

Αριθμητική Ανάλυση Γεω-κατασκευών υπό Καθεστώς Ρευστοποίησης

Numerical Analysis of Geo-structures in a Liquefiable Regime

ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ Κ.Ι.
ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ Γ. Δ
ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Α. Γ.

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζεται ένα νέο λογισμικό αριθμητικής ανάλυσης για την προσομοίωση της απόκρισης εδαφών και θεμελιώσεων σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Βασίζεται σε ένα πρόσφατα προταθέν ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Οριακής Επιφάνειας, το οποίο έχει ενσωματωθεί στον εμπορικό κώδικα πεπερασμένων διαφορών 2Δ ανάλυσης FLAC2D. Εκτεταμένες συγκρίσεις τόσο με εργαστηριακά πειράματα όσο και με πειράματα φυγοκεντριστή καταδεικνύουν τη δυνατότητα για ακριβή προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης εδαφών και θεμελιώσεων σε πρακτικές εφαρμογές.

ABSTRACT : A new numerical methodology is presented for the simulation of the soil response under small, medium and large cyclic strains, with special interest given to liquefaction phenomena. The new methodology is based on a recently proposed elastoplastic Bounding Surface model, which has been implemented in the commercial finite difference code of 2D analysis FLAC2D. Extensive comparisons with laboratory and centrifuge experiments show its capability to simulate the seismic response of geo-structures.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση της απόκρισης του εδάφους σε ένα έντονο σεισμικό γεγονός, είτε ως υλικού κατασκευής είτε ως υλικού θεμελίωσης αποτελεί πεδίο σημαντικής έρευνας στη Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική. Η κύρια έμφαση δίνεται σε αριθμητικές μεθόδους οι οποίες έχουν αποδείξει ότι μπορούν να προσομοιώσουν σύνθετα προβλήματα κάτι το οποίο είναι πρακτικά αδύνατο με απλές αναλυτικές μεθόδους.

Βασικό κριτήριο δυσκολίας της προσομοίωσης είναι η ένταση της σεισμικής διέγερσης ή αλλιώς το μέγεθος των αναμενόμενων παραμορφώσεων. Έτσι, σε σεισμικές διεγέρσεις μικρής έντασης, όπου οι παραμορφώσεις είναι μικρές, η απόκριση του εδαφικού υλικού δεν αποκλίνει αρκετά από την ελαστικότητα και η προσομοίωση μπορεί να επιτευχθεί με απλούς καταστατικούς νόμους. Σε σεισμικές διεγέρσεις όμως μεγάλης έντασης, όπου οι αναμενόμενες παραμο-

ρφώσεις είναι μεγάλες, η απόκριση είναι έντονα μη-γραμμική και η προσομοίωση περιπλέκεται. Η συσσώρευση παραμενουσών παραμορφώσεων, η απομείωση του μέτρου δυστημσίας με την παραμόρφωση, η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας καθώς και η αλλαγή της δομής του υλικού με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης είναι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό.

Τα σύγχρονα εμπορικά λογισμικά επίλυσης προβλημάτων συνοριακών συνθηκών είναι εντελώς ακατάλληλα για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης γεω-κατασκευών σε μεγάλες παραμορφώσεις όπου φαινόμενα όπως αυτό της ρευστοποίησης καθορίζουν τη συμπεριφορά, και αυτό γιατί δεν προσφέρουν προς χρήση κατάλληλα καταστατικά προσομοιώματα της ανακυκλικής συμπεριφοράς εδαφών. Έτσι, στην πράξη τέτοια προβλήματα αναλύονται είτε με εμπειρικές είτε με προσεγγιστικές αριθμητικές μεθόδους, καθώς υπάρχοντα εξειδικευμένα λογισμικά που έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικά κέντρα ή

πανεπιστημιακά ιδρύματα έχουν συνήθως στενό εύρος εφαρμογής και δεν προσφέρονται ευρέως προς χρήση στην τεχνική κοινότητα.

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται ένα νέο λογισμικό αριθμητικής ανάλυσης για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης εδαφών και θεμελιώσεων σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις, με την ίδια ομάδα παραμέτρων, ανεξαρτήτως πυκνότητας, αρχικών τάσεων και συνθηκών φόρτισης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην προσομοίωση φαινομένων ρευστοποίησης. Το προτεινόμενο λογισμικό προσφέρεται για ευρεία εφαρμογή στην πράξη καθώς προϋποθέτει μόνον την προσθήκη ενός νέου καταστατικού προσομοιώματος (UDM) σε υπάρχοντα εμπορικά λογισμικά, όπως εν προκειμένω στο FLAC2D (Itasca, 1998).

2. ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται (Ανδριανόπουλος, 2005) αποτελεί εξέλιξη ενός πρόσφατα προταθέντος ελαστοπλαστικού προσομοιώματος που αναπτύχθηκε στο Τομέα Γεωτεχνικής του Ε.Μ.Π. (Παπαδημητρίου 1999, Papadimitriou & Bouckovalas 2002). Βασίζεται στις αρχές της θεωρίας της πλαστικότητας, ανήκει στην κατηγορία προσομοιωμάτων Οριακής Επιφάνειας με σημειακή επιφάνεια διαρροής και ενσωματώνει το ολοκληρωμένο πλαίσιο της Εδαφομηχανικής Κρίσιμης Κατάστασης (CSSM, Roscoe and Burland 1968). Αποσκοπεί στη ρεαλιστική προσομοίωση της απόκρισης μη-συνεκτικών εδαφών (άμμων και ιλύων) υπό μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση τόσο υπό στραγγιζόμενες όσο και υπό αστράγγιστες συνθήκες, για μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις, με την ίδια ομάδα παραμέτρων, ανεξαρτήτως πυκνότητας, αρχικών τάσεων ή συνθηκών φόρτισης. Εκτεταμένη σύγκριση με εργαστηριακά αποτελέσματα έχει δείξει ότι σημαντικά χαρακτηριστικά της απόκρισης του εδάφους υπό ανακυκλική φόρτιση όπως η ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων, μόνιμων παραμορφώσεων, διαστολικότητα, χαλάρωση του υλικού και αλλαγή της δομής προσομοιώνονται αρκετά ικανοποιητικά.

Στην παρούσα μορφή, το προσομοίωμα αποτελείται από τρεις κωνικές επιφάνειες με κορυφή την αρχή των αξόνων: (1) την επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης στην οποία έχουμε συσσώρευση διατμητικής παραμόρφωση υπό σταθερές τάσεις και όγκο, (2) την

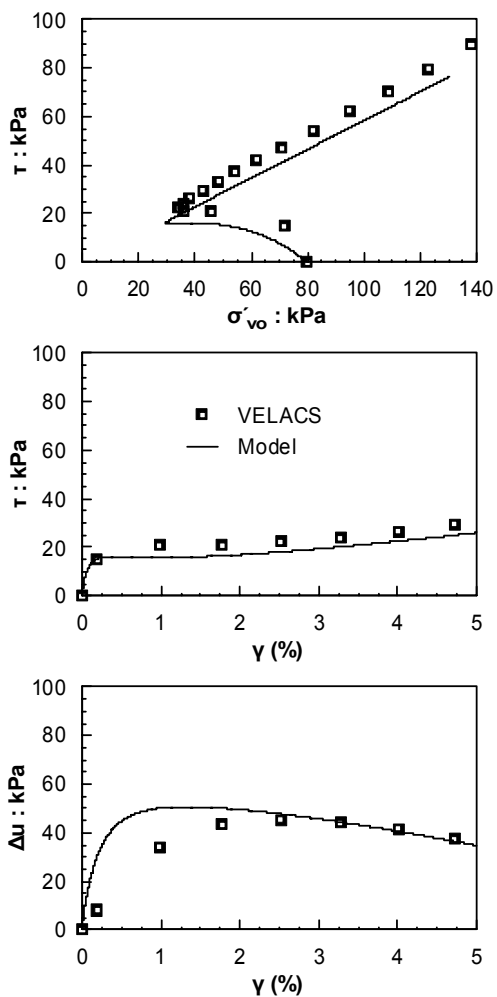
Οριακή Επιφάνεια η οποία ορίζει τις κορυφαίες τιμές της αποκλίνουσας τάσης και (3) την Επιφάνεια Διαστολικότητας η οποία καθορίζει αν το υλικό θα διασταλεί ή θα συσταλεί κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Το προτεινόμενο προσομοίωμα δεν έχει αμιγώς ελαστική περιοχή αφού η επιφάνεια διαρροής έχει εκφυλιστεί σε σημείο, δηλαδή σε κάθε υπολογιστικό βήμα η απόκριση του υλικού είναι ελαστοπλαστική. Η επιλογή αυτή προσδίδει στο προσομοίωμα αριθμητική ευστάθεια αφού πλέον η μετάβαση από μικρές σε μεγάλες παραμορφώσεις γίνεται πιο ομαλά (Ανδριανόπουλος 2005). Επιπλέον, με αυτό τον τρόπο απλοποιείται η αριθμητική ολοκλήρωση της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων καθώς δεν απαιτούνται πια διαδικασίες όπως η εύρεση του σημείου τομής με την επιφάνεια διαρροής και η συνεχής εφαρμογή του νόμου συμβατότητας, με κέρδος τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους.

Η υιοθέτηση σημειακής επιφάνειας διαρροής διαφοροποιεί το προσομοίωμα από το αρχικό (Papadimitriou and Bouckovalas 2002) αφού συνεπάγεται και μια σειρά άλλων τροποποιήσεων όπως (i) την υιοθέτηση νέου νόμου προβολής της τρέχουσας εντατικής κατάστασης στην συζυγή της επί της Οριακής Επιφάνειας (mapping rule) και (ii) τη τροποποίηση του νόμου παρεμβολής (interpolation rule) που συνδέει τη τιμή του πλαστικού μέτρου κράτυνσης στην τρέχουσα εντατική κατάσταση με την αντίστοιχη της συζυγούς κατάστασης. Παρόλα αυτά οι βασικές εξισώσεις έχουν διατηρηθεί και συνεπώς ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις αρχικές δημοσιεύσεις για περισσότερες λεπτομέρειες.

3. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ FLAC

Το ανωτέρω προσομοίωμα ενσωματώθηκε στον εμπορικό κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca, 1998). Ο εν λόγω κώδικας είναι προσανατολισμένος σε προβλήματα Γεωτεχνικής Μηχανικής και δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης νέων καταστατικών προσομοιωμάτων μέσω μιας εξωτερικής υπορουτίνας που καλείται σε κάθε υπολογιστικό βήμα. Έτσι σε κάθε βήμα, με δεδομένη την επαύξηση των παραμορφώσεων, καλείται η υπορουτίνα και με χρήση των καταστατικών εξισώσεων υπολογίζεται η επαύξηση των τάσεων. Η διαδικασία με την οποία ολοκληρώνονται οι καταστατικές εξισώ-



Σχήμα 1. Σύγκριση προβλέψεων με πειραματικά αποτελέσματα για μονοτονική φόρτιση
 Figure 1. Example comparisons of simulations versus data for monotonic shearing

σεις και υπολογίζονται οι επαυξήσεις των τάσεων καθορίζει και την ακρίβεια των υπολογισμών, ειδικά όταν ο καταστατικός νόμος είναι έντονα μη-γραμμικός και πολύπλοκος όπως ο προτεινόμενος.

Στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε η μη-πεπλεγμένη ολοκλήρωση (explicit integration) με τη μέθοδο των υποβημάτων (substepping technique) κατά την οποία υπάρχει συνεχής αυτοματοποιημένος έλεγχος σφάλματος, όπως προτάθηκε αρχικά από τον Sloan (1987). Εν συντομία, ο εν λόγω αλγόριθμος υποδιαιρεί κάθε βήμα σε υπο-βήματα εκτιμώντας το σφάλμα ολοκλήρωσης σε επίπεδο στοιχείου και επιχειρώντας να ελέγξει με αυτό τον τρόπο το σφάλμα σε ολόκληρο τον κάνναβο.

4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

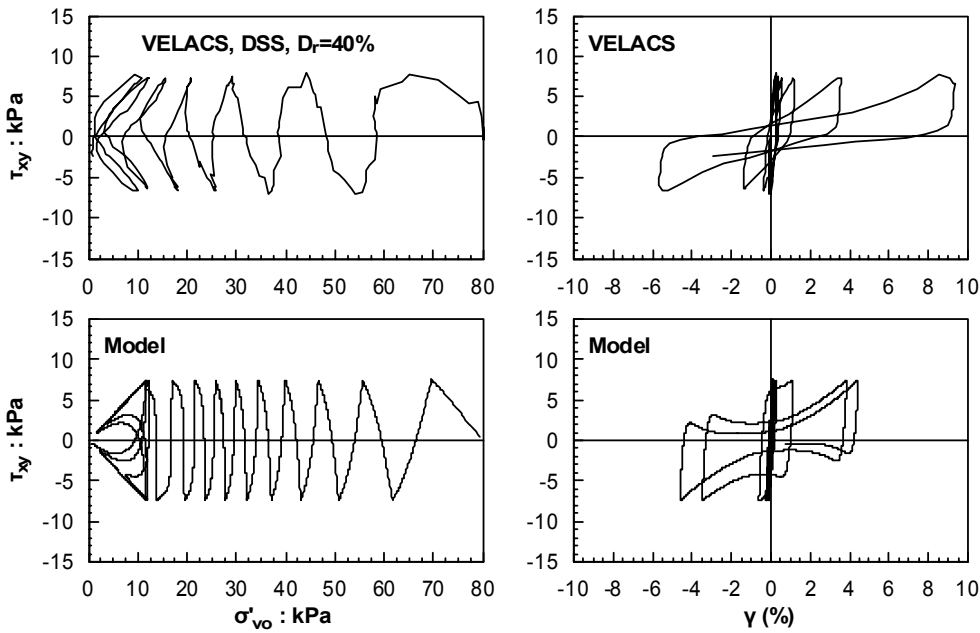
Για τη βαθμονόμηση του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του

ερευνητικού προγράμματος VELACS (Arulmoli et al . 1982). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών στήλης συντονισμού, απλής διάτμησης αλλά και τριαξονικής φόρτισης σε λεπτόκοκκη άμμο Nevada. Οι δοκιμές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα αρχικών συνθηκών τόσο πυκνότητας ($D_r=40$ & 60%) όσο και ενεργών τάσεων (40-160kPa). Επιπλέον ποσοτικοποιούν την απόκριση μη-συνεκτικών εδαφών σε ανακυκλική φόρτιση ως προς την απομείωση του μέτρου διατμήσεως, την αύξηση της υστερητικής απόσβεσης συναρτήσει της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης αλλά και την αντοχή έναντι ρευστοποίησης.

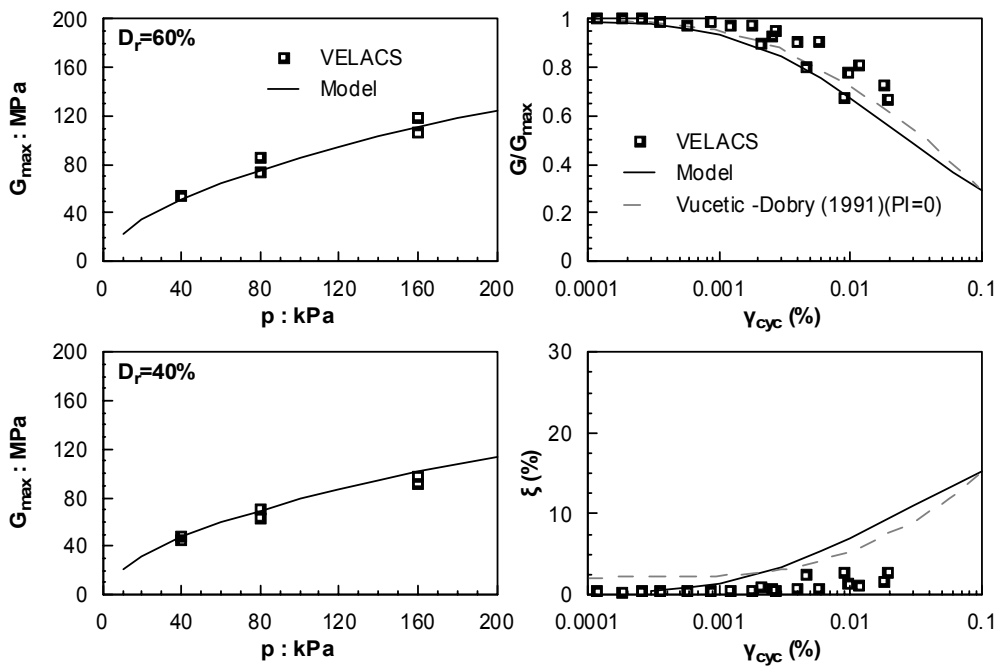
Αποτελέσματα αυτής της βαθμονόμησης παρουσιάζονται στα Σχήματα 1 έως 5. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 1 συγκρίνονται οι προβλέψεις του προτεινόμενου λογισμικού με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα μιας τυπικής μονοτονικής δοκιμής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$ και αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση 80 kPa. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2 γίνεται σύγκριση προβλέψεων – μετρήσεων για τις ίδιες αρχικές συνθήκες και συνθήκες στράγγισης υπό ανακυκλική φόρτιση. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των συγκρίσεων προβλέψεων προσομοιώματος με τα αντίστοιχα εργαστηριακά για ανακυκλική διάτμηση σε μικρές και μεσαίες παραμορφώσεις. Η σύγκριση γίνεται σε όρους μέγιστου μέτρου διατμήσεως G_{max} καθώς και μεταβολής του τρέχοντος μέτρου διατμήσεως G και της υστερητικής απόσβεσης ξ (%) συναρτήσει του εύρους της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{cyc} (%). Τέλος στα Σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των συγκρίσεων-προβλέψεων του προσομοιώματος για το πεδίο των μεγάλων παραμορφώσεων όπου η ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων καθορίζει την απόκριση του εδάφους. Η σύγκριση γίνεται σε όρους υπερπιέσεων πόρων που αναπτύσσονται στον πρώτο κύκλο φόρτισης $\Delta u_{,1}$ καθώς και απαιτούμενων κύκλων φόρτισης για πλήρη ρευστοποίηση N_L για δεδομένο λόγο ανακυκλικών τάσεων CSR.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΣΤΗ

Η απόκριση του λογισμικού σε διδιάστατα προβλήματα συνοριακών συνθηκών αξιολογήθηκε (Ανδριανόπουλος, 2005) συγκρίνοντας



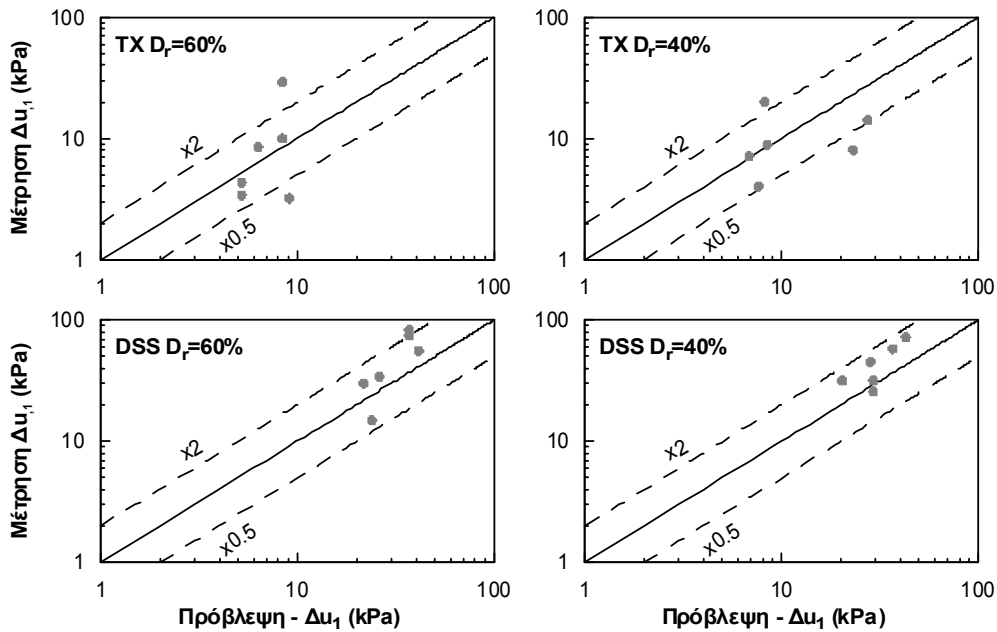
Σχήμα 2. Σύγκριση προβλέψεων με πειραματικά αποτελέσματα για ανακυκλική φόρτιση
 Figure 2. Example comparisons of simulations versus data for cyclic shearing



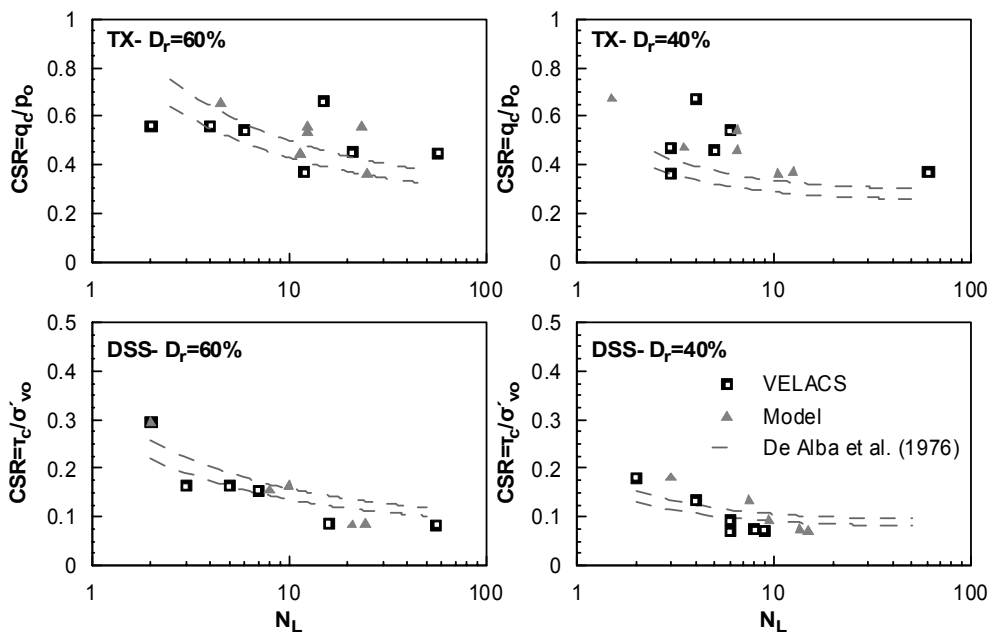
Σχήμα 3. Συγκεντρωτικές συγκρίσεις προβλέψεων-μετρήσεων για ανακυκλική φόρτιση σε μικρές έως μεσαίες ανακυκλικές παραμορφώσεις (μετρήσεις δοκιμής στήλης συντονισμού)
 Figure 3. Summary comparisons of simulations versus data for cyclic shearing for small to medium cyclic strains (data from resonant column tests)

προβλέψεις με αντίστοιχα αποτελέσματα από πειράματα φυγοκεντριστή που εκτελέστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος VELACS (Aguiloli et al. 1992). Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα πειράματα είναι ότι πρόκειται για πλήρως τεκμηριωμένες δοκιμές υπό ελεγχόμενες συνθήκες που προσομοιώνουν σε μεγάλο βαθμό τη

συμπεριφορά πραγματικών έργων. Τα προβλήματα που επιλέχθηκαν αφορούσαν την απόκριση ελευθέρου πεδίου (Πείραμα No. 1), το φαινόμενο πλευρικής εξάπλωσης (Πείραμα No. 2) και την απόκριση επιφανειακής θεμελίωσης (Πείραμα No. 12) επί ρευστοποιήσιμου εδάφους. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης για



Σχήμα 4. Συγκεντρωτική σύγκριση προβλέψεων-μετρήσεων για ανακυκλική φόρτιση σε μεγάλες παραμορφώσεις σε όρους $\Delta u_{,1}$
 Figure 4. Summary comparisons of data versus simulations for cyclic shearing at large strains in terms of $\Delta u_{,1}$



Σχήμα 5. Συγκεντρωτική σύγκριση προβλέψεων – μετρήσεων για ανακυκλική φόρτιση σε μεγάλες παραμορφώσεις σε όρους αριθμού κύκλων φόρτισης για ρευστοποίηση N_L
 Figure 5. Summary comparisons of data versus simulations for cyclic shearing in terms of the number of cycles N_L for initial liquefaction

την περίπτωση της επιφανειακής θεμελίωσης.

Η πειραματική διάταξη του Πειράματος Νο. 12 καθώς και η θέση των μετρητών πιέσεων πόρων (P), επιταχύνσεων (ACC) και καθιζήσεων (LDVT) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. Σε πραγματικές διαστάσεις, το πείραμα αναφέρεται σε στρώση ρευστο-

ποίησιμης λεπτόκοκκης άμμου Nevada σχετικής πυκνότητας $D_r=60\%$ και πάχους 6m η οποία υπόκειται μη-ρευστοποίησιμης στρώσης ιλύος πάχους 1m με τον υδροφόρο ορίζοντα να βρίσκεται 1m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Η ανωδομή προσομοιώνεται με ένα άκαμπτο δοκίμιο πλάτους 4m και ύψους 3m το

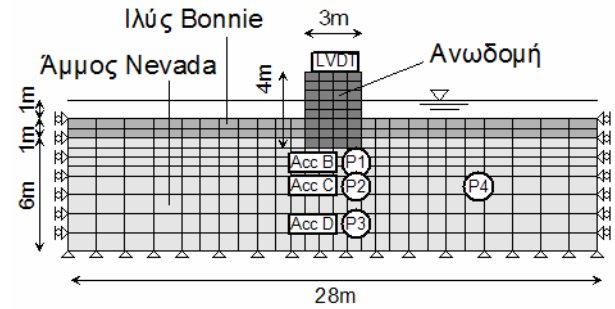
οποίο είναι θεμελιωμένο 0.5m εντός της στρώσης άμμου με τάση έδρασης 150kPa. Το πείραμα έγινε εντός άκαμπτου υποδοχέα (container) διαστάσεων 282mm x 128mm και υποβλήθηκε σε 100g φυγοκεντρική επιτάχυνση. Η βάση του υποδοχέα υποβλήθηκε σε αρμονική σεισμική διέγερση η οποία αποτελείται από 10 κύκλους σχεδόν σταθερής μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης 0.25g και συχνοτικού περιεχομένου 2Hz (Σχήμα 7). Η κατακόρυφη επιτάχυνση κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν πολύ μικρή και για αυτό δεν λήφθηκε υπόψη κατά την αριθμητική προσομοίωση. Για την καταγραφή της απόκρισης χρησιμοποιήθηκαν μετρητές πιέσεων πόρων, επιταχύνσεων αλλά και καθιζήσεων τόσο στον άξονα της θεμελίωσης όσο και στο ελεύθερο πεδίο.

Ο κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Η διέγερση επιβλήθηκε τόσο στη βάση του κάρναβου όσο και στα πλευρικά σύνορα για να προσομοιωθούν έτσι τα άκαμπτα σύνορα της πειραματικής διάταξης. Η στρώση ιλύος προσομοιώθηκε ως λεπτόκοκκο έδαφος πλασιμότητας $PI=15\%$ με ιξωδό-ελαστική συμπεριφορά κατά Vucetic & Dobry (1991), αλλά χωρίς συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων και υδατικών υπερπιέσεων.

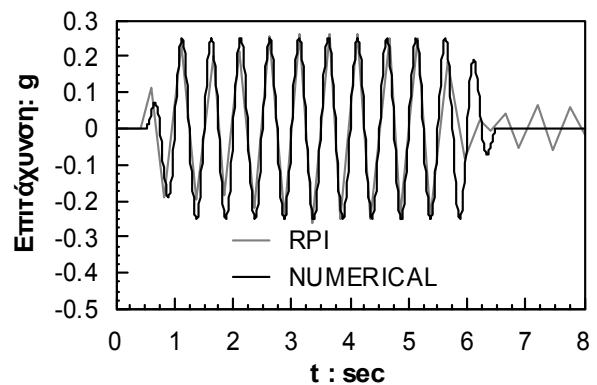
Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες υδατικών υπερπιέσεων $r_u = \Delta_u / \sigma'_{vo}$ αλλά και τα διανύσματα υδατικής ροής σε δύο χρονικές στιγμές ($t=2$ & 5sec) της σεισμικής διέγερσης, όπως προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση. Όπως παρατηρείται, η παρουσία ανωδομής αποτρέπει τη ρευστοποίηση κάτω από το θεμέλιο, η οποία συμβαίνει μόνο στο ελεύθερο πεδίο. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων είναι επίσης έντονη.

Αυτή η διαφοροποίηση της απόκρισης πλησίον και μακριά του θεμελίου παρατηρείται και στο Σχήμα 9 όπου συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες r_u της αριθμητικής ανάλυσης με τις αντίστοιχες πειραματικές στις τέσσερις θέσεις των καταγραφών (PP1 έως PP4). Συγκεκριμένα, από τη καταγραφή PP4 η οποία αντιπροσωπεύει την απόκριση του εδάφους μακριά από την κατασκευή (συνθήκες ελεύθερου πεδίου), παρατηρείται έντονη ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων, η οποία μετά από 4sec καταλήγει σε πλήρη ρευστοποίηση. Αντίθετα, στις θέσεις των μετρητών PP1, PP2, PP3 οι οποίοι καταγράφουν την απόκριση του εδάφους στον άξονα της θεμελίωσης σε διάφορα βάθη, παρατηρείται μεν ανάπτυξη

υδατικών υπερπιέσεων χωρίς όμως να καταλήγει σε ρευστοποίηση.



Σχήμα 6. Διάταξη πειράματος No. 12 – Κάρναβος & συνοριακές συνθήκες.
Figure 6. VELACS Model 12 configuration – Mesh and boundary conditions



Σχήμα 7. Χρονοϊστορία επιβληθείσας διέγερσης
Figure 7. Timehistory of input motion

Και στις τέσσερις θέσεις τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τα αντίστοιχα πειραματικά. Μοναδική απόκλιση παρατηρείται στον ρυθμό αποτόνωσης των υδατικών υπερπιέσεων όπου οι προβλεπόμενοι ρυθμοί είναι μεγαλύτεροι από τους μετρηθέντες. Μια πιθανή εξήγηση είναι η προσεγγιστική προσομοίωση της διέγερσης που υποβλήθηκε, η οποία δεν σταματάει στα 6sec αλλά συνεχίζεται με απομειωμένη επιτάχυνση η οποία όμως τελικά ενισχύεται σημαντικά στα ανώτερα στρώματα (Σχήματα 7 και 10).

Στα Σχήματα 10 και 11 συγκρίνονται τα αποτελέσματα σε όρους οριζόντιων επιταχύνσεων και καθιζήσεων. Και εδώ η αριθμητική ανάλυση προβλέπει με ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές για τη μελέτη της απόκρισης εδαφών και θεμελίωσης έναντι ρευστοποίησης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα εργασία προκύπτει ότι το νέο καταστατικό προσομοίωμα προβλέπει με επιτυχία την απόκριση μη-συνεκτικών εδαφών (άμμων και ιλύων):

- σε επίπεδο στοιχείου & καννάβου
- σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις
- σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση
- σε στραγγιζόμενες και αστραγγιστες συνθήκες
- για διάφορες πυκνότητες, αρχικές τάσεις και συνθήκες φόρτισης

Από πρακτικής σκοπιάς, το σημαντικότερο είναι ότι η επιτυχής προσομοίωση επιτυγχάνεται με την ίδια ομάδα παραμέτρων για όλες τις ανωτέρω συνθήκες. Η ενσωμάτωση του σε εμπορικό λογισμικό, ευρείας χρήσης σε θέματα Γεωτεχνικής Μηχανικής και στην Ελλάδα, δίνει τη δυνατότητα για ακριβή προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης εδαφών και θεμελιώσεων σε πρακτικές εφαρμογές, η δε χρήση του αναμένεται ότι θα οδηγήσει σε πληρέστερη κατανόηση μηχανισμών σε προβλήματα Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής.

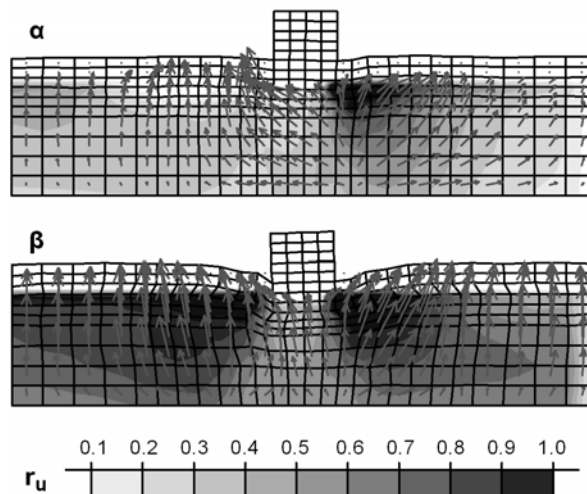
7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Δ. Καραμήτρο, Πολιτικό Μηχανικό, Υποψ. Διδάκτορα Ε.Μ.Π για τη βοήθεια του στην εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων. Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία

Έρευνας & Τεχνολογίας (Γ.Γ.Ε.Τ.) μέσω του προγράμματος ΕΠΑΝ-ΔΠ23 ("X-SOILS").

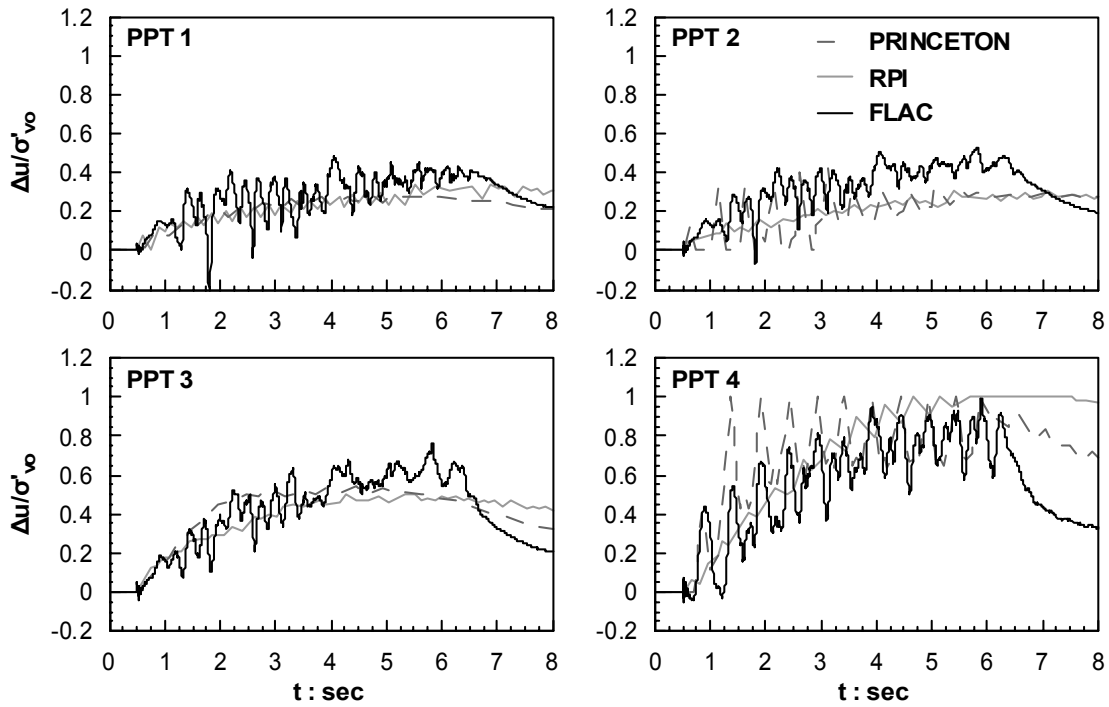
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ανδριανόπουλος Κ. Ι. (2005), "Αριθμητική προσομοίωση στατικών και δυναμικών φορτίσεων σε ελαστοπλαστικά εδάφη", Διδασκτορ. Διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π. (υπό συγγραφή).
- Arulmoli K. Muraleetharan K. K., Hossain M. M., Fruth L. S. (1992), "VELACS", Research report, The Earth. Techn. Corp.
- De Alba P., Seed H. B., Chan C. K. (1976), "Sand liquefaction in large-scale simple shear tests", *Journal of Geotech. Engr.*, ASCE, 102 (9), pp. 909-927
- Papadimitriou A. G., Bouckovalas G. D. (2002), "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation", *Soil. Dyn. Earth. Eng.*, Vol. 22, pp. 191-204
- Παπαδημητρίου Α. (1999), "Ελαστοπλαστική προσομοίωση της μονοτονικής και δυναμικής συμπεριφοράς εδαφών", Διδασκτορ. Διατριβή, Τομέας Γεωτεχν. ΕΜΠ.
- Popescu R., Prevost J. H. (1993), "Numerical class A predictions for Models 1, 2, 3, 4, 6, 11 & 12", VELACS, Balkema, pp. 1105-1207
- Sloan S. W. (1987), "Substepping schemes for the numerical integration of elastoplastic stress-strain relations", *Int. Jnl. Num. Meth. Eng.*, Vol. 24, pp. 893-911
- Itasca (1998), FLAC version 3.4
- Vucetic M., Dobry R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response", *Journal of Geotech. Engr.*, ASCE, 114(2), pp. 133-149

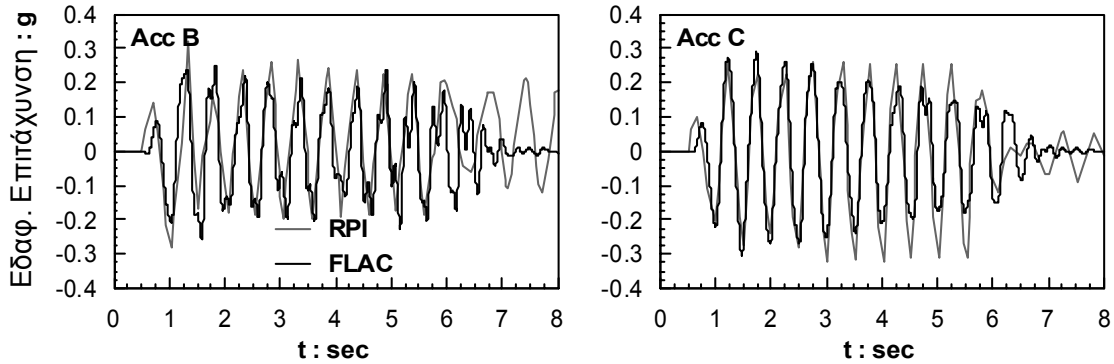


Σχήμα 8. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων - Ισοκαμπύλες λόγω υδατικών υπερπιέσεων r_u και διανυσμάτων ροής για (α) $t=2\text{sec}$, (β) $t=5\text{sec}$

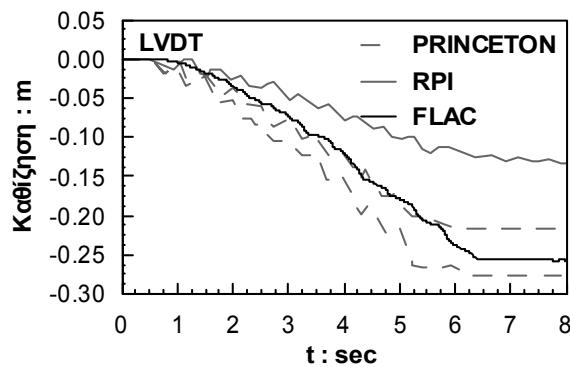
Figure 8. Numerical analysis results - Contours of excess pore pressure ratio and flow vectors for (a) $t=2\text{sec}$, (b) $t=5\text{sec}$



Σχήμα 9. Χρονοϊστορίες λόγω υδατικών υπερπίεσεων
 Figure 9. Excess pore pressure ratio time histories



Σχήμα 10. Χρονοϊστορίες οριζόντιων επιταχύνσεων
 Figure 10. Acceleration time histories



Σχήμα 11. Χρονοϊστορία καθιζήσεων ανωδομής
 Figure 11. Structure settlement time histories