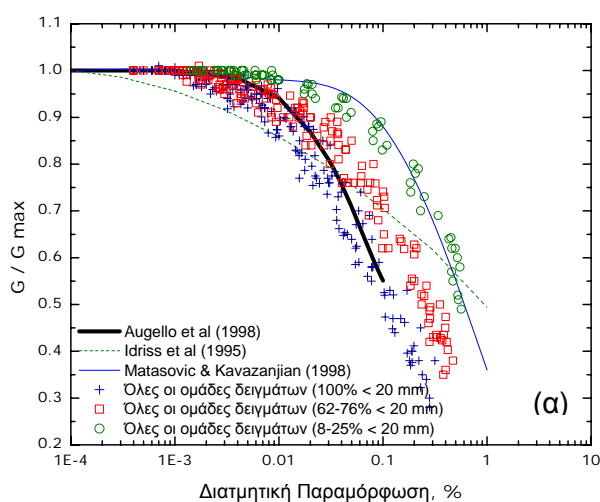
Figure 5. Results of cyclic triaxial tests from all sample groups: a) Normalized shear modulus reduction curve, b) Material damping curve, as a function of shear strain.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες προς το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών των Ηνωμένων Πολιτειών (National Science Foundation, USA) για την χρηματοδότηση του παρόντος ερευνητικού

έργου (Grants CMS-022064/CMS-0220159/CMS-0219834). Στο ερευνητικό αυτό έργο με σκοπό τον προσδιορισμό των δυναμικών και στατικών ιδιοτήτων του υλικού των στερεών αστικών αποβλήτων συμμετείχαν το University of California at Berkeley, το University of Texas at Austin, η εταιρεία GeoSyntec Consultants, το Arizona State University, και το Πανεπιστήμιο Πατρών.

Σημείωση: Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την παρούσα μελέτη καθώς και πρόσθετο υλικό στο θέμα των μηχανικών ιδιοτήτων των αστικών στερεών αποβλήτων διατίθενται από το Geoengineer website στη διεύθυνση <http://waste.geoengineer.org>.



Σχήμα 6. Αποτελέσματα δοκιμών κυκλικής τριαξονικής φόρτισης και σύγκριση με τη βιβλιογραφία: α) Απομείωση του μέτρου διάτμησης, β) Λόγος απόσβεσης υλικού D, ως συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης
Figure 6. Cyclic triaxial test results and comparison with the literature: a) Normalized shear modulus reduction curve, b) Material damping curve, as a function of shear strain.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Athanasopoulos, G. A., Pelekis, P. C. (1997), "Reliability estimations of an approximate SASW method". Proceedings of the fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Hamburg, 6-12 September 1997, pp. 445-448, A. A. Balkema.
- Augello, A.J., Bray, J.D., Abrahamson, N.A., Seed, R.B. (1998), "Dynamic properties of solid waste based on back-analysis of Oll landfill". ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No.3, March, 1998.
- Elgamel, A., Lai, T., Gunturi, R., Zeghal, M. (2004), "System identification of landfill seismic response". Journal of earthquake engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 545-5666, Imperial College Press.
- Idriss, I.M., Fiegel, G., Hudson, M.B., Mundy, P.K., Herzig, R. (1995), "Seismic response of the Operating Industries landfill". Earthquake design and performance of solid waste landfills, ASCE Geotechnical Special Publication No.54, editors M.Y. Yegian, W.D. Liam Finn, pp.83-118.
- Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N., Bonaparte, R., Schmertmann, G.R. (1995), "Evaluation of MSW properties for seismic analysis". Geoenvironment 2000, ASCE Geotechnical Special Publication #46, V.2, pp. 126-141.
- Matasovic, N., Kavazanjian, E.Jr. (1998), "Cyclic characterization of Oll landfill solid waste". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, March 1998, Vol. 124, No. 3, pp. 197-210.
- Morochnik, V., Bardet, J. P., Hushmand, B. (1998), "Identification of dynamic properties of Oll landfill". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 3, March 1998.
- Zekkos, D. P. (2005), "Evaluation of static and dynamic properties of Municipal Solid-Waste". PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley. Επίσης διατίθεται στη διεύθυνση <http://www.geoengineer.org>
- Zekkos, D. P., Bray, J. D., Riemer, M., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Stokoe K.H., Rathje, E., Chickey, S., Seos, B., Lee, J. J. (2005), "A framework for developing the unit weight profile of Municipal Solid Waste". Πρακτικά Sardinia 2005, 3-7 October 2005. Επίσης διατίθεται στη διεύθυνση <http://www.geoengineer.org>

