

Εργαστηριακή Διερεύνηση της Διατμητικής Αντοχής Υλικών ΧΥΤΑ σε Μεγάλη Συσκευή Άμεσης Διάτμησης.

Laboratory Investigation of MSW Shear Strength in a Large Box Direct Shear Apparatus.

ΘΕΟΔΩΡΑΤΟΣ, Α. Ε. Πολιτικός Μηχανικός, Μεταπτυχιακός Φοιτητής, Πανεπιστήμιο Πατρών
ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. Α. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών
ΓΕΩΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, Δ. Φ. Πολιτικός Μηχανικός, Μεταπτ. Φοιτητής, Οικον. Παν. Αθηνών
ΖΕΚΚΟΣ, Δ. Π. Πολιτικός Μηχανικός, MSc, PhD, GeoSyntec Consultants, USA.
BRAY, J. D. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, University of California at Berkeley,
RIEMER, M. F. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής, University of California at Berkeley

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης που διεξήχθησαν σε συσκευή κιβωτίου μεγάλων διαστάσεων (300mm x 300mm) σε υλικό αστικών στερεών αποβλήτων προερχόμενο από το ΧΥΤΑ Tri-Cities, στο San Francisco Bay Area, ΗΠΑ. Τα αποτελέσματα αξιοποιούνται για τη διερεύνηση της εξάρτησης της διατμητικής αντοχής του υλικού από α) τα επιμέρους συστατικά των απορριμμάτων, β) τον προσανατολισμό των επιμήκων συστατικών ως προς το επίπεδο διάτμησης του δείγματος, και γ) το ειδικό βάρος του υλικού. Ακολουθεί σύγκριση με αποτελέσματα άλλων ερευνητών για διαφορετικούς ΧΥΤΑ και προτείνονται παράμετροι αντοχής για χρήση σε αναλύσεις ευστάθειας πρανών ΧΥΤΑ.

ABSTRACT : Results of shear tests in a large shear box (300mm x 300mm) direct shear apparatus are presented, on samples from the Tri-Cities Municipal Solid Waste (MSW) landfill, San Francisco Bay Area, USA. The results are utilized for investigating the effects of a) composition of solid waste, b) the orientation of fiber-like constituents with relation to the shearing plane and c) the unit weight of material on the shear strength of the MSW. The results are compared to the findings of other investigators for different landfills and mean values of strength parameters are proposed for use in stability analyses of MSW slopes.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μεγάλες ποσότητες στερεών αστικών αποβλήτων παράγονται στον Ελληνικό χώρο και παγκοσμίως. Ο συνεχώς αυξανόμενος όγκος των αστικών αποβλήτων αποτίθεται σε χώρους ορισμένους από την Πολιτεία για αυτό τον σκοπό. Οι χώροι αυτοί και στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια έχουν εξελιχθεί από χωματερές και Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ), χωρίς τεχνικές προδιαγραφές για την προστασία του περιβάλλοντος, σε οργανωμένους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) με αυστηρές πλέον προδιαγραφές χωροθέτησης, λειτουργίας και τελικής σφράγισης.

Η συνεχιζόμενη με αυξητικές τάσεις παραγωγή στερεών αστικών αποβλήτων, η δυσκολία εξεύρεσης περιοχών που να πληρούν τις προδιαγραφές χωροθέτησης ΧΥΤΑ, σε συνδυασμό με τη δυσκολία των πολιτών να αποδεχθούν τη λειτουργία ΧΥΤΑ κοντά στην κατοικία τους (αντίληψη “not-in-my-backyard”) δημιουργούν αυξανόμενες πιέσεις για την απόθεση μεγαλύτερων ποσοτήτων απορριμμάτων στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις απόθεσης απορριμμάτων, σε ορισμένες περιπτώσεις χωρίς τις απαραίτητες τεχνικές αναλύσεις.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, δεν προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί ένας σημαντικός αριθμός αστοχιών ΧΥΤΑ, όπως του Rumpke στο Ohio

των ΗΠΑ (Eid et al. , 2000), του Dona Juanna στην Κολομβία (Hendron et al.,1999), του Payatas των Φιλιππίνων (Kavazanjian and Merry, 2005), του Java της Ινδονησίας (Koelsch et al. ,2005) καθώς και της χωματερής των Άνω Λιοσίων της Αττικής το 2003. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές συνέπειες των αστοχιών αυτών ήταν ιδιαίτερα σημαντικές. Κοινό χαρακτηριστικό των αστοχιών αποτελεί το γεγονός ότι η συμβολή της μηχανικής συμπεριφοράς των αστικών στερεών αποβλήτων στις αστοχίες αυτές ήταν σημαντική και σε μεγάλο βαθμό άγνωστη. Κρίνεται επομένως αναγκαία η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των απορριμμάτων και η διερεύνηση των παραγόντων που την επηρεάζουν.

Το 2001 το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών των Ηνωμένων Πολιτειών (National Science Foundation) χρηματοδότησε ένα ερευνητικό πρόγραμμα συνεργασίας του University of California at Berkeley, του University of Texas at Austin, του Arizona State Universty και της εταιρείας GeoSyntec Consultants με σκοπό τον προσδιορισμό των δυναμικών και στατικών ιδιοτήτων των αστικών στερεών αποβλήτων. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετέχει από το 2004 και το Πανεπιστήμιο Πατρών.

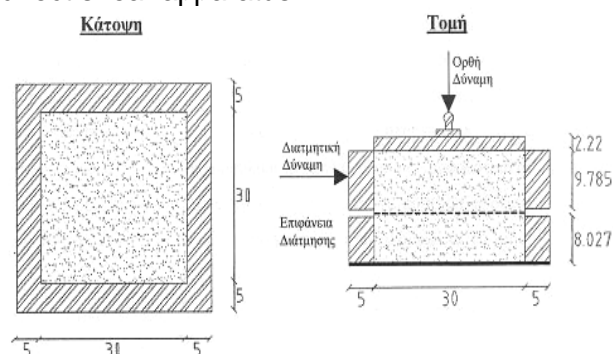
2. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η γνώση της διατμητικής αντοχής των αστικών στερεών αποβλήτων είναι απαραίτητη για τη διεξαγωγή αναλύσεων ευστάθειας των πρηνών των σύγχρονων ΧΥΤΑ. Η πλέον διαδεδομένη περιβάλλουσα αστοχίας που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διατμητικής αντοχής των στερεών αποβλήτων είναι αυτή των Kavazanjian et al. (1995). Πρόκειται για δι-γραμμική περιβάλλουσα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: Για $\sigma_n < 30$ kPa, $\phi = 0^\circ$ και $c = 24$ kPa ενώ για $\sigma_n > 30$ kPa, $\phi = 33^\circ$ και $c = 0$. Η συγκεκριμένη περιβάλλουσα είχε ως σκοπό να παρέχει μια συντηρητική εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των αστικών στερεών αποβλήτων και βασίστηκε στα πολύ περιορισμένα εργαστηριακά αποτελέσματα της περιόδου εκείνης, καθώς και σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθών πρηνών. Πιο πρόσφατα, οι Eid et al. (2000) χρησιμοποίησαν περισσότερα αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης και αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων ασταθών πρηνών προτείνοντας γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας με τιμές

παραμέτρων αντοχής $\phi = 35^\circ$ και $c = 25$ kPa. Η διατμητική αντοχή των αστικών στερεών αποβλήτων εξακολουθεί όμως να θεωρείται σε μεγάλο βαθμό άγνωστη και δύσκολο να εκτιμηθεί. Εκτεταμένη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας (Zekkos, 2005) υποδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τις παραμέτρους αντοχής. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί τιμές συνοχής από 0 έως 80 kPa και γωνίας τριβής από 0° έως 60° .



Φωτογραφία 1. Συσκευή άμεσης διάτμησης με κιβώτιο διαστάσεων 300mm x 300mm
Photo 1. Large shear box (300mm x 300mm) direct shear apparatus



Σχήμα 1. Τομή του μεγάλου κιβωτίου άμεσης διάτμησης (διαστάσεις σε cm)
Figure 1. Cross-section of large direct shear box (dimensions in cm)

3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης σε συσκευή μεγάλου κιβωτίου (300mm x 300mm) που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών (Φωτογραφία 1 και Σχήμα 1). Η συσκευή έχει τη δυνατότητα επιβολής μέγιστης διατμητικής και κατακόρυφης δύναμης ίσης με 100 kN και επιτρέπει την πραγματοποίηση δοκιμών με μέγιστο ρυθμό διάτμησης ίσο με 5

mm/min. Στην παρούσα διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε ρυθμός ίσος με 1 mm/min.

Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε υλικό αστικών στερεών αποβλήτων από το ΧΥΤΑ Tri-Cities που βρίσκεται στην περιοχή San Francisco Bay Area, στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Πληροφορίες σχετικές με τις επι-τόπου δοκιμές, τις γεωτρητικές εργασίες και τον χαρακτηρισμό των υλικών του συγκεκριμένου ΧΥΤΑ δίνονται από τον Zekkos (2005). Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στη διερεύνηση αυτή προέρχεται από βάθος 26 m περίπου, έχει ποσοστό υγρασίας 12%, ποσοστό οργανικών 15-30%, και η ηλικία του, κατά το χρόνο δειγματολήψιας, ήταν 15 έτη. Το υλικό περιλαμβάνει κυρίως εδαφοειδές υλικό μεγέθους σωματιδίων <19 mm, χαρτί και πλαστικό ινώδους μορφής με μήκος μέχρι 76 mm, καθώς και ξύλο και χάλικες διαμέτρου <38 mm (Φωτογραφία 2). Τα υλικά με διαστάσεις μεγαλύτερες των 19 mm έχουν γενικά χαμηλό ειδικό βάρος υλικού και χαρακτηρίζονται από ινώδη μορφή με εξαίρεση τους χάλικες.



Φωτογραφία 2. Δείγμα αστικών στερεών αποβλήτων που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές.

Photo 2. Tested sample of Municipal Solid-Waste

4. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΔΟΚΙΜΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τις ανάγκες του προγράμματος των εργαστηριακών δοκιμών μορφώθηκαν συνολικά 15 δοκίμια μεγάλων διαστάσεων (300 mm x 300 mm x 180 mm). Στα δοκίμια αυτά διεξήχθησαν δοκιμές άμεσης διάτμησης κάτω από τις ακόλουθες τάσεις: 2 kPa, 50 kPa, 150 kPa, 370 kPa και 700 kPa. Πέντε από τα δοκίμια παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας το κλάσμα των στερεών αποβλήτων με σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 19 mm (εδαφοειδές υλικό). Για τα υπόλοιπα 10 δοκίμια χρησιμοποιήθηκε υλικό αποβλήτων με την

ακόλουθη κατά βάρος σύσταση, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική της σύστασης του υλικού του πεδίου (Zekkos, 2005): εδαφοειδές υλικό (<19 mm) 62%, χαρτί 18%, πλαστικό 5%, ξύλο 5%, και χάλικες 10%.



Φωτογραφία 3. Σφύρα που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπύκνωση των δοκιμών στερεών αστικών αποβλήτων

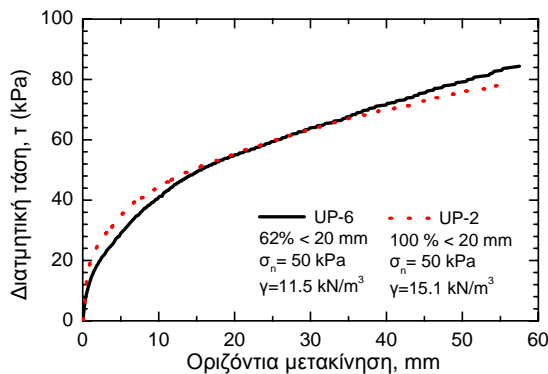
Photo 3. Drop weight used for the MSW specimen preparation

4.1 Περιγραφή Τρόπου Συμπύκνωσης

Τα εργαστηριακά δοκίμια συμπυκνώθηκαν στο εσωτερικό του κιβωτίου διάτμησης σε τρεις στρώσεις χρησιμοποιώντας την πτώση ειδικά κατασκευασμένης σφύρας βάρους 100 kN περίπου, από ύψος 0.8 m, στην επιφάνεια του υλικού, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ενέργεια συμπύκνωσης ή το επιθυμητό ειδικό βάρος δείγματος (Φωτογραφία 3).

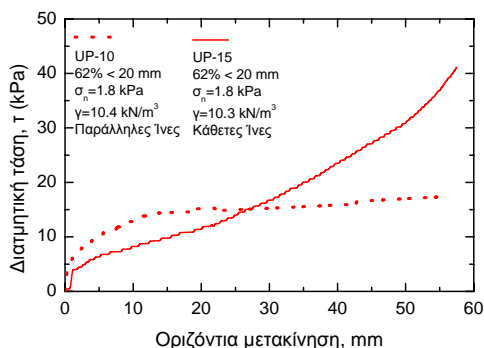
Σημειώνεται ότι το ειδικό βάρος των μεγάλου μεγέθους (και κυρίως επιμήκους ή ινώδους μορφής) συστατικών όπως το χαρτί, πλαστικό και το ξύλο είναι πολύ μικρό σε σχέση με αυτό του εδαφοειδούς κλάσματος. Επομένως, η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ινώδη συστατικά των δοκιμών που παρασκευάστηκαν με κατα βάρος ποσοστό εδαφοειδούς υλικού 62% προκύπτει ιδιαίτερα υψηλή. Παρατηρείται επίσης με βάση το σύνολο των δοκιμών, ότι για σταθερή ενέργεια συμπύκνωσης του δοκιμίου προκύπτει υλικό με μικρότερο ειδικό βάρος όταν το δοκίμιο περιλαμβάνει και συστατικά ινώδους μορφής. Η διαφοροποίηση του ειδικού βάρους του δοκιμίου εν τούτοις δεν οδηγεί σε ουσιαστική ποιοτική διαφοροποίηση της σχέσης διατμητική τάση-μετακίνηση. Ενδεικτικά η ανωτέρω συμπεριφορά φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2 στο οποίο συγκρίνονται οι καμπύλες τάσης-μετακίνησης των δοκιμών UP-2 (περιεκτικότητα σε

εδαφοειδές υλικό 100%, $\gamma=15.1 \text{ kN/m}^3$) και UP-6 (περιεκτικότητα σε εδαφοειδές υλικό 62%, $\gamma=11.5 \text{ kN/m}^3$). Η μορφή των καμπυλών του Σχήματος 2 αποτελεί τυπικό δείγμα των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας και υποδεικνύει ότι κατά το πέρας της δοκιμής (μετακίνηση $\sim 55 \text{ mm}$) το υλικό προσεγγίζει την κατάσταση αστοχίας χωρίς όμως να είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με βεβαιότητα η τιμή της μετακίνησης και τάσης αστοχίας. Για τον ανωτέρω λόγο όλες οι τιμές “διατμητικής αντοχής” που παρουσιάζονται στην παρούσα έρευνα αποτελούν στην πραγματικότητα τιμές “κινητοποιούμενης” διατμητικής αντίστασης για διατμητική μετακίνηση ίση με 55 mm (εκτός των περιπτώσεων στις οποίες η μέγιστη διατμητική αντίσταση εμφανίζεται για μετακινήσεις μικρότερες των 55 mm). Θα πρέπει να τονισθεί, επομένως, ότι όλα τα σχετικά συμπεράσματα χαρακτηρίζονται από σχετικό συντηρητισμό.



Σχήμα 2. Διάγραμμα διατμητικής τάσης – οριζόντιας μετακίνησης από δοκιμή άμεσης διάτμησης σε δοκίμια με διαφορετική περιεκτικότητα σε εδαφοειδές υλικό.

Figure 2. Shear stress vs. horizontal displacement from direct shear tests on specimens with different content of soil-like material.



Σχήμα 3. Επίδραση της σχετικής διεύθυνσης συστατικών ινώδους μορφής ως προς την επιφάνεια αστοχίας.

Figure 3. Effect of relative orientation of fibrous materials with respect to the shear surface.

4.2. Επίδραση των Συστατικών Ινώδους Μορφής

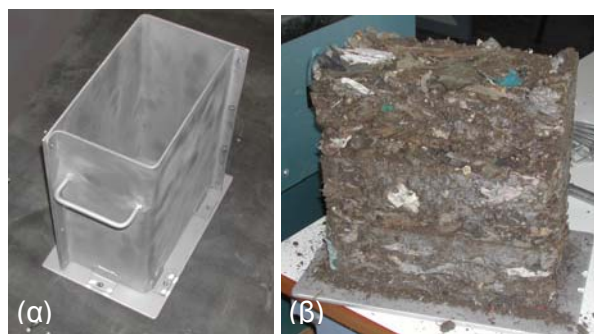
Το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας έρευνας καταστρώθηκε με τρόπο που να επιτρέπει μεταξύ άλλων και τη διερεύνηση της επίδρασης της παρουσίας συστατικών ινώδους μορφής στη διατμητική αντοχή των αστικών αποβλήτων. Για παράδειγμα, στο διάγραμμα του Σχήματος 2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα δοκιμών σε δοκίμια αμιγώς εδαφοειδούς υλικού και σε δοκίμια με ποσοστό 62% εδαφοειδούς υλικού. Από το ανωτέρω διάγραμμα συνάγεται ότι για δείγματα με την ίδια ενέργεια συμπύκνωσης κατά τη παρασκευή του δείγματος, η παρουσία των συστατικών ινώδους μορφής έχει σχεδόν αμελητέα επίδραση στην αντοχή του υλικού, φαίνεται δηλαδή να υποδεικνύει ότι τα ινώδη συστατικά δεν συμμετέχουν ουσιαστικά στο μηχανισμό ανάπτυξης των διατμητικών μετακινήσεων. Η ανωτέρω συμπεριφορά είναι δυνατόν να ερμηνευθεί χρησιμοποιώντας τη μηχανική του οπλισμένου εδάφους (Sawicki, 2000, Ling et al., 2003).

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, τα δοκίμια των στερεών αποβλήτων μορφώθηκαν στο εσωτερικό του κιβωτίου διάτμησης διαμέσου διαδικασίας συμπύκνωσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Με τον ίδιο τρόπο προετοιμάστηκαν επίσης και τα δοκίμια των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης που διεξήχθησαν από τον Zekkos (2005) στο University of California, Berkeley. Με την ανωτέρω διαδικασία συμπύκνωσης παρατηρήθηκε ότι τα ινώδους μορφής συστατικά αποκτούν οριζόντιο προσανατολισμό. Επομένως κατά την διεξαγωγή των δοκιμών διάτμησης η επιφάνεια διάτμησης είναι σχεδόν παράλληλη προς τη διεύθυνση των ινώδων συστατικών με αποτέλεσμα τα τελευταία να μη συμμετέχουν στο μηχανισμό ανάπτυξης τάσεων και μετακινήσεων. Τα παραπάνω θεωρείται σχεδόν βέβαιο ότι εκτός από την περίπτωση της παρούσας έρευνας ισχύουν και για τις περιπτώσεις των πειραματικών δοκιμών άμεσης διάτμησης άλλων ερευνητών (Landva and Clark, 1990, Edinçliler et al. 1996, Kavazanjian et al., 1999). Από τα ανωτέρω προκύπτει επίσης το συμπέρασμα ότι το υλικό των στερεών αποβλήτων το οποίο συμπυκνώνεται επί-τόπου με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές, θα πρέπει να εμφανίζει ανισοτροπία όσον αφορά τη διατμητική αντοχή

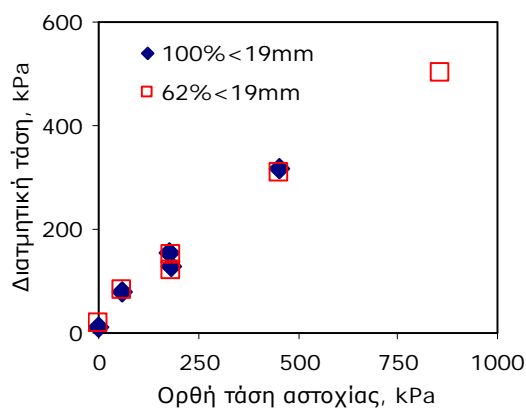
του. Συμπεραίνεται επίσης ότι η διεξαγωγή δοκιμών άμεσης διάτμησης σε δοκίμια στερεών αστικών αποβλήτων με τον τρόπο που περιγράφηκε στα προηγούμενα, παρέχει συντηρητική εκτίμηση (δηλαδή την ελάχιστη τιμή) της διατμητικής αντοχής του υλικού.

Με στόχο την πειραματική επιβεβαίωση των ανωτέρω συμπερασμάτων αποφασίστηκε να συμπεριληφθούν στο πρόγραμμα των δοκιμών της παρούσας έρευνας και δοκιμές άμεσης διάτμησης με τα ινώδους μορφής συστατικά προσανατολισμένα κάθετα στο επίπεδο διάτμησης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού ήταν αναγκαία η συμπύκνωση των αντίστοιχων δοκιμών κατά την οριζόντια διεύθυνση. Επειδή αυτό ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό του κιβωτίου διάτμησης, κατασκευάστηκε ανεξάρτητο χαλύβδινο δοχείο (μήτρα) συμπύκνωσης με διαστάσεις πυθμένα 300 mm x 180 mm και ύψος 300 mm, του οποίου τα κατακόρυφα τοιχώματα έχουν τη δυνατότητα αποσυναρμολόγησης και απομάκρυνσης από την πλάκα βάσης, (Φωτογραφία 4α). Το υλικό των στερεών αποβλήτων συμπυκνώνεται στο εσωτερικό της χαλύβδινης μήτρας, με τρόπο όμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται για τη συμπύκνωση στο εσωτερικό του κιβωτίου διάτμησης, και στη συνέχεια απομακρύνονται τα τοιχώματα της μήτρας αφήνοντας το δοκίμιο να διατηρεί το σχήμα του για αρκετό χρονικό διάστημα (Φωτογραφία 4β). Στη συνέχεια το δοκίμιο περιτυλίσσεται σε λεπτή διαφανή μεμβράνη (cling film) και μεταφέρεται στο εσωτερικό του κιβωτίου διάτμησης αφού περιστραφεί κατά 90° ως προς το επίπεδο διάτμησης. Ακολουθώντας την ανωτέρω διαδικασία μορφώθηκαν 3 δοκίμια με ποσοστό εδαφοειδούς υλικού 62% και διεξήχθησαν δοκιμές για τρεις τιμές ορθής τάσης: 2 kPa, 50 kPa, και 150 kPa. Στο διάγραμμα του Σχήματος 3 συγκρίνονται οι καμπύλες τάσης-μετακίνησης δυο δοκιμών άμεσης διάτμησης για ορθή τάση $\sigma_n=2$ kPa. Στη δοκιμή UP-10 η διεύθυνση των συστατικών ινώδους μορφής ήταν παράλληλη προς το επίπεδο ολίσθησης ενώ στη δοκιμή UP-15 η διεύθυνση αυτή ήταν κάθετη. Η διαφοροποίηση των δυο καμπύλων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Το δοκίμιο με διεύθυνση ινών κάθετη προς το επίπεδο ολίσθησης εμφανίζει ελαφρά μικρότερη διατμητική αντίσταση (σε σχέση με το δοκίμιο του παραλλήλου προσανατολισμού) για μικρές τιμές μετακίνησης, στη συνέχεια όμως η αντίσταση αυξάνεται δραματικά και αντί να προσεγγίζει συνθήκες οριακής αντοχής,

καμπυλώνεται έντονα προς τα επάνω, λόγω της κινητοποίησης της εφελκυστικής αντοχής των ινών. Για μετακίνηση 55 mm παρουσιάζει διπλάσια τιμή σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του δοκιμίου με ίνες παράλληλες προς το επίπεδο διάτμησης. Επιβεβαιώνεται επομένως το γεγονός της εξάρτησης της διατμητικής αντοχής των στερεών αστικών αποβλήτων από τη σχετική διεύθυνση της επιφάνειας διάτμησης ως προς τη διεύθυνση των ινών (ανισοτροπία υλικού).



Φωτογραφία 4. (α) Διαιρούμενη χαλύβδινη μήτρα για τη συμπύκνωση δοκιμών εκτός του κιβωτίου διάτμησης, (β) Άποψη δείγματος προετοιμασμένου εκτός κιβωτίου διάτμησης. Photo 4. (a) The split-mold used for the specimen compaction outside of the direct shear box, (b) view of specimen prepared outside the direct shear box.



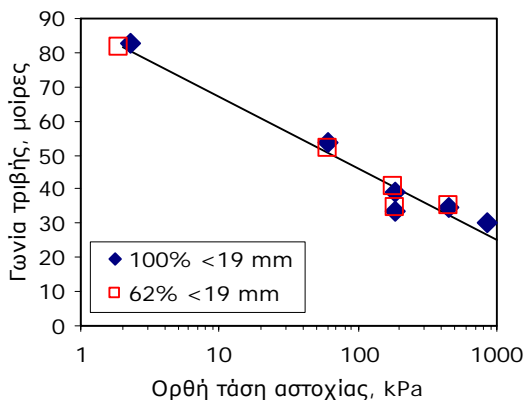
Σχήμα 4. Διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων για αστικά στερεά απόβλητα από το ΧΥΤΑ Tri-Cities.

Figure 4. Shear vs. normal stresses for MSW specimens from Tri-Cities landfill.

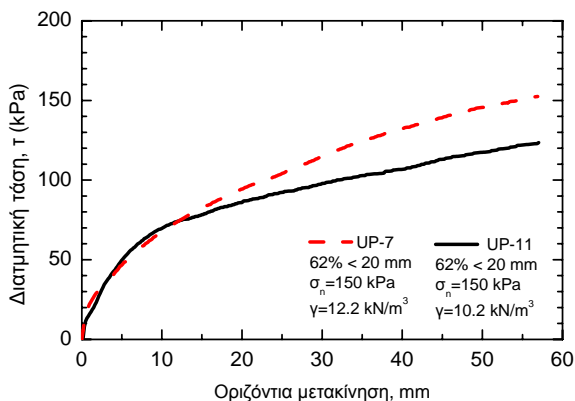
4.3 Περιβάλλουσα Αστοχίας

Τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 4 υποδεικνύουν ότι η περιβάλλουσα αστοχίας του υλικού των στερεών αστικών αποβλήτων δεν είναι γραμμική όπως γίνεται συνήθως δεκτό από άλλους ερευνητές (Kavazanjian et

al., 1995, Eid et al., 2000), αλλά παρουσιάζει ελαφρά καμπυλότητα με τα κοίλα προς την πλευρά του άξονα των ορθών τάσεων. Υπολογίζοντας τις τιμές της φαινόμενης γωνίας τριβής ϕ , ως συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n , είναι δυνατή η συσχέτιση που παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 5. Παρατηρείται ότι η τιμή της γωνίας τριβής, ϕ , μειώνεται περίπου γραμμικά με το λογάριθμο της ορθής τάσης σ_n , συμπεριφορά που παρουσιάζει ομοιότητα με αυτή των μη-συνεκτικών εδαφών (Duncan and Wright, 2005).



Σχήμα 5. Επίδραση της ορθής τάσης στη γωνία τριβής (για $c=0$).
Figure 5. Effect of normal stress on the secant friction angle (assuming $c=0$)



Σχήμα 6. Επίδραση ειδικού βάρους στην σχέση διατμητικής τάσης-οριζόντιας μετακίνησης.
Figure 6. Effect of unit weight in the shear stress vs. horizontal displacement relationship.

4.4 Επίδραση Ειδικού Βάρους

Θεωρείται εύλογο ότι το ειδικό βάρος των διαστρωμένων υλικών και η αντίστοιχη διατμητική αντοχή των στερεών αστικών αποβλήτων θα πρέπει να επηρεάζεται από την

ενέργεια συμπίκνωσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε πειραματικά στην παρούσα έρευνα. Στο διάγραμμα του Σχήματος 6 συγκρίνονται οι καμπύλες διατμητικής αντίστασης-μετακίνησης για δυο δοκίμια ίδιας σύστασης και με διαφορετικές τιμές ειδικού βάρους. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο UP-7 με ειδικό βάρος 12.2 kN/m^3 παρουσιάζει μεγαλύτερη κινητοποιούμενη διατμητική αντίσταση σε σχέση με το δοκίμιο UP-11 ειδικού βάρους 10.2 kN/m^3 .

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΚΙΒΩΤΙΟΥ

Η πρόσφατη εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση του Zekkos (2005) περιλαμβάνει αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης σε κιβώτιο μεγάλων διαστάσεων (από 300 mm x 300 mm έως 1400 mm x 1400 mm) σε υλικά στερεών αποβλήτων. Τα ανωτέρω αποτελέσματα έχουν δημοσιευθεί από 8 ερευνητικές ομάδες (Landva and Clark, 1990, Richardson and Reynolds, 1991, Houston et al., 1995, Edinçliler et al. 1996, Kavazanjian et al., 1999, Mazzucatto et al., 1999, Caicedo et al., 2002, Mahler and De Lamare Netto, 2003) και μαζί με τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης αποτελούν μια τράπεζα δεδομένων 103 δοκιμών σε υλικά προερχόμενα από ΧΥΤΑ του Καναδά, των ΗΠΑ (Mayne, Arizona, Wisconsin, California), της Ιταλίας, της Κολομβίας και της Βραζιλίας. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στο Σχήμα 7, από το οποίο προκύπτει το αξιοσημείωτο γεγονός της πολύ μικρής διασποράς των πειραματικών σημείων παρά τη μεγάλη ποικιλία των υλικών και τη γεωγραφική διασπορά των θέσεων των ΧΥΤΑ. Προσαρμογή ευθύγραμμης περιβάλλουσας στα δεδομένα του Σχήματος 7(α) οδηγεί στις τιμές $\phi=32^\circ$ και $c=26 \text{ kPa}$. Λαμβάνοντας όμως υπόψη γωνία τριβής μειούμενη με την αύξηση της ορθής τάσης (βλ. Σχήμα 5) είναι δυνατή η προσαρμογή καμπύλης περιβάλλουσας αστοχίας της μορφής:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (1)$$

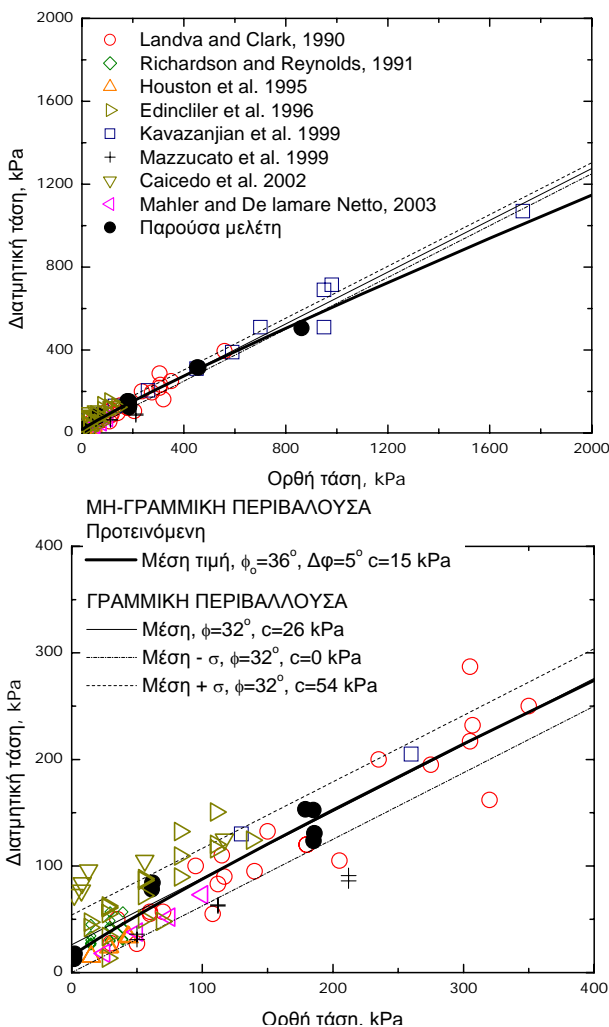
όπου: $c=15 \text{ kPa}$

$$\phi = \phi_o - \Delta\phi \cdot \log\left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right) \quad (2)$$

$\phi_o=36^\circ$ (γωνία τριβής για ορθή τάση ίση με 1 atm ή 101.3 kPa)

$\Delta\phi=5^\circ$, κλίση της ευθείας γραμμής του διαγράμματος ϕ - $\log(\sigma_n)$

Η ανωτέρω μη-γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας προτείνεται για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής του υλικού των στερεών αστικών αποβλήτων κατά το σχεδιασμό ΧΥΤΑ. Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μη-γραμμικής περιβάλλουσας, σε σχέση με προηγούμενες προτάσεις της βιβλιογραφίας είναι τα εξής: α) βασίζεται σε σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό δοκιμών μεγάλου μόνο μεγέθους δείγματος, β) περιλαμβάνει αποτελέσματα δοκιμών για μεγαλύτερες τιμές ορθής τάσης (μεγαλύτερα βάθη) και, γ) λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ορθής τάσης στη γωνία τριβής.



Σχήμα 7. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης μεγάλου δοκιμίου σε αστικά στερεά απόβλητα.

Figure 7. Large Direct shear test results on MSW.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

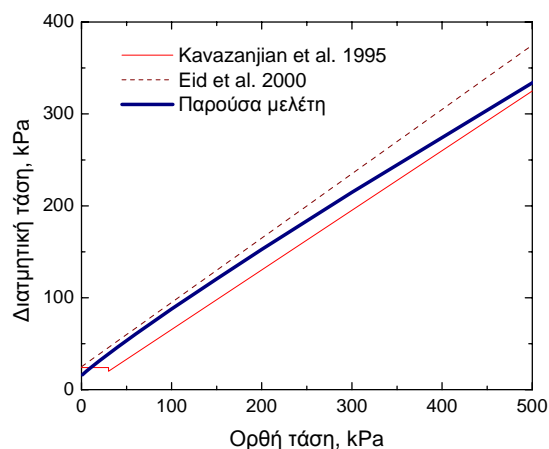
Στα πλαίσια χρηματοδοτούμενου ερευνητικού προγράμματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης μεγάλου κιβωτίου σε αστικά στερεά απόβλητα από τον ΧΥΤΑ Tri-Cities. Παρατηρήθηκε ότι στη δοκιμή άμεσης διάτμησης, η επιφάνεια διάτμησης είναι γενικά παράλληλη στη διεύθυνση των ινών με αποτέλεσμα οι ίνες να μη συνεισφέρουν στη διατμητική αντοχή του δείγματος. Πειράματα σε αστικά απορρίμματα με τη διεύθυνση των ινών κάθετη προς την επιφάνεια διάτμησης υποδεικνύουν ότι λόγω της κινητοποίησης των ινών, η σχέση τάσης-οριζόντιας μετακίνησης διαφοροποιείται και ότι η διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη από αυτή των απορριμμάτων με ίνες παράλληλες στην επιφάνεια διάτμησης. Η διατμητική αντοχή των αστικών απορριμμάτων παρουσιάζει ανισοτροπία και εξαρτάται από τη σχετική γωνία μεταξύ της επιφάνειας διάτμησης και της διεύθυνσης των ινών.

Τα αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης της παρούσας διερεύνησης συνδυάστηκαν με τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Η διατμητική αντοχή που υπολογίζεται από όλες τις δοκιμές άμεσης διάτμησης της βιβλιογραφίας αποτελεί πιθανότατα την διατμητική αντοχή του δοκιμίου κατά την πλέον δυσμενή διεύθυνση διάτμησης και κατά συνέπεια παρέχει μια χαμηλή και συντηρητική εκτίμηση της διατμητικής αντοχής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό των ΧΥΤΑ. Με αναλύσεις παλινδρόμησης, προτείνεται μια μη-γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας που χαρακτηρίζεται από συνοχή ίση με 15 kPa και γωνία τριβής 36° για ορθή τάση ίση με 1 atm (101.3 kPa) και $\Delta\phi=5^\circ$. Η προτεινόμενη περιβάλλουσα αστοχίας σε σύγκριση με προηγούμενες προτεινόμενες περιβάλλουσες αστοχίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 8. Προηγούμενες προτεινόμενες περιβάλλουσες αστοχίας βασίζονται σε σημαντικά λιγότερα πειραματικά αποτελέσματα και δε λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της ορθής τάσης στη γωνία τριβής.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες προς το National Science Foundation, USA για τη χρηματοδότηση του παρόντος ερευνητικού έργου (Grants CMS-022064/CMS-0220159/CMS-0219834). Περισσότερες πληροφορίες σχετικά

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



Σχήμα 8. Προτεινόμενη μη-γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας και σύγκριση με προηγούμενες περιβάλλουσες.

Figure 8. Recommended non-linear shear strength envelope and comparison with previous recommendations.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E. and Coronado, O. (2002a), "Geomechanical properties of municipal solid waste in Dona Juana sanitary landfill", Proceeding of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol. 1, pp. 177-182.
- Duncan, J. M., Wright, S. G. (2005), "Soil strength and slope stability", John Wiley & Sons Inc.
- Edinçliler, A. Benson, C. H., Edil, T. B. (1996), "Shear strength of municipal solid waste", Interim Report - year 1, Environmental Geotechnics Report 96-2, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin - Madison, February 16, 1996.
- Eid, H.T, Stark, T.D, Douglas, W.D. and Sherry, P.E. (2000), "Municipal Solid waste slope failure 1. Waste and foundation properties", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.126, No.5, pp.397-407.
- Hendron, D. M., Fernandez, G., Prommer, P.J., Giroud, J.P., Orozco, L. F. (1999), "Investigation of the cause of the 27 September 1997 slope failure at the Dona Juana Landfill", Proceedings of Sardinia 99.
- Houston, W.N., Houston, S.L., Liu, J.W., Elsayed, A., Sanders, C.O., (1995), "In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills", Earthquake Design and performance of solid waste landfills, ASCE Geotechnical Special Publication No.54, pp.73-82
- Kavazanjian, E. Jr., Matasovic, N., Bonaparte, R., Schmertmann, G.R. (1995), "Evaluation of MSW properties for seismic analysis", Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication No.46, pp. 1126-1141.
- Kavazanjian, E. Jr., Merry S. M. (2005), "The 10 July 2000 Payatas landfill failure", Proceedings of Sardinia 2005.
- Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C., Damanhuri, E. (2005), "Stability of landfills - The Bandung dumpsite disaster", Proceedings of Sardinia 2005.
- Landva, A.O., Clark, J. I. (1990), "Geotechnics of waste fill, Theory and practice", STP 1070, Landva and Knowles (ed.), ASTM, pp.86-103.
- Ling, H. I., Leshchinsky, D. and Tatsuoka, F., eds. (2003), "Reinforced Soil Engineering – Advances in Research and Practice", Marcel Dekker Inc., USA.
- Mahler, C. F., De Lamare Netto, A. (2003), "Shear resistance of mechanical biological pre-treated domestic urban waste", Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 6-10 October 2003.
- Mazzucato, N., Simonini, P., Colombo, S. (1999), "Analysis of block slide in a MSW landfill", Proceedings Sardinia 1999, Seventh International Waste Management and Landfill symposium, Cagliari, Italy, 4-8 October 1999.
- Richardson, G., Reynolds, D. (1991), "Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays", Proceedings of Geosynthetics '91, Vol.2, Industrial Fabrics Association International, St. Paul, MN.
- Sawicki, A. (2000), "Mechanics of reinforced soil", A. A. Balkema, Rotterdam.
- Vilar, O.M. and Carvalho, M.F. (2002), "Shear strength properties of municipal solid waste", Proceeding of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol. 1, pp. 59-64.
- 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.

