

# Δυναμικές Ιδιότητες Μιγμάτων Χονδρόκοκκων Εδαφών με Συνθετικά Υλικά στη μη Γραμμική Περιοχή Συμπεριφοράς

## Dynamic Properties of Mixtures of Granular Soils with Synthetic Materials in the Region of Nonlinear Behavior

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας, Α.Π.Θ.  
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ, Κ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.  
ΣΕΝΕΤΑΚΗΣ, Κ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψήφιος Διδάκτορας Α.Π.Θ.  
ΤΣΑΟΥΣΗ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Α.Π.Θ.  
ΧΑΤΖΗΓΙΑΝΝΗ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην μεταβολή του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση,  $G/G_0$ - $\gamma$ -DT, μιγμάτων χονδρόκοκκων εδαφών με συνθετικά υλικά μικρού ειδικού βάρους και υψηλής απόσβεσης. Πραγματοποιούνται στρεπτικές δοκιμές στήλης συντονισμού σε πυκνά, ξηρά και κορεσμένα δοκίμια με ποσοστά συνθετικού υλικού σε ένα εύρος τιμών από 0 έως 35% κατά βάρος μίγματος. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών προτείνονται αναλυτικές σχέσεις εκτίμησης των δυναμικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών σύμφωνα με το τροποποιημένο υπερβολικό προσομοίωμα.

**ABSTRACT :** This study examines the nonlinear dynamic curves of normalized shear modulus and damping ratio in shear versus shearing strain,  $G/G_0$ - $\log \gamma$  and DT- $\log \gamma$ , of mixtures of granular soils with synthetic materials of low specific gravity and high damping capacity. Torsional resonant column tests (RC) are performed on dense, dry and saturated specimens using percentages of synthetic materials that range between 0 and 35% by mixture weight. Based on the RC-tests results analytical relationships are proposed according to the modified hyperbolic model.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός μιγμάτων εδαφικών υλικών με συνθετικά υλικά προερχόμενα από ανακύκλωση μεταχειρισμένων ελαστικών σε κοκκοποιημένη μορφή, μπορεί να οδηγήσει σε 'γεωυλικά' με εξαιρετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (Kim and Santamarina, 2008). Επιλεκτικά αναφέρονται εφαρμογές σε επιχώματα αυτοκινητοδρόμων (Bosscher et al., 1997, Heimdahl and Druscher, 1999), ελαφρύ υλικό επίχωσης σε τοίχους αντιστήριξης (Masad et al., 1996, Lee et al., 1999, Garga and O'Shaghnessy, 2000) καθώς και σε συστήματα αποστράγγισης (Nagasaka et al., 1996). Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή των μιγμάτων εδάφους-ελαστικών είναι η χρήση τους ως παρεμβλήματος για τη σεισμική μόνωση επιφανειακών θεμελιώσεων (Tsang, 2007).

Η εφαρμογή ωστόσο τέτοιων συστημάτων ως υλικό θεμελίωσης κατασκευών δε δίνει μονοσήμαντα ευνοϊκά αποτελέσματα. Οι Senetakis et al. (2009) κατέδειξαν ότι η χρήση τέτοιων μιγμάτων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη σεισμική απόκριση υπερκείμενων κατασκευών, ωστόσο αρκετοί παράμετροι επηρεάζουν την τελική συμπεριφορά του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής. Τέτοιοι παράγοντες αποτελούν τα χαρακτηριστικά του ίδιου του μίγματος που εξαρτώνται σημαντικά από το ποσοστό ελαστικού, τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους θεμελίωσης που εκφράζονται συνήθως με τη μέση ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30m ( $V_{s,30}$ ), καθώς και τα χαρακτηριστικά της ίδιας της κατασκευής.

Η θεωρητική διερεύνηση της ευνοϊκής ή μη επιρροής μιγμάτων εδάφους-ελαστικών στην απόκριση υπερκείμενων κατασκευών, καθώς και

αντίστοιχων γεωκατασκευών, απαιτεί τη συστηματική διερεύνηση των δυναμικών ιδιοτήτων αυτών των μιγμάτων, κυρίως στη μη γραμμική περιοχή (καμπύλες  $G/G_0$ -logγ και  $DT$ -logγ). Η μέχρι σήμερα πειραματική έρευνα της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών αυτών είναι αρκετά περιορισμένη (Feng & Sutter, 2000, Senetakis et al., 2009, Anastasiadis et al., 2009).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης πυκνών μιγμάτων χονδρόκοκκων εδαφών με ανακυκλωμένα ελαστικά σε κοκκοποιημένη μορφή μέσω δοκιμών στήλης συντονισμού. Η σύνθεση των αποτελεσμάτων οδήγησε στην έκφραση των καμπυλών  $G/G_0$ -logγ και  $DT$ -logγ με βάση το τροποποιημένο υπερβολικό προσομοίωμα (Darendeli, 2001). Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε επί μέρους θέματα όπως η επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στην οριακή παραμόρφωση όγκου,  $\gamma_v^*$ , καθώς και η επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στην απόκριση της πίεσης του νερού των πόρων σε πολύ υψηλά πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης.

## 2. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

### 2.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά και παρασκευή μιγμάτων

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δύο αντιπροσωπευτικά χονδρόκοκκα εδάφη: μία λεπτόκοκκη ομοιόμορφη άμμος στρογγυλεμένων κόκκων (άμμος Αξιού 40/80), και μία καλά διαβαθμισμένη χαλικώδης άμμος γωνιωδών κόκκων. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται δύο ομοιόμορφα συνθετικά υλικά σε κοκκοποιημένη μορφή, προερχόμενα από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρίας καθώς και το ειδικό βάρος στερεών κόκκων των χρησιμοποιούμενων υλικών συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Σημειώνεται ότι τα συνθετικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία παραχωρήθηκαν από την εταιρία Ecoelastika AE.

Για την παρασκευή μιγμάτων αρχικά ζυγίστηκαν κατάλληλες ποσότητες των επί μέρους υλικών, σε στεγνή κατάσταση, ώστε να προκύψει μίγμα συγκεκριμένων αναλογιών και στη συνέχεια ακολουθεί ανάμειξη ώστε να διαμορφωθεί ομοιογενές στεγνό μίγμα. Σημειώνεται ότι η κωδική ονομασία των μιγμάτων αναφέρεται στα επί μέρους υλικά και

τα κατά βάρος ποσοστά αυτών στο μίγμα. Για παράδειγμα, μίγμα των υλικών C13D3 και R3 με ποσοστό ελαστικού 25% θα έχει κωδική ονομασία C13D3-R3-75/25.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων υλικών

Table 1. Characteristics of materials used

Υλικό	Κωδική ονομασία	$G_s$	$D_{50}$ (mm)	$C_u$
Άμμος 1	C2D03	2.67	0.27	1.58
Άμμος 2	C13D3	2.67	3.00	12.50
Ελαστικό 1	R2	1.10	1.50	1.74
Ελαστικό 2	R3	1.10	2.75	2.37

### 2.2 Πειραματικός εξοπλισμός και πρόγραμμα δοκιμών

Το σύνολο των δυναμικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε με τη συσκευή στήλης συντονισμού Long-Tor του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, Α.Π.Θ., η οποία είναι τύπου πακτωμένο-ελεύθερο άκρο. Στο άνω-ελεύθερο άκρο του δοκιμίου προσαρμόζεται η ειδική πλάκα του μηχανισμού διέγερσης (ενεργό άκρο), ενώ το κάτω-πακτωμένο άκρο του δοκιμίου βρίσκεται σε στέρεη βάση πολύ μεγάλης μάζας και αδράνειας (παθητικό άκρο).

Η στρεπτική ταλάντωση του δοκιμίου επιτυγχάνεται από ένα σύστημα δύο μαγνητών που είναι ενσωματωμένοι στην ειδική πλάκα του μηχανισμού διέγερσης και τεσσάρων πηνίων που περιβάλλουν το δοκίμιο. Η απόκριση των δοκιμών καταγράφεται από πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα στο ελεύθερο άκρο τους. Μέσω κατάλληλου ηλεκτρονικού εξοπλισμού επιβάλλεται αρμονική στρεπτική διέγερση στο δοκίμιο, ρυθμίζεται η συχνότητα έως την επίτευξη συντονισμού του συστήματος και καταγράφεται το πλάτος της αρμονικής διέγερσης, η συχνότητα συντονισμού και η απόκριση του δοκιμίου. Ο συντονισμός του συστήματος παρατηρείται όταν η διαφορά φάσης ταχύτητας δοκιμίου και αρμονικής διέγερσης είναι  $180^\circ$ .

Η εκτέλεση των δυναμικών δοκιμών και επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε σύμφωνα με την πρότυπη Αμερικανική προδιαγραφή ASTM D4015-92.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε ξηρά δοκίμια διαμέτρου 71.1 mm και ύψους 142.2 mm καθώς και σε κορεσμένα δοκίμια διαμέτρου 35.7 mm ύψους 82.2 mm. Τα δοκίμια διαμέτρου

71.1mm διαμορφώθηκαν με συμπύκνωση σε 14 στρώσεις ίσης μάζας στεγνού υλικού (15 κτύποι στις πρώτες στρώσεις και 45 κτύποι στις ανώτερες στρώσεις) με στόχο την παρασκευή πυκνών-έως πολύ πυκνών δοκιμίων. Αντίστοιχα, τα δοκίμια διαμέτρου 35.7 mm διαμορφώθηκαν σε 5 στρώσεις ίσης μάζας στεγνού υλικού (10 κτύποι στην πρώτη στρώση και 30 κτύποι στην ανώτερη στρώση).

Στον Πίνακα 2 συνοψίζεται το πρόγραμμα δοκιμών της παρούσας εργασίας σε πυκνά-ξηρά δοκίμια το οποίο περιελάμβανε δοκιμές στήλης συντονισμού με μεταβαλλόμενο πλάτος παραμόρφωσης για ποσοστά ελαστικού από 0 έως 35% κατά βάρος μίγματος και για διάφορες τιμές της μέσης ενεργής περιβάλλουσας τάσης (25, 50, 100, 200, 400 kPa).

Πίνακας 2. Πρόγραμμα δοκιμών στήλης συντονισμού σε πυκνά, ξηρά δοκίμια  
Table 2. Torsional resonant column testing program on dense, dry specimens

Δοκιμή	Κωδική ονομασία δοκιμίου	Ποσοστό ελαστικού (%)
1	C2D03	0
2	C2D03-R3-95/5	5
3	C2D03-R3-90/10	10
4	C2D03-R3-85/15	15
5	C2D03-R3-75/25	25
6	C2D03-R3-65/35	35
7	C13D3	0
8	C13D3-R3-95/5	5
9	C13D3-R3-85/15	15
10	C13D3-R3-75/25	25
11	C13D3-R3-65/35	35

Πίνακας 3. Πρόγραμμα δοκιμών στήλης συντονισμού σε πυκνά, κορεσμένα δοκίμια  
Table 3. Torsional resonant column testing program on dense, saturated specimens

Δοκιμή	Κωδική ονομασία δοκιμίου	Ποσοστό ελαστικού (%)
12	C2D03	0
13	C2D03-R2-95/5	5
14	C2D03-R2-90/10	10
15	C2D03-R2-85/15	15

Αντίστοιχα, στον Πίνακα 3 συνοψίζεται το πρόγραμμα δοκιμών συντονισμού σε πυκνά-κορεσμένα δοκίμια το οποίο περιελάμβανε δοκιμές χαμηλού πλάτους παραμόρφωσης σε τιμές της μέσης ενεργής περιβάλλουσας τάσης

25, 50, και 100 kPa, ενώ δοκιμές υψηλού πλάτους παραμόρφωσης πραγματοποιήθηκαν στο υψηλότερο επίπεδο περιβάλλουσας τάσης.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΗΛΗΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

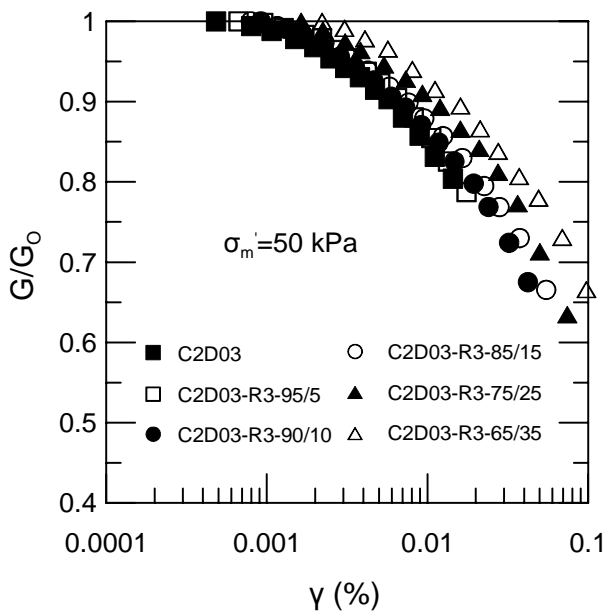
3.1 Επιρροή του περιεχόμενου ποσοστού σε ελαστικό στο μέτρο διάτμησης και στο λόγο απόσβεσης ( $G/G_0$ - $\gamma$ -DT) ξηρών δοκιμίων

Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα (σε μέση ενεργή περιβάλλουσα τάση 50 kPa) των δοκιμών στήλης συντονισμού σε ξηρά δοκίμια μιγμάτων της ομοιόμορφης άμμου (C2D03) με το συνθετικό χονδρόκοκκο ελαστικό υλικό (R3).

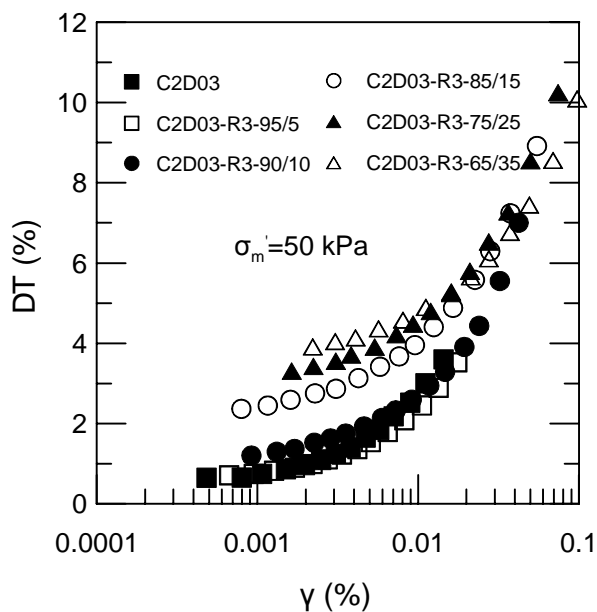
Η αύξηση του ποσοστού σε ελαστικό υλικό στο μίγμα οδηγεί γενικά σε αύξηση του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης σε σύγκριση με το αρχικό χονδρόκοκκο υλικό (Σχήμα 1) αναφορικά με το ίδιο πλάτος διατμητικής παραμόρφωσης. Η επιρροή αυτή είναι περισσότερο σημαντική για ποσοστά ελαστικού μεγαλύτερα από 15% κατά βάρος του μίγματος.

Αντίστοιχα, οι τιμές του λόγου απόσβεσης αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού σε ελαστικό στο μίγμα (Σχήμα 2), αναφορικά με μεσαία πλάτη παραμόρφωσης ( $10^{-3}\%$  έως  $10^{-2}\%$ ) ενώ σε μεγαλύτερα πλάτη παραμόρφωσης ( $10^{-2}\%$  έως  $10^{-1}\%$ ) οι τιμές συγκλίνουν.

Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι σύμφωνα με αντίστοιχα αποτελέσματα των Feng & Sutter, (2000), Anastasiadis et al. (2009) και Senetakis et al. (2009). Επιπλέον, οι Anastasiadis et al. (2009) παρατήρησαν ότι η μέση ενεργή περιβάλλουσα τάση,  $\sigma_m$ , καθώς και το πλάτος της διατμητικής παραμόρφωσης,  $\gamma$ , έχουν παρόμοια επιρροή στις καμπύλες  $G/G_0$ - $\gamma$ -DT καθαρών εδαφών και μιγμάτων εδαφών με ελαστικά. Οι καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης  $G/G_0$ - $\log\gamma$  και  $DT$ - $\log\gamma$  γίνονται πιο ομαλές με την αύξηση της  $\sigma_m$ , ενώ γενικά αύξηση του πλάτους της διατμητικής παραμόρφωσης οδηγεί σε μείωση του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και αύξηση του λόγου απόσβεσης.



Σχήμα 1. Επιρροή ποσοστού σε ελαστικό στις μη γραμμικές καμπύλες  $G/G_0$ - $\log\gamma$  στεγνών δοκιμίων  
 Figure 1. Effect of rubber percentage on the nonlinear  $G/G_0$ - $\log\gamma$  curves of the dry specimens



Σχήμα 2. Επιρροή ποσοστού σε ελαστικό στο λόγο απόσβεσης στεγνών δοκιμίων  
 Figure 2. Effect of rubber percentage on the damping ratio of the dry specimens

### 3.2 Περιγραφή καμπυλών $G/G_0$ - $\log\gamma$ ξηρών δοκιμίων, με χρήση του τροποποιημένου υπερβολικού προσομοιώματος

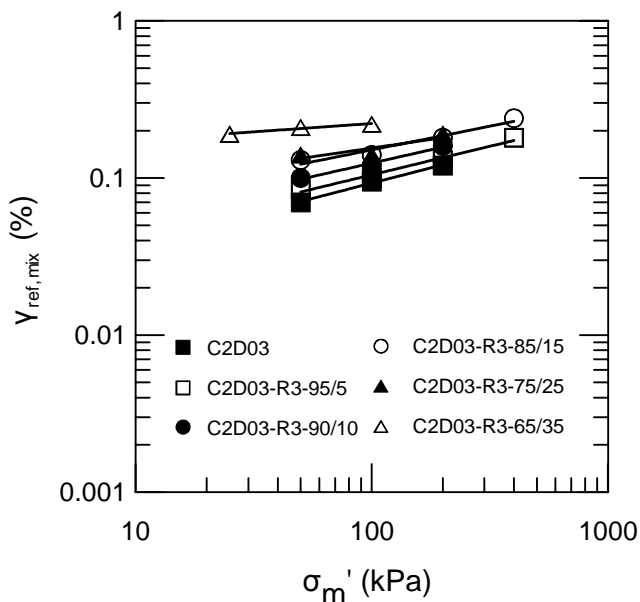
Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας όπως φαίνεται στα Σχήματα 1 και 2 αναφέρονται σε ένα εύρος παραμορφώσεων  $10^{-4}\%$  έως  $10^{-1}\%$ ,

περίπου. Για τη συστηματική μελέτη της επιρροής σημαντικών παραμέτρων των μιγμάτων που εξετάστηκαν, τη σύγκρισή τους με αντίστοιχα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας σε 'κοκκώδη' δείγματα όσο και για την εύκολη εισαγωγή των πειραματικών καμπυλών σε υπολογιστικούς κώδικες χρησιμοποιήθηκε το τροποποιημένο υπερβολικό προσομοίωμα (Darendeli, 2001) για την επέκταση και προσαρμογή των αποτελεσμάτων σε πλήρη διατηρητική παραμόρφωση έως  $\gamma=1\%$ . Το υπόψη προσομοίωμα βελτιώνει το προσομοίωμα των Hardin & Drnevich (1972) εισάγοντας την παράμετρο  $a$ , με την οποία επιτυγχάνεται η καλύτερη προσαρμογή μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών καμπυλών. Το τροποποιημένο υπερβολικό προσομοίωμα εκφράζεται αναλυτικά από την Εξίσωση 1, στην οποία  $\gamma_{ref}$  η παραμόρφωση αναφοράς που αντιστοιχεί σε τιμή  $G/G_0=0.50$ , και  $a$  ο συντελεστής καμπυλότητας που προτάθηκε από τον Darendeli (2001).

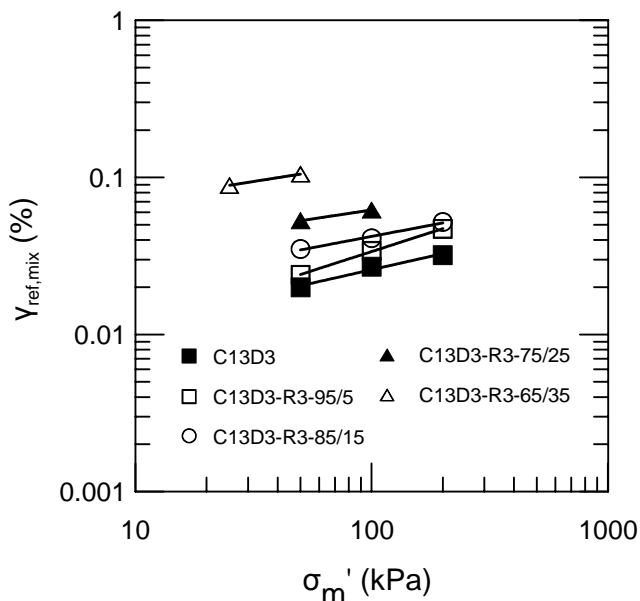
$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^a} \quad (1)$$

Στα Σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται οι τιμές της παραμόρφωσης αναφοράς,  $\gamma_{ref}$ , που εκτιμήθηκαν με προσαρμογή του προσομοιώματος στα πειραματικά αποτελέσματα σε συνάρτηση με το πλάτος της μέσης ενεργής περιβάλλουσας τάσης,  $\sigma'_m$ , των μιγμάτων της λεπτόκοκκης άμμου και της χαλικώδους άμμου, αντίστοιχα.

Η επιρροή της μέσης ενεργής περιβάλλουσας τάσης,  $\sigma'_m$ , και του ποσοστού σε ελαστικό είναι γενικά έντονη σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν. Η αύξηση του ποσοστού σε ελαστικό οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης αναφοράς, στο ίδιο πλάτος τάσης  $\sigma'_m$ . Η αύξηση της  $\sigma'_m$  οδηγεί επίσης σε αύξηση της παραμόρφωσης αναφοράς σε όλα τα δοκίμια η οποία εξαρτάται τόσο από το ποσοστό του ελαστικού όσο και από τα χαρακτηριστικά του 'φυσικού' υλικού.



Σχήμα 3. Επιρροή μέσης ενεργής περιβάλλουσας τάσης και ποσοστού σε ελαστικό στην παραμόρφωση αναφοράς των ξηρών δοκιμίων  
Figure 3. Effect of mean effective confining pressure and percentage of rubber on the reference strain of the dry specimens



Σχήμα 4. Επιρροή μέσης ενεργής περιβάλλουσας τάσης και ποσοστού σε ελαστικό στην παραμόρφωση αναφοράς των ξηρών δοκιμίων  
Figure 4. Effect of mean effective confining pressure and percentage of rubber on the reference strain of the dry specimens

Η επιρροή της τάσης  $\sigma'_m$  στις τιμές της παραμόρφωσης αναφοράς ( $\gamma_{ref}$ ) μπορεί να εκφραστεί με τη σχέση :

$$\gamma_{ref} = A_v \times (\sigma'_m)^{n_v} \quad (2)$$

όπου  $A_v$  παράμετρος που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το ποσοστό ελαστικού στο μίγμα και  $n_v$  εκθέτης που εκφράζει την επιρροή της τάσης  $\sigma'_m$  στην παραμόρφωση αναφοράς.

Η επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στις παραμέτρους  $A_v$  και  $n_v$  των μιγμάτων της παρούσας εργασίας δίδεται στα Σχήματα 5 και 6. Παρατηρείται σημαντική επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στις παραμέτρους  $A_v$  και  $n_v$  και συγκεκριμένα η παράμετρος  $A_v$  αυξάνεται ενώ ο εκθέτης  $n_v$  γενικά μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού σε ελαστικό. Η αύξηση της παραμέτρου  $A_v$  με το ποσοστό σε ελαστικό οφείλεται στην αύξηση της παραμόρφωσης αναφοράς,  $\gamma_{ref}$ , ενώ η μείωση του εκθέτη  $n_v$  εκφράζει τη μείωση της επιρροής της μέσης ενεργής περιβάλλουσας τάσης στις καμπύλες  $G/G_0 - \log \gamma$  των δοκιμίων με την αύξηση του ποσοστού σε ελαστικό.

Οι τιμές των παραμέτρων  $A_v$  και  $n_v$  προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και δίδονται στις Εξισώσεις 3, 4 και 5, 6 για τα μίγματα της λεπτόκοκκης άμμου και της χαλικώδους άμμου με το ελαστικό R3, αντίστοιχα. Στις εξισώσεις αυτές σημειώνεται ότι η παράμετρος  $pr$  (%) είναι το κατά βάρος ποσοστό ελαστικού στο μίγμα.

$$A_v = \{1.21 \times (pr)^2 - 10.64 \times (pr) + 201.23\} \times 10^{-4} \quad (3)$$

$$n_v = -0.0079 \times (pr) + 0.406 \quad (4)$$

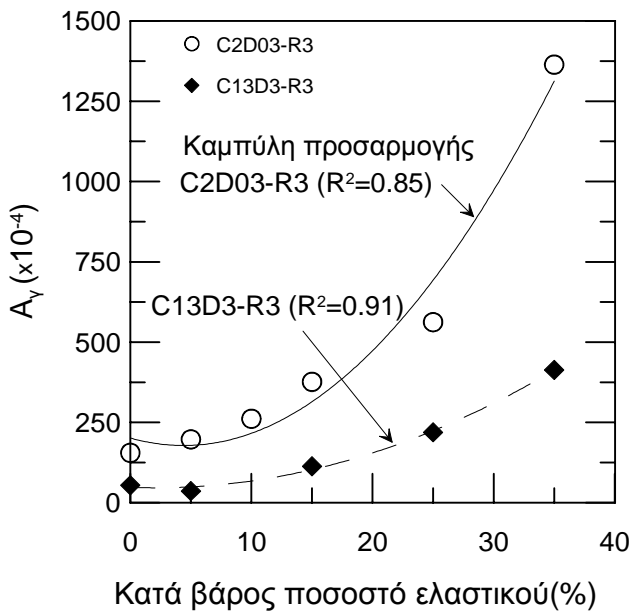
$$A_v = \{0.34 \times (pr)^2 - 1.39 \times (pr) + 47.48\} \times 10^{-4} \quad (5)$$

$$n_v = -0.0055 \times (pr) + 0.406 \quad (6)$$

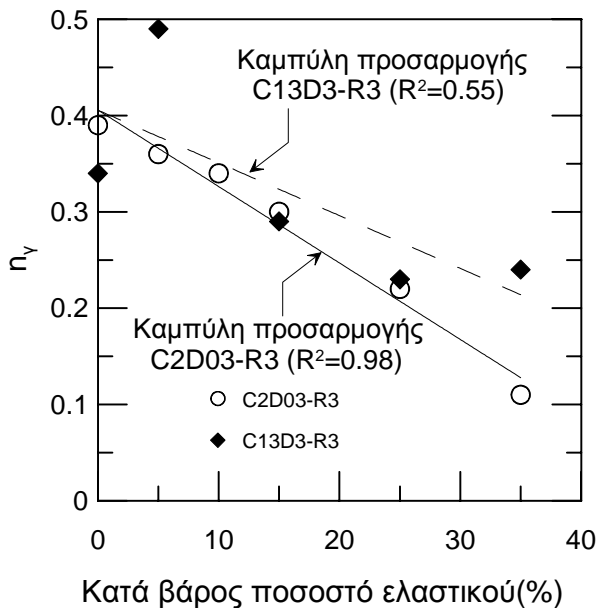
Σύμφωνα με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα η αύξηση της τάσης  $\sigma'_m$  οδηγεί σε μικρή αύξηση της παραμέτρου  $a$ , αλλά η επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό επί της παραμέτρου  $a$  δεν είναι απόλυτα ξεκάθαρη. Για το λόγο αυτό απαιτείται μία πιο συστηματική μελέτη για την αναλυτική περιγραφή της παραμέτρου  $a$  με τη διεξαγωγή επιπρόσθετων δοκιμών. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέση τιμή της παραμέτρου  $a$  (σχέσεις 7 και 8) που αντιστοιχεί στο σύνολο των δοκιμών.

Μίγματα άμμος-1 με ελαστικό:  $a = 0.88$  (7)

Μίγματα άμμος-2 με ελαστικό:  $a = 1.03$  (8)



Σχήμα 5. Επιρροή ποσοστού σε ελαστικό στην παράμετρο  $A_v$   
Figure 5. Effect of rubber percentage on the parameter  $A_v$

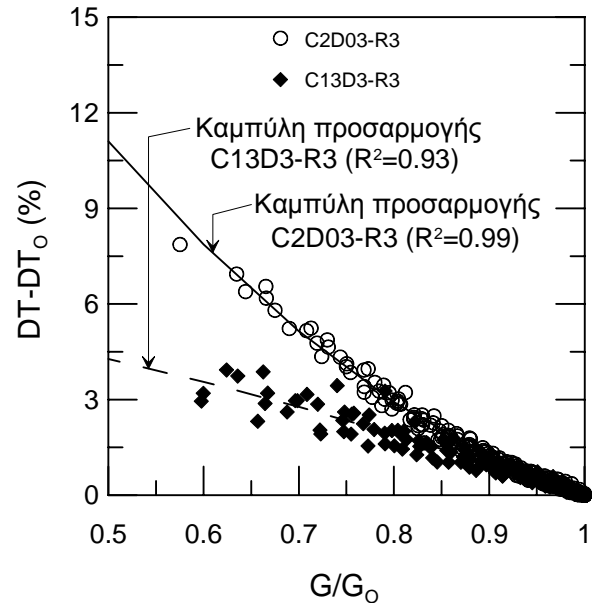


Σχήμα 6. Επιρροή ποσοστού σε ελαστικό στον εκθέτη  $n_v$   
Figure 5. Effect of rubber percentage on the exponent  $n_v$

Με χρήση των εξισώσεων 1 έως 8 οι πειραματικές καμπύλες  $G/G_0$ -log $\gamma$  της παρούσας εργασίας μπορούν να επεκταθούν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, της τάξεως του 1% ή 10%.

### 3.3 Συσχέτιση καμπυλών $G/G_0$ -log $\gamma$ και $DT$ -log $\gamma$ ξηρών δοκιμίων

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι τιμές του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης όλων των ξηρών μιγμάτων της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 7. Συσχέτιση τιμών  $DT-DT_0$  και  $G/G_0$  στεγνών δοκιμίων  
Figure 7. Relation between  $DT-DT_0$  and  $G/G_0$  values of dry specimens

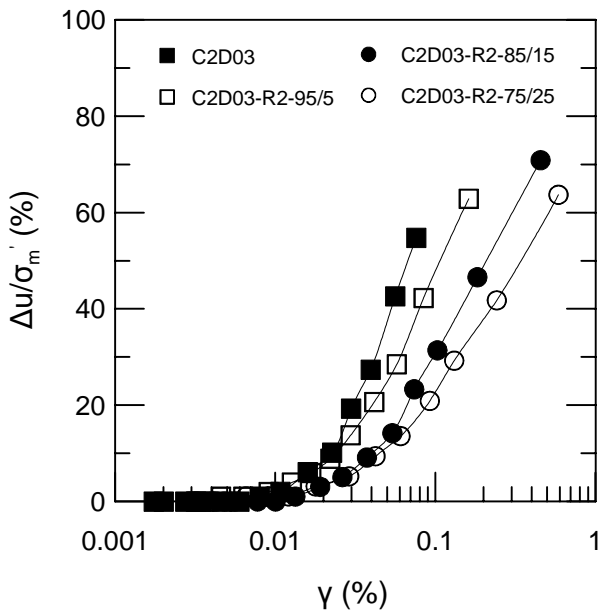
Οι τιμές του λόγου απόσβεσης έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τις αντίστοιχες τιμές στην ελαστική γραμμική περιοχή συμπεριφοράς ( $DT-DT_0$ ), με στόχο τον περιορισμό της επιρροής των τιμών της απόσβεσης  $DT_0$  που εξαρτώνται σημαντικά από το ποσοστό ελαστικού στο μίγμα. Η επιρροή των χαρακτηριστικών κοκκομετρίας του φυσικού κλάσματος στο μίγμα είναι σημαντική γεγονός το οποίο πιθανόν να οφείλεται τόσο στην διαφορετική μη γραμμική συμπεριφορά που παρουσιάζει το φυσικό υλικό (λεπτή ομοιόμορφη άμμος, καλά διαβαθμισμένο χονδρόκοκκο υλικό), όσο και στην επιρροή του λόγου του μέσου μεγέθους κόκκων ελαστικού προς το μέσο μέγεθος κόκκων εδάφους μεταξύ των μιγμάτων C2D03-R3 και C13D3-R3, για το οποίο απαιτείται ωστόσο μία πιο συστηματική διερεύνηση. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η σχέση των τιμών  $DT-DT_0$  με τις τιμές  $G/G_0$  των μιγμάτων C2D03-R3 και C13D3-R3 μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά με τις πολυωνυμικές σχέσεις των εξισώσεων 9 και 10, αντίστοιχα:

$$DT - DT_0 = 25.4 \times \left(\frac{G}{G_0}\right)^2 - 60.3 \times \left(\frac{G}{G_0}\right) + 34.9 \quad (9)$$

$$DT - DT_0 = -3.5 \times \left(\frac{G}{G_0}\right)^2 - 3.3 \times \left(\frac{G}{G_0}\right) + 6.8 \quad (10)$$

### 3.4 Επιρροή ποσοστού σε ελαστικό στις τιμές της πίεσης του νερού των πόρων κορεσμένων δοκιμίων

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η μεταβολή με το πλάτος της διατμητικής παραμόρφωσης των τιμών του λόγου της υπερπίεσης του νερού των πόρων ( $\Delta u/\sigma_m$ ) των κορεσμένων δοκιμίων, σε τάση  $\sigma_m=100$  kPa για διάφορα ποσοστά ελαστικού στο μίγμα.

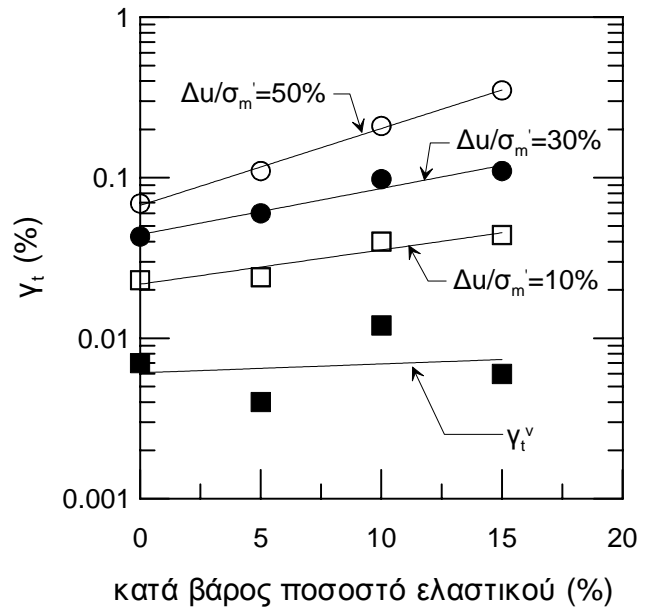


Σχήμα 8. Απόκριση πίεσης νερού πόρων κορεσμένων δοκιμίων  
Figure 8. Dynamic response of pore water pressure of saturated specimens

Διακρίνονται τρία επίπεδα διατμητικών παραμορφώσεων  $\gamma_t^v$ ,  $\gamma_{t,10}$  και  $\gamma_{t,50}$ , όπου: (α)  $\gamma_t^v$  οριακή παραμόρφωση όγκου, που αντιστοιχεί στην έναρξη αύξησης της υπερπίεσης του νερού των πόρων ( $\Delta u/\sigma_m > 0$ ) και την εισαγωγή στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς, (β) οριακές παραμορφώσεις  $\gamma_{t,10}$  και  $\gamma_{t,50}$  που αντιστοιχούν σε τιμές του λόγου  $\Delta u/\sigma_m$  10% και 50%, αντίστοιχα. Για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από την οριακή τιμή  $\gamma_{t,10}$  η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται με πολύ έντονο ρυθμό, ενώ για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από την οριακή παραμόρφωση  $\gamma_{t,50}$  τα δοκίμια οδηγούνται τελικώς σε ρευστοποίηση.

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στις τιμές των παραμορφώσεων  $\gamma_t^v$ ,  $\gamma_{t,10}$ ,  $\gamma_{t,30}$  και  $\gamma_{t,50}$ . Σημειώνεται ότι το ποσοστό σε ελαστικό δεν

επιηρεάζει σημαντικά την οριακή παραμόρφωση όγκου,  $\gamma_t^v$ , ενώ η συνεισφορά του είναι πολύ σημαντική σε μεγάλα πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης και οδηγεί σε απομείωση της υπερπίεσης του νερού των πόρων (π.χ. για 5% ελαστικό  $\gamma_{t,50}=10^{-1}\%$ , ενώ για 15% ελαστικό  $\gamma_{t,50}=3 \times 10^{-1}\%$ ).



Σχήμα 9. Οριακές παραμορφώσεις κορεσμένων δοκιμίων  
Figure 9. Threshold shearing strains of saturated specimens

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καταδεικνύουν τη σημαντική επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στην δυναμική απόκριση πυκνών δοκιμίων μιγμάτων χονδρόκοκκων εδαφών με κοκκοποιημένα ελαστικά. Γενικά, καθώς αυξάνεται το ποσοστό σε ελαστικό τα δοκίμια συμπεριφέρονται περισσότερο γραμμικά σε σύγκριση με το φυσικό υλικό. Η επέκταση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας σε υψηλότερες παραμορφώσεις για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου και του λόγου απόσβεσης γίνεται με χρήση του τροποποιημένου υπερβολικού προσομοιώματος που χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους: την παραμόρφωση αναφοράς  $\gamma_{ref}$ , που αντιστοιχεί σε  $G/G_{max}=0.5$  καθώς και τον συντελεστή καμπυλότητας,  $\alpha$ . Η αύξηση του ποσοστού σε ελαστικό στο μίγμα με χονδρόκοκκα υλικά οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης  $\gamma_{ref}$ , ωστόσο, δεν είναι απόλυτα ξεκάθαρη η επιρροή αυτή στην

παράμετρο  $\alpha$ . Η επιρροή των χαρακτηριστικών κοκκομετρίας του φυσικού κλάσματος στο μίγμα είναι σημαντική γεγονός το οποίο πιθανόν να οφείλεται τόσο στην διαφορετική μη γραμμική συμπεριφορά που παρουσιάζει το φυσικό υλικό, όσο και στην επιρροή του λόγου του μέσου μεγέθους κόκκων ελαστικού προς το μέσο μέγεθος κόκκων εδάφους.

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση κορεσμένων μιγμάτων η αύξηση του ποσοστού σε ελαστικό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση στις τιμές της υπερπίεσης του νερού των πόρων ιδιαίτερα σε μεγάλα πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM (1992), "Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant column method", ASTM Standard D854-06, American Soc. for Testing and Materials.
- Anastasiadis, A., Pitilakis, K. and Senetakis K. (2009), "Dynamic shear modulus and damping ratio curves of sand/rubber mixtures", Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference, XVIIth Int. Conf. on Soil Mechanics & Geotechnical Eng., October 2-3, Alexandria, Egypt.
- Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Kuraoka, S. (1997), "Design of highway embankments using tire chips", J. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 295-304.
- Darendeli, M.B. (2001), "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves", Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin.
- Feng, Z-Y. and Sutter, K.G. (2000), "Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 23, No. 3, pp. 338-344.
- Garga, V.K. and O'Shaughnessy V. (2000), "Tire-reinforced earth-fill. Part I: Construction of a test fill, performance and retaining wall design", Can.Geot.J., 37(1), pp:75-96.
- Heimdahl, C. and Druscher, A. (1999), "Elastic anisotropy of tire shres", J.of Geotech.and Geoenv.Eng., 125(5), pp.383-389.
- Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972), "Shear modulus and damping in soils ; design equations and curves", J. of the Soil Mech. and Foundations Div., ASCE, Vol. 98, pp. 667-692.
- Kim, H.K. and Santamarina, J.C. (2008), "Sand-rubber mixtures (large rubber chips)", Can.Geotech.J., vol.45, pp.1457-1466.
- Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, C.W. (1999), "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill", J. of Geotech. and Geoenv. Eng., Vol. 125, No. 2, pp. 132-141.
- Masad, E., Taha, R., Ho, C. and Papagiannakis, T. (1996), "Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material", Geotech. Testing J., GTJODJ, Vol.19(3), pp. 297-304.
- Nagasaka, Y., Horiuchi, S. and Higaki, K. (1996), "Status of utilization and disposal of industrial waste in Japan", Environmental geotechnics, A.Balkema, pp.839-844.
- Senetakis, K., Anastasiadis, A., Trevlopoulos, K. and Pitilakis, K. (2009), "Dynamic Response of SDOF systems on soil replaced with sand/rubber mixture", ECOMAS Thematic Conf. on Computation Methods in Structural Dynamics and Earthquake Eng. June 22-24, Rhodes, Greece.
- Tsang, H-H. (2007), "Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Published online in Wiley InterScience.