

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Π Ο Λ Υ Τ Ε Χ Ν Ι Κ Η Σ Χ Ο Λ Η

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ:
ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

*Passive Stabilization of liquefiable soils:
constitutive and numerical simulation*

Μακρή Ισαβέλλα-Μαρία



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 11847/1
Ημερ. Εισ.: 11-09-2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2013
ΜΑΚ

*<<Αν δεν φυτέψουμε το δέντρο της γνώσης όταν είμαστε νέοι,
δεν θα μας δώσει τον ίσκιο του όταν θα έχουμε γεράσει>>.*

ΦΙΛΙΠ ΣΤΑΝΧΟΠ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, που στάθηκε δίπλα μου όχι μόνο ως καθηγητής αλλά και ως άνθρωπος καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής ενθαρρύνοντας, στηρίζοντας και καθοδηγώντας με. Μεταλαμπαδεύοντάς μου τις γνώσεις του και μεταδίδοντάς μου το ζήλο του για τη δουλειά συνέβαλε όχι μόνο στο να μοιάζει το ταξίδι μου στη γνώση ευχάριστο αλλά και στην επιθυμία μου να θέτω τον πήχη στη ζωή όλο και πιο ψηλά.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου, που ήταν πάντα δίπλα μου σε όλη την πορεία μου, καθώς χωρίς εκείνη θα ήμουν ένας άλλος άνθρωπος.

Μακρή Ισαβέλλα-Μαρία

Βόλος, 01 Ιουλίου 2013

«Στους γονείς οφείλομεν το ζην, στους δε διδασκάλους το ευ ζην».

Μέγας Αλέξανδρος, 356-323 π.Χ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μία νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών έναντι σεισμικής ρευστοποίησης, είναι η **παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization)**, κατά την οποία ένας σταθεροποιητής (stabilizer) εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος. Η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης του εδάφους βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο διεθνώς. Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο ενός μεγάλου ερευνητικού προγράμματος που βρίσκεται σε εξέλιξη στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Π.Θ.) την περίοδο αυτή, και στοχεύει στο να καταστεί η παθητική σταθεροποίηση μια πρακτικώς εφαρμόσιμη τεχνική βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κolloειδούς οξειδίου του πυριτίου (colloidal silica) Ludox SM, που επιλέγεται ως βέλτιστος σταθεροποιητής προς χρήση στην παθητική σταθεροποίηση. Επιπλέον, γίνεται περιληπτική αναφορά στη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων άμμων σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις, όπως προκύπτει από αποσπασματικά έως τώρα πειράματα στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στη συνέχεια επιδιώκεται η προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων άμμων με ευφυή χρήση υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος (NTUA-SAND, των Andrianopoulos et al. 2010). Η βασική υπόθεση εργασίας είναι ότι η συμπεριφορά μιας άμμου σταθεροποιημένης με κolloειδές οξείδιο του πυριτίου (colloidal silica) αντιστοιχεί στη συμπεριφορά της ίδιας φυσικής άμμου αλλά με σαφώς μεγαλύτερη σχετική πυκνότητα. Η θεώρηση αυτή ενσωματώνεται στην καταστατική προσομοίωση μέσω μιας ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας D_r , ή ισοδύναμα μιας ψευδο-μείωσης του δείκτη πόρων, χωρίς να χρειάζεται αλλαγή στις σταθερές του προσομοιώματος NTUA-SAND.

Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων σε σταθεροποιημένες άμμους με καταστατικές προσομοιώσεις όπου η επίδραση της σταθεροποίησης εισάγεται ως μια ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας υποδεικνύει ότι:

- Για μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις ($\gamma_c < 10^{-5}$), η επίδραση της σταθεροποίησης στην τιμή του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_{max} είναι μικρή (της τάξης του 25%, με αρκετή διασπορά), και η ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας που μπορεί να την αποδώσει καταστατικά θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα μικρή (σαφώς μικρότερη από +20% στην τιμή της D_r).
- Για μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις ($10^{-5} \leq \gamma_c < 10^{-3}$), δεν υπάρχει ουσιώδης επίδραση της σταθεροποίησης στις καμπύλες απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης G/G_{max} και αύξησης της υστερητικής

απόσβεσης ξ με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c . Στην περίπτωση αυτή, οι καταστατικές προσομοιώσεις για τις καμπύλες $G/G_{max}-\gamma_c$ και $\xi-\gamma_c$ δεν υποδεικνύουν επίδραση της ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας σε αυτές, και συνεπώς είναι ακριβείς

- Για μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις ($\gamma_c > 10^{-3}$), η επίδραση της σταθεροποίησης οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση, η οποία ποσοτικοποιείται αδρά ως αύξηση του ανακυκλικού λόγου τάσεων CSR μέχρι και 0.2 για τον ίδιο αριθμό κύκλων δοκιμών. Οι καταστατικές προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι η επίδραση αύξησης της σχετικής πυκνότητας οδηγεί σε σαφώς μικρότερη προσαύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους ΔCSR) συγκριτικά με πειραματικά αποτελέσματα σε φυσικές άμμους. Συνεπώς, προσομοίωση της αύξησης του CSR μέχρι και 0.2 με χρήση του NTUA-SAND χρειάζεται αντίστοιχα μεγάλη ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας ΔDr (έως και +60%).

Τέλος, διερευνάται η δυνατότητα αριθμητικής προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ενός εδάφους που έχει σταθεροποιηθεί. Για το σκοπό αυτό επελέγη ένα δυναμικό πείραμα σε φυγοκεντριστή (Gallagher et al. 2007) που αφορά στη 1Δ δυναμική απόκριση οριζόντιας ομοιόμορφης εδαφικής στρώσης άμμου Nevada ($Dr = 40\%$) πάχους 10m που έχει σταθεροποιηθεί με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου και υποβάλλεται σε 20 κύκλους ημιτονοειδούς φόρτισης, συχνότητας 2Hz με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης 0.2g. Η προσομοίωση έγινε με το NTUA-SAND και με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC, και υπέδειξε ότι:

- Η σταθεροποίηση αποτρέπει τη σεισμική ρευστοποίηση, και μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση της ταλάντωσης συγκριτικά με τη βάση της εδαφικής στρώσης και εν γένει μικρές καθιζήσεις.
- Η προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας είναι ποιοτικώς ορθή, και σε επίπεδο προβλήματος συνοριακών τιμών. Παρόλα αυτά, μια προσαύξηση $\Delta Dr = 40\%$ αποδεικνύεται ποσοτικά ανεπαρκής (π.χ. δεν προσομοιώνεται η ενίσχυση της ταλάντωσης στην επιφάνεια).
- Εναλλακτικά, η προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της διαπερατότητας, αν και θεωρητικώς λανθασμένη (καθώς η διαπερατότητα πρακτικώς μηδενίζεται) είναι ποιοτικώς ορθή. Βέβαια, ακόμη και μια προσαύξηση της διαπερατότητας κατά 1000 φορές αποδεικνύεται ποσοτικά ανεπαρκής (π.χ. δεν προσομοιώνεται η ενίσχυση της ταλάντωσης στην επιφάνεια). Από την άλλη, μια τόσο μεγάλη προσαύξηση της διαπερατότητας μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές καθιζήσεις, ένα πρόβλημα που πρέπει να είναι γνωστό στο χρήστη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Αντικείμενο	7
1.2 Παθητική σταθεροποίηση και Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.....	9
1.3 Σκοπός και διάρθρωση εργασίας.....	10
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΜΜΟΥ.....	11
2.1 Χαρακτηριστικά κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου.....	12
2.2 Σταθεροποιημένη άμμος σε μικρές παραμορφώσεις	15
2.2.1 Μετρήσεις Vs σε δοκιμές φυγοκεντριστή.....	16
2.2.2 Μετρήσεις ταχύτητας κυμάτων παλμών.....	16
2.2.3 Μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.....	17
2.2.4 Μετρήσεις σε δοκιμές στήλης συντονισμού.....	19
2.3 Σταθεροποιημένη άμμος σε μέτριες παραμορφώσεις	20
2.4 Σταθεροποιημένη άμμος σε μεγάλες παραμορφώσεις.....	22
3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	23
3.1 Γενικά.....	23
3.2 Βασικές αρχές επιλεγέντος καταστατικού προσομοιώματος.....	23

3.3	Προσομοίωση σταθεροποιημένης άμμου σε μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις.....	26
3.4	Προσομοίωση σταθεροποιημένης άμμου σε μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις.....	27
3.5	Προσομοίωση σταθεροποιημένης άμμου σε μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις.....	34
3.5.1	Ορισμός ρευστοποίησης.....	34
3.5.2	Προσομοιώσεις ανακυκλικής φόρτισης μέχρι ρευστοποίησης.....	35
3.5.3	Πειραματικά αποτελέσματα διεθνούς βιβλιογραφίας.....	41
4.	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.....	47
4.1	Πείραμα δυναμικής φόρτισης σταθεροποιημένου εδάφους σε φυγοκεντριστή.....	47
4.2	Προσομοίωση επίδρασης σταθεροποίησης, μέσω ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας του εδάφους.....	48
4.3	Προσομοίωση επίδρασης σταθεροποίησης, μέσω ψευδο-αύξησης της διαπερατότητας του εδάφους.....	57
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	63
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	82
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Μία από τις σημαντικότερες αιτίες δομικής αστοχίας κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων είναι η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (αμμοχάλικες, άμμοι, μίγματα αμμοϊλύων, μη πλαστικές υλίες). Δεδομένου ότι η κατασκευή νέων έργων καθώς και η συνέχιση λειτουργίας υφιστάμενων έργων σε καθεστώς ρευστοποίησης δεν επιτρέπεται από τους κανονισμούς, η αποτροπή της ρευστοποίησης μέσω βελτίωσης του εδάφους πριν ή και μετά την κατασκευή αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή.

Η αποτροπή της ρευστοποίησης σε θέσεις νέων κατασκευών δεν παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα. Οι μεθοδολογίες, που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την περίπτωση είναι ευρέως διαδεδομένες και στηρίζονται:

- i) στη συμπύκνωση (π.χ. βαθιά δονητική συμπύκνωση, δυναμική συμπύκνωση)
- ii) τη σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) ή
- iii) την αποτόνωση των σεισμικών υπερπίεσεων πόρων (π.χ. χαλικο-στραγγιστήρια).

Αντίθετα, η αποτροπή ρευστοποίησης σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών δεν είναι τόσο ευχερής, δεδομένου ότι η χρήση των ανωτέρω μεθοδολογιών είναι από δυσχερής έως αδύνατη, είτε λόγω χρήσης (π.χ. η κανονική λειτουργία ενός νοσοκομείου παρεμποδίζεται σε περίπτωση πραγματοποίησης εργασιών βελτίωσης), είτε λόγω των ζημιών που μπορούν να προκληθούν από τη χρήση δονητικών ή δυναμικών μεθόδων βελτίωσης, είτε λόγω έλλειψης χώρου (π.χ. συχνεχής αστικής δόμησης). Συνεπώς, στις θέσεις υφιστάμενων κατασκευών, οι κυριότερες μεθοδολογίες βελτίωσης έναντι σεισμικής ρευστοποίησης είναι :

- i) η τοποθέτηση μικροπασσάλων (underpinning),
- ii) η εισπίεση ενεμάτων (grouting) υψηλού ιξώδους μέσω γειτονικών γεωτρήσεων και
- iii) η έμπηξη στραγγιστηρίων διακορευμένων πλαστικών σωλήνων (perforated drains)

Όμως, λόγω της ύπαρξης της υφιστάμενης κατασκευής, οι υπάρχουσες αυτές μεθοδολογίες όχι μόνο δεν είναι σε θέση να βελτιώσουν το έδαφος σε ολόκληρη την κάτοψή του, αλλά συχνά δημιουργούν και προβλήματα (π.χ. η εισπίεση ενεμάτων μπορεί να οδηγήσει σε ανασήκωμα θεμελίων). Επιπλέον, για μεγάλες επιφάνειες, το κόστος είναι πολύ υψηλό.

Μία νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών έναντι ρευστοποίησης, είναι η **παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization)**, κατά την οποία ένας σταθεροποιητής (stabilizer) εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της περιοχής μιας υφιστάμενης κατασκευής.

Ο σταθεροποιητής έχοντας αρχικώς χαμηλό ιξώδες εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης. Όταν ο σταθεροποιητής φθάνει στην επιθυμητή θέση αυξάνει (σε ελεγχόμενο χρόνο) το ιξώδες του ραγδαία δημιουργώντας ένα νέο γεωϋλικό (σταθεροποιημένο μη-συνεκτικό έδαφος) στη θεμελίωση του κτηρίου. Αυτή η διαδικασία αλλάζει τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού – υγρού πόρων, καθιστώντας το λιγότερο ευάλωτο σε ανάπτυξη σημαντικών ανακυκλικών παραμορφώσεων.

Η διήθηση αυτή μπορεί να γίνει:

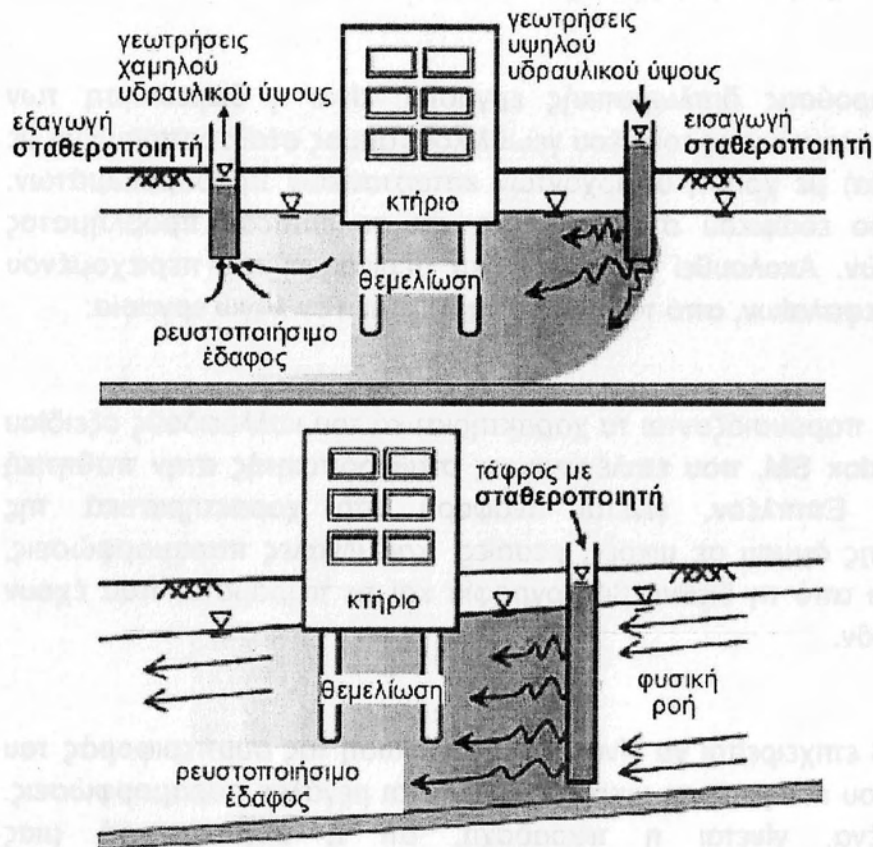
(Α) Με μεταβολή της φυσικής ροής μέσω της χρήσης γεωτρήσεων υψηλού και χαμηλού υδραυλικού ύψους εκατέρωθεν της κατασκευής ή

(Β) Μετά από διάνοιξη φρέατος μέσω της φυσικής ροής του υγρού των πόρων (βλέπε Σχήμα 1.1)

Σημειώνεται, πως η τεχνική αυτή δεν επιδρά αρνητικά στη θεμελίωση, δεδομένου ότι επιδρά στο υγρό των πόρων και αφήνει ανεπηρέαστο το δείκτη πόρων του εδάφους και συνεπώς τον εδαφικό σκελετό. Άλλα πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας αυτής είναι:

- i) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη βελτίωση του εδάφους σε μικρά βάθη και γύρω από αστικές υποδομές, όπως αγωγοί, δίκτυα κάτω από οδοστρώματα.
- ii) Το κόστος της διαδικασίας βελτίωσης αναμένεται χαμηλό και συγκρίσιμο με την εισπίεση οποιουδήποτε χημικού ενέματος (chemical grouting), αλλά με τη διαφορά ότι
- iii) δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης εξειδικευμένου εξοπλισμού ή προσωπικού.

Επισημαίνεται ότι η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών παραμένει σε ερευνητικό επίπεδο διεθνώς. Πρωτοεμφανίστηκε ως ιδέα στη διεθνή βιβλιογραφία στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας (Gallagher 2000) και βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο εξέλιξης παγκοσμίως. Παρόλα αυτά διαφαίνεται ότι έχει σημαντικά προτερήματα, και αν καταστεί στο μέλλον πρακτικώς εφαρμόσιμη θα αποτελέσει ισχυρό εργαλείο για την απομείωση του σεισμικού κινδύνου κατοικημένων περιοχών της χώρας μας, αλλά και διεθνώς.



Σχήμα 1.1 Εκτέλεση παθητικής σταθεροποίησης α) με χρήση γεωτρήσεων υψηλού και χαμηλού υδραυλικού ύψους, β) με χρήση της φυσικής ροής (βασισμένο σε σχήματα των Pamuk et al 2008)

1.2 Παθητική σταθεροποίηση και Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Την περίοδο αυτή βρίσκεται σε εξέλιξη στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Π.Θ.) ένα μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα, που στοχεύει στο να καταστεί πρακτικώς εφαρμόσιμη η παθητική σταθεροποίηση εδαφών θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών. Εκπονείται από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σε συνεργασία με άλλα ΑΕΙ της χώρας (ακρωνύμιο NANO-LIQ, στο πλαίσιο του προγράμματος ΘΑΛΗΣ). Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο αυτής της ερευνητικής προσπάθειας. Σημειώνεται, ότι ήδη στο Π.Θ. έχει εκπονηθεί στο παρελθόν (Οκτώβριος 2012) μία διπλωματική εργασία στο πλαίσιο του ίδιου προγράμματος με τίτλο «Παθητική Σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών: Βιβλιογραφική έρευνα και καταστατική προσομοίωση» από τους Βελαλή Κωνσταντίνο και Παπαγιαννάκη Παναγιώτη, και η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια αυτής.

1.3 Σκοπός και διάρθρωση εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων προσομοίωσης του νέου γεωϋλικού (άμμος σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία) με χρήση υπαρχόντων καταστατικών προσομοιωμάτων, τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου όσο και σε επίπεδο προβλήματος συνοριακών τιμών. Ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή του περιεχομένου των διαφόρων Κεφαλαίων, από τα οποία απαρτίζεται η εν λόγω εργασία:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου Ludox SM, που επιλέγεται ως σταθεροποιητής στην παθητική σταθεροποίηση. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της σταθεροποιημένης άμμου σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις, όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία και τα πειράματα, που έχουν γίνει στο παρελθόν.

Στο **Κεφάλαιο 3** επιχειρείται να γίνει η προσομοίωση της συμπεριφοράς του σταθεροποιημένου εδάφους σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή, ότι η συμπεριφορά μιας σταθεροποιημένης άμμου με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου αντιστοιχεί σε μία «ψευδο»-αύξηση της σχετικής πυκνότητας του φυσικού εδάφους. Η προσομοίωση γίνεται με τη βοήθεια του καταστατικού προσομοιώματος ntua-sand και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στο εν λόγω κεφάλαιο αλλά και στο Παράρτημα Ι.

Στο **Κεφάλαιο 4** επιδιώκεται να γίνει η αξιολόγηση του μοντέλου ntua-sand όσον αφορά στην προσομοίωση της συμπεριφοράς μίας πραγματικής εδαφικής στρώσης βάθους 10m, όταν αυτή υποβληθεί σε ανακυκλική φόρτιση και όχι ενός απλού εδαφικού δοκιμίου, όπως έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, που προέκυψαν από την εν λόγω διπλωματική εργασία.

Τέλος, στο **Παράρτημα** παρατίθενται όλα τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΜΜΟΥ

Βασικά χαρακτηριστικά σταθεροποιητή, όπως απορρέουν από την ανάλυση της ανωτέρω τεχνικής σταθεροποίησης:

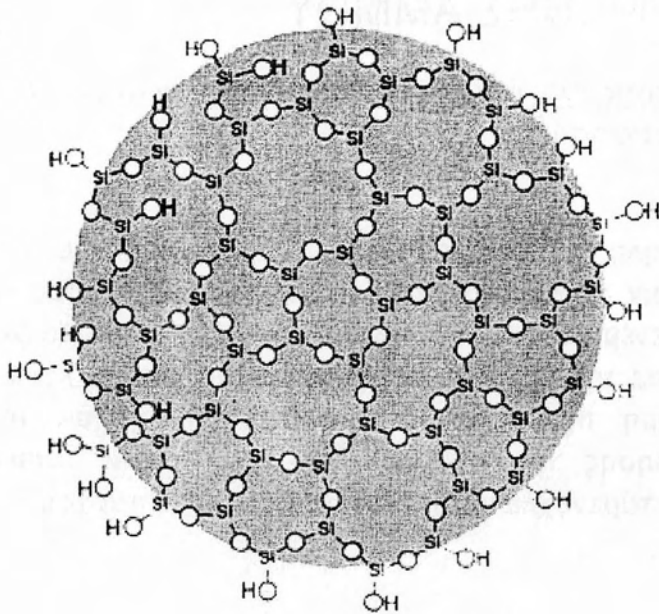
- i) Θα πρέπει να έχει χαμηλή τιμή αρχικού ιξώδους, η οποία θα αυξάνει όταν αυτός φθάσει στην επιθυμητή θέση (αυτή είναι και η βασική διαφορά με τα συνήθη ενέματα, τα οποία έχουν αρχικώς υψηλό ιξώδες και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πασσάλων ενέματος, και δε διηθούνται σε ολόκληρη την περιοχή). Συνεπώς, με χρήση της παθητικής σταθεροποίησης η βελτίωση δεν έχει πλέον τοπικό χαρακτήρα, ενώ δεν παρενοχλείται η λειτουργία της υπάρχουσας κατασκευής.
- ii) Να έχει διάρκεια ζωής.
- iii) Να είναι μη τοξικός.
- iv) Επαρκώς φτηνός.

Βάσει αυτών των χαρακτηριστικών, ως πιθανοί κατάλληλοι σταθεροποιητές κρίνονται οι ακόλουθοι:

- i) το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου (colloidal silica), σταθεροποιητής ο οποίος ερευνήθηκε αναλυτικά στην παρούσα εργασία,
- ii) αργιλικά πλακίδια νανοειδών διαστάσεων (nano-clay particles),
- iii) χημικά ενέματα (chemical grouts) και
- iv) ο αδρανής σίδηρος (zero-valent iron).

Σύμφωνα με την Gallagher (2000), μια σειρά από χημικά ενέματα αποκλείονται για διαφορετικούς λόγους. π.χ. το πυριτικό νάτριο (sodium silicate) επειδή αλλάζει ιξώδες γρήγορα, το ακριλαμίδιο (acrylamide) επειδή είναι τοξικό αλλά και ακριβό. Επιπλέον, ο αδρανής σίδηρος αποκλείεται επειδή είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε οξείδωση, και συνεπώς υπάρχει θέμα διάρκειας ζωής της βελτίωσης. Συνεπώς, ακόμη δεν έχει διερευνηθεί πλήρως ποιος σταθεροποιητής μπορεί να θεωρηθεί ως βέλτιστος.

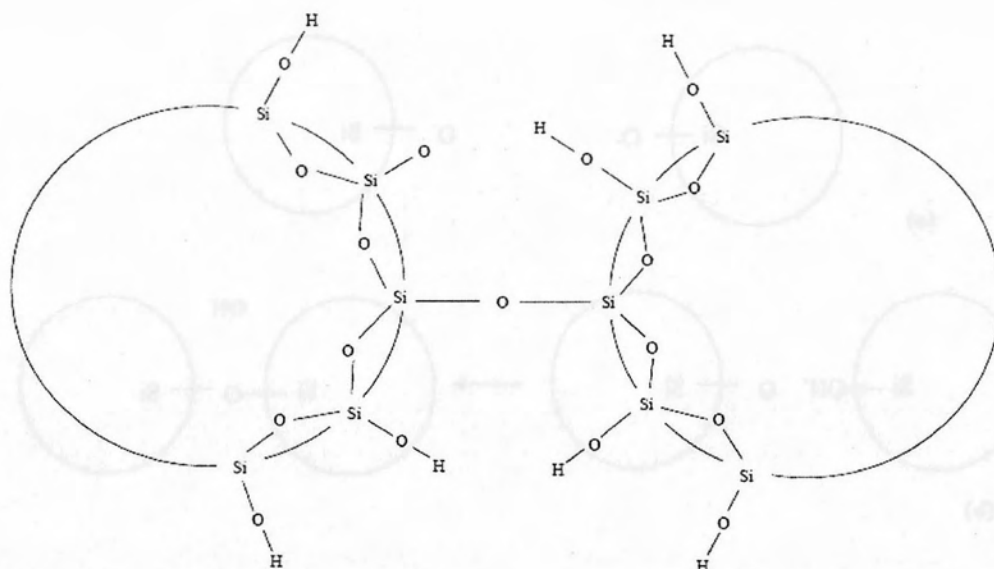
2.1 Χαρακτηριστικά κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση ενός μορίου του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου. (Silco International 2005).

Το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου Ludox SM, είναι αυτό που έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο στη βιβλιογραφία. Είναι αιώρημα σε νερό, διάλυμα μικροσκοπικών σωματιδίων πυριτίου. Τα σωματίδια είναι συνήθως μεταξύ 2 και 100 nm σε μέγεθος. Σε μίγματα 5% κατά βάρος, το κολλοειδές οξείδιο πυριτίου έχει αρχικώς ιξώδες αντίστοιχο του νερού. Το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου είναι μη τοξικό, βιολογικά και χημικά αδρανές, άοσμο, μη εύφλεκτο, λευκό στο χρώμα και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά την εφαρμογή του όσο και μετά το πέρας αυτής. Επιπλέον, το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά αντοχής. Για την καλύτερη διατήρηση του προτείνεται η αποθήκευση του σε ξηρό περιβάλλον 20oC - 25oC (Iler et al 1979, Whang 1995). Τα μόρια του είναι σφαιρικά με αρνητικό φορτίο όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.1.

Επιπλέον, σημειώνεται πως οι επιφάνειες των σωματιδίων περιέχουν ομάδες σιλανόλης με ελεύθερους δεσμούς SiOH. Το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου δημιουργείται όταν μόρια H_4SiO_4 αλληλεπιδρούν για να σχηματίσουν δεσμούς σιλοξάνης (Si-O-Si) με άλλα μόρια (Iler et al 1979).

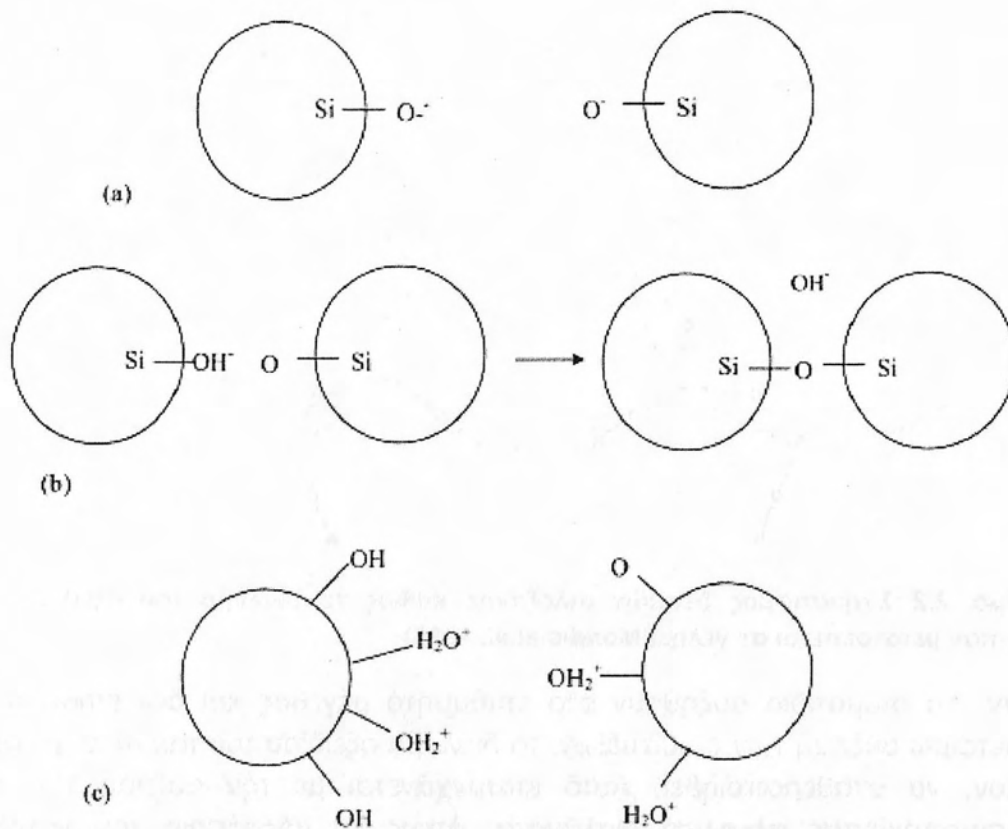


Σχήμα 2.2 Σχηματισμός δεσμών σιλοξάνης καθώς το διάλυμα του οξειδίου του πυριτίου μετατρέπεται σε γέλη. (Moridis et al. 1995)

Όταν τα σωματίδια αυξηθούν στο επιθυμητό μέγεθος και δεν επιθυμούμε περαιτέρω αύξηση των σωματιδίων, το διάλυμα οξειδίου του πυριτίου μπορεί, πλέον, να σταθεροποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση του pH, χρησιμοποιώντας αλκαλικά διαλύματα, όπως το υδροξείδιο του νατρίου, NaOH. Το αλκάλιο αντιδρά με τις επιφάνειες των σωματιδίων, δημιουργώντας ένα αρνητικό φορτίο για τα σωματίδια με αποτέλεσμα την μεταξύ τους απώθηση. Τα διαλύματα οξειδίου του πυριτίου σταθεροποιούνται χωρίς να μετατραπούν σε γέλη. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.3.α).

Σε χαμηλότερες τιμές pH, η επιβάρυνση των σωματιδίων μειώνεται ανάλογα με τη συγκέντρωση των ιόντων υδροξυλίου στο διάλυμα. Ως εκ τούτου, τα σωματίδια μπορούν να αλληλεπιδράσουν και να σχηματίσουν δεσμούς σιλοξάνης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.β). Το αποτέλεσμα είναι ότι ο ελάχιστος χρόνος γέλης, εμφανίζεται μεταξύ pH 5 και 7.

Καθώς το pH συνεχίζει να μειώνεται κάτω από 5, τα ιόντα υδροξυλίου εξαφανίζονται και τα σωματίδια γίνονται αφόρτιστα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.γ). Ως εκ τούτου, ο ρυθμός σχηματισμού δεσμών σιλοξάνης μειώνεται και υπάρχει μια αντίστοιχη αύξηση του χρόνου που απαιτείται για τη μετατροπή του διαλύματος σε γέλη (Gallagher 2000).



Σχήμα 2.3 Συμπεριφορά κολλοειδών σωματιδίων πυριτίου σε διαφορετικές τιμές pH: (a) $\text{pH} \geq 8$: O⁻ στην επιφάνεια προκαλεί στα σωματίδια να απωθούνται, (b) $5 < \text{pH} < 8$: OH στην επιφάνεια ενός σωματιδίου δημιουργεί δεσμό με H σε άλλα σωματίδια, Si-O-Si δημιουργεί δεσμούς μεταξύ των μορίων (c) $\text{pH} < 5$: σωματίδια είναι αφορτιστα ή απωθούνται. (Gallagher 2000)

Στο υδατικό διάλυμα μπορεί να προκληθεί δημιουργία γέλης σε μεταγενέστερο χρόνο, μειώνοντας τις απωστικές δυνάμεις με έναν ελεγχόμενο τρόπο, που επιτρέπει στα κολλοειδή σωματίδια να πήξουν, να αυξηθούν σε μέγεθος και τελικά να διαμορφώσουν μια πυκνή δομή. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται από το ποσοστό της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους.

Ο χρόνος που απαιτείται για την μετατροπή του διαλύματος οξειδίου του πυριτίου σε γέλη είναι πολύ σημαντικός, γιατί αυτός καθορίζει την αποτελεσματική εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης. Ο χρόνος γέλης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από το τέλος της ανάμειξης μέχρι το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου να αποτελεί ένα είδος γέλης, να έχει αυξηθεί πρακτικά το ιξώδες του και να έχει πυκνή δομή. Ο χρόνος μετατροπής σε γέλη του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου εξαρτάται από το ποσοστό της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους, το οποίο εξαρτάται από

πολλές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού του κολλοειδές οξειδίου του πυριτίου στο διάλυμα, το μέγεθος των σωματιδίων και το ιονικό σθένος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου, του pH, και της θερμοκρασίας του διαλύματος.

Επιπλέον, ο χρόνος γέλης μειώνεται με:

- i) την αύξηση του βάρους του πυριτίου, μειώνοντας το μέγεθος των σωματιδίων,
- ii) την αύξηση του ιονικού σθένος, καθώς και
- iii) με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο χρόνος γέλης επηρεάζεται επιπλέον και από την παρουσία ιόντων στο έδαφος που θα σταθεροποιηθεί. Αν υπάρχουν ανταλλάξιμα κατιόντα στο έδαφος αυτό ίσως επηρεάζει το χρόνο γέλης. Τα κατιόντα αλλάζουν το ιονικό σθένος και αυτό με τη σειρά του προκαλεί αλλαγή στο χρόνο γέλης. (DuPont 1997, Gallagher 2000).

Το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου είναι ένας ιδανικός σταθεροποιητής για παθητική στερεοποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών, καθώς τα διαλύματά του έχουν χαμηλό αρχικό ιξώδες καθώς επίσης μεγάλους και ελεγχόμενους χρόνους κατά τους οποίους τα διαλύματα μετατρέπονται σε γέλη. Γίνεται κατανοητό, ότι για πρακτικούς λόγους είναι πολύ σημαντική η αποφυγή της πρόωρης μετατροπής του διαλύματος σε γέλη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους :

1. ξέπλυμα με αλατόνερο-άλμη
2. η όλη διαδικασία να γίνει με χαμηλή ποσότητα σταθεροποιητή (δηλαδή αραιό διάλυμα)
3. χρήση χλωριούχου νατρίου NaCl ή χλωριούχου φθορίου NaF

Το κόστος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου ανέρχεται στα 60 \$ για 5 % κατά βάρος ανά κυβικό μέτρο εδάφους, δηλαδή πρόκειται για τον φθηνότερο σταθεροποιητή από όλους τους άλλους υποψήφιους.

2.2 Σταθεροποιημένη άμμος σε μικρές παραμορφώσεις

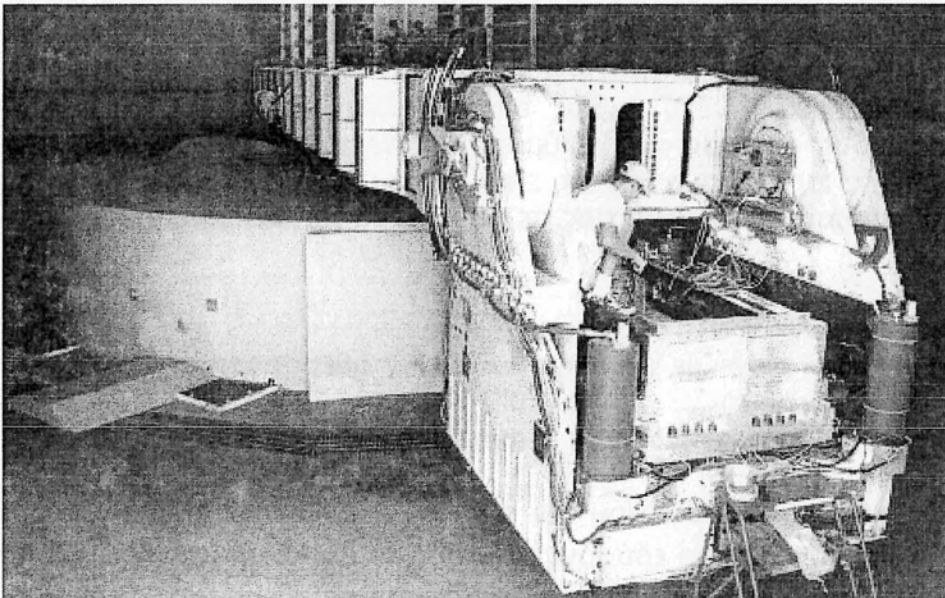
Όταν οι άμμοι σταθεροποιούνται σε μικρές παραμορφώσεις μπορεί να γίνει λόγος για δυναμική συμπεριφορά των άμμων. Με τον όρο δυναμική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων γίνεται αρχικώς αναφορά στο (μέγιστο) μέτρο δυσκαμψίας G_{max} των υλικών αυτών σε μικρές ανακυκλικές διατμητικές παραμορφώσεις (όπως μετράται είτε σε δοκιμές στήλης συντονισμού ή σε δοκιμές μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων Vs) και στην αντιστοιχούσα ελάχιστη τιμή υστερητικής απόσβεσης ξ_{min} .

2.2.1 Μετρήσεις Vs σε δοκιμές φυγοκεντριστή

Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων Vs μπορεί να μετρηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, με μετρήσεις ταχύτητας κυμάτων παλμών (pulse wave test) και τη μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender element test).

2.2.2 Μετρήσεις ταχύτητας κυμάτων παλμών

Οι εν λόγω μετρήσεις πραγματοποιούνται εντός προσομοιώματος φυγοκεντριστή (εικόνα 2.4) κατά τη διάρκεια της «πτήσης» του, με τις καταγραφές του παλμού μέσα στο φυσικό και στο σταθεροποιημένο έδαφος (ταυτόχρονα) να γίνονται από επιταχυνσιόμετρα διατεταγμένα κατακόρυφα, με πράσινο χρώμα, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



Εικόνα 2.4 Περιστρεφόμενο άκρο φυγοκεντριστή, όπου φαίνεται ο χώρος όπου τοποθετείται το γεωτεχνικό προσομοίωμα (Conlee, 2010)

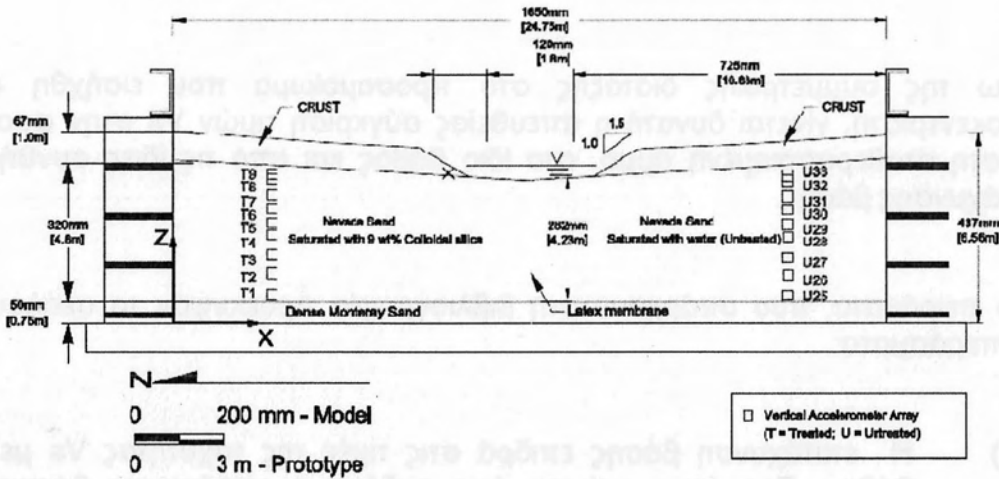
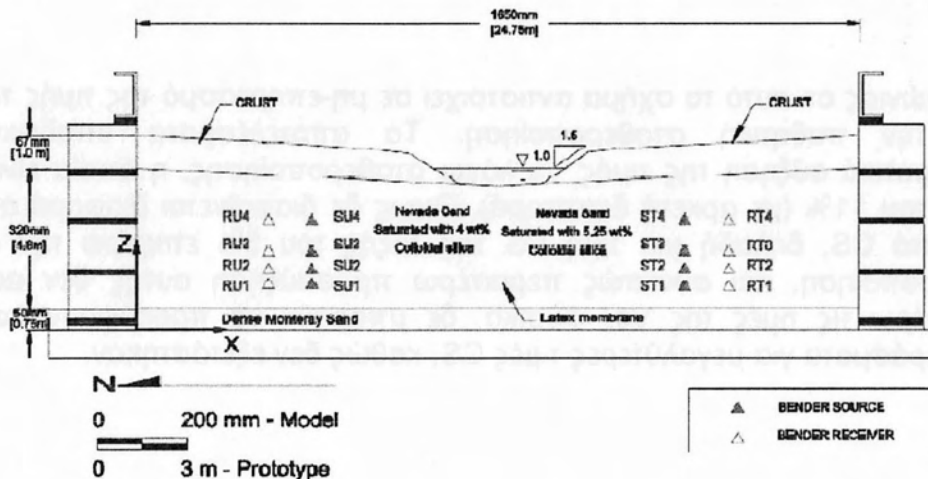


Figure 5.8 Instrumentation Layout for Pulsewave Testing in CTC01

Σχήμα 2.5 Διάταξη επιταχυνσιομέτρων στο γεωτεχνικό προσομοίωμα που εισήχθη στον φυγοκεντριστή (Conlee, 2010)

2.2.3 Μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Η δοκιμή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender element test), η οποία αναπτύχθηκε από τους Shirley & Hampton (1978), χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια για τη μέτρηση της V_s ταυτόχρονα με άλλες δοκιμές στον συμβατικό εργαστηριακό εξοπλισμό, όπως είναι οι συσκευές συμπίεσότητας, τριαξονικής φόρτισης και άμεσης διάτμησης. Η προσθήκη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στις συσκευές αυτές μετατρέπει τη μέτρηση της V_s σε μια διαδικασία ρουτίνας, εύκολη και άμεση, ενώ η Conlee (2010) την χρησιμοποίησε για την καταγραφή της ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων V_s σε εδάφη για διαφορετικά βάθη. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η διάταξη των πομπών και των δεκτών (αισθητήρων) για τις σχετικές μετρήσεις.



Σχήμα 2.6 Διάταξη αισθητήρων για τις μετρήσεις πιεζομετρικών στοιχείων στο γεωτεχνικό προσομοίωμα που εισήχθη στον φυγοκεντριστή (Conlee, 2010)

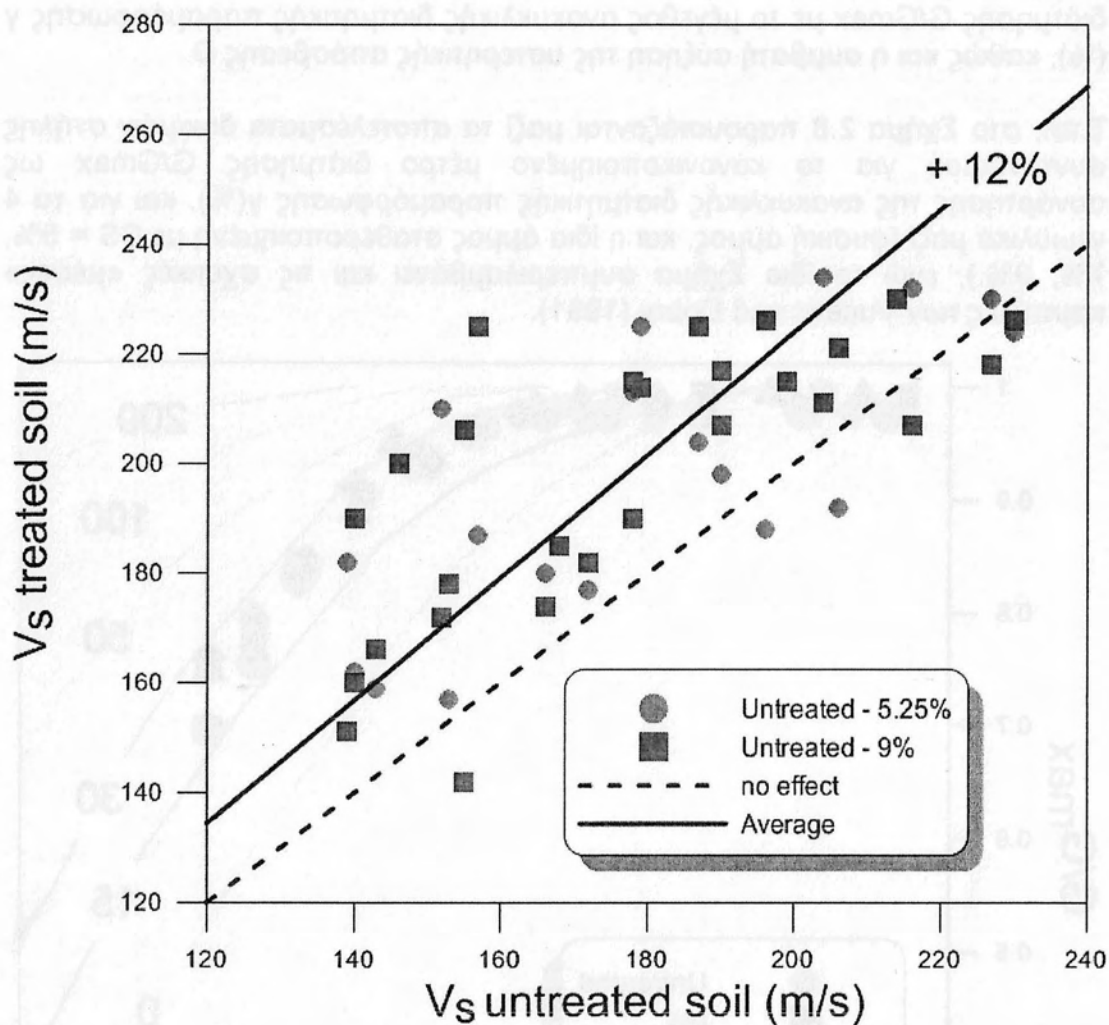
Λόγω της συμμετρικής διάταξης στο προσομοίωμα που εισήχθη στο φυγοκεντρική, γίνεται δυνατή η απευθείας σύγκριση τιμών V_s στην φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο, στο ίδιο βάθος και υπό τις ίδιες συνθήκες επιτάχυνσης βάσης.

Από πειράματα, που υπάρχουν στη βιβλιογραφία προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i) Η επιτάχυνση βάσης επιδρά στις τιμές της ταχύτητας V_s με το βάθος. Προκύπτει μείωση όσο αυξάνει η επιτάχυνση βάσης, η οποία αποδίδεται στη μη-γραμμική συμπεριφορά του γεωυλικού και στην ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων (ειδικά στις μεγάλες επιταχύνσεις της φυσικής άμμου).
- ii) Το ποσοστό $CS(\%)$ επιδρά στη μεταβολή της ταχύτητας V_s με το βάθος για διάφορα επίπεδα επιτάχυνσης βάσης. Η παθητική σταθεροποίηση αυξάνει τις τιμές της V_s (για το ίδιο ή αντίστοιχο βάθος), αλλά το ποσοστό $CS(\%)$ δε δείχνει να είναι καθοριστικός παράγων (δηλαδή δε διαφαίνεται συστηματική διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων με $CS=5.25\%$ και 9% , σε αντίθεση με τα αποτελέσματα για φυσική άμμο).

Για να γίνει σαφέστερη αυτή η σύγκριση και να μπορέσει να ποσοτικοποιηθεί η όποια επίδραση, στο Σχήμα 2.7 συγκρίνονται οι μετρήσεις V_s της φυσικής άμμου με αντίστοιχες μετρήσεις για σταθεροποιημένη άμμο στο ίδιο βάθος, θεωρώντας διαφορετικά σύμβολα για κάθε τιμή του $CS(\%)$.

Η διαγώνιος σε αυτό το σχήμα αντιστοιχεί σε μη-επηρεασμό της τιμής του V_s από την παθητική σταθεροποίηση. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν συστηματικά αύξηση της τιμής V_s λόγω σταθεροποίησης, η οποία είναι της τάξης του 11% (με αρκετή διασπορά). Όμως δε διαφαίνεται διαφορά από το ποσοστό CS , δηλαδή μια τιμή CS της τάξης του 5% επιφέρει την όποια διαφοροποίηση, και συνεπώς περαιτέρω προσαύξηση αυτής δεν αυξάνει περαιτέρω τις τιμές της V_s . Φυσικά, δε μπορούν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για μεγαλύτερες τιμές CS , καθώς δεν εξετάστηκαν.



Σχήμα 2.7 Σύγκριση τιμών V_s φυσικής (untreated) άμμου Nevada No. 120 ($D_r=41\%$, $e=0.73$) με τιμές V_s της ίδιας άμμου σταθεροποιημένης (treated) με $CS = 5.25\%$, 9% , και στο ίδιο βάθος, με βάση τις μετρήσεις της Conlee (2010).

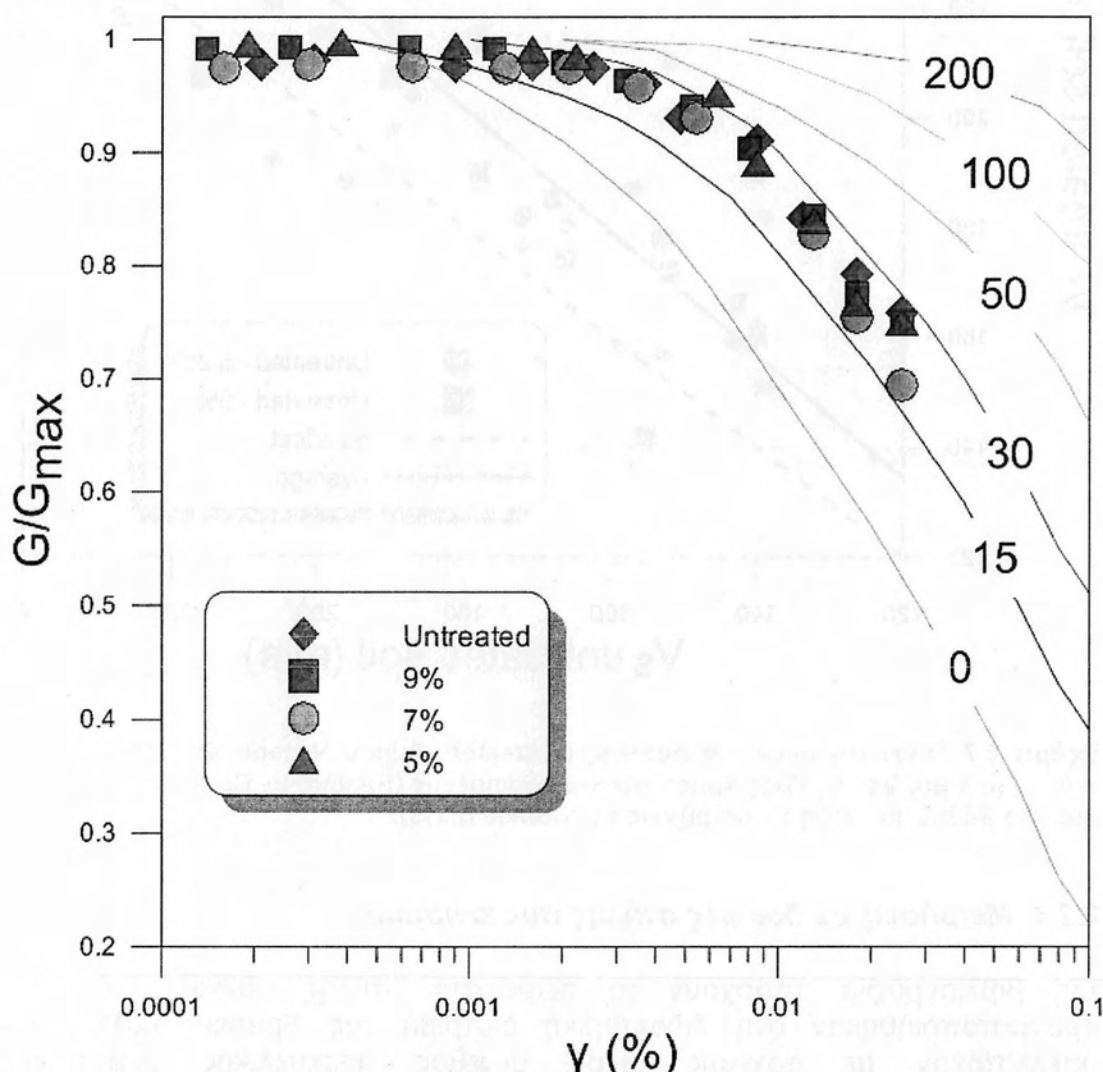
2.2.4 Μετρήσεις σε δοκιμές στήλης συντονισμού

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν τα πειράματα στήλης συντονισμού, που πραγματοποιήθηκαν στη διδακτορική διατριβή της Spencer (2010) και εκτελέστηκαν με αρχικώς μικρό μέγεθος ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης, η οποία αυξήθηκε σταδιακά, φτάνοντας μια μέγιστη παραμόρφωση ίση με 0.03% , ανάλογα με τη δυσκαμψία του εκάστοτε δοκιμίου. Συνολικά έγιναν δοκιμές σε δώδεκα (12) δοκίμια, τρία (3) για κάθε ένα από τα παρακάτω γεωυλικά: φυσική άμμος Nevada No. 120 ($D_r=41\%$, $e=0.73$), και η ίδια άμμος σταθεροποιημένη με κolloειδές οξειδίο του πυριτίου (Ludox SM) σε ποσοστά κατά βάρος $CS = 5\%$, 7% και 9% .

2.3 Σταθεροποιημένη άμμος σε μέτριες παραμορφώσεις

Στις μέτριες παραμορφώσεις μελετώνται οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης G/G_{max} με το μέγεθος ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%), καθώς και η συμβατή αύξηση της υστερητικής απόσβεσης D .

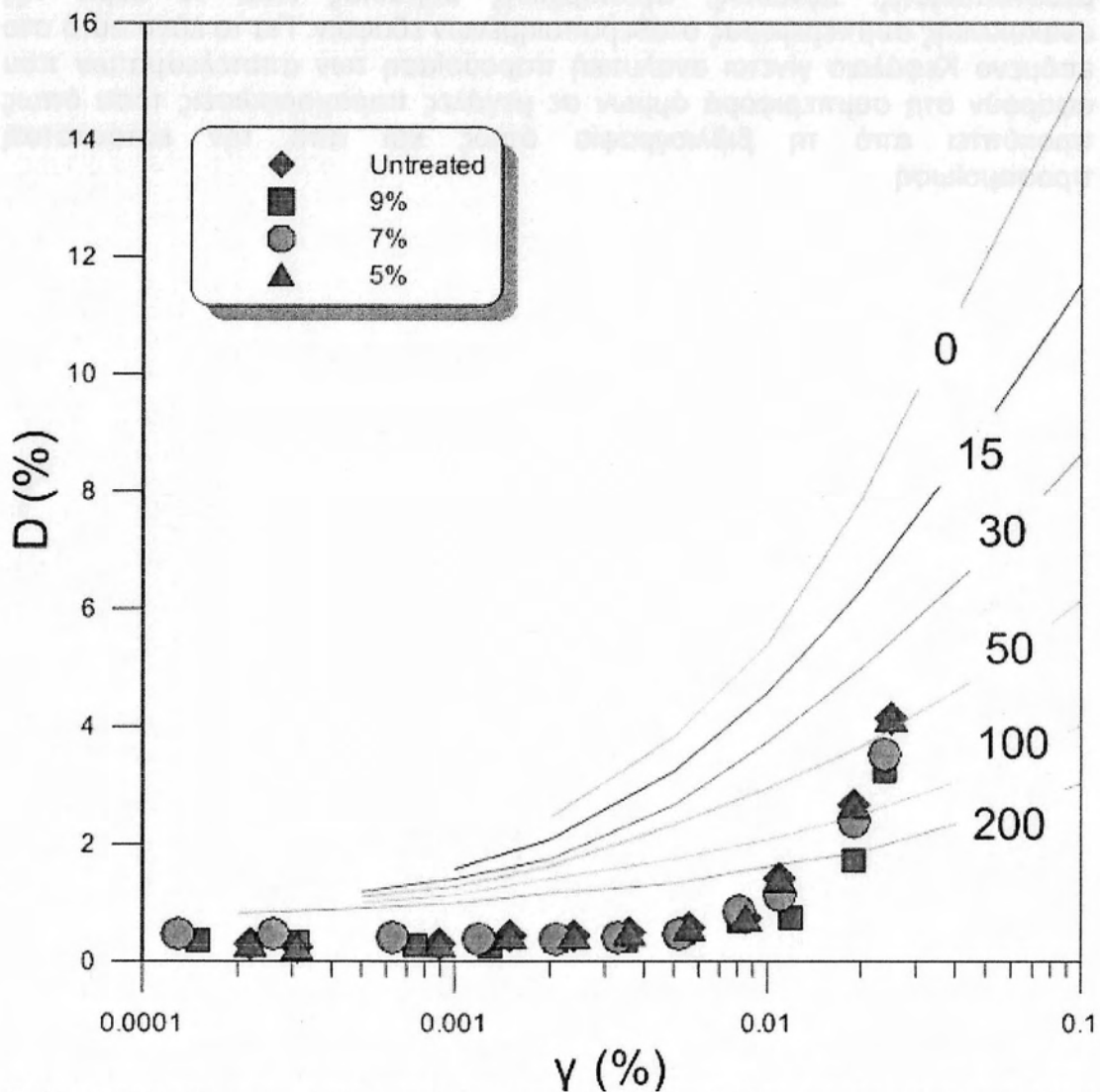
Έτσι, στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται μαζί τα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης G/G_{max} ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%), και για τα 4 γεωυλικά μαζί (φυσική άμμος, και η ίδια άμμος σταθεροποιημένη με $CS = 5\%$, 7% , 9%), ενώ το ίδιο Σχήμα συμπεριλαμβάνει και τις σχετικές «μέσες» καμπύλες των Vucetic and Dobry (1991).



Σχήμα 2.8 Επίδραση σταθεροποίησης με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος $CS = 5, 7$ και 9% σε άμμο Nevada No. 120, στα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης G/G_{max} ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%) (δεδομένα από Spencer, 2010 – καμπύλες Vucetic and Dobry 1991)

Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η παθητική σταθεροποίηση δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης G/G_{max} ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%). Αν υπάρχει μια διαφορά αυτή εντοπίζεται για τιμές παραμόρφωσης γ μεγαλύτερες του 0.01%, όπου τα σταθεροποιημένα δείχνουν να έχουν μια πιο απότομη κλίση υποδεικνύοντας πιο μη-γραμμική συμπεριφορά. Παρόλα αυτά η διαφορά είναι μόνο 5%, η οποία είναι ίση με την διασπορά που βρέθηκε μεταξύ δειγμάτων ίδιων υλικών, οπότε δεν κρίνεται στατιστικά σημαντική.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται μαζί τα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το λόγο υστερητικής απόσβεσης D (%) ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%), και για τα 4 γεωυλικά μαζί (με διαφορετικά σύμβολα), ενώ το ίδιο Σχήμα συμπεριλαμβάνει και τις σχετικές «μέσες» καμπύλες των Vucetic and Dobry (1991).



Σχήμα 2.9 Επίδραση σταθεροποίησης με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος $CS = 5, 7$ και 9% σε άμμο Nevada No. 120, στα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για τον λόγο υστερητικής απόσβεσης D (%) ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%) (δεδομένα από Spencer, 2010 – καμπύλες Vucetic and Dobry 1991)

Και από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η παθητική σταθεροποίηση δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης αύξησης του λόγου υστερητικής απόσβεσης $D(\%)$ ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma(\%)$. Αν υπάρχει μια διαφορά αυτή εντοπίζεται για τιμές παραμόρφωσης γ μεγαλύτερες του 0.003%, όπου η φυσική άμμος υποδεικνύει ελαφρώς μεγαλύτερη απόσβεση από τα σταθεροποιημένα δοκίμια, αντίθετα με ότι προκύπτει σε πολύ μικρές παραμορφώσεις (βλ. τιμές για D_{min}). Σε κάθε περίπτωση, δεν κρίνονται ως στατιστικά σημαντικές αυτές οι διαφοροποιήσεις.

2.4 Σταθεροποιημένη άμμος σε μεγάλες παραμορφώσεις

Η παθητική σταθεροποίηση σχεδιάστηκε ως μέσο αποτροπής της ρευστοποίησης. Συνεπώς, πρωταρχικής σημασίας είναι το θέμα της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών. Για το λόγο αυτό στο επόμενο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αφορούν στη συμπεριφορά άμμων σε μεγάλες παραμορφώσεις τόσο όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία όπως και από την καταστατική προσομοίωση.

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

3.1 Γενικά

Στο εν λόγω κεφάλαιο επιδιώκεται η προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων άμμων με ευφυή χρήση υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος για άμμους. Ο λόγος είναι ότι στη

βιβλιογραφία δε βρέθηκε ένα ολοκληρωμένο σετ δοκιμών για μία σταθεροποιημένη άμμο, και έτσι επί του παρόντος δεν είναι δυνατή η κατάστρωση νέων καταστατικών σχέσεων ειδικά για σταθεροποιημένη άμμο. Για το λόγο αυτό, έγινε μια βασική αλλά απλουστευτική παραδοχή, ότι η συμπεριφορά μιας άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (colloidal silica) αντιστοιχεί στη συμπεριφορά μιας φυσικής άμμου με σαφώς μεγαλύτερη πυκνότητα. Με βάση αυτήν την παραδοχή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα υπάρχον καταστατικό προσομοίωμα για μη συνεκτικά εδάφη, που να έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών υπό διαφορετικές πυκνότητες με την ίδια ομάδα σταθερών, και η σταθεροποίηση μιας φυσικής άμμου να εισαχθεί ως μια ψευδο-αύξηση της πυκνότητας (ή ψευδο-μείωση του δείκτη πόρων).

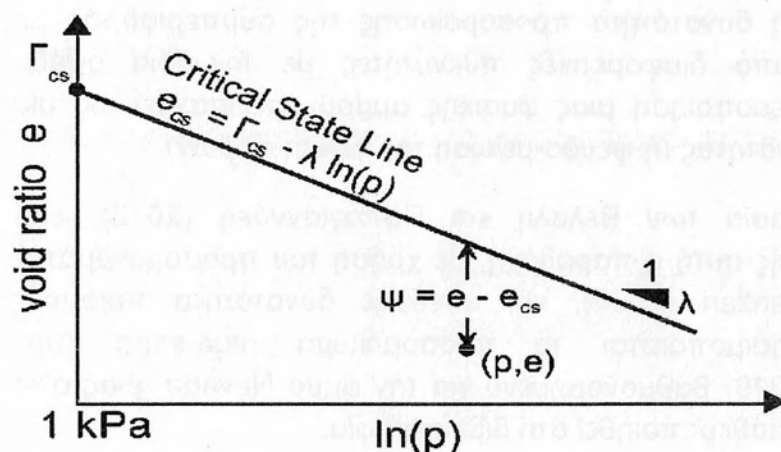
Στη διπλωματική εργασία των Βελαλή και Παπαγιαννάκη (2012), είχε δοκιμαστεί επί της αρχής αυτή η παραδοχή, με χρήση του προσομοιώματος των Dafalias and Manzari (2004), και υπέδειξε δυνατότητα ποιοτικής ακρίβειας. Εδώ, χρησιμοποιείται το προσομοίωμα ntua-sand (των Andrianopoulos et al 2010) βαθμονομημένο για την άμμο Nevada, μιας από τις άμμους που έχουν σταθεροποιηθεί στη βιβλιογραφία.

3.2 Βασικές αρχές επιλεγέντος καταστατικού προσομοιώματος

Η προσομοίωση της απόκρισης εδαφών κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού εξακολουθεί να είναι αντικείμενο εντατικής έρευνας στο χώρο της Σεισμικής Γεωτεχνικής Μηχανικής. Σημαντικό εργαλείο του κλάδου αποτελεί η αριθμητική ανάλυση. Αναπτύσσονται κώδικες, που είναι σε θέση να προσομοιώσουν την απόκριση εδαφών σε σεισμό. Δυστυχώς, τα περισσότερα υπάρχοντα μοντέλα, που υπάρχουν στην αγορά και χρησιμοποιούνται στο δομοστατικό κλάδο δεν είναι σε θέση να «αντιληφθούν» τη σύνθετη συμπεριφορά των εδαφών, τις πιέσεις πόρων κτλ. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένα μοντέλα, που να ενσωματώνουν τις αρχές της Εδαφομηχανικής.

Το μοντέλο ntua-sand των Andrianopoulos et al. (2010) που χρησιμοποιείται εδώ αποτελεί ένα σύγχρονο ελαστο-πλαστικό μοντέλο, που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της μονοτονικής και ανακυκλικής συμπεριφοράς φόρτισης μη συνεκτικών εδαφών. Ο κώδικας, που γράφτηκε ενσωματώθηκε μέσω της εφαρμογής User-Defined-Model (UDM) στον εμπορικό κώδικα του FLAC (finite-difference code). Το μοντέλο ntua-sand αποτελεί μία βελτίωση του προϋπάρχοντος μοντέλου των Papadimitriou et al. (2001) and Papadimitriou and Bouckovalas (2002) το οποίο με τη σειρά του βασίστηκε στο μοντέλο των Manzari and Dafalias (1997)

Το μοντέλο ntua-sand ενσωματώνει τις αρχές της Κρίσιμης Κατάστασης της Εδαφομηχανικής. Η ελαστική περιοχή είναι «εξαφανισμένη» ή σημειακή (vanished elastic region, που προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Dafalias and Porou 1977), και έτσι σε κάθε βήμα οι παραμορφώσεις είναι ελαστοπλαστικές.



Σχήμα 3.1 Ορισμός της παραμέτρου ψ (Been and Jefferies 1985) ως η «απόσταση» της παρούσας κατάστασης (p, e) από την γραμμή κρίσιμης κατάστασης (CSL) στο χώρο $[e-\ln p]$.

Το μοντέλο ενσωματώνει 3 σημαντικές επιφάνειες, την οριακή επιφάνεια η απόσταση από την οποία καθορίζει το πλαστικό μέτρο κράτυνσης, την επιφάνεια διαστολικότητας, η απόσταση από την οποία καθορίζει το αν το υλικό έχει τάση για διαστολή ή συστολή υπό διάτμηση, και τέλος την επιφάνεια κρίσιμης κατάστασης, η οποία είναι η επιφάνεια στην οποία καταλήγει η εντατική κατάσταση όταν φθάσει στην κρίσιμη κατάσταση: συσσώρευση διατμητικών παραμορφώσεων, υπό σταθερό όγκο και τάσεις. Οι 3 αυτές επιφάνειες είναι κωνικές στο τρι-διάστατο χώρο των τάσεων, και στον τριαξονικό χώρο των τάσεων $p-q$ παρουσιάζονται ως ευθείες με διαφορετικές κλίσεις που διέρχονται από την αρχή των αξόνων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κλίσεις αυτών των επιφανειών, M^b , M^d , και M^c αντίστοιχα (βλέπε Σχ. 3.2), οι οποίες αλληλοσυνδέονται με χρήση της παραμέτρου κατάστασης ψ (βλέπε Σχ. 3.1). Όταν το $\psi=0$, τότε $M = M^d = M^b$ που σημαίνει, πως φθάσαμε στην κρίσιμη κατάσταση, αρκεί βέβαια και ο λόγος αποκλίνουσας τάσης $\eta=(q/p)$ να έχει και εκείνος, ταυτόχρονα, φθάσει στην επιφάνεια κρίσιμης κατάστασης, δηλαδή $\eta=M^c$. Οι σχέσεις που εισάγουν την αλληλοσυσχέτιση των επιφανειών είναι οι ακόλουθες:

$$M^b = M^c - k^b \psi$$

$$M^d = M^c + k^d \psi$$

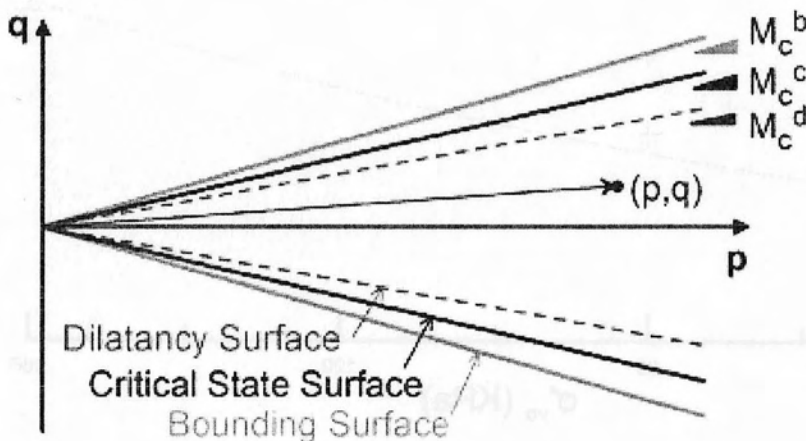
Η απόσταση του λόγου $\eta=(q/p)$ σε σχέση με τη οριακή επιφάνεια M^b καθορίζει το μέτρο των πλαστικών παραμορφώσεων. Πιο συγκεκριμένα, ορίζει το πλαστικό μέτρο κράτυνσης K_p , που ποσοτικοποιεί την απόσταση του λόγου η από την οριακή επιφάνεια M^b μέσω της σχέσης:

$$K_p = h(M^b - \eta).$$

Αντίστοιχα, η απόσταση του λόγου $\eta=(q/p)$ σε σχέση με τη επιφάνεια διαστολικότητας M^d καθορίζει αν έχουμε τάση για αύξηση ή μείωση του όγκου, και την ένταση αυτής. Πιο συγκεκριμένα, ορίζει τη διαστολικότητα D που ποσοτικοποιεί την απόσταση του λόγου η από την επιφάνεια διαστολικότητας M^d μέσω της σχέσης:

$$D = A(M^d - \eta)$$

Συνεπώς, αν $\eta < M^d$, τότε $D > 0$ και άρα παρατηρείται τάση για μείωση του όγκου, ενώ αν $\eta > M^d$, τότε $D < 0$ και συνεπώς παρατηρείται τάση για αύξηση του όγκου.

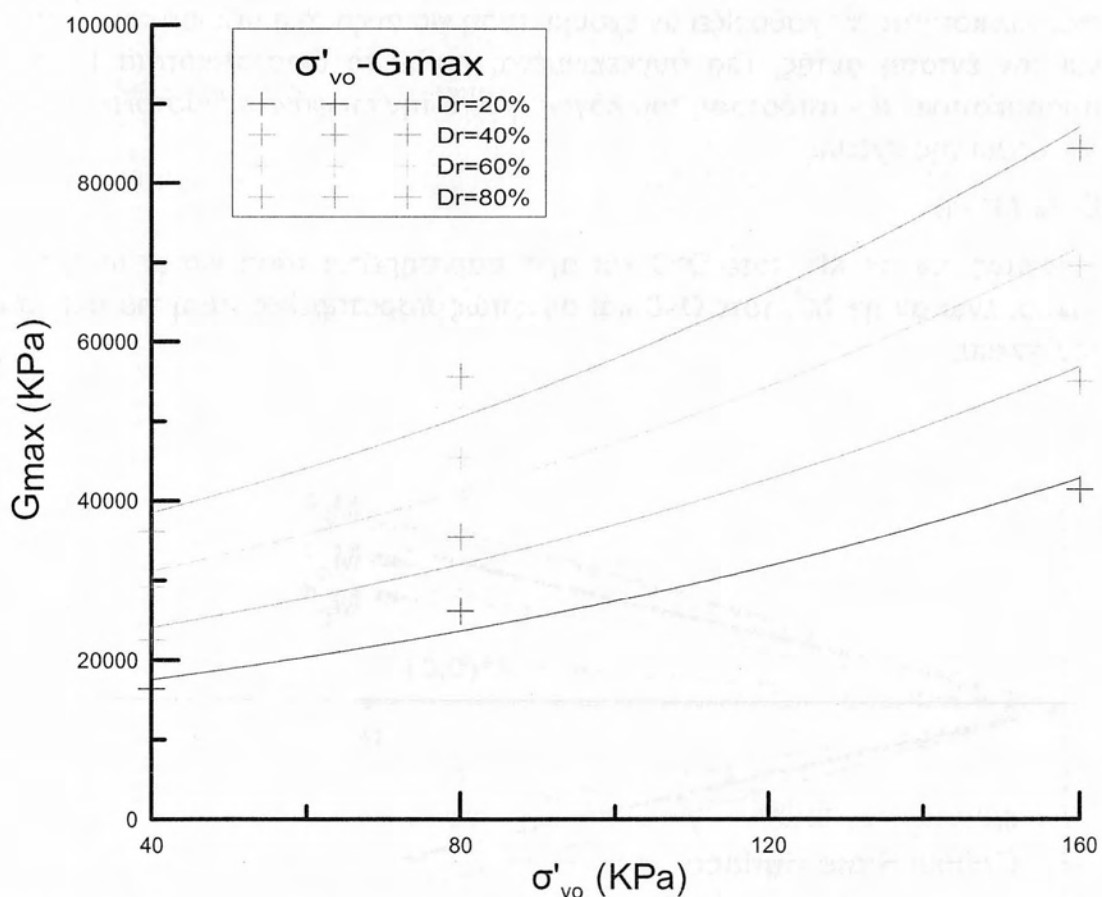


Σχήμα 3.2 Επιφάνειες μοντέλου ntua-sand (Andrianopoulos et al. 2010) στον τρισδιάστατο χώρο $[q-p]$ και ορισμός των κλίσεων M^d , M και M^b

3.3 Προσομοίωση σταθεροποιημένης άμμου σε μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις

Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.1, η σταθεροποίηση θα προσομοιωθεί ως μια ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας ή μια ψευδο-μείωση του δείκτη πόρων e . Με το *ntua-sand*, αυτή η προσομοίωση γίνεται με αλλαγή στην τιμή του δείκτη πόρων e , και δε χρειάζεται καμία περαιτέρω αλλαγή στις τιμές των σταθερών.

Στις μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις μας ενδιαφέρει η επίδραση που θα έχει η αλλαγή στην τιμή του e στην τιμή του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_{max} , και αυτό θα διερευνηθεί για τρεις διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης 40, 80 και 160kPa. Επισημαίνεται ότι έγιναν προσομοιώσεις ανακυκλικής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες, και η τιμή του G_{max} , εκτιμήθηκε από κύκλους με διατμητική παραμόρφωση γ της τάξης του 10^{-6} . Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του FLAC, θεωρώντας ένα μοναδιαίο στοιχείο πλευρών 1x1m για διαφορετικές αρχικές τάσεις και σχετικές πυκνότητες $Dr = 20, 40, 60$ και 80% (βλ. Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3. Μέγιστη δυσκαμψία G_{max} για τιμές αρχικής ενεργού τάσης $\sigma'_{vo} = 40, 80$ και 160KPa και τιμές σχετικής πυκνότητας $Dr = 20, 40, 60$ και 80%, με βάση το *ntua-sand* βαθμονομημένο για άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)

Όπως εύκολα συνάγεται από το Σχήμα 3.3 η μέγιστη δυσκαμψία G_{max} αυξάνει τόσο με αύξηση της τιμής της αρχικής ενεργού τάσης, όσο και με αύξηση της σχετικής πυκνότητας D_r , όπως και αναμενόταν. Λόγου χάρη, για αύξηση της πυκνότητας κατά 20% (από $D_r=20\%$ σε 40%, από $D_r=40\%$ σε 60%, και από $D_r=60\%$ σε 80%), υπό αρχική ενεργό τάση $\sigma'_v = 80\text{KPa}$ (ως μέση τιμή), παρατηρούνται αυξήσεις του G_{max} που κυμαίνεται από 6000KPa έως 8000KPa, δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 38%, κατά μέσο όρο. Για μεγαλύτερες μεταβολές της D_r , π.χ. κατά 40%, από 20% σε 60% ή από 40% σε 80%, η αύξηση είναι 13000KPa και 14000KPa αντίστοιχα, δηλαδή έχουμε μια αύξηση της τάξης του 72%.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί, πως η αντίστοιχη τιμή, που προέκυψε από τα πειράματα σε σταθεροποιημένες άμμους στο Κεφάλαιο 3, είναι μία αύξηση της τάξης του 12% σε όρους ταχύτητας V_s διατμητικών κυμάτων S . Η τιμή αυτή είναι μια μέση τιμή με αρκετή διασπορά, και δε δείχνει να επηρεάζεται από το ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας cs .

Η σχέση που συνδέει την ταχύτητα V_s με το G_{max} σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικότητας είναι η εξής: $V_s = (G_{max}/\rho)^{0.5}$. Συνεπώς, η αύξηση κατά 12% σε όρους V_s αντιστοιχεί σε αύξηση κατά 25% σε όρους G_{max} .

Συνάγεται λοιπόν, ότι οι προσομοιώσεις δείχνουν πως η ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, ακόμη και για ΔD_r μόλις +20%, οδηγεί σε προσαύξηση του G_{max} της τάξης του 38%, κατά μέση τιμή, δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη από το +25% που υποδεικνύουν τα πειράματα σε σταθεροποιημένες άμμους. Συνεπώς, αν είναι να χρησιμοποιηθεί το *ntua-sand* για την προσομοίωση της σταθεροποίησης με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, αυτή θα πρέπει να είναι σχετικώς μικρή (δηλαδή μικρότερη από +20%).

Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή θεωρηθεί μεγάλη ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, θα εκτιμάται τιμή του G_{max} αρκετά μεγαλύτερη της πραγματικής, και συνεπώς:

- θα υπερεκτιμάται η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_s
- θα υποεκτιμώνται οι παραμορφώσεις.

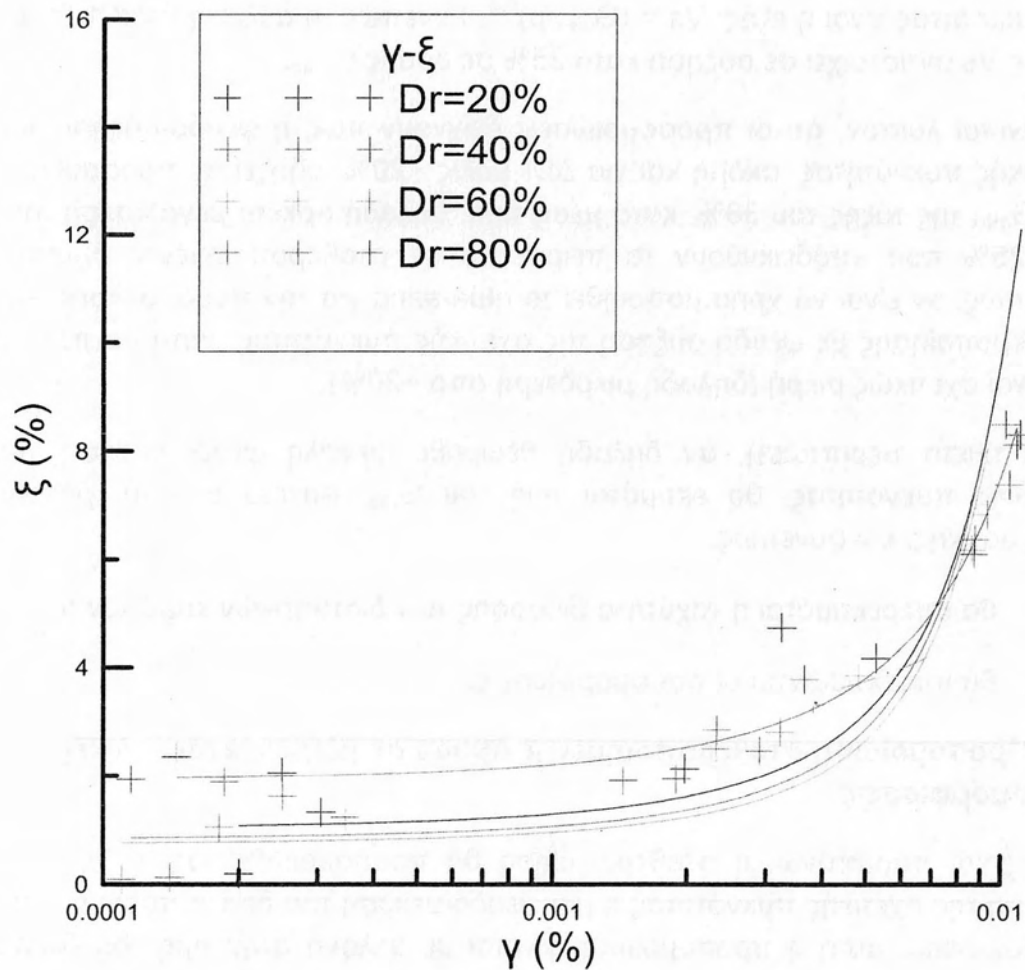
3.4 Προσομοίωση σταθεροποιημένης άμμου σε μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις

Όπως και παραπάνω, η σταθεροποίηση θα προσομοιωθεί ως μια ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας ή μια ψευδο-μείωση του δείκτη πόρων e . Με το *ntua-sand*, αυτή η προσομοίωση γίνεται με αλλαγή στην τιμή του δείκτη πόρων e , και δε χρειάζεται καμία περαιτέρω αλλαγή στις τιμές των σταθερών.

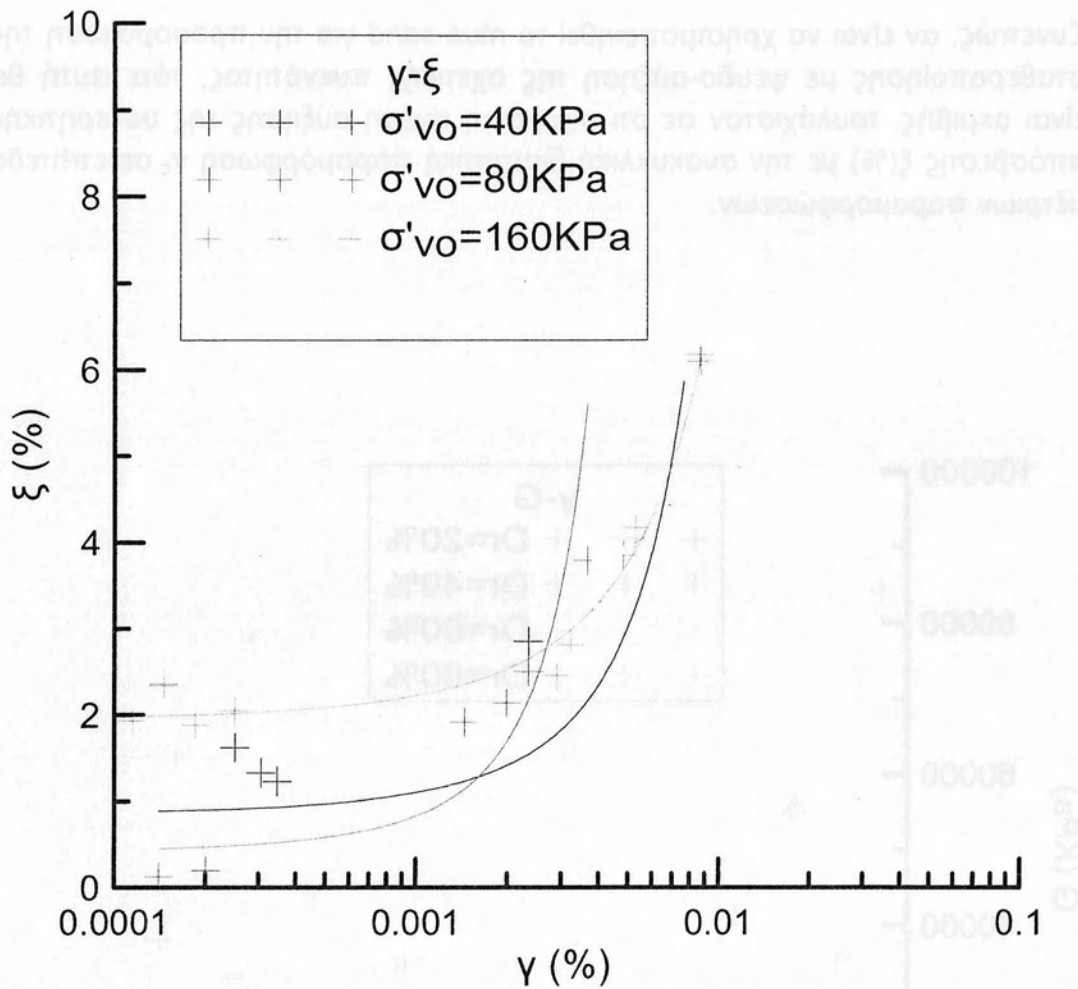
Στις μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις μας ενδιαφέρει η επίδραση που θα έχει η αλλαγή στην τιμή του e στο ρυθμό απομείωσης του κανονικοποιημένου

μέτρου διάτμησης G/G_{max} και το ρυθμό αύξησης της υστερητικής απόσβεσης ξ , με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c . Η επίδραση αυτή διερευνήθηκε και πάλι για τρεις διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης 40, 80 και 160kPa. Επισημαίνεται ότι έγιναν προσομοιώσεις ανακυκλικής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες, μέχρι τιμών ανακυκλικών διατμητικών παραμορφώσεων γ_c της τάξης του 10^{-4} , και όχι μεγαλύτερες. Ο λόγος είναι ότι τα πειραματικά αποτελέσματα για σταθεροποιημένες άμμους σε δοκιμές στήλης συντονισμού δεν υπερβαίνουν αυτό το μέγεθος παραμόρφωσης, αλλά επίσης και ότι η θεώρηση αστράγγιστων συνθηκών στην προσομοίωση με το *ntua-sand* προκαλεί ουσιώδεις υπερπιέσεις πόρων για μεγαλύτερες ανακυκλικές παραμορφώσεις γεγονός μη συμβατό με τον τρόπο που γίνονται οι μετρήσεις στη στήλη συντονισμού.

Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του FLAC, θεωρώντας ένα μοναδιαίο στοιχείο πλευρών 1x1m για διαφορετικές αρχικές τάσεις και σχετικές πυκνότητες $Dr = 20, 40, 60$ και 80% .



Σχήμα 3.4 Σχέση υστερητικής απόσβεσης (ξ) – ανακυκλικών παραμορφώσεων (γ) για τιμές σχετικής πυκνότητας $Dr = 20, 40, 60$ και 80% και διαφορετικές αρχικές τάσεις σ'_{vo} , με βάση το *ntua-sand* βαθμονομημένο για άμμο Nevada (βλ. Andrianoopoulos et al. 2010)

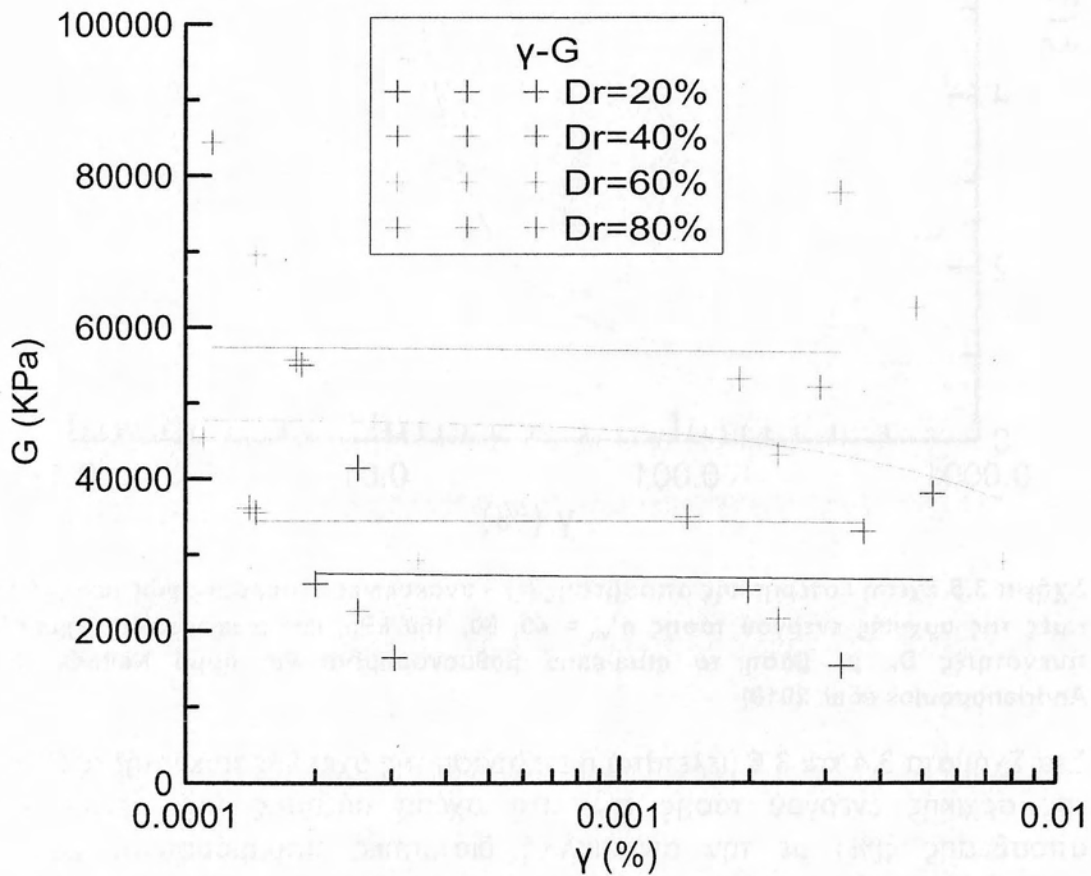


Σχήμα 3.5 Σχέση υστερητικής απόσβεσης (ξ) – ανακυκλικών παραμορφώσεων (γ) για τιμές της αρχικής ενεργού τάσης $\sigma'_{vo} = 40, 80, 160$ kPa, και διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_r , με βάση το ntua-sand βαθμονομημένο για άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)

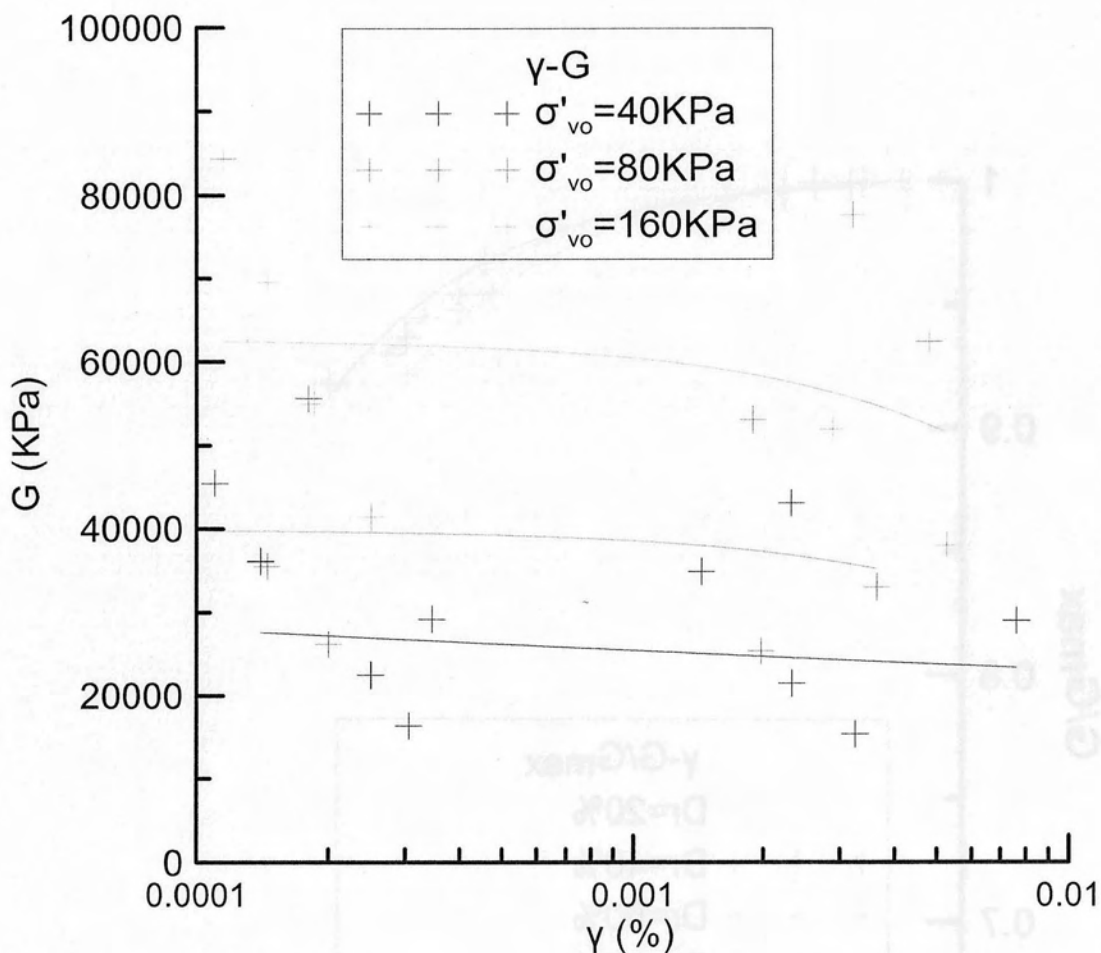
Στα Σχήματα 3.4 και 3.5 μελετάται η επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_r και της αρχικής ενεργού τάσης σ'_{vo} στη σχέση αύξησης της υστερητικής απόσβεσης $\xi(\%)$ με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c . Τα αποτελέσματα δεν υποδεικνύουν συστηματική επίδραση αυτών των μεγεθών στη σχέση $\xi-\gamma_c$, καθώς τα αποτελέσματα συνιστούν μια, λίγο έως πολύ, ενιαία γκάμα τιμών για το εύρος παραμορφώσεων από 10^{-6} έως 10^{-4} που μελετήθηκαν.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα $\xi-\gamma_c$ απ' όπου προέκυψε ότι η σταθεροποίηση δεν μεταβάλλει τη σχέση αύξησης της υστερητικής απόσβεσης $\xi(\%)$ με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c της φυσικής άμμου, και αυτό ανεξαρτήτως ποσοστού κατά βάρος cs με την οποία έγινε η σταθεροποίηση.

Συνεπώς, αν είναι να χρησιμοποιηθεί το *ntua-sand* για την προσομοίωση της σταθεροποίησης με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, τότε αυτή θα είναι ακριβής, τουλάχιστον σε ότι αφορά τη σχέση αύξησης της υστερητικής απόσβεσης $\xi(\%)$ με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c σε επίπεδα μέτρων παραμορφώσεων.

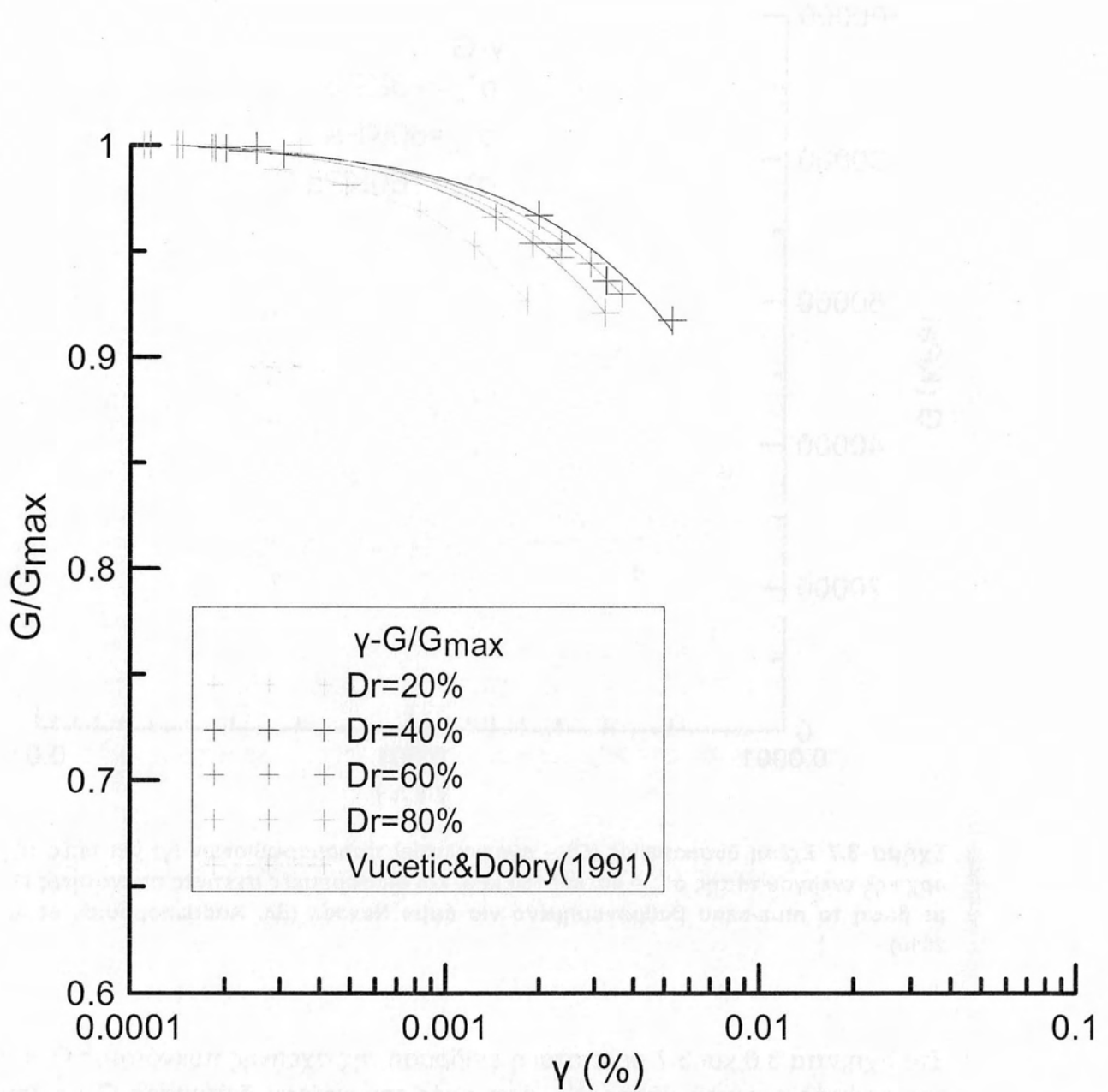


Σχήμα 3.6 Σχέση δυσκαμψίας (G) – ανακυκλικών παραμορφώσεων (γ) για τιμές σχετικής πυκνότητας $D_r = 20, 40, 60$ και 80% και διαφορετικές αρχικές τάσεις σ'_{vo} , με βάση το *ntua-sand* βαθμονομημένο για άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)

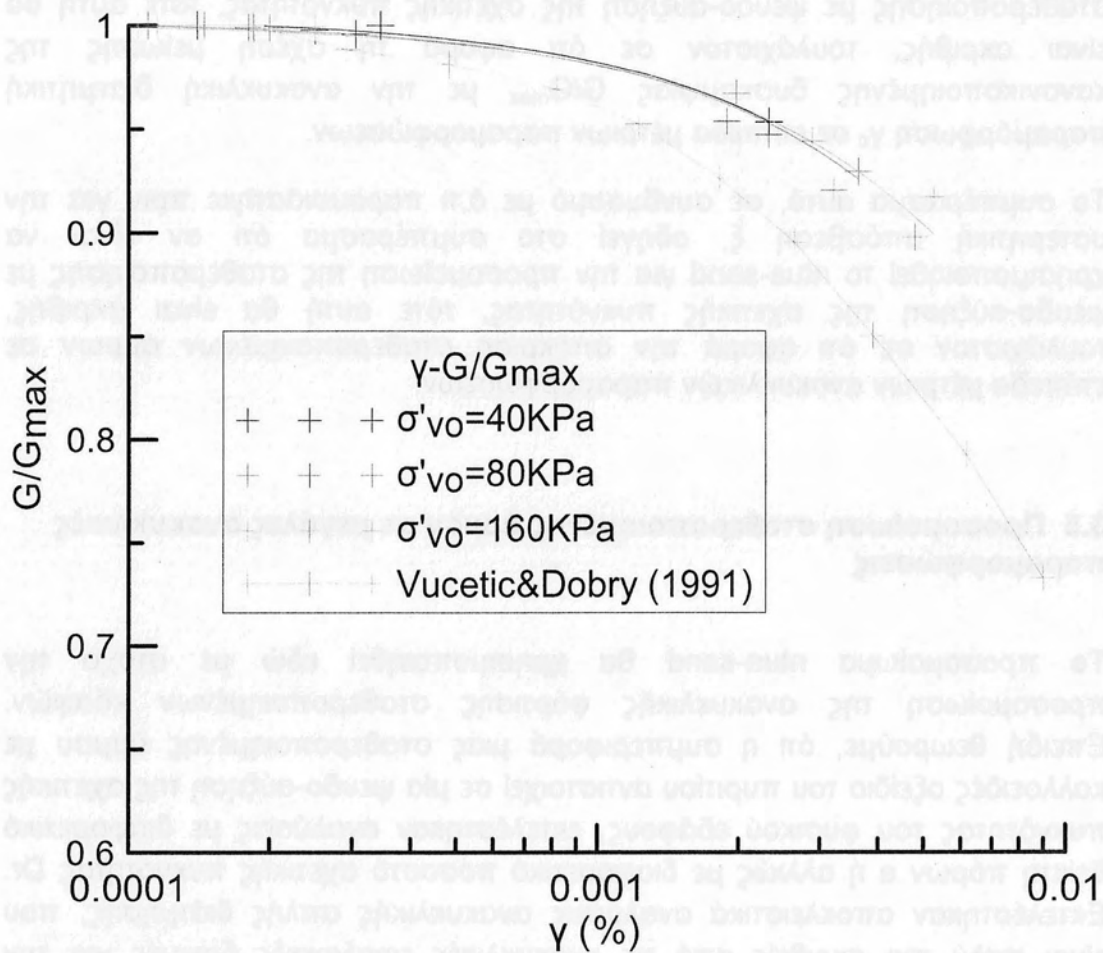


Σχήμα 3.7 Σχέση δυσκαμψίας (G) – ανακυκλικών παραμορφώσεων (γ) για τιμές της αρχικής ενεργού τάσης $\sigma'_{vo} = 40, 80, 160$ kPa, και διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_r , με βάση το *ntua-sand* βαθμονομημένο για άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)

Στα Σχήματα 3.6 και 3.7 μελετάται η επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_r και της αρχικής ενεργού τάσης σ'_{vo} στις τιμές του μέτρου διάτμησης G με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c . Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, δηλαδή υποδεικνύουν σημαντική αυξητική επίδραση τόσο της D_r όσο και της σ'_{vo} στις τιμές της δυσκαμψίας G . Όμως, στην προηγούμενη παράγραφο βρήκαμε αντίστοιχη επίδραση των μεγεθών αυτών και στην τιμή της μέγιστης δυσκαμψίας G_{max} . Συνεπώς, το ενδιαφέρον εδώ μετατοπίζεται στο ποια είναι η προβλεπόμενη επίδραση των μεγεθών αυτών στη σχέση απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης G/G_{max} με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c .



Σχήμα 3.8 Σχέση απομείωσης της κανονικοποιημένης δυσκαμψίας G/G_{max} με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση (γ) για τιμές σχετικής πυκνότητας $D_r = 20, 40, 60$ και 80% και διαφορετικές αρχικές τάσεις σ'_{vo} , με βάση το ntua-sand βαθμονομημένο για άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)



Σχήμα 3.9 Σχέση απομείωσης της κανονικοποιημένης δυσκαμψίας G/G_{max} με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση (γ) για τιμές της αρχικής ενεργού τάσης $\sigma'_{vo} = 40, 80, 160$ kPa, και διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_r , με βάση το *ntua-sand* βαθμονομημένο για άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)

Στα Σχήματα 3.8 και 3.9 μελετάται η επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_r και της αρχικής ενεργού τάσης σ'_{vo} στη σχέση μείωσης της κανονικοποιημένης δυσκαμψίας G/G_{max} με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c . Τα αποτελέσματα δεν υποδεικνύουν συστηματική επίδραση αυτών των μεγεθών στη σχέση $G/G_{max} - \gamma_c$, καθώς τα αποτελέσματα συνιστούν μια, λίγο έως πολύ, ενιαία γκάμα τιμών για το εύρος παραμορφώσεων από 10^{-6} έως 10^{-4} που μελετήθηκαν.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα $G/G_{max} - \gamma_c$ απ' όπου προέκυψε ότι η σταθεροποίηση δεν μεταβάλλει τη σχέση μείωσης της κανονικοποιημένης δυσκαμψίας G/G_{max} με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c της φυσικής άμμου, και αυτό ανεξαρτήτως ποσοστού κατά βάρος cs με την οποία έγινε η σταθεροποίηση.

Συνεπώς, αν είναι να χρησιμοποιηθεί το *ntua-sand* για την προσομοίωση της σταθεροποίησης με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, τότε αυτή θα είναι ακριβής, τουλάχιστον σε ότι αφορά τη σχέση μείωσης της κανονικοποιημένης δυσκαμψίας G/G_{max} με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c σε επίπεδα μέτριων παραμορφώσεων.

Το συμπέρασμα αυτό, σε συνδυασμό με ό,τι παρουσιάστηκε πριν για την υστερητική απόσβεση ξ , οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αν είναι να χρησιμοποιηθεί το *ntua-sand* για την προσομοίωση της σταθεροποίησης με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, τότε αυτή θα είναι ακριβής, τουλάχιστον σε ότι αφορά την απόκριση σταθεροποιημένων άμμων σε επίπεδα μέτριων ανακυκλικών παραμορφώσεων.

3.5 Προσομοίωση σταθεροποιημένης άμμου σε μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις

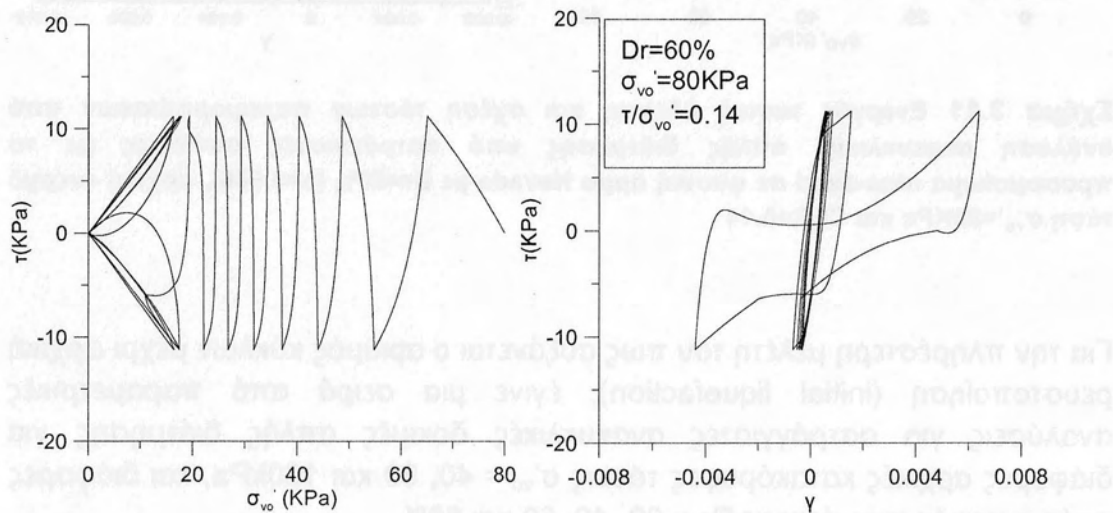
Το προσομοίωμα *ntua-sand* θα χρησιμοποιηθεί εδώ με στόχο την προσομοίωση της ανακυκλικής φόρτισης σταθεροποιημένων εδαφών. Επειδή θεωρούμε, ότι η συμπεριφορά μιας σταθεροποιημένης άμμου με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου αντιστοιχεί σε μία ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας του φυσικού εδάφους, εκτελέστηκαν αναλύσεις με διαφορετικό δείκτη πόρων e ή αλλιώς με διαφορετικό ποσοστό σχετικής πυκνότητας D_r . Εκτελέστηκαν αποκλειστικά αναλύσεις ανακυκλικής απλής διάτμησης, που είναι πολύ πιο ακριβείς από τις ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές για την προσομοίωση της σεισμικής ταλάντωσης, και οι οποίες είχαν εκτελεσθεί από τους Βελαλή και Παπαγιαννάκη (2012), χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα των Dafalias & Mazari (2004).

3.5.1 Ορισμός ρευστοποίησης

Η ρευστοποίηση, τόσο για φυσικές άμμους όσο και για σταθεροποιημένες, ορίζεται όταν η ανακυκλική αξονική παραμόρφωση πλήρους εύρους (*double amplitude* DA) φθάσει ένα προαποφασισμένο όριο ($DA = 1, 2, 3$ ή 5%). Εναλλακτικά, η λεγόμενη αρχική ρευστοποίηση προκύπτει όταν η ενεργός κατακόρυφη τάση σ'_v τείνει στο μηδέν, ή με ακρίβεια μηχανικού όταν φτάσει να είναι κάτω από το 5% της αρχικής ενεργού τάσης σ'_{v0} . Με άλλα λόγια, όταν η υπερπίεση πόρων $\Delta u = \sigma'_{v0} - \sigma'_v$ τείνει να γίνει ίση με την αρχική ενεργό τάση σ'_{v0} , ή με ακρίβεια μηχανικού όταν φτάσει να είναι πάνω από το 95% της αρχικής ενεργού τάσης σ'_{v0} . Ισοδύναμα, η αρχική ρευστοποίηση ορίζεται όταν ο λόγος υπερπίεσεων πόρων $r_u = \Delta u/\sigma'_{v0}$ τείνει να γίνει ίσος με 1.0 , ή με ακρίβεια μηχανικού όταν φθάσει να είναι μεγαλύτερος από 0.95 .

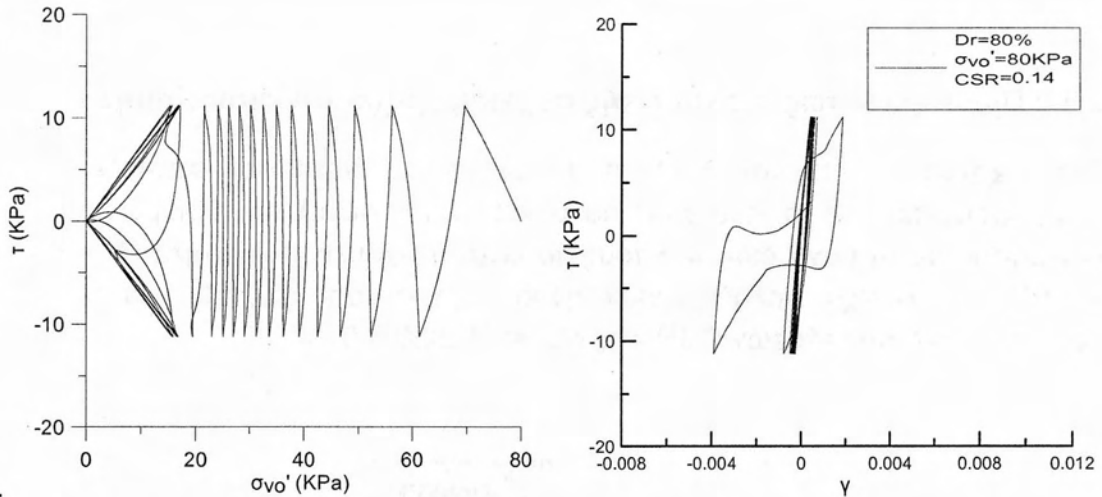
3.5.2 Προσομοιώσεις ανακυκλικής φόρτισης μέχρι ρευστοποίησης

Στα Σχήματα 3.10 και 3.11 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων με το ntua-sand αστράγγιστων ανακυκλικών δοκιμών απλής διάτμησης με τη μόνη διαφορά τους να είναι η σχετική πυκνότητα $D_r = 60\%$ και 80% , αντίστοιχα. Δηλαδή έχουν την ίδια αρχική τάση $\sigma'_{vo} = 80\text{kPa}$, και ίδιο λόγο ανακυκλικών τάσεων $CSR = \tau_c/\sigma'_{vo} = 11.2/80 = 0.14$.



Σχήμα 3.10 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από ανάλυση ανακυκλικής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες με το προσομοίωμα ntua-sand σε φυσική άμμο Nevada με $D_r=60\%$ ($e=0.661$), αρχική ενεργό τάση $\sigma'_{vo}=80\text{kPa}$ και $CSR=0.14$

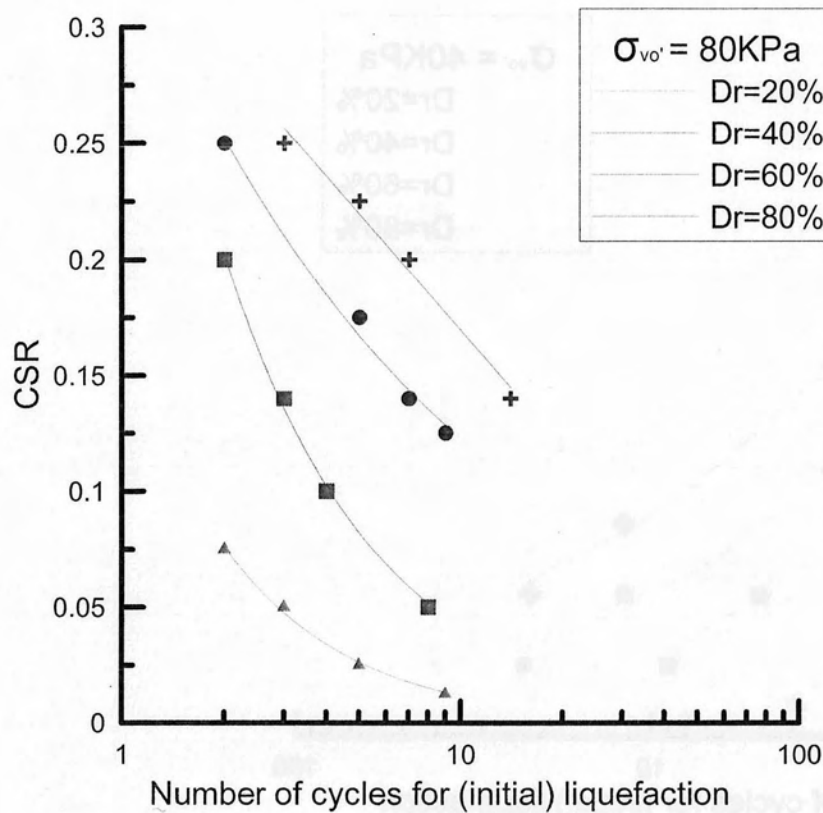
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα στα 2 σχήματα προκύπτει ότι η αύξηση της σχετικής πυκνότητας, από $D_r = 60\%$ σε 80% , αλλάζει σημαντικά την προβλεπόμενη συμπεριφορά. Για παράδειγμα, σε ό,τι αφορά στον αριθμό κύκλων μέχρι αρχική ρευστοποίηση (initial liquefaction), προβλέπεται σαφής αύξηση αυτού, από $N_I = 8$ σε $N_I = 14$. Φυσικά, υπάρχουν και πολλές άλλες διαφορές στην απόκριση (π.χ. εύρος ανακυκλικών μετατοπίσεων που μειώνεται με την αύξηση της D_r), μα η αύξηση του αριθμού κύκλων είναι το πιο σημαντικό για τη μελέτη της επίδρασης της σταθεροποίησης στα μη-συνεκτικά εδάφη, και έτσι η έμφαση θα δοθεί στο μέγεθος αυτό.



Σχήμα 3.11 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από ανάλυση ανακυκλικής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες με το προσομοίωμα *ntua-sand* σε φυσική άμμο Nevada με $D_r=80\%$ ($e=0.586$), αρχική ενεργό τάση $\sigma'_{vo}=80\text{KPa}$ και $\text{CSR}=0.14$

Για την πληρέστερη μελέτη του πώς αυξάνεται ο αριθμός κύκλων μέχρι αρχική ρευστοποίηση (*initial liquefaction*), έγινε μια σειρά από παραμετρικές αναλύσεις για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης για διάφορες αρχικές κατακόρυφες τάσεις $\sigma'_{vo} = 40, 80$ και 160kPa , και διάφορες τιμές σχετικής πυκνότητας $D_r = 20, 40, 60$ και 80% .

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε όρους καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση, δηλαδή με τη φθίνουσα σχέση του επιβαλλόμενου λόγου ανακυκλικών τάσεων CSR με τον αριθμό κύκλων μέχρι αρχική ρευστοποίηση N_l .

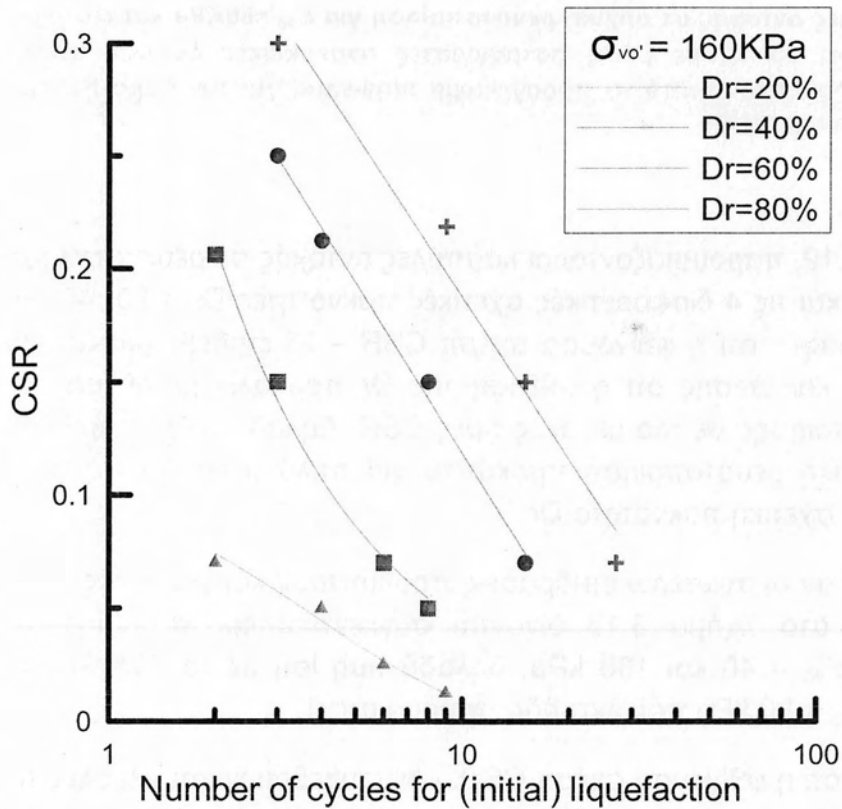
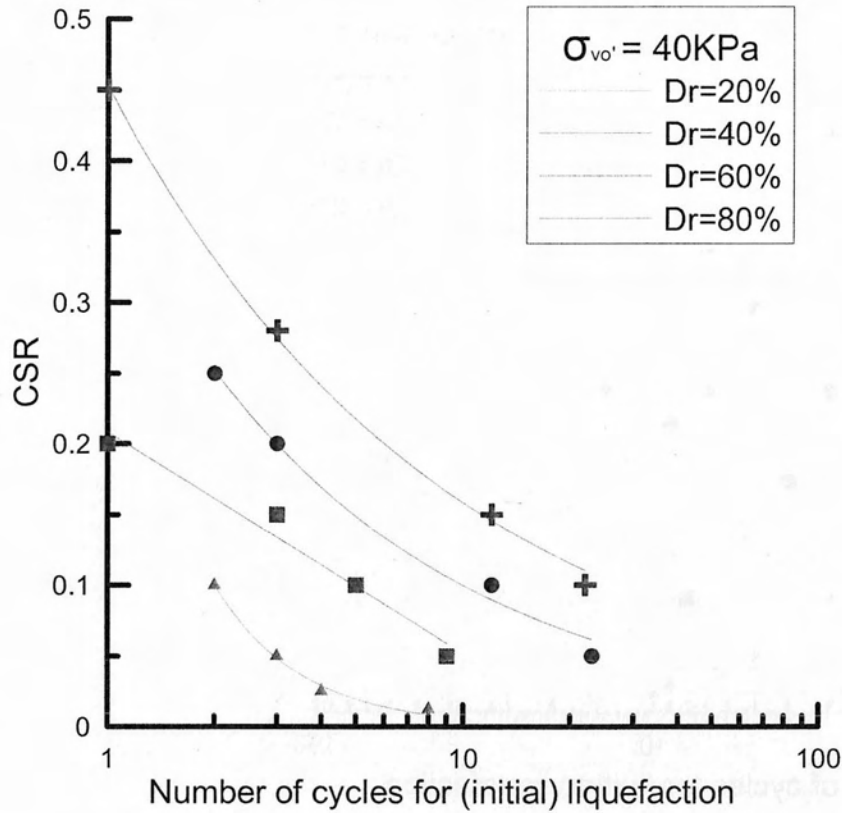


Σχήμα 3.12 Καμπύλες αντοχής σε αρχική ρευστοποίηση για $\sigma'_{vo}=80\text{KPa}$ και τέσσερις τιμές $Dr=20,40,60$ και 80% , με βάση αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης, όπως προκύπτουν από το προσμοίωμα *ntua-sand* για την άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)

Έτσι, στο Σχήμα 3.12, παρουσιάζονται οι καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για $\sigma'_{vo} = 80 \text{ kPa}$, και τις 4 διαφορετικές σχετικές πυκνότητες $Dr = 20, 40, 60$ και 80% . Γίνεται σαφές ότι η φθίνουσα σχέση $CSR - Nl$ επιβεβαιώνεται για όλες τις τιμές Dr , και επίσης ότι η αύξηση της Dr προκαλεί μετάθεση της καμπύλης ρευστοποίησης σε πιο μεγάλες τιμές CSR . Δηλαδή ο ίδιος αριθμός κύκλων μέχρι αρχική ρευστοποίηση προκύπτει για πολύ μεγαλύτερες τιμές CSR , αν αυξηθεί η σχετική πυκνότητα Dr .

Για να διερευνηθεί αν οι ανωτέρω επιδράσεις προκύπτουν και για άλλες τιμές αρχικών τάσεων, στο Σχήμα 3.13 δίνονται συγκεντρωτικά τα αντίστοιχα διαγράμματα για $\sigma'_{vo} = 40$ και 160 kPa , δηλαδή τιμή ίση με το 50% και το 200% της τιμής $\sigma'_{vo} = 80 \text{ kPa}$ που έχει ήδη παρουσιαστεί.

Προκύπτει λοιπόν ότι η φθίνουσα σχέση $CSR - Nl$ επιβεβαιώνεται για όλες τις τιμές Dr , αλλά και όλες τις τιμές σ'_{vo} . Επιπλέον προκύπτει ότι η αύξηση της Dr προκαλεί μετάθεση της καμπύλης ρευστοποίησης σε πιο μεγάλες τιμές CSR , και αυτό παρατηρείται για όλες τις εξετασθείσες τιμές σ'_{vo} .



Σχήμα 3.13 Καμπύλες αντοχής σε αρχική ρευστοποίηση για $\sigma_{vo'}=40\text{KPa}$ και 160kPa , και τέσσερις, κάθε φορά, τιμές $Dr=20,40,60$ και 80% , με βάση αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης, όπως προκύπτουν από το προσομοίωμα *ntua-sand* για την άμμο Nevada (βλ. Andrianopoulos et al. 2010)

Προσεκτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων αυτών υποδεικνύει ότι και οι καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για 40kPa βρίσκονται σε πιο υψηλές τιμές CSR απ' ό,τι οι αντίστοιχες (ίδιου Dr) για 160kPa. Αυτό υποδεικνύει ότι το προσομοίωμα αποτυπώνει την πειραματικά μετρηθείσα (σε φυσικές άμμους) μείωση της αντοχής σε ρευστοποίηση με την αύξηση της σ'_{vo} , η οποία είναι και αναμενόμενη καθώς η αύξηση της σ'_{vo} καθιστά το έδαφος ίδιου δείκτη πόρων πιο συστολικό, και άρα πιο ρευστοποιήσιμο.

Συνεπώς, ως μία πρώτη αδρή προσέγγιση, προκύπτει ότι η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης στην αντοχή μιας φυσικής άμμου ομοιάζει με την αντίστοιχη επίδραση της αύξησης της σχετικής πυκνότητάς της. Η βασική αυτή παρατήρηση αποτέλεσε τη βάση για την λογική προσομοίωσης της επίδρασης της σταθεροποίησης ως μιας ψευδο-αύξησης της πυκνότητας, και επιβεβαιώνεται ποσοτικά με τα ανωτέρω αποτελέσματα.

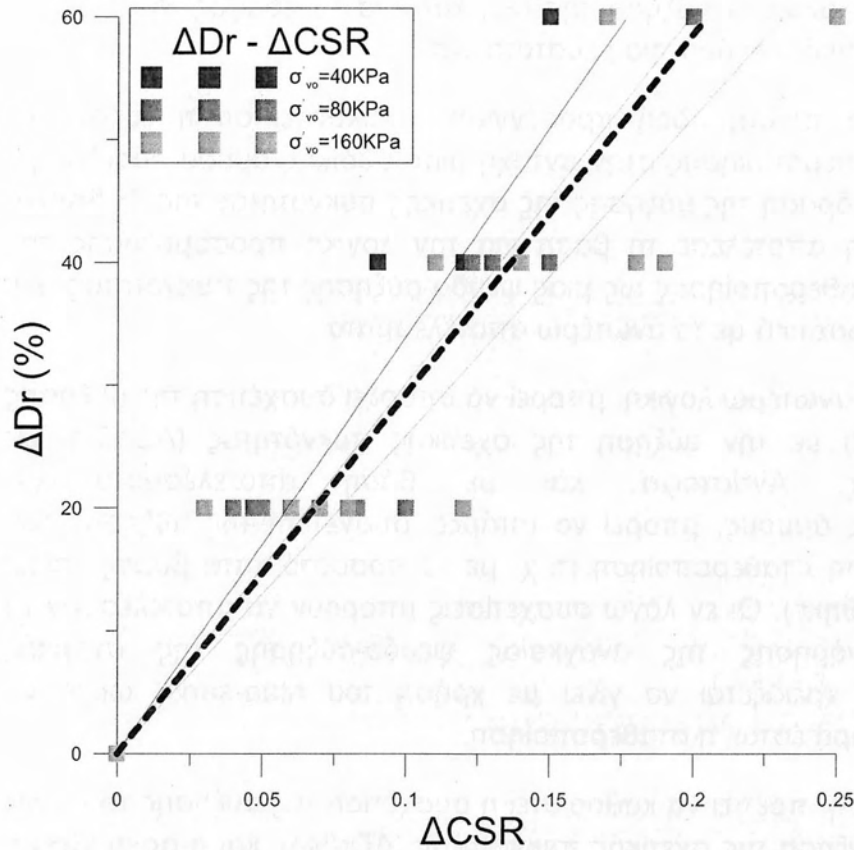
Βασιζόμενοι στην ανωτέρω λογική, μπορεί να υπάρξει συσχέτιση της αύξησης του CSR (ΔCSR) με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας ($\Delta Dr(\%)$) σε φυσικές άμμους. Αντίστοιχα, και με βάση αποτελέσματα για σταθεροποιημένες άμμους, μπορεί να υπάρξει συσχέτιση της αύξησης του CSR (ΔCSR) με τη σταθεροποίηση (π.χ. με το ποσοστό κατά βάρος $cs(\%)$ που χρησιμοποιήθηκε). Οι εν λόγω συσχετίσεις μπορούν να αποτελέσουν το εργαλείο βαθμονόμησης της αναγκαίας ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας που χρειάζεται να γίνει με χρήση του *ntua-sand*, ώστε να προσομοιωθεί, αδρά έστω, η σταθεροποίηση.

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να καθοριστεί η συσχέτιση της αύξησης του CSR (ΔCSR) με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας ($\Delta Dr(\%)$), και η αρχή γίνεται με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα. Μετά από επεξεργασία των καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση στις προηγούμενες σελίδες, προκύπτουν ζεύγη $\Delta Dr(\%)$ - ΔCSR για διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις $\sigma'_{vo} = 40, 80$ και 160 kPa . Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.14, απ' όπου προκύπτει ότι η αύξηση της σχετικής πυκνότητας $\Delta Dr(\%)$ οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές ΔCSR όσο αυξάνει η αρχική ενεργός τάση, ή με άλλα λόγια η προβλεπόμενη αντοχή σε ρευστοποίηση είναι πιο ευαίσθητη σε αύξηση της σχετικής πυκνότητας $\Delta Dr(\%)$. Παρόλα αυτά, η επίδραση αυτή είναι σχετικώς μικρή, και μια ενιαία συσχέτιση $\Delta Dr(\%) - \Delta CSR$ είναι επαρκής, και αυτή παρουσιάζεται με τη διακεκομμένη γραμμή και ισούται με:

$$\Delta Dr(\%) = 240 \Delta CSR$$

Επισημαίνεται ότι για τις συσχετίσεις αυτές ελήφθησαν υπόψη δεδομένα για δύο τιμές του αριθμού κύκλων για ρευστοποίηση, $Nl=5$ και $Nl=10$, ώστε να ληφθεί υπόψη και το αν οι καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση δε μετατοπίζονται εντελώς παράλληλα προς τα άνω, αλλά πιθανώς υπόκεινται

και σε ελαφρά περιστροφή. Τα αποτελέσματα δεν υποδεικνύουν αξιόλογη σχετική διαφοροποίηση, και συνεπώς η μία και ενιαία σχέση $\Delta Dr(\%) - \Delta CSR$ είναι επαρκής.



Σχήμα 3.14 Συσχέτιση αύξησης CSR (ΔCSR) που οδηγεί σε ρευστοποίηση (σε 5 και 10 κύκλους φόρτισης) λόγω αύξησης της σχετικής πυκνότητας ΔDr (%) στην άμμο Nevada, με βάση αστράγγιστες δοκιμές απλής διάτμησης όπως προκύπτουν από το προσομοίωμα *ntua-sand*

Επιπλέον, τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα για τη σταθεροποίηση (βλ. Βελαλής και Παπαγιαννάκης 2012) υποδεικνύουν ότι με βάση όλα τα δημοσιευμένα αποτελέσματα για διάφορες άμμους (Lazaro-Cardenas, Τογουρα), διάφορες αρχικές τάσεις (από 29.4kPa έως 88.2kPa), διάφορες σχετικές πυκνότητες (40% έως 60%), η σταθεροποίηση επιβάλλει ΔCSR που κυμαίνεται από 0.01 (για μικρές τάσεις και μεγάλες Dr) έως και 0.2 κατά μέγιστο. Συνεπώς, αν ο στόχος είναι η χρήση του *ntua-sand* για την αδρή προσομοίωση της σταθεροποίησης με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, η υπό χρήση ΔDr θα κυμαίνεται από +2.4% έως +60%.

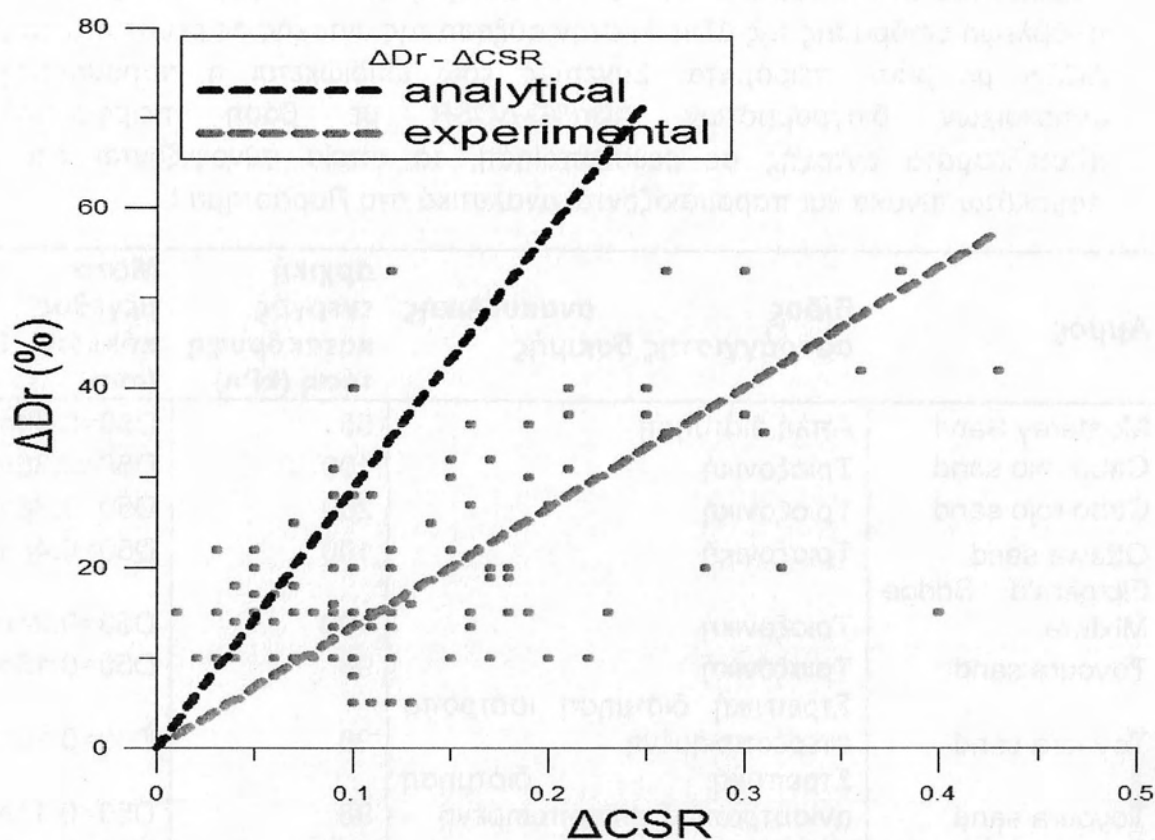
3.5.3 Πειραματικά αποτελέσματα διεθνούς βιβλιογραφίας

Όμως, όλα όσα προέκυψαν στην προηγούμενη παράγραφο αφορούσαν την επίδραση της $\Delta D_r(\%)$ στην προβλεπόμενη αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση ΔCSR , με βάση το προσομοίωμα *ntua-sand*, και όχι πειραματικά αποτελέσματα. Όμως είναι ασαφές το πόσο ρεαλιστική είναι η πρόβλεψη επίδρασης της $\Delta D_r(\%)$ στην αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση ΔCSR με βάση πειράματα. Συνεπώς εδώ επιδιώκεται η παρουσίαση αντιστοιχών διαγραμμάτων $\Delta D_r(\%)$ - ΔCSR με βάση πειραματικά αποτελέσματα αντοχής σε ρευστοποίηση, τα οποία συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα και παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι.

Άμμος	Είδος ανακυκλικής αστράγγιστης δοκιμής	αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση (kPa)	Μέσο μέγεθος κόκκων D50 (mm)
Monterey Sand	Απλή διάτμηση	55	D50=0.44mm
Cabo rojo sand	Τριαξονική	100	D50=0.36mm
Cabo rojo sand	Τριαξονική	200	D50=0.36mm
Ottawa sand	Τριαξονική	100	D50=0.4mm
Fitzgerald Bridge Mixture	Τριαξονική	100	D50=0.2mm
Toyoura sand	Τριαξονική	98	D50=0.16mm
Toyoura sand	Στρεπτική διάτμηση ισότροπα στερεοποιημένη	98	D50=0.16mm
Toyoura sand	Στρεπτική διάτμηση ανισοτροπικά στεροποιημένη	98	D50=0.16mm
Sengenyama sand	Τριαξονική	131	D50=0.39mm
Sengenyama sand	Στρεπτική διάτμηση ανισοτροπικά στερεοποιημένη	131	D50=0.39mm
Fuzhou sand	Τριαξονική	50	D50=0.35mm
Fuzhou sand	Τριαξονική	100	D50=0.35mm
Fuzhou sand	Τριαξονική	200	D50=0.35mm
Monterey	Τριαξονική	100	D50=0.5mm
Monterey	Απλή διάτμηση	80	D50=0.36mm
Playa Santa sand	Τριαξονική	100	D50=0.48mm
Toyoura sand	Στρεπτική διάτμηση	98	D50=0.16mm
Lazaro-Cardenas sand	Απλή διάτμηση	29.4	D50=0.18mm

Πίνακας 3.15 Είδος δοκιμών, τύποι άμμων, αρχικό επίπεδο τάσεων για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές ρευστοποίησης που επιλέχτηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία για μελέτη της επίδρασης της σχετικής πυκνότητας D_r

Στο Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία που συνοψίζονται στον Πίνακα 3.15 σε όρους διαγραμμάτων $\Delta Dr(\%)$ - ΔCSR . Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται όλα μαζί τα πειραματικά αποτελέσματα ανεξαρτήτως αρχικής τάσης, τύπου ανακυκλικής δοκιμής, τύπου άμμου και κοκκομετρίας αυτού.



Σχήμα 3.16 Συσχέτιση αύξησης CSR (ΔCSR) που οδηγεί σε ρευστοποίηση (σε 5 και 10 κύκλους φόρτισης) λόγω αύξησης της σχετικής πυκνότητας ΔDr (%) σε φυσικές άμμους από διαφόρων τύπων ανακυκλικές δοκιμές, σε διαφόρων επιπέδων τάσεων και σε διαφόρων τύπων άμμου, με βάσει τα δεδομένα του Πίνακα 3.15

Σε μία πρώτη ανάγνωση του διαγράμματος παρατηρείται εύρος μεταβολής ΔDr έως και 55% και εύρος μεταβολής ΔCSR έως 0.45, με πολύ μεγάλη διασπορά. Ως μέση τιμή καμπύλης μπορεί να θεωρηθεί η παρακάτω:

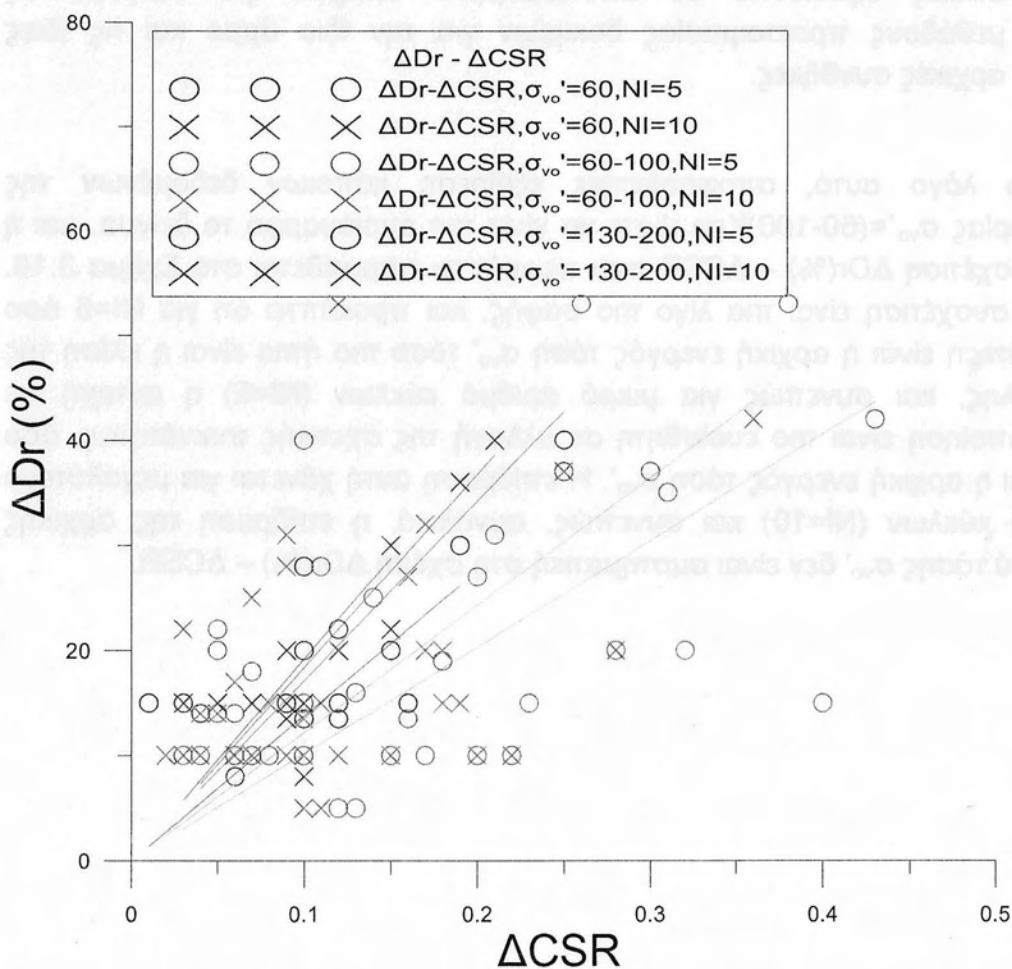
$$\Delta Dr(\%) = 143 \Delta CSR.$$

Συγκρίνοντας τη μέση καμπύλη από τα πειραματικά αποτελέσματα, με εκείνη με βάση τις αναλύσεις με το ntu-sand προκύπτει ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ τους. Δηλαδή προκύπτει ότι το ntu-sand είναι λιγότερο ευαίσθητο σε μεταβολή ΔDr απ' ό,τι τα πειραματικά αποτελέσματα, ή με άλλα λόγια, ότι για να προκληθεί η επιθυμητή αύξηση ΔCSR στις προβλέψεις του προσομοιώματος (δηλαδή η επιθυμητή αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση) θα πρέπει να αυξηθεί παραπάνω η σχετική πυκνότητα απ' ό,τι

υποδεικνύουν τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για φυσικές άμμους. Αυτή η διαφορά θεωρείται αποτέλεσμα της βαθμονόμησης του προσομοιώματος και όχι αποτέλεσμα των καταστατικών του σχέσεων, και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να είναι γνωστή στο χρήστη.

Προσπαθώντας να διερευνηθεί ο λόγος της σχετικά μεγάλης διασποράς στα πειραματικά αποτελέσματα, γίνεται προσπάθεια ομαδοποίησής τους με βάση διάφορα κριτήρια. Αρχικώς η ομαδοποίηση γίνεται με βάση την αρχική ενεργό τάση, αλλά ανεξαρτήτως μεγέθους κόκκων και είδους δοκιμής. Έτσι προκύπτουν τρεις ομάδες δεδομένων, που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

- 1) Δοκιμές με αρχική ενεργό τάση $\sigma_{vo}' \leq 60 \text{KPa}$
- 2) Δοκιμές με αρχική ενεργό τάση $\sigma_{vo}' = (60-100) \text{KPa}$
- 3) Δοκιμές με αρχική ενεργό τάση $\sigma_{vo}' = (130-200) \text{KPa}$



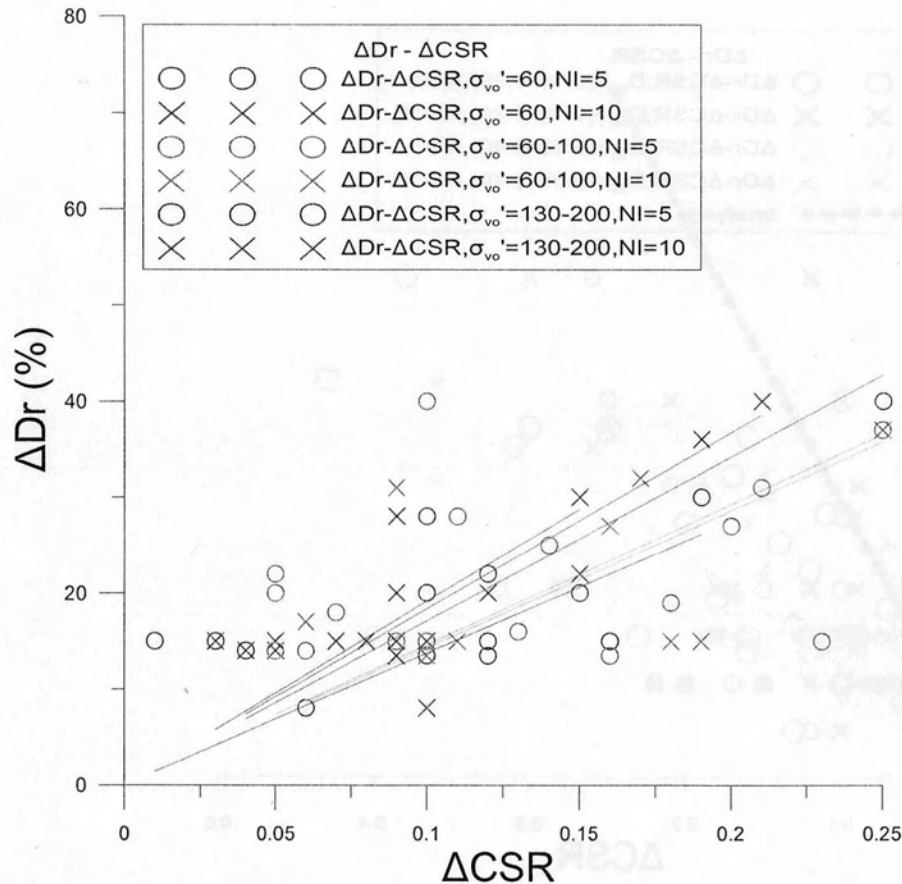
Σχήμα 3.17 Συσχέτιση αύξησης CSR (ΔCSR) που οδηγεί σε ρευστοποίηση (σε 5 και 10 κύκλους φόρτισης) λόγω αύξησης της σχετικής πυκνότητας ΔDr (%) σε φυσικές άμμους υπό ανακυκλικές δοκιμές, με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 3.5.6α μετά από ομαδοποίηση με κριτήριο την αρχική ενεργό τάση σ_{vo}'

Στο Σχήμα 3.17 γίνεται σαφές, ότι για όλες τις ομάδες σ_{vo}' η καμπύλη που αντιπροσωπεύει τον εκάστοτε αρχικό αριθμό κύκλων $NI=5$ έχει μικρότερη κλίση από την αντίστοιχη καμπύλη των $NI=10$. Δηλαδή, για δεδομένο ΔDr (%) η καμπύλη των $NI=5$ αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή ΔCSR . Ωστόσο, δεν προκύπτει κάποια σαφής συσχέτιση της αύξησης της αντοχής σε ρευστοποίηση ΔCSR με αύξηση της ΔDr με την αρχική ενεργό τάση.

Θεωρήθηκε, ότι είναι πιθανό να επηρεάζονται τα δεδομένα από δύο παράγοντες:

- i) από τον σαφώς μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων στην κατηγορία $\sigma_{vo}'=(60-100)Kpa$, και
- ii) από την παρουσία ακραίων τιμών, οι οποίες δεν είναι στατιστικά σημαντικές στην κατηγορία δεδομένων $\sigma_{vo}'=(60-100)Kpa$, και οι οποίες οφείλονται σε αποτελέσματα δοκιμών για διαφορετικές μεθόδους προετοιμασίας δοκιμίων για την ίδια άμμο και τις ίδιες αρχικές συνθήκες.

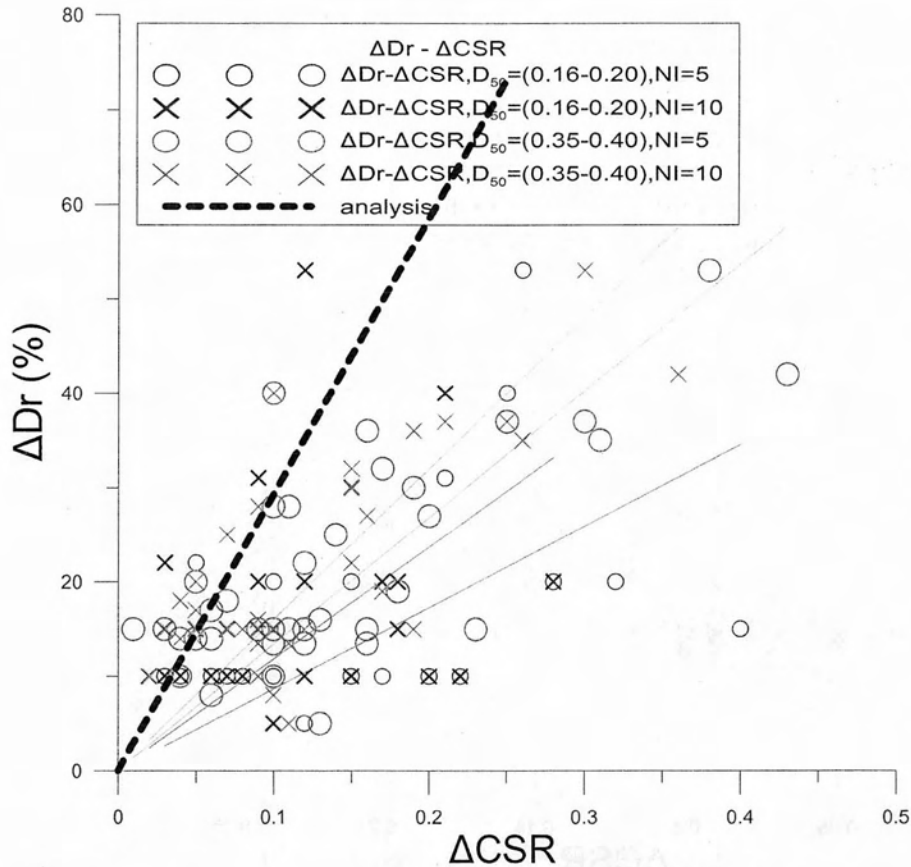
Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε εξαίρεση κάποιων δεδομένων της κατηγορίας $\sigma_{vo}'=(60-100)Kpa$ ώστε να γίνει πιο ομοιόμορφο το δείγμα, και η νέα συσχέτιση $\Delta Dr(\%) - \Delta CSR$ που προκύπτει παρατίθεται στο Σχήμα 3.18. Η νέα συσχέτιση είναι πια λίγο πιο σαφής, και προκύπτει ότι για $NI=5$ όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ενεργός τάση σ_{vo}' τόσο πιο ήπια είναι η κλίση της καμπύλης, και συνεπώς για μικρό αριθμό κύκλων ($NI=5$) η αντοχή σε ρευστοποίηση είναι πιο ευαίσθητη σε αλλαγή της σχετικής πυκνότητας, όσο αυξάνει η αρχική ενεργός τάση σ_{vo}' . Η επίδραση αυτή χάνεται για μεγαλύτερο αριθμό κύκλων ($NI=10$) και συνεπώς, συνολικά, η επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης σ_{vo}' δεν είναι συστηματική στη σχέση $\Delta Dr(\%) - \Delta CSR$.



Σχήμα 3.18 Συσχέτιση αύξησης CSR (ΔCSR) που οδηγεί σε ρευστοποίηση (σε 5 και 10 κύκλους φόρτισης) λόγω αύξησης της σχετικής πυκνότητας ΔDr (%) σε φυσικούς άμμους υπό ανακυκλικές δοκιμές, με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 3.5.6α μετά από ομαδοποίηση με κριτήριο την αρχική ενεργό τάση (απομειωμένο δείγμα για $\sigma'_{vo}=(60-100)kPa$)

Εν συνεχεία, έγινε μία νέα ομαδοποίηση δεδομένων. Αυτή τη φορά, κριτήριο κατηγοριοποίησης ήταν το μέσο μέγεθος κόκκων άμμου στις δοκιμές. Οι δύο ομάδες δεδομένων, που επιλέχτηκαν είναι οι εξής:

- i) άμμοι με μέγεθος κόκκων $D_{50}=0.16-0.20mm$, και
- ii) άμμοι με μέγεθος κόκκων $D_{50}=0.35-0.40mm$.



Σχήμα 3.19 Συσχέτιση αύξησης CSR (ΔCSR) που οδηγεί σε ρευστοποίηση (σε 5 και 10 κύκλους φόρτισης) λόγω αύξησης της σχετικής πυκνότητας ΔDr (%) σε φυσικές άμμους και ανακυκλικές δοκιμές, με βάσει τα δεδομένα του Πίνακα 3.1 μετά από ομαδοποίηση με κριτήριο το μέσο μέγεθος των κόκκων

Στο Σχήμα 3.19 παρατηρείται, ότι όσο πιο μεγάλο είναι το μέσο μέγεθος των κόκκων d_{50} , τόσο πιο ήπια είναι η κλίση της καμπύλης, δηλαδή η αντοχή σε ρευστοποίηση των σχετικά χονδρόκοκκων άμμων επηρεάζεται πιο έντονα από την αύξηση της πυκνότητας συγκριτικά με εκείνη των λεπτόκοκκων άμμων, και αυτό είναι συστηματικό ανεξαρτήτως αριθμού κύκλων για ρευστοποίηση.

Επισημαίνεται συνολικά ότι παρότι υπάρχει μια επίδραση του μέσου μεγέθους κόκκων στην ευαισθησία της αντοχής σε ρευστοποίηση στην αλλαγή της σχετικής πυκνότητας, το εύρος των δεδομένων και η διασπορά τους δε

συνιστούν να λαμβάνεται αυτή συστηματικά υπόψη. Συνεπώς, μια πιο απλή προσέγγιση μιας μέσης καμπύλης για τα πειραματικά αποτελέσματα που είναι μικρότερης κλίσης από εκείνη για τις αριθμητικές προσομοιώσεις είναι πιο κατάλληλη, δεδομένων όλων των ασαφειών.

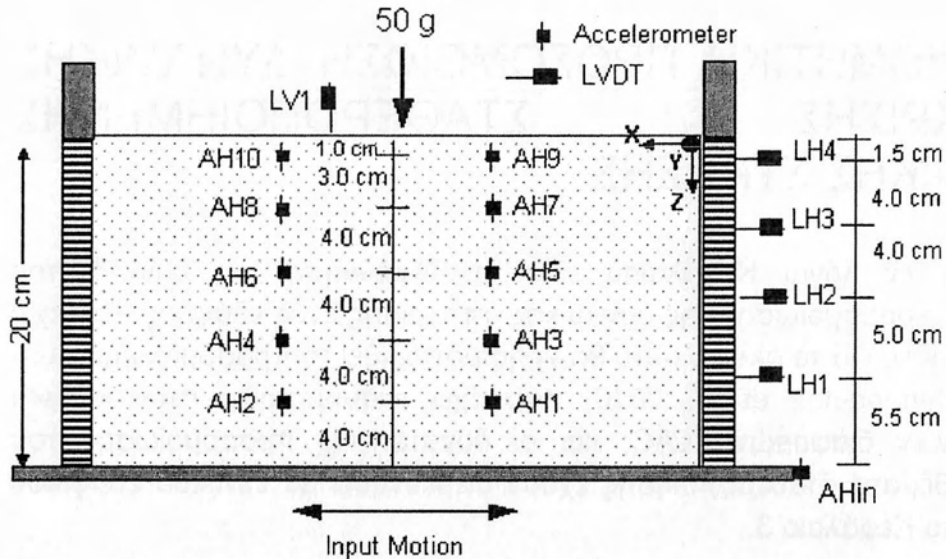
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Στόχος του εν λόγω Κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αριθμητικής προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ενός εδάφους που έχει σταθεροποιηθεί. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί το προσομοίωμα ntuasand (Andrianopoulos et al. 2010) που έχει ενσωματωθεί στον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC, και οι δυνατότητες προσομοίωσης του οποίου σε θέματα σταθεροποίησης έχουν διερευνηθεί σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου στο Κεφάλαιο 3.

4.1 Πείραμα δυναμικής φόρτισης σταθεροποιημένου εδάφους σε φυγοκεντριστή

Για το σκοπό του Κεφαλαίου αυτού επελέγη ένα δυναμικό πείραμα σε φυγοκεντριστή που αφορά στη δυναμική απόκριση οριζόντιας ομοιόμορφης εδαφικής στρώσης που έχει σταθεροποιηθεί με κολλοειδή πυριτία. Διεξήχθη στο Rensselaer Polytechnic Institute RPI από τους Gallagher, Ahmet και Abdoun (2007). Οι εν λόγω ερευνητές μελέτησαν τη δυναμική συμπεριφορά μιας στρώσης εδάφους βάθους 10 μέτρων, που αποτελούνταν από **σταθεροποιημένη** άμμο Nevada 120, πυκνότητας $D_r=40\%$.

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του μοντέλου ήταν η χρήση ενός εύμητου κουτιού (laminar box), που περιελάμβανε μία στοίβα από ορθογώνιους δακτυλίους αλουμινίου, που χωρίζονταν από γραμμικά ρουλεμάν τοποθετημένα έτσι ώστε να επιτρέπονται σχετικές κινήσεις μεταξύ των δακτυλίων με ελάχιστη τριβή. Οι διαστάσεις του κουτιού ήταν 460mm και 370 mm στο επίπεδο και 260 mm καθ' ύψος (βλέπε Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Σκαρίφημα δοκιμής με μετρητές για το πείραμα φυγοκεντριστή (Gallagher, Ahmet και Abdoun (2007).

Εν συνεχεία, το κουτί γεμίστηκε με άμμο Nevada No. 120 σχετικής πυκνότητας $D_r=40\%$. Μετά την τοποθέτηση άμμου, η εδαφική στρώση σταθεροποιήθηκε με κολλοειδή πυριτία LUDOX-SM με ποσοστό κατά βάρος 10%. Με περιστροφή στα 50g, τα 20cm της εδαφικής στρώσης στο μοντέλο αντιστοιχούσε σε συνολικό πάχος 10m στο πρωτότυπο, το οποίο υποβλήθηκε σε 20 κύκλους ημιτονοειδούς φόρτισης, συχνότητας 2Hz παράλληλα στη βάση του κουτιού με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης $\pm 0.2g$.

Χρησιμοποιήθηκαν πέντε LVDTs για τη μέτρηση μετατοπίσεων, ένας εκ των οποίων αφορούσε τη καθίζηση της επιφάνειας (LV1). Τοποθετήθηκαν επίσης και επιταχυνσιόμετρα AH σε διάφορα βάθη για την μέτρηση των οριζοντίων επιταχύνσεων (βάθη 8μ, 6μ, 4μ, 2μ, 0.5μ). Επειδή η σταθεροποίηση μειώνει σημαντικά τη διαπερατότητα του εδάφους, μετρήσεις πίεσης πόρων δεν έγιναν.

4.2 Προσομοίωση επίδρασης σταθεροποίησης, μέσω ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας του εδάφους

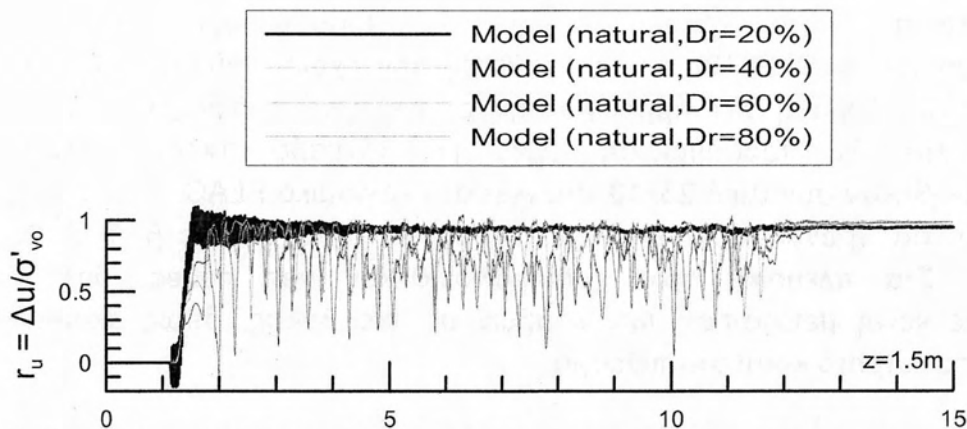
Η επίδραση της σταθεροποίησης θα προσομοιωθεί αρχικώς με ψευδο-αύξηση της πυκνότητας (παράγραφος 4.2), δηλαδή όπως ακριβώς έχει κατοχυρωθεί με σύγκριση πειραμάτων-προσομοιώσεων σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου (βλ. Κεφάλαιο 3). Αυτό γίνεται παρά το γεγονός ότι η σχετική πυκνότητα του φυσικού εδάφους παραμένει αναλλοίωτη με τη σταθεροποίηση. Ο λόγος αυτής της θεωρητικώς λανθασμένης θεώρησης έχει αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 3. Πιο συγκεκριμένα, η ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας έχει στόχο την αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση, κάτι που προκαλεί και η σταθεροποίηση μέσω της μετατροπής του υγρού των πόρων σε γέλη.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα nua-sand (Andrianopoulos et al. 2010), με τις σταθερές που έχουν βαθμονομηθεί για άμμο Nevada, δηλαδή την άμμο για την οποία έγινε η δυναμική δοκιμή φυγοκεντριστή. Η προσομοίωση έγινε με κάναβο 1x1m, δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 23x10 στοιχεία στο λογισμικό FLAC. Η διέγερση επιβλήθηκε σα χρονοϊστορία επιτάχυνσης στους κόμβους της βάσης του καννάβου. Στα πλευρικά όρια χρησιμοποιήθηκαν tied nodes, δηλαδή επιβλήθηκε κοινή μετατόπιση των κόμβων σε ίδιο βάθος, όπως ακριβώς επιβάλλει το εύτημο κουτί στο πείραμα.

Η προσομοίωση της σταθεροποίησης διερευνήθηκε παραμετρικά, όπως ακριβώς έγινε και σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου. Με άλλα λόγια, έγιναν αναλύσεις για εδάφη με σχετική πυκνότητα $D_r = 20, 40, 60$ και 80% . Επισημαίνεται ότι η άμμος στο πείραμα είχε $D_r = 40\%$, συνεπώς:

- η ανάλυση με $D_r = 20\%$ δεν αντιπροσωπεύει προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης, αφού αντιστοιχεί σε D_r μικρότερο της φυσικής άμμου. Έγινε όμως χάριν πληρότητας και συμβατότητας με τις προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 3
- η ανάλυση με $D_r = 40\%$ δεν αντιπροσωπεύει προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης, αφού αντιστοιχεί σε D_r ίσο με εκείνο της φυσικής άμμου. Όμως αφού δεν έγινε ποτέ αντίστοιχο πείραμα για τη δυναμική απόκριση 10μ φυσικής άμμου Nevada με $D_r=40\%$, το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην απόκριση αυτή. Συνεπώς, η σύγκριση του αποτελέσματος της ανάλυσης αυτής με τα πειραματικά αποτελέσματα για τη σταθεροποιημένη άμμο, υποδεικνύει την επίδραση της σταθεροποίησης.
- η ανάλυση με $D_r = 60\%$ αντιπροσωπεύει προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης, αφού αντιστοιχεί σε D_r μεγαλύτερο της φυσικής άμμου ($\Delta D_r=20\%$).
- η ανάλυση με $D_r = 80\%$ αντιπροσωπεύει προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης, αφού αντιστοιχεί σε D_r μεγαλύτερο της φυσικής άμμου ($\Delta D_r=40\%$).

Για να διερευνηθεί το τι καθορίζει ουσιαστικά τη συμπεριφορά των 10μ άμμου με βάση τις αναλύσεις, παρουσιάζονται επιπλέον εδώ και τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για το συντελεστή υπερπίεσεων πόρων r_u ενδεικτικά σε βάθος 1.5m, δηλαδή πλησίον της επιφάνειας του εδάφους, για τις διάφορες αναλύσεις με διαφορετικές τιμές D_r (Σχήμα 4.2). Όπως αναφέρθηκε πριν, δεν υπάρχουν μετρήσεις r_u στο πείραμα λόγω της φύσης του σταθεροποιημένου εδάφους.



Σχήμα 4.2 Χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων σε βάθος 1.5μ για αναλύσεις φυσικής άμμου με διαφορετικές σχετικές πυκνότητες $Dr = 20, 40, 60$ και 80%

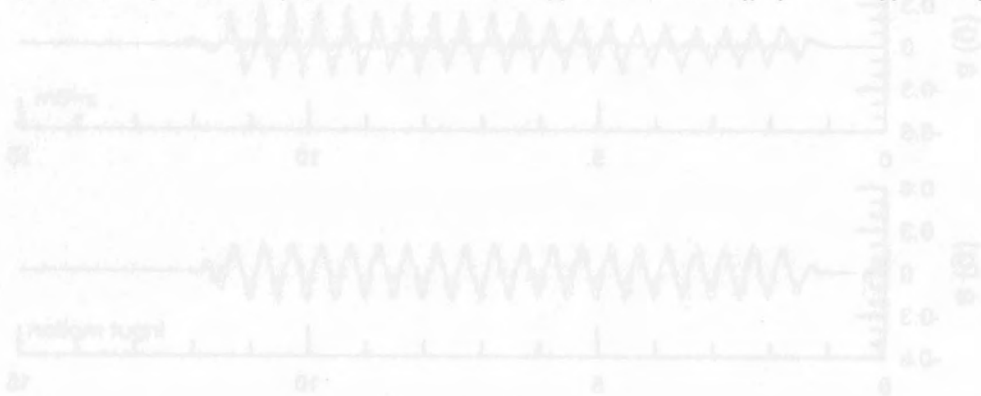
Όπως προκύπτει, αύξηση της Dr καθυστερεί την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων, αλλά για $Dr = 20$ και 40% η ρευστοποίηση ($r_u = 1$) δεν αποφεύγεται. Για $Dr = 60\%$, στιγμές με $r_u=1$ υπάρχουν, αλλά η μέση τιμή r_u είναι σαφώς μικρότερη, και αυτό γίνεται πολύ πιο έντονο για $Dr = 80\%$ όπου η μέση τιμή r_u είναι της τάξης του 0.6, καθώς υπάρχουν παλμοί διαστολικότητας (dilation spikes) που ρίχνουν την τιμή του r_u σε τιμές έως και σχεδόν 0. Συνολικά βέβαια προκύπτει, ότι ακόμη και για $Dr = 80\%$, η ρευστοποίηση δεν έχει αποφευχθεί για τη σχετικά έντονη διέγερση βάσης 0.2g. Συνεπώς, μια τιμή $\Delta Dr = 40\%$ διαφαίνεται αρχικώς ως ανεπαρκής να αποτυπώσει την επίδραση της σταθεροποίησης.

Πληρέστερη και ορθότερη εικόνα μπορεί να αποκτήσει κανείς αν κοιτάξει τις οριζόντιες επιταχύνσεις με το βάθος, σε κάθε μία από τις αναλύσεις, και να τις συγκρίνει όπου δει με τις αντίστοιχες μετρήσεις. Αυτό γίνεται στα Σχήματα 4.3 έως και 4.6, όπου οι μετρήσεις οριζοντίων επιταχύνσεων με το βάθος (κόκκινες γραμμές) συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναλύσεων (μαύρες γραμμές) για $Dr = 20, 40, 60$ και 80% .

Από το Σχήμα 4.3 προκύπτει ότι ενώ η διέγερση είναι ημιτονοειδής και επιβάλλεται σε βάθος 10μ, μόλις 2μ πιο ψηλά (σε βάθος 8μ δηλαδή) πρακτικώς έχει εξαλειφθεί, και ο λόγος είναι η πρακτικώς άμεση και σε όλα τα βάθη πλήρης ρευστοποίηση της εδαφικής στρώσης με $Dr = 20\%$. Φυσικά, σε βάθος 2μ, πλησίον της επιφάνειας, η απομείωση της ταλάντωσης είναι ακόμη πιο έντονη, καθώς το έδαφος πρακτικώς δεν ταλαντώνεται. Ο λόγος είναι ότι προκύπτει $r_u = 1.0$ σχεδόν από την αρχή της δόνησης, μια τιμή που παραμένει πρακτικώς σταθερή (βλ. Σχήμα 4.2). Αποτέλεσμα αυτού είναι η πρακτικώς πλήρης απώλεια της διατμητικής αντοχής του εδάφους, δηλαδή το έδαφος συμπεριφέρεται σχεδόν σα παχύρρευστο υγρό μέσα στο οποίο δε μπορούν να μεταδοθούν διατμητικά κύματα S (δηλαδή δε μπορεί να μεταδοθεί ταλάντωση). Επισημαίνεται, ότι σύγκριση με τα πειραματικά

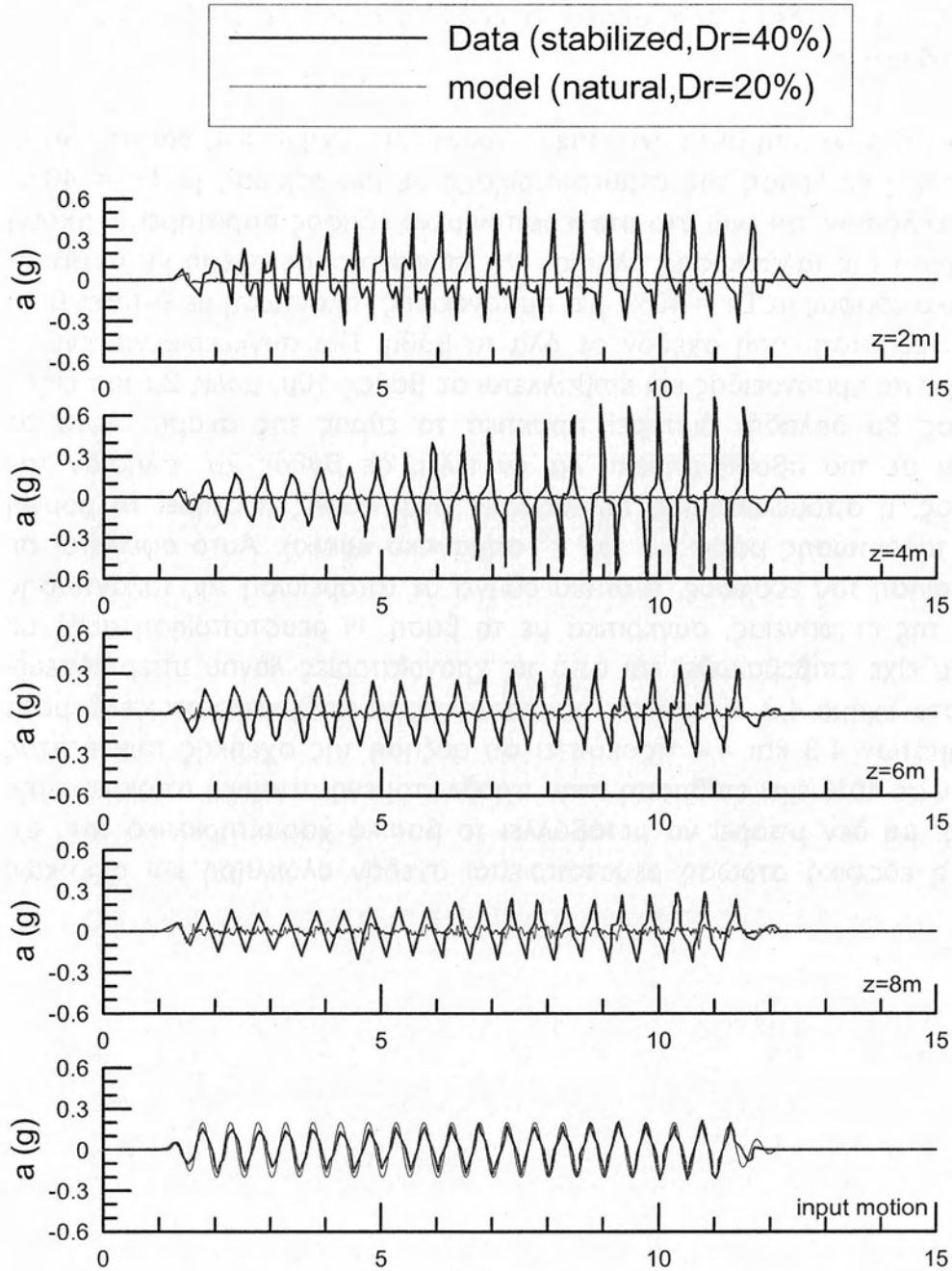
αποτελέσματα εδώ δεν έχει πρακτικό νόημα, καθώς $D_r = 20\% < D_r = 40\%$ του φυσικού εδάφους.

Αντιθέτως, η σύγκριση αυτή έχει σαφές νόημα στο Σχήμα 4.4, και απ' όπου διαφαίνεται η επίδραση της σταθεροποίησης σε μια στρώση με $D_r = 40\%$. Προκύπτει λοιπόν, ότι ενώ στο σταθεροποιημένο έδαφος παρατηρείται ακόμη και ενίσχυση της ταλάντωσης πλησίον της επιφάνειας σε σχέση με τη βάση, στο φυσικό έδαφος με $D_r = 40\%$, μια ημιτονοειδής ταλάντωση με ένταση 0.2g προκαλεί ρευστοποίηση σχεδόν σε όλα τα βάθη. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η διέγερση είναι ημιτονοειδής και επιβάλλεται σε βάθος 10μ, μόλις 2μ πιο ψηλά (σε βάθος 8μ δηλαδή) διατηρεί πρακτικά το εύρος της ακόμη. Αυτό δε συμβαίνει σε πιο αβαθή σημεία, και εν τέλει, σε βάθος 2μ, πλησίον της επιφάνειας, η απομείωση της ταλάντωσης είναι σαφής (διατηρεί τη μορφή σαφούς ταλάντωσης μόλις για τον 1^ο σημαντικό κύκλο). Αυτό οφείλεται σε ρευστοποίηση του εδάφους, η οποία οδηγεί σε απομείωση της ταλάντωσης πλησίον της επιφάνειας, συγκριτικά με τη βάση. Η ρευστοποίηση αυτή σε βάθος 2μ είχε επιβεβαιωθεί και από τις χρονοϊστορίες λόγου υπερπίεσεων πόρων στο Σχήμα 4.2. Επιπλέον, συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα των Σχημάτων 4.3 και 4.4 προκύπτει ότι αύξηση της σχετικής πυκνότητας από 20% σε 40% έχει επίδραση στην προβλεπόμενη σεισμική απόκριση της στρώσης, μα δεν μπορεί να μεταβάλλει το βασικό χαρακτηριστικό της, ότι δηλαδή η εδαφική στρώση ρευστοποιείται σχεδόν ολόκληρη και σχετικώς άμεσα.



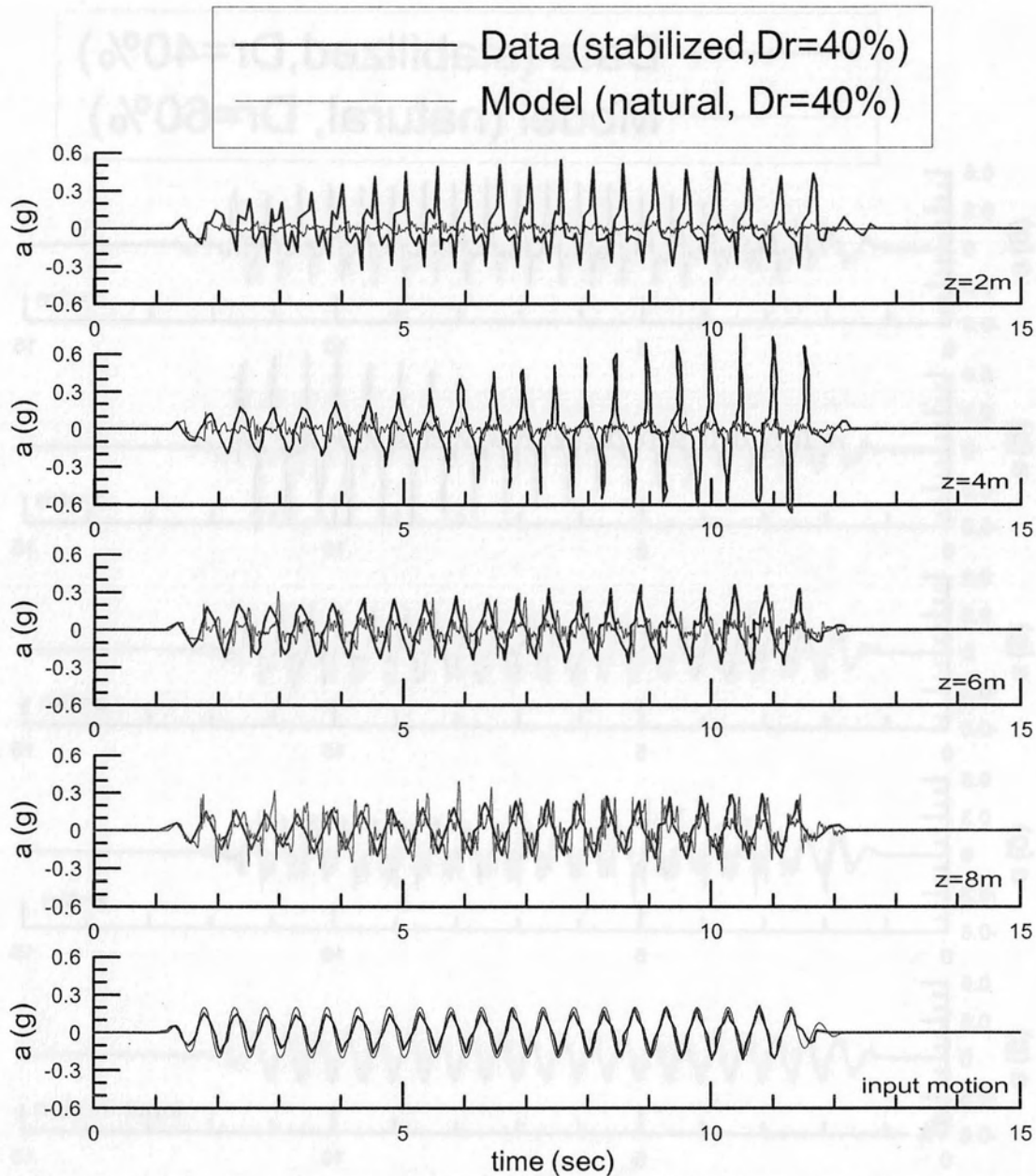
Σχήμα 4.3 Σύγκριση των επιταχύνσεων επιφανείας και σε βάθος 2μ για έδαφος με $D_r = 40\%$ και $\Delta\sigma_v = 20\text{ kPa}$ (από το Σχήμα 4.2).

Από επί του παρόντος, στο Σχήμα 4.4 γίνεται μια πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης επιβάλλοντος $\Delta\sigma_v = 20\text{ kPa}$ από $D_r = 40\%$ σε 60% . Συγκριτικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα για $D_r = 40\%$ (στο Σχήμα 4.3), παρατηρείται ότι η ταλάντωση διατηρείται ως ταλάντωση μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, αλλά όχι και το μέγιστο εύρος της το οποίο και πολύ φθονοειδώς, αλλά πέρα ελαφρώς.



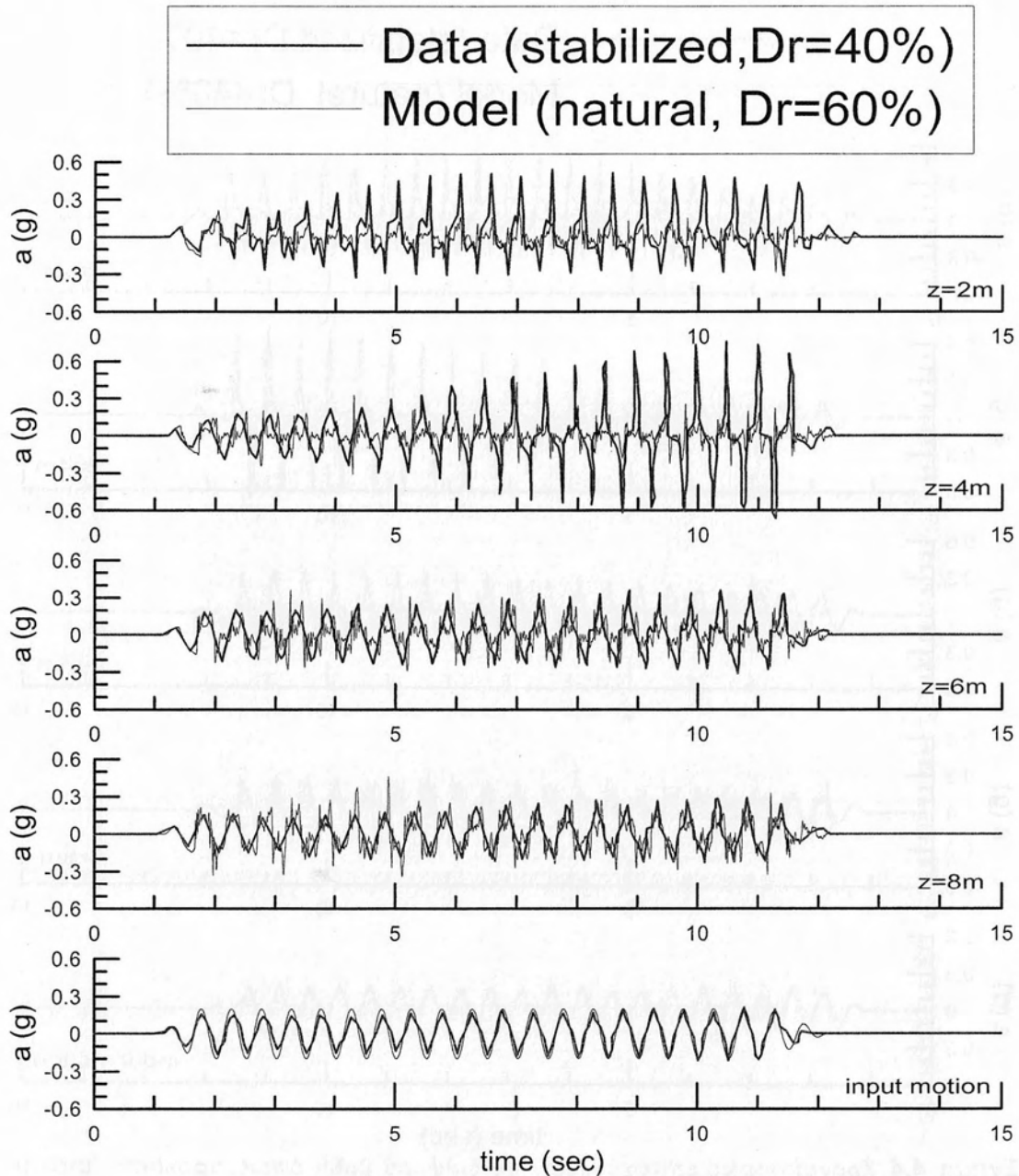
Σχήμα 4.3 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $D_r=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με $D_r=20\%$)

Από εκεί και πέρα, στο Σχήμα 4.5 γίνεται μια πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης επιβάλλοντας $\Delta D_r = 20\%$, από $D_r = 40\%$ σε 60% . Συγκριτικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα για $D_r = 40\%$ (στο Σχήμα 4.4), παρατηρείται ότι η ταλάντωση διατηρείται ως ταλάντωση μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, αλλά όχι και το μέγιστο εύρος της το οποίο και πάλι αφομοιώνεται, αλλά τώρα ελαφρώς.



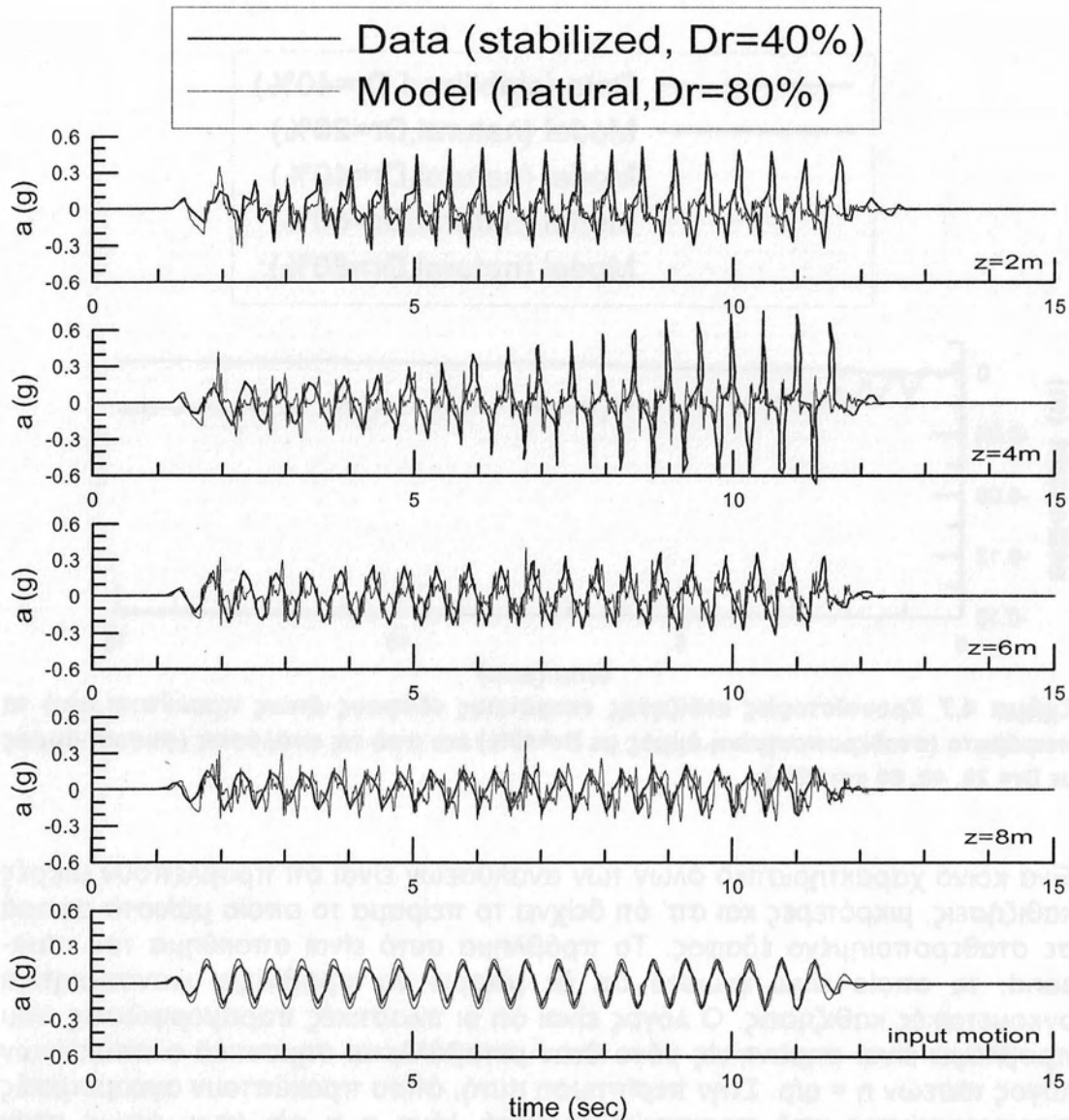
Σχήμα 4.4 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $D_r=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με $D_r=40\%$)

Συνεπώς, το έδαφος πλέον, δεν παρουσιάζει χαρακτηριστικά πλήρους ρευστοποίησης, απλώς εκείνα της ανάπτυξης σημαντικών υπερπίεσεων πόρων, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις χρονοϊστορίες λόγω υπερπίεσεων πόρων στο Σχήμα 4.2. Σε κάθε περίπτωση, η πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης επιβάλλοντας $\Delta D_r = 20\%$ δεν είναι επαρκής (στο Σχήμα 4.5), καθώς η ταλάντωση στην επιφάνεια (αλλά και μέχρι βάθους 6μ) υποεκτιμάται σαφώς συγκριτικά με εκείνη του σταθεροποιημένου εδάφους.



Σχήμα 4.5 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $D_r=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με $D_r=60\%$)

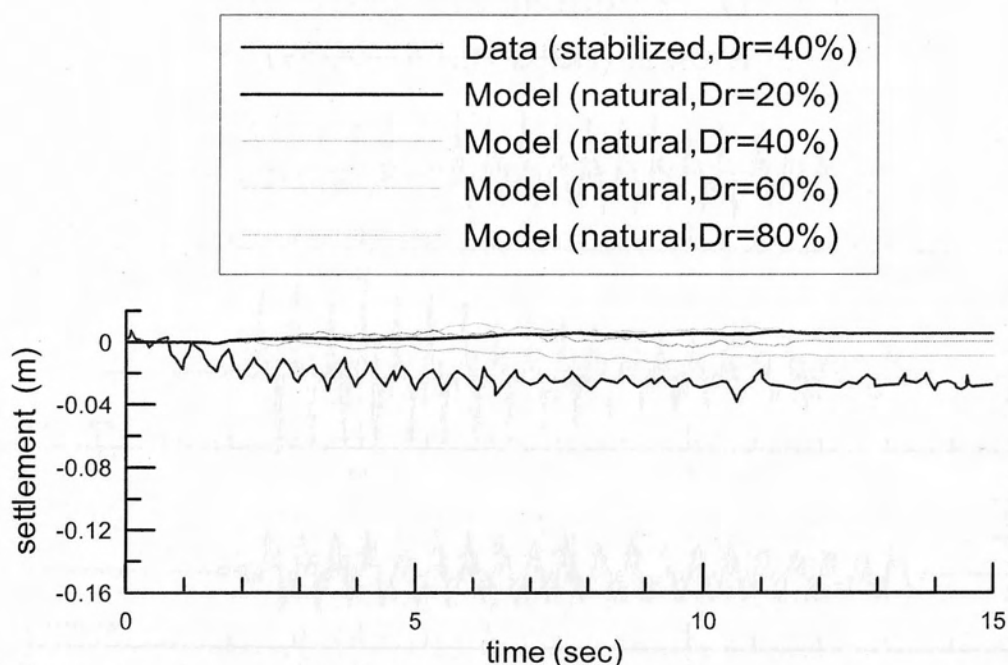
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.6 γίνεται μια δεύτερη προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης επιβάλλοντας $\Delta D_r = 40\%$, από $D_r = 40\%$ σε 80% . Συγκριτικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα για $D_r = 40\%$ (στο Σχήμα 4.4) και $D_r = 60\%$ (στο Σχήμα 4.5), παρατηρείται ότι η ταλάντωση είναι σαφής σε όλα τα βάθη, και μάλιστα προβλέπεται και κάποια ελαφρά ενίσχυση στην επιφάνεια συγκριτικά με τη βάση της στρώσης. Συνεπώς, το έδαφος πλέον, δεν παρουσιάζει παρά μόνο ενδείξεις ρευστοποίησης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις χρονοϊστορίες λόγω υπερπιέσεων πόρων στο Σχήμα 4.2, όπου υπάρχουν μόνο στιγμές όπου παρατηρείται $r_u = 1.0$.



Σχήμα 4.6 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $D_r=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με $D_r=80\%$)

Από εκεί και πέρα, η ταλάντωση για φυσικό έδαφος με $D_r = 80\%$ εξακολουθεί να υπολείπεται σε ένταση εκείνης για σταθεροποιημένο έδαφος σε βάθη έως 4μ. Συνεπώς, και η δεύτερη προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης επιβάλλοντας $\Delta D_r = 40\%$ δεν είναι επαρκής (στο Σχήμα 4.6), αλλά βέβαια είναι σαφώς καλύτερη εκείνης για $\Delta D_r = 20\%$ (στο Σχήμα 4.5).

Τέλος, μια πλήρης προσπάθεια προσομοίωσης δε μπορεί παρά να περιλαμβάνει και συγκρίσεις σε όρους καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους. Έτσι, στο Σχήμα 4.7 συγκρίνονται συγκεντρωτικά οι χρονοϊστορίες καθιζήσεων για το σταθεροποιημένο έδαφος (κόκκινη γραμμή) με εκείνες που προκύπτουν από αναλύσεις για φυσικό έδαφος με $D_r = 20, 40, 60$ και 80% (με διάφορα χρώματα).



Σχήμα 4.7 Χρονοϊστορίες καθίζησης επιφάνειας εδάφους όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $Dr=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με $Dr= 20, 40, 60$ και 80%)

Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των αναλύσεων είναι ότι προβλέπουν μικρές καθιζήσεις, μικρότερες και απ' ό,τι δείχνει το πείραμα το οποίο μάλιστα αφορά σε σταθεροποιημένο έδαφος. Το πρόβλημα αυτό είναι αποκύημα του *ntua-sand*, το οποίο είναι γνωστό ότι δε μπορεί να προβλέψει ικανοποιητικά ογκομετρικές καθιζήσεις. Ο λόγος είναι ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις που προβλέπει είναι σημαντικές μόνο όταν μεταβάλλεται σημαντικά ο αποκλίνων λόγος τάσεων $\eta = q/p$. Στην περίπτωση αυτή, όπου προκύπτουν ογκομετρικές παραμορφώσεις υπό πρακτικώς σταθερό λόγο $\eta = q/p$ (π.χ. όπως στην ισοτροπική στερεοποίηση όπου $\eta = 0$, ή στην 1- Δ στερεοποίηση όπου $\eta =$ σταθερό και συνάρτηση του λόγου K_0), το προσομοίωμα προβλέπει πρακτικώς μόνο ελαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις, οπότε το συνολικό τους μέγεθος είναι προφανώς μικρό. Από απόψεως σύγκρισης με τα πειράματα όμως, συνολικά το σταθεροποιημένο έδαφος αναμένεται να προκαλεί μικρές καθιζήσεις, και η προσομοίωση του με το *ntua-sand* προβλέπει μικρές καθιζήσεις, έστω και λόγω ανεπάρκειας του προσομοιώματος.

Συνεπώς, η προσέγγιση για προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας, αν και θεωρητικώς λανθασμένη, είναι ποιοτικώς ορθή, και σε επίπεδο προβλήματος συννοριακών τιμών. Παρόλα αυτά, μια προσαύξηση $\Delta Dr = 40\%$ με χρήση του *ntua-sand* αποδεικνύεται ανεπαρκής, τουλάχιστον για το πρόβλημα που διερευνήθηκε εδώ. Ένας πιθανός λόγος είναι ότι μια προσαύξηση $\Delta Dr = 40\%$ με το προσομοίωμα αντιστοιχεί, υπό αστράγγιστες έστω συνθήκες, σε $\Delta CSR = 0.167$, το οποίο με τη σειρά του αντιστοιχεί σε προσαύξηση μόλις $\Delta Dr = 24\%$ για πραγματικές άμμους, μια μεταβολή που δε

μπορεί να θεωρηθεί εξαιρετικά μεγάλη. Επισημαίνεται ότι οι μεταβολές αυτές εκτιμήθηκαν με βάση τις σχέσεις μέσης τιμής για τις αναλύσεις και τα πειράματα που εκτιμήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.

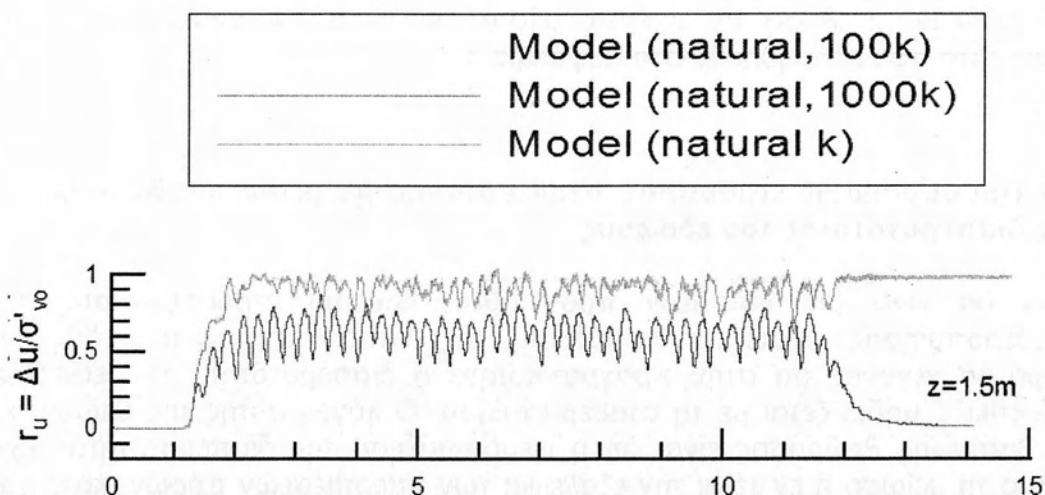
4.3 Προσομοίωση επίδρασης σταθεροποίησης, μέσω ψευδο-αύξησης της διαπερατότητας του εδάφους

Εδώ θα γίνει μια επιπλέον προσπάθεια έμμεσης προσομοίωσης της σταθεροποίησης, μέσω ψευδο-αύξησης της διαπερατότητας του εδάφους, παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα η διαπερατότητα του εδάφους πρακτικώς μηδενίζεται με τη σταθεροποίηση. Ο λόγος αυτής της θεωρητικά λανθασμένης θεώρησης είναι ότι η ψευδο-αύξηση της διαπερατότητας έχει στόχο τη μείωση ή εν τέλει την εξάλειψη των υπερπιέσεων πόρων, κάτι που κάνει και η σταθεροποίηση μέσω της μετατροπής του υγρού των πόρων σε γέλη.

Όπως και στην παράγραφο 4.2, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα nua-sand (Andrianopoulos et al. 2010), με τις σταθερές που έχουν βαθμονομηθεί για άμμο Nevada, δηλαδή την άμμο για την οποία έγινε η δυναμική δοκιμή φυγοκεντρική. Η προσομοίωση έγινε με τον ίδιο κάρναβο και συνοριακές συνθήκες συνθήκες. Και πάλι, η προσομοίωση της σταθεροποίησης διερευνήθηκε παραμετρικά. Με άλλα λόγια, έγιναν αναλύσεις για εδάφη με σχετική πυκνότητα $D_r = 40\%$, και τρεις (3) τιμές διαπερατότητας, την ρεαλιστική τιμή k , μια τιμή 100 φορές μεγαλύτερη (100k), και μια τιμή 1000 φορές μεγαλύτερη της ρεαλιστικής (1000k). Πιο συγκεκριμένα:

- η ανάλυση με διαπερατότητα k δεν αντιπροσωπεύει προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης, αφού αντιστοιχεί σε διαπερατότητα ίση με εκείνη της φυσικής άμμου. Όμως αφού δεν έγινε ποτέ αντίστοιχο πείραμα για τη δυναμική απόκριση 10μ φυσικής άμμου Nevada με $D_r=40\%$, το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην απόκριση αυτή. Συνεπώς, η σύγκριση του αποτελέσματος της ανάλυσης αυτής με τα πειραματικά αποτελέσματα για τη σταθεροποιημένη άμμο, υποδεικνύει την επίδραση της σταθεροποίησης. Επισημαίνεται ότι η ανάλυση αυτή είναι η ανάλυση $D_r = 40\%$ της παραγράφου 4.2, και αποτελεί ανάλυση αναφοράς και για την παρούσα παράγραφο,
- η ανάλυση με διαπερατότητα 100k αντιπροσωπεύει προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης,
- η ανάλυση με διαπερατότητα 1000k αντιπροσωπεύει επίσης προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης.

Όπως και στην παράγραφο 4.2, για να διερευνηθεί το τι καθορίζει ουσιαστικά τη συμπεριφορά των 10μ άμμου με βάση τις αναλύσεις, παρουσιάζονται επιπλέον εδώ και τα αποτελέσματα των 3 προσομοιώσεων για το συντελεστή υπερπιέσεων πόρων r_u ενδεικτικά σε βάθος 1.5m, δηλαδή πλησίον της επιφάνειας του εδάφους, για τις διάφορες αναλύσεις με διαφορετικές τιμές διαπερατότητας (Σχήμα 4.8). Όπως είναι γνωστό, δεν υπάρχουν μετρήσεις r_u στο πείραμα λόγω της φύσης του σταθεροποιημένου εδάφους.

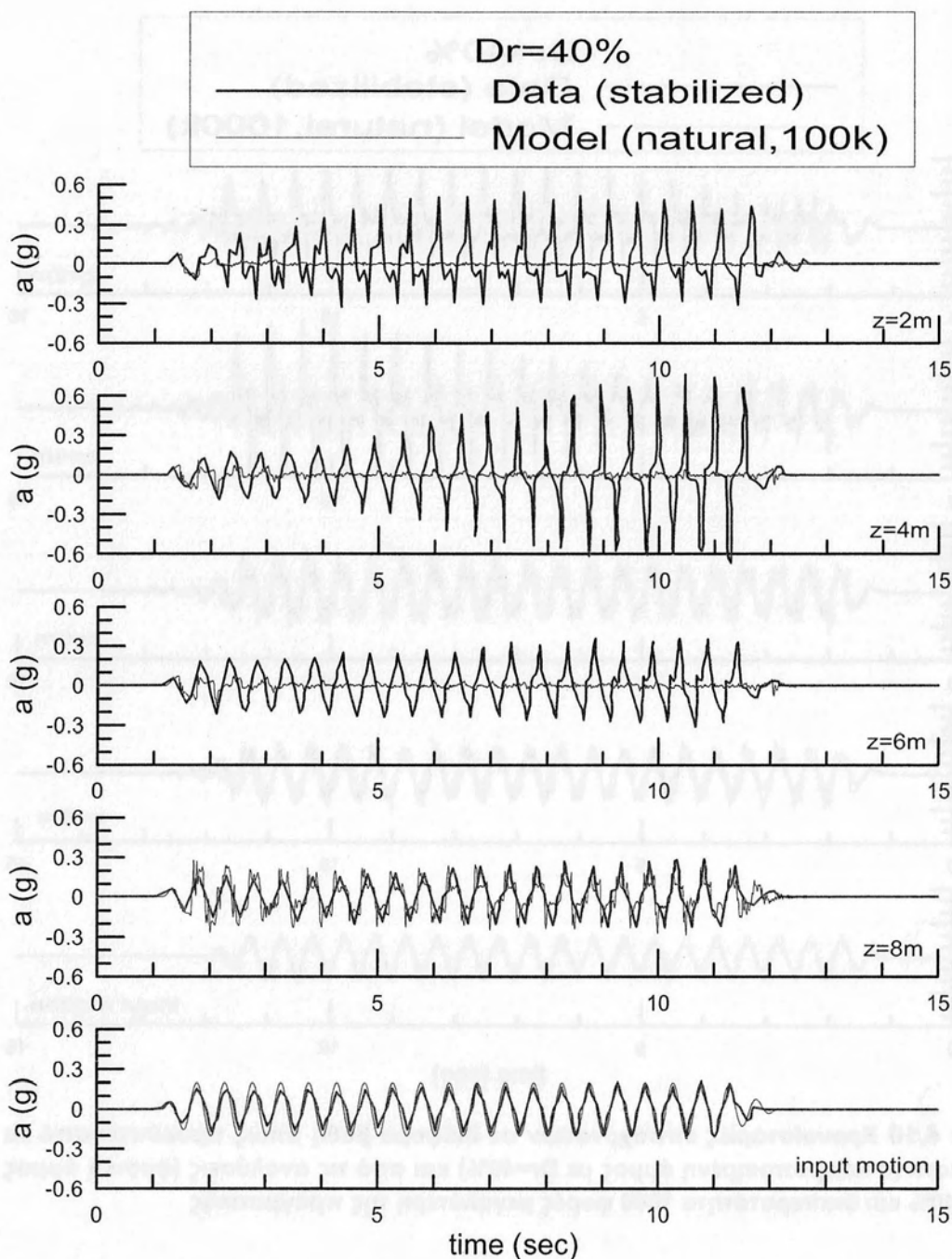


Σχήμα 4.8 Χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων σε βάθος 1.5μ για αναλύσεις φυσικής άμμου με $D_r = 40\%$ και διαφορετικές διαπερατότητες k , 100k, 1000k

Όπως προκύπτει, αύξηση της διαπερατότητας κατά 100 φορές καθυστερεί ελάχιστα την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων, μα η ρευστοποίηση ($r_u = 1$) δεν αποφεύγεται. Αντίθετα, αύξηση της διαπερατότητας κατά 1000 φορές όχι μόνο καθυστερεί, αλλά τελικώς και αποτρέπει τη ρευστοποίηση (μέση τιμή $r_u = 0.6$). Συγκριτικά, η μέση τιμή $r_u = 0.6$ αντιστοιχεί περίπου στην ανάλυση της παραγράφου για $D_r = 80\%$, αλλά εδώ δεν υπάρχουν καθόλου στιγμές με $r_u = 1$. Συνεπώς, σε πρώτη ανάγνωση, μια τέτοια αύξηση της διαπερατότητας, ή πιθανώς και ακόμη μεγαλύτερη, να μπορεί να αποδώσει την επίδραση της σταθεροποίησης, ως μέτρου αναστολής της ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων.

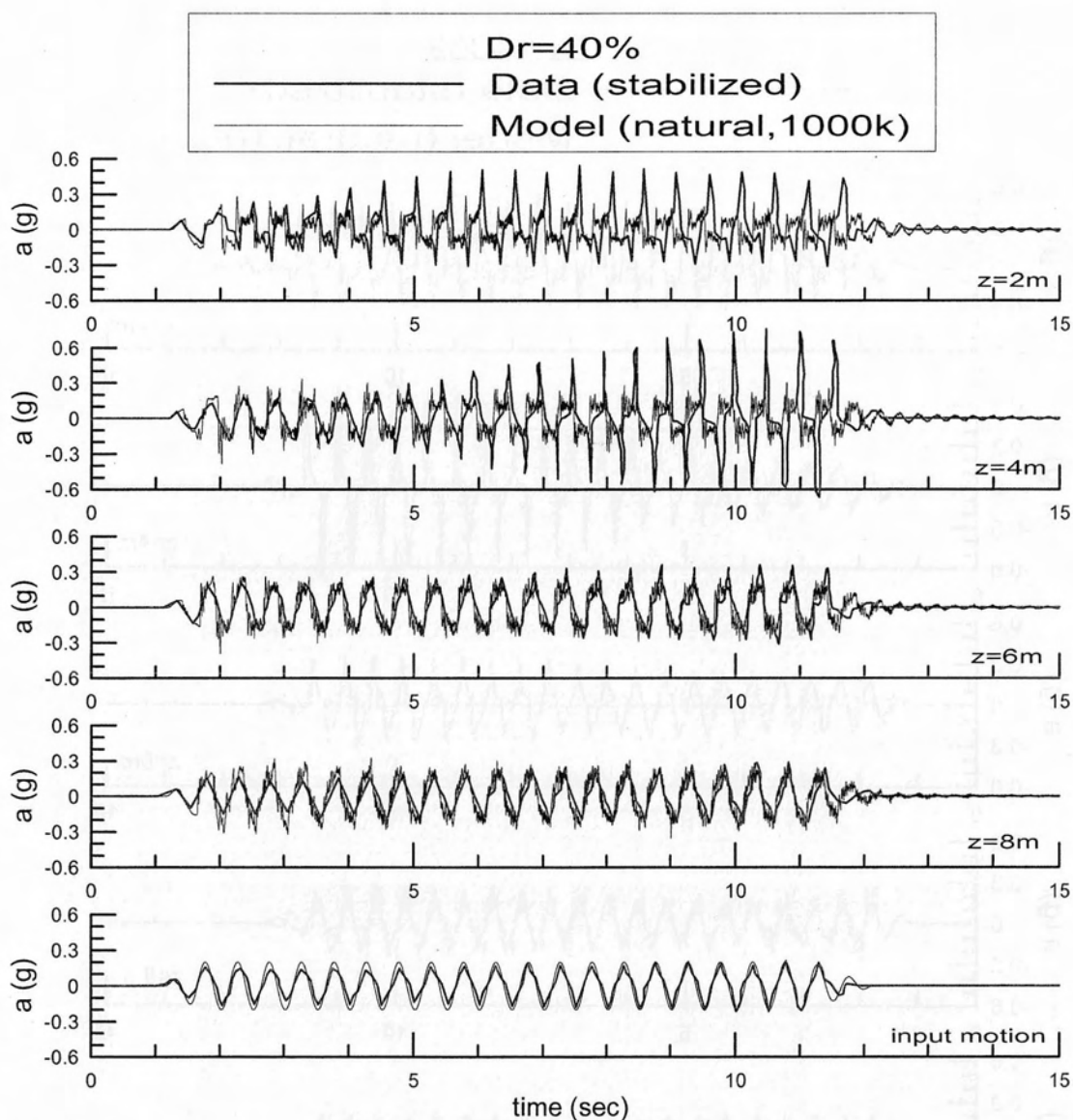
Πληρέστερη και ορθότερη εικόνα μπορεί να αποκτήσει κανείς αν κοιτάξει τις οριζόντιες επιταχύνσεις με το βάθος, σε κάθε μία από τις αναλύσεις, και να τις συγκρίνει όπου δει με τις αντίστοιχες μετρήσεις. Αυτό γίνεται στα Σχήματα 4.9 και 4.10, όπου οι μετρήσεις οριζοντίων επιταχύνσεων με το βάθος (κόκκινες γραμμές) συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναλύσεων (μαύρες γραμμές) για 100k και 1000k. Υπενθυμίζεται η ανάλυση αναφοράς με διαπερατότητα k , τα σχετικά αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4, και δεν επαναλαμβάνεται εδώ.

Έτσι λοιπόν, η σύγκριση πειραμάτων – αναλύσεων στο Σχήμα 4.9 υποδηλώνει αδυναμία της ανάλυσης να αποτυπώσει τη σταθεροποίηση. Ο λόγος είναι ότι ενώ στο σταθεροποιημένο έδαφος παρατηρείται ακόμη και ενίσχυση της ταλάντωσης πλησίον της επιφάνειας σε σχέση με τη βάση, στην ανάλυση για φυσικό έδαφος με 100k, μια ημιτονοειδής ταλάντωση με ένταση 0.2g προκαλεί ρευστοποίηση σχεδόν σε όλα τα βάθη. Πιο συγκεκριμένα, η ημιτονοειδής διέγερση που επιβάλλεται σε βάθος 10μ, μόλις 2μ πιο ψηλά (σε βάθος 8μ δηλαδή) διατηρεί πρακτικά το εύρος της ακόμη.



Σχήμα 4.9 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $D_r=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με $D_r=40\%$ και διαπερατότητα 100 φορές μεγαλύτερη της πραγματικής)

Αυτό δε συμβαίνει σε πιο αβαθή σημεία, και εν τέλει, σε βάθος 2μ, πλησίον της επιφάνειας, η απομείωση της ταλάντωσης είναι σαφής (διατηρεί τη μορφή σαφούς ταλάντωσης μόλις για τον 1^ο σημαντικό κύκλο). Αυτό οφείλεται σε ρευστοποίηση του εδάφους, η οποία οδηγεί σε απομείωση της ταλάντωσης πλησίον της επιφάνειας, συγκριτικά με τη βάση. Η ρευστοποίηση αυτή σε βάθος 2μ είχε επιβεβαιωθεί και από τις χρονοϊστορίες λόγω υπερπίεσεων πόρων στο Σχήμα 4.8.

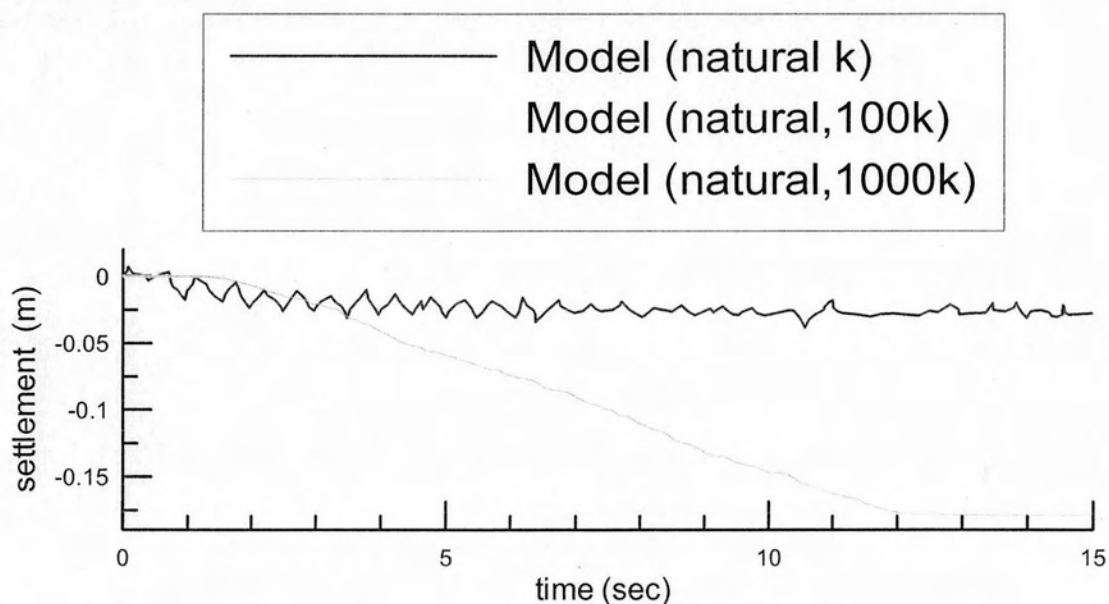


Σχήμα 4.10 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $D_r=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με $D_r=40\%$ και διαπερατότητα 1000 φορές μεγαλύτερη της πραγματικής)

Επιπλέον, συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα των Σχημάτων 4.9 και 4.4 προκύπτει ότι αύξηση της διαπερατότητας κατά 100 φορές έχει ελάχιστη επίδραση στην προβλεπόμενη σεισμική απόκριση της στρώσης, και δεν μπορεί να μεταβάλλει το βασικό χαρακτηριστικό της, ότι δηλαδή η εδαφική στρώση ρευστοποιείται σχεδόν ολόκληρη και σχετικώς άμεσα. Επισημαίνεται ότι αυτό το συμπέρασμα αντιστοιχεί στην επιβληθείσα διέγερση έντασης 0.2g. Αν η διέγερση ήταν μικρότερης έντασης μια τέτοια μεταβολή της διαπερατότητας αναμένεται να είχε σχετικώς μεγαλύτερη επίδραση στην απόκριση.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.10 γίνεται μια δεύτερη προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης επιβάλλοντας 1000 φορές μεγαλύτερη

διαπερατότητα. Συγκριτικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα για διαπερατότητα k (στο Σχήμα 4.4) και $100k$ (στο Σχήμα 4.9), παρατηρείται ότι η ταλάντωση είναι σαφής σε όλα τα βάθη. Συνεπώς, το έδαφος πλέον, δεν παρουσιάζει ενδείξεις ρευστοποίησης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις χρονοϊστορίες λόγου υπερπίεσεων πόρων στο Σχήμα 4.8. Από εκεί και πέρα, η ταλάντωση για φυσικό έδαφος με διαπερατότητα $1000k$ εξακολουθεί να υπολείπεται σε ένταση εκείνης για σταθεροποιημένο έδαφος σε βάθη έως 4 με 6μ. Συνεπώς, και η δεύτερη προσπάθεια προσομοίωσης της σταθεροποίησης επιβάλλοντας διαπερατότητα $1000k$ δεν είναι επαρκής (στο Σχήμα 4.10), αλλά βέβαια είναι σαφώς καλύτερη εκείνης για $100k$ (στο Σχήμα 4.9). Ένα άλλο πρόβλημα που χρήζει επιπλέον διερεύνησης είναι το γεγονός ότι λόγω μεγαλύτερων ενεργών τάσεων (μικρότερων τιμών r_u) η ταλάντωση (στην επιφάνεια τουλάχιστον) δείχνει να αλλάζει δεσπόζουσα περίοδο στο Σχήμα 4.10, σε σχέση με εκείνη στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.11 Χρονοϊστορίες καθίζησης επιφάνειας εδάφους όπως προκύπτει από τα πειράματα (σταθεροποιημένη άμμος με $D_r=40\%$) και από τις αναλύσεις (φυσική άμμος με διαπερατότητα k , $100k$, $1000k$)

Τέλος, μια πλήρης προσπάθεια προσομοίωσης δε μπορεί παρά να περιλαμβάνει και συγκρίσεις σε όρους καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους. Έτσι, στο Σχήμα 4.11 συγκρίνονται συγκεντρωτικά οι χρονοϊστορίες καθιζήσεων για το σταθεροποιημένο έδαφος (κόκκινη γραμμή) με εκείνες που προκύπτουν από αναλύσεις για φυσικό έδαφος με $D_r = 40\%$ με διαπερατότητες k , $100k$ και $1000k$ (με διάφορα χρώματα). Όπως προκύπτει και αναμενόταν, η ανάλυση $100k$ προκαλεί καθιζήσεις αντίστοιχης (μικρής) τάξης μεγέθους με την ανάλυση k . Άλλωστε, οι διαφορές μεταξύ των 2

αναλύσεων σε όλες τις εκφάνσεις της συμπεριφοράς βρέθηκαν μικρές. Δε συμβαίνει το ίδιο και με την ανάλυση 1000k, για την οποία οι καθιζήσεις είναι εξαιρετικά μεγαλύτερες και εν τέλει μη ρεαλιστικές. Αυτό αποτελεί ένα βασικό μειονέκτημα της προσπάθειας προσομοίωσης της σταθεροποίησης μέσω ψευδο-αύξησης της διαπερατότητας.

Συνεπώς, η προσέγγιση για προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της διαπερατότητας, αν και θεωρητικώς λανθασμένη, είναι ποιοτικώς ορθή σε επίπεδο προβλήματος συνοριακών τιμών. Επισημαίνεται βέβαια ότι ακόμη και μια προσαύξηση 1000k με χρήση του n_{tua}-sand αποδεικνύεται ανεπαρκής, τουλάχιστον για το πρόβλημα που διερευνήθηκε εδώ. Ίσως πιο σημαντικά, η εν λόγω μεγάλη αύξηση της διαπερατότητας μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές καθιζήσεις, ένα πρόβλημα που πρέπει να είναι γνωστό στο χρήστη.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μία από τις σημαντικότερες αιτίες δομικής αστοχίας κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων είναι η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (αμμοχάλικες, άμμοι, μίγματα αμμοιλύων, μη πλαστικές υλίες). Δεδομένου ότι η κατασκευή νέων έργων καθώς και η συνέχιση λειτουργίας υφιστάμενων έργων σε καθεστώς ρευστοποίησης δεν επιτρέπεται από τους κανονισμούς, η αποτροπή της ρευστοποίησης μέσω βελτίωσης του εδάφους πριν ή και μετά την κατασκευή αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή. Η αποτροπή της ρευστοποίησης σε θέσεις νέων κατασκευών σε αντίθεση με τις υφιστάμενες κατασκευές δεν παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα.

Μία νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών έναντι ρευστοποίησης, είναι η **παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization)**, κατά την οποία ένας σταθεροποιητής (stabilizer) εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της περιοχής μιας υφιστάμενης κατασκευής. Ο σταθεροποιητής έχοντας αρχικώς χαμηλό ιξώδες εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης. Όταν ο σταθεροποιητής φθάνει στην επιθυμητή θέση αυξάνει (σε ελεγχόμενο χρόνο) το ιξώδες του ραγδαία δημιουργώντας ένα νέο γεωυλικό (σταθεροποιημένο μη-συνεκτικό έδαφος) στη θεμελίωση του κτηρίου. Αυτή η διαδικασία αλλάζει τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού – υγρού πόρων, καθιστώντας το λιγότερο ευάλωτο σε ανάπτυξη σημαντικών ανακυκλικών παραμορφώσεων.

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων άμμων με ευφυή χρήση υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος (NTUA-SAND, των Andrianopoulos et al. 2010). Η βασική υπόθεση εργασίας είναι ότι η συμπεριφορά μιας άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (colloidal silica) αντιστοιχεί στη συμπεριφορά της ίδιας φυσικής άμμου αλλά με σαφώς μεγαλύτερη σχετική πυκνότητα. Η θεώρηση αυτή ενσωματώνεται στην καταστατική προσομοίωση μέσω μιας ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας D_r , ή ισοδύναμα μιας ψευδο-μείωσης του δείκτη πόρων, χωρίς να χρειάζεται αλλαγή στις σταθερές του προσομοιώματος NTUA-SAND. Η προσέγγιση ήταν παραμετρική, και έγιναν προσομοιώσεις για μικρές, μέτριες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις, υπό αρχικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις $\sigma'_{vo} = 40, 80$ και 160 kPa, και σχετικές πυκνότητες $D_r = 20, 40, 60$ και 80% .

Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων σε σταθεροποιημένες άμμους με καταστατικές προσομοιώσεις όπου η επίδραση της σταθεροποίησης εισάγεται ως μια ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας υποδεικνύει ότι:

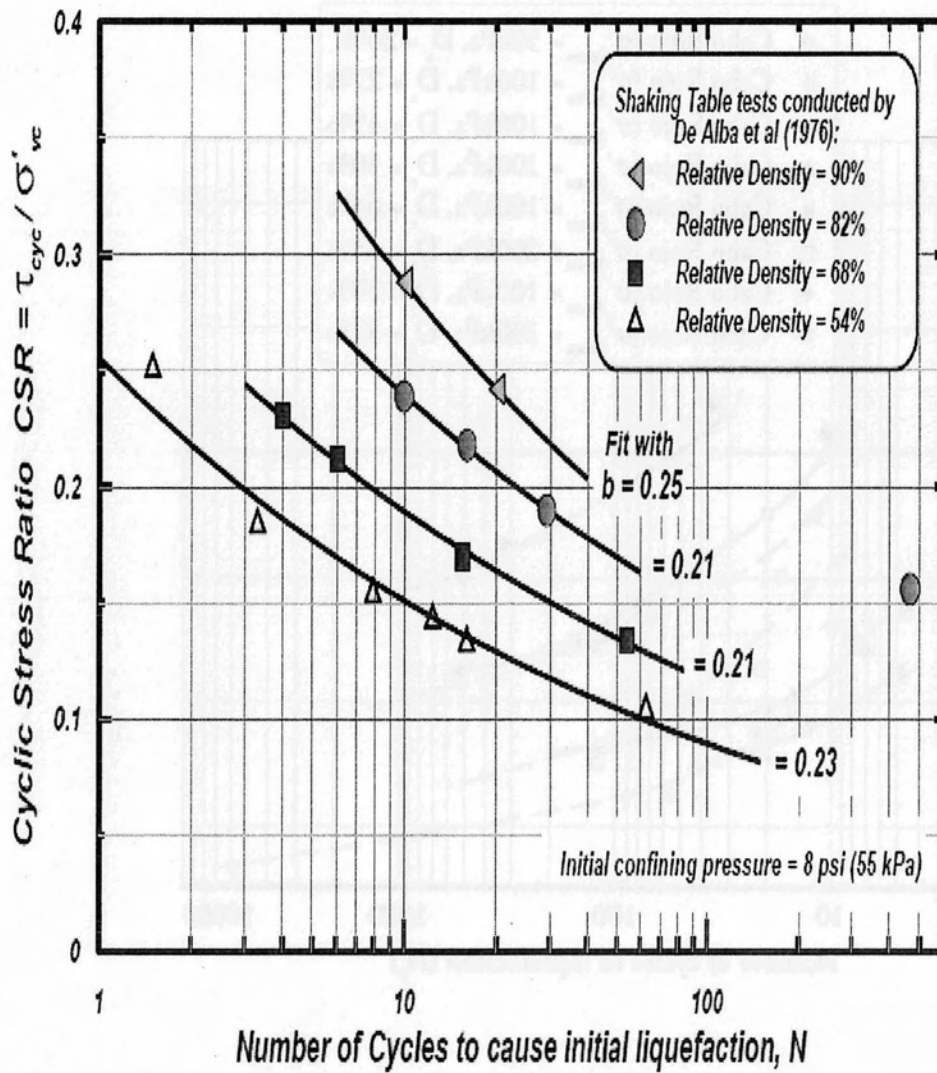
- Για μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις ($\gamma_c < 10^{-5}$), η επίδραση της σταθεροποίησης στην τιμή του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_{max} είναι μικρή (της τάξης του 25%, με αρκετή διασπορά), και η ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας που μπορεί να την αποδώσει καταστατικά θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα μικρή (σαφώς μικρότερη από +20% στην τιμή της D_r).
- Για μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις ($10^{-5} \leq \gamma_c < 10^{-3}$), δεν υπάρχει ουσιώδης επίδραση της σταθεροποίησης στις καμπύλες απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης G/G_{max} και αύξησης της υστερητικής απόσβεσης ξ με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c . Στην περίπτωση αυτή, οι καταστατικές προσομοιώσεις για τις καμπύλες $G/G_{max}-\gamma_c$ και $\xi-\gamma_c$ δεν υποδεικνύουν επίδραση της ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας σε αυτές, και συνεπώς είναι ακριβείς.
- Για μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις ($\gamma_c > 10^{-3}$), η επίδραση της σταθεροποίησης οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση, η οποία ποσοτικοποιείται αδρά ως αύξηση του ανακυκλικού λόγου τάσεων CSR μέχρι και 0.2 για τον ίδιο αριθμό κύκλων δοκιμών. Οι καταστατικές προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι η επίδραση αύξησης της σχετικής πυκνότητας οδηγεί σε σαφώς μικρότερη προσαύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους ΔCSR) συγκριτικά με πειραματικά αποτελέσματα σε φυσικές άμμους. Συνεπώς, προσομοίωση της αύξησης του CSR μέχρι και 0.2 με χρήση του NTUA-SAND χρειάζεται αντίστοιχα μεγάλη ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας ΔD_r (έως και +60%).

Τέλος, διερευνάται η δυνατότητα αριθμητικής προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ενός εδάφους που έχει σταθεροποιηθεί. Για το σκοπό αυτό επελέγη ένα δυναμικό πείραμα σε φυγοκεντριστή (Gallagher et al. 2007) που αφορά στη 1Δ δυναμική απόκριση οριζόντιας ομοιόμορφης εδαφικής στρώσης άμμου Nevada ($D_r = 40\%$) πάχους 10m που έχει σταθεροποιηθεί με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου και υποβάλλεται σε 20 κύκλους ημιτονοειδούς φόρτισης, συχνότητας 2Hz με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης 0.2g. Η προσομοίωση έγινε με το NTUA-SAND και με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC, και υπέδειξε ότι:

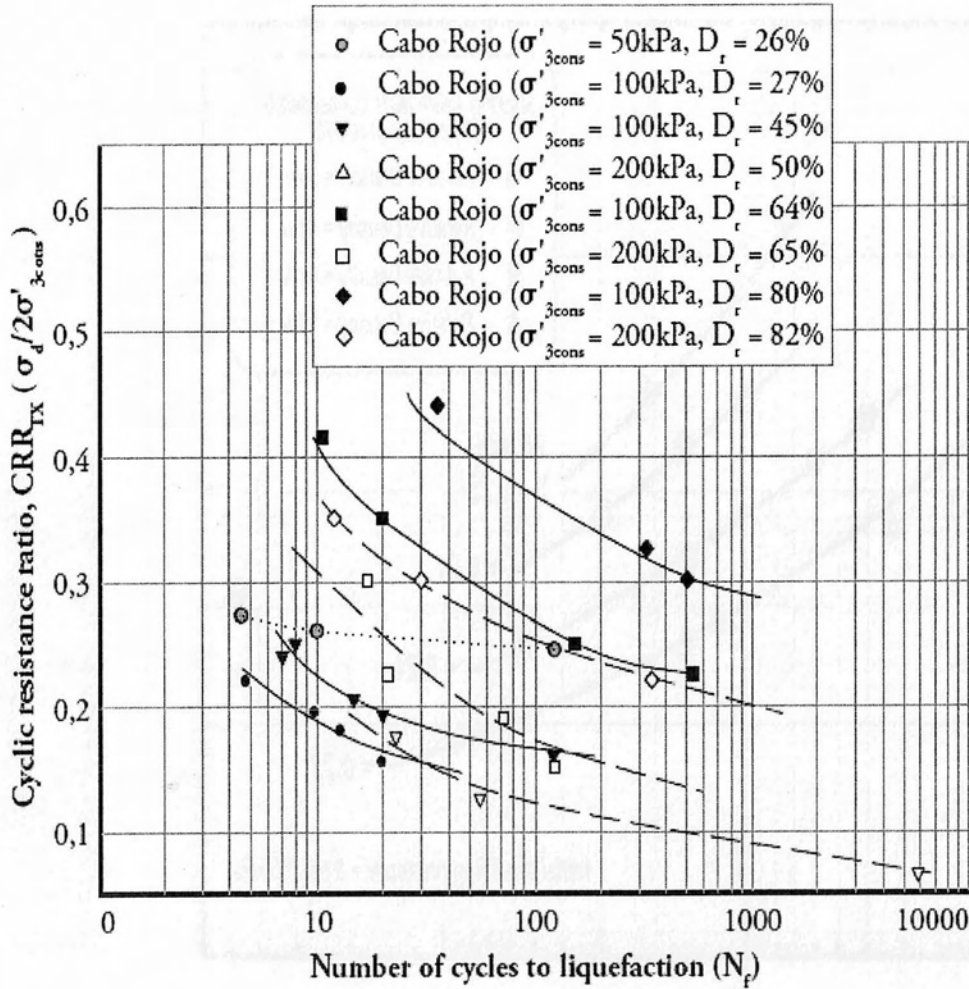
- Η σταθεροποίηση αποτρέπει τη σεισμική ρευστοποίηση, και μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση της ταλάντωσης συγκριτικά με τη βάση της εδαφικής στρώσης και εν γένει μικρές καθιζήσεις.
- Η προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας είναι ποιοτικώς ορθή, και σε επίπεδο προβλήματος συννοριακών τιμών. Παρόλα αυτά, μια προσαύξηση $\Delta D_r = 40\%$ αποδεικνύεται ποσοτικά ανεπαρκής (π.χ. δεν προσομοιώνεται η ενίσχυση της ταλάντωσης στην επιφάνεια). Προβλέπονται μικρές καθιζήσεις, αλλά αυτό οφείλεται κυρίως στο καταστατικό προσομοίωμα που αδυνατεί να προβλέψει μεγάλες τιμές ογκομετρικών καθιζήσεων καθώς αυτές θεωρούνται πρακτικώς ελαστικές.

- Εναλλακτικά, η προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της διαπερατότητας, αν και θεωρητικώς λανθασμένη (καθώς η διαπερατότητα πρακτικώς μηδενίζεται λόγω μετατροπής του υγρού πόρων σε γέλη) είναι ποιοτικώς ορθή. Βέβαια, ακόμη και μια προσαύξηση της διαπερατότητας κατά 1000 φορές αποδεικνύεται ποσοτικά ανεπαρκής (π.χ. δεν προσομοιώνεται η ενίσχυση της ταλάντωσης στην επιφάνεια). Από την άλλη, μια τόσο μεγάλη προσαύξηση της διαπερατότητας μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές καθιζήσεις, ένα πρόβλημα που πρέπει να είναι γνωστό στο χρήστη.

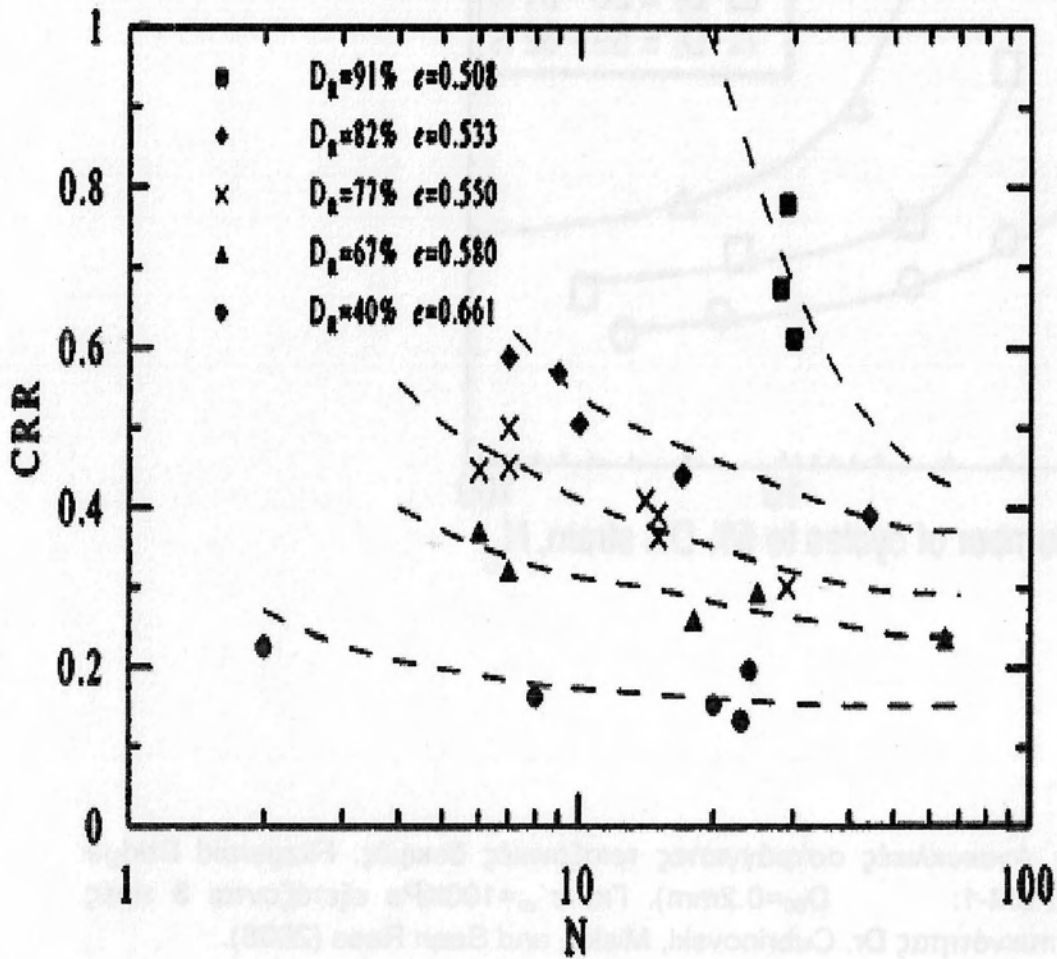
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι



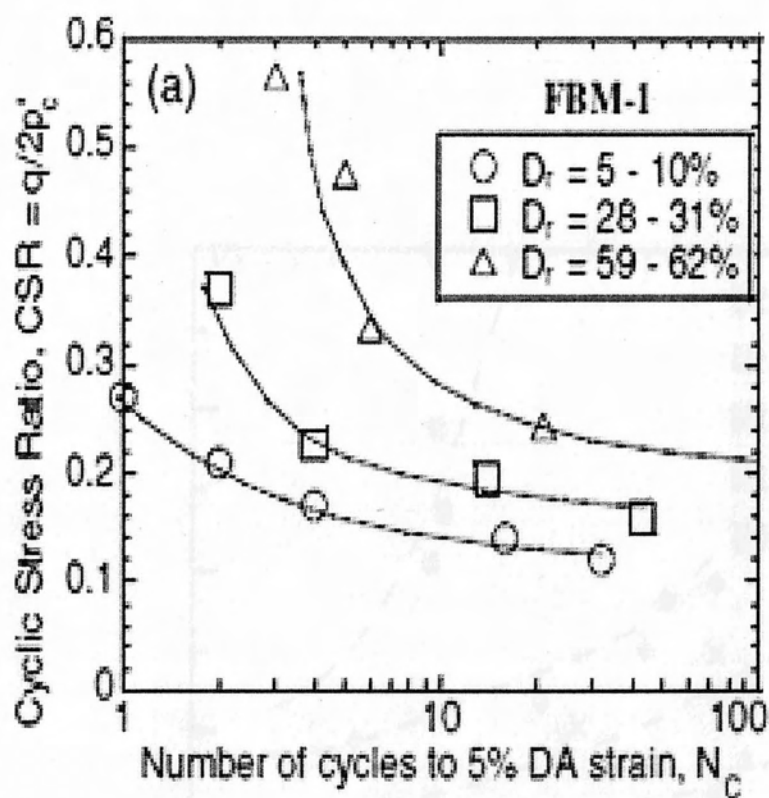
Σχήμα 1: Δοκιμές Απλής Διάτμησης. Άμμος Monterey ($D_{50}=0.44\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=55\text{kPa}$ εξετάζονται 4 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r . De Alba, P., Seed, H. And Chan, C.K. (1976),



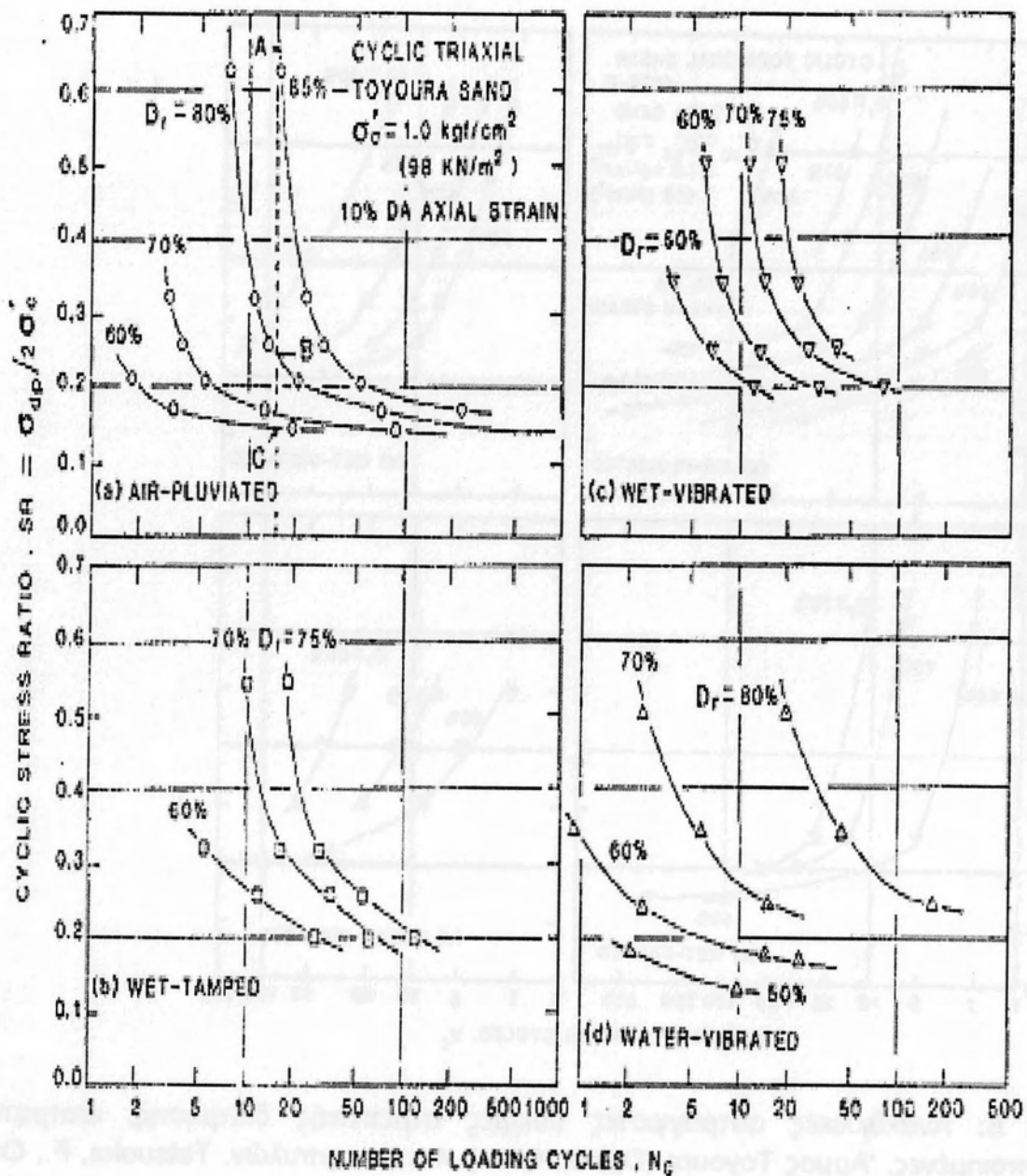
Σχήμα 2: Ανακυκλικές αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές, 'Άμμος Cabo rojo, ($D_{50}=0.36\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=100\text{KPa}$ εξετάζονται 4 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r ενώ για $\sigma'_{vo}=200\text{KPa}$ εξετάζονται 3 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r 3 D_r . Eimar A. Sandoval, Miguel A. Pando, (2012).



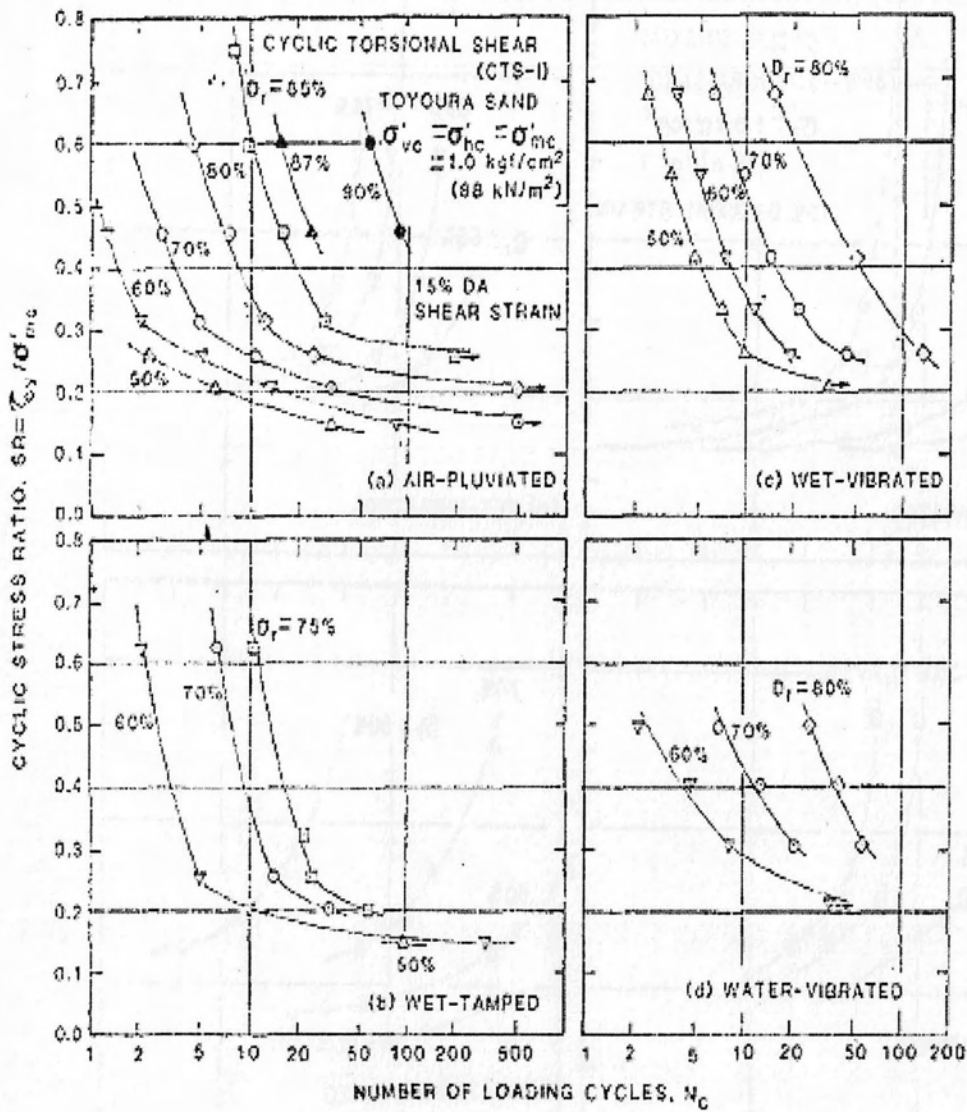
Σχήμα 3: Ανακυκλικές αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές, Άμμος Ottawa ($D_{50} = 0.4\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=100\text{KPa}$ εξετάζονται 5 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r . Carraro J.A., P. Bandini, and R. Salgado, (2003).



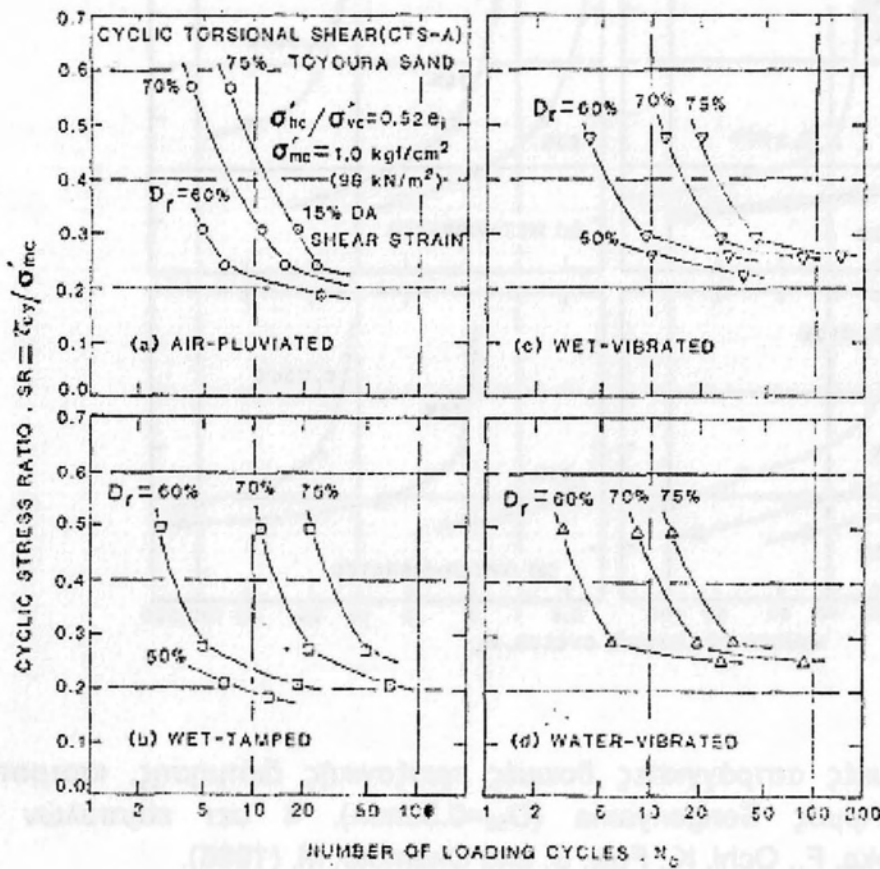
Σχήμα 4: Ανακυκλικές αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές. Fitzgerald Bridge Mixture (FBM-1: $D_{50}=0.2\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=100\text{KPa}$ εξετάζονται 3 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r . Cubrinovski, Misko, and Sean Rees (2008).



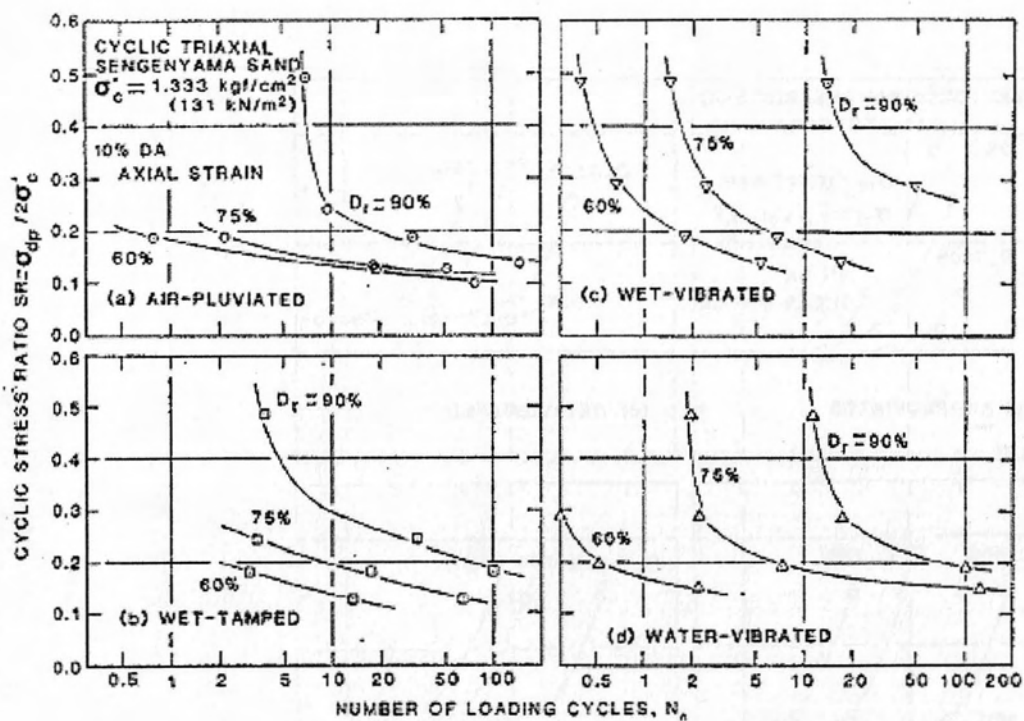
Σχήμα 5: Ανακυκλικές αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές. Άμμος Toyoura ($D_{50}=0.16\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=98\text{KPa}$ εξετάζονται 4 σειτ καμπυλών. Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. (1986)



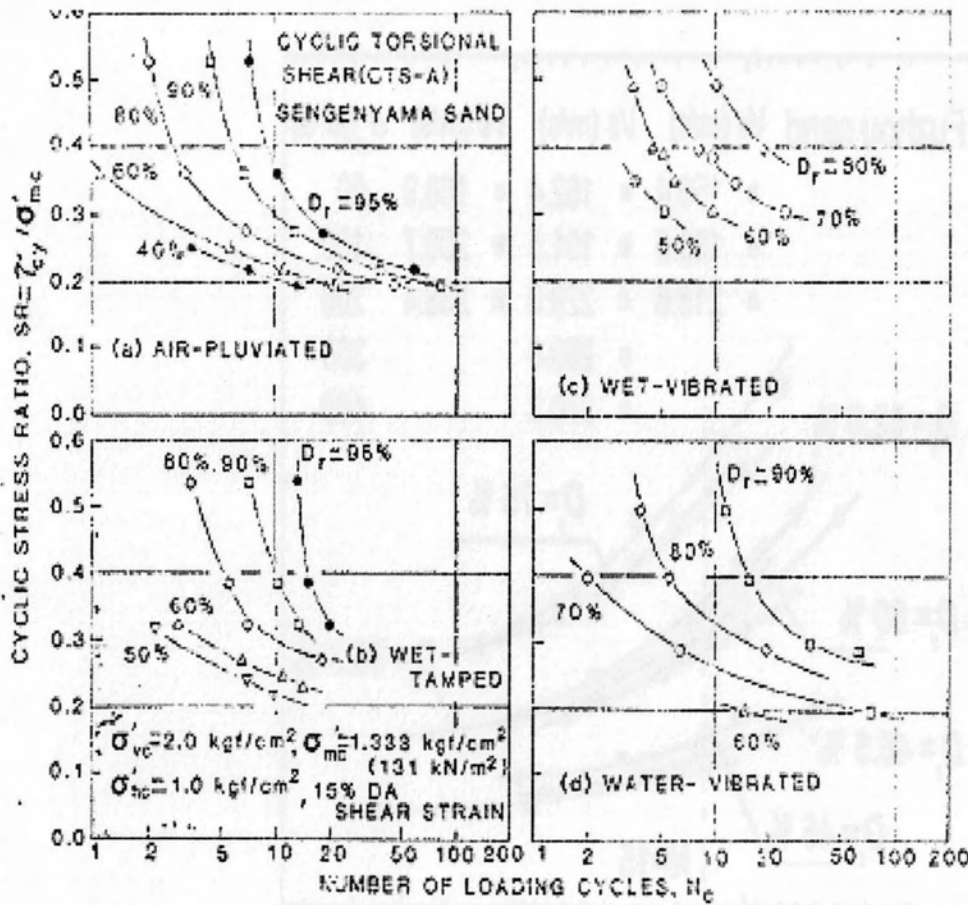
Σχήμα 6: Ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης, ιστροπικά στερεοποιημένες. Άμμος Τογούρα ($D_{50}=0.16\text{mm}$). 4 σετ καμπυλών. Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. (1986)



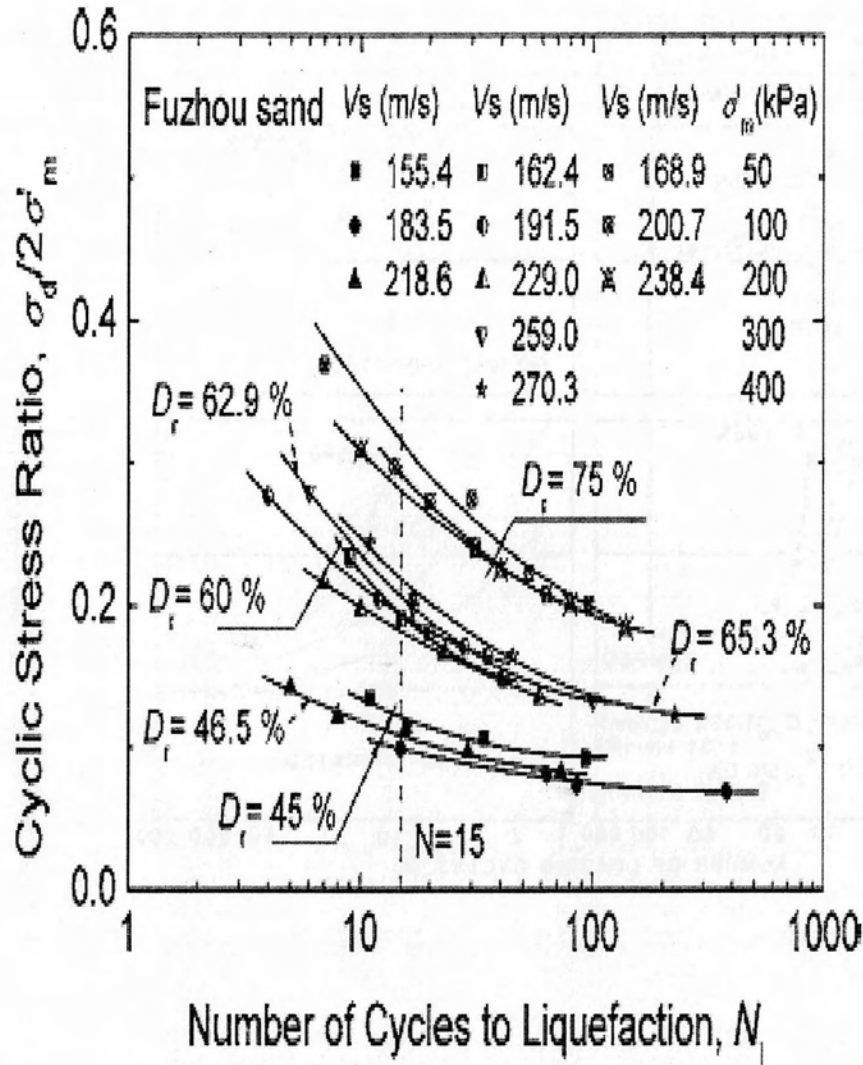
Σχήμα 7: Ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης. Άμμος Toyoura ($D_{50}=0.16\text{mm}$). 4 σετ καμπυλών. Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. (1986)



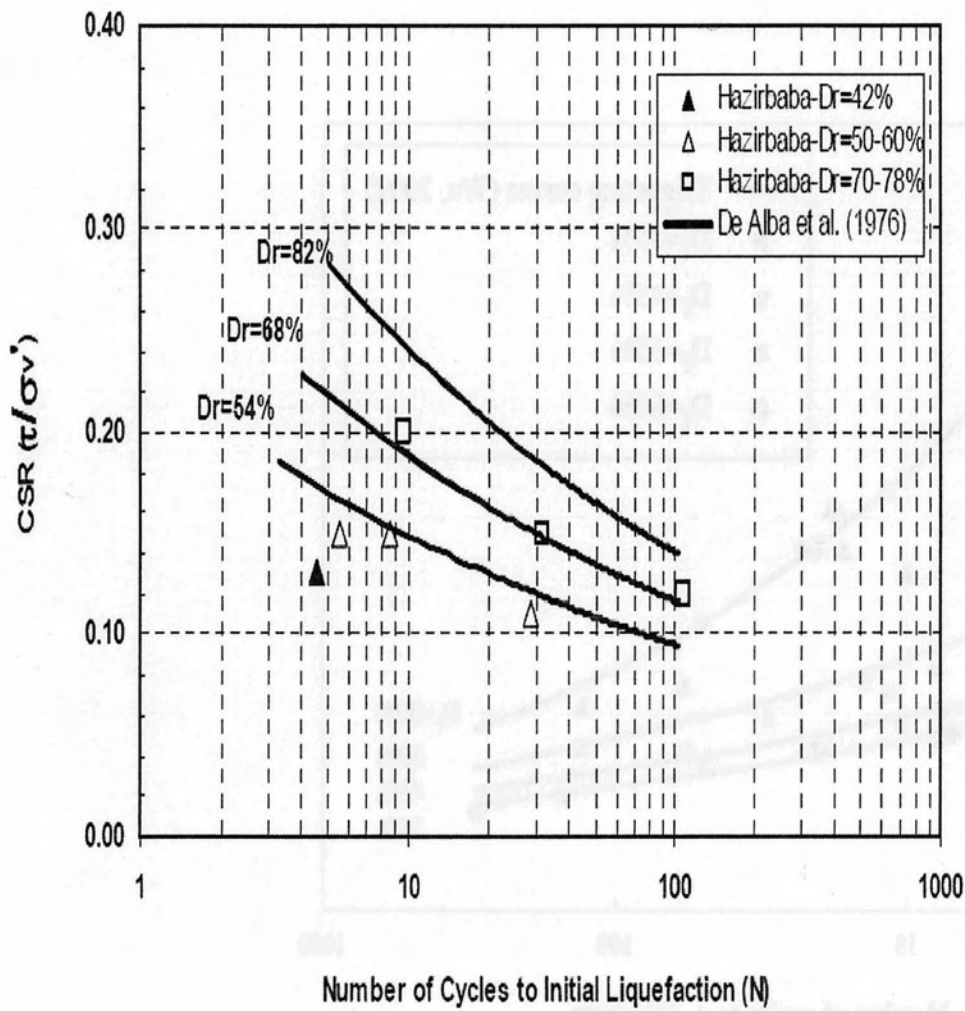
Σχήμα 8: Ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής διάτμησης, ιστροπικά στερεοποιημένες. Άμμος Sengenyama ($D_{50}=0.39\text{mm}$). 4 σειτ καμπυλών για $\sigma'_{v0}=131\text{kPa}$. Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. (1986).



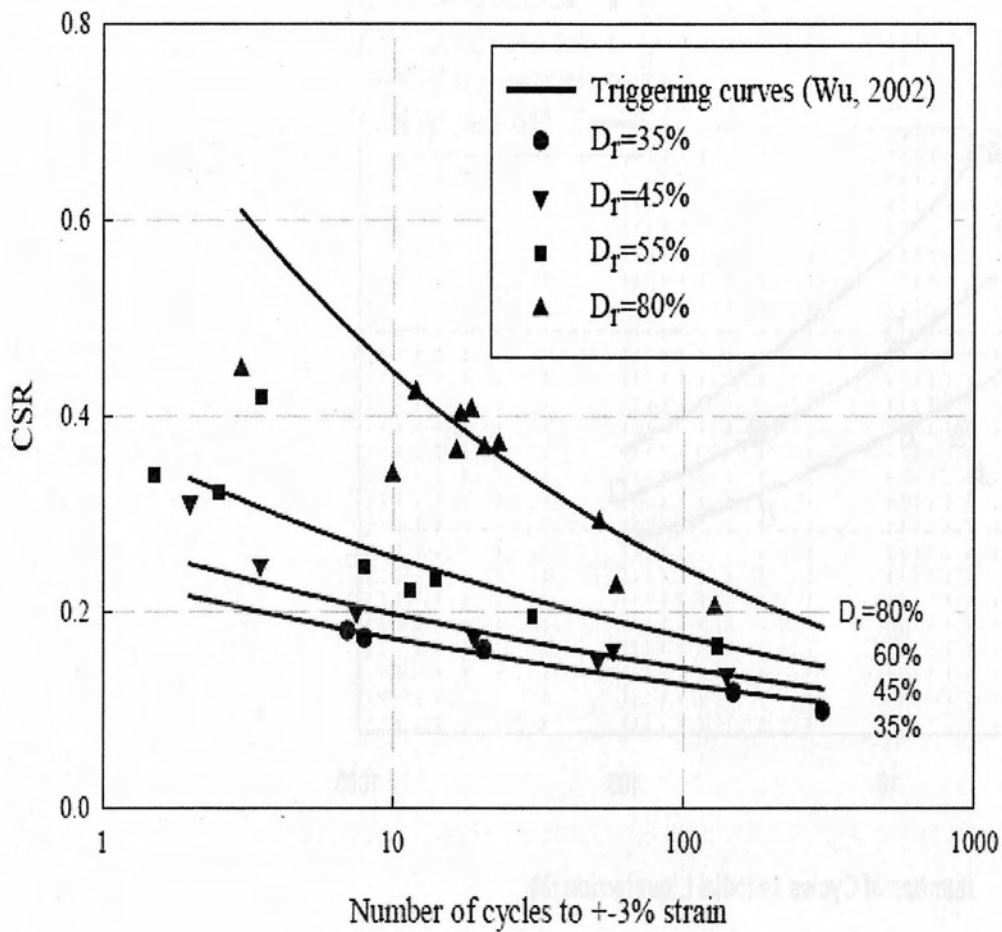
Σχήμα 9: Ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης, ανισοτροπικά στερεοποιημένες. Άμμος Sengenyama ($D_{50}=0.39\text{mm}$). 4 σετ καμπυλών για $\sigma'_{vc}=131\text{kPa}$. Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. (1986).



Σχήμα 10: Ανακυκλικές αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές. Άμμος Fuzhou ($D_{50}=0.35\text{mm}$). Για κάθε τιμή σ'_{vo} εξετάζονται 3 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r . Yan-Guo Zhou, Yun-Min Chen, (2007)



Σχήμα 11: Ανακυκλικές αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές. Άμμος Monterey #0/30 ($D_{50}=0.5\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=100\text{kPa}$ εξετάζονται 2 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r . Hazirbaba K., (2005)



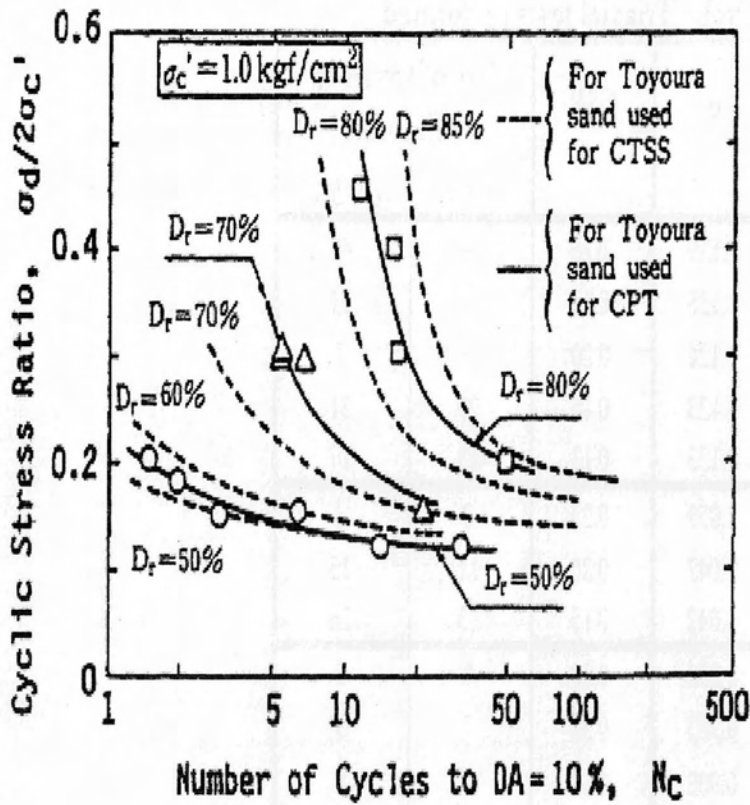
Σχήμα 12: Ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές απλής διάτμησης. Άμμος Monterey #0/30 ($D_{50}=0.36\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=80\text{kPa}$ εξετάζονται 4 τιμές σχετικής πυκνότητας. Wu, J. (2002).

Table 5-2. Summary of Cyclic Triaxial tests performed

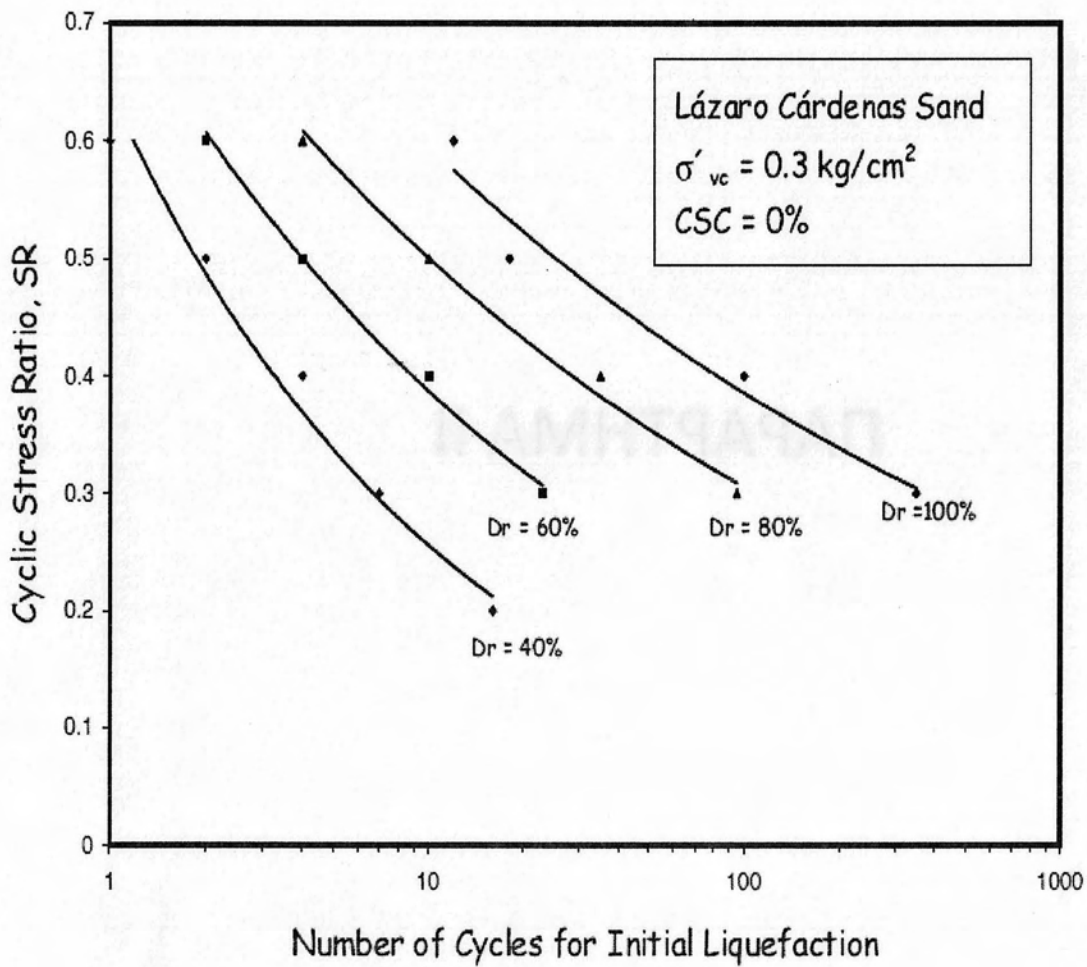
Test No.	D_r (%)	σ_{CON} (kPa)	e	CSR	No. of Cycles to Failure	
					$(r_u = 1)^*$	$(\epsilon > 5\%)^\dagger$
CTX01	20 (21.7) [‡]	100	1.129	0.10	36	40
CTX02	20 (22.0)	100	1.128	0.15	8	11
CTX03	20 (23.6)	100	1.126	0.20	5	7
CTX04	20 (23.1)	100	1.123	0.15	29	31
CTX05	20 (23.2)	100	1.123	0.13	13	17
CTX06	40 (38.4)	100	1.059	0.25	3	4
CTX07	40 (41.3)	100	1.047	0.20	11	13
CTX08	40 (42.6)	100	1.042	0.15	23	26
CTX09	60 (55.4)	100	0.988	0.30	8	9
CTX10	60 (56.6)	100	0.983	0.35	7	9
CTX11	60 (56.8)	100	0.982	0.32	7	9
CTX12	60 (57.8)	100	0.978	0.30	11	14
CTX13	60 (58.9)	100	0.974	0.25	38	42

[‡] Rounded final relative density (actual final relative density)
^{*} Pore-pressure ratio equal to 1 (initial liquefaction)
[†] 5% Accumulated axial strain

Σχήμα 13: Ανακυκλικές αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές. Άμμος Playa Santa Monterey ($D_{50}=0.48\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=100\text{kPa}$ εξετάζονται 3 τιμές σχετικής πυκνότητας. LaVielle T. H., (2008).



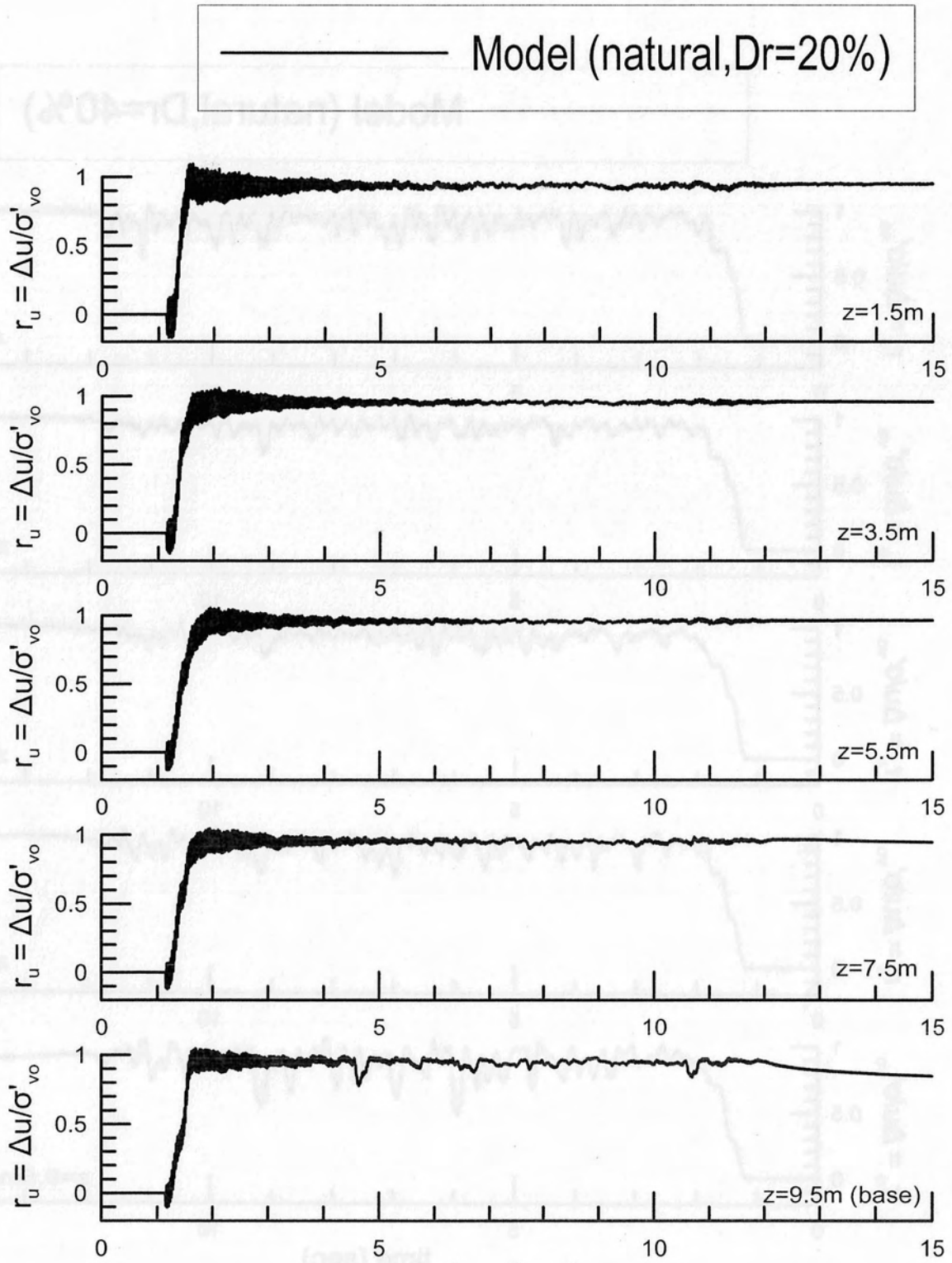
Σχήμα 14: : Ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης. Άμμος Toyoura ($D_{50}=0.16\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=98\text{KPa}$ εξετάζονται 3 τιμές σχετικής πυκνότητας. Tanizama F., Iwasaki K., Zhou S., Tatsuoka F., (1988).



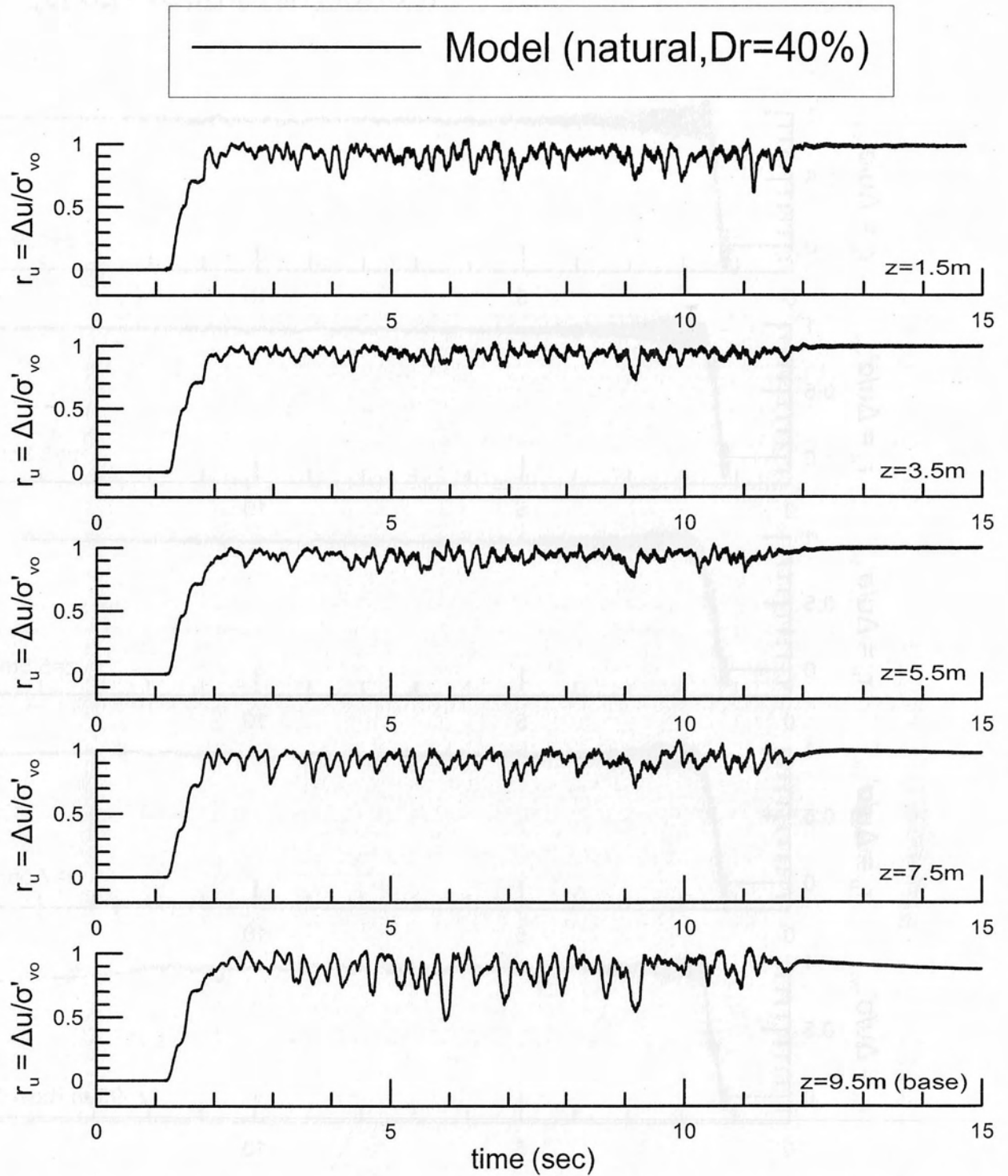
Σχήμα 15: Ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές απλής διάτμησης. Άμμος Lazaro-Cardenas ($D_{50}=0.18\text{mm}$). Για $\sigma'_{vo}=29.4 \text{ KPa}$ εξετάζονται 4 τιμές σχετικής πυκνότητας. Diaz-Rodriguez J. A., Antonio-Izarraras V.M., (2004).



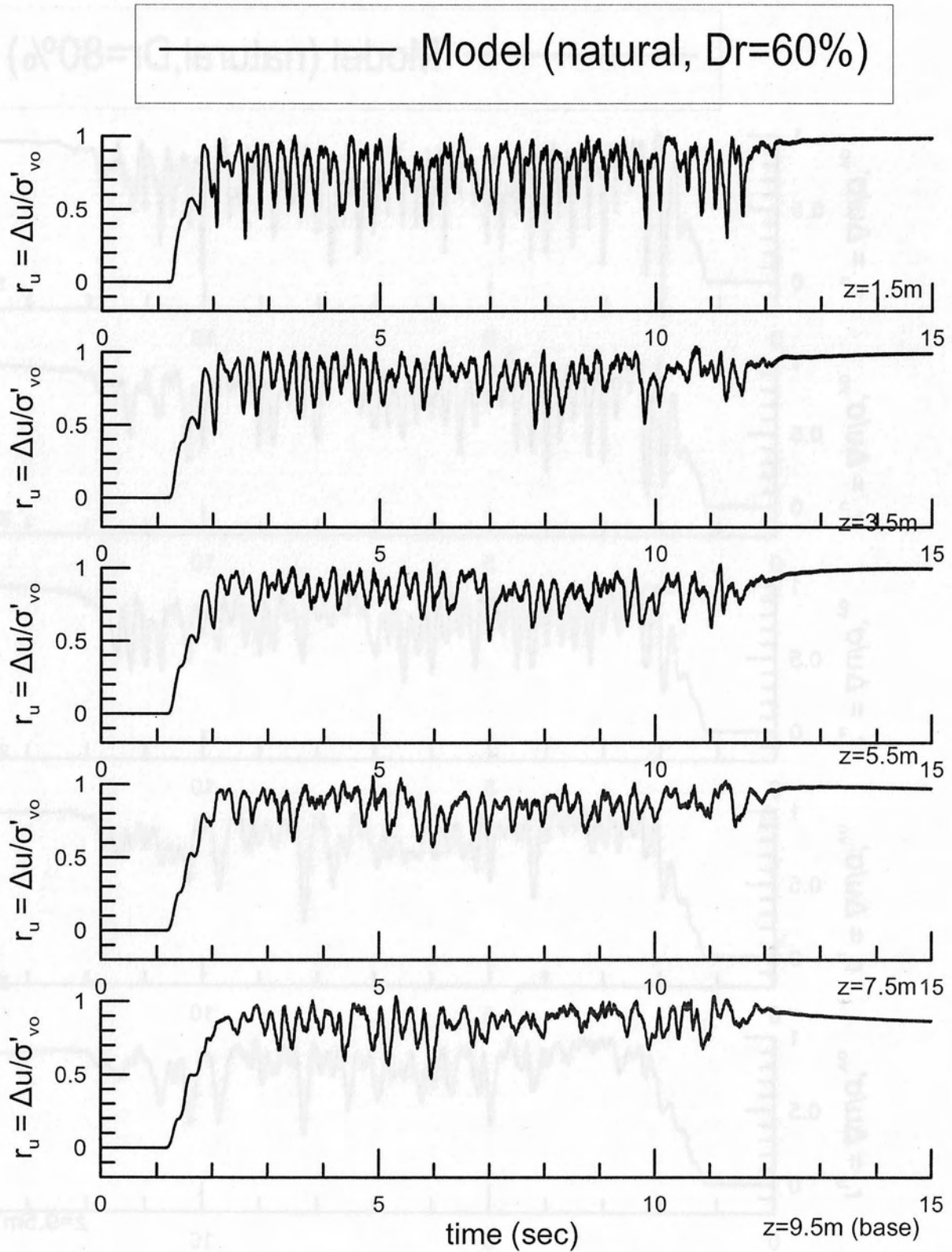
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ



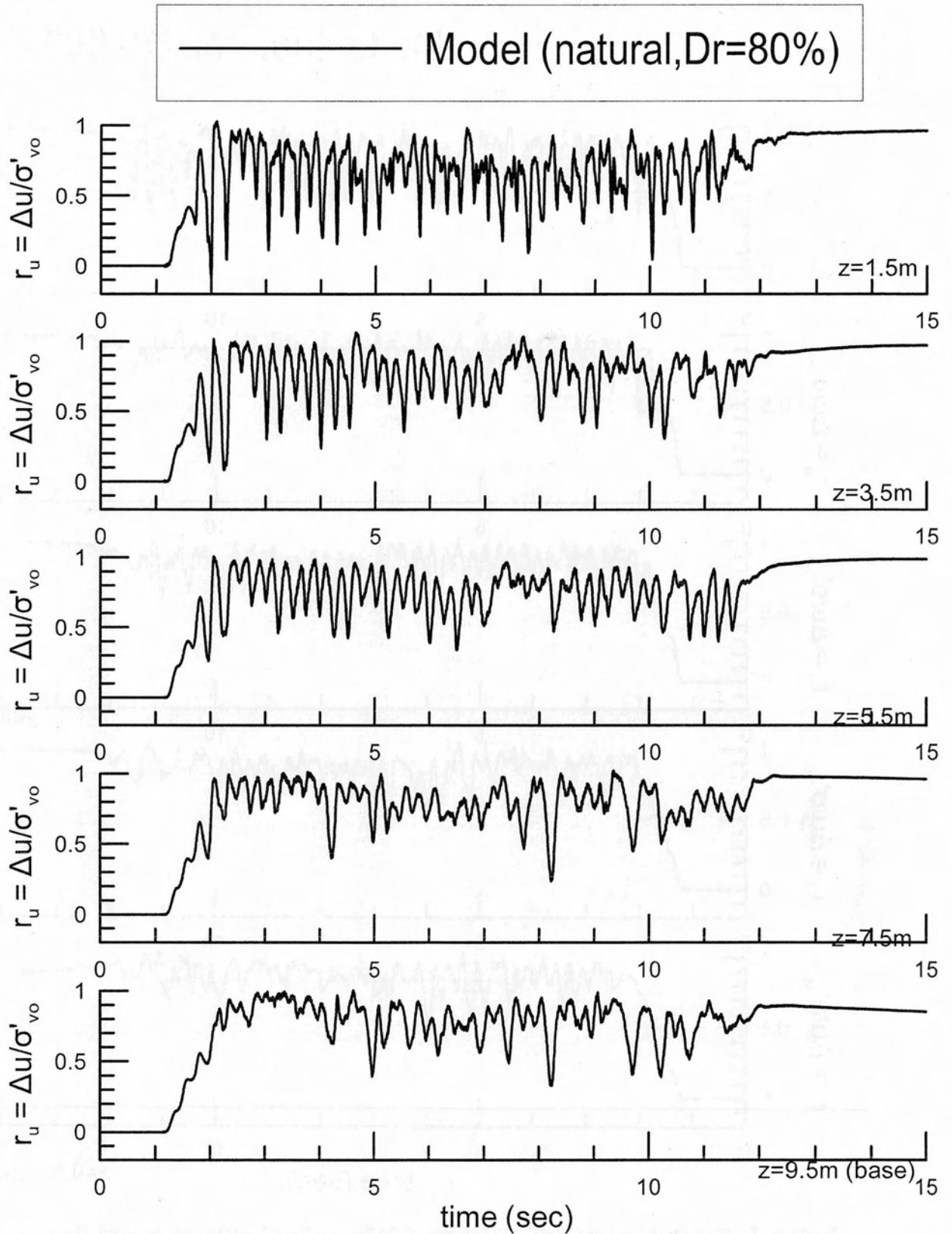
Σχήμα 1: Υπερπίεσεις πόρων σε διάφορα βάθη για αναλύσεις σε φυσική άμμο με ψευδοαύξηση της πυκνότητας $D_r=20\%$.



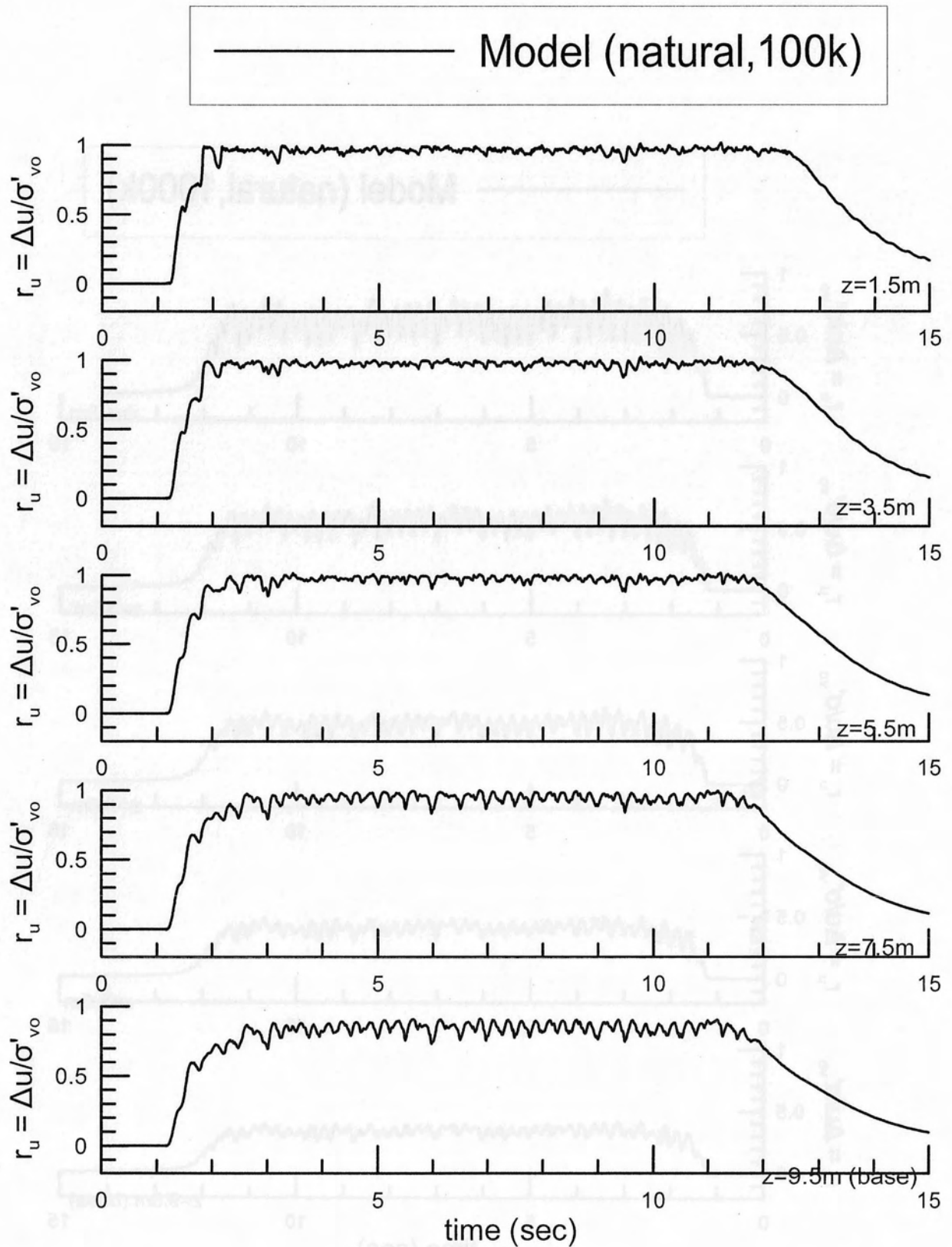
Σχήμα 2: Υπερπίεσεις πόρων σε διάφορα βάθη για αναλύσεις σε φυσική άμμο με ψευδοαύξηση της πυκνότητας $D_r=40\%$.



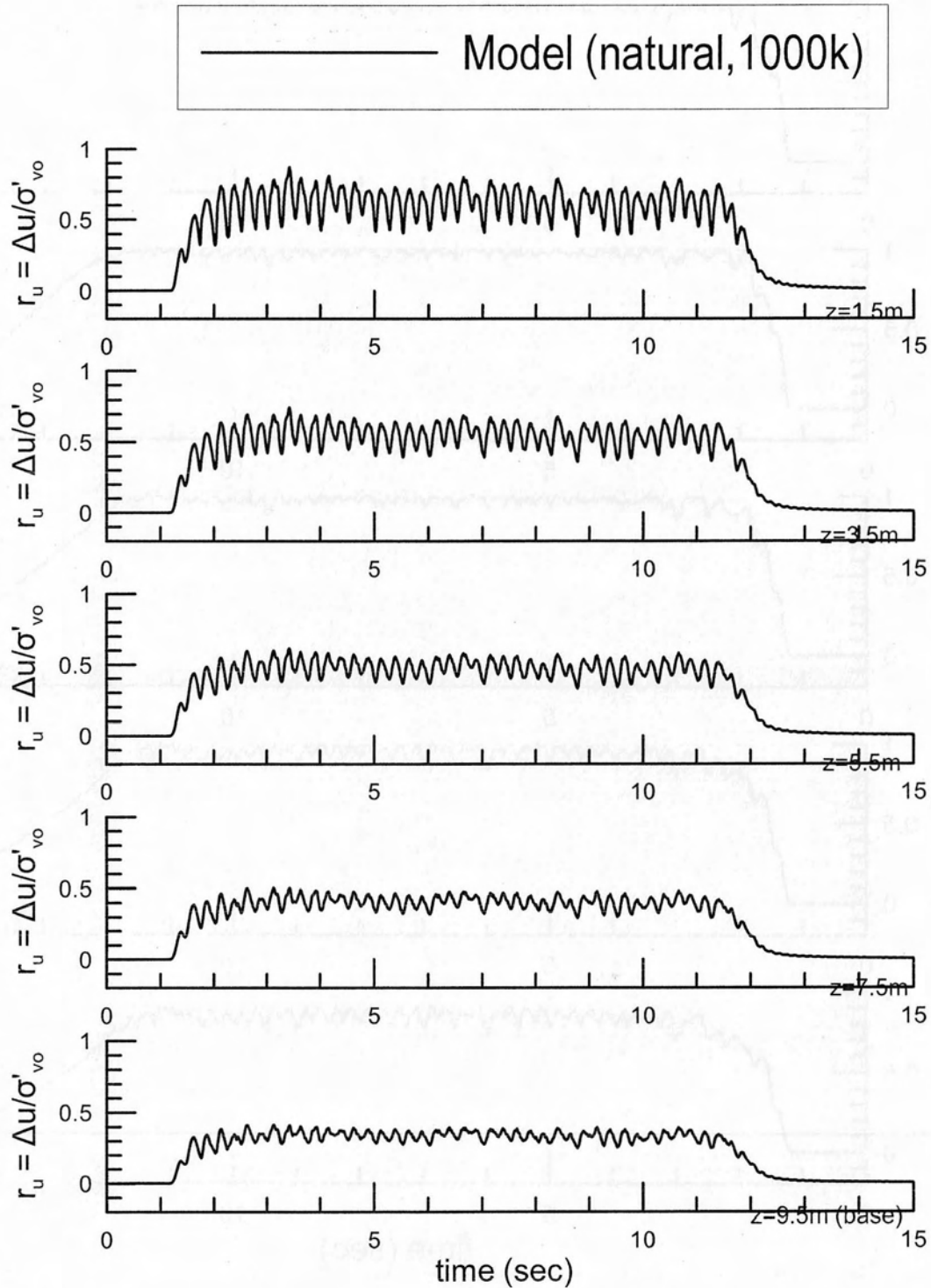
Σχήμα 3: Υπερπιέσεις πόρων σε διάφορα βάθη για αναλύσεις σε φυσική άμμο με ψευδοαύξηση της πυκνότητας $D_r=60\%$.



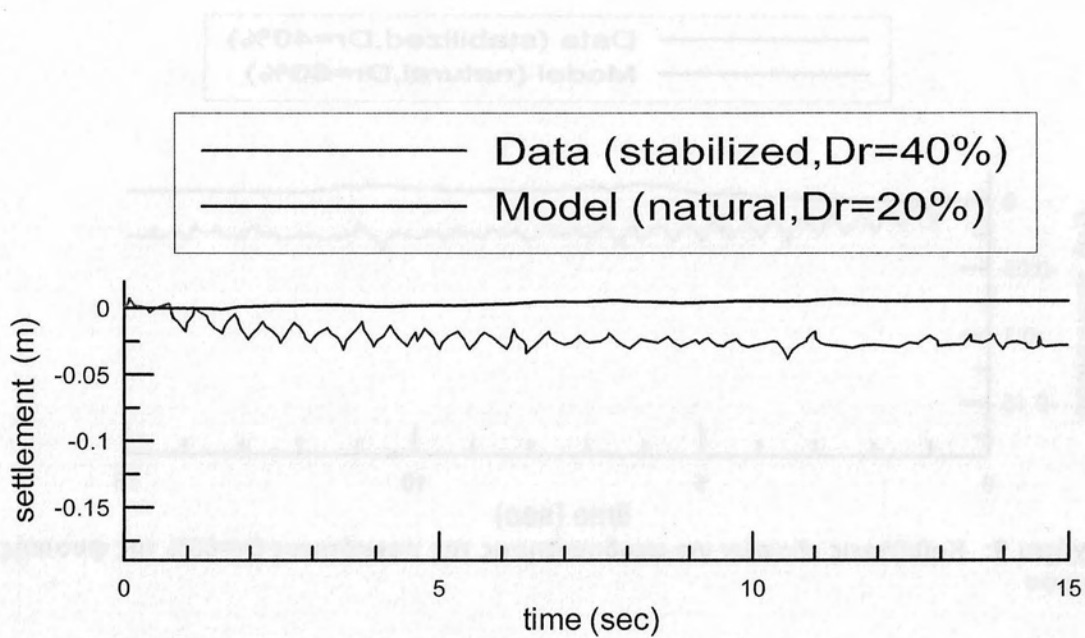
Σχήμα 4: Υπερπίεσεις πόρων σε διάφορα βάθη για αναλύσεις σε φυσική άμμο με ψευδοαύξηση της πυκνότητας $D_r=80\%$.



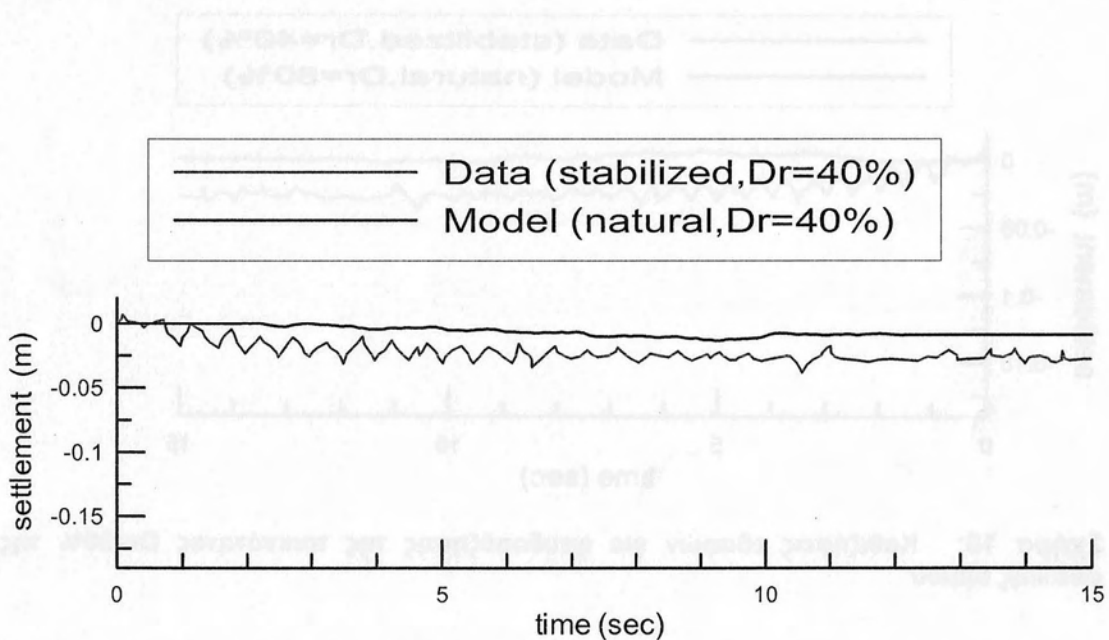
Σχήμα 5: Υπερπιέσεις πόρων σε διάφορα βάθη για αναλύσεις σε φυσική άμμο με 100 φορές μεγαλύτερη διαπερατότητα)



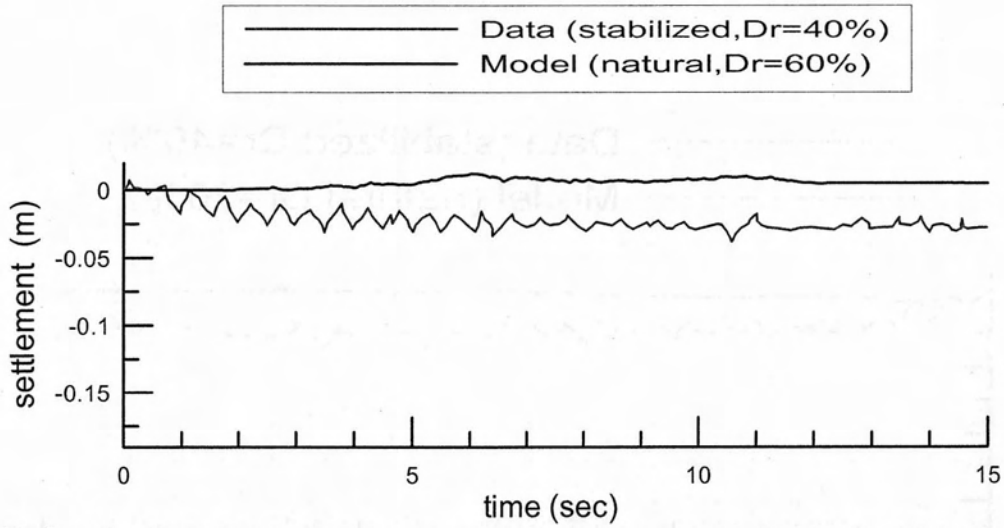
Σχήμα 6: Υπερπίεσεις πόρων σε διάφορα βάθη για αναλύσεις σε φυσική άμμο με 1000 φορές μεγαλύτερη διαπερατότητα)



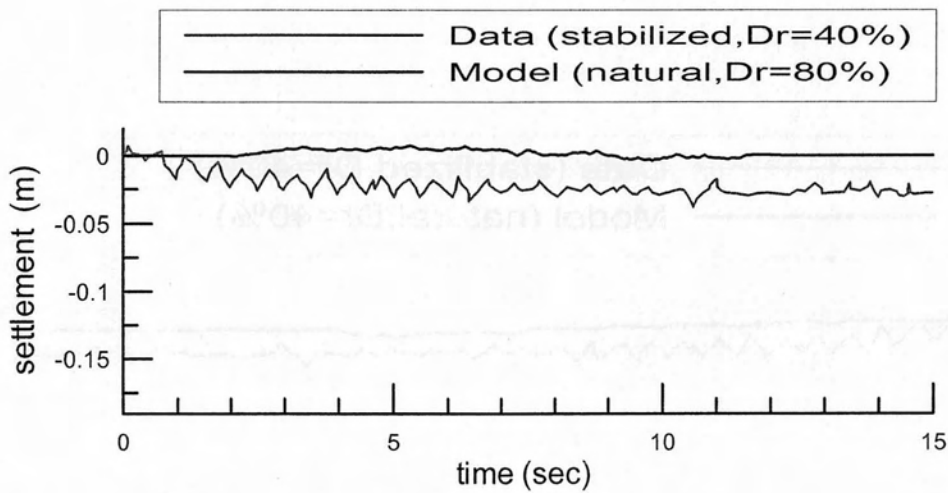
Σχήμα 7: Καθιζήσεις εδαφών για ψευδοαύξησης της πυκνότητας $D_r=20\%$ της φυσικής άμμου



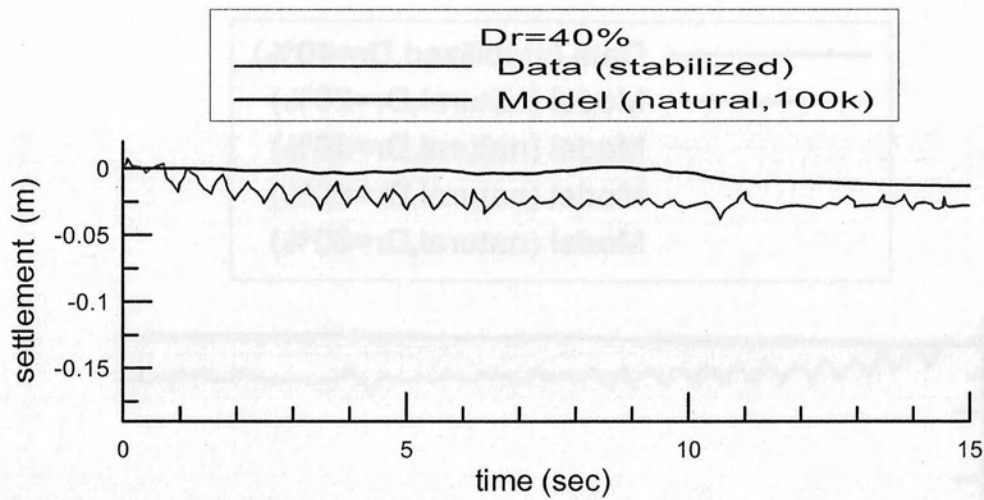
Σχήμα 8: Καθιζήσεις εδαφών για ψευδοαύξησης της πυκνότητας $D_r=40\%$ της φυσικής άμμου



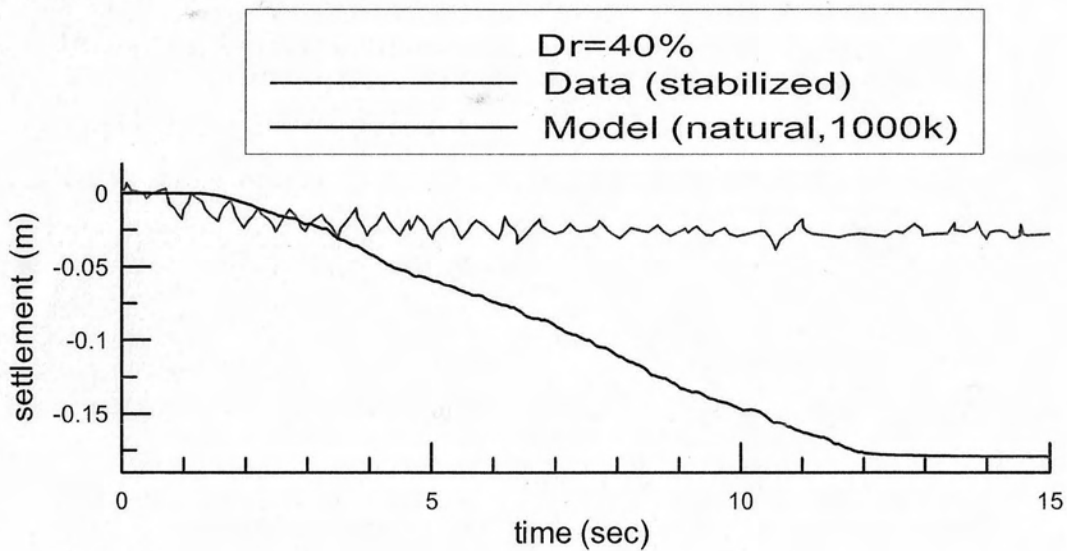
Σχήμα 9: Καθιζήσεις εδαφών για ψευδοαύξησης της πυκνότητας $Dr=60\%$ της φυσικής άμμου



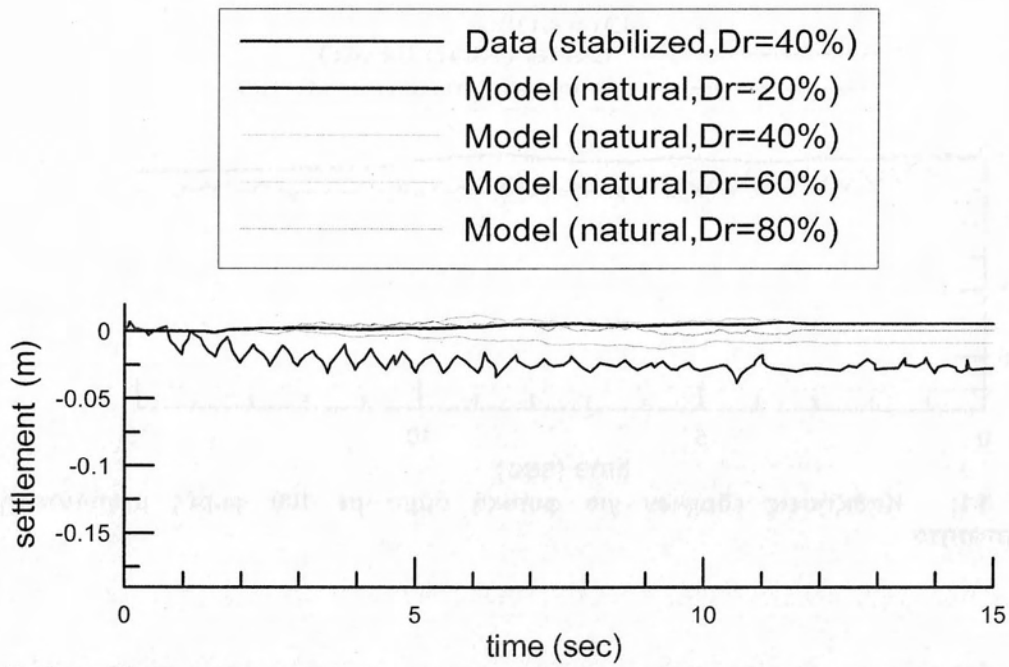
Σχήμα 10: Καθιζήσεις εδαφών για ψευδοαύξησης της πυκνότητας $Dr=80\%$ της φυσικής άμμου



Σχήμα 11: Καθιζήσεις εδαφών για φυσική άμμο με 100 φορές μεγαλύτερη διαπερατότητα



Σχήμα 12: Καθιζήσεις εδαφών για φυσική άμμο με 100 φορές μεγαλύτερη διαπερατότητα



Σχήμα 13: Καθιζήσεις εδαφών για διάφορες τιμές ψευδοαύξησης της πυκνότητας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

Patricia M. Gallagher, A. Pamuk, & T. Abdoun, (2007). Stabilization of Liquefiable Soils Using Colloidal Silica Grout. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING(19(1)), pp. 33-40.

Patricia M. Gallagher and James K. Mitchell, (2000) Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk, PhD, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Yannis F. Dafalias and Majid T. Manzari (2004). Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 6 ©ASCE , ISSN 0733-9399/2004/6-622-634

Conlee, C. T. (2010). Dynamic Properties of Colloidal Silica Soils using Centrifuge Model Tests and a Full-Scale Field Test, Doctor of Philosophy Drexel University

Konstantinos I. Andrianopoulos, Achilleas G. Papadimitriou and George D. Bouckovalas (2009). Explicit integration of bounding surface model for the analysis of earthquake soil liquefaction. INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS IN GEOMECHANICS; 34:1586-1614

Konstantinos I. Andrianopoulos, Achilleas G. Papadimitriou, George D. Bouckovalas (2010). Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geotechnical structures. Volume 30 (10) Elsevier

Diaz-Rodriguez, J. A., Antonio-Izarraras, V. M., Bandini, P., & Lopez-Molina, J. A. (2008). Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout. Canadian Geotechnical Journal, 45(10):1345-1355.

De Alba, P., Seed, H. And Chan, C.K. (1976), Sand liquefaction in large scale simple shear tests, J. Geotechnical Eng. Div., ASCE 102 (GT9), 909-927

Eimar A. Sandoval, Miguel A. Pando, (2012), Experimental assessment of the liquefaction resistance of calcareous biogenous sands, Earth Sciences Research Journal Vol 16, No1, pp: 55-63

Carraro J.A., P. Bandini, and R. Salgado, (2003). Liquefaction Resistance of Clean and Nonplastic Silty Sands Based on Cone Penetration Resistance, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 11

Cubrinovski, Misko, and Sean Rees. Effects of fines on undrained behaviour of sands, ASCE Geotech Spec Publ 181 (2008): pp.1-11.

Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. (1986), Cyclic triaxial and torsional strength of sands for different preparation methods, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, pp. 23-41.

Yan-Guo Zhou, Yun-Min Chen, (2007), Laboratory Investigation on Assessing Liquefaction Resistance of Sandy Soils by Shear Wave Velocity, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 8

Hazirbaba K., (2005), "Pore Pressure Generation Characteristics of Sands and Silty Sands: A Strain Approach", Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin.

Wu, J. (2002), Liquefaction triggering and post-liquefaction deformation of Monterey 0/30 sand under uni-directional cyclic simple shear loading, PhD Dissertation, University of California, Berkeley

LaVielle T. H., (2008), Liquefaction susceptibility of uncemented calcareous sands from Puerto Rico by cyclic triaxial testing, MSc thesis, Blacksburg Virginia.

Tanizama F., Iwasaki K., Zhou S., Tatsuoka F., (1988), Evaluation of liquefaction strength of sand by using cone penetration test, Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering August 1988, Tokyo-Kyoto, Japan (Vol 3) 201-206

Diaz-Rodriguez J. A., Antonio-Izarraras V.M., (2004), Mitigation of liquefaction risk using colloidal silica stabilizer, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, pp 509

Ελληνική Βιβλιογραφία

Κ. Βελαλής, Π. Παπαγιαννάκης (2012). Παθητική Σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών: βιβλιογραφική έρευνα, καταστατική προσομοίωση. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Διπλωματική εργασία.

