

Αριθμητική Προσομοίωση Της Απόκρισης Λεπτόκοκκης Άμμου Σε Στρεπτική Διάτμηση

The Response of a Fine Medium Sand to Monotonic Torsional Loading and its Numerical Simulation

ΤΣΟΜΩΚΟΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.
ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Β.Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Επικ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π.
ΚΟΝΤΟΕ, Σ. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ, Imperial College

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εκτιμάται η ικανότητα ενός ελαστοπλαστικού προσομοιώματος να προβλέπει τα αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου σε μία άμμο μέσης διαβάθμισης. Η σύγκριση πραγματοποιείται για διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις στερεοποίησης, πυκνότητες και συνθήκες στράγγισης. Η αριθμητική προσομοίωση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ της απόκρισης που προβλέπει το μοντέλο και της πραγματικής απόκρισης της άμμου. Παρόλα αυτά, κατά τη μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης η συσχέτιση δεν είναι ικανοποιητική.

ABSTRACT: This paper evaluates the predictive capabilities of an advanced constitutive model through comparison with experimental results of monotonic, hollow cylinder torsional shear tests on a fine-medium sand. Comparison is made at various densities, mean effective consolidation stresses and drainage conditions. The results of the numerical analysis have shown good correlation between the response predicted from the constitutive model and obtained from torsional shear under drained loading conditions. However, for torsional loading under undrained conditions correlation is poor.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η πραγματική συμπεριφορά των άμμων δεν είναι ούτε ιδανική ούτε απλή. Αντιθέτως, η άμμος συμπεριφέρεται έντονα μη-γραμμικά, καθώς η αντοχή και η ακαμψία της εξαρτώνται από το μέγεθος των τάσεων και των παραμορφώσεων. Επιπροσθέτως, η δομή των φυσικά αποτιθέμενων άμμων είναι ανισότροπη με αποτέλεσμα να αλλάζει η απόκρισή τους όταν μεταβάλλεται η διεύθυνση και ο τρόπος φόρτισης τους (Shibuya and Hight, 1987, Vaid et al., 1990, Yoshimine et al., 1999). Συνεπώς, για να προσομοιωθεί η απόκριση ενός υλικού και συγκεκριμένα της άμμου με ρεαλιστικό τρόπο είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση σύνθετων ελαστοπλαστικών προσομοιωμάτων που να μπορούν να εισαχθούν σε κώδικες

πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών σε Η/Υ, ώστε στη συνέχεια τα αποτελέσματα να εξαχθούν αριθμητικά.

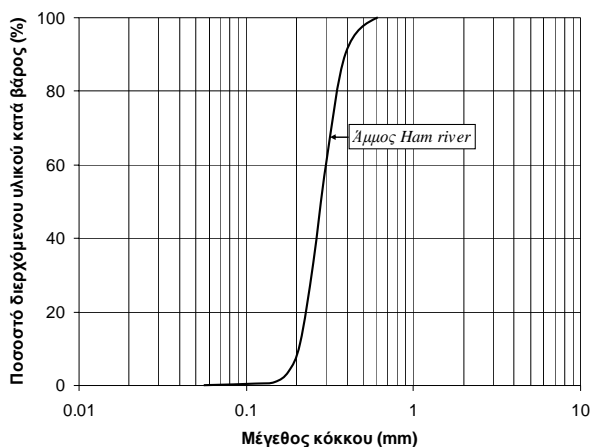
Στην παρούσα μελέτη διερευνάται η συμπεριφορά μίας άμμου μέσης διαβάθμισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου κατά την μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα προσομοιώνονται στη συνέχεια αριθμητικά με τη χρησιμοποίηση κατάλληλου ελαστοπλαστικού μοντέλου, του “Lade’s Double Hardening Model” (Lade, 1977), μέσω του υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων του Imperial College (Imperial College Finite Element Program – ICFEP). Η προσομοίωση πραγματοποιείται για διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις στερεοποίησης, πυκνότητες και συνθήκες

στράγγισης και εστιάζεται στην πρόβλεψη των διαδρομών τάσεων και των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης του εδαφικού υλικού.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

2.1 Μέθοδος Παρασκευής Δοκιμίων

Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι μία άμμος μέσης διαβάθμισης, η άμμος Ham river, η οποία είναι χαλαζιτική και αποτελείται από κόκκους υπογωνιώδεις έως γωνιώδεις με ειδικό βάρος στερεών $G_s=2.66$. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων (ή λόγος κενών) της άμμου είναι ίσος με $e_{min}=0.526$ και $e_{max}=0.860$, αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση διακρίνεται στο Σχήμα 1. Όλα τα δοκίμια της άμμου Ham river παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της “εμβάπτισης σε νερό” σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνουν οι Bishop and Henkel (1957). Η μέθοδος αυτή οδήγησε στην παρασκευή δοκιμίων μέσης πυκνότητας με δείκτη πόρων $e=0.735\pm 0.005$ ή σχετική πυκνότητα $D_r=37.4\pm 1.5\%$. Δοκίμια πυκνότερης δομής παρασκευάστηκαν με εναπόθεση της άμμου και ελαφρά χτυπήματα του εξωτερικού μεταλλικού καλουπιού.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου Ham river.

Figure 1. Grain size distribution curve for Ham river sand.

Τα κοίλα δοκίμια που εξετάστηκαν είχαν εξωτερική διάμετρο ίση με 70mm, εσωτερική διάμετρο ίση με 40mm και ύψος ίσο με 140mm. Για τον έλεγχο του βαθμού κορεσμού των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος B

του Skempton (1954) για τιμές της οποίας μεγαλύτερες από 0.97 θεωρήθηκε ότι έχει επιτευχθεί πλήρης κορεσμός. Μετά τον κορεσμό τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις, $p_i'=(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3')/3$, και ακολούθησε περίοδος ηρεμίας διάρκειας 12 ωρών πριν από τη φόρτιση.

2.2 Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Δοκιμίου

Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η συσκευή δύναται να επιβάλλει μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση με έλεγχο της επιβαλλόμενης τάσης ή της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Οι δοκιμές της παρούσας μελέτης εκτελέστηκαν διατηρώντας την ίδια πίεση μέσα (p_i) και έξω (p_o) από τα τοιχώματα του κοίλου δοκιμίου με αποτέλεσμα η γωνία α που αντιπροσωπεύει την κλίση της μέγιστης κύριας τάσης, σ_1 , ως προς την κατακόρυφο να συνδέεται με την παράμετρο b που αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , σύμφωνα με τη σχέση $b=\sin^2\alpha$. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων σύμφωνα με τις εξισώσεις που προτείνουν οι Hight et al. (1983).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Δοκιμίων.
Table 1. Specimen Characteristics.

Πείραμα	Συνθήκες στράγγισης	Δείκτης πόρων e_i	Μέση ενεργός τάση p_i' (kPa)
HRS1	U	0.729	75
HRS2	U	0.735	130
HRS3	U	0.734	215
DHRS4	U	0.649	75
DHRS5	U	0.666	130
HRS7	D	0.734	75
HRS8	D	0.732	130
HRS9	D	0.740	215

3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ HAM RIVER ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η απόκριση της άμμου Ham river κατά τη μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2(α) παρουσιάζονται οι διαδρομές ενεργών τάσεων των δοκιμίων, ενώ στα Σχήματα 2(β) και 2(γ) οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και υπερπίεσης πόρων-παραμόρφωσης αντίστοιχα. Οι δείκτες πόρων e_i των δοκιμίων μετά από τη στερεοποίηση και πριν από τη διάτμηση έλαβαν τιμές από 0.729 έως 0.735 με εξαίρεση δύο πυκνά δοκίμια. Λεπτομέρειες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων που εξετάστηκαν δίνονται στον Πίνακα 1. Τα δοκίμια όταν υποβάλλονται σε φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης εμφανίζουν καταρχήν τάση για συστολή μέχρι μία τιμή διατμητικής παραμόρφωσης (περίπου 2%) και από το σημείο αυτό και έπειτα (τα σημεία σημειώνονται με βέλη στα Σχήματα 2β και 2γ), παρουσιάζουν συνεχή τάση για διαστολή με ταυτόχρονη αύξηση της διατμητικής τους αντοχής (Σχήμα 2β). Τα σημεία αλλαγής φάσης ορίζουν τη γραμμή αλλαγής φάσης (phase transformation line - PTL, Ishihara et al., 1975) που περνάει από την αρχή των αξόνων και χαρακτηρίζεται από τη γωνία αλλαγής φάσης $\varphi'_{PTL}=30^\circ$. Στο Σχήμα 2(α) εκτός από τη γραμμή αλλαγής φάσης έχει σχεδιασθεί και η γραμμή αστοχίας των δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης που αντιστοιχεί σε γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi'=36^\circ$. Αναλυτικότερα περιγράφονται τα ανωτέρω από τους Tsomokos and Georgiannou (2005).

Στο Σχήμα 2 έχουν προστεθεί με διακεκομμένη γραμμή τα αποτελέσματα δύο δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης σε πυκνότερα δοκίμια. Η τάση για συστολή της άμμου Ham river έχει ελαττωθεί σημαντικά για $e_i=0.65$ αν και απαιτούνται ακόμα πιο πυκνά δοκίμια για να εξαλειφθεί εντελώς. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι η γραμμή αλλαγής φάσης είναι ανεξάρτητη από την πυκνότητα, τουλάχιστον για το εύρος πυκνοτήτων που εξετάζονται. Στο Σχήμα 2(α) έχουν προστεθεί, επίσης, οι διαδρομές τάσεων δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης για τις ίδιες αρχικές τιμές μέσης ενεργού τάσης με τις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλίση της γραμμής

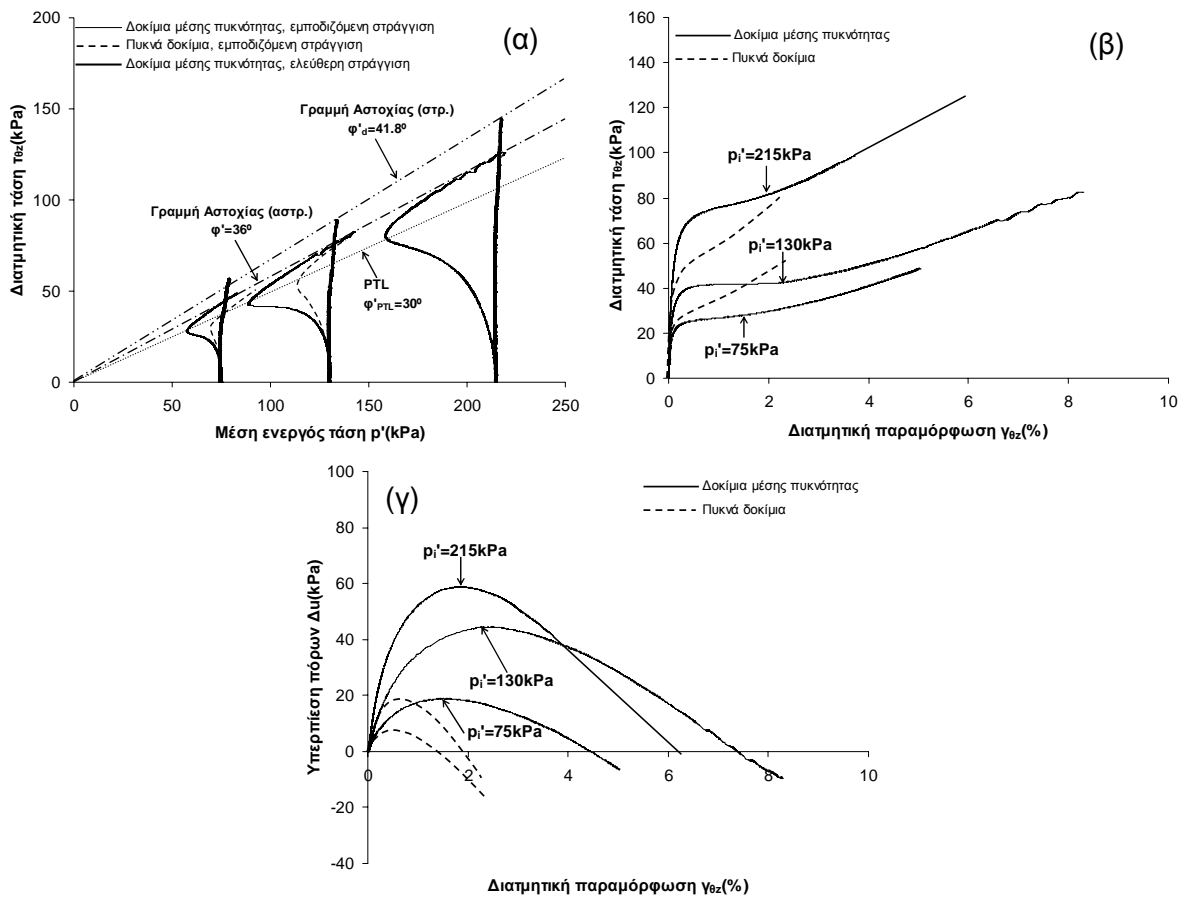
μεταβατικής φάσης ορίζεται με μοναδικό τρόπο ανεξάρτητα από τις συνθήκες στράγγισης. Αντίθετα, η γωνία διατμητικής αντοχής που προκύπτει από τις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης είναι μεγαλύτερη ($\varphi'_d=41.8^\circ$), μία διαφορά που είναι γνωστό ότι μεγαλώνει με την αύξηση της πυκνότητας. Στο Σχήμα 3(α) έχει σχεδιασθεί η ογκομετρική παραμόρφωση ε_v των δοκιμίων ως προς τη διατμητική παραμόρφωση $\gamma_{\theta z}$ και στο Σχήμα 3(β) ο λόγος των ενεργών κυρίων τάσεων ως προς τη $\gamma_{\theta z}$. Η ογκομετρική παραμόρφωση υποδηλώνει έντονα διαστολική συμπεριφορά της άμμου για τη μικρότερη ενεργό τάση, αλλά όσο η ενεργός τάση μεγαλώνει η απόκριση της άμμου αλλάζει και εμφανίζει περισσότερο συστολική συμπεριφορά. Επίσης, ο λόγος $\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$ μειώνεται αυξανόμενη της ενεργού τάσης, συμβαδίζοντας με τη γενικότερη συμπεριφορά που εμφανίζουν τα δοκίμια που υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση στην τριαξονική συσκευή υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (Lade, 1977).

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4.1 Εισαγωγή

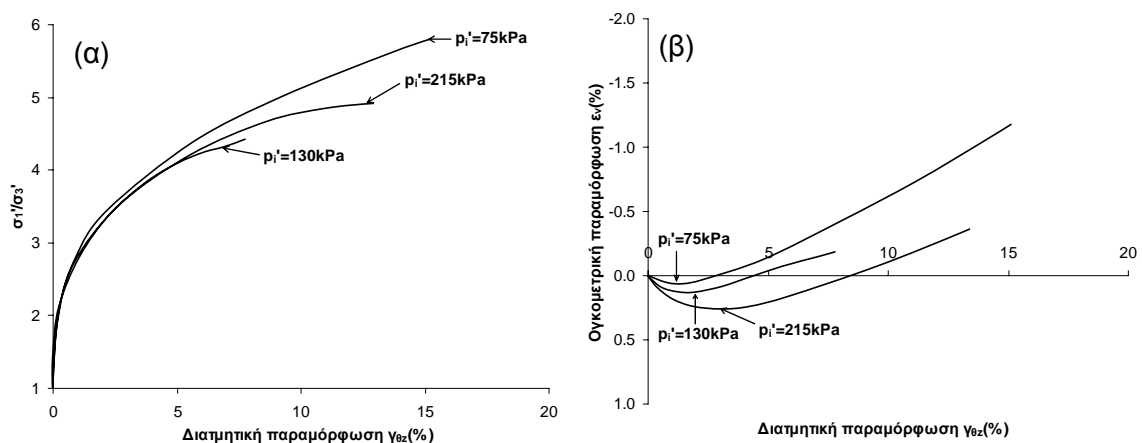
Το δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας ασχολείται με την αριθμητική προσομοίωση των αποτελεσμάτων της μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης στην άμμο Ham river με τη συνδρομή του "Lade's Double Hardening Model". Το "Lade's Double Hardening Model", Lade (1977), είναι ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο που μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά ενός κοκκώδους εδάφους και συγκεκριμένα της άμμου, όπως αυτή προκύπτει από τα εργαστηριακά πειράματα (μη-γραμμικότητα, επίδραση μέσης κύριας τάσης, ανάπτυξη πιέσεων πόρων σε δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης, πρόβλεψη παραμορφώσεων κ.λπ.). Αντιθέτως, δεν μπορεί να προβλέψει επακριβώς την εδαφική συμπεριφορά υπό ανακυκλική φόρτιση και την απόκριση ενός αρχικά ανισότροπου υλικού. Ο Lade (1977) έδειξε ότι το μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει τη συμπεριφορά της άμμου όταν αυτή υποβάλλεται σε τριαξονική φόρτιση. Πρέπει, άλλωστε, να σημειωθεί ότι η διατύπωση του μοντέλου βασίζεται σε τριαξονικές δοκιμές και όχι σε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου.

Το προσομοίωμα αποτελείται από δύο



Σχήμα 2. Στρεπτική διάτμηση δοκιμίων HRS υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (α) Διαδρομές ενεργών τάσεων (δοκίμες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης); (β) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης; (γ) υπερπίεση πόρων ως προς τη διατμητική παραμόρφωση.

Figure 2. Undrained torsional shear tests on specimens of HRS: (a) Effective stress paths (undrained and drained conditions); (b) stress-strain curves; (c) excess pore water pressure against shear strain curves.



Σχήμα 3. Στρεπτική διάτμηση δοκιμίων HRS υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης: (α) Καμπύλες λόγου τάσεων-παραμόρφωσης; (β) καμπύλες ογκομετρικής-διατμητικής παραμόρφωσης.

Figure 3. Drained torsional shear tests on specimens of HRS: (a) Stress ratio-strain curves; (b) volumetric strain-shear strain curves.

τεμνόμενες επιφάνειες διαρροής που έχουν μορφή κώνου και “καπέλου” αντίστοιχα (conical and cap yield surfaces). Οι παράμετροι που απαιτούνται για την περιγραφή της συμπεριφοράς ενός μη-συνεκτικού υλικού με βάση το “Lade’s Double Hardening Model” είναι δεκατέσσερις. Τρεις παράμετροι σχετίζονται με την ελαστική συμπεριφορά (M, λ, ν), εννέα παράμετροι περιγράφουν τις πλαστικές παραμορφώσεις “λόγω διόγκωσης” ($\eta_1, m, \rho, R, t, \alpha, \beta, P, l$) και δύο παράμετροι απαιτούνται για την περιγραφή των πλαστικών παραμορφώσεων “λόγω κατάρρευσης” (C, ρ). Στην παρούσα μελέτη το μέτρο ελαστικότητας E του Young εκφράστηκε σαν συνάρτηση της τάσης σ_3' σύμφωνα με την Εξίσωση (1):

$$E = M p_a \left[\frac{\sigma_3'}{p_a} \right]^\lambda \quad (1)$$

όπου p_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση σε μονάδες μέτρησης αντίστοιχες με το μέτρο ελαστικότητας E και την τάση σ_3' , και M, λ είναι αδιάστατες σταθερές. Πλήρης περιγραφή του μοντέλου μπορεί να αναζητηθεί στους Lade (1977) και Potts and Zdravkovic (1999).

4.2 Προσομοίωση Των Πειραμάτων

Οι αριθμητικές αναλύσεις έγιναν με το υπολογιστικό πρόγραμμα ICFEP (Imperial College Finite Element Program) που έχει αναπτυχθεί από τον καθηγητή D.M. Potts (Potts and Zdravkovic, 1999). Η εισαγωγή του προσομοιώματος του Lade στο ICFEP έγινε από τον Kovacevic (1994).

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των μονοτονικών δοκιμών ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης της παρούσας μελέτης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.

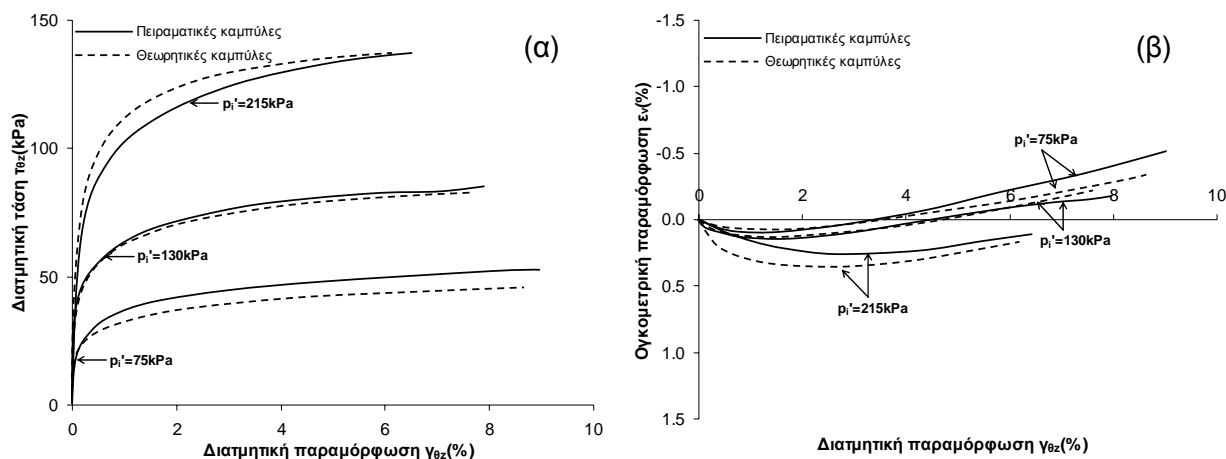
Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα τριών δοκιμών μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου Ham river (δοκίμια HRS7, HRS8 και HRS9 στον Πίνακα 1). Οι αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες που προβλέπει το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα του Lade σχεδιάζονται στο Σχήμα 4 με διακεκομμένη γραμμή και έχουν προκύψει με βάση τις τιμές των παραμέτρων της “Πρόβλεψη 1” στον Πίνακα 2. Η σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών είναι καλή, αφού το

μοντέλο προβλέπει με αρκετή μεγάλη ακρίβεια τόσο τις καμπύλες τάσης–παραμόρφωσης (Σχήμα 4α) όσο και τις αναπτυσσόμενες ογκομετρικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4β).

Πίνακας 2. Παράμετροι Προσομοιώματος.
Table 2. Model Parameters.

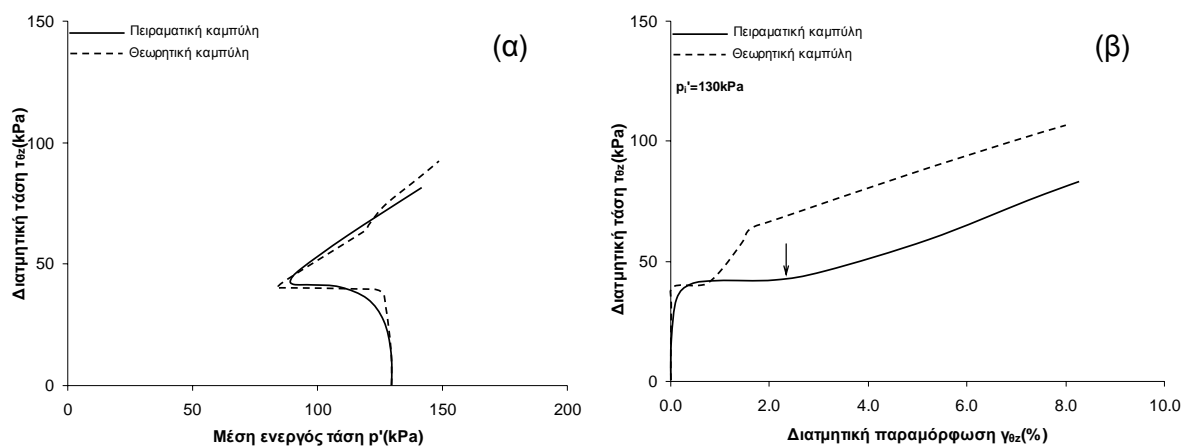
Παράμετρος	Άμμος Ham river		Παραμορφώσεις
	Πρόβλεψη 1	Πρόβλεψη 2	
Σχετική πυκνότητα, D_r (%)	37.9	60.2	
M	4648.0	5940.0	Ελαστικές
λ	0.57	0.57	
Λόγος του Poisson, ν	0.3	0.3	
η_1	20.0	25.0	Πλαστικές λόγω διόγκωσης
m	0.02	0.02	
R	-1.15	-1.15	
ρ	0.345	0.345	
t	0.5	0.5	
α	2.2	2.2	
β	0.076	0.076	
P	0.11	0.11	Πλαστικές λόγω κατάρρευσης
l	5×10^{-4}	5×10^{-4}	
C	0.8×10^{-4}	0.8×10^{-4}	
ρ	2.0	2.0	

Στα Σχήματα 5 και 6 συγκρίνεται η πραγματική και η προβλεπόμενη συμπεριφορά της άμμου HRS όταν αυτή υποβάλλεται σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5 συγκρίνονται οι πειραματικές και οι θεωρητικές καμπύλες ενός ισότροπα στερεοποιημένου, μέσης πυκνότητας δοκιμίου άμμου HRS (δοκίμιο HRS2, Πίνακας 1) και στο Σχήμα 6 οι πειραματικές και οι θεωρητικές καμπύλες δύο ισότροπα στερεοποιημένων, πυκνών δοκιμίων άμμου HRS (δοκίμια DHRS4 και DHRS5, Πίνακας 1). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5(α) που παρουσιάζει τη διαδρομή ενεργών τάσεων του δοκιμίου HRS2 η σταδιακή αύξηση της διατμητικής τάσης πριν από το σημείο μεταβατικής φάσης δεν μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς από το μοντέλο. Επιπλέον, η θεωρητική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική καμπύλη του δοκιμίου, αφού το μοντέλο προβλέπει ότι το δοκίμιο εμφανίζει



Σχήμα 4. Πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες (α) διατμητικής τάσης ως προς τη διατμητική παραμόρφωση και (β) ογκομετρικής παραμόρφωσης ως προς τη διατμητική παραμόρφωση για δοκίμια άμμου HRS υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης.

Figure 4. Experimental and predicted curves for HRS specimens under drained conditions: (a) Stress-strain curves; (b) volumetric strain-shear strain curves.



Σχήμα 5. Πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες μέσης πυκνότητας δοκιμίου HRS υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (α) Διαδρομή ενεργών τάσεων (β) διατμητική τάση ως προς τη διατμητική παραμόρφωση.

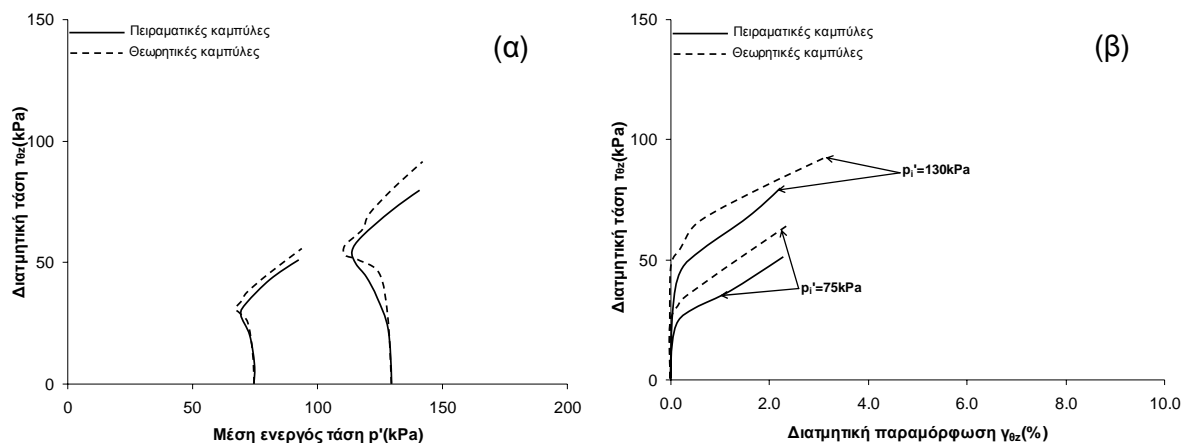
Figure 5. Experimental and predicted curves for a medium density HRS specimen under undrained conditions: (a) Stress path; (b) stress-strain curves.

διαστολική συμπεριφορά για επίπεδα διατμητικών παραμορφώσεων αρκετά μικρότερα από εκείνα που παρατηρούνται στην πραγματικότητα (βέλος στο Σχήμα 6β). Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της καμπύλης $\tau_{\theta z}$ - $\gamma_{\theta z}$ βελτιώνεται όταν η πυκνότητα των δοκιμών μεγαλώνει (“Πρόβλεψη 2” στον Πίνακα 2). Αν και το μοντέλο του Lade προβλέπει ότι τα δοκίμια εμφανίζουν διαστολική συμπεριφορά συντομότερα από ότι στην πραγματικότητα, η διατμητική τάση αυξάνεται με ρυθμό αντίστοιχο με εκείνον που παρατηρείται κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών (Σχήμα 6β). Επιπροσθέτως, οι διαδρομές ενεργών τάσεων

των δοκιμών προσομοιώνονται καλύτερα σε σχέση με τα χαλαρά δοκίμια (Σχήμα 6α).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η συμπεριφορά μίας άμμου μέσης διαβάθμισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου κατά την μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα δοκίμια της άμμου που υποβλήθηκαν σε φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης εμφάνισαν αρχικά τάση για συστολή μέχρι τη μεταβατική φάση, οπότε και παρουσίασαν



Σχήμα 6. Πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες πυκνών δοκιμίων HRS υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (α) Διαδρομές ενεργών τάσεων (β) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

Figure 6. Experimental and predicted curves for dense HRS specimens under undrained conditions: (a) Stress paths (b) stress-strain curves.

συνεχή τάση για διαστολή. Η άμμος σε κανένα σημείο δεν εμφάνισε ψαθυρή συμπεριφορά, ενώ η γραμμή μεταβατικής φάσης φάνηκε να ορίζεται με μοναδικό τρόπο ανεξάρτητα από τις συνθήκες στράγγισης.

Η αριθμητική προσομοίωση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων με το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα "Lade's Double Hardening Model" έδειξε ότι:

- Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της άμμου υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης είναι καλή.
- Εν τούτοις, η απόκριση των δοκιμίων της άμμου κατά τη μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης δεν μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς αν και η προσομοίωση βελτιώνεται με την αύξηση της πυκνότητας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διατύπωση του μοντέλου βασίζεται σε τριαξονικές δοκιμές και όχι σε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Επιπλέον, η παρατηρούμενη απόκριση των δοκιμίων επηρεάζεται από την διεύθυνση της φόρτισης, εφόσον η δομή που δημιουργείται μέσω της μεθόδου της "εμβάπτισης σε νερό" είναι ανισότροπη.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bishop, A. W. and Henkel, D. J. (1957), "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Edward Arnold, Ltd., London, p. 190.
 Hight, D. W., Gens, A. and Symes, M. J. (1983), "The Development of a New Hollow Cylinder Apparatus for Investigating the

Effects of Principal Stress Rotation in Soils", *Geotechnique*, Vol. 33, No. 4, pp. 355-383.
 Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S. (1975), "Undrained Deformation and Liquefaction of Sand Under Cyclic Stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 1, pp. 29-44.
 Kovacevic, N. (1994), "Numerical Analyses of Rockfill Dams, Cut Slopes and Road Embankments", Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.
 Lade, P. V. (1977), "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil With Curved Yield Surfaces", *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 13, pp. 1019-1035.
 Potts, D. M. and Zdravkovic, L. (1999), "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering", Thomas Telford Publishing, London, p. 440.
 Shibuya, S. and Hight, D. W. (1987), "A Bounding Surface for Granular Materials", *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 4, pp. 123-136.
 Skempton, A. W. (1954), "The Pore Pressure Coefficients A and B", *Geotechnique*, Vol. 4, pp. 143-147.
 Tsomokos, A. and Georgiannou, V. N. (2005), "Numerical Simulation of the Response of a Fine-Medium Sand to Torsional Loading", *Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Civil-Comp Press, Stirling, United Kingdom, paper 267.
 Vaid, Y. P., Chung, E. K. F. and Kuerbis, R. H. (1990), "Stress Path and Steady State",

Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, pp. 1-7.

Yoshimine, M., Ozay, R., Sezen, A. and Ansal, A. (1999), "Undrained Plane Strain Shear Tests on Saturated Sand Using a Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus", Soils and Foundations, Vol. 39, No. 2, pp. 131-136.