



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

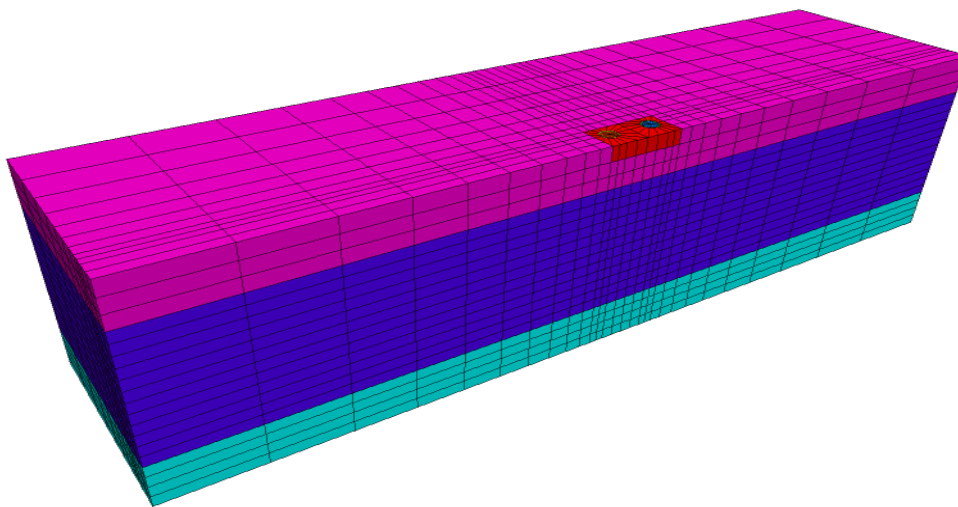
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΒΑΘΙΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΑΘΗΤΙΚΗ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΑΝΤΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Ιωάννης Τιπτιρής

Επιβλέπων: **Αχιλλέας Γ. Παπαδημητρίου**, Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.



DIPLOMA THESIS

**NUMERICAL SIMULATION OF THE SEISMIC RESPONSE OF
SOILS AND DEEP FOUNDATIONS AFTER PASSIVE
STABILIZATION AGAINST LIQUEFACTION**

Ioannis Tiptiris

Supervisor: **Achilleas G. Papadimitriou** , Assistant Professor NTUA

Νοέμβριος/November 2017

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή σηματοδοτεί το τέλος της φοιτητικής μου ζωής στο ΕΜΠ, και θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της.

Πρώτα και κύρια θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος επέβλεψε την διπλωματική αυτή εργασία. Για περίπου 7 μήνες ο άνθρωπος αυτός ήταν δίπλα μου σε κάθε στάδιο, αφιερώνοντας το χρόνο του για να λύσει κάθε είδους απορία και να βοηθήσει όσο περισσότερο μπορεί. Η καθοδήγηση του και η προθυμία του κυρίως να βοηθήσει και να διαλευκάνει κάθε είδους ασάφεια συνέβαλλε καθοριστικά όχι μόνο στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, αλλά και στο να αποκτήσω μια βαθύτερη και πιο ολοκληρωμένη αντίληψη για τα αντικείμενα της γεωτεχνικής. Τον ευχαριστώ σαν δάσκαλο για όλα όσα μου έμαθε αλλά κυρίως σαν άνθρωπο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, και για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό τον καιρό.

Πολλά ακόμη άτομα της κοινότητας του ΕΜΠ βοήθησαν στην δημιουργία αυτής της εργασίας. Μία εξ' αυτών είναι η Ταξιαρχούλα Λημναίου, υποψήφια διδάκτορας ΕΜΠ, η οποία με βοήθησε στα αρχικά στάδια αυτού του ταξιδιού. Την ευχαριστώ για όλες τις γνώσεις που μου έδωσε και για το χρόνο που αφιέρωσε για να βοηθήσει. Επιπλέον ευχαριστώ πολύ τον Δρ. Ιωάννη Χαλούλο, του οποίου η βοήθεια ήταν καθοριστική για το κομμάτι των αριθμητικών προσομοιώσεων.

Τέλος δεν ξεχνώ τους δικούς μου ανθρώπους που μου στάθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ λοιπόν, απ' τα βάθη της καρδιάς μου, τους γονείς μου, Μαίρη και Δημήτρη, τους φίλους μου, Νίκο και Ηρακλή, την Ισαβέλλα αλλά και όλους όσους με στήριξαν σε αυτή την προσπάθεια.

Γιάννης

Περίληψη

Σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών, η χρήση των πλέον διαδεδομένων μεθόδων αποτροπής ή/και περιορισμού της σεισμικής ρευστοποίησης είναι είτε δύσκολη ή αδύνατη (π.χ. δονητική αντικατάσταση). Σε τέτοιες θέσεις, συνήθως επιλέγονται μικροπάσσαλοι, ενέματα υψηλού ιξώδους, ή προκατασκευασμένα στραγγιστήρια που αφενός δεν αποτρέπουν τη ρευστοποίηση σε όλη την κάτοψη (λόγω αδυναμίας πρόσβασης του εξοπλισμού) και αφετέρου μπορούν να δημιουργήσουν δομικά προβλήματα (π.χ. ανασήκωμα θεμελίων με χρήση ενεμάτων). Μια εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης του εδάφους χωρίς τα παραπάνω μειονεκτήματα είναι η παθητική σταθεροποίηση. Πρόκειται για την αργή εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας (ενός υδατικού διαλύματος νάνο-σωματιδίων SiO_2) που χαρακτηρίζεται από αρχικώς χαμηλό ιξώδες (επιτρέποντας την εύκολη διήθησή του), που όμως αυξάνει ραγδαία μετά από ελεγχόμενο χρόνο (όταν φθάσει στη θέση θεμελίωσης). Η αύξηση του ιξώδους μετατρέπει το υγρό πόρων του εδάφους σε γέλη και η εν λόγω γέλη καθιστά το σταθεροποιημένο έδαφος πιο δύσμητο και λιγότερο συστολικό, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των παραμορφώσεων υπό ανακυκλική διάτμηση που σχετίζονται με τη ρευστοποίηση.

Η εφαρμογή της νέας μεθόδου βελτίωσης εδαφών στην πράξη χρειάζεται μια μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής συμπεριφοράς του σταθεροποιημένου εδάφους. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει τέτοια μεθοδολογία στη βιβλιογραφία πέραν της πρόσφατης πρότασης της Αγαπουλάκη (2017), στόχος της παρούσας εργασίας είναι να καλυφτεί αυτό το κενό, μέσω συγκρίσεων αριθμητικών προσομοιώσεων με πειραματικές μετρήσεις κυρίως από δυναμικές δοκιμές σε φυγοκεντρική (από τη βιβλιογραφία) που αφορούν στη σεισμική απόκριση των σταθεροποιημένων άμμων. Ελλείψει ενός εξειδικευμένου καταστατικού προσομοιώματος για τέτοια εδάφη, επιχειρήθηκε η «ευφυής» χρήση του προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianoopoulos et al. 2010) που αφορά σε φυσικές άμμους.

Μια νέα μεθοδολογία προσομοίωσης προέκυψε εν μέρει από την επεξεργασία των πρόσφατων πειραματικών αποτελεσμάτων μιας σειράς μονοτονικών τριαξονικών δοκιμών (σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά από σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία) των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017). Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εν λόγω δοκιμών προέκυψαν οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31 στο χώρο δείκτη πόρων – μέσης ενεργού τάσης, με τη δεύτερη να είναι μετατοπισμένη σε μεγαλύτερους δείκτες πόρων και να είναι μεγαλύτερης κλίσης, ποσοτικοποιώντας την αύξηση της δυσμησίας και μείωση της συστολικότητας λόγω σταθεροποίησης που όμως φθίνει σε μεγάλες τιμές μέσης τάσης. Δεδομένου ότι οι διαθέσιμες δοκιμές φυγοκεντρική έχουν εκτελεστεί σε άμμο Nevada και όχι M31 και το προσομοίωμα NTUA-SAND έχει βαθμονομηθεί για φυσική άμμο Nevada έγινε η παραδοχή ότι η σταθεροποίησή της θα οδηγήσει σε αντίστοιχα μετατοπισμένη CSL. Ο πρώτος έλεγχος αυτής της έμμεσης βαθμονόμησης έγινε με προσομοιώσεις ανακυκλικών δοκιμών απλής διάτμησης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Nevada και έδειξε ότι δίνει αυξημένη αντοχή σε ρευστοποίηση, που είναι στο άνω όριο του εύρους των αντίστοιχων βιβλιογραφικών δεδομένων από πειραματικές μετρήσεις σε άλλες άμμους.

Στη συνέχεια εκτελέστηκαν προσομοιώσεις τριών (3) προβλημάτων συνοριακών τιμών, προκειμένου να διακριβωθεί η αξιοπιστία της νέας μεθοδολογίας, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών με τα λογισμικά FLAC και FLAC^{3D} . Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν τρεις (3) σειρές δυναμικών δοκιμών φυγοκεντρική, μία για τη 1D σεισμική απόκριση επίπεδου εδάφους (Gallagher et al. 2007), μία για τη 2D σεισμική απόκριση εδάφους υπό μικρή κλίση (Conlee et al. 2012) και μία για την 3D σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε έδαφος υπό μικρή κλίση (Pamuk et al. 2007), καλύπτοντας ένα αρκετά μεγάλο εύρος εντάσεων διέγερσης ώστε να ληφθεί μια ξεκάθαρη εικόνα για την καταλληλότητα εφαρμογής των υπό εξέταση μεθοδολογιών προσομοίωσης. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν: (α) ο επαναπροσδιορισμός της CSL του σταθεροποιημένου υλικού (όπως παραπάνω), (β) η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση που έγκειται στην σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας K του υγρού των πόρων (Αγαπουλάκη 2017) και (γ) μία

προσέγγιση που συνδυάζει τις (α) και (β), δηλαδή τον επαναπροσδιορισμό της CSL ταυτόχρονα με μια ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων.

Τα αποτελέσματα των εν λόγω προσομοιώσεων κατέδειξαν τα εξής:

- Η σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων K , χωρίς αλλαγή στις σταθερές του προσομοιώματος για τον εδαφικό σκελετό (Αγαπουλάκη 2017), προβλέπει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα όλων των εξετασθέντων δοκιμών σε επίπεδο μετακινήσεων, επιταχύνσεων, υπερπιέσεων πόρων, αλλά και καμπτικών ροπών της πασσαλομάδας του πειράματος των Ramuk et al. (2007).
- Ο επαναπροσδιορισμός της CSL του σταθεροποιημένου υλικού, χωρίς αλλαγή στο μέτρο συμπίεστότητας του υγρού πόρων K , οδηγεί σε ποιοτικώς ορθά αποτελέσματα, αλλά δεν προσφέρει ποσοτική ακρίβεια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ρευστοποίηση καθυστερεί μεν χρονικά αλλά δεν αποφεύγεται τελικώς, ενώ υπερεκτιμούνται οι μετακινήσεις των σταθεροποιημένων εδαφών.
- Ο συνδυασμός της επαναπροσδιορισμένης CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K_w (ελαφρότερη εκείνης της Αγαπουλάκη 2017) οδηγεί σε ελαφρώς ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη πρόταση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι παρατηρείται ελαφρώς καλύτερη εκτίμηση των μετακινήσεων, ενώ οι καμπτικές ροπές της πασσαλομάδας στο πείραμα των Ramuk et al. (2007) προσεγγίζονται με συγκρίσιμη ακρίβεια με εκείνη της υπάρχουσας βέλτιστης πρότασης.

Abstract

At developed sites, the mitigation of seismic liquefaction via conventional ground improvement methods is either difficult or impossible to implement (e.g. vibro-replacement). In such cases, the usually applied methods (micropiles, high viscosity grouting, perforated drains) cannot mitigate liquefaction under the whole structure (due to inaccessibility of the equipment) and may even cause structural problems (e.g. footing heave during grouting). An alternative ground improvement method without these drawbacks is passive (site) stabilization. It entails the low-pressure injection of colloidal silica (an aqueous suspension of silica nano-particles, SiO_2), which has a low initial viscosity (allowing injection) that increases rapidly after well-controlled time (when it has reached the foundation of the structure). The increase of viscosity causes gelation of the pore fluid and this gelation leads to a stiffer and less contractive stabilized soil, which is less vulnerable to plastic strain accumulation related to liquefaction.

The application of the new improvement method requires a methodology for numerical simulation of the seismic response of stabilized soils. Such a methodology does not exist in the literature, which only includes the recent proposal of Agapoulaki (2017). The scope of this thesis is to cover this gap, via comparisons of numerical results with laboratory measurements mainly from dynamic centrifuge tests (from the literature) that study the seismic response of stabilized sands. Due to the lack of a dedicated constitutive model for such soils, the “intelligent” use of the NTUA-SAND model (Andrianopoulos et al. 2010) was considered, despite that it was proposed for untreated sands.

A new simulation methodology came about partly from the processing of the recent series of monotonic triaxial tests performed by Georgiannou et al. (2017) and Pavlopoulou (2017) on both untreated and treated M31 sand samples. This processing provided the Critical State Lines (CSLs) in the void ratio – mean effective stress space for the untreated and treated M31 sands. The CSL for the treated M31 sand was located at higher void ratios and is relatively more inclined, thus quantifying that the increase of stiffness and reduction of contractiveness due to stabilization diminishes at high mean effective stresses. Given that the available centrifuge tests employed treated and untreated Nevada sand and that the NTUA-SAND model has been calibrated for untreated Nevada sand, it was assumed here that its stabilization would impose a similar dislocation of the CSL. Simulations of cyclic simple shear tests for untreated and treated Nevada sand and showed that the new calibration leads to an increase of liquefaction resistance, which lies on the upper bound of pertinent data from literature measurements on other sands.

In the sequel, simulations of three (3) boundary-value problems were performed in order to validate the reliability of the new methodology. These simulations were performed with the finite-differences codes FLAC and FLAC^{3D}. These simulations correspond to three (3) series of dynamic centrifuge tests, which refer to the 1D seismic response of stabilized sand (Gallagher et al. 2007), the 2D seismic response of a mildly inclined layer of stabilized sand (Conlee et al. 2012), and the 3D seismic response of a pile group in a mildly inclined layer of stabilized sand (Pamuk et al. 2007). These tests cover a wide range of excitation intensities, thus providing for a reliable validation procedure of the examined simulation methodologies. These include: (a) the dislocation of the CSL due to stabilization (as mentioned above), (b) the significant reduction of the pore fluid bulk modulus K (the optimal existing methodology of Agapoulaki 2017) and (c) a combination of (a) and (b) above, i.e. the dislocation of the CSL concurrently with a mild reduction of the pore fluid bulk modulus K .

The results of these simulations showed the following:

- The significant reduction of the pore fluid modulus K , without any other recalibration in the model constants for the soil skeleton (Agapoulaki, 2017), shows satisfactory simulation accuracy for all tests, in terms of displacements, accelerations, excess pore pressures, as well as pile bending moments in the test of Pamuk et al. (2007).

- The dislocation of the CSL due to stabilization, without any change in the pore fluid bulk modulus K , leads to qualitatively accurate results, but does not provide quantitative accuracy. Indicatively, liquefaction is delayed, but is not avoided in any simulation, while displacements of stabilized sands are over predicted.

The combination of a dislocated CSL with a mild reduction of the pore fluid bulk modulus K (milder than that proposed by Agapoulaki 2017) leads to slightly more accurate results than what the optimal existing methodology provides. Indicatively, a slightly more accurate simulation of displacements is ensured, while the bending moments for the pile group of the Pamuk et al. (2007) experiment are simulated with comparable accuracy.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Η ιδέα της παθητικής στερεοποίησης στην πράξη: α) με εισπίεση και άντληση, β) μέσω της φυσικής υπόγειας ροής (Pamuk et al 2007).	2
Σχήμα 2.1: Δομή μονομερούς σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας αριστερά, δημιουργία δεσμών σιλοξάνης μεταξύ σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά την γελοποίηση (από Moridis et al. 1995) δεξιά	5
Σχήμα 2.2: Διάταξη πειράματος συμπεριλαμβανομένων και των οργάνων μέτρησης (Gallagher et al 2007) ..	7
Σχήμα 2.3: Επιταχυνσιογραφήματα σε διάφορα βάθη για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη διέγερση (δεξιά) αντίστοιχα. (Gallagher et al 2007).....	8
Σχήμα 2.4: Καθιζήσεις κατά τη διάρκεια 1 ^{ου} (πάνω) και 2 ^{ου} (κάτω) σεισμικού κραδασμού (Gallagher et al 2007)	8
Σχήμα 2.5: Διάταξη πειραμάτων συμπεριλαμβανομένων των θέσεων τοποθέτησης οργάνων (Conlee et al. 2012).....	9
Σχήμα 2.6: Καθιζήσεις (αριστερά) και Οριζόντιες Μετατοπίσεις (δεξιά) κατά τη διάρκεια των 5 πρώτων σεισμικών διεγέρσεων. (Conlee et al. 2012).....	11
Σχήμα 2.7: Χρονοϊστορίες συντελεστή r_u (πρώτη γραμμή) και επιταχύνσεων σε δύο ύψη για το φυσικό έδαφος στη δοκιμή CTC01. (Conlee et al. 2012)	11
Σχήμα 2.8: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων βάσεως και σε ύψος 3,3m για τις διάφορες περιεκτικότητες CS% (κατακόρυφη κλίμακα) για κάθε ένα εκ των 5 διεγέρσεων. (Conlee et al. 2012).....	12
Σχήμα 2. 9: Διάταξη πειράματος και οργάνων μέτρησης. (Pamuk et al. 2007)	13
Σχήμα 2.10: Χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων (Δu) για το έδαφος μακριά από την πασσαλομάδα (πάνω διάγραμμα) και στην περιοχή της πασσαλομάδας (κάτω διάγραμμα). (Pamuk et al. 2007)	13
Σχήμα 2.11: Μετρηθείσες επιταχύνσεις σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος για το μοντέλο 1 (αριστερά) και το μοντέλο 2 (δεξιά) αντίστοιχα. (Pamuk et al. 2007).....	14
Σχήμα 2.12: Οριζόντιες μετακινήσεις εδάφους, στην περιοχή μακριά της πασσαλομάδας για κάθε μοντέλο σε διάφορες χρονικές στιγμές. (Pamuk et al. 2007)	15

Σχήμα 2.13: Χρονοιστορία παραμενουσών παραμορφώσεων, για την επιφάνεια του εδάφους και τον κεφαλόδεσμο της πασσαλομάδας για κάθε μοντέλο. (Pamuk et al. 2007)	15
Σχήμα 2.14: Διαγράμματα καμπτικών ροπών καθ' ύψος των πασσάλων για κάθε μοντέλο αντίστοιχα, σε διάφορες χρονικές στιγμές. (Pamuk et al. 2007)	16
Σχήμα 2.15: Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων καθ' ύψος των πασσάλων για κάθε μοντέλο αντίστοιχα, σε διάφορες χρονικές στιγμές. (Pamuk et al. 2007)	17
Σχήμα 2.16: Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων υπό αριθμητική προσομοίωση σε βάθος 4,98m από την επιφάνεια για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο. (Kodaka et al. 2005)	19
Σχήμα 2.17: Χρονοιστορίες επιταχύνσεων στο ρευστοποιήσιμο στρώμα για φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη (δεξιά) άμμο, από αριθμητική προσομοίωση. (Kodaka et al. 2005).....	19
Σχήμα 2.18: Σύγκριση χρονοιστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν σε βάθος 2 μέτρων στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a), με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων. (Αγαπουλάκη 2017).....	21
Σχήμα 2.19: Σύγκριση χρονοιστοριών καθιζήσεων όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a), με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων. (Αγαπουλάκη 2017).	21
Σχήμα 2.20: Σύγκριση χρονοιστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν σε διάφορα βάθη στο πείραμα (Conlee et al. 2012), με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων. (Αγαπουλάκη 2017)	22
Σχήμα 3.1: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο p-q (Andriopoulos et al. 2010).....	26
Σχήμα 3.2: Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο e-lnp και ορισμός της παραμέτρου κατάστασης ψ.	27
Σχήμα 3.3: Γράφημα ογκομετρικών παραμορφώσεων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για διάφορα δοκίμια σε διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης (Georgiannou et al 2017).	28
Σχήμα 3.4: Γραφική απεικόνιση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης (CSLs) για την φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο M31 βάσει της επεξεργασίας των δεδομένων της δημοσίευσης των Georgiannou et al. (2017), και της μεταπτυχιακής εργασίας της Ελένης-Μαρίας Παυλοπούλου (2017).	32
Σχήμα 3.5: Γραφική απεικόνιση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης (CSLs) για την φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada μετά από επεξεργασία των CSL της άμμου M31.	34
Σχήμα 3.6: Συγκεντρωτικό διάγραμμα βελτίωσης αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους ΔCSR) λόγω σταθεροποίησης, συναρτήσει των κύκλων φόρτισης NI από τις διάφορες μελέτες της βιβλιογραφίας και τις αριθμητικές αναλύσεις	36

Σχήμα 3.7: Συγκεντρωτικό διάγραμμα βελτίωσης αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους RCSR) λόγω σταθεροποίησης, συναρτήσει των κύκλων φόρτισης NI από τις διάφορες μελέτες της βιβλιογραφίας και τις αριθμητικές αναλύσεις	37
Σχήμα 4.1: Διάταξη και όργανα μέτρησης στο προσομοίωμα του φυγοκεντριστή. (Gallagher 2007a)	41
Σχήμα 4.2: (a) Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/825$ (Agaroulaki 2017) και για την επαναπροσδιορισθείσα CSL. (b) Οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπιέσεων πόρων ru όπως προέκυψαν από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις σε διάφορα βάθη.	42
Σχήμα 4.3: Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων , για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/825$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL	43
Σχήμα 4.4: (α) Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/825$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων ($K= Kw/400$), (b) Οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπιέσεων πόρων ru , όπως προέκυψαν από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις σε διάφορα βάθη.....	45
Σχήμα 4.5: Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων , για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/825$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων ($K= Kw/400$).....	46
Σχήμα 5.1: Κάναβρος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα FLAC 2D για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος CTC01 των Conlee et al (2012).	48
Σχήμα 5.2: Η στρωματογραφία του καννάβου, μωβ: η επιφανειακή στρώση Yolo loam, κόκκινο: η ενδιάμεση στρώση άμμου Nevada, ροζ: η κατώτερη στρώση άμμου Monterey στο σταθεροποιημένο αριστερό πρανές και στο φυσικό δεξί πρανές μωβ: η επιφανειακή στρώση Yolo loam, πράσινο: η ενδιάμεση στρώση άμμου Nevada, κίτρινο: η κατώτερη στρώση άμμου Monterey.	49
Σχήμα 5.3: Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη στο πείραμα CTC01 – Shake3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL.....	51

Σχήμα 5.4: Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων (a έως d) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (e έως h) όπως μετρήθηκαν στο πείραμα CTC01 – Shake 3 (Conlee et al 2012) στην επιφάνεια του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL..... 52

Σχήμα 5.5: Σύγκριση των χρονοϊστοριών του λόγου υπερπιέσεων πόρων ru όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z και σε αποστάσεις x από τη μεμβράνη στο πείραμα CTC01 – Shake 3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL. 53

Σχήμα 5.6: Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη στο πείραμα CTC01 - Shake3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$)..... 55

Σχήμα 5.7: Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων (a έως d) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (e έως h) όπως μετρήθηκαν στο πείραμα CTC01 Shake3 (Conlee et al 2012) στην επιφάνεια του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$) 56

Σχήμα 5.8: Σύγκριση των χρονοϊστοριών του λόγου υπερπιέσεων πόρων ru όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z και σε αποστάσεις x από τη μεμβράνη στο πείραμα CTC01 Shake 3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$)..... 57

Σχήμα 5.9: Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη στο πείραμα CTC01- Shake 4 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$). 59

Σχήμα 5.10: Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων (a έως d) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (e έως h) όπως μετρήθηκαν στο πείραμα CTC01 Shake 4 (Conlee et al 2012) στην επιφάνεια του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$). 60

- Σχήμα 5.11:** Σύγκριση των χρονοϊστοριών του λόγου υπερπιέσεων πόρων u όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z και σε αποστάσεις x από τη μεμβράνη στο πείραμα CTC01 Shake 4 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K=K_w/600$). 61
- Σχήμα 6.1 :**Κάναβρος που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα FLAC3D για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος των Pamuk et al. (2007), όπου διαφαίνεται η διαζώνιση των διαφορετικών υλικών. 64
- Σχήμα 6.2:** Τελική διάταξη πειράματος συμπεριλαμβανομένων και των οργάνων μέτρησης (Pamuk et al.2007) 66
- Σχήμα 6.3:** Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων εντός της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους. 67
- Σχήμα 6.4:** Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες οριζόντιων μετατοπίσεων επιφανείας, στο ελεύθερο πεδίο (free field) και επί του κεφαλόδεσμου (pile cap) αντίστοιχα, για τη δοκιμή με τη ρευστοποιήσιμη στρώση. 67
- Σχήμα 6.5:** Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις με το βάθος στο ελεύθερο πεδίο σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη ρευστοποιήσιμη στρώση..... 68
- Σχήμα 6.6:** Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις καμπτικών ροπών των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη ρευστοποιήσιμη στρώση..... 69
- Σχήμα 6.7:** Συγκριτικά διαγράμματα 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων εντός της σταθεροποιημένης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους (τα πειραματικά αποτελέσματα ($r_u=1$) αφορούν τη δοκιμή με τη ρευστοποιημένη στρώση άμμου, και παρουσιάζονται εδώ ενδεικτικά). Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017)..... 70
- Σχήμα 6.8:** Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες οριζόντιων μετατοπίσεων επιφανείας, στο ελεύθερο πεδίο (free field) και επί του κεφαλόδεσμου (pile cap) αντίστοιχα, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017)..... 70

Σχήμα 6.9: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις με το βάθος στο ελεύθερο πεδίο σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017). 71

Σχήμα 6.10: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις καμπτικές ροπές των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017). 72

Σχήμα 6.11: Συγκριτικά διαγράμματα 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων εντός της σταθεροποιημένης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους (τα πειραματικά αποτελέσματα ($r_u=1$) αφορούν τη δοκιμή με τη ρευστοποιημένη στρώση άμμου, και παρουσιάζονται εδώ ενδεικτικά). Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017). 73

Σχήμα 6.12: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες οριζόντιων μετατοπίσεων επιφανείας, στο ελεύθερο πεδίο (free field) και επί του κεφαλόδεσμου (pile cap) αντίστοιχα, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017). 74

Σχήμα 6.13: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις με το βάθος στο ελεύθερο πεδίο σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017). 74

Σχήμα 6.14: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις καμπτικών ροπών των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017). 75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σεισμικές διεγέρσεις για κάθε πείραμα (Conlee et al. 2012).....	10
Πίνακας 2.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα καμπτικών ροπών και μετακινήσεων κεφαλής. (Pamuk et al. 2007).....	17
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά υλικών και δοκιμών των Georgiannou et al. (2017).....	28
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα επεξεργασίας για τιμές e_{cs} και p_{cs} από τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017), για τα δοκίμια φυσικής άμμου M31. ...	29
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα επεξεργασίας για τιμές e_{cs} και p_{cs} από τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017), για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31.....	30
Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα επεξεργασίας για τιμές e_{cs} και p_{cs} από τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017 και Παυλοπούλου (2017)), για τα δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.....	30
Πίνακας 3.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων για σημεία επί των CSL από δοκιμές υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017). Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι δοκιμές στις οποίες το υλικό δεν έχει φτάσει ακόμα την CSL του αλλά ενσωματώνονται εδώ χάριν πληρότητας.	31
Πίνακας 4 1: Τιμές παραμέτρων NTUA-SAND για φυσική άμμο Nevada (Andrianopoulos et al, 2010).....	39
Πίνακας 5.1: Τιμές των σταθερών του Mohr-Coulomb για τη στρώση Yolo loam.....	49

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Κατάλογος Σχημάτων	v
Κατάλογος Πινάκων	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Εισαγωγή.....	1
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος.....	1
1.2 Στόχος της Εργασίας	3
1.2 Διάρθρωση της Εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Παθητική Σταθεροποίηση στη Βιβλιογραφία.....	5
2.1 Χαρακτηριστικά Κολλοειδούς Πυριτίας (Colloidal Silica).....	5
2.2 Πειράματα υπό κλίμακα σε Παθητικά Σταθεροποιημένα Εδάφη	6
2.3 Αριθμητική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών με κολλοειδή πυριτία.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Καταστατική προσομοίωση μηχανικής απόκρισης σταθεροποιημένων άμμων.....	25
3.1 Γενικά.....	25
3.2 Βασικά στοιχεία του καταστατικού προσομοιώματος	25
3.3 Επίδραση σταθεροποίησης στη Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης άμμων.....	27
3.4 Επίδραση σταθεροποίησης στις καμπύλες αντοχής στη ρευστοποίηση	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Αριθμητική προσομοίωση μονοδιάστατης σεισμικής απόκρισης οριζόντιας σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης.....	39
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρησης	39
4.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL).....	41
4.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό μικρή κλίση ..	47
5.1 Εισαγωγή.....	47
5.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρησης CTC01	47
5.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL για τη δοκιμή CTC01 - Shake 3....	50

5.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων για το πείραμα CTC01-Shake 3.....	54
5.5 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων για τη δοκιμή CTC01 - Shake 4	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης ομάδας πασσάλων σε σταθεροποιημένη αμμώδη στρώση υπό μικρή κλίση	63
6.1 Εισαγωγή	63
6.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκεντριστή για σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε πλευρικώς εξαπλούμενο έδαφος	63
6.3 Προσομοίωση πλευρικής εξάπλωσης για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε φυσική αμμώδη στρώση ..	67
6.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε σταθεροποιημένη στρώση	69
6.5 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε σταθεροποιημένη στρώση	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	77
7.1 Περίληψη – Συμπεράσματα	77
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	79
Βιβλιογραφία.....	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (άμμοι, αμμοχάλικα, αμμοιλίες) θεωρείται σήμερα ένα από τα κυρίαρχα αίτια αστοχίας κυρίως κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης, το κορεσμένο μη συνεκτικό έδαφος αδυνατεί να συμπιεστεί (λόγω αδυναμίας διαφυγής του νερού στα λίγα δευτερόλεπτα της διέγερσης), με αποτέλεσμα την αύξηση των πιέσεων πόρων του νερού. Έτσι βάση της αρχής της ενεργού τάσης, όσο η πίεση πόρων αυξάνει, η ενεργός τάση μειώνεται, και μπορεί να μηδενιστεί. Στην περίπτωση που αυτό συμβεί, η διατμητική αντοχή του εδάφους γίνεται πρακτικά μηδενική, παρατηρείται απότομη αύξηση παραμορφώσεων του εδάφους και σε μεγάλες μετακινήσεις των έργων Πολιτικού Μηχανικού.

Ο κίνδυνος της ρευστοποίησης σε νέες κατασκευές μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά, λαμβάνοντας κατάλληλα μέτρα για τη βελτίωση του εν δυνάμει ρευστοποιήσιμου εδάφους. Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι βασίζονται στη συμπύκνωση (π.χ. δυναμική συμπύκνωση, βαθιά δονητική συμπύκνωση), τη σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) και την αποτόνωση των πιέσεων των πόρων (στραγγιστήρια).

Ωστόσο, μεγάλο πρόβλημα προκύπτει σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών κατά την μελέτη των οποίων δεν είχε ληφθεί υπόψη ο κίνδυνος ρευστοποίησης. Ο λόγος είναι ότι οι προαναφερθείσες μεθοδολογίες βελτίωσης εδάφους αδυνατούν να εφαρμοσθούν, ή εφαρμόζονται πολύ δύσκολα. Η αδυναμία αυτή οφείλεται τόσο σε χωροταξικούς λόγους (έλλειψη χώρου λόγω αστικού περιβάλλοντος, αδυναμία κάλυψης ολόκληρης της κάτοψης του κτιρίου), όσο και σε κινδύνους πρόκλησης βλαβών στην κατασκευή από τη χρήση των μηχανημάτων. Επιπλέον, η παράλληλη λειτουργία της κατασκευής σε συνδυασμό με τις εργασίες αυτές αποτελεί πολλές φορές περιοριστικό παράγοντα (π.χ. σε νοσοκομεία). Τέλος, το κόστος για την επίτευξη του στόχου και την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων είναι πολλές φορές απαγορευτικό, ιδιαίτερα σε μεγάλες περιοχές που οικοδομήθηκαν χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο κίνδυνος της ρευστοποίησης.

Για τους παραπάνω λόγους, οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για βελτίωση εδαφών έναντι ρευστοποίησης σε υφιστάμενες κατασκευές είναι:

- Τοποθέτηση μικροπασσάλων ή περιμετρικού διαφραγματικού τοίχου
- Εισπίεση ενέματος (grouting)
- Έμπηξη στραγγιστηρίων με μορφή διακορευμένων σωλήνων

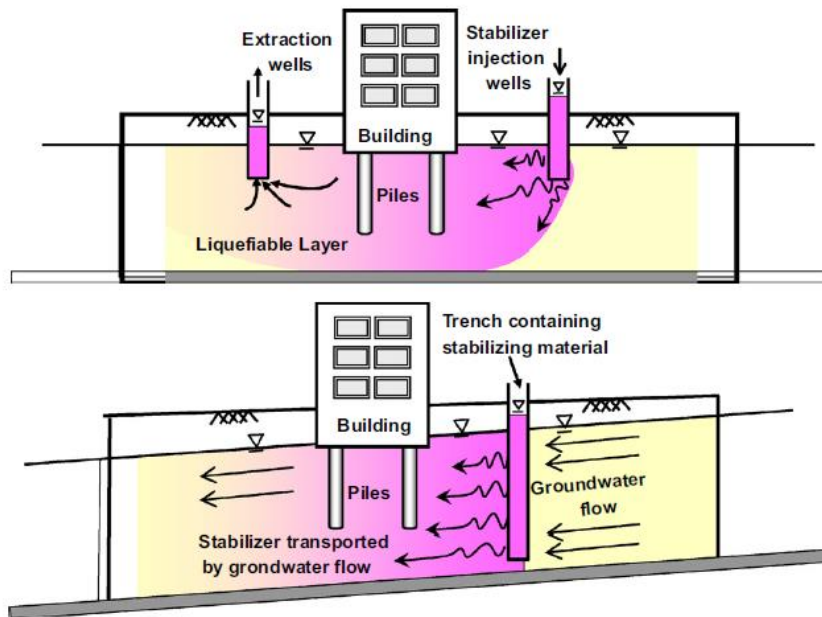
Ωστόσο και αυτές οι μεθοδολογίες δεν θεωρούνται πλήρως αποτελεσματικές καθώς, αφενός αδυνατούν να βελτιώσουν το έδαφος στο σύνολο της κάτοψης της κατασκευής και αφετέρου ο κίνδυνος πρόκλησης βλαβών στην κατασκευή είναι υψηλός. Επιπλέον συνοδεύονται από υψηλό κόστος εφαρμογής, γεγονός που πάντα αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα.

Η παθητική στερεοποίηση είναι μια εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης, η οποία δεν παρουσιάζει τα παραπάνω προβλήματα. Μελετήθηκε και παρουσιάστηκε αρχικά από την Gallagher (2000) και έχει αποτελέσει έκτοτε αντικείμενο έρευνας διεθνώς, αλλά και στη χώρα μας. Η μεθοδολογία συνίσταται στα εξής:

- Εισπίεση με χαμηλή πίεση ενός σταθεροποιητή (stabilizer). Ο σταθεροποιητής αποτελείται από νανοσωματίδια διαφόρων πιθανών μορφών χημικής σύστασης σε όλη την επιφάνεια της κάτοψης της κατασκευής.

- Ο σταθεροποιητής, αλληλοεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό και το υγρό των πόρων δίνοντας στο έδαφος νέα μηχανική συμπεριφορά και καθιστώντας το λιγότερο έως καθόλου ευάλωτο σε ρευστοποίηση.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η φύση του σταθεροποιητή που επιτρέπει την εύκολη εισπίεση του σε συνδυασμό με τα υψηλής ποιότητας αποτελέσματα. Ο σταθεροποιητής έχει αρχικά πολύ χαμηλό ιξώδες (εφάμιλλο με του νερού) που επιτρέπει την εύκολη εισπίεση του στο έδαφος, ενώ προοδευτικά αυξάνει μέχρις ότου να πιάσει την μέγιστη τιμή όταν θα βρίσκεται κάτω από την επιθυμητή περιοχή.



Σχήμα 1. 1: Η ιδέα της παθητικής στερεοποίησης στην πράξη: α) με εισπίεση και άντληση, β) μέσω της φυσικής υπόγειας ροής (Patuk et al 2007).

Η ποιότητα της εκτελεσθείσας παθητικής στερεοποίησης πρέπει να διασφαλίζεται. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών που αφορούν τόσο την απαραίτητη ποσότητα υλικού που πρέπει να διηθηθεί ώστε να έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα όσο και δοκιμών που αφορούν την ποιότητα και την ταχύτητα διήθησης του υλικού και την εξάπλωση του σε ολόκληρη την επιφάνεια που μας ενδιαφέρει. Ενδεικτικά μερικές δοκιμές είναι δοκιμές ανακυκλικής διάτμησης, δοκιμές εισπίεσης, τριαξονικές, CPT, SPT κ.λπ.

Η εισπίεση στην ευρύτερη περιοχή της θεμελίωσης ενός κτιρίου μπορεί να γίνει είτε μέσω γεωτρήσεων εισπίεσης και αντλήσεως εκατέρωθεν της κατασκευής με μεγαλύτερη υδραυλική κλίση από τη φυσική εάν υπάρχει, ή με τη διήθηση μέσω φρεάτων του σταθεροποιητή χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα φυσική ροή για τη διάδοση του (βλ. **Σχήμα 1.1**). Το κόστος της μεθόδου θεωρείται συγκρίσιμο με αυτά των υπάρχουσών μεθοδολογιών και αναμένεται περαιτέρω μείωση του εάν υπάρξει ευρύτερη εφαρμογή στην πράξη.

Η μέθοδος της παθητικής στερεοποίησης βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, δεδομένου ότι πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές του 21^{ου} αιώνα. Επομένως τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν ως σταθεροποιητές μελετώνται ακόμα. Εξυπακούεται ότι κάθε υποψήφιο υλικό επιβάλλεται να είναι μη τοξικό, να έχει υψηλή ανθεκτικότητα και να πληροί τις απαραίτητες περιβαλλοντικές προδιαγραφές, καθώς μιλάμε για διήθηση του στο υπέδαφος. Κυρίαρχα υλικά όπως καταδεικνύεται από τις μελέτες αποτελούν η κολλοειδής πυριτία (colloidal silica) αλλά και τα αργιλικά πλακίδια. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς εδαφών που έχουν σταθεροποιηθεί με χρήση κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητή.

1.2 Στόχος της Εργασίας

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χρήση της κolloειδούς πυριτίας ως υλικό σταθεροποίησης και στη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του σταθεροποιημένου εδάφους με χρήση του εν λόγω υλικού. Η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης του εδάφους έχει απασχολήσει τις τελευταίες δύο δεκαετίες σχεδόν, αρκετούς ερευνητές διεθνώς. Ωστόσο δεν έχει καθοριστεί ακόμα μια συγκεκριμένη μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής συμπεριφοράς του σταθεροποιημένου εδάφους. Στόχος λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι η κατοχύρωση μιας νέας μεθοδολογίας αριθμητικής προσομοίωσης, βασιζόμενη σε συγκρίσεις με πειραματικές μετρήσεις σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου και σε πειράματα φυγοκεντρική, ικανή να ποσοτικοποιήσει τη σεισμική απόκριση των σταθεροποιημένων εδαφών. Επιπλέον διερευνάται ο συνδυασμός της νέας προτεινόμενης προσέγγισης με προηγούμενες προτάσεις για την προσομοίωση του προβλήματος, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη δυνατή προσέγγιση.

Οι δύο αυτές προσεγγίσεις (υπάρχουσα βέλτιστη και νέα πρόταση) θα εξετασθούν ως προς την ορθότητα και την ακρίβεια τους σε τρία (3) προβλήματα συνοριακών τιμών. Συγκεκριμένα θα επιχειρηθεί η προσομοίωση των εξής πειραμάτων:

- Gallagher et al. (2007), που αφορά τη 1Δ σεισμική απόκριση οριζόντιου σταθεροποιημένου εδάφους,
- Conlee et al (2012), που αφορά στη 2Δ σεισμική απόκριση σταθεροποιημένης στρώσης με μικρή κλίση, και
- Ramuk et al. (2007), που αφορά στην 3Δ σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε σταθεροποιημένη στρώση με μικρή κλίση.

Απώτερος στόχος είναι να κατοχυρωθεί μια βέλτιστη δυνατή αριθμητική προσομοίωση, η οποία θα αποτελέσει στο μέλλον ένα χρήσιμο εργαλείο σχεδιασμού για κατασκευές επί σταθεροποιημένων εδαφών, στα έργα Πολιτικού Μηχανικού.

1.2 Διάρθρωση της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου. Επιγραμματικά :

- Στο Κεφάλαιο 2 διερευνάται συνοπτικά η υπάρχουσα σχετική βιβλιογραφία, με έμφαση τόσο στη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων εδαφών, αλλά κυρίως στις υπάρχουσες προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς παθητικώς σταθεροποιημένων εδαφών.
- Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μεθοδολογία προσομοίωσης που θα ακολουθηθεί στα πλαίσια της παρούσας έρευνας για την επιτυχή προσομοίωση των εξεταζόμενων πειραμάτων.
- Στο Κεφάλαιο 4 εξετάζεται η ακρίβεια της μεθοδολογίας προσέγγισης που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του πειράματος φυγοκεντρική των Gallagher et al. (2007), αλλά και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση που προέκυψε από το Κεφάλαιο 2, αλλά και συνδυασμό των δύο.
- Μετά, στο Κεφάλαιο 5 διερευνάται η αξιοπιστία των ίδιων μεθοδολογιών προσομοίωσης, όσον αφορά σειρά δυναμικών πειραμάτων φυγοκεντρική των Conlee et al. (2012).
- Στο Κεφάλαιο 6 εξετάζεται η ορθότητα και η ακρίβεια των εν λόγω μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με τις μετρήσεις του πειράματος φυγοκεντρική των Ramuk et al. (2007).
- Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα της εν λόγω εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, επί του ιδίου αντικειμένου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

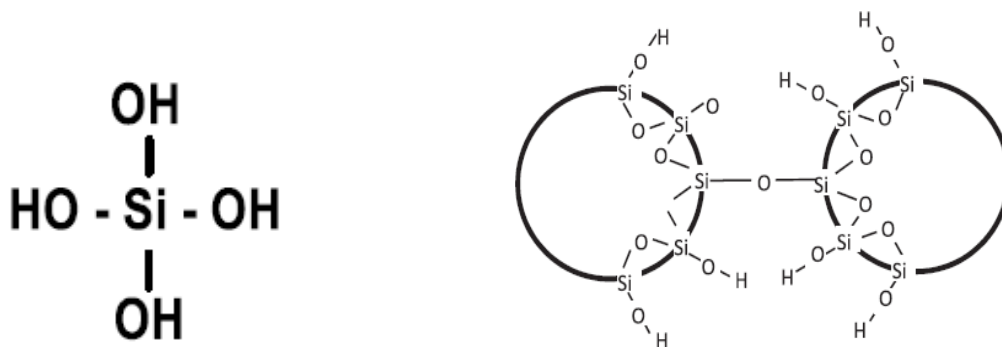
Παθητική Σταθεροποίηση στη Βιβλιογραφία

2.1 Χαρακτηριστικά Κολλοειδούς Πυριτίας (Colloidal Silica)

Κολλοειδή σωματίδια ονομάζονται αυτά που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο των ατομικών διαστάσεων ($> 1\text{nm}$) και ταυτόχρονα αρκετά μικρό ώστε να μην επηρεάζονται από τις βαρυτικές δυνάμεις ($>1\ \mu\text{m}$), διαφοροποιώντας τα τόσο από τα αιωρήματα όσο και από τα πραγματικά διαλύματα. Η κολλοειδής πυριτία Ludox SM, η οποία χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα με τα οποία θα ασχοληθεί η εργασία αυτή, αποτελείται από σωματίδια μεγέθους 7nm .

Λόγω των μικροσκοπικών διαστάσεων τους, ο λόγος επιφάνειας προς μάζα (ειδική επιφάνεια) είναι εξαιρετικά μεγάλος. Συγκεκριμένα, για την πυριτία Ludox SM οι προδιαγραφές αναφέρουν ειδική επιφάνεια ίση με $345\ \text{m}^2/\text{g}$. Τα σωματίδια αλληλοεπιδρούν τόσο με απωστικές δυνάμεις (ηλεκτροστατικές) αλλά και ελκτικές (Van der Waals), ενώ η φύση του διαλύματος εξαρτάται από το ποιες υπερτερούν κάθε στιγμή.

Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας Ludox SM στο εμπόριο έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 ίση με 30% κατά βάρος και είναι σταθεροποιημένα σε βασικό $\text{pH}=10$ με χρήση αλκαλικού παράγοντα Na_2O . Το ιξώδες του υγρούλυματος είναι ίσο με $5,5\ \text{cP}$ (όπου $1\ \text{cP}$ είναι το ιξώδες του νερού), ενώ με την αραιώση του υγρούλυματος αναμένεται περαιτέρω μείωση του. Η διάρκεια ζωής της κολλοειδούς πυριτίας ξεπερνά τα 25 έτη. Το **Σχήμα 2.1**, καταδεικνύει τη χημική σύσταση του κολλοειδούς σωματιδίου, ενώ το **Σχήμα 2.2** παρουσιάζει την δημιουργία δεσμών σιλοξάνης μεταξύ των σωματιδίων κατά την γελοποίησης.



Σχήμα 2.1: Δομή μονομερούς σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας αριστερά, δημιουργία δεσμών σιλοξάνης μεταξύ σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά την γελοποίηση δεξιά (από Moridis et al. 1995).

Οι κυρίαρχοι μηχανισμοί, όσον αφορά την παθητική σταθεροποίηση είναι οι εξής κατά τους Brinker και Scherer (1990) :

- Γελοποίηση (Gelation)

Γελοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία δημιουργούνται συμπλέγματα από τη συμπύκνωση πολυμερών ή τη συσσωμάτωση των σωματιδίων μέχρι τη στιγμή που τα συμπλέγματα συγκρούονται. Τότε δημιουργούνται δεσμοί μεταξύ των συμπλεγμάτων, σχηματίζοντας ένα τεράστιο σύμπλεγμα. Ωστόσο τη στιγμή που σχηματίζεται η γέλη υπάρχουν ακόμη ελεύθερα συμπλέγματα εκτός της σκελετικής δομής, που αναμένεται να ενωθούν με αυτή μεταγενέστερα προσδίδοντας της περαιτέρω

δυσκαμψία. Η γέλη εμφανίζεται όταν σχηματιστεί ο τελευταίος δεσμός μεταξύ δυο μεγάλων συμπλεγμάτων, που αποτελεί την έναρξη της ελαστικότητας του συνεχούς στερεού σκελετού. Αυτή το σημείο λέγεται σημείο γέλης (gel point) και ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το μίγμα σε αυτό λέγεται χρόνος γέλης (gel time). Στο χρόνο γέλης, το ιώδες αυξάνεται απότομα και η γέλη αρχίζει να αποκρίνεται ελαστικά στην τάση.

- Ωρίμανση (Aging)
Οι αντιδράσεις που οδηγούν στη γελοποίηση, δεν σταματούν στο gel point. Αντίθετα όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν ακόμη αρκετά ελεύθερα συμπλέγματα, τα οποία εν καιρώ θα συγκρουστούν-ενωθούν με την ενιαία σκελετική δομή συμπυκνώνοντας την έτσι παραπάνω. Επομένως οι ιδιότητες της γέλης συνεχίζουν να μεταβάλλονται για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το gel point. Αυτή η διαδικασία λέγεται ωρίμανση και οδηγεί σε ένα πυκνότερο και πιο στιβαρό αλλά όχι συρρικνωμένο σκελετικό δίκτυο.
- Ξήρανση (Drying)
Είναι η απομάκρυνση του νερού από τους πόρους της γέλης υπό συνθήκες συνήθους θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή σχεδόν αλλάζει τη διασικτότητα του υλικού, κάνοντας το εν γένει τριφασικό και η συμπεριφορά του θα μπορούσε να προσομοιαστεί με αυτή ενός ακόρεστου εδάφους.
- Αυτό-ΐαση (self-healing)
Μετά από μερική καταστροφή των δεσμών του σκελετικού δικτύου (πχ ένα έντονο σεισμικό γεγονός), το σταθεροποιημένο έδαφος θα εκτονώσει αργά τις παραμένουσες πιέσεις, μέσω καθιζήσεων που θα φέρουν πιο κοντά τα «σπασμένα κομμάτια» του δικτύου (πυριτικές αλυσίδες), με συνέπεια να δημιουργηθούν νέοι δεσμοί σιλοξάνης, και το δίκτυο να αρχίσει να αποκτά ξανά στιβαρότητα, ενώ γίνεται λιγότερο διαπερατό. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται αυτό-ΐαση και μπορεί να παρατηρηθεί εργαστηριακά και κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων εδαφών.

2.2 Πειράματα υπό κλίμακα σε Παθητικά Σταθεροποιημένα Εδάφη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η επιτυχής προσομοίωση τριών εργαστηριακών πειραμάτων φυγοκεντρική σε παθητικώς σταθεροποιημένα εδάφη που έγιναν από τους:

- Gallagher et al. (2007)
- Conlee et al (2012)
- Pamuk et al. (2007)

Χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010a,b), και βάσει των τελευταίων ερευνών τόσο στο ΕΜΠ όσο και διεθνώς, θα επιχειρηθεί η αριθμητική προσομοίωση των παραπάνω εργαστηριακών δοκιμών βάσει μιας νέας μεθοδολογίας που θα περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

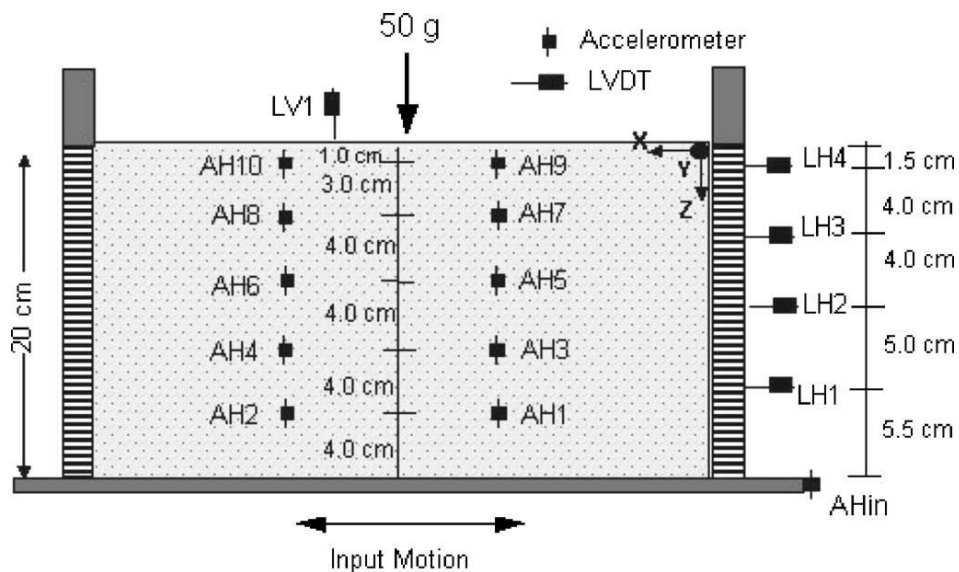
Κρίνεται λοιπόν σκόπιμη μια προκαταρκτική συνοπτική παρουσίαση των τριών πειραμάτων. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι για τα δύο πειράματα (Gallagher et al 2007, Conlee et al 2007) έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες αριθμητικής προσέγγισης, ενώ για το πείραμα των Pamuk et al. (2007) δεν έχει επιχειρηθεί ακόμα. Ακολουθεί η παρουσίαση των πειραμάτων.

2.2.1 Σεισμική απόκριση οριζόντιας στρώσης σταθεροποιημένου εδάφους

Οι Gallagher et al. (2007) πραγματοποίησαν δοκιμές φυγοκεντριστή σε σταθεροποιημένο έδαφος με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM περιεκτικότητας 6%, σε ρευστοποιήσιμη άμμο Nevada No120, υπό διέγερση βάσης.

Κατά το πείραμα, αρχικά επιβλήθει κορεσμός του δοκιμίου με την πυριτία και ακολούθως το δοκίμιο υπεβλήθη σε δύο διαδοχικούς σεισμικούς κραδασμούς που προσομοίωναν σεισμό πεδίου με επιταχύνσεις βάσης 0,2g και 0,25g.

Το μοντέλο για το πείραμα στήθηκε και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.3**, όπου παρουσιάζονται και οι θέσεις που τοποθετήθηκαν τα όργανα μέτρησης. Η άμμος Nevada No120 που χρησιμοποιήθηκε είχε σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$, ενώ το εν λόγω μοντέλο προσομοιάζει ένα πρωτότυπο στρώμα άμμου πάχους 10m.



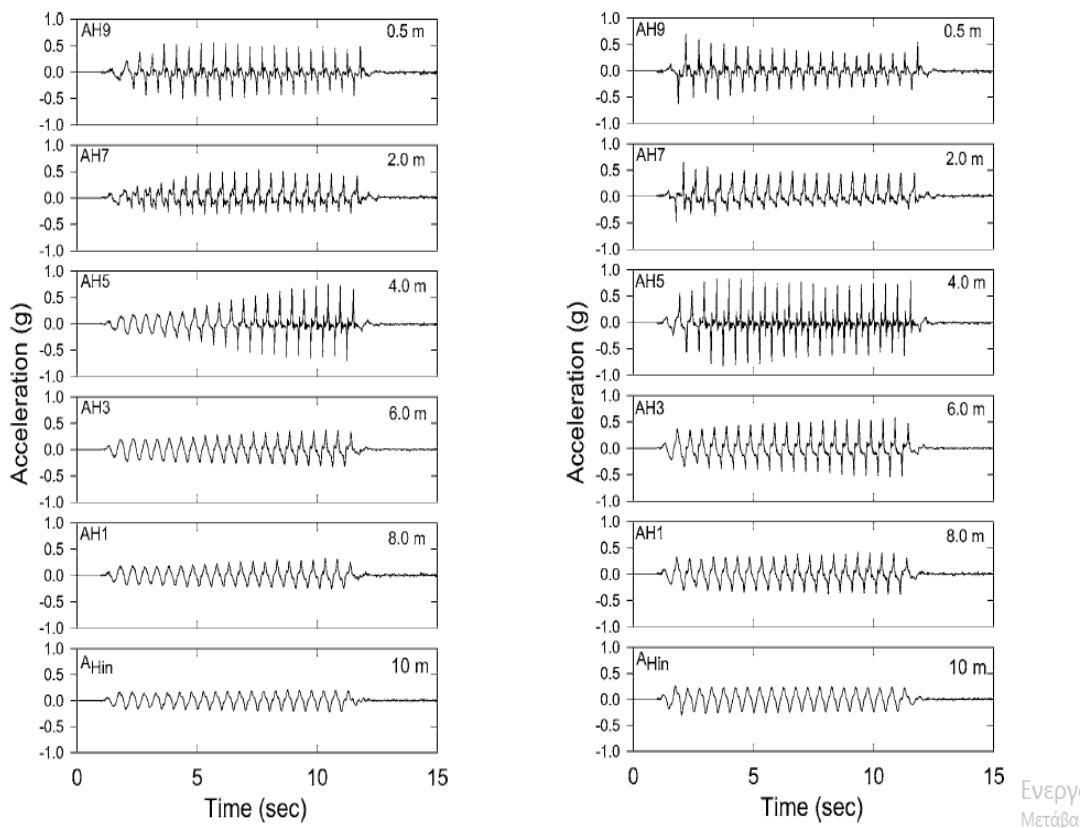
Σχήμα 2.2: Διάταξη πειράματος συμπεριλαμβανομένων και των οργάνων μέτρησης (Gallagher et al 2007)

Η εισαγωγή της πυριτίας στο μοντέλο έγινε από τον πυθμένα προς την επιφάνεια με χρήση αναρροφητήρα. Ο χρόνος γέλης του πειράματος ήταν 56h. Η ολική αντικατάσταση του νερού των πόρων με κολλοειδή πυριτία έγινε αντιληπτή από το χρώμα του εξερχόμενου υγρού από την επιφάνεια εξόδου που στην αρχή ήταν διάφανο σαν του νερού ενώ στο τέλος είχε το χρώμα του ενέματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις των δοκιμών φυγοκεντριστή.

Επιταχύνσεις

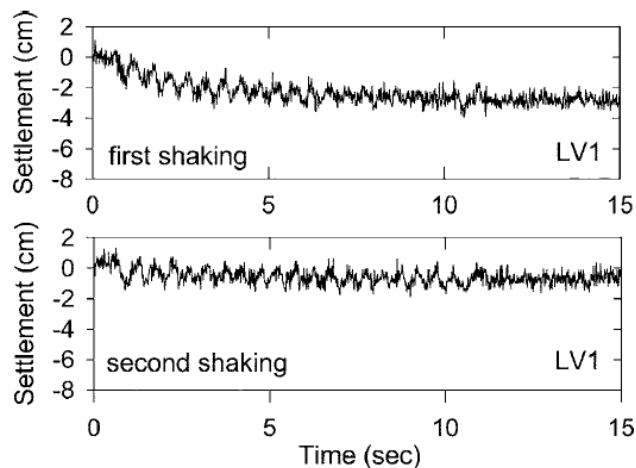
Για τη μέτρηση των επιταχύνσεων τοποθετήθηκαν επιταχυνσιογράφοι σε διάφορες θέσεις του μοντέλου όπως φάνηκε και από το **Σχήμα 2.3**. Οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης που προέκυψαν για κάθε ένα από τα δύο σεισμικά γεγονότα σε κάθε ύψος παρατίθενται στο **Σχήμα 2.4**. Παρατηρήθηκε ενίσχυση της διέγερσης στην εδαφική στρώση κατά τα δύο γεγονότα που αυξανόταν αναλογικά με το πλάτος της επιτάχυνσης που εισήχθη. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε ρευστοποίηση σε κανένα από τα δύο σεισμικά γεγονότα.



Σχήμα 2.3: Επιταχυνσιογραφήματα σε διάφορα βάθη για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη διέγερση (δεξιά) αντίστοιχα. (Gallagher et al 2007).

Μετακινήσεις

Μετρητές μετακινήσεων (LVDTs) χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των οριζοντίων και των κατακόρυφων μετακινήσεων σε διάφορες θέσεις του προσομοιώματος όπως φαίνεται από το **Σχήμα 2.3**. Παρατηρήθηκαν διατμητικές παραμορφώσεις της τάξεως του 0,5% και 1% και ισοδύναμες καθιζήσεις πρωτοτύπου 30mm και 10mm, στο 1^ο και 2^ο γεγονός αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4: Καθιζήσεις κατά τη διάρκεια 1^{ου} (πάνω) και 2^{ου} (κάτω) σεισμικού κραδασμού (Gallagher et al 2007)

Συγκρίνοντας αυτά τα αποτελέσματα με παλαιότερα πειράματα σε καθαρό έδαφος (Taboada 1995) προκύπτει εμφανώς βελτιωμένη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους τόσο σε επίπεδο αντίστασης σε ρευστοποίηση όσο και σε επίπεδο παραμορφώσεων. Ενδεικτικά αναφέρεται 25 φορές μικρότερη καθίζηση, ενώ όσον αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις το φυσικό έδαφος παρουσίασε παραμόρφωση 3-5 φορές μεγαλύτερη του σταθεροποιημένου.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι από τα αποτελέσματα των Gallagher et al. (2007a) προκύπτουν ασάφειες ως προς τη βελτίωση που προσφέρει η σταθεροποίηση εδάφους με κολλοειδή πυριτρία, καθώς η μεγαλύτερης έντασης (2^η) διέγερση βάσης οδήγησε σε μικρότερες καθιζήσεις συγκριτικά με αυτές που έδωσε η μικρότερης έντασης (1^η) διέγερση.

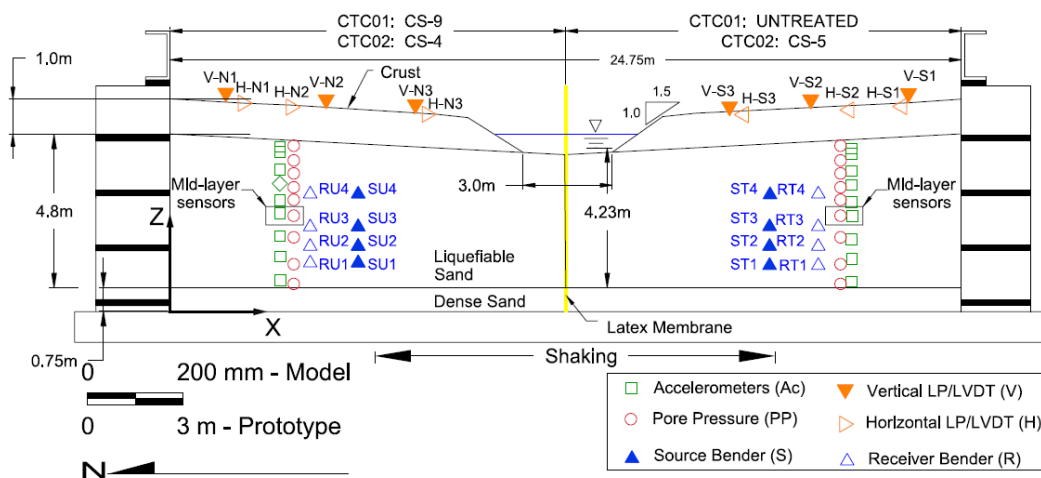
2.2.2 Πλευρική εξάπλωση σταθεροποιημένης στρώσης εδάφους υπό μικρή κλίση.

Οι Conlee et al. (2012) πραγματοποίησαν σειρά από δοκιμές σε φυγοκεντρική με σκοπό να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της κολλοειδούς πυριτίας στον περιορισμό της ρευστοποίησης σε στρώσεις υπό μικρή κλίση που, ρευστοποιούμενες, εξαπλώνονται πλευρικά. Το προσομοίωμα αποτελούνταν από δύο πρανή με κλίση 3° προς ένα κεντρικό κανάλι πλάτους 3m. Τα πρανή αποτελούνταν από 3 στρώσεις με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- μία στρώση βάσης πάχους 0.75m πυκνής άμμου Monterey No.0/30
- μία ενδιάμεση στρώση πάχους 4,8m από ρευστοποιήσιμη άμμο Nevada No120
- μία επιφανειακή στρώση πάχους 1m συμπαγούς ιλυώδους αργίλου Yolo loam

Στόχος του πειράματος ήταν η σύγκριση, σε όρους αντίστασης σε ρευστοποίηση αλλά και σε όρους μετακινήσεων, σταθεροποιημένων εδαφών με ποσοστά πυριτίας Ludox®-SM κατά βάρος 4%, 5% και 9% με την αντίστοιχη συμπεριφορά ενός μη-σταθεροποιημένου («φυσικού») εδάφους.

Στο πρώτο πείραμα CTC01 το αριστερό πρανές σταθεροποιήθηκε με Ludox®-SM CS=9% κατά βάρος, ενώ στο δεξιό πρανές παρέμεινε η φυσική άμμος Nevada. Στο δεύτερο πείραμα CTC02 σταθεροποιήθηκαν και τα δύο πρανή με CS=4% και CS=5%, αντίστοιχα. Η χρήση κολλοειδούς πυριτίας με ποσοστό λιγότερο του 5% έγινε προκειμένου να ελεγχθεί και να συγκριθεί η συμπεριφορά μια στιβαρούς γέλης, έναντι μίας χαλαρότερης. Το **Σχήμα 2.6** δείχνει τη γενική διάταξη των πειραμάτων, συμπεριλαμβανομένου και του μετρητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε :



Σχήμα 2.5: Διάταξη πειραμάτων συμπεριλαμβανομένων των θέσεων τοποθέτησης οργάνων (Conlee et al. 2012)

Έγιναν 8 σεισμικές διεγέρσεις σε κάθε ένα από τα δύο πειράματα σε διάφορες επιταχύνσεις στον φυγοκεντριστή. Κάθε γεγονός αποτελούνταν από 20 ημιτονοειδείς κύκλους συχνότητας 2Hz. Οι επιταχύνσεις βάσεως για κάθε γεγονός φαίνονται στον **Πίνακα 2.1**:

Table 3. Testing Sequence

CTC01		CTC02	
Event ^a	PBA ^b	Event ^a	PBA ^b
CTC01_01 (Shake 1)	0.007	CTC02_01 (Shake 1)	0.007
CTC01_02 (Shake 2) (pulse wave test)	0.03	CTC02_02 (Shake 2) (bender test)	0.03
CTC01_03 (Shake 3) (pulse wave test)	0.1	CTC02_03 (Shake 3) (bender test)	0.15
CTC01_04 (Shake 4) (pulse wave test)	0.2	CTC02_04 (Shake 4) (bender test)	0.25
CTC01_05 (Shake 5) (pulse wave test)	0.56	CTC02_05 (Shake 5) (bender test)	0.69
CTC01_06 (Shake 6) (pulse wave test)	0.03	CTC02_06 (Shake 6) (bender test)	0.03
CTC01_07 (Shake 7) (pulse wave test)	0.2	CTC02_07 (Shake 7) (bender test)	0.25
CTC01_08 (Shake 8) (pulse wave test)	1.28	CTC02_08 (Shake 8) (bender test)	1.37

^aRest time between events is approximately 15 min and shaking time is 10 s.

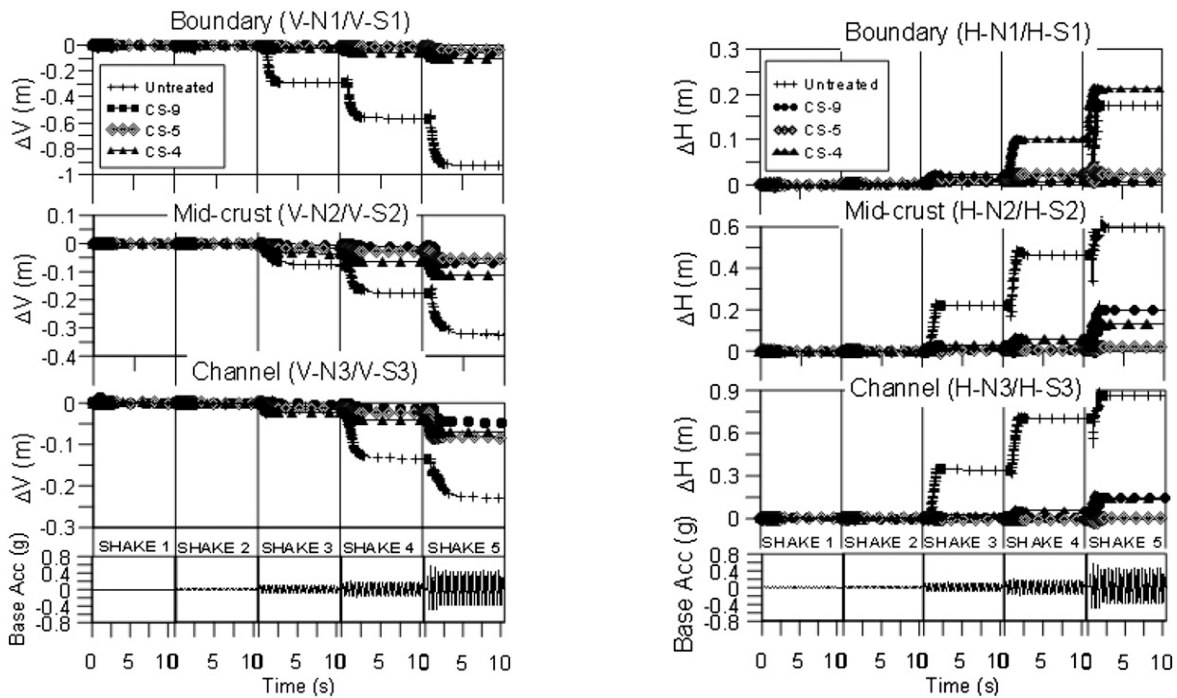
^bPeak base acceleration determined by average recordings at the north and south bases of the container.

Πίνακας 2.1: Σεισμικές διεγέρσεις για κάθε πείραμα (Conlee et al. 2012)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις των δοκιμών φυγοκεντριστή.

Μετακινήσεις:

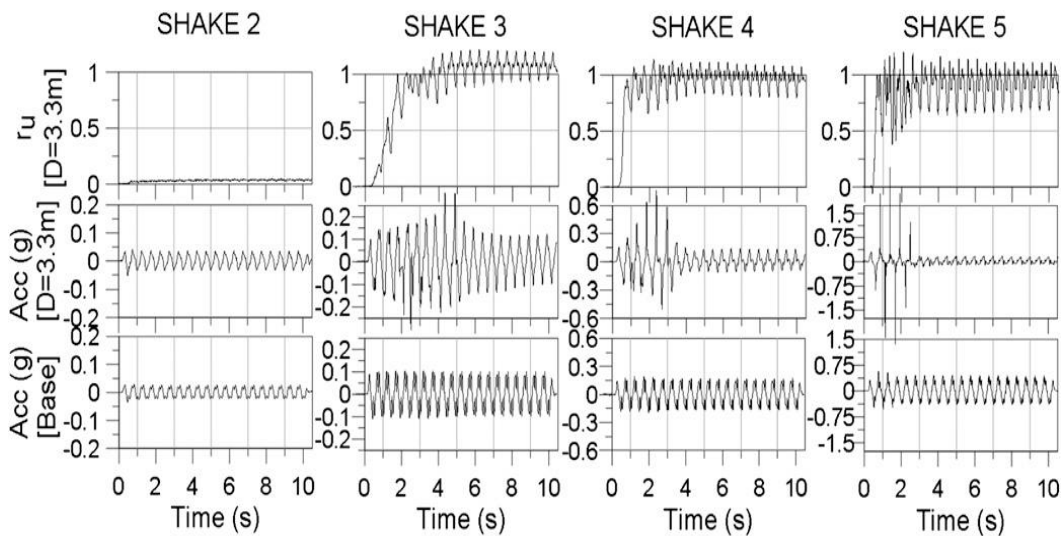
1. Η επιφανειακή στρώση ιλυώδους αργίλου στην πλευρά που δεν είχε σταθεροποιηθεί, είχε βυθιστεί εξ ολοκλήρου καθώς υπέστη τεράστιες καθιζήσεις όταν το υποκείμενο στρώμα της άμμου ρευστοποιήθηκε.
2. Η επιφανειακή στρώση ιλυώδους αργίλου στην σταθεροποιημένη πλευρά υπέστη μικρή καθίζηση, παραμένοντας ουσιαστικά άθικτη.
3. Σε όλες τις διεπιφάνειες επιφανειακής αργίλου-σταθεροποιημένης άμμου παρατηρήθηκε ότι η άργιλος μετακινήθηκε σα στερεό σώμα.
4. Η ανάλυση των μετατοπίσεων και η σύγκριση της συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων έναντι των μη-σταθεροποιημένων εδαφών καταδεικνύει ότι τα σταθεροποιημένα εδάφη παρουσιάζουν πολύ μικρότερες μετακινήσεις.
5. Στο μη-σταθεροποιημένο έδαφος παρατηρήθηκαν καθιζήσεις πρωτοτύπου μέχρι και 0,9m. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν το υποκείμενο στρώμα άμμου ρευστοποιήθηκε, η άργιλος υπέστη αστοχία πρσανούς προκαλώντας έτσι τεράστιες καθιζήσεις στο σύνολο με το μοντέλο και μικρότερες στο κέντρο.
6. Στο CTC02, δεδομένου ότι δεν υπέστη καμία πλευρά ρευστοποίηση οι επιφανειακές καθιζήσεις που παρατηρήθηκαν ήταν σαφώς μικρότερες. Ωστόσο υπήρχε διαφορά μεταξύ των δύο πλευρών που σταθεροποιήθηκαν με CS=4 και 5%, αντίστοιχα. Ενδεικτικά παρατηρήθηκαν καθιζήσεις εύρους 0,01 έως 0,08 cm και 0,07 έως 1 cm στα 5% και 4% αντίστοιχα. Αντίστοιχες διαφορές παρατηρήθηκαν και στις οριζόντιες μετατοπίσεις.



Σχήμα 2.6: Καθιζήσεις (αριστερά) και Οριζόντιες Μετατοπίσεις (δεξιά) κατά τη διάρκεια των 5 πρώτων σεισμικών διεγέρσεων. (Conlee et al. 2012)

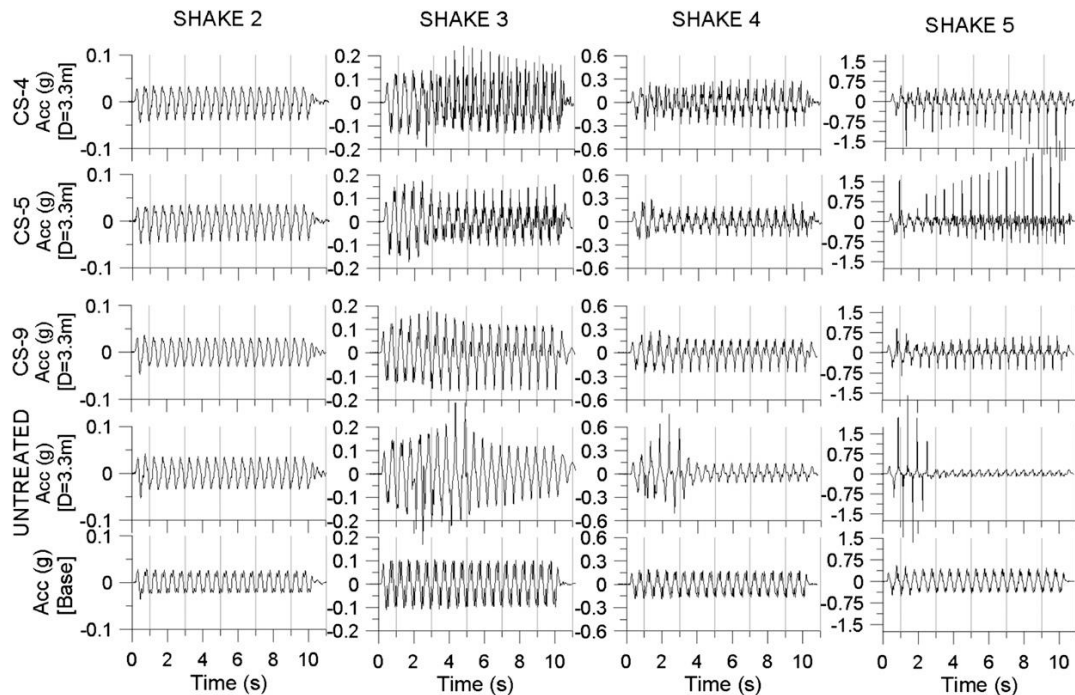
Επιταχύνσεις και Πιέσεις Πόρων:

Πιέσεις πόρων μετρήθηκαν μόνο μέσα στην ρευστοποιήσιμη μη-σταθεροποιημένη άμμο, επί τη βάση των οποίων υπολογίσθηκε ο συντελεστής υπερπίεσεων πόρων r_u . Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του συντελεστή r_u και των επιταχύνσεων σε δύο ύψη για την φυσική άμμο για τις διεγέρσεις 1-5 του CTC01.



Σχήμα 2.7: Χρονοϊστορίες συντελεστή r_u (πρώτη γραμμή) και επιταχύνσεων σε δύο ύψη για το φυσικό έδαφος στη δοκιμή CTC01. (Conlee et al. 2012)

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 2.9** παρουσιάζονται οι ιστορίες επιτάχυνσης στις διάφορες θέσεις καθ' ύψος του μοντέλου για τα διάφορα πρηνή με διαφορετική τιμή του CS(%), δηλαδή μια σύνοψη αποτελεσμάτων για διαφορετικές διεγέρσεις των δοκιμών CTC01 και CTC02.



Σχήμα 2.8: Χρονοιστορίες επιταχύνσεων βάσεως και σε ύψος 3,3m για τις διάφορες περιεκτικότητες CS% (κατακόρυφη κλίμακα) για κάθε ένα εκ των 5 διεγέρσεων. (Conlee et al. 2012).

Παρατηρήθηκε ότι σε κανένα από τα σταθεροποιημένα εδάφη και ανεξαρτήτως ποσοστού CS(%), δεν υπήρξε ραγδαία απομείωση της ταλάντωσης σε καμία εκ των 5 δονήσεων. Αντιθέτως, στο «φυσικό» έδαφος, από την 3^η δόνηση και πέρα παρατηρήθηκε ακριβώς αυτό, που είναι σαφής ένδειξη ρευστοποίησης.

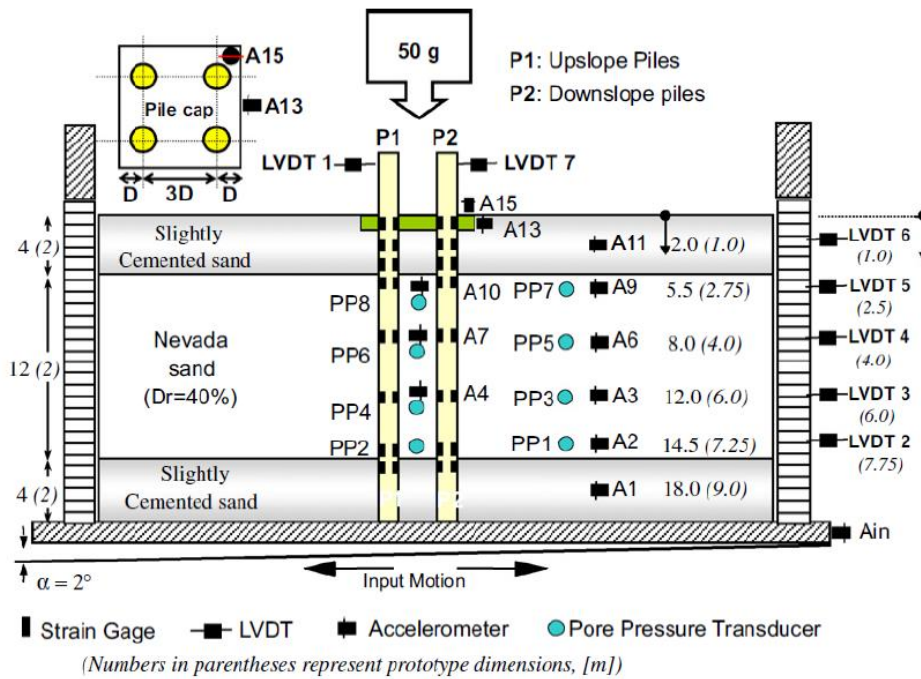
2.2.3 Σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε πλευρικός εξαπλούμενο σταθεροποιημένο έδαφος

Το εν λόγω πείραμα εκπονήθηκε από τους Ramuk et al. (2007) και αποτελούνταν από δύο δοκιμές σε φυγοκεντρική σε επιτάχυνση βάσης 0,25g, προσομοιώνοντας την αλληλεπίδραση πασσαλομάδας με το έδαφος. Σε διαστάσεις πρωτοτύπου, το εδαφικό προφίλ αποτελούνταν από:

- μία κατώτατη στρώση 2m ελαφρώς σιμεντοποιημένης άμμου Nevada, στην οποία θεμελιωνόταν η πασσαλομάδα και δεν είναι ευάλωτη σε ρευστοποίηση
- μία μεσαία στρώση 6m άμμου Nevada με σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$
- μία επιφανειακή στρώση πάλι ελαφρώς σιμεντοποιημένης άμμου πάχους 2m, πάλι μη ρευστοποιήσιμη.

Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη του πειράματος φαίνεται στο **Σχήμα 2.10**, όπου διαχωρίζονται οι 3 προαναφερθείσες στρώσεις. Στο εδαφικό προφίλ του μοντέλου δόθηκε μία μικρή κλίση 2° , που επαρκεί για πλευρική εξάπλωση σε περίπτωση ρευστοποίησης. Οι πάσσαλοι διαμέτρου $d=0,60m$, ακαμψίας $EI=8.000 kNm^2$ με μεταξύ τους απόσταση 2m στο πρωτότυπο θεμελιωνόταν στην κατώτατη στρώση και ο

κεφαλόδεσμος τους, διαστάσεων $W=3m$, $L=3m$ και $H=0,7m$, βρισκόταν στην ανώτατη στρώση. Η ενδιάμεση ρευστοποιήσιμη στρώση Nevada στο πρώτο πείραμα παρέμεινε «φυσική» (μη-σταθεροποιημένη), ενώ στο δεύτερο πείραμα σταθεροποιήθηκε με κολλοειδή πυριτία συγκέντρωσης $CS=5\%$ τύπου Ludox-SM. Όλοι οι πάσσαλοι εφοδιάστηκαν με όργανα μέτρησης καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων, πυκνώνοντας στις θέσεις κοντά στις διεπιφάνειες των στρωμάτων.

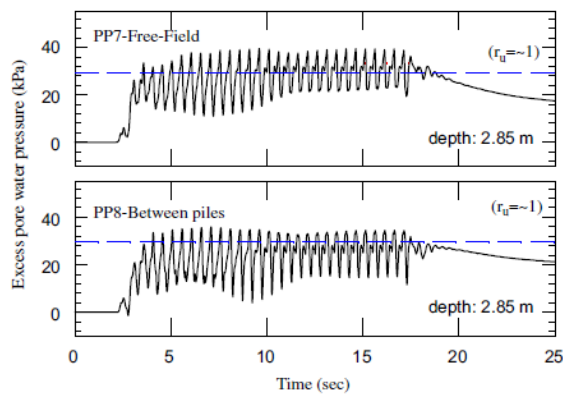


Σχήμα 2. 9: Διάταξη πειράματος και οργάνων μέτρησης. (Ratuk et al. 2007)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις των δοκιμών φυγοκεντριστή.

Υπερπιέσεις Πόρων:

Μόνο για το μοντέλο 1 με την φυσική άμμο έγιναν μετρήσεις πιέσεων πόρων που φαίνονται στο Σχήμα 2.11:

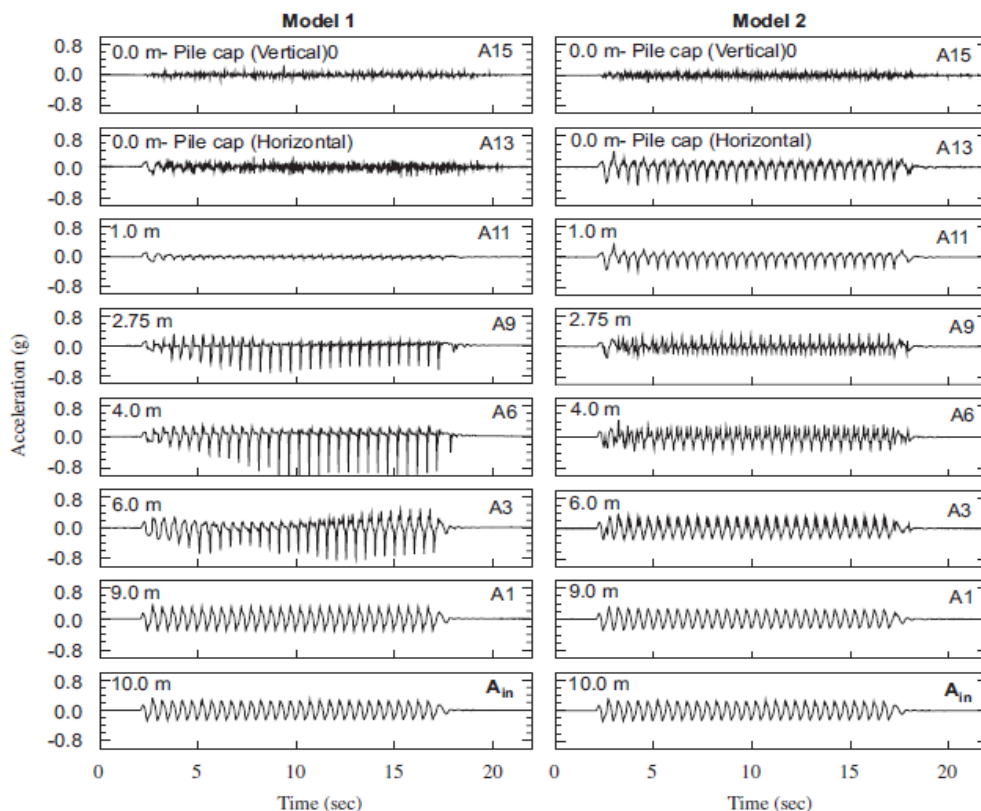


Σχήμα 2.10: Χρονοιστορίες υπερπιέσεων πόρων (Δu) για το έδαφος μακριά από την πασσαλομάδα (πάνω διάγραμμα) και στην περιοχή της πασσαλομάδας (κάτω διάγραμμα). (Ratuk et al. 2007)

Η γαλάζια διακεκομμένη γραμμή δείχνει την αρχική ενεργό τάση. Είναι φανερό πως έχει επέλθει ρευστοποίηση, τόσο στο ελεύθερο πεδίο, όσο και μεταξύ των πασσάλων, με τις διαφορές των δύο χρονοϊστοριών να είναι μικρές.

Επιταχύνσεις:

Παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.11** οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων που προέκυψαν τόσο στον κεφαλόδεσμο όσο και στο έδαφος για τα δύο μοντέλα.



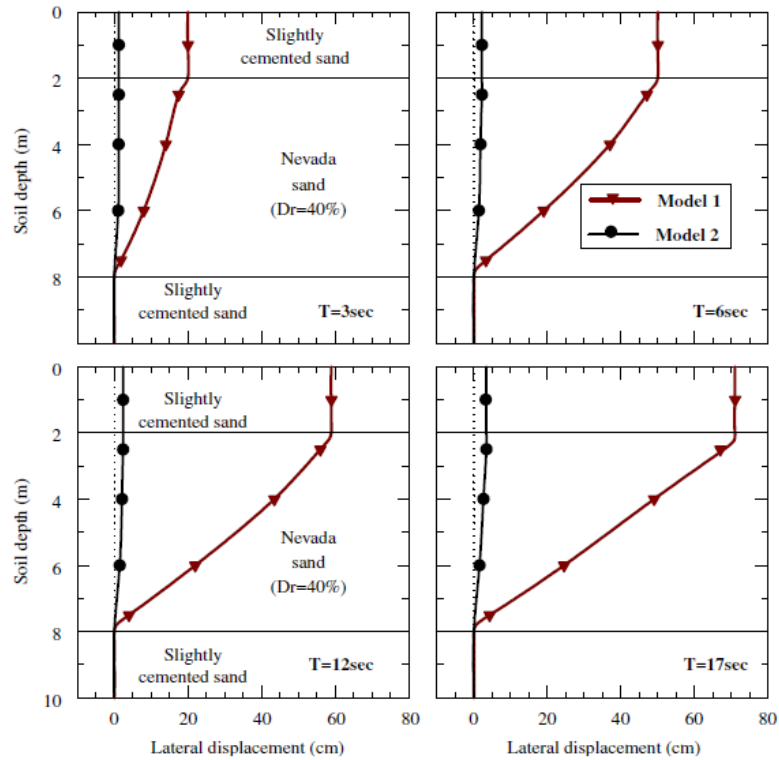
Σχήμα 2.11: Μετρηθείσες επιταχύνσεις σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος για το μοντέλο 1 (αριστερά) και το μοντέλο 2 (δεξιά) αντίστοιχα. (Pamuk et al. 2007)

Παρατηρείται ότι στο μοντέλο 1 (μετρητές A3, A6 και A9), υπήρξε δραματική πτώση των θετικών επιταχύνσεων, ενώ υπήρξε αντίστοιχη άνοδος στις αρνητικές επιταχύνσεις. Αυτό οφείλεται στην ρευστοποίηση του στρώματος, που οδήγησε σε «μετακίνηση» προς την μεριά της κλίσης, δηλαδή στην πλευρική εξάπλωση. Επιπλέον παρατηρείται ότι στον μετρητή A11, μετά από μερικούς κύκλους, προκύπτουν πρακτικά μηδενικές επιταχύνσεις, γεγονός που υποδεικνύει ρευστοποίηση της μεσαίας αμμώδους στρώσης.

Για το μοντέλο 2 παρατηρείται ότι οι επιταχύνσεις στην επιφάνεια είναι παρεμφερείς με αυτές της αρχικής διέγερσης, με μικρές διαφορές στα πλάτη. Οι επιταχυνσιογράφοι στις διεπιφάνειες δείχνουν ασύμμετρες καταγραφές προς τα κάτω, πράγμα που μπορεί να σημαίνει ότι υπήρξε σχετική ολίσθηση της επιφανειακής ως προς τη σταθεροποιημένη στρώση κατά τη διάρκεια της διέγερσης. Γενικότερα όμως η συμπεριφορά ήταν τελείως διαφορετική, καθώς δεν επήλθε ρευστοποίηση της μεσαίας αμμώδους στρώσης λόγω σταθεροποίησης.

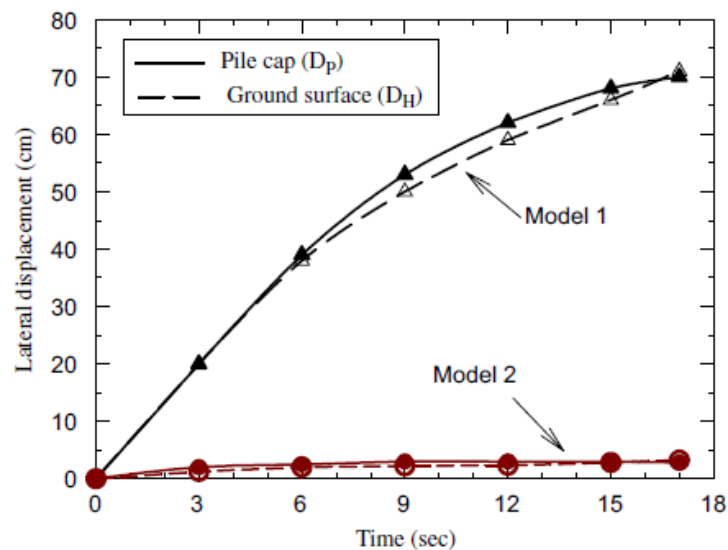
Μετακινήσεις:

Στο **Σχήμα 2.12** παρουσιάζονται για διάφορες χρονικές στιγμές οι οριζόντιες μετακινήσεις εδάφους εκτός πασσαλομάδας, που προέκυψαν για τις δύο δοκιμές. Είναι εμφανής η διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων καθώς στο μοντέλο 2 οι μετακινήσεις που έχουν προκύψει είναι ελάχιστες, ενώ στο μοντέλο 1 προκύπτουν μεγάλες μετακινήσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης.



Σχήμα 2.12: Οριζόντιες μετακινήσεις εδάφους, στην περιοχή μακριά της πασσαλομάδας για κάθε μοντέλο σε διάφορες χρονικές στιγμές. (Ratuk et al. 2007)

Ακόμα κατατοπιστικότερο είναι το γράφημα στο **Σχήμα 2.13** όπου απεικονίζονται οι παραμένουσες μετατοπίσεις εδάφους και κεφαλόδεσμου συναρτήσει του χρόνου, για τα δύο διαφορετικά πειράματα. Αρχικά παρατηρείται όμοια συμπεριφορά για τα πρώτα 6s κεφαλόδεσμου και εδάφους. Αυτό αλλάζει μετέπειτα για το μοντέλο 1, καθώς η μετατόπιση του εδάφους γίνεται ελαφρώς μικρότερη από αυτή του κεφαλόδεσμου, που μπορεί να οφείλεται στην αστοχία της επιφανειακής στρώσης (παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις). Πιο σημαντικά όμως, προκύπτει τεράστια διαφορά στις μετατοπίσεις στα δύο μοντέλα, με μέγιστες μετακινήσεις 71cm στο 1, έναντι μόνο 3,4cm στο 2.



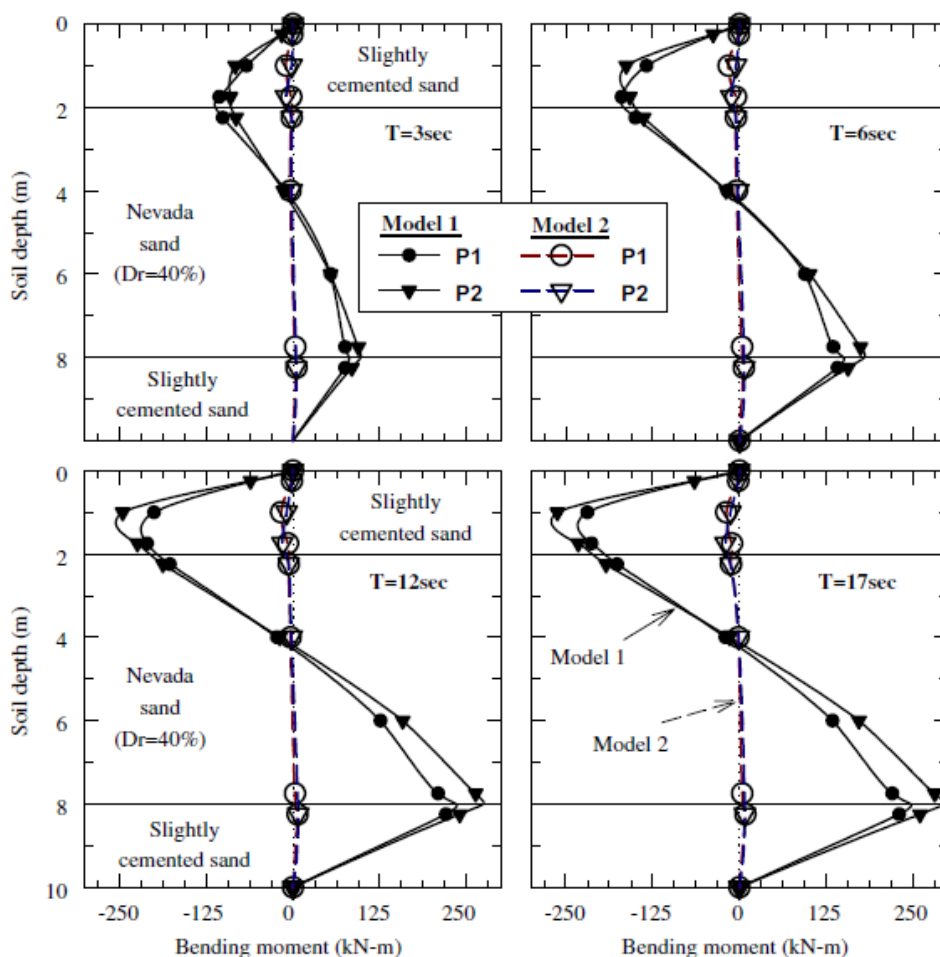
Σχήμα 2.13: Χρονοιστορία παραμενουσών παραμορφώσεων, για την επιφάνεια του εδάφους και τον κεφαλόδεσμο της πασσαλομάδας για κάθε μοντέλο. (Ratuk et al. 2007)

Εντατικά Μεγέθη Πασσαλομάδας:

Καμπτικές Ροπές:

Το **Σχήμα 2.14** απεικονίζει τις καμπτικές ροπές για τους -κατά την κλίση- πασσάλους (P2) αλλά και για τους αντίστροφους αυτής (P1), της πασσαλομάδας για κάθε ένα από τα δύο μοντέλα αντίστοιχα.

Στο μοντέλο 1 φαίνεται ότι οι ροπές μεταβάλλονται γραμμικά με το βάθος, γεγονός που υπονοεί πως το ρευστοποιημένο στρώμα δεν συνέβαλε καν στην κατανομή των ροπών καθ' ύψος των πασσάλων. Οι μέγιστες ροπές εκδηλώθηκαν στα όρια της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου (διεπιφάνειες με τις σιμεντοποιημένες στρώσεις) και συνέβησαν κατά την αρχή της διέγερσης. Όσο προχωρούσε χρονικά η διέγερση, η μέγιστη ροπή του πάνω ορίου μεταφέρθηκε ψηλότερα στην επιφανειακή στρώση, πιθανώς εξαιτίας κάποιας αστοχίας του εδάφους γύρω από τους πασσάλους. Στο μοντέλο 2, ενώ οι θέσεις που παρατηρήθηκαν οι μέγιστες ροπές ήταν οι ίδιες, υπήρχε τεράστια διαφορά στα μεγέθη τους με τις τιμές του μοντέλου 2 να είναι κατά 90% μικρότερες από αυτές του μοντέλου 1.



Σχήμα 2.14: Διαγράμματα καμπτικών ροπών καθ' ύψος των πασσάλων για κάθε μοντέλο αντίστοιχα, σε διάφορες χρονικές στιγμές. (Patuk et al. 2007)

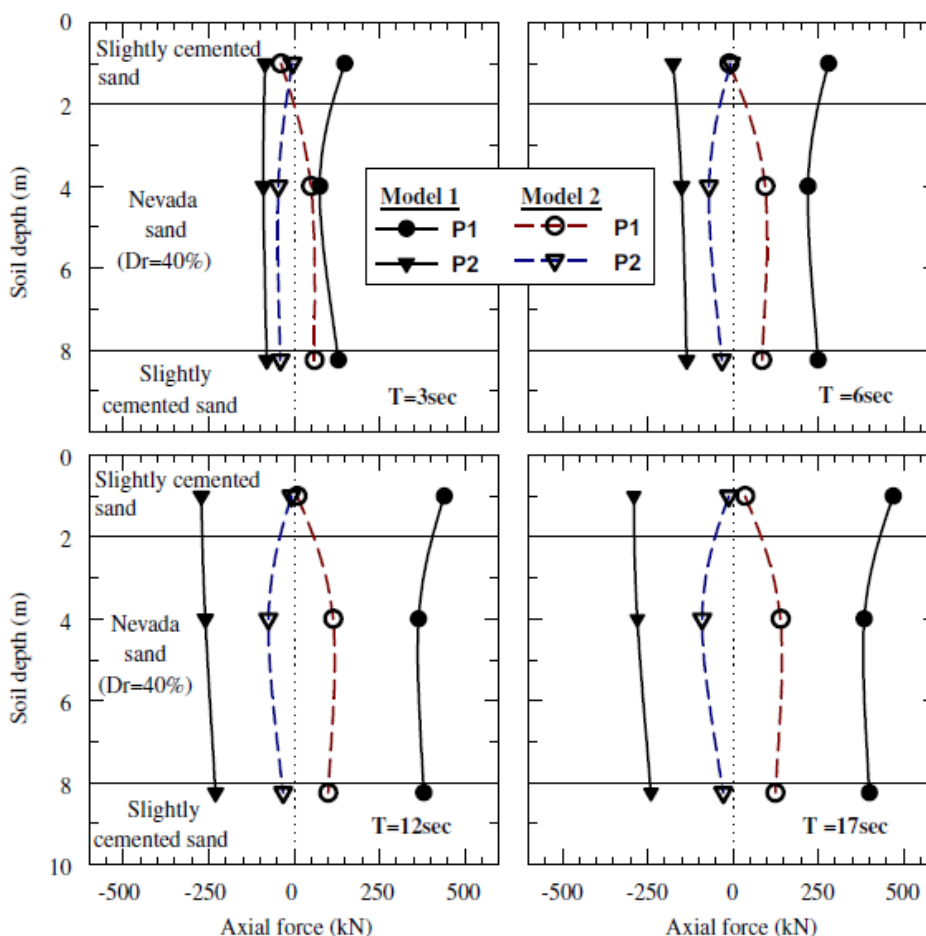
Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών σε όρους ροπών και εδαφικών μετατοπίσεων.

Model no.	Model description	Max. moments, M_{max} (kN m)		Max. Pile head displacement $D_{p max}$ (cm)	Max. ground displacement $D_{H max}$ (cm)
		Upper boundary	Lower boundary		
2	No treatment	$P_1 = 220; P_2 = 260$ (average = 240)	$P_1 = 230; P_2 = 280$ (average = 255)	70	71
	Treatment with dilute colloidal silica	$P_1 = 20; P_2 = 13$ (average = 16)	$P_1 = 9; P_2 = 8$ (average = 9)	3	3.4

Πίνακας 2. 2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα καμπτικών ροπών και μετακινήσεων κεφαλής. (Patuk et al. 2007)

Αξονικές Δυνάμεις:

Στο Σχήμα 2.15, παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις που μετρήθηκαν στο σώμα των πασσάλων. Ολόκληρη η πασσαλομάδα υπέστη θλίψη και στα δύο μοντέλα. Και εδώ παρατηρήθηκε όμοια συμπεριφορά στα δύο μοντέλα, με σημαντικότερη διαφορά ωστόσο στις τιμές των αξονικών που ήταν κατά 90% μικρότερες στο μοντέλο σταθεροποιημένου εδάφους.



Σχήμα 2.15: Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων καθ' ύψος των πασσάλων για κάθε μοντέλο αντίστοιχα, σε διάφορες χρονικές στιγμές. (Patuk et al. 2007)

Συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές των Ramuk et al. (2007) ήταν τα εξής:

- Στο σταθεροποιημένο έδαφος δεν επήλθε ρευστοποίηση,
- Οι μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν ήταν 21 φορές μικρότερες στο σταθεροποιημένο έδαφος απ' ότι στο φυσικό, χωρίς να επέλθει κανενός είδους εδαφική αστοχία, ενώ στο «φυσικό» (μη-σταθεροποιημένο) έδαφος παρατηρήθηκαν ρωγματώσεις στην επιφανειακή στρώση.
- Τα εντατικά μεγέθη της πασσαλομάδας ήταν μικρότερα κατά 90% στο μοντέλο σταθεροποιημένου εδάφους έναντι αυτού του φυσικού εδάφους.

2.3 Αριθμητική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών με κολλοειδή πυριτιτιά

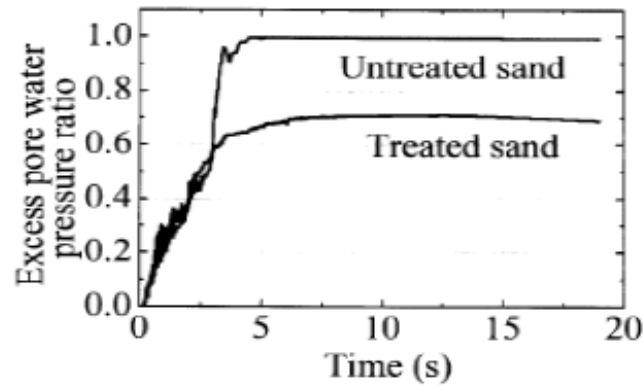
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν έχει ακόμα πλήρως κατανοηθεί ο μηχανισμός βελτίωσης που προσφέρει ο εμπλουτισμός του υγρού των πόρων με κολλοειδή πυριτιτιά στο επίπεδο της μικροδομής. Έτσι, δεν έχει κατοχυρωθεί στη βιβλιογραφία κάποια καταστατική προσομοίωση της απόκρισης των σταθεροποιημένων εδαφών. Ωστόσο παρακάτω θα παρουσιαστούν κάποιες προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης, με χρήση και τροποποίηση ήδη υπαρχόντων καταστατικών προσομοιωμάτων για άμμους.

2.3.1 Προσέγγιση των Kodaka et al. 2005

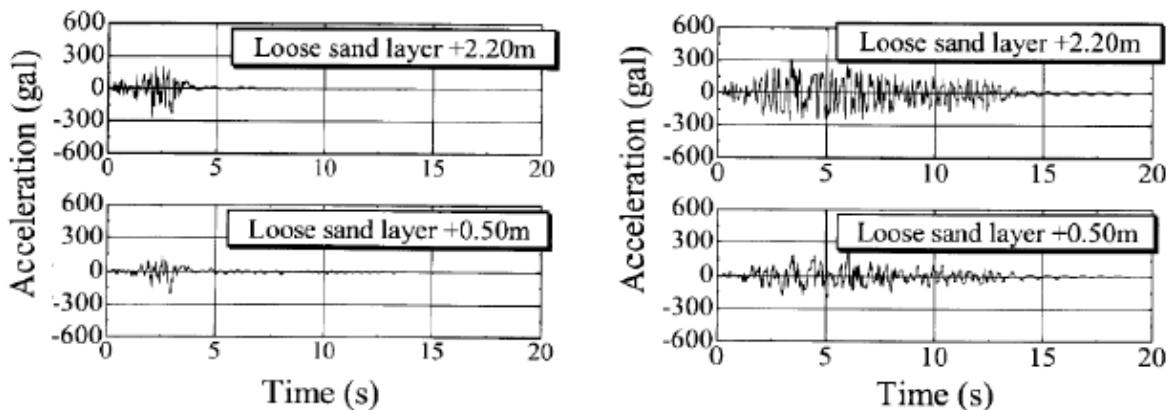
Πρώτοι οι Kodaka et al (2005) επέκτειναν το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα για άμμους των Oka et al (1999) βάσει στοιχείων από το προσομοίωμα των Adachi and Oka (1993) για μαλακό βράχο προκειμένου να μπορεί να αποδώσουν τη φαινόμενη συνοχή που προσφέρει η κολλοειδής πυριτιτιά. Τα αποτελέσματα των δοκιμών προσομοιώθηκαν ικανοποιητικά ποιοτικά. Ποσοτικά στα σταθεροποιημένα εδάφη, προβλέφθηκαν σχετικά μικρότερες παραμορφώσεις από αυτές των πειραματικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, η αριθμητική ανάλυση μπόρεσε να αποδώσει τόσο την αύξηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους, όσο και τη συσσώρευση σημαντικών διατμητικών παραμορφώσεων που συμβαίνει όταν η τασική όδευση φτάνει την Γραμμή Αλλαγής Φάσης (PTL).

Έχοντας βαθμονομήσει τις απαιτούμενες σταθερές του προσομοιώματος για τα σταθεροποιημένα εδάφη, με το λογισμικό LIQCA-2D προσομοιώθηκε μία στήλη ύψους 33,48m με μία τυπική στρωματογραφία της παραλιακής περιοχής του Tokyo Bay, τα ανώτερα 3,28m της οποίας αποτελούνται από αλλουβιανές προσχώσεις και είναι πολύ ευάλωτα στη ρευστοποίηση, για την προσομοίωση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν οι σταθερές που προέκυψαν από την ανάλυση εδαφικού στοιχείου.

Από την αριθμητική προσομοίωση φαίνεται ξανά ότι το προσομοίωμα καταφέρνει να αποδώσει ποιοτικά τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών, όμως δεν μπορεί να γίνει ποσοτική σύγκριση, ελλείψει πειραματικών μετρήσεων σε εδαφικά προφίλ και διεγέρσεις αντίστοιχα με αυτά της ανάλυσης. Παρατηρείται ότι η ανάπτυξη των υπερπιέσεων πόρων στο σταθεροποιημένο έδαφος είναι λιγότερο έντονη και τελικά σημαντικά μικρότερη από αυτή στο φυσικό έδαφος (**Σχήμα 2.16**). Τέλος, από τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη της εδαφικής στήλης προέκυψε μία μικρή ενίσχυση στην κορυφή του σταθεροποιημένου εδάφους (**Σχήμα 2.17**).



Σχήμα 2.16: Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων υπό αριθμητική προσομοίωση σε βάθος 4,98m από την επιφάνεια για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο. (Kodaka et al. 2005)



Σχήμα 2.17: Χρονοιστορίες επιταχύνσεων στο ρευστοποιήσιμο στρώμα για φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη (δεξιά) άμμο, από αριθμητική προσομοίωση. (Kodaka et al. 2005).

2.3.3 Προσέγγιση των Andrianopoulos et al. (2016)

Η μελέτη των Andrianopoulos et al. (2016) επικεντρώνεται στην «ευφυή» χρήση του προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010a, b) ώστε να μπορεί να προσομοιώσει και τη συμπεριφορά παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, για τη μελέτη της αυξημένης αντίστασης σε ρευστοποίηση των παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών, διερευνώνται δύο μηχανισμοί συμβολής:

- Ισχυροί αναπτυσσόμενοι δεσμοί μεταξύ των κόκκων και της γέλης.
- Μειωμένη ανάπτυξη υπερπίεσεων Δu , λόγω της συμπιεστότητας της γέλης στους πόρους

Από την μελέτη που έγινε, προέκυψε ότι δεσπάζοντα ρόλο τελικά παίζει η συμπιεστότητα της γέλης, η οποία έχει παρατηρηθεί εμμέσως σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια καθαρής κολλοειδούς πυριτίας του Towhata (2008). Αυτή η συμπιεστότητα εισήχθη ουσιαστικά στη συζευγμένη αριθμητική ανάλυση μέσω της σχέσης:

$$K = \frac{K_w}{n} \tag{2.1}$$

όπου K είναι το μέτρο συμπίεσης του υγρού πόρων, K_w είναι το μέτρο συμπίεσης του νερού (ίσο με 2×10^6 kPa) και n μια σταθερά που είναι μεγαλύτερη του 1, και απομειώνει το μέτρο συμπίεσης του υγρού πόρων (γέλη, στην περίπτωση αυτή) συγκριτικά με την τιμή για το νερό.

Επιπλέον, επιχειρήθηκε η προσομοίωση του πειράματος φυγοκεντρίστη των Gallagher et al. (2007) με αυτή την προσέγγιση, και προέκυψε ότι τιμές $n = 500 - 1000$ δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια σε όρους επιταχύνσεων και καθιζήσεων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξαιρετική προσομοίωση των επιταχύνσεων που προκύπτει για τιμές $n \rightarrow \infty$, μια προσέγγιση που δεν μπορεί να υιοθετηθεί καθώς τέτοιες τιμές του μέτρου K :

- προσομοιώνουν απολύτως στραγγιζόμενες συνθήκες (που δεν υπάρχουν στη φύση, ειδικά για γέλη στους πόρους της άμμου που σχεδόν μηδενίζει τη διαπερατότητα του σταθεροποιημένου εδάφους),
- οδηγούν σε αφύσικα μεγάλες καθιζήσεις που δε συνάδουν με τις πειραματικές μετρήσεις.

2.3.4 Προσέγγιση της Αγαπουλάκη (2017)

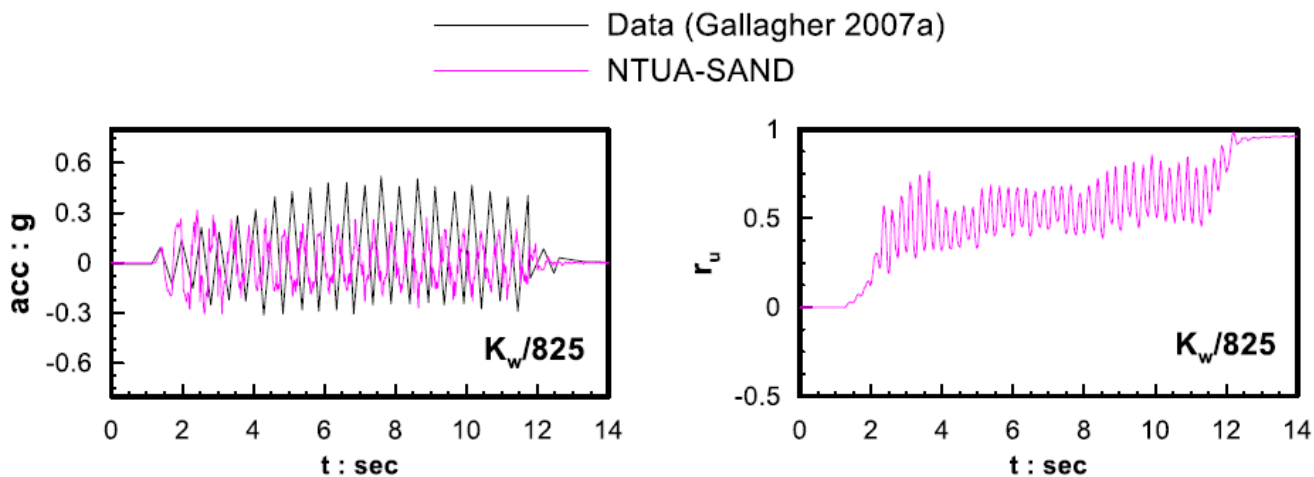
Μια ακόμη αξιολογη προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής απόκρισης παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών παρουσιάστηκε στην πρόσφατη διδακτορική διατριβή της Γεωργίας Αγαπουλάκη (2017), ενώ στοιχεία της είχαν παρουσιαστεί στο παρελθόν στη διπλωματική εργασία ΕΜΠ των Πανάγου και Σιάμπου (2015). Μεταξύ πολλών άλλων θεμάτων, η Αγαπουλάκη (2017), εκτέλεσε αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων των Gallagher et al (2007) και Conlee et al (2012), με «ευφυή» χρήση του προσομοιώματος NTUA-SAND στο λογισμικό FLAC, κατά' αντιστοιχία με ό,τι προτείνουν οι Andrianopoulos et al. (2016).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η παραμετρική διερεύνηση κατέληξε στη χρήση της σχέσης (2.1), αλλά με τιμή του διαιρέτη n που να συσχετίζεται με το ποσοστό πυριτίας κατά βάρος $CS(\%)$, η οποία δίνεται από :

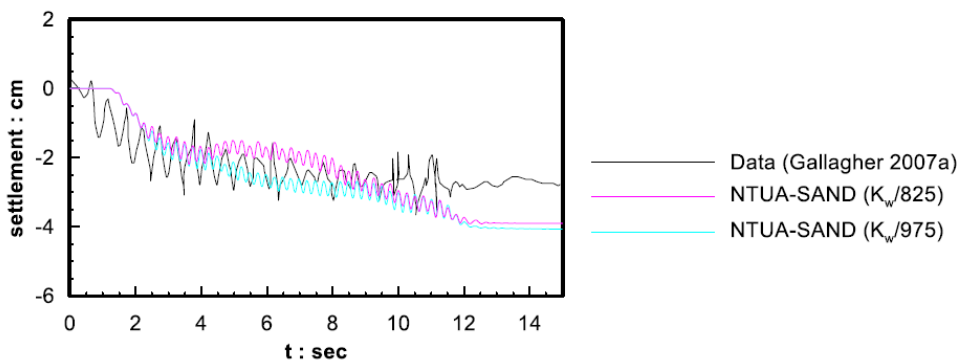
$$n = [CS(\%) + 2,25] \cdot 100 \quad (2.2)$$

Σύμφωνα με τη σχέση 2.2, για τη δοκιμή της Gallagher et al. (2007) που έχει χρησιμοποιήσει $CS=6\%$, η κατάλληλη τιμή του $n = 825$, ενώ αντίστοιχα για τη δοκιμή της Conlee et al. (2012) που έχει χρησιμοποιήσει $CS = 9\%$, η αντίστοιχη τιμή του $n = 1125$. Αντιθέτως αν είχε επιλεγεί μια ενιαία τιμή του n , τότε μια καλή εκτίμηση θα μπορούσε να είναι μια τιμή $n = 975$, που αντιστοιχεί σε $CS = 7.5\%$, δηλαδή τη μέση τιμή $CS(\%)$ μεταξύ των 5% και 10% που είναι το όριο εφαρμογής στην παθητική σταθεροποίηση.

Η καταλληλότητα της σχέσης 2.2 επιβεβαιώνεται στα επόμενα σχήματα που διαφαίνεται η ικανοποιητική συμφωνία των πειραματικών δεδομένων και των αριθμητικών αναλύσεων, και συγκριτικά με τη χρήση μιας ενιαίας τιμής n .

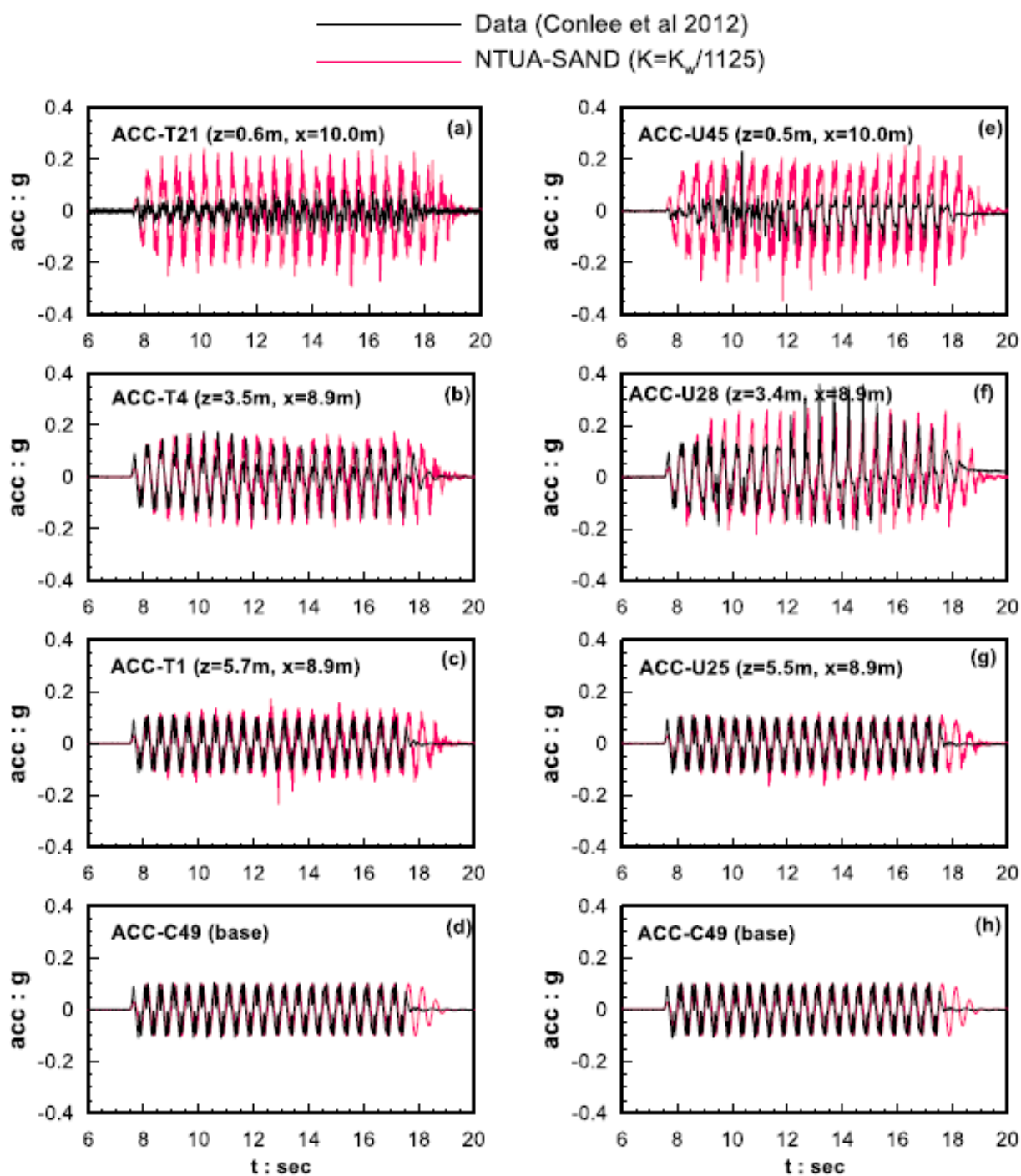


Σχήμα 2.18: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν σε βάθος 2 μέτρων στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a), με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων. (Αγαπουλάκη 2017).

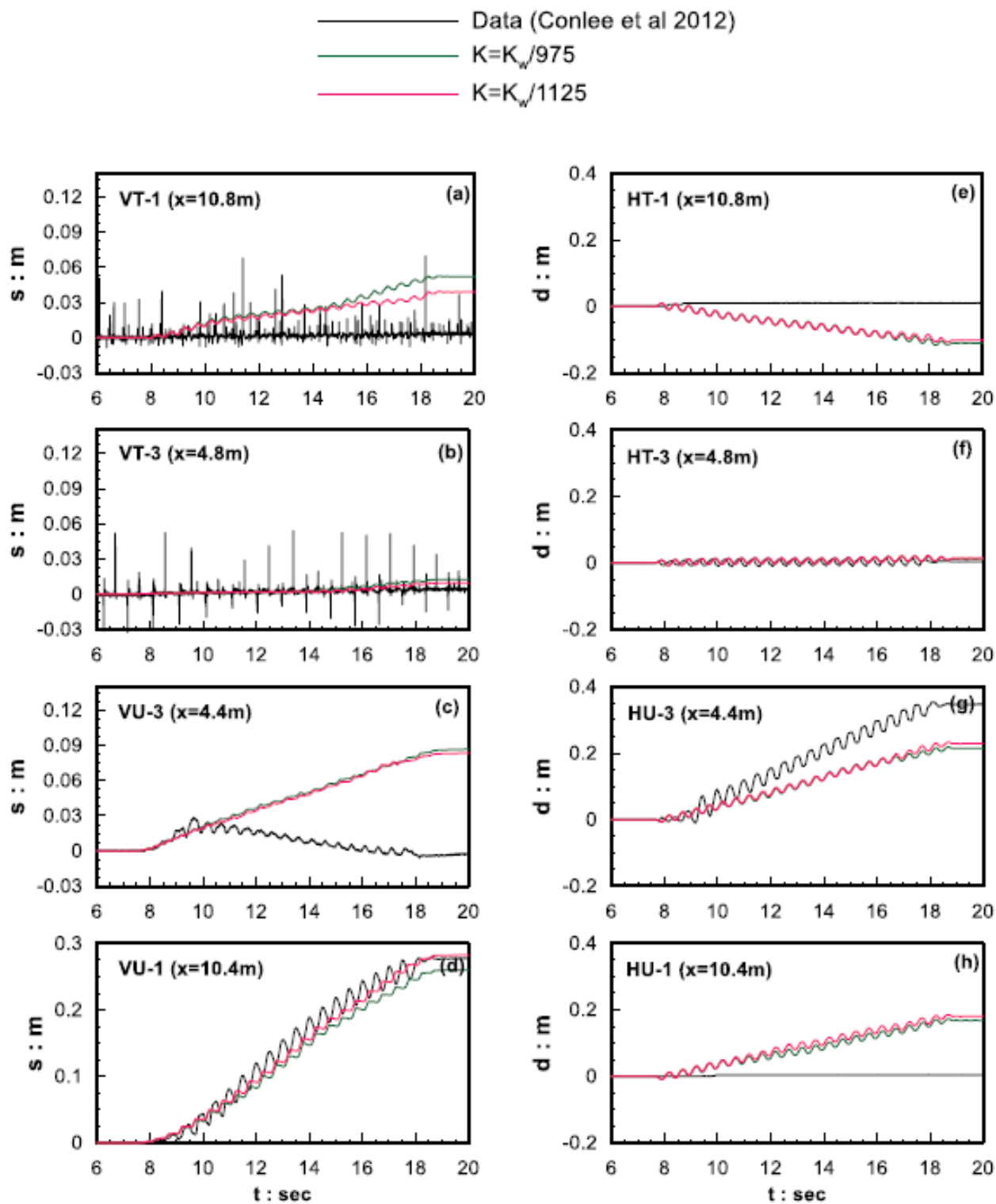


Σχήμα 2.19: Σύγκριση χρονιοιστοριών καθιζήσεων όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a), με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων. (Αγαπουλάκη 2017).

Όμοια ήταν και η προσέγγιση του πειράματος των Conlee et al. (2012), από την οποία προέκυψε και πάλι ικανοποιητική προσέγγιση με ενιαία τιμή n , αλλά σχετικά καλύτερη με τιμή n που να σχετίζεται με το ποσοστό CS(%) κατά βάρος.



Σχήμα 2.20: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν σε διάφορα βάθη στο πείραμα (Conlee et al. 2012), με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων. (Αγαπουλάκη 2017)



Σχήμα 2.21: Σύγκριση χρονιοιστοριών κατιζήσεων και οριζοντίων μετατοπίσεων όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια στο πείραμα (Conlee et al. 2012), με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων. (Αγαπουλάκη 2017)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Καταστατική προσομοίωση μηχανικής απόκρισης σταθεροποιημένων άμμων

3.1 Γενικά

Όπως παρουσιάστηκε προηγούμενα, η μηχανική απόκριση σταθεροποιημένων άμμων έχει ορισμένες ομοιότητες με εκείνη των φυσικών άμμων, αλλά και αρκετές διαφορές. Οι σταθεροποιημένες άμμοι, ιδανικά θα πρέπει να θεωρηθούν και να μελετηθούν ως ένα νέο γεωϋλικό, με δική του συμπεριφορά. Ωστόσο λόγω της έλλειψης πολλών πειραματικών μετρήσεων αλλά και ενός στοχευμένου καταστατικού προσομοιώματος της μηχανικής συμπεριφοράς τους (πέραν της προσπάθειας των Kodaka et al 2005), μια τέτοια προσέγγιση είναι, αυτή τη στιγμή, αδύνατη.

Μια προσέγγιση που έχει αποδειχτεί επιτυχημένη και μπορεί να αποτελέσει εφελθτήριο για νέες ιδέες και μελέτες έγινε από τους Andrianoopoulos et al. (2016). Σύμφωνα με αυτή, επιχειρείται η «ευφυής» χρήση υπαρχόντων καταστατικών προσομοιωμάτων με κατάλληλες προσαρμογές για την προσομοίωση των προαναφερθέντων σημαντικών διαφορών. Το προσομοίωμα Κρίσιμης Κατάστασης που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το NTUA-SAND (Andrianoopoulos, et al 2010) και διερευνάται πλήρως η δυνατότητα χρήσης του για την προσομοίωση εργαστηριακών δοκιμών σε σταθεροποιημένα εδάφη. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο αυτό (παράγραφος 3.2) παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και ορισμένες εξισώσεις του προσομοιώματος NTUA-SAND και στη συνέχεια η έμφαση δίνεται στην επίδραση της σταθεροποίησης στη Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (παράγραφος 3.3) με βάση δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα. Το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται στην παράγραφο 3.4, όπου διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης στις καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση με βάση πειραματικά αποτελέσματα, και το πώς αυτή μπορεί να προβλεφθεί από το NTUA-SAND αν ληφθεί υπόψη η πειραματικώς ευρεθείσα επίδραση της σταθεροποίησης στη Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης.

3.2 Βασικά στοιχεία του καταστατικού προσομοιώματος

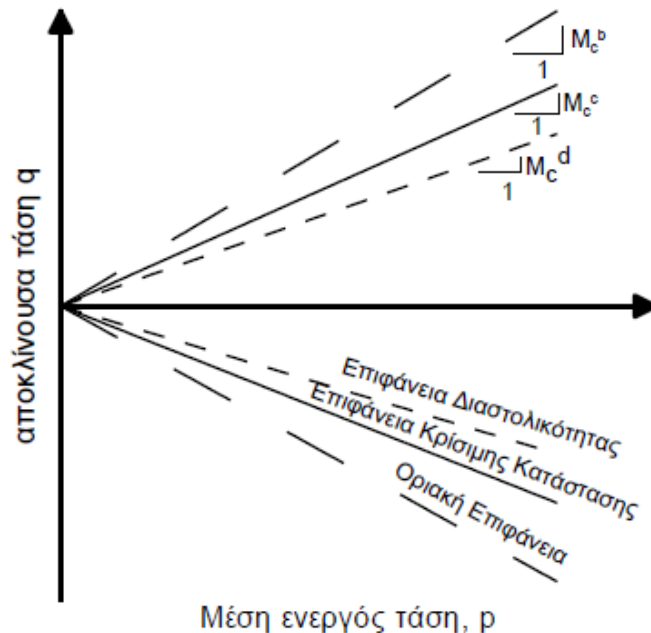
Το NTUA-SAND (Andrianoopoulos et al. 2010) είναι ένα καταστατικό προσομοίωμα για άμμους που ανήκει στην κατηγορία των *ελαστοπλαστικών προσομοιωμάτων οριακής επιφάνειας*. Πρόκειται για ένα αναλυτικό προσομοίωμα συνεχούς μέσου που βασίζεται στις αρχές της θεωρίας πλαστικότητας και συνδέεται με το ολοκληρωμένο πλαίσιο εδαφικής συμπεριφοράς που είναι γνωστό ως *Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης* (CSSM, Roscoe et al. 1963, Schofield and Wroth 1968, Roscoe and Burland 1968). Βασίζεται στο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα που προτάθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Παπαδημητρίου (1999) και στις δημοσιεύσεις της (Papadimitriou et al. 2001, Papadimitriou and Bouckovalas 2002). Το NTUA-SAND διατηρεί τη φιλοσοφία, τις παραδοχές και τις βασικές εξισώσεις του αρχικού προσομοιώματος, υιοθετώντας κάποιες τροποποιήσεις με στόχο την ενσωμάτωσή του σε λογισμικό αριθμητικής ανάλυσης. Μια από τις σημαντικότερες τροποποιήσεις είναι η μετατροπή της επιφάνειας διαρροής σε σημειακή. Με αυτό τον τρόπο οι επιφάνειες του προσομοιώματος μειώνονται κατά μια, και αντίστοιχα μειώνεται και το υπολογιστικό κόστος. Έτσι, το προσομοίωμα μεταπίπτει στην κατηγορία *προσομοιωμάτων οριακής επιφάνειας με σημειακή ελαστική περιοχή* (*bounding surface models with vanished elastic region*) και η απόκριση του υλικού είναι ελαστοπλαστική σε κάθε βήμα φόρτισης. Συνοπτικά τα σημαντικότερα συστατικά του NTUA-SAND είναι τα εξής:

- Η αλληλεξάρτηση της οριακής επιφάνειας και των επιφανειών κρίσιμης κατάστασης, διαστολικότητας από την παράμετρο ψ .

- Μια τροποποιημένη έκφραση του μη-γραμμικού απολύτως υστερητικού προσομοιώματος Ramberg-Osgood (1943) για το «ελαστικό» μέτρο, το οποίο ορίζει την απόκριση στις μικρές και μεσαίες ανακυκλικές διατμητικές παραμορφώσεις.
- Ένα κέντρο προβολής του λόγου αποκλινουσών τάσεων, του οποίου η θέση επαναπροσδιορίζεται αυτόματα κατά την «τελευταία» αντιστροφή της φόρτισης και το οποίο χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για να προσδιορίσει τη θέση της τρέχουσας κατάστασης στις επιφάνειες του προσομοιώματος.
- Ένας εμπειρικός μακροσκοπικός δείκτης για την επίδραση της αλλαγής της δομής της άμμου στην απόκριση κατά τη διάρκεια της διάτμησης, ο οποίος μεταβάλλει την τιμή του πλαστικού μέτρου.

Το NTUA-SAND έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να προσομοιώσει με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση των μη συνεκτικών εδαφών υπό μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση για όλο το εύρος των διατμητικών παραμορφώσεων, για δοκιμές τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου όσο και εδαφικής στήλης, με τις ίδιες τιμές των σταθερών του προσομοιώματος, οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τις αρχικές συνθήκες (αρχική ενεργός τάση και δείκτης πόρων). Μάλιστα το προσομοίωμα αυτό έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στο λογισμικό πεπερασμένων διαφορών *FLAC2D* στην προσομοίωση του φαινομένου της ρευστοποίησης και της απόκρισης συστήματος εδάφους-κατασκευής.

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al 2010) περιλαμβάνει τρεις επιφάνειες στο χώρο των τάσεων (πέραν της επιφάνειας διαρροής, η οποία είναι σημειακή), δηλαδή: την Οριακή επιφάνεια, η οποία ορίζει την αντοχή του εδαφικού υλικού, την επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης κατά την οποία έχουμε συσσώρευση διατμητικής παραμόρφωσης υπό σταθερές τάσεις και όγκο, και την επιφάνεια Διαστολικότητας, η οποία αποτελεί γενίκευση της Γραμμής Αλλαγής Φάσης (Phase Transformation Line, PTL) των Ishihara et al. (1975) και καθορίζει αν το υλικό θα συσταλεί ή θα διασταλεί κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται οι μορφές των επιφανειών του προσομοιώματος για τριαξονική εντατική κατάσταση στο χώρο τάσεων q - p , όπου p είναι η μέση ενεργός τάση και $q = \sigma_1 - \sigma_3$ η αποκλίνουσα τάση.



Σχήμα 3.1: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο p - q (Andrianopoulos et al. 2010).

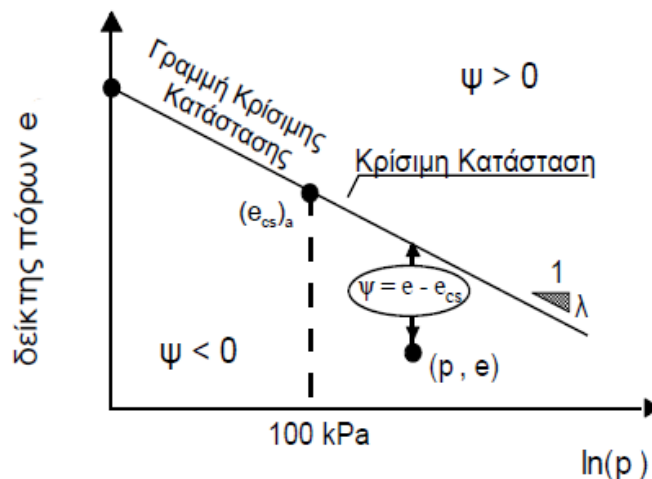
Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στην Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (Critical State Line) καθώς θα μελετηθεί η επίδραση της μετατόπισης και στροφής αυτής, λόγω της παθητικής σταθεροποίησης.

Συγκεκριμένα στο προσομοίωμα NTUA-SAND, η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης θεωρείται εκ των προτέρων γνωστή και έχει μορφή ευθείας (τουλάχιστον για τις τάσεις που δεν προκαλούν θραύση κόκκων) στο χώρο $[e - \log(p)]$, όπου e είναι ο δείκτης πόρων. Η μορφή ευθείας γραμμής απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2 και δίνεται από τη σχέση:

$$e_{cs} = e_{cs,a} - \lambda \cdot \ln\left(\frac{p}{p_a}\right) \quad (3.1)$$

όπου:

- e_{cs} είναι ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για μέση ενεργό τάση p
- p_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση (π.χ. $p_a = 98.1 \text{ kPa}$),
- $e_{(cs)a}$ είναι ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για $p = p_a$ και
- λ είναι η σταθερή κλίση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης CSL στο χώρο $[e - \ln(p)]$.



Σχήμα 3.2: Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο $e - \ln p$ και ορισμός της παραμέτρου κατάστασης ψ .

Στην επόμενη παράγραφο θα αναλυθεί η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να προσδιορισθεί η νέα θέση της Critical State Line των σταθεροποιημένων εδαφών.

3.3 Επίδραση σταθεροποίησης στη Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης άμμων

3.3.1 Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων

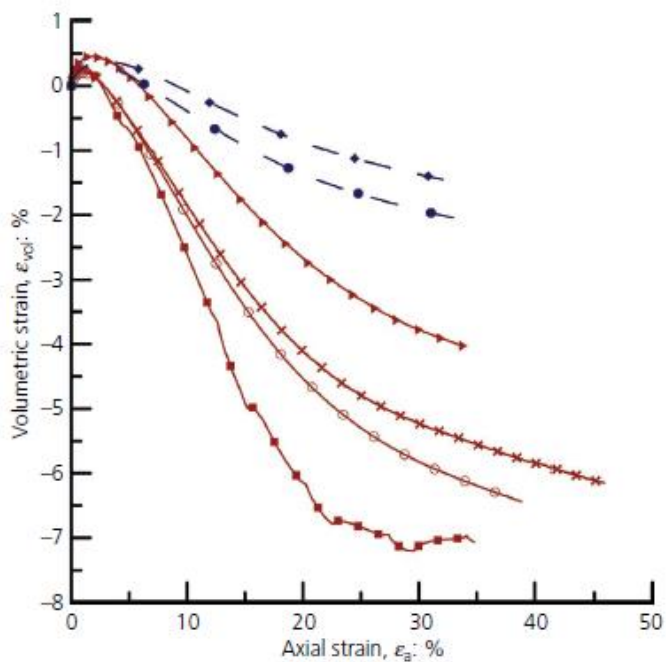
Για να προσδιορισθεί με σαφήνεια η μεταβολή της θέσης της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης, των παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το δημοσιευμένο άρθρο των Georgiannou et al. (2017). Στο εν λόγω paper έγιναν τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές απευθείας διάτμησης σε δοκίμια φυσικής άμμου M31 αλλά και σταθεροποιημένης άμμου M31 με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM σε ποσοστό 10%. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τόσο υπό στραγγιζόμενες όσο και υπό αστράγγιστες συνθήκες προκειμένου να μελετηθεί διεξοδικά η συμπεριφορά του υλικού.

Παρατίθεται παρακάτω ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα καθώς και ένα ενδεικτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων από τη μελέτη των Georgiannou et al. (2017).

Test	Test type	e_i	e_p	σ'_{v0} : kPa	ρ'_i : kPa	τ/σ'_i	q/p'	q_{UCS} : kPa	U/T
A-1	DS	0.641	0.638	125	—	0.665	—	—	U
A-2	DS	0.550	0.542	125	—	0.766	—	—	U
A-3	DS	0.696	0.696	125	—	0.587	—	—	U
A-4	DS	0.535	0.524	125	—	0.758	—	—	U
A-5	DS	0.651	0.646	232	—	0.641	—	—	U
A-6	DS	0.661	0.656	232	—	0.612	—	—	U
A-7	DS	0.528	0.523	232	—	0.749	—	—	U
A-8	DS	0.626	0.618	232	—	0.729	—	—	U
A-9	DS	0.658	0.653	340	—	0.650	—	—	U
A-10	DS	0.656	0.655	555	—	0.630	—	—	U
A-11	DS	0.554	0.547	555	—	0.742	—	—	U
SA-1	DS	0.655	0.621	53	—	0.835	—	—	T
SA-2	DS	0.639	0.623	125	—	0.877	—	—	T
SA-3	DS	0.637	0.619	196	—	0.857	—	—	T
SA-4	DS	0.647	0.631	232	—	0.824	—	—	T
SA-5	DS	0.612	0.600	232	—	0.884	—	—	T
SA-6	DS	0.643	0.625	268	—	0.789	—	—	T
SA-7	DS	0.646	0.623	340	—	0.770	—	—	T
SA-8	DS	0.681	0.676	340	—	0.723	—	—	T
SA-9	DS	0.632	0.625	555	—	0.698	—	—	T
A-12	TR-D	0.710	0.716	—	200	—	1.33	—	U
A-13	TR-D	0.717	0.718	—	300	—	1.30	—	U
A-14	TR-D	0.691	0.693	—	500	—	1.31	—	U
A-15	TR-D	0.676	0.681	—	700	—	1.32	—	U
SA-10	TR-D	0.748	0.795	—	100	—	1.56	—	T
SA-11	TR-D	0.751	0.774	—	200	—	1.53	—	T
SA-12	TR-D	0.742	0.769	—	300	—	1.47	—	T
SA-13	TR-D	0.711	0.724	—	700	—	1.42	—	T
SA-14	TR-UCS	0.770	—	—	—	—	—	85	T
SA-15	TR-UCS	0.750	—	—	—	—	—	72	T

DS, direct shear test; TR-D, drained triaxial test; TR-UCS, unconfined compression test; U, untreated specimen; T, treated specimen

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά υλικών και δοκιμών των Georgiannou et al. (2017)



Σχήμα 3.3: Γράφημα ογκομετρικών παραμορφώσεων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για διάφορα δοκίμια σε διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης (Georgiannou et al 2017).

Έμφαση δόθηκε στις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης, τόσο σε στραγγιζόμενες όσο και σε αστράγγιστες συνθήκες. Στόχος είναι να προσδιορισθεί ο συνδυασμός τελικού δείκτη πόρων $e_{(cs)}$ και τελικής ενεργού τάσης p' (kPa), για κάθε τριαξονική δοκιμή. Τα σημεία θα απεικονισθούν τελικά στο χώρο $[e_{(cs)} - \log(p'/p_a)]$, και βάση αυτών θα χαραχτεί η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) τόσο για το φυσικό έδαφος, όσο και για το σταθεροποιημένο. Παρακάτω αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για κάθε μία περίπτωση ξεχωριστά.

3.3.2 Αποτελέσματα από Τριαξονικές Δοκιμές στην άμμο M31

Από τα διαγράμματα $\varepsilon_{vol,\%} - \varepsilon_a,\%$, για κάθε δοκιμή σημειώνεται η τελική ογκομετρική παραμόρφωση που προέκυψε, όταν το δοκίμιο έφτασε στην Κρίσιμη Κατάσταση. Αυτή συσχετίζεται, εξ' ορισμού, με τη μεταβολή του δείκτη πόρων e , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varepsilon_{vol} = - \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (3.2)$$

Όπου:

- e_0 : ο αρχικός δείκτης πόρων
- ε_{vol} : η τελική ογκομετρική παραμόρφωση
- $\Delta e = e_{cs} - e_0$ δηλαδή η διαφορά μεταξύ τελικού και αρχικού δείκτη πόρων.

Με δεδομένη την τιμή της ε_{vol} και τη σχέση (3.2) προκύπτει η διαφορά Δe , οπότε γνωρίζοντας τον αρχικό δείκτη πόρων e_0 για κάθε δοκιμή (βλ. Πίνακα 3.1) προκύπτει ο ζητούμενος τελικός δείκτης πόρων e_{cs} στην Κρίσιμη Κατάσταση.

Η αρχική ενεργός τάση p_0 είναι γνωστή από τα δεδομένα του πειράματος. Από τα διαγράμματα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$ σημειώνεται η τελική αποκλίνουσα τάση q_{final} της δοκιμής και βάσει της γνωστής σχέσης για τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης:

$$p_{cs} = p_0 + \frac{q_{final}}{3} \quad (3.3)$$

Όπου:

- p_0 : η αρχική ενεργός τάση
- q_{final} : η τελική αποκλίνουσα τάση ($\sigma_{1,final} - \sigma_{3,final}$)
- p_{cs} : η τελική ενεργός τάση στην κρίσιμη κατάσταση

προσδιορίζεται η p_{cs} . Έτσι προκύπτει τελικά το ζητούμενο σημείο στον χώρο $[e_{(cs)} - \log(p'/p_a)]$. Παρατίθενται κάτωθι οι Πίνακες με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας για τα φυσικά δοκίμια (Πίνακας 3.2) και για τα σταθεροποιημένα (Πίνακας 3.3).

P_0	P_{cs} (untreated)	$e(cs)$
200	316,667	0,745
300	493,333	0,743
500	833,333	0,718
700	1083,333	0,706

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα επεξεργασίας για τιμές e_{cs} και p_{cs} από τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017), για τα δοκίμια φυσικής άμμου M31.

P_0	P_{cs} (treated)	$e(cs)$
100	166,667	0,890
200	366,667	0,860
300	533,333	0,848
500	833,333	0,805
700	1176,667	0,781
1000	1694,915	0,749
2000	3366,667	0,676

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα επεξεργασίας για τιμές e_{cs} και p_{cs} από τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017), για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31.

Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι παρόλο που από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων προκύπτουν τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρώντας με μία πιο κριτική ματιά ορισμένες από τις πειραματικές καμπύλες, βλέπουμε ότι δεν υπάρχει τάση «σταθεροποίησης» της ογκομετρικής παραμόρφωσης. Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι το υλικό δεν «έφτασε» τότε ουσιαστικά την CSL του και άρα, εάν η δοκιμή μπορούσε να παραταθεί θα οδηγούσε σε λίγο μεγαλύτερη (κατ' απόλυτη τιμή) ογκομετρική παραμόρφωση, και αντίστοιχα λίγο μεγαλύτερη τιμή p_{cs} υπό δεδομένο e_{cs} . Συνεπώς, όσες δοκιμές θεωρούνται ότι δεν έφτασαν στην CSL θα σημειωθούν με κόκκινο στον συγκεντρωτικό Πίνακα των αποτελεσμάτων και θα ληφθούν κατάλληλα υπόψη στη χάραξη της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης.

Στις τριαξονικές δοκιμές, υπό αστράγγιστες συνθήκες, ο δείκτης πόρων παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Από τα διαγράμματα $q-p'$ (διαδρομές τάσεων) για κάθε δοκιμή προκύπτει η μέγιστη ενεργός τάση που απέκτησε το δοκίμιο. Συνθέτοντας λοιπόν σε ένα πίνακα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα γραφήματα έχουμε:

Undrained					
e	P_0 (kPa)	P_{cs} (kPa)	e	P_0 (kPa)	P_{cs} (kPa)
Untreated			Treated		
0,679	300	800	0,732	100	1500
0,681	1000	1850	0,752	200	1750
0,707	1500	2150	0,735	300	2000
0,715	2000	2700	0,722	1000	2750
			0,667	2000	3500

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα επεξεργασίας για τιμές e_{cs} και p_{cs} από τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017), για τα δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.

Επισημαίνεται ότι και σε αυτές τις δοκιμές υπήρξε το θέμα που προαναφέρθηκε με τα σημεία τα οποία δεν έχουν φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση. Επιπλέον, σε ορισμένες από αυτές τις δοκιμές και συγκεκριμένα σε όσες έγιναν υπό αρχική ενεργό τάση μικρότερη των 700 kPa, που ήταν η λεγόμενη back pressure με την οποία εκτελέσθηκε η δοκιμή, παρατηρείται το φαινόμενο της σπηλαιώσης (cavitation) του υγρού των πόρων. Είναι ξεκάθαρο λοιπόν ότι λόγω αρχικών συνθηκών και φύσεως της δοκιμής εμποδίζεται η δυνατότητα να φτάσουν στην Κρίσιμη Κατάσταση και επομένως αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

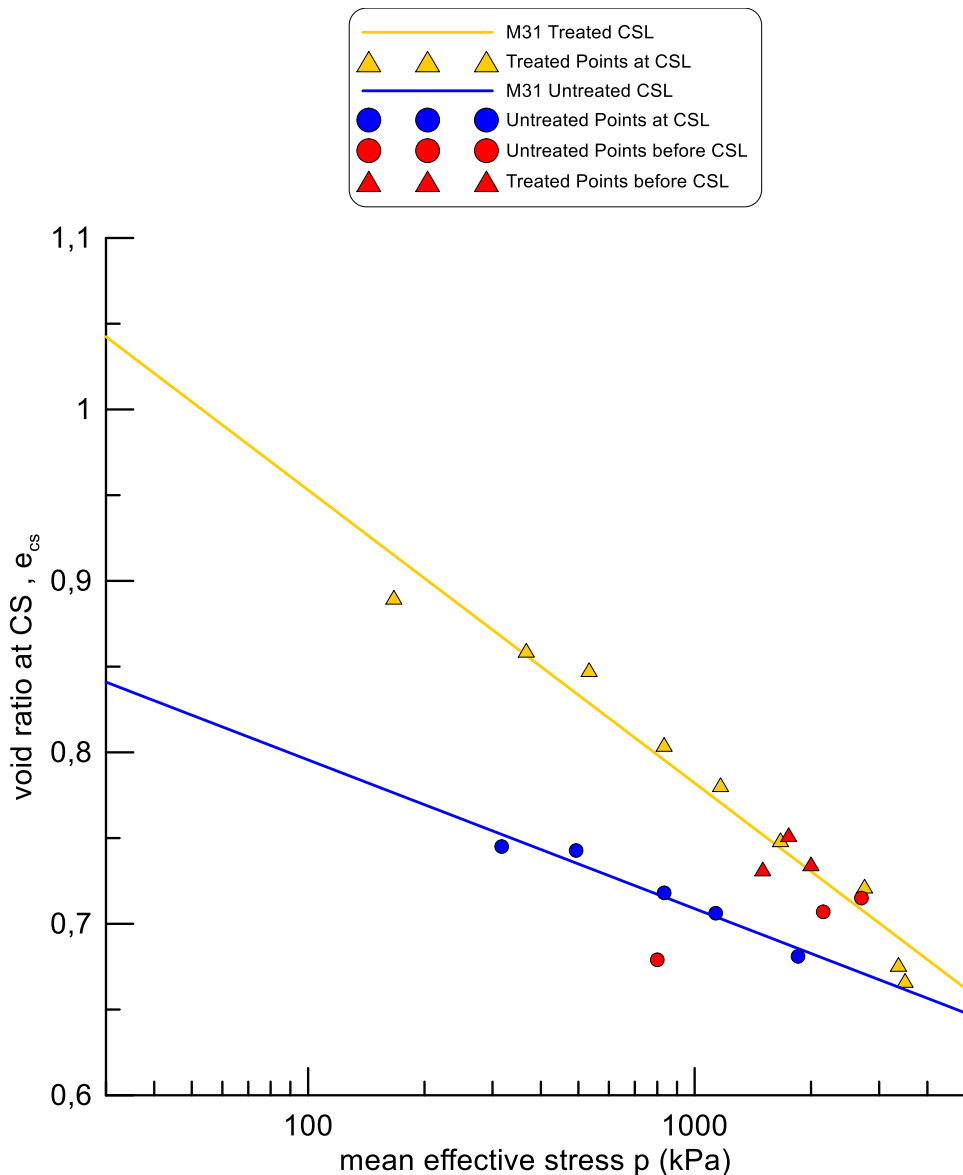
Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των σημείων που προέκυψαν τόσο από τις δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, όσο και αυτών υπό αστράγγιστες συνθήκες. Με κόκκινο επισημαίνονται τα σημεία που έχουν την τάση να κινηθούν πιο «δεξιά» (δηλαδή δεν έχουν φτάσει ακόμα στην CSL τους).

p_{final} (kPa)	e_{cs}	
	Untreated	Treated
166,667		0,890
366,667		0,860
533,333		0,848
833,333		0,805
1176,667		0,781
1694,915		0,749
3366,667		0,676
316,667	0,745	
493,333	0,743	
833,333	0,718	
1083,333	0,706	
800	0,679	
1850	0,681	
2150	0,707	
2700	0,715	
1500		0,732
1750		0,752
2000		0,735
2750		0,722
3500		0,667

Πίνακας 3.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων για σημεία επί των CSL από δοκιμές υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες των Georgiannou et al. (2017) και Παυλοπούλου (2017). Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι δοκιμές στις οποίες το υλικό δεν έχει φτάσει ακόμα την CSL του αλλά ενσωματώνονται εδώ χάριν πληρότητας.

3.3.4 Εκτίμηση Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) για τις Φυσικές και Σταθεροποιημένες Άμμους M31 και Nevada.

Τα σημεία του Πίνακα 3.5 τοποθετήθηκαν σε κοινό γράφημα με άξονες $e - \log(p'/p_a)$ και με λογική «βέλτιστης προσαρμογής» χαράχτηκαν δύο ευθείες, μία για την φυσική άμμο M31 και μία για τη σταθεροποιημένη. Επισημαίνεται πως λόγω της αβεβαιότητας των σημείων που δεν έχουν φτάσει την CSL, επιλέχθηκε να ληφθούν υπόψη μόνο τα σημεία που σίγουρα έχουν φτάσει στην CSL (όχι τα κόκκινα σημεία). Το εύρος τάσεων αυτών περιλαμβάνει σχεδόν κάθε δυνατή φυσικά περίπτωση, και στο **Σχήμα 3.4** που ακολουθεί παρουσιάζεται το εν λόγω γράφημα.



Σχήμα 3.4: Γραφική απεικόνιση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης (CSLs) για την φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο M31 βάσει της επεξεργασίας των δεδομένων της δημοσίευσης των Georgiannou et al. (2017), και της μεταπτυχιακής εργασίας της Ελένης-Μαρίας Παυλοπούλου (2017).

Οι εξισώσεις που δίνουν τις CSL για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο M31 σύμφωνα με το Σχήμα 3.4 δίνονται από τις σχέσεις 3.4 και 3.5:

$$e_{cs} = 0.796 - 0.0379 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_a}\right) \quad (3.4)$$

$$e_{cs} = 0.954 - 0.0743 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_a}\right) \quad (3.5)$$

Με βάση τα αποτελέσματα αυτή, η παθητική σταθεροποίηση μεταθέτει προς τα άνω και αυξάνει την κλίση της CSL μιας άμμου, με την πρώτη επίδραση να εκφράζεται από το σταθερό όρο $e_{cs,a}$ της σχέσης 3.1 και τη δεύτερη από τον πολλαπλασιαστή λ της ίδιας σχέσης. Στην άμμο M31, η παθητική σταθεροποίηση μεταθέτει προς τα άνω τη CSL κατά 0.158 (= 0.954 – 0.796) σε όρους δείκτη πόρων και αυξάνει την κλίση της κατά 1.96 φορές (= 0.0743/0.0379).

Ωστόσο, η άμμος που θα μας απασχολήσει περαιτέρω στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι η Nevada 120 η οποία χρησιμοποιήθηκε και στις τρεις δοκιμές φυγοκέντρησης που θα εξεταστούν στα επόμενα κεφάλαια. Για την άμμο αυτή είναι γνωστή από την βιβλιογραφία η CSL της (Andrianopoulos et al. 2010):

$$e_{cs} = 0.809 - 0.022 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_a}\right) \quad (3.6)$$

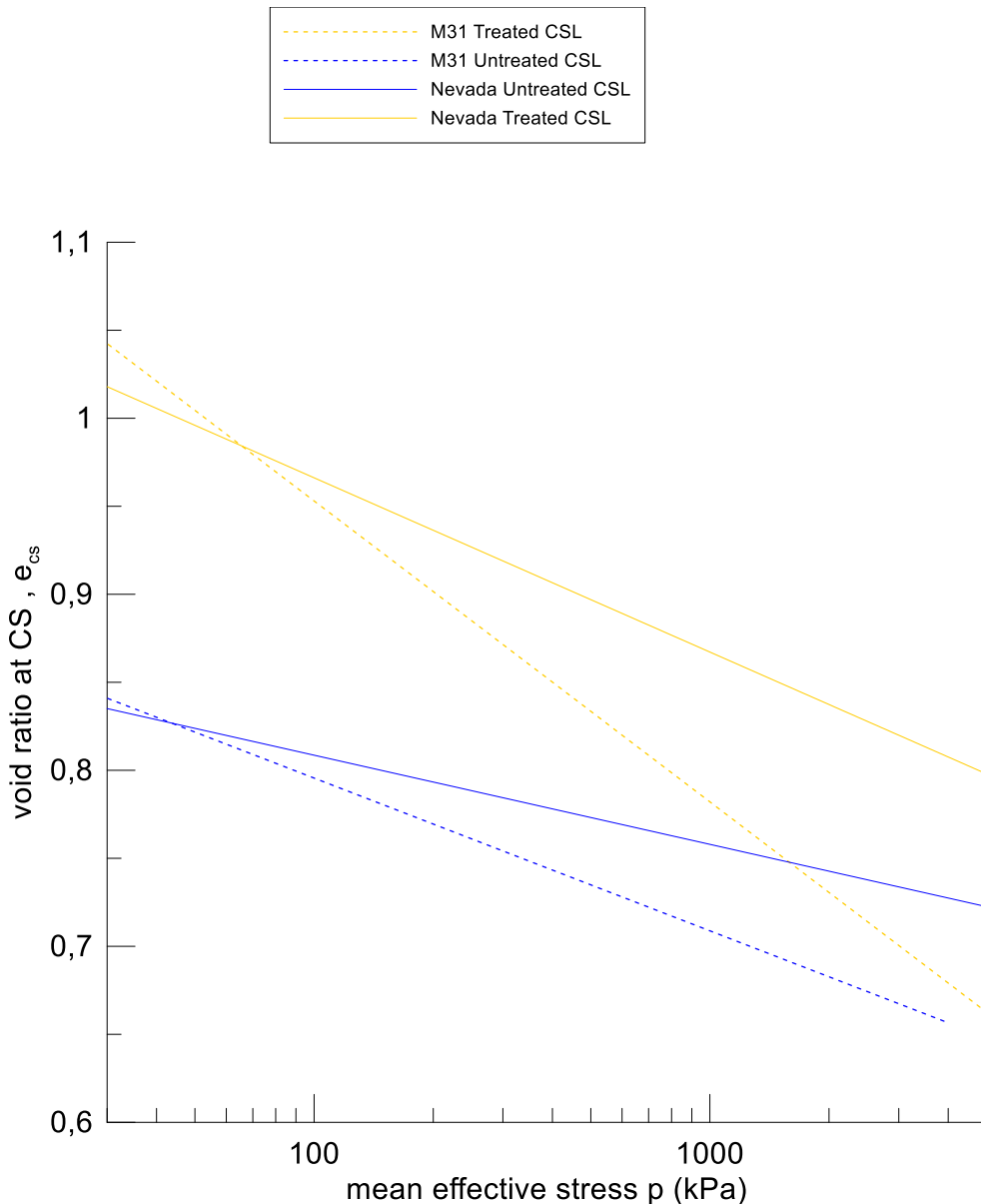
Δεδομένης της έλλειψης πειραματικών μετρήσεων, προκειμένου να προσδιορισθεί η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης για την σταθεροποιημένη άμμο Nevada, έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Η μετάθεση προς τα άνω είναι εκείνη που προέκυψε και για την άμμο M31, ήτοι 0.158 σε όρους δείκτη πόρων, όπως αυτή ποσοτικοποιείται από το $e_{cs,a}$ της σχέσης 3.1.
- Η αύξηση της κλίσης είναι εκείνη που προέκυψε και για την άμμο M31, ήτοι κατά 1.96 φορές μεγαλύτερη τιμή του λ της σχέσης 3.1

Χρήση των ανωτέρω παραδοχών, μαζί με την εξίσωση (3.6) οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση για την CSL της σταθεροποιημένης άμμου Nevada 120:

$$e_{cs} = 0.967 - 0.043 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_a}\right) \quad (3.7)$$

Χάριν πληρότητας, στο **Σχήμα 3.5** παρουσιάζονται οι CSL των άμμων M31 και Nevada, πριν και μετά τη σταθεροποίηση.



Σχήμα 3.5: Γραφική απεικόνιση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης (CSLs) για την φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada μετά από επεξεργασία των CSL της άμμου M31.

3.4 Επίδραση σταθεροποίησης στις καμπύλες αντοχής στη ρευστοποίηση

Σε μεγάλες ανακυκλικές διατμητικές παραμορφώσεις τα χαλαρά κορεσμένα μη συνεκτικά εδάφη έχουν μειωμένη αντίσταση σε ρευστοποίηση, η οποία εκδηλώνεται με τη συσσώρευση διατμητικών παραμορφώσεων, τη ραγδαία ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων και τελικώς σημαντική απώλεια της διατμητικής αντοχής τους. Σε αντίθεση με το φυσικό έδαφος, αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών σε σταθεροποιημένα εδάφη με κολλοειδή πυριτία δείχνουν σημαντική συνεισφορά της σταθεροποίησης σε αντίσταση σε ρευστοποίηση συγκριτικά με το φυσικό έδαφος υπό τις ίδιες αρχικές συνθήκες και φόρτιση.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η ρευστοποίηση μπορεί να οριστεί ως το σημείο που οι πιέσεις του υγρού των πόρων ισούνται με την αρχική ενεργό τάση ή εναλλακτικά όταν το έδαφος φτάσει σε ένα προκαθορισμένο

επίπεδο παραμορφώσεων. Στις ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές, η παραμόρφωση συχνά μετριέται σε όρους διπλού εύρους αξονικής παραμόρφωσης (Double Amplitude, DA) που είναι η μέγιστη παραμόρφωση η οποία αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου φόρτισης. Στα σταθεροποιημένα εδάφη, η αύξηση του ιξώδους της πυριτίας προκαλεί σημαντική μείωση της διαπερατότητας του εδαφικού σχηματισμού, κάνοντας τη μέτρηση των πιέσεων του υγρού των πόρων δύσκολη και εν γένει ανακριβή. Έτσι είναι συνήθης η χρήση του κριτηρίου των παραμορφώσεων για τον ορισμό της ρευστοποίησης, ειδικά στα σταθεροποιημένα εδάφη.

Συγκεκριμένα, ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές (Gallagher and Mitchell 2002, Vranna Tikka et al 2015), καθώς και δοκιμές απλής διάτμησης (Diaz-Rodriguez et al 2008, Porcino et al 2012, 2015) και στρεπτικής διάτμησης (Kodaka et al 2005) δείχνουν ότι το σταθεροποιημένο έδαφος φτάνει ένα επίπεδο μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης (DA=1%, 2% ή 5%), μετά το πέρας αυξημένου αριθμού κύκλων σε σχέση με το φυσικό.

Αν και τα δεδομένα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, αφορούν διαφορετικούς τύπους άμμων και διαφορετικές συγκεντρώσεις κολλοειδούς πυριτίας, η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης σε όρους αύξησης των ανακυκλικών τάσεων CSR για δεδομένο αριθμό κύκλων N_L για το σταθεροποιημένο έδαφος είναι αδιαμφισβήτητη. Για να ποσοτικοποιηθεί αυτή η επίδραση με βάση και τις έξι (6) προαναφερθείσες εργασίες, αποφασίσθηκε να καταρτισθούν δύο συγκεντρωτικά γραφήματα. Το πρώτο θα παρουσιάζει τη βελτίωση που παρατηρήθηκε σε άξονες $\Delta CSR-N_L$, δηλαδή της διαφοράς του CSR μεταξύ σταθεροποιημένου ($CSR_{treated}$) και φυσικού εδάφους ($CSR_{untreated}$) για σταθερούς κύκλους φόρτισης N_L . Το δεύτερο γράφημα παρουσιάζει την βελτίωση που παρατηρήθηκε σε όρους RCSR, δηλαδή του λόγου των δύο τιμών CSR σταθεροποιημένου προς φυσικού εδάφους, για σταθερούς κύκλους φόρτισης N_L . Άρα:

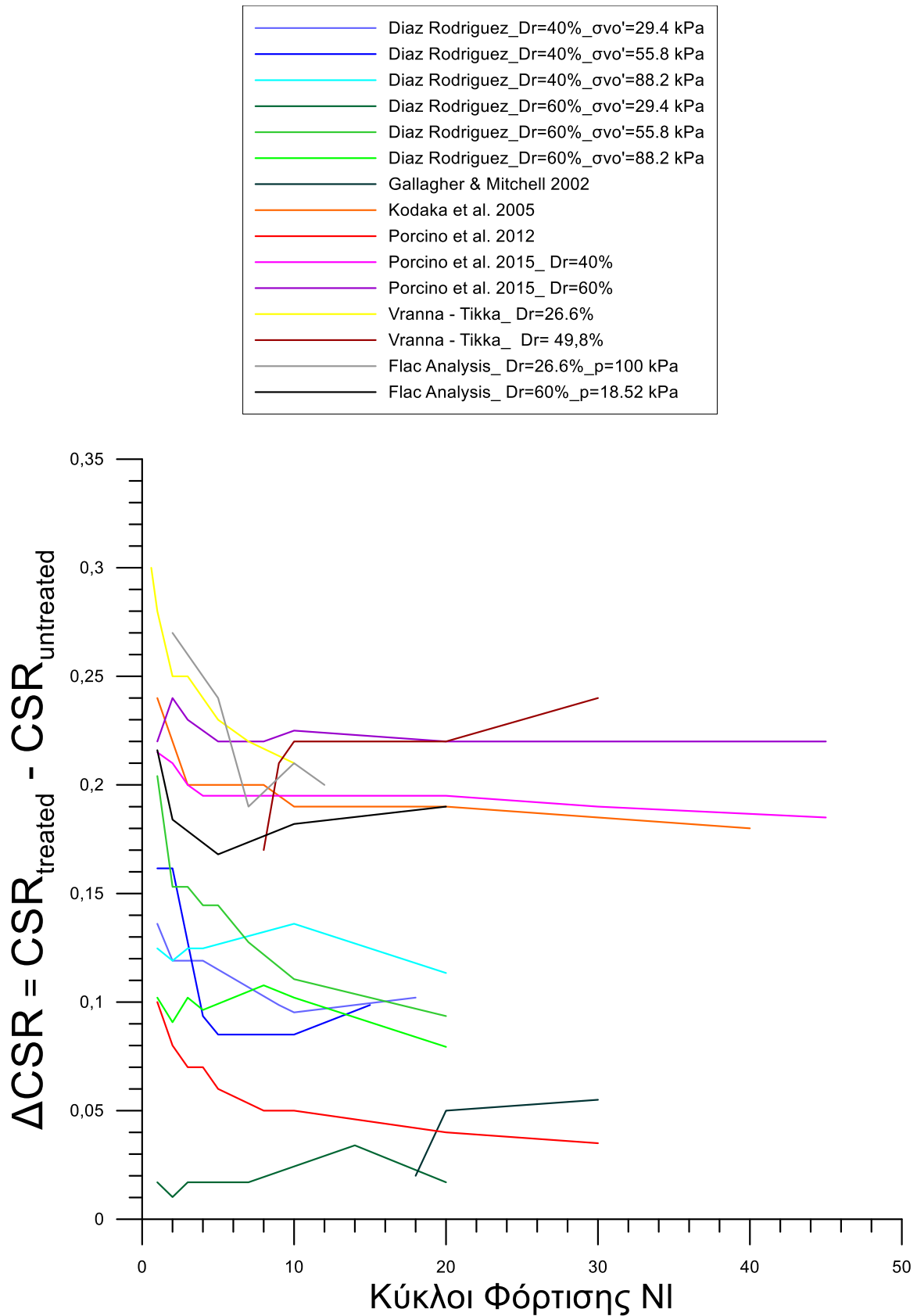
$$1. \Delta CSR = CSR_{treated} - CSR_{untreated}$$

$$2. RCSR = \frac{CSR_{treated}}{CSR_{untreated}}$$

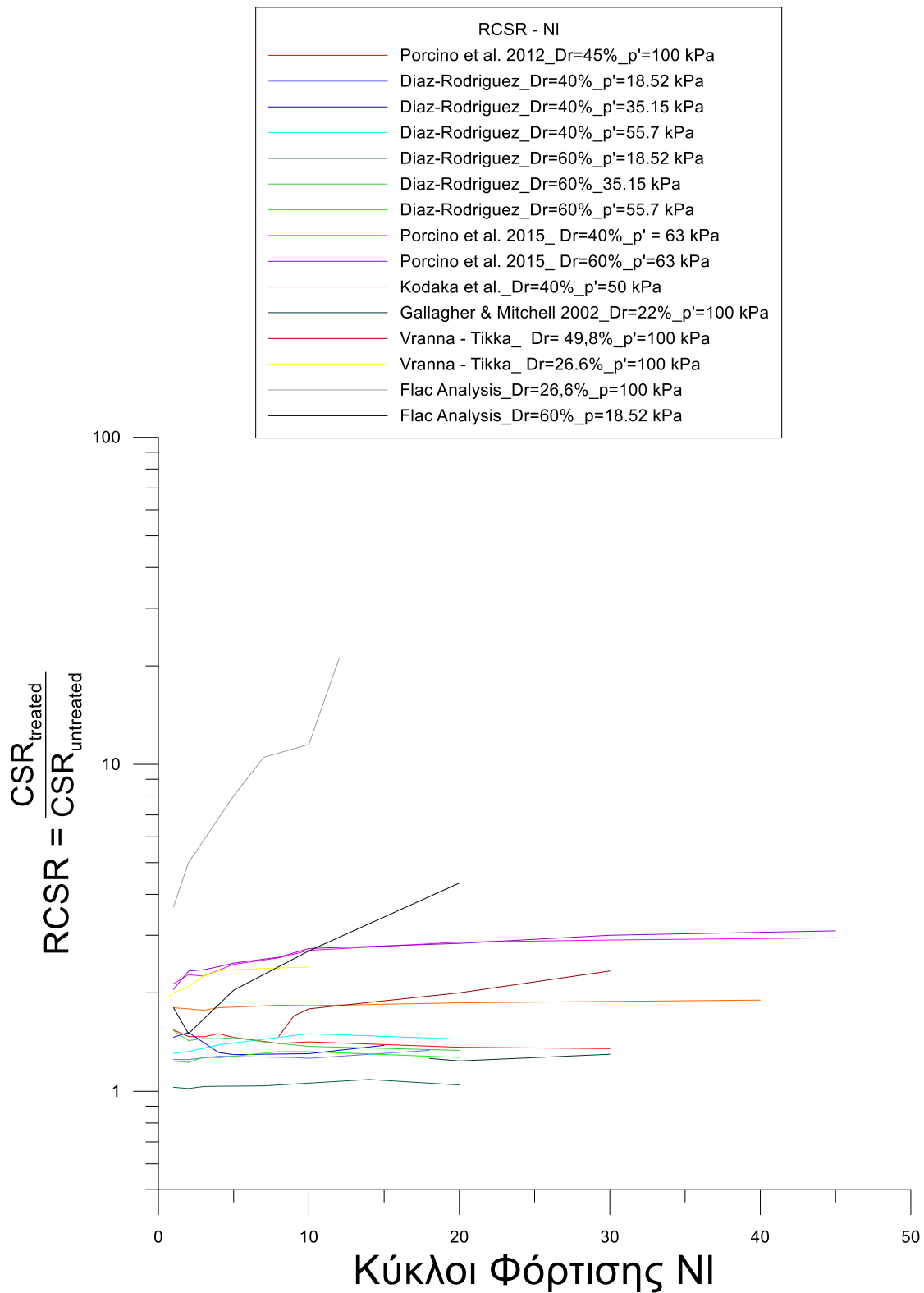
Επιπλέον αποφασίσθηκε να γίνουν προσομοιώσεις αστράγγιστων δοκιμών απλής διάτμησης με χρήση του NTUA-SAND και των παραμέτρων του για άμμο Nevada (με χρήση του FLAC), ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της αλλαγής της CSL που διερευνήθηκε ανωτέρω, στη βελτίωση της απόκρισης σε όρους ΔCSR και RCSR. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν ως αρχικές τιμές πυκνότητας και ενεργού τάσεις, οι ακραίες σχετικές τιμές από τις έξι (6) μελέτες της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα:

- Έδαφος με σχετική πυκνότητα $D_r=26,6\%$ (δηλαδή την ελάχιστη από τις μελέτες της βιβλιογραφίας) σε συνδυασμό με αρχική ενεργό τάση $p'=100$ kPa (δηλαδή την μέγιστη από τις μελέτες της βιβλιογραφίας), με στόχο τη διερεύνηση της πλέον συστολικής συμπεριφοράς.
- Έδαφος με σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$ (δηλαδή την μέγιστη από τις μελέτες της βιβλιογραφίας) σε συνδυασμό με αρχική ενεργό τάση $p'=18,52$ kPa (δηλαδή την ελάχιστη από τις μελέτες της βιβλιογραφίας).

Παρακάτω, στα Σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα βελτίωσης αντοχής σε ρευστοποίηση σε όρους ΔCSR και RCSR, αντίστοιχα, λόγω σταθεροποίησης, συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_L από τις διάφορες μελέτες της βιβλιογραφίας και τις αριθμητικές αναλύσεις.



Σχήμα 3.6 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα βελτίωσης αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους ΔCSR) λόγω σταθεροποίησης, συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N1 από τις διάφορες μελέτες της βιβλιογραφίας και τις αριθμητικές αναλύσεις



Σχήμα 3.7 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα βελτίωσης αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους RCSR) λόγω σταθεροποίησης, συναρτήσει των κύκλων φόρτισης NI από τις διάφορες μελέτες της βιβλιογραφίας και τις αριθμητικές αναλύσεις

Συμπερασματικά προκύπτουν τα κάτωθι:

- Σε όρους ΔCSR , η επίδραση της σταθεροποίησης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,01 και 0,3, αν και συνήθως δεν υπερβαίνει την τιμή 0,23.
- Σε όρους RCSR, η επίδραση της σταθεροποίησης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.0 και 2.0. με εξαίρεση τις εργασίες των Porcino et al (2012, 2015), όπου ο λόγος αυτός φθάνει οριακά το 3.0.
- Η πρόβλεψη του NTUA-SAND για την επίδραση της σταθεροποίησης είναι στο άνω όριο των πειραματικά προσδιορισθέντων τιμών του ΔCSR , και πάνω από αυτό για τις πειραματικά προσδιορισθείσες τιμές του RCSR. Ο λόγος για το δεύτερο είναι ότι το $CSR_{untreated}$ είναι σχετικά χαμηλό για την άμμο Nevada για την οποία έχει βαθμονομηθεί το NTUA-SAND, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλες τιμές για το λόγο RCSR και όχι τόσο για το ΔCSR .

Σε κάθε περίπτωση, η ως άνω βαθμονόμηση του NTUA-SAND για προσομοίωση της απόκρισης της σταθεροποιημένης άμμου Nevada κυμαίνεται στο άνω όριο επίδρασης συγκριτικά με τις πειραματικά ευρεθείσες επιδράσεις σε άλλες άμμους και είναι συνεπώς αποδεκτή προς χρήση για τα προβλήματα συνοριακών τιμών στα επόμενα Κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αριθμητική προσομοίωση μονοδιάστατης σεισμικής απόκρισης οριζόντιας σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται η ακρίβεια της αριθμητικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία εδαφών σε προβλήματα συνοριακών τιμών, με «ευφυή» χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND. Εκλέχθηκε λοιπόν για το σκοπό αυτό, όπως προαναφέρθηκε, η προσομοίωση μίας δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρησης σταθεροποιημένης επίπεδης εδαφικής στρώσης υπό διέγερση βάσης, που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (Gallagher et al, 2007). Έχοντας υπόψιν τις πειραματικές διατάξεις και τα αποτελέσματα αυτών, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, παρακάτω παρουσιάζονται αρχικά οι παραδοχές των αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν, οι προηγούμενες προσπάθειες προσομοίωσης και τέλος οι αναλύσεις που έγιναν βάσει της νέας μεθοδολογίας-προσέγγισης του προβλήματος. Η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας αριθμητικής ανάλυσης αξιολογείται μετά από σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά και με τις προηγούμενες προσπάθειες-μεθοδολογίες προσομοίωσης, με στόχο γενικά συμπεράσματα για την ακρίβειά της.

4.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρησης

Η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος φυγοκεντριστή των Gallagher et al. (2007) έγινε με το λογισμικό FLAC 7.0 (Itasca Inc.), με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND, το οποίο έχει βαθμονομηθεί κατάλληλα για άμμο Nevada (Andrianopoulos et al. 2010). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την φυσική άμμο Nevada, παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 4.1.

Nevada sand	
Πυκνότητα (Mgr/m^3)	1.52
Πορώδες	0.424
e	0.737
M_c^c	1.25
M_c^e	0.72
$(e_{cs})_a$	0.809
λ	0.022
B_0	600
ν	0.33
k_c^b	1.45
k_c^d	0.30
γ_1	0.00025
α_1	0.6
A_0	0.8
h_0	15000
n_0	40000

Πίνακας 4 1: Τιμές παραμέτρων NTUA-SAND για φυσική άμμο Nevada (Andrianopoulos et al, 2010).

Αρχικά δημιουργήθηκε κανάβος διαστάσεων 23x10m με ζώνες εμβαδού 1x1m. Η στάθμη του υδροφόρου οριζοντα ορίστηκε στο 1m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, μέσω επιβολής πίεσης πόρων ίση με 9.81kPa στην επιφάνεια, ώστε να εξασφαλιστεί ο κορεσμός του εδάφους κατά την επιβολή της σεισμικής διέγερσης (σημειώνεται εδώ πως η θεώρηση αυτή δεν αλλάζει τις ενεργές τάσεις). Οι κάτω κόμβοι του καναβου που αντιστοιχούν σε βάθος 10m δεσμεύτηκαν σε μετακίνηση κατά τον x και τον y άξονα λόγω του αμετακίνητου πυθμένα του υποδοχέα και επειδή μέσω αυτών επιβλήθηκε η διέγερση βάσης της δοκιμής. Στα πλευρικά σύνορα δεσμεύτηκαν καθ' ύψος οι ακραίοι κόμβοι του καναβου (μέθοδος tied nodes) στο ίδιο ύψος ώστε να δίνουν κοινή οριζόντια και κατακόρυφη παραμόρφωση στο ίδιο ύψος. Έτσι επετεύχθη η ορθή προσομοίωση των συνοριακών συνθήκων που επιβάλλει το εύκαμπτο δοχείο (Laminar box) του φυγοκεντρική.

Για την αριθμητική προσομοίωση του σταθεροποιημένου εδάφους χρησιμοποιήθηκε η λογική που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, δηλαδή χρησιμοποιώντας τις δύο (2) προσεγγίσεις που προαναφέρθηκαν και συγκεκριμένα:

- Τον επαναπροσδιορισμό της Critical State Line (CSL) του εδαφικού υλικού μετά τη σταθεροποίηση με προσαρμογή της βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το Κεφάλαιο 3, δηλαδή υιοθετώντας μια CSL που δίνεται από τη σχέση:

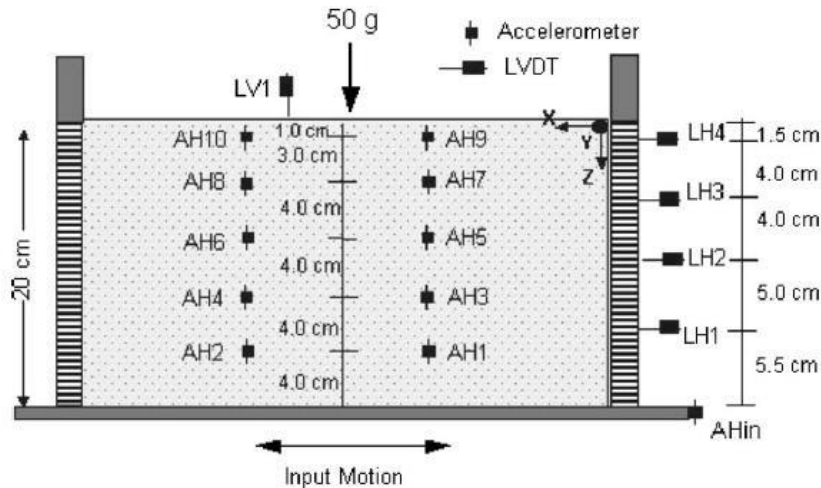
$$e_{cs} = 0.967 - 0.043 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_a}\right) \quad (4.1)$$

- Τον επαναπροσδιορισμό της CSL του εδαφικού υλικού (λόγω σταθεροποίησης, βάσει της σχέσης (4.1) σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων $K = K_w/n$.

Η τιμή της διαπερατότητας του σταθεροποιημένου εδάφους για συγκέντρωση πυριτίας CS=6% που χρησιμοποιήθηκε κατά την ανάλυση, σε όλες τις προσεγγίσεις, επιλέχθηκε με βάση τους Persoff et al. (1996) και προκύπτει ίση με $k = 10^{-9}$ m/s .

Στη βάση του καναβου επιβλήθηκε ημιτονοειδής οριζόντια διέγερση με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης ίση με 0.20g και συχνότητας 2Hz και θεωρήθηκε αρχική απόσβεση τοπικής φύσης (local damping), δηλαδή ανεξάρτητη της συχνότητας της διέγερσης, 2% για την άμμο Nevada. Επισημαίνεται ότι η χρήση του NTUA-SAND για την προσομοίωση συνεπάγεται επιπλέον υστερητική απόσβεση ανάλογα με την ένταση της διέγερσης.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, για καθεμία από τις δύο προσεγγίσεις, σε όρους εδαφικών επιταχύνσεων, λόγων υδατικών υπερπίεσεων, αλλά και καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι μετρήσεις των επιταχυνσιογράφων που βρίσκονται στην αριστερή μεριά του υποδοχέα όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.1 (AH10, AH8, AH6, AH4, AH2) με τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες επιταχύνσεων που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση στις θέσεις των μετρητών αυτών. Επίσης συγκρίνονται οι καθιζήσεις που μετρήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους από το μετρητή LV1 (βλ. Σχήμα 4.1) με τις καθιζήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση στην ίδια θέση.



Σχήμα 4.1: Διάταξη και όργανα μέτρησης στο προσομοίωμα του φυγοκεντριστή. (Gallagher 2007a)

Τέλος παρατίθενται και οι χρονοϊστορίες των λόγου υδατικών υπερπιέσεων r_u σε διάφορα βάθη μόνο από την αριθμητική προσομοίωση, καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις προς σύγκριση. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ο λόγος υπερπιέσεων πόρων r_u για τα σταθεροποιημένα εδάφη δεν έχει την ίδια φυσική σημασία με αυτήν στα φυσικά εδάφη, αφού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν έχει διερευνηθεί ακόμα μικροσκοπικά ο μηχανισμός ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων σε σταθεροποιημένα εδάφη. Έτσι ο λόγος που παρουσιάζονται αυτές οι εκτιμήσεις r_u είναι η κατανόηση των μηχανισμών της προσομοίωσης σε όρους επιταχύνσεων και καθιζήσεων.

Σημειώνεται εδώ, ότι τα αποτελέσματα συγκρίνονται πάντα με την προηγούμενη βέλτιστη προσέγγιση που έχει προκύψει από τη διπλωματική εργασία των Πανάγου-Σιάμπου (2015) και τη διδακτορική διατριβή της Αγαπουλάκη (2017), δηλαδή:

(α) τη διατήρηση της CSL όπως προκύπτει για τη φυσική άμμο, που δίνεται από:

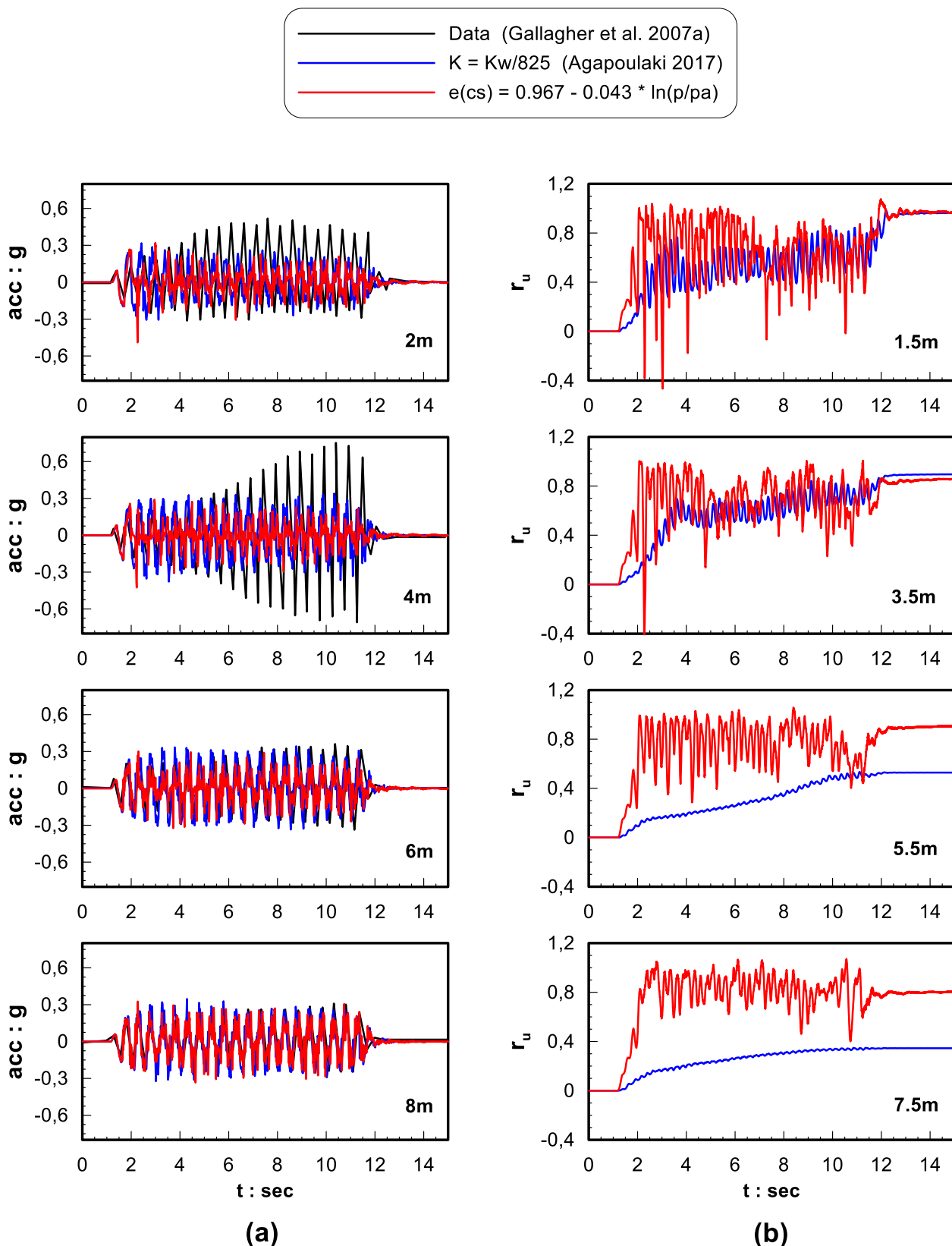
$$e_{cs} = 0.809 - 0.022 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_a}\right) \quad (4.2)$$

(β) τη σημαντική μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων $K = K_w/n$, όπου:

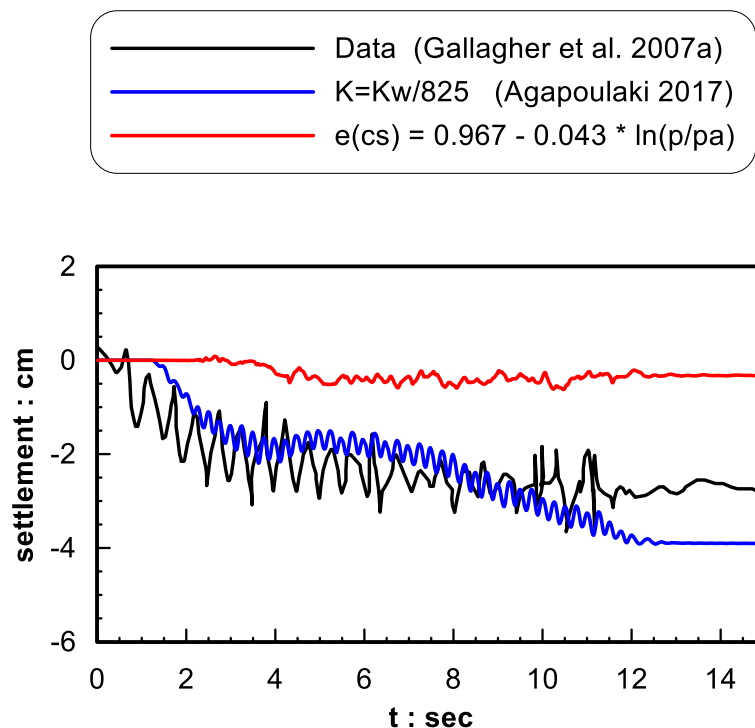
$$n = 100 * [2.25 + CS(\%)] \quad (4.3)$$

4.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL)

Στην παράγραφο αυτή διερευνάται η ακρίβεια της προσομοίωσης της σταθεροποίησης μέσω επαναπροσδιορισμού της Critical State Line του σταθεροποιημένου εδάφους, και μόνον. Για το σκοπό αυτό, παρακάτω παρατίθενται τα γραφήματα σύγκρισης των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων και υπερπιέσεων πόρων του πειράματος και των αριθμητικών προβλέψεων που προέκυψαν από την πρώτη προσέγγιση δηλαδή τον επαναπροσδιορισμό της CSL του σταθεροποιημένου εδάφους (Σχήμα 4.2). Ακολουθούν τα συγκριτικά γραφήματα των καθιζήσεων που προκύπτουν από το πείραμα και τις αριθμητικές αναλύσεις, πάλι για την πρώτη προσέγγιση (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.2: (α) Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/825$ (Agaroulaki 2017) και για την επαναπροσδιορισθείσα CSL. (β) Οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων r_u όπως προέκυψαν από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις σε διάφορα βάθη.



Σχήμα 4.3: Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/825$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL.

Από το **Σχήμα 4.2** προκύπτει ότι η νέα προσέγγιση είναι ποιοτικώς ορθή, αλλά οδηγεί σε λίγο μικρότερες επιταχύνσεις πλησίον της επιφάνειας συγκριτικά με την βέλτιστη υπάρχουσα, και αυτό οφείλεται στις μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων και τη ρευστοποίηση ($r_u = 1$) που δεν αποφεύγεται με τη νέα προσέγγιση. Επιπλέον, από το **Σχήμα 4.3** προκύπτει ότι η βέλτιστη υπάρχουσα προσέγγιση προβλέπει ικανοποιητικά τις μικρές καθιζήσεις του πειράματος, αντίθετα με τη νέα προσέγγιση που οδηγεί σε μηδενικές καθιζήσεις. Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα αυτά η νέα προσέγγιση, καίτοι ποιοτικώς ορθή, ποσοτικώς υπολείπεται της βέλτιστης υπάρχουσας σε ακρίβεια.

4.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων.

Η δεύτερη προσομοίωση της σταθεροποίησης είναι ο συνδυασμός των δύο μεθοδολογιών, Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) του σταθεροποιημένου εδάφους σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση της συμπίεστότητας του υγρού των πόρων.

Στην διδακτορική διατριβή της Αγαπουλάκη (2017) αλλά και στην διπλωματική εργασία των Πανάγου – Σιάμπου (2015), στα πλαίσια της διερεύνησης της επίδρασης της μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων, προτάθηκε η εμπειρική σχέση 4.3 που συνδέει το μέτρο συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων, με το ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας κατά βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Η σχέση αυτή προέκυψε μέσω δοκιμαστικών προβλέψεων και αναλύσεων (trial and error) επί των πειραμάτων των Gallagher et al. (2007) και Conlee et al. (2012).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πάλι μέσω δοκιμαστικών προβλέψεων και αναλύσεων (trial and error) και επί του πειράματος των Gallagher et al. (2007) και το μετέπειτα εξεταζόμενο πείραμα των Conlee et al. (2012), σε συνδυασμό με τον επαναπροσδιορισμό της CSL του σταθεροποιημένου εδάφους (σχέση 4.1), η σχέση αυτή επικαιροποιήθηκε. Προέκυψε επομένως η εξής σχέση για τον διαιρέτη n :

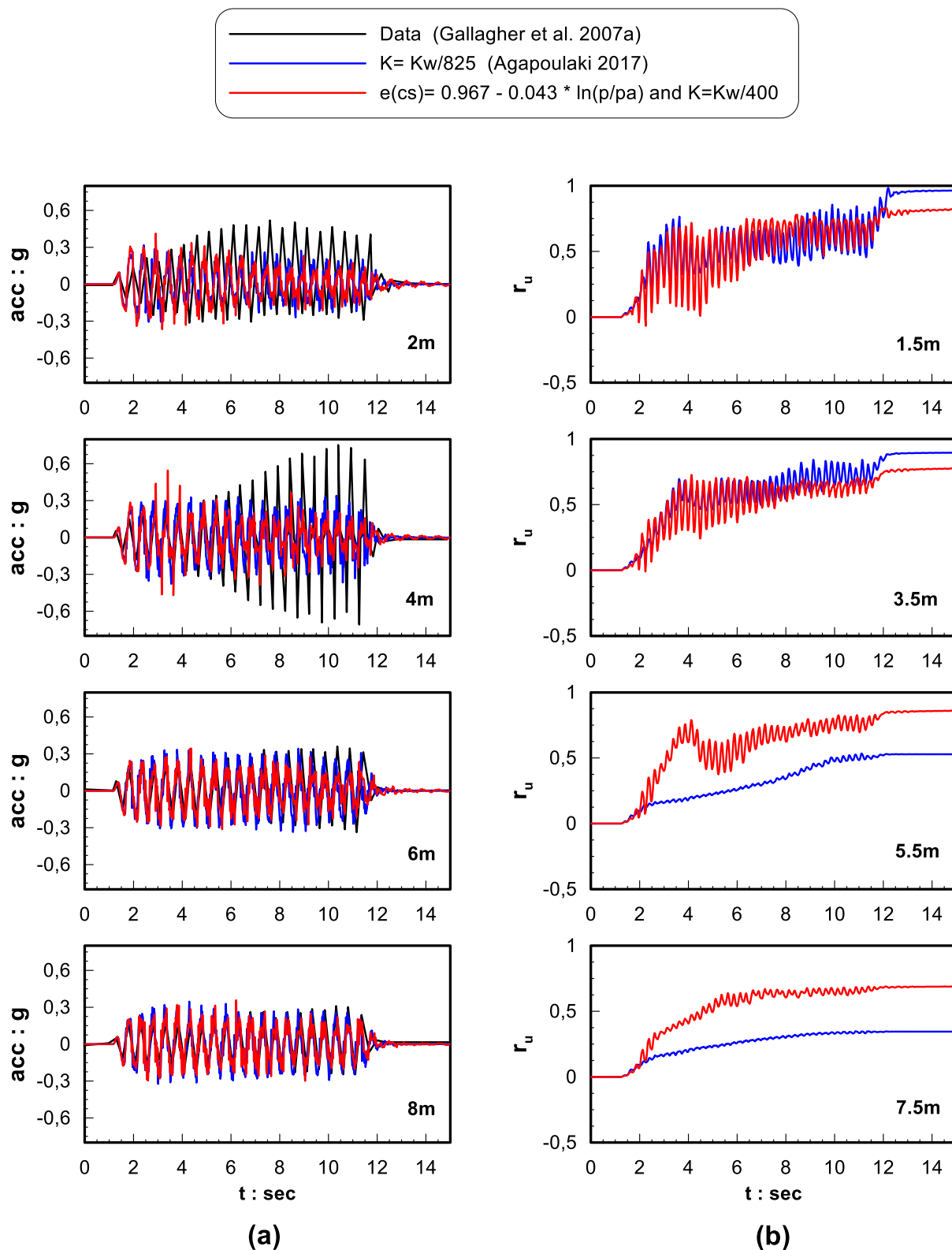
$$n = \frac{2}{3} \cdot CS(\%) \cdot 100 \quad (4.4)$$

Η επικαιροποιημένη σχέση φαίνεται να έχει καλύτερο φυσικό νόημα, καθώς ο παρονομαστής δεν έχει σταθερό όρο, η ύπαρξη του οποίου στην εργασία της Agaroulaki (2017) μπορεί να αποδοθεί στην ανάγκη επαναπροσδιορισμού της CSL που αφορά στον εδαφικό σκελετό.

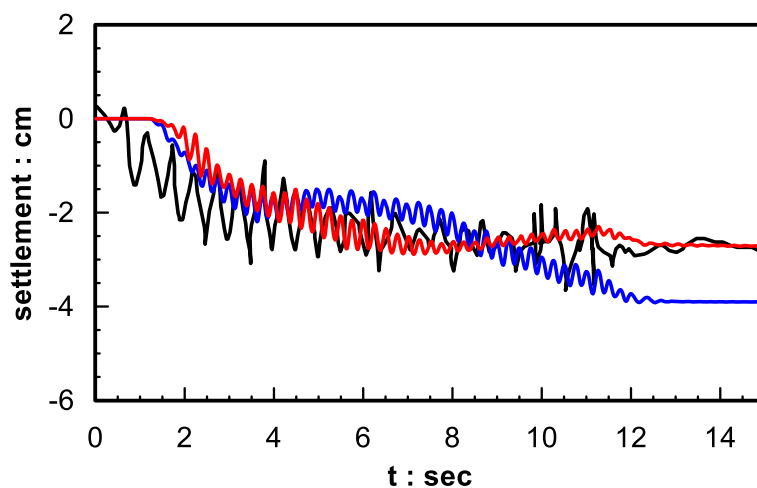
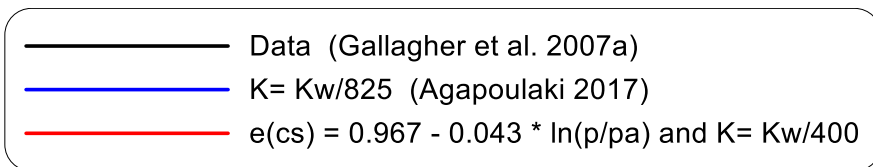
Για την τιμή της συγκέντρωσης κολλοειδούς πυριτίας $CS = 6\%$ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα της Gallagher (2007), προκύπτει από την ανωτέρω σχέση η τιμή 400 για τον διαιρέτη του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων K_w , έναντι της τιμή 825 που προκύπτει με βάση την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση (σχέση 4.1).

Παρουσιάζονται στη συνέχεια τα γραφήματα σύγκρισης των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων και λόγου υπερπιέσεων πόρων του πειράματος και των αριθμητικών προβλέψεων (Σχήμα 4.4), ακολουθούμενα από τα αντίστοιχα γραφήματα των καθιζήσεων, όπως προέκυψαν από την δεύτερη προσέγγιση (Σχήμα 4.5). Όπως και στην παράγραφο 4.3, τα γραφήματα αυτά συμπεριλαμβάνουν τις αριθμητικές προβλέψεις με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση της σταθεροποίησης (Agaroulaki 2017), χάριν σύγκρισης.

Από το Σχήμα 4.4 προκύπτει ότι η νέα προσέγγιση είναι αναμενόμενα ποιοτικώς ορθή, και οδηγεί σε λίγο μεγαλύτερες επιταχύνσεις πλησίον της επιφάνειας συγκριτικά με την βέλτιστη υπάρχουσα προσομοίωση. Αυτή η αύξηση είναι υπέρ της ακρίβειας, καθώς προσεγγίζει σχετικώς καλύτερα τις ενισχύσεις της επιτάχυνσης που έχει υποδείξει το πείραμα της Gallagher et al. (2007). Αυτές οι μεγαλύτερες επιταχύνσεις αποδίδονται στις μικρότερες υπερπιέσεις πόρων και τη σαφέστερη αποφυγή της ρευστοποίησης ($r_u \ll 1$) που προβλέπει η νέα προσέγγιση πλησίον της επιφάνειας. Επιπλέον, από το Σχήμα 4.5 προκύπτει ότι η νέα προσέγγιση δίνει παρόμοιες προβλέψεις με τη βέλτιστη υπάρχουσα, δηλαδή καλή εκτίμηση των μικρών καθιζήσεων που προέκυψαν και από το πείραμα, με τη νέα προσέγγιση να κρίνεται ως ελαφρώς καλύτερη της βέλτιστης υπάρχουσας. Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα αυτά η νέα προσέγγιση είναι ποιοτικώς ορθή και οδηγεί σε ελαφρώς ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη της Agaroulaki (2017).



Σχήμα 4.4: (α) Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/825$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων ($K=K_w/400$), (β) Οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπείσεων πόρων r_u , όπως προέκυψαν από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις σε διάφορα βάθη.



Σχήμα 4.5: Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα (Gallagher 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/825$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= Kw/400$)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό μικρή κλίση

5.1 Εισαγωγή

Πέραν της αριθμητικής προσομοίωσης της μονοδιάστατης σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένων εδαφών, η οποία παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται περαιτέρω η ευφυής χρήση του NTUA-SAND για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό μικρή κλίση δηλαδή ένα δισδιάστατο πρόβλημα. Για το σκοπό αυτό, παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μια σειρά από δοκιμές φυγοκέντρησης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό μικρή κλίση των Conlee et al, 2012. Έτσι η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία προσομοίωσης διερευνάται και αξιολογείται ακόμα καλύτερα και αποκτά στέρεες βάσεις και αξιοπιστία. Συνεπώς στη παράγραφο 5.2, παρουσιάζονται παρουσιάζονται οι παραδοχές των αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν με στόχο την προσομοίωση των εν λόγω δοκιμών φυγοκεντριστή. Η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας αριθμητικής ανάλυσης αξιολογείται μετά από σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά και με τις προηγούμενες προσπάθειες προσομοίωσης στην παράγραφο 5.3, ενώ στην παράγραφο 5.4 μελετάται και ο συνδυασμός των μεθοδολογιών μετάθεσης της CSL και μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας K .

5.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρησης CTC01

Για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος CTC01 της Conlee et al (2012) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FLAC (Itasca Inc. 2005). Συγκεκριμένα από τις διάφορες σεισμικές διεγέρσεις που επιβλήθηκαν επιλέχθηκε η προσομοίωση του Shake 3 και του Shake 4. Ο κάρναβος που επιλέχθηκε, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1, και έχει συνολικό μήκος 24.75m (στο πρωτότυπο), το μέγιστο ύψος του καννάβου είναι 6.73m και αποτελείται από 676 στοιχεία μεταβλητού εμβαδού προκειμένου να προσομοιωθεί επιτυχώς η γεωμετρία του προσομοιώματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1 (συμμετρικά πρηνή κλίσης 3°). Οι συγκεκριμένες διαστάσεις επιλέχθηκαν ως βέλτιστη προσέγγιση, καθώς στη βιβλιογραφία υπάρχουν μικροδιαφορές στη γεωμετρία του μοντέλου όπως αυτή παρουσιάζεται στα Conlee (2010), Conlee et al (2012). Το αριστερό τμήμα του καννάβου αντιπροσωπεύει το σταθεροποιημένο πρηνές, ενώ το συμμετρικό δεξί τμήμα το φυσικό πρηνές. Η στρωματογραφία του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Τα στοιχεία του καννάβου χωρίζονται σε 5 ομάδες (groups) με διαφορετικές ιδιότητες. Τα κατώτερα 0.81m αντιστοιχούν στην πυκνή άμμο Monterey, η οποία απεικονίζεται με ροζ χρώμα για το σταθεροποιημένο και κίτρινο για το φυσικό πρηνές, τα επόμενα 4.92m αντιστοιχούν στην ενδιάμεση στρώση άμμου Nevada (κόκκινο και πράσινο, αντίστοιχα) και το ανώτερο 1m αντιπροσωπεύει την επιφανειακή στρώση Yolo loam που είναι ίδια και στα δύο πρηνή (μωβ). Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή του καναλιού ορίστηκε στην ελεύθερη επιφάνεια της άμμου Nevada, ενώ παράλληλα εξασφαλίστηκε ο κορεσμός των δύο αμμωδών στρώσεων του φυσικού πρηνούς.

Ως συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν κατακόρυφες κυλίσεις στα κατακόρυφα σύνορα, ώστε να επιτρέπονται οι καθιζήσεις και αρθρώσεις στους κάτω κόμβους για τη στατική ισορροπία. Η μεμβράνη που βρίσκεται στο μέσο του προσομοιώματος προσομοιώθηκε με στοιχείο δοκού (beam) μηδενικού πάχους και η διεπιφάνεια της ορίστηκε έτσι ώστε να είναι αδιαπέρατη και να επιτρέπει την αλληλεπίδραση των δύο πρηνών, αλλά όχι τη σχετική ολίσθηση του ενός στο άλλο. Στη συνέχεια, οι ακραίοι δεξιοί κόμβοι συνδέθηκαν καθ' ύψος με τους αντίστοιχους ακραίους αριστερούς (tied nodes) με στοιχεία cables που δεν παραμορφώνονται αξονικά, ώστε να επιβληθεί στους κόμβους αυτούς κοινή μετακίνηση κατά x προκειμένου να προσομοιωθούν κατάλληλα οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλει το εύκαμπτο δοχείο.

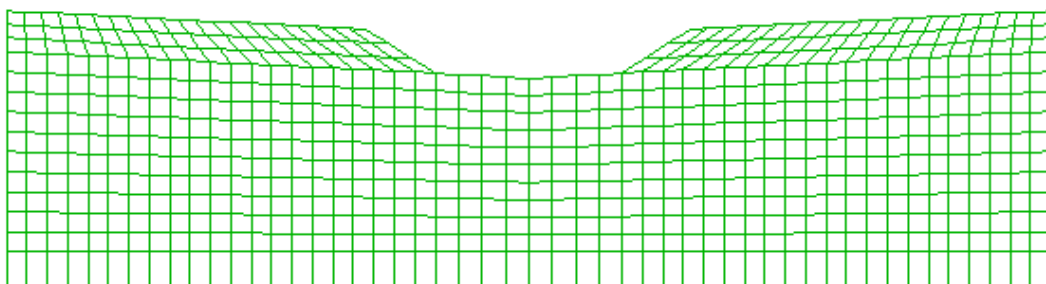
Ακολούθως υιοθετήθηκε προς χρήση το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND και για την πυκνή και για τη χαλαρή άμμο, με τις τιμές των σταθερών που εμφανίζονται στον Πίνακα 4.1, καθώς θεωρείται ότι έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει και τη σεισμική απόκριση της πυκνής άμμου Monterey που βρίσκεται στη βάση των δύο πρανών, διαφοροποιώντας τις τιμές της πυκνότητας και του πορώδους (ή του δείκτη πόρων) από αυτές της άμμου Nevada. Αυτή η παραδοχή γίνεται ελλείψει βαθμονόμησης για την άμμο Monterey ειδικώς, και βασίζεται στη δυνατότητα του NTUA-SAND να προσομοιώνει τις αλλαγές στη συμπεριφορά μιας άμμου με απλή αλλαγή του δείκτη πόρων. Για την προσομοίωση της επιφανειακής στρώσης Yolo loam χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, οι σταθερές του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Για την αριθμητική προσομοίωση του σταθεροποιημένου εδάφους (αριστερό πρανές) χρησιμοποιήθηκε η λογική που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, δηλαδή χρησιμοποιώντας τις δύο (2) προσεγγίσεις που προαναφέρθηκαν και συγκεκριμένα:

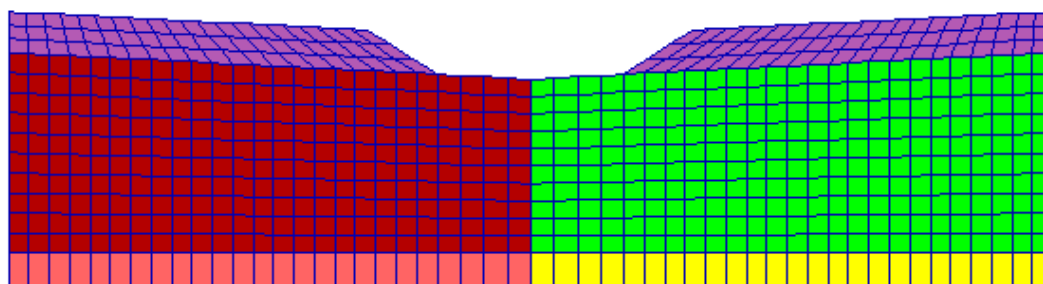
- Τον επαναπροσδιορισμό της Critical State Line (CSL) του εδαφικού υλικού μετά τη σταθεροποίηση με προσαρμογή της βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το Κεφάλαιο 3, δηλαδή υιοθετώντας μια CSL που δίνεται από τη σχέση 4.1.
- Τον επαναπροσδιορισμό της CSL του εδαφικού υλικού (λόγω σταθεροποίησης, με βάση τη σχέση 4.1) σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων $K = K_w/n$.

Σύμφωνα με τους Persoff et al (1996) η διαπερατότητα του σταθεροποιημένου εδάφους για συγκέντρωση πυριτίας $CS(\%)=9$ προκύπτει ίση με $3 \cdot 10^{-10}$ m/s. Για τα φυσικά αμμώδη εδάφη θεωρήθηκε ίση με $2.94 \cdot 10^{-6}$ m/s, ενώ για το Yolo loam η τιμή ήταν $1.97 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Τέλος, στη βάση του καννάβου επιβλήθηκε ημιτονοειδής διέγερση με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης ίση με 0.10g και συχνότητας 2Hz, που αντιστοιχεί στη τρίτη διέγερση της ακολουθίας (Shake 3) που θα μελετηθεί στις παραγράφους 5.3 και 5.4, ενώ επιβλήθηκε διέγερση εντάσεως 0,19g και συχνότητας 2Hz που αντιστοιχεί στην τέταρτη διέγερση της ακολουθίας (Shake 4) και θα μελετηθεί στην παράγραφο 5.5. Επιπλέον εισήχθη αρχική απόσβεση τοπικής φύσης (local), δηλαδή ανεξάρτητη της συχνότητας της διέγερσης, 2% για τα μη συνεκτικά εδάφη και 10% για την επιφανειακή στρώση (Yolo loam) και στα δύο πρανή.



Σχήμα 5.1: Κανάβθος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα FLAC 2D για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος CTC01 των Conlee et al (2012).



Σχήμα 5.2: Η στρωματογραφία του καννάβου, μωβ: η επιφανειακή στρώση Yolo loam, κόκκινο: η ενδιάμεση στρώση άμμου Nevada, ροζ: η κατώτερη στρώση άμμου Monterey στο σταθεροποιημένο αριστερό πρανές και στο φυσικό δεξί πρανές μωβ: η επιφανειακή στρώση Yolo loam, πράσινο: η ενδιάμεση στρώση άμμου Nevada, κίτρινο: η κατώτερη στρώση άμμου Monterey.

Μέτρο ισότροπης συμπίεσης (KPa)	18000
Μέτρο διάτμησης (KPa)	8300
Ξηρή πυκνότητα (Mgr/m ³)	1.90
Πορώδες	0.30
Συνοχή (KPa)	10
Γωνία τριβής	0°

Πίνακας 5.1: Τιμές των σταθερών του Mohr-Coulomb για τη στρώση Yolo loam

Στη συνέχεια του παρόντος Κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που έγιναν για τις 2 προσομοιώσεις της σταθεροποίησης σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις, κατ' αντιστοιχία με το Κεφάλαιο 4. Τα πειραματικά δεδομένα που παρατίθενται στα ακόλουθα σχήματα προέκυψαν για τη CTC01 (βλ. Σχήμα 5.2) από τις μετρήσεις:

- των επιταχυνσιογράφων του σταθεροποιημένου αριστερού πρανούς T21, T4, T1 και C49 σε βάθη από την επιφάνεια $z=0.6\text{m}$, $z=3.5$, $z=5.7$ και στη βάση του πρανούς αντίστοιχα
- των επιταχυνσιογράφων U45, U28, U25 και U49 που βρίσκονται στο φυσικό δεξί πρανές σε βάθη από την επιφάνεια $z=0.5\text{m}$, $z=3.4$, $z=5.5$ και στη βάση του πρανούς αντίστοιχα
- οι καθιζήσεις από τους μετρητές VT1, VT3 για το σταθεροποιημένο πρανές, ενώ για το φυσικό από τους VU1, VU3.
- οι οριζόντιες μετατοπίσεις για το σταθεροποιημένο πρανές από τους μετρητές HT1, HT3 που βρίσκονται στην επιφάνεια του σταθεροποιημένου εδάφους σε αντίστοιχες αποστάσεις $x=10.8\text{m}$ και $x=4.8\text{m}$ από τη μεμβράνη (άξων συμμετρίας του προσομοιώματος). Για το φυσικό πρανές χρησιμοποιήθηκαν οι μετρητές HU1, HU3 (οριζόντιες μετατοπίσεις) σε αποστάσεις $x=10.4\text{m}$ και $x=4.4\text{m}$ από τη μεμβράνη.

Πέραν των ανωτέρω, παρατίθενται και οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u και για τα δύο πρανή σε διάφορα βάθη (z) από την επιφάνεια και σε διαφορετικές οριζόντιες αποστάσεις από τη μεμβράνη (x), έτσι όπως προέκυψαν από το πείραμα CTC01 και τις αναλύσεις. Υπογραμμίζεται ότι οι εν λόγω συγκρίσεις έχουν μικρότερη βαρύτητα, δεδομένης της χρήσης μετρητών φτιαγμένων για υγρό πόρων με ιξώδες 1cP (νερό). Επισημαίνεται ότι η επιλογή των προαναφερθέντων μετρητών έγινε με στόχο να αποδοθεί μία πλήρης εικόνα της απόκρισης των δύο πρανών, αποφεύγοντας λαθεμένες μετρήσεις ή μετατοπισμένα όργανα που εντοπίζονται από τους ίδιους τους εκτελεστές των δοκιμών (βλ. Conlee 2010, Conlee et al 2012).

Σημειώνεται εδώ, ότι τα αποτελέσματα συγκρίνονται πάντα με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση που έχει προκύψει από τη διπλωματική εργασία των Πανάγου-Σιάμπου (2015) και τη διδακτορική διατριβή της Αγαπουλάκη (2017), δηλαδή:

(α) τη διατήρηση της CSL όπως προκύπτει για τη φυσική άμμο (σχέση 4.2),

(β) τη σημαντική μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων $K = K_w/n$, με βάση τη σχέση 4.3.

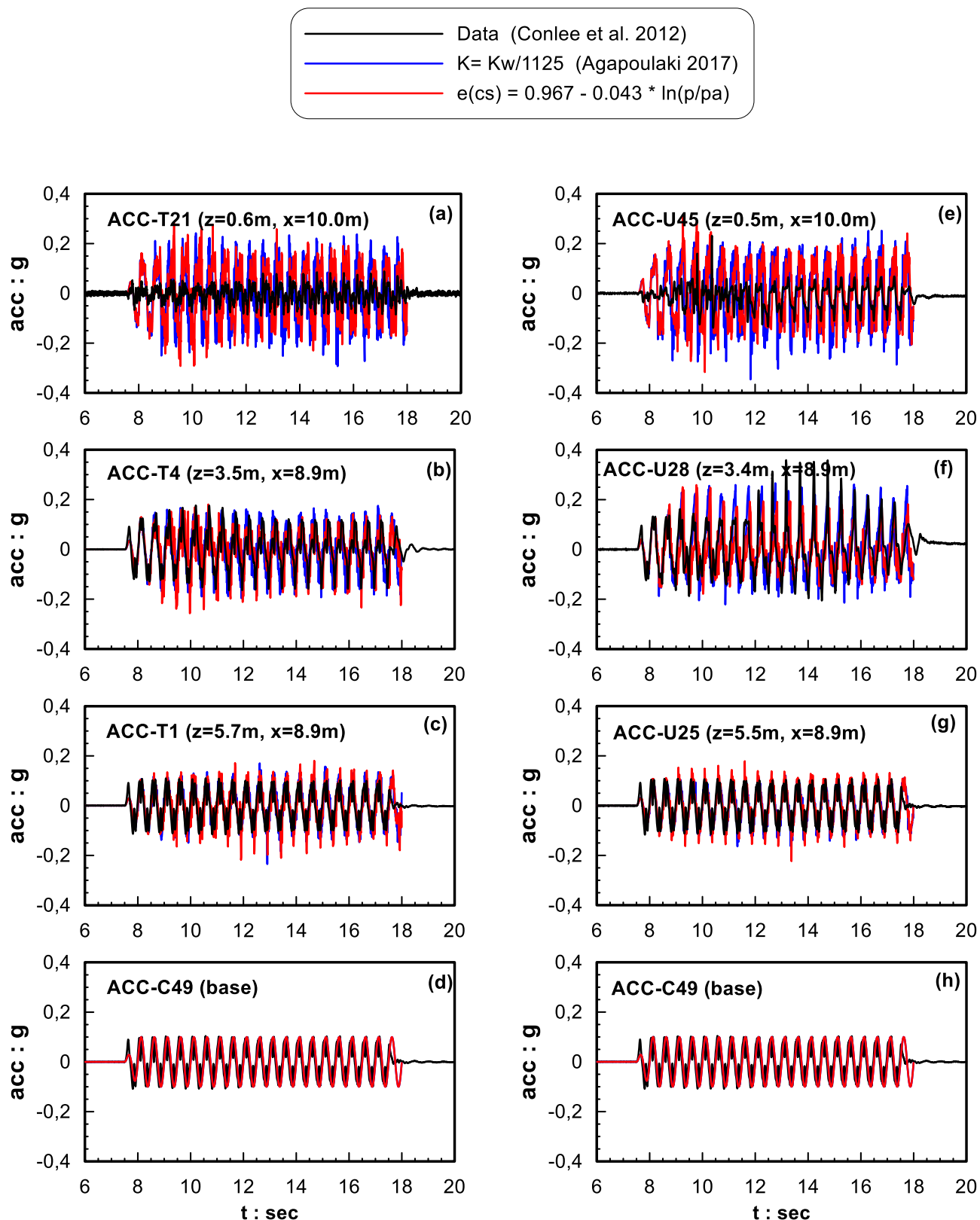
5.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL για τη δοκιμή CTC01 - Shake 3.

Αρχικά, στο Σχήμα 5.3, παρουσιάζονται τα γραφήματα σύγκρισης των χρονοϊστοριών του πειράματος και των αριθμητικών αναλύσεων που προέκυψαν από την μέχρι τώρα βέλτιστη αριθμητική προσέγγιση (Αγαπουλάκη 2017) και από την πρώτη προτεινόμενη μεθοδολογία, δηλαδή τον επαναπροσδιορισμό της Critical State Line του σταθεροποιημένου εδάφους. Ακολουθούν τα συγκριτικά γραφήματα των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων (Σχήμα 5.4) και τέλος τα γραφήματα των λόγων υπερπιέσεων πόρων r_u που προκύπτουν από τα δεδομένα του πειράματος και τις αριθμητικές αναλύσεις (Σχήμα 5.5).

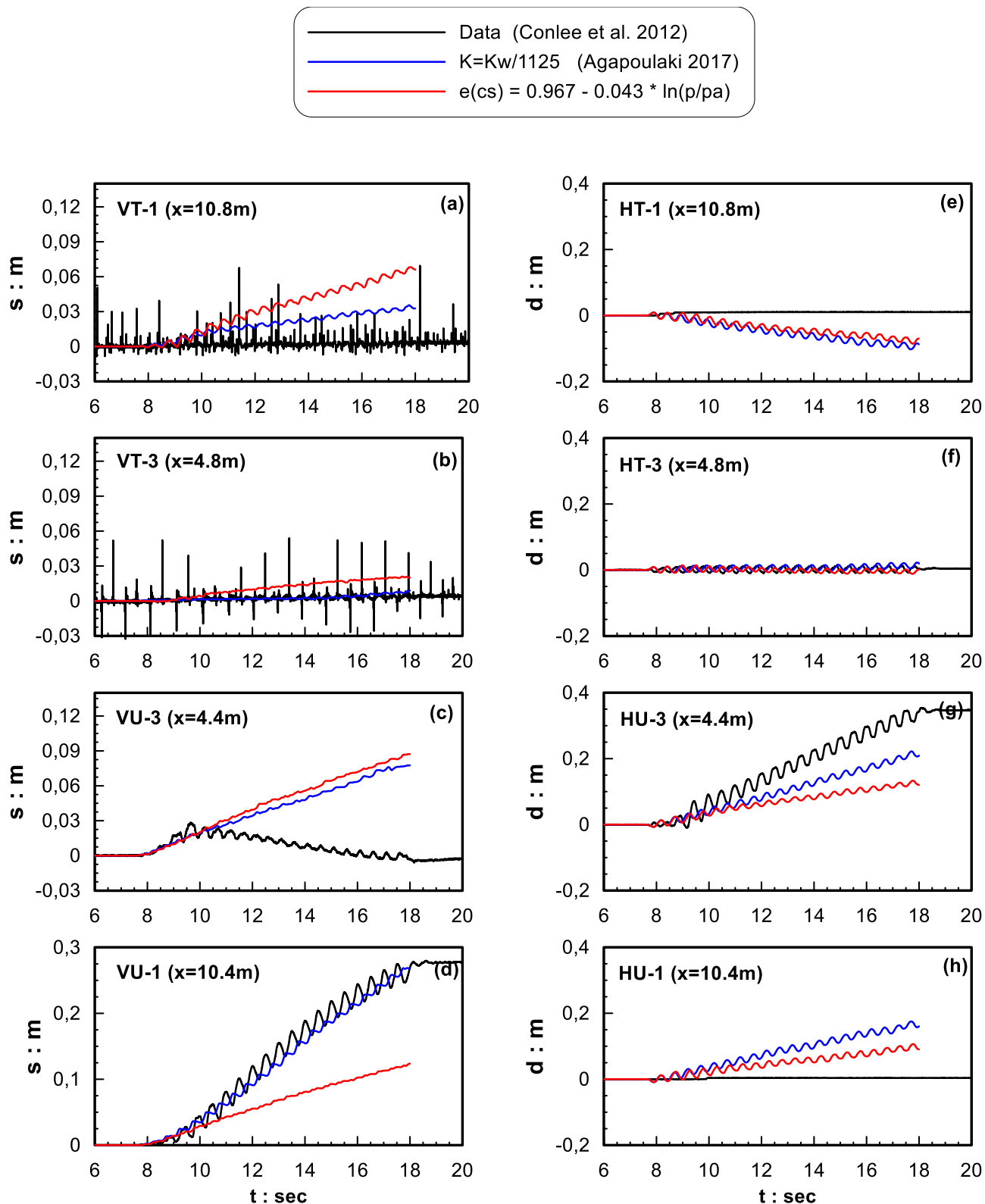
Από το Σχήμα 5.3 προκύπτει ότι η νέα προσέγγιση είναι ποιοτικώς ορθή, και οδηγεί σε λίγο μικρότερες επιταχύνσεις ειδικά πλησίον της επιφάνειας συγκριτικά με την βέλτιστη υπάρχουσα προσομοίωση. Αυτή η μείωση είναι υπέρ της ακριβείας στα πολύ μικρά βάθη ($z=0.5m$, μέσα στη στρώση Yolo loam), αλλά γενικότερα δεν είναι υπέρ της ακριβείας εντός των στρώσεων της άμμου (σε μεγαλύτερα βάθη), τόσο στο σταθεροποιημένο όσο και στο φυσικό πρανές, δεδομένου ότι οι επιταχύνσεις είναι λίγο μεγαλύτερες στις μετρήσεις της Conlee et al. (2012). Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι διαφορές μετρήσεων-προβλέψεων στις επιταχύνσεις είναι σχετικώς μικρές, με εξαίρεση τα πολύ μικρά βάθη, όπου οι διαφοροποιήσεις θα πρέπει να οφείλονται και στον σχετικώς απλοϊκό τρόπο προσομοίωσης του Yolo loam (με Mohr-Coulomb, χωρίς να υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα).

Αυτό δεν ισχύει για τις μετατοπίσεις στο Σχήμα 5.4, όπου οι διαφορές μετρήσεων-προβλέψεων είναι μεγαλύτερες. Συγκριτικά, η νέα προσέγγιση δίνει μεγαλύτερες καθιζήσεις στο σταθεροποιημένο πρανές (VT-1, VT3) απ' ό,τι δίνει η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση, και αυτό δεν είναι υπέρ της ακριβείας. Στις οριζόντιες μετατοπίσεις του σταθεροποιημένου πρανούς (HT1, HT3), οι δύο προσεγγίσεις είναι συγκρίσιμες. Όμως λόγω της αλληλεπίδρασης των 2 πρανών, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις προβλέψεις μετατοπίσεων και στο φυσικό πρανές, όπου η νέα προσέγγιση υποεκτιμά τις μετρήσεις (π.χ. VU1, HU3). Τέλος, σε ό,τι αφορά στις υπερπιέσεις πόρων, οι 2 προσεγγίσεις δίνουν συγκρίσιμες τιμές στο φυσικό πρανές, ενώ η νέα προσέγγιση δίνει μεγαλύτερες υπερπιέσεις στο σταθεροποιημένο πρανές, ακόμη και ρευστοποίηση ($r_u = 1$).

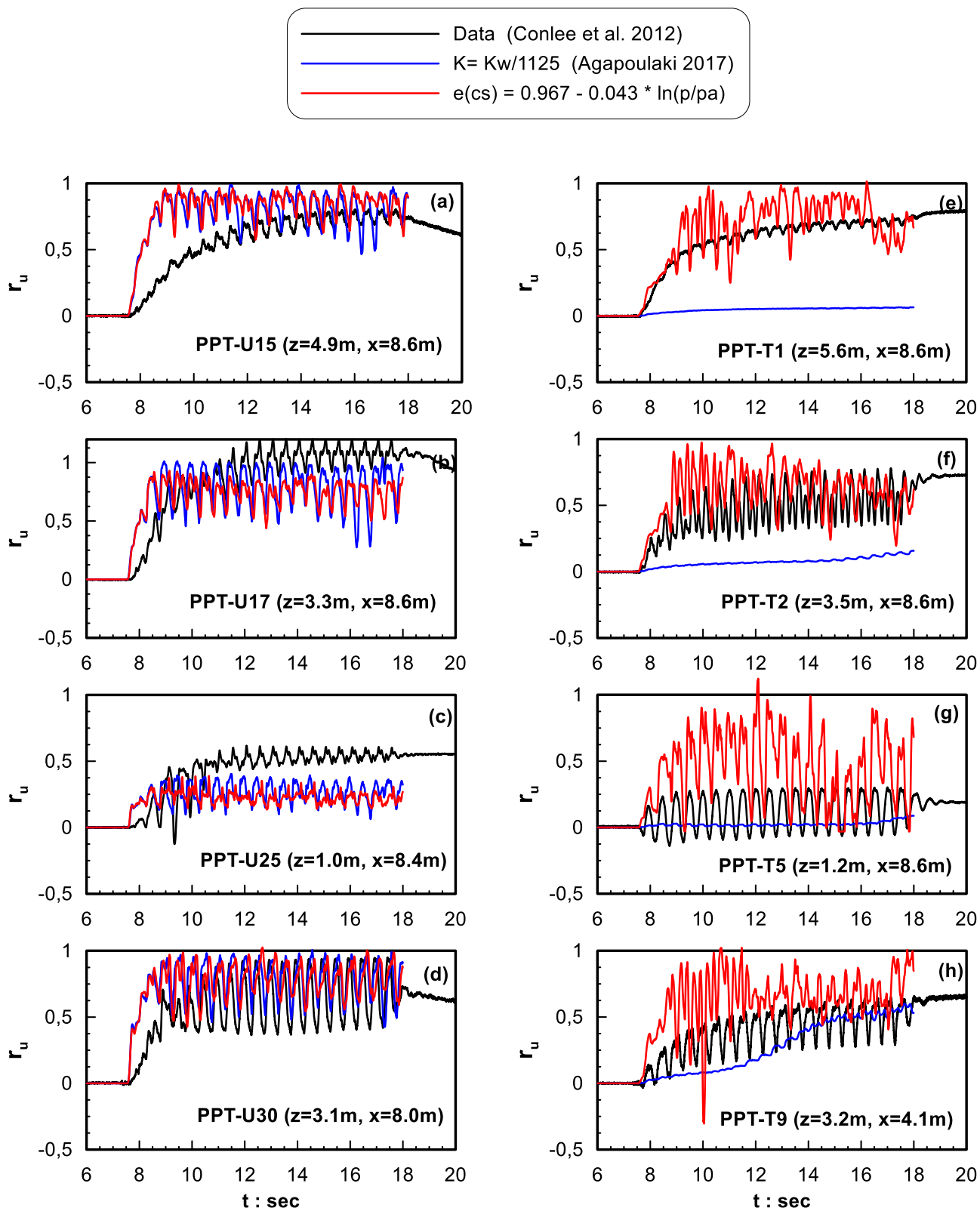
Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα αυτά η νέα προσέγγιση είναι ποιοτικώς ορθή αλλά δεν οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη της Agaroulaki (2017).



Σχήμα 5.3: Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη στο πείραμα CTC01 – Shake3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση των χρονιοστοριών καθιζήσεων (a έως d) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (e έως h) όπως μετρήθηκαν στο πείραμα CTC01 – Shake 3 (Conlee et al 2012) στην επιφάνεια του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση των χρονιοιστοριών του λόγου υπερπείσεων πόρων r_u όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z και σε αποστάσεις x από τη μεμβράνη στο πείραμα CTC01 – Shake 3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL.

5.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων για το πείραμα CTC01-Shake 3.

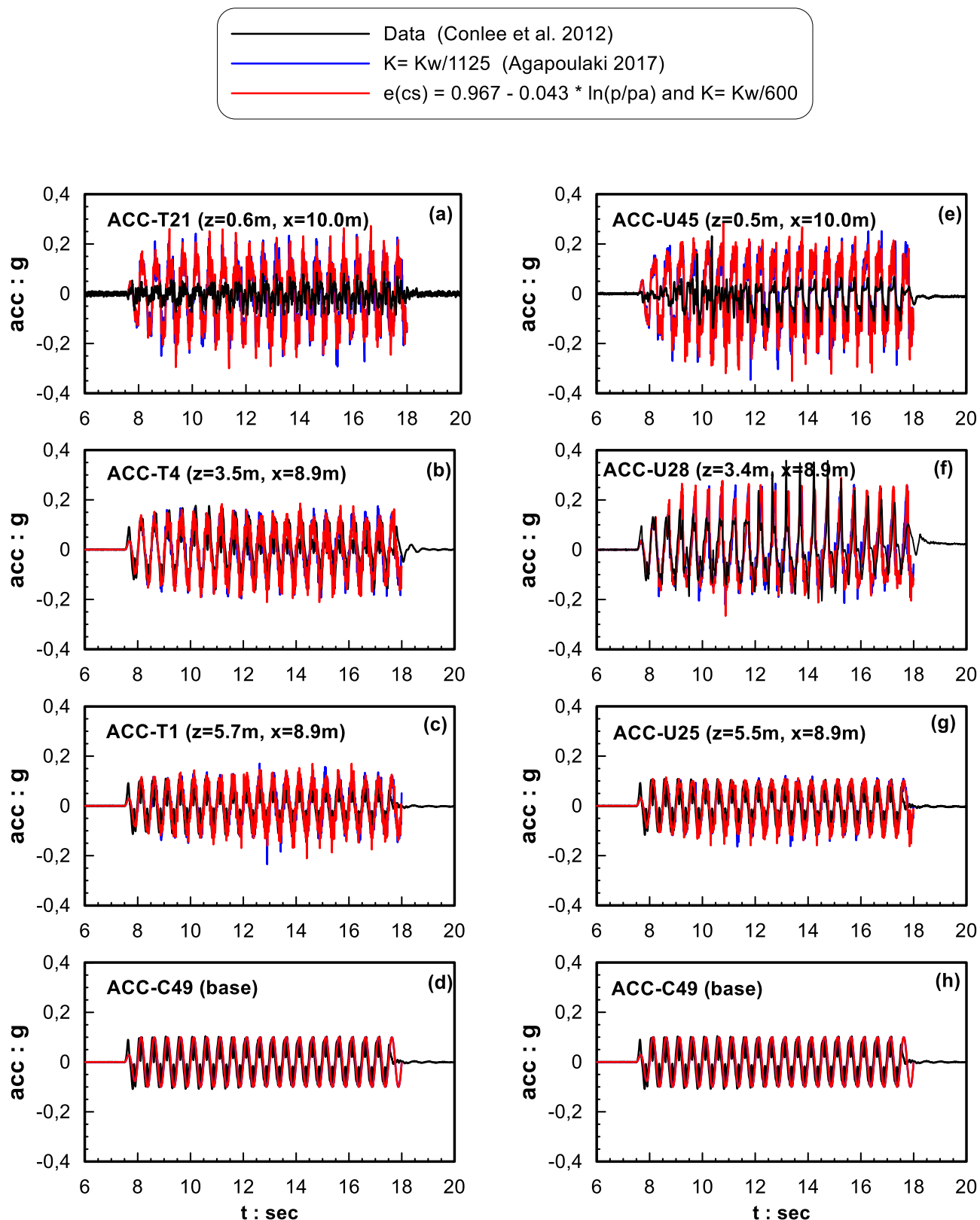
Όπως και στο Κεφάλαιο 4, η δεύτερη προσομοίωση της σταθεροποίησης είναι ο συνδυασμός των δύο μεθοδολογιών, δηλαδή του επαναπροσδιορισμού της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) του σταθεροποιημένου εδάφους σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση της συμπίεστότητας του υγρού των πόρων. Για την εν λόγω ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων K_w , για την τιμή της συγκέντρωσης κολλοειδούς πυριτίας $CS(\%) = 9$ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα των Conlee et al. (2012), προκύπτει από την σχέση 4.4 η τιμή 600 για τον διαιρέτη του K_w .

Έτσι, στο Σχήμα 5.6, παρουσιάζονται τα γραφήματα σύγκρισης των χρονοϊστοριών του πειράματος και των αριθμητικών αναλύσεων που προέκυψαν από την μέχρι τώρα βέλτιστη αριθμητική προσέγγιση (Αγαπουλάκη 2017) και από τη δεύτερη προτεινόμενη μεθοδολογία, δηλαδή τον επαναπροσδιορισμό της Critical State Line του σταθεροποιημένου εδάφους σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού πόρων. Ακολουθούν τα συγκριτικά γραφήματα των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων (Σχήμα 5.7) και τέλος τα γραφήματα των λόγων υπερπιέσεων πόρων r_u που προκύπτουν από τα δεδομένα του πειράματος και τις 2 αριθμητικές αναλύσεις (Σχήμα 5.8).

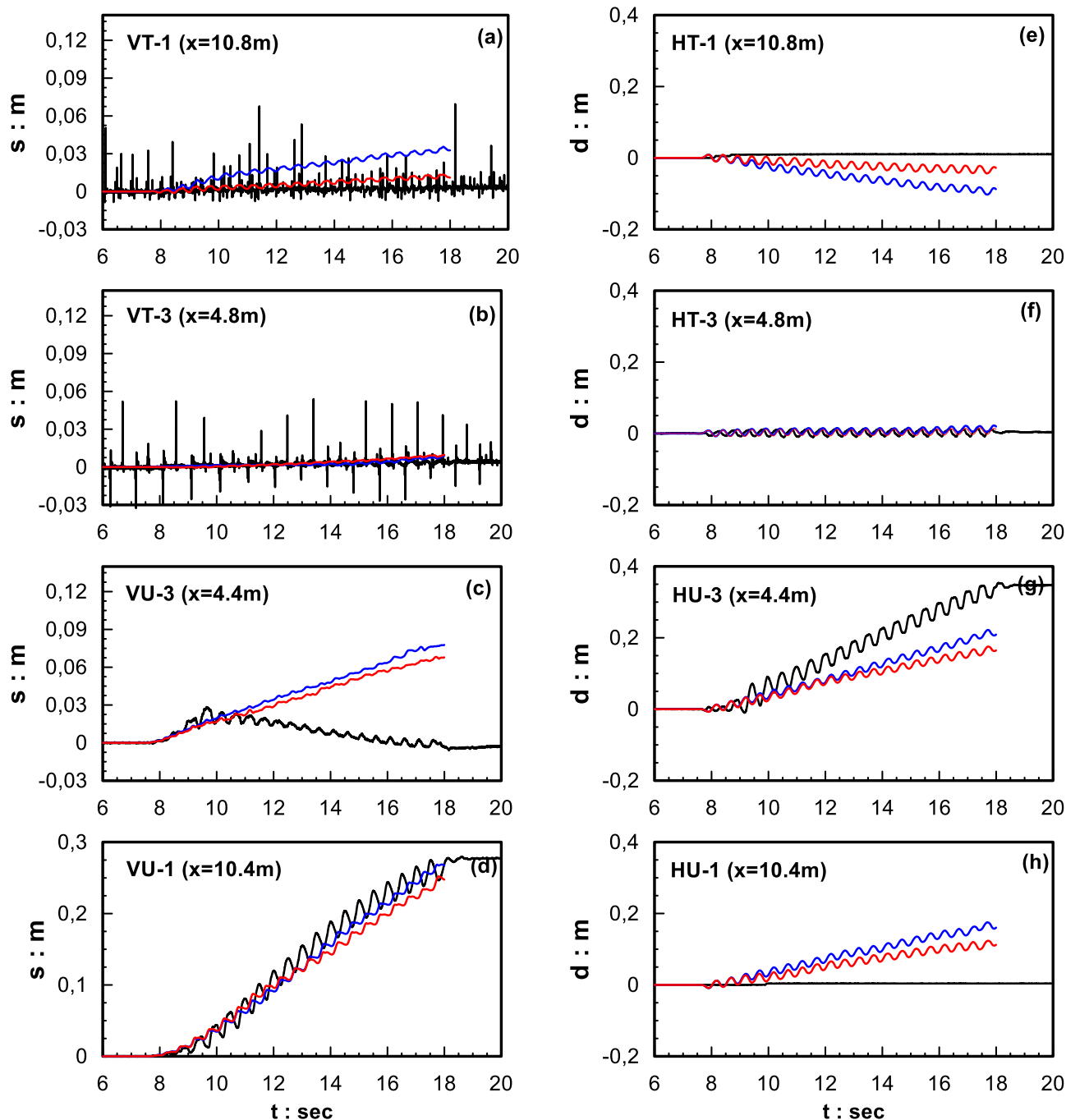
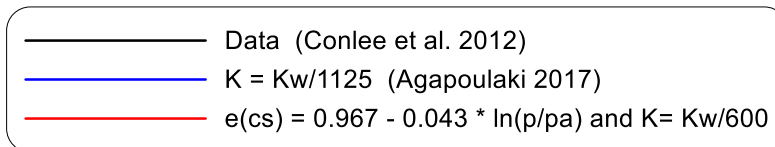
Από το Σχήμα 5.6 προκύπτει ότι η νέα προσέγγιση είναι ποιοτικώς ορθή, και οδηγεί σε συγκρίσιμες επιταχύνσεις με την βέλτιστη υπάρχουσα προσομοίωση, σε όλα τα βάθη. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι διαφορές μετρήσεων-προβλέψεων στις επιταχύνσεις είναι σχετικώς μικρές, με εξαίρεση τα πολύ μικρά βάθη, όπου οι διαφοροποιήσεις θα πρέπει να οφείλονται και στον σχετικώς απλοϊκό τρόπο προσομοίωσης του Yolo loam (με Mohr-Coulomb, χωρίς να υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα).

Αυτό δεν ισχύει για τις μετατοπίσεις στο Σχήμα 5.7, όπου οι διαφορές μετρήσεων-προβλέψεων είναι μεγαλύτερες. Συγκριτικά, η νέα προσέγγιση δίνει μικρότερες καθιζήσεις στο σταθεροποιημένο πρανές (VT-1, VT3) απ' ό,τι δίνει η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση, και αυτό είναι υπέρ της ακριβείας. Στις οριζόντιες μετατοπίσεις του σταθεροποιημένου πρανούς (HT1, HT3), οι δύο προσεγγίσεις είναι συγκρίσιμες αλλά και πάλι η νέα προσέγγιση δίνει μικρότερες μετατοπίσεις, κάτι που είναι και πάλι υπέρ της ακριβείας. Όμως λόγω της αλληλεπίδρασης των 2 πρανών, προκύπτουν διαφορές στις προβλέψεις μετατοπίσεων και στο φυσικό πρανές, όπου η νέα προσέγγιση υποεκτιμά ελαφρώς τις μετρήσεις (π.χ. VU1, HU3), αλλά οι διαφορές μεταξύ των 2 προσεγγίσεων είναι μικρές. Τέλος, σε ό,τι αφορά στις υπερπιέσεις πόρων (Σχήμα 5.8), οι 2 προσεγγίσεις δίνουν συγκρίσιμες τιμές τόσο στο φυσικό όσο και στο σταθεροποιημένο πρανές, όπου και οι 2 προσεγγίσεις προβλέπουν τις μικρότερες υπερπιέσεις πόρων στο σταθεροποιημένο πρανές, συγκριτικά με το φυσικό.

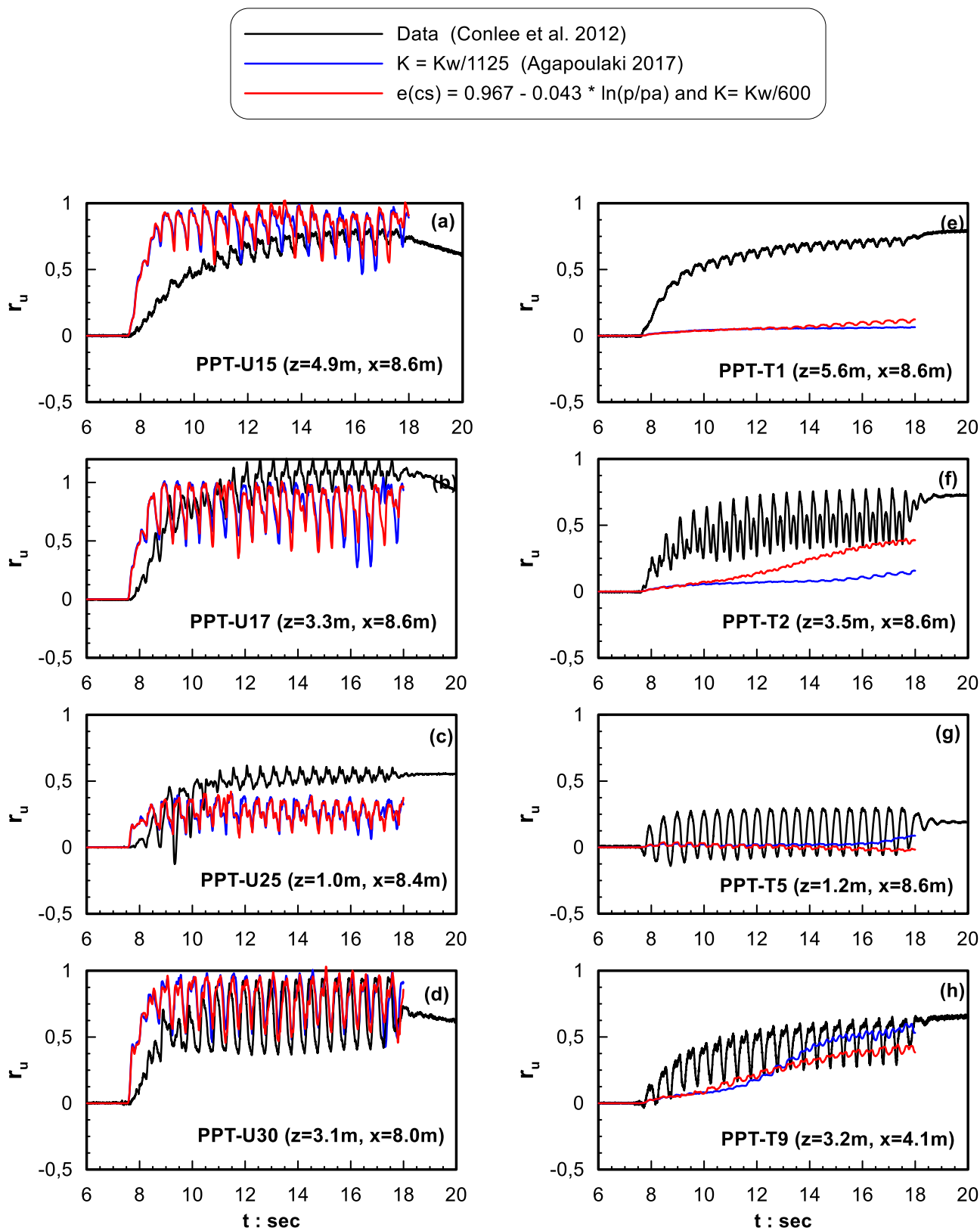
Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα αυτά η νέα προσέγγιση είναι ποιοτικώς ορθή και οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη της Agaroulaki (2017).



Σχήμα 5.6: Σύγκριση των χρονιοιστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη στο πείραμα CTC01 - Shake3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων ($K=K_w/600$)



Σχήμα 5.7: Σύγκριση των χρονιοστοριών καθιζήσεων (a έως d) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (e έως h) όπως μετρήθηκαν στο πείραμα CTC01 Shake3 (Conlee et al 2012) στην επιφάνεια του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$)



Σχήμα 5.8: Σύγκριση των χρονιοιστοριών του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z και σε αποστάσεις x από τη μεμβράνη στο πείραμα CTC01 Shake 3 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσιτότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$)

5.5 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων για τη δοκιμή CTC01 - Shake 4

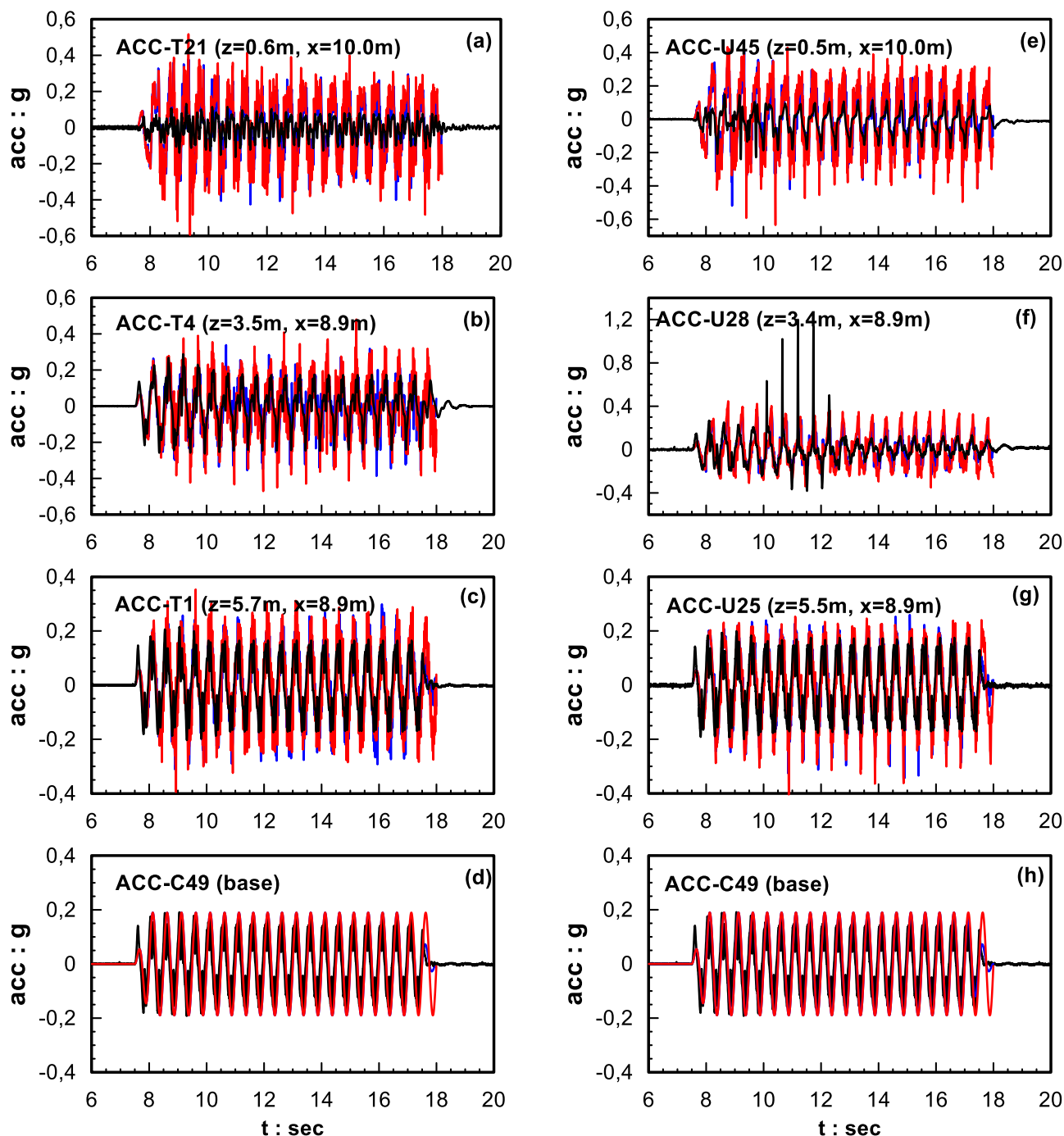
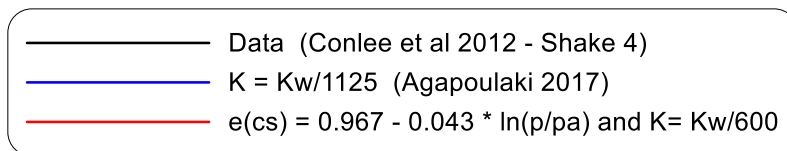
Έχοντας δει τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων για τη διέγερση Shake 3, αποφασίσθηκε να ελεγχθεί η αξιοπιστία της νέας προσέγγισης και σε μια διέγερση με μεγαλύτερη ένταση (Peak Ground Acceleration). Συγκεκριμένα επιλέγεται το αμέσως επόμενο γεγονός μετρά το Shake 3, δηλαδή το Shake 4. Η μόνη διαφορά του με το Shake 3 είναι η επιβαλλόμενη φυγοκεντρική επιτάχυνση η οποία είναι περί τα 0.19g αντί 0.10g που ήταν στις προηγούμενες αναλύσεις του Shake 3. Επομένως, η ανάλυση εκτελέστηκε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με το Shake 3 που παρουσιάστηκε παραπάνω, με μόνη διαφορά στην επιβαλλόμενη χρονοϊστορία επιτάχυνσης.

Επιπλέον, έχοντας ήδη ελέγξει την καταλληλότητα των δύο προσεγγίσεων και έχοντας καταλήξει ότι ο συνδυασμός επαναπροσδιορισμού της CSL και ελαφράς μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων K δείχνει καλύτερος, στην παρούσα παράγραφο γίνεται έλεγχος μόνο με αυτή. Επομένως, σε συνέπεια με τα προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάζονται παρακάτω τα συγκριτικά γραφήματα πειραματικών αποτελεσμάτων, της υπάρχουσας βέλτιστης προσέγγισης του προβλήματος (δηλαδή μείωση μόνο του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων K, σύμφωνα με Agaroulaki)2017) και της νέας προαναφερθείσας προσέγγισης. Η σειρά παρουσίασης είναι η ίδια, δηλαδή στο Σχήμα 5.9, παρουσιάζονται τα γραφήματα σύγκρισης των χρονοϊστοριών του πειράματος και των αριθμητικών αναλύσεων που προέκυψαν από την μέχρι τώρα βέλτιστη αριθμητική προσέγγιση (Αγαπουλάκη 2017) και από τη δεύτερη προτεινόμενη μεθοδολογία. Ακολουθούν τα συγκριτικά γραφήματα των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων (Σχήμα 5.10) και τέλος τα γραφήματα των λόγων υπερπίεσεων πόρων r_u που προκύπτουν από τα δεδομένα του πειράματος και τις 2 αριθμητικές αναλύσεις (Σχήμα 5.11).

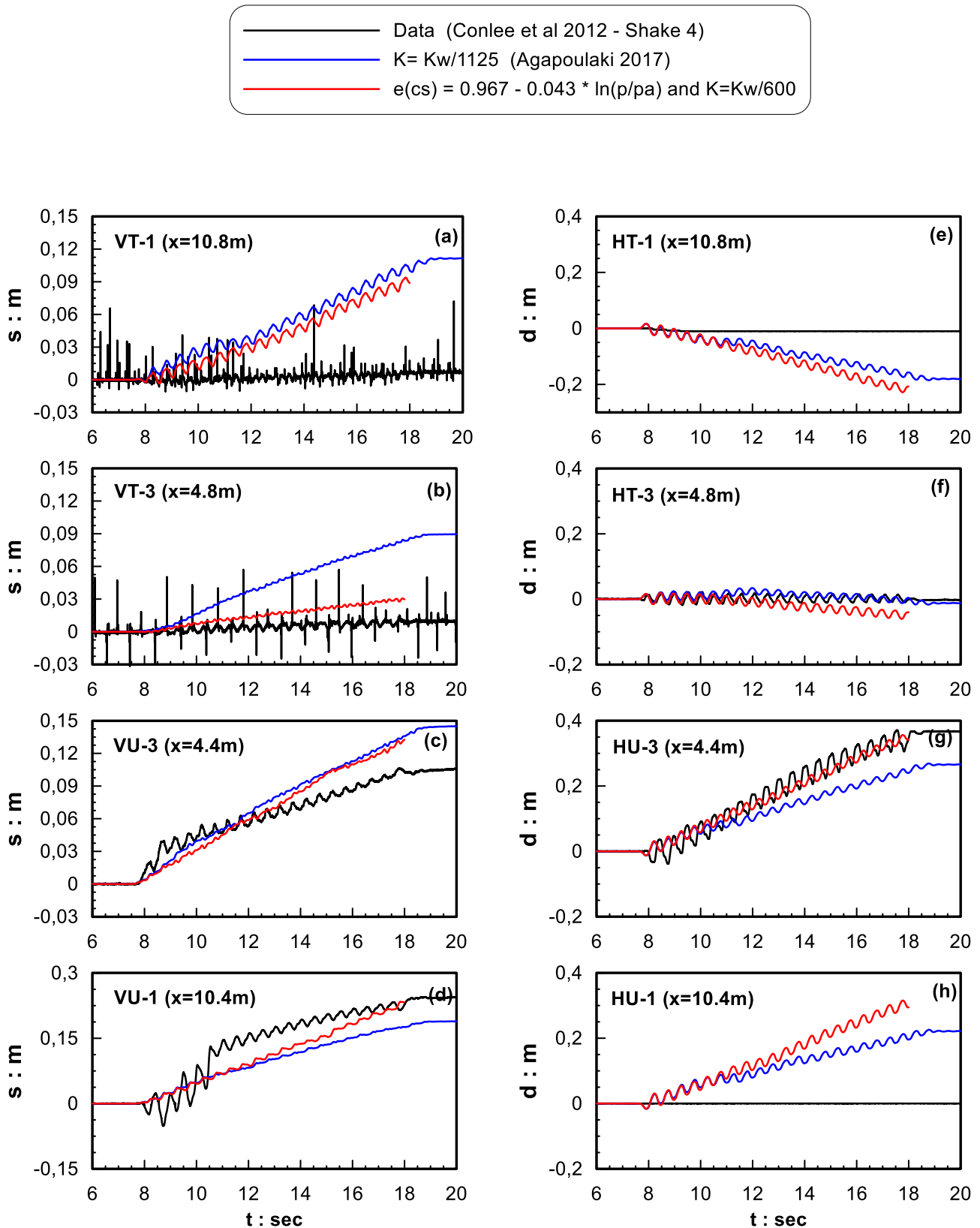
Από το Σχήμα 5.9 προκύπτει ότι η νέα προσέγγιση είναι και πάλι ποιοτικώς ορθή, και οδηγεί σε συγκρίσιμες επιταχύνσεις με την βέλτιστη υπάρχουσα προσομοίωση, σε όλα τα βάθη. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι διαφορές μετρήσεων-προβλέψεων στις επιταχύνσεις είναι σχετικώς μικρές, με εξαίρεση στον μετρητή U28 που οι μετρήσεις δείχνουν 3 παλμούς τεράστιας έντασης (> 1g) που δεν αιτιολογούνται ούτε εργαστηριακά, ούτε με βάση τις προσομοιώσεις.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.10, οι διαφορές μετρήσεων-προβλέψεων είναι μεγαλύτερες. Συγκριτικά, η νέα προσέγγιση δίνει μικρότερες καθιζήσεις στο σταθεροποιημένο πρανές (VT-1, VT3) απ' ό,τι δίνει η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση, και αυτό είναι υπέρ της ακριβείας. Στις οριζόντιες μετατοπίσεις του σταθεροποιημένου πρανούς (HT1, HT3), οι δύο προσεγγίσεις είναι συγκρίσιμες αλλά η νέα προσέγγιση δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες μετατοπίσεις, κάτι που δεν είναι υπέρ της ακριβείας. Όμως λόγω της αλληλεπίδρασης των 2 πρανών, προκύπτουν διαφορές στις προβλέψεις μετατοπίσεων και στο φυσικό πρανές, όπου η νέα προσέγγιση προσεγγίζει καλά τις μετρήσεις (VU1, VU3, HU3), σε αντίθεση με την υπάρχουσα βέλτιστη που τις υποεκτιμά ελαφρώς. Τέλος, σε ό,τι αφορά στις υπερπίεσεις πόρων (Σχήμα 5.11), οι 2 προσεγγίσεις δίνουν συγκρίσιμες τιμές στο φυσικό πρανές, ενώ στο σταθεροποιημένο η νέα προσέγγιση προβλέπει καλύτερα τις μικρότερες υπερπίεσεις που μετρήθηκαν στη δοκιμή.

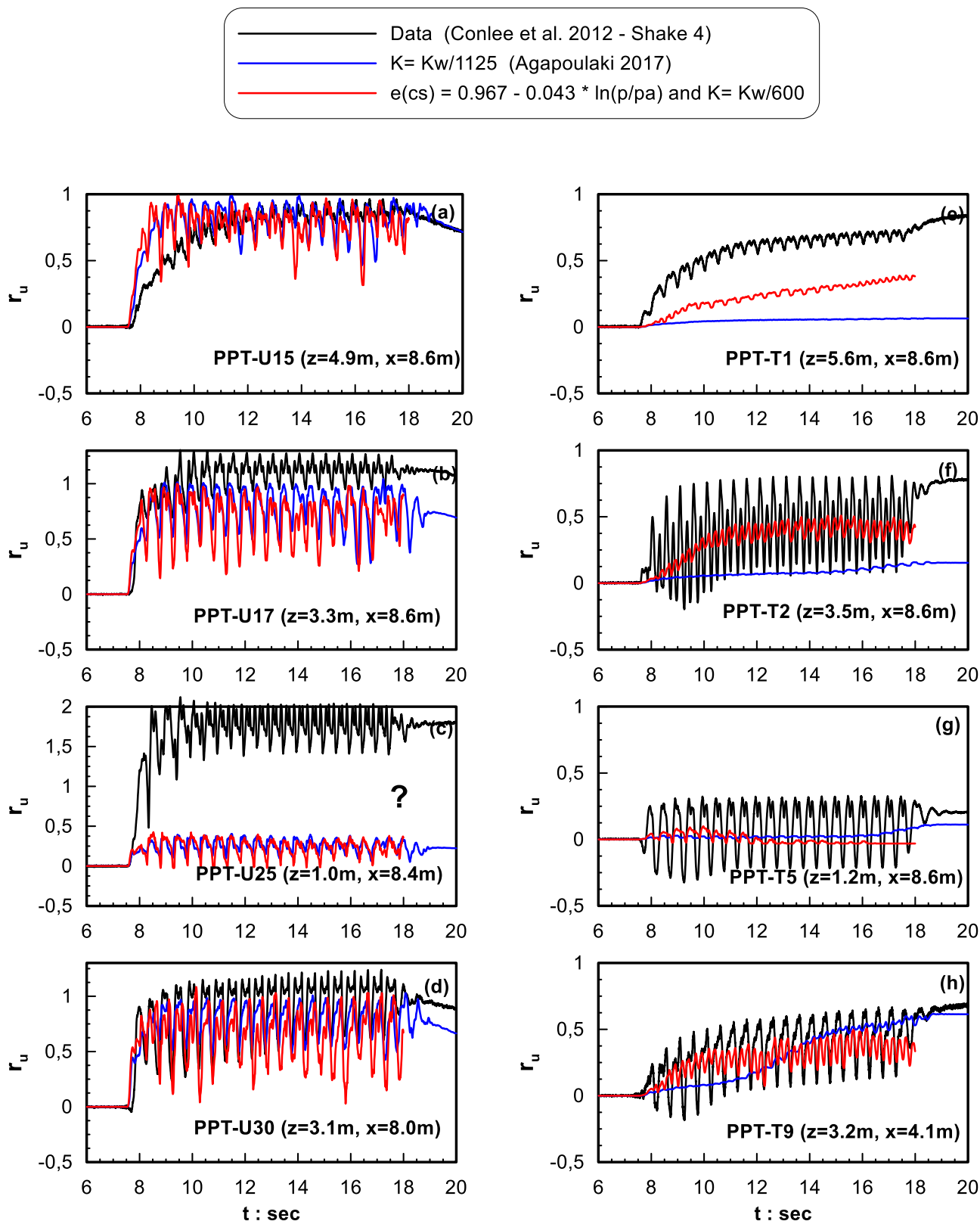
Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα αυτά η νέα προσέγγιση είναι ποιοτικώς ορθή και οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη της Agaroulaki (2017), και αυτό ειδικά στη δοκιμή CTC01 – Shake 4 που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερης έντασης διέγερση.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη στο πείραμα CTC01- Shake 4 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$).



Σχήμα 5.10: Σύγκριση των χρονιοιστοριών κατιζήσεων (α έως δ) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (ε έως η) όπως μετρήθηκαν στο πείραμα CTC01 Shake 4 (Conlee et al 2012) στην επιφάνεια του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις x από την κεντρική μεμβράνη, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων ($K=K_w/600$).



Σχήμα 5.11: Σύγκριση των χρονοϊστοριών του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη z και σε αποστάσεις x από τη μεμβράνη στο πείραμα CTC01 Shake 4 (Conlee et al 2012) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=K_w/1125$ και για την νέα προσέγγιση με επαναπροσδιορισθείσα CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων ($K= K_w/600$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης ομάδας πασσάλων σε σταθεροποιημένη αμμώδη στρώση υπό μικρή κλίση

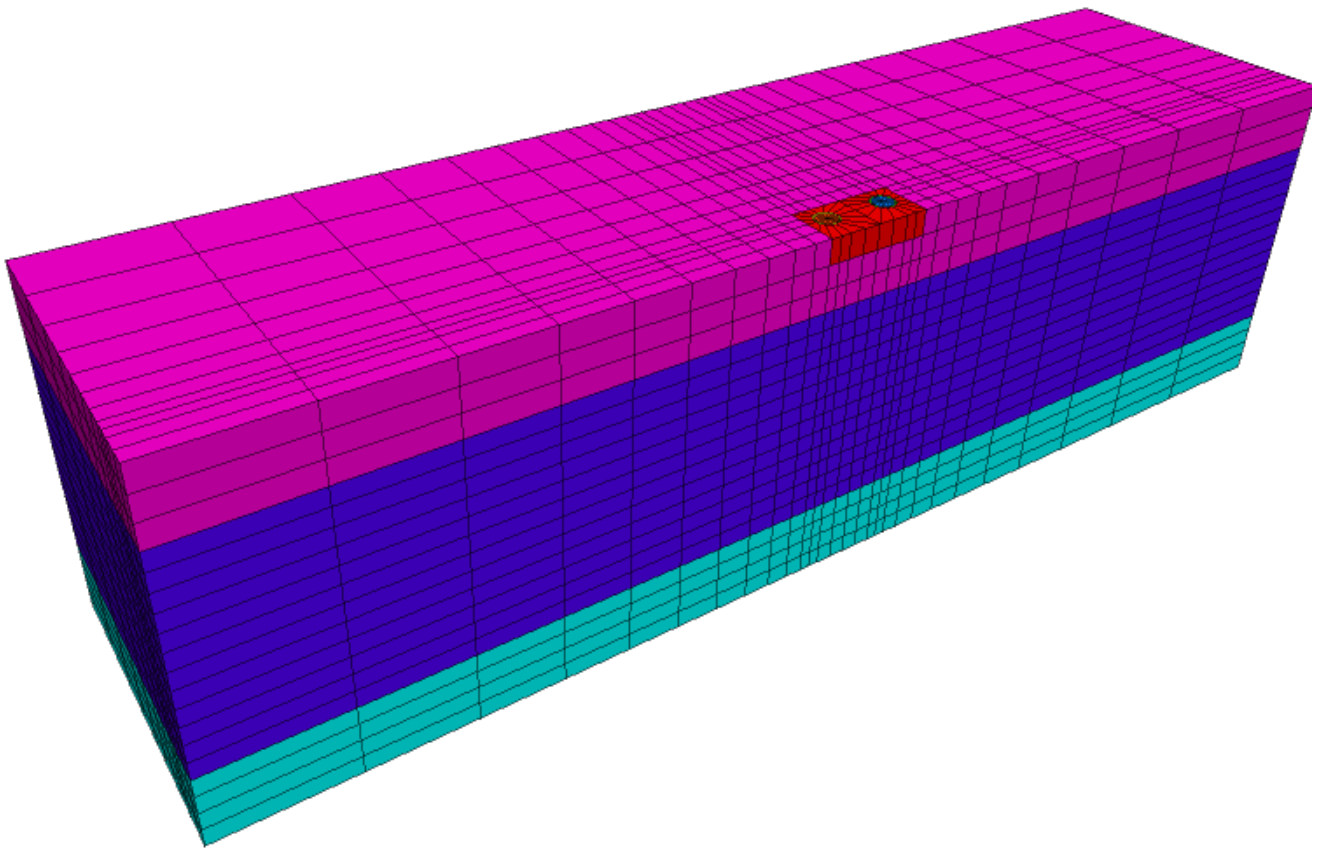
6.1 Εισαγωγή

Σε συνέχεια των αριθμητικών προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα δύο κεφάλαια και με γνώμονα την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, επιχειρείται στο παρόν κεφάλαιο η προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους, αλλά και η αλληλεπίδραση αυτού με πασσαλομάδα. Το εν λόγω πρόβλημα είναι ένα αμιγώς τρισδιάστατο πρόβλημα και για το λόγο αυτό οι αναλύσεις εκπονήθηκαν στο λογισμικό FLAC^{3D} σε αντίθεση με των προηγούμενων κεφαλαίων που προσομοιώθηκαν σε FLAC. Παρουσιάζονται παρακάτω λοιπόν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μια σειρά από δοκιμές φυγοκέντρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης των Ramuk et al (2007). Έτσι εξετάζεται η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας προσομοίωσης της σταθεροποίησης σε ένα ακόμα πρόβλημα συνοριακών τιμών. Επομένως, στη παράγραφο 6.2 παρουσιάζονται οι παραδοχές των 3D αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν με στόχο την προσομοίωση των εν λόγω δοκιμών. Η παράγραφος 6.3 επεξηγεί την προσπάθεια βαθμονόμησης και ελέγχου της 3D προσομοίωσης, με έμφαση στη δοκιμή σε πασσαλομάδα μη-σταθεροποιημένου εδάφους το οποίο υπέστη πλευρική εξάπλωση. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την προσέγγιση που αφορά την μετάθεση της CSL μόνο, ακολουθούμενα από αυτά για το συνδυασμό αυτής με την μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων, στις παραγράφους 6.4 και 6.5 αντίστοιχα. Οι εν λόγω προσομοιώσεις της σταθεροποίησης συγκρίνονται με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση της σταθεροποίησης της Agaroulaki (2017).

6.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκεντριστή για σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε πλευρικός εξαπλούμενο έδαφος

Για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος των Ramuk et al (2007) χρησιμοποιήθηκε όπως προαναφέρθηκε το λογισμικό FLAC^{3D} (Itasca Inc. 2005). Λόγω της φύσης του προβλήματος, η δημιουργία του καννάβου αποτέλεσε ένα εξαιρετικά σύνθετο πρόβλημα. Απαιτείται η σωστή διαζώνιση του καννάβου προκειμένου να προσομοιωθούν σωστά τόσο τα διάφορα υλικά που υπάρχουν όσο και οι διαφορετικές περιοχές ενδιαφέροντος (εκτός-εντός πασσαλομάδας). Δεδομένης της συμμετρίας του προβλήματος (4 πάσσαλοι με πασσαλόδεσμο κεντρικά στο εύκαμπτο δοχείο, με διέγερση σε μία διεύθυνση), επιλέχθηκε να προσομοιωθεί το «μισό» πρόβλημα, με τον κάρναβο που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.1**.

Το συνολικό μήκος του καννάβου είναι 35,5m (όσο το μήκος του εύκαμπτου δοχείου), το πλάτος του είναι 8,88m (όσο το μισό πλάτος του εύκαμπτου δοχείου), ενώ το ύψος του είναι 10m (όσο το ύψος της εδαφικής στρώσης). Αποτελείται από τετραπλευρικά στοιχεία μεταβλητού εμβαδού προκειμένου να προσομοιωθεί η πολύπλοκη «μισή» γεωμετρία του αρχικού προβλήματος που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.2**. Οι κάτω κόμβοι του καννάβου δεσμεύτηκαν σε μετακίνηση κατά τους 2 οριζόντιους άξονες και επειδή μέσω αυτών επιβλήθηκε η διέγερση βάσης της δοκιμής. Στα πλευρικά σύνορα δεσμεύτηκαν καθ' ύψος οι ακραίοι κόμβοι του καννάβου (μέθοδος tied nodes) στο ίδιο ύψος ώστε να δίνουν κοινή οριζόντια και κατακόρυφη παραμόρφωση στο ίδιο ύψος. Έτσι επετεύχθη η ορθή προσομοίωση των συνοριακών συνθήκων που επιβάλλει το εύκαμπτο δοχείο (Laminar box) του φυγοκεντριστή. Η ελαφρά κλίση 2° που εν δυνάμει οδηγεί σε πλευρική εξάπλωση επετεύχθη με στροφή του διανύσματος της βαρύτητας, ενώ ελήφθη υπόψη η επίδραση αυτής της στροφής στα πλευρικά σύνορα.



Σχήμα 6.1 :Κάναβος που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα FLAC3D για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος των Ratuk et al. (2007), όπου διαφαίνεται η διαζώνιση των διαφορετικών υλικών.

Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ομάδες ζωνών πεπερασμένων διαφορών προκειμένου να προσομοιωθούν όλα τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του πειράματος. Συγκεκριμένα:

- Τα κατώτερα 2m (γαλάζιο) προσομοιώνουν τη στρώση βάσης αποτελούμενη από ελαφρώς σιμεντοποιημένης άμμου Nevada, στην οποία θεμελιωνόταν η πασσαλομάδα και δεν είναι ευάλωτη σε ρευστοποίηση
- Τα επόμενα 6m (μπλε) αποτελούν την ρευστοποιήσιμη άμμο Nevada με σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$
- Τα ανώτερα 2m (μωβ) προσομοιώνουν την επιφανειακή στρώση πάλι ελαφρώς σιμεντοποιημένης άμμου που δεν ρευστοποιείται.

Οι ιδιότητες των υλικών επιλέχθηκαν τόσο από τα δεδομένα, του πειράματος όσο και από λογικές παραδοχές και συμπεράσματα προκειμένου να επιτυγχάνονται ορισμένα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα:

1. Για τους πασσάλους επιλέχθηκε ελαστικό προσομοίωμα με μέτρο διάτμησης $G = 23,56 \cdot 10^4$ kPa , μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K=31,31 \cdot 10^4$ kPa που με βάση τη διάμετρό τους προσομοιώνει πολύ καλά το μέτρο ακαμψίας που δόθηκε από τα πειραματικά δεδομένα ως $EI=8000$ kNm². Η διαπερατότητα k των πασσάλων επιλέχθηκε $k=10^{-9}$ m/s (πρακτικώς αδιαπέρατοι).
2. Για τον κεφαλόδεσμο επιλέχθηκε ελαστικό προσομοίωμα με τις εξής παραμέτρους: μέτρο διάτμησης $G=70,68 \cdot 10^4$ kPa , μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K= 93,93 \cdot 10^4$ kPa. Η διαπερατότητα του κεφαλόδεσμου επιλέχθηκε ίση με $k = 10^{-9}$ m/s (πρακτικώς αδιαπέρατος).

3. Για την σιμεντοποιημένη στρώση βάσης επιλέχθηκε ελαστικό προσομοίωμα με παραμέτρους: μέτρο διάτμησης $G=1800$ kPa, μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K=4678$ kPa. Η διαπερατότητα της στρώσης επιλέχθηκε ίση με $k = 10^{-9}$ m/s (πρακτικώς αδιαπέρατη).
4. Για τη στρώση της ρευστοποιήσιμης άμμου επιλέχθηκε ο αρχικός δείκτης πόρων ίσος με $e = 0.742$ προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά η σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$ του υλικού. Οι υπόλοιπες παράμετροι έλαβαν διαφορετικές τιμές για τις αναλύσεις που θεωρούν τη στρώση φυσική (μη-σταθεροποιημένη) ή σταθεροποιημένη. Συγκεκριμένα:
 - Για φυσική στρώση, η διαπερατότητα επιλέχθηκε ίση με $k = 6,6 \cdot 10^{-5}$ m/s και το μέτρο συμπίεσότητας του νερού ίσο με $K_w = 2 \cdot 10^6$ kPa.
 - Για σταθεροποιημένη στρώση, η διαπερατότητα επιλέχθηκε ίση με $k = 4 \cdot 10^{-9}$ m/s (πρακτικώς αδιαπέρατη, αλλά περισσότερο διαπερατή από τις σιμεντοποιημένη στρώση βάσης) και το μέτρο συμπίεσότητας του υγρού πόρων ίσο με K_w/n (στις περιπτώσεις που επελέγη να προσομοιωθεί μέσω αυτού η σταθεροποίηση).
5. Για την διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλων επιλέχθηκε γωνία τριβής $\delta=36^\circ$.
6. Για την ανώτερη σιμεντοποιημένη στρώση δεν υπήρχαν πολλά δεδομένα στη δημοσίευση των Ramuk et al. (2007). Επομένως, η προσομοίωσή της θεωρήθηκε αντίστοιχη με εκείνη της στρώσης βάσης, αλλά με σαφώς μειωμένες ιδιότητες λόγω μικρού βάθους. Έτσι, επιλέχθηκε ελαστικό προσομοίωμα με παραμέτρους: μέτρο διάτμησης $G= 300$ kPa, μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K=782.33$ kPa. Η διαπερατότητα της στρώσης επιλέχθηκε ίση με $k = 10^{-9}$ m/s (πρακτικώς αδιαπέρατη).
7. οι παράμετροι επιλέχθηκαν με γνώμονα τη λογική και το αρχικό αποτέλεσμα. Ωστόσο ήταν σαφές ότι για αυτή την στρώση συγκεκριμένα η ανάλυση ήταν πολύ ασταθής. Το μοντέλο ανάλυσης επιλέχθηκε να είναι ελαστικό. Οι παράμετροι που τελικά επιλέχθηκαν ως βέλτιστες προσεγγίσεις ήταν οι εξής: μέτρο διάτμησης $G = 300$ kPa, μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K= 782.33$ kPa. Η διαπερατότητα επιλέχθηκε ίση με $k = 6,6 \cdot 10^{-6}$ m/s, δηλαδή 10 φορές μικρότερη εκείνης της φυσικής ρευστοποιήσιμης άμμου, για την προσομοίωση της επίδρασης της σιμεντοποίησης.

Στη βάση του καννάβου επιβλήθηκε ημιτονοειδής οριζόντια διέγερση με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης ίση με $0.20g$, συχνότητας 2Hz , διάρκειας ισχυρής κίνησης 16sec και θεωρήθηκε αρχική απόσβεση τοπικής φύσης (local damping), δηλαδή ανεξάρτητη της συχνότητας της διέγερσης, 2% για την άμμο Nevada. Επισημαίνεται ότι προσομοιώνονται 2 δοκιμές φυγοκεντρική, μία με τη μεσαία αμμώδη στρώση φυσική και μία με την ίδια στρώση παθητικά σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτίδα με $CS(\%) = 5$.

Για την αριθμητική προσομοίωση του σταθεροποιημένου εδάφους (μεσαία αμμώδης στρώση) χρησιμοποιήθηκε η λογική που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, δηλαδή χρησιμοποιώντας τις δύο (2) προσεγγίσεις που προαναφέρθηκαν και συγκεκριμένα:

- Τον επαναπροσδιορισμό της Critical State Line (CSL) του εδαφικού υλικού μετά τη σταθεροποίηση με προσαρμογή της βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το Κεφάλαιο 3, δηλαδή υιοθετώντας μια CSL που δίνεται από τη σχέση 4.1.
- Τον επαναπροσδιορισμό της CSL του εδαφικού υλικού (λόγω σταθεροποίησης, με βάση τη σχέση 4.1) σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού των πόρων $K = K_w/n$.

Σημειώνεται εδώ, ότι τα ανωτέρω αποτελέσματα που αφορούν την απόκριση του σταθεροποιημένου εδάφους συγκρίνονται πάντα με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση που έχει προκύψει από τη διπλωματική εργασία των Πανάγου-Σιάμπου (2015) και τη διδακτορική διατριβή της Αγαπουλάκη (2017), δηλαδή:

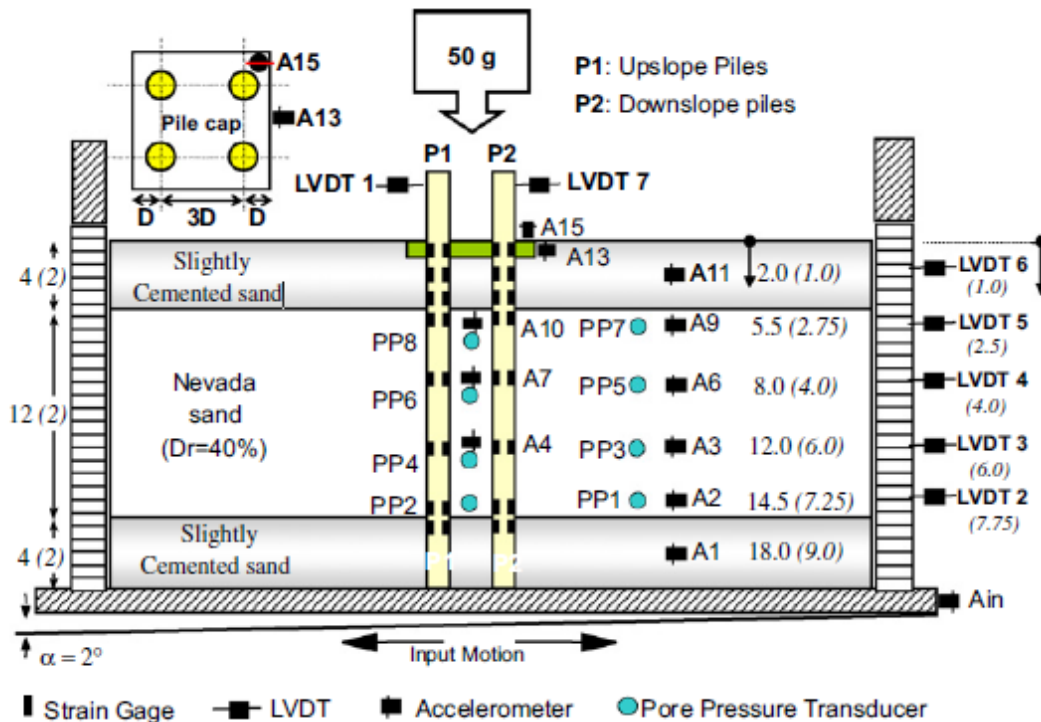
(α) τη διατήρηση της CSL όπως προκύπτει για τη φυσική άμμο (σχέση 4.2),

(β) τη σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού των πόρων $K = K_w/n$, με βάση τη σχέση 4.3.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η διάταξη της δοκιμής (σε τομή), με τη θέση της πασσαλομάδας και των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήσαν οι Ramuk et al. (2007). Οι συγκρίσεις πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων γίνεται για επιλεγμένα φυσικά μεγέθη, και σε επιλεγμένες θέσεις μετρητών. Πιο συγκεκριμένα, η σύγκριση θα γίνει σε όρους ιστορικών υπερπίεσεων πόρων, ιστορικών μετακινήσεων επιφάνειας εδάφους και κεφαλόδεσμου, μετατοπίσεων του εδάφους συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές, και καμπτικών ροπών των πασσάλων συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Συγκεκριμένα:

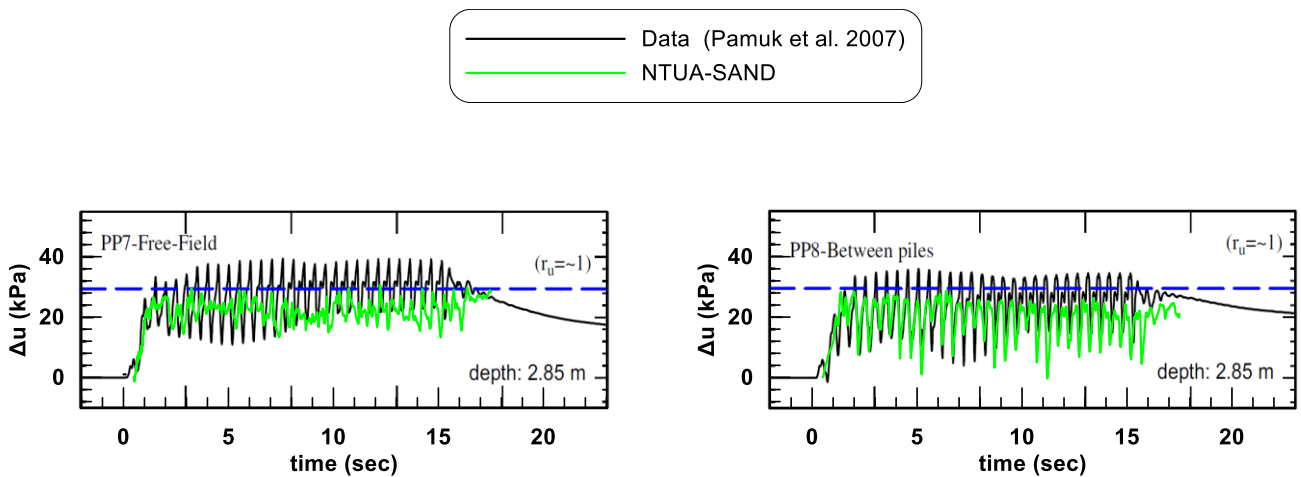
- Για τις υπερπίεσεις πόρων λήφθηκαν τα αποτελέσματα των μετρητών PP7 και PP8 για τις αναπτυσσόμενες υπερπίεσεις μακριά και εντός της περιοχής των πασσάλων αντίστοιχα. Οι μετρητές αυτό αντιστοιχούν σε βάθος 2.85m περίπου, δηλαδή εντός της μεσαίας αμμώδους στρώσης.
- Για τις επιφανειακές οριζόντιες μετακινήσεις συγκρίνονται τα αποτελέσματα των επιφανειακών μκηνοσιόμετρων LVDT-6 για τη μετακίνηση του ελεύθερου πεδίου, LVDT-1, LVDT-7 για τις μετακινήσεις του κεφαλόδεσμού (upslope και downslope αντίστοιχα).
- Για τις μετακινήσεις του εδάφους με το βάθος χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των μκηνοσιόμετρων που βρίσκονται στο ελεύθερο πεδίο (LVDT -6, 5, 4, 3 και 2), και αυτά παρουσιάζονται για διάφορες χρονικές στιγμές ($t = 3, 6, 12$ και 17sec).
- Για τις ροπές των πασσάλων χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα από την παραμορφωμένη ελαστική γραμμή τους με το βάθος, για διάφορες χρονικές στιγμές ($t = 3, 6, 12$ και 17sec) και διαχωρίζοντας τις ροπές των κατάντη και ανάντη πασσάλων, P2 και P1 αντίστοιχα.



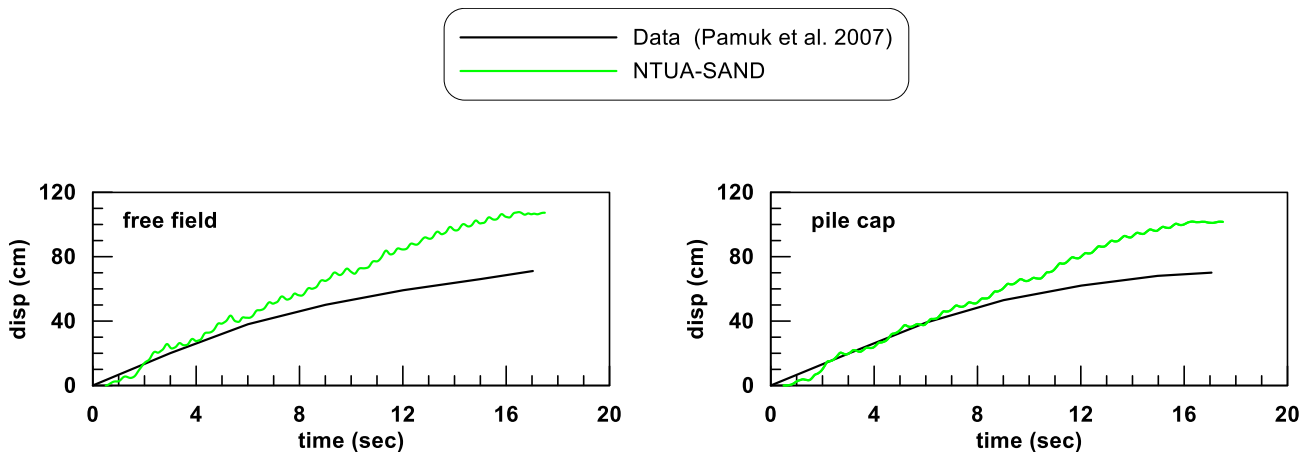
Σχήμα 6.2: Τελική διάταξη πειράματος συμπεριλαμβανομένων και των οργάνων μέτρησης (Ramuk et al.2007)

6.3 Προσομοίωση πλευρικής εξάπλωσης για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε φυσική αμμώδη στρώση

Αρχικώς γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης της δοκιμής των Pamuk et al. (2007) στην οποία η μεσαία αμμώδης στρώση παραμένει ρευστοποιήσιμη, και πράγματι οδηγείται σε πλευρική εξάπλωση λόγω της σχετικά ισχυρής έντασης. Συνεπώς, στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για αυτή τη δοκιμή, και πιο συγκεκριμένα στα Σχήματα 6.3, 6.4, 6.5 και 6.6 η σύγκριση γίνεται σε όρους χρονοϊστοριών υπερπιέσεων πόρων, χρονοϊστοριών μετακινήσεων επιφάνειας εδάφους και κεφαλόδεσμου, μετατοπίσεων του εδάφους συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές, και καμπτικών ροπών των πασσάλων συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές, αντίστοιχα.

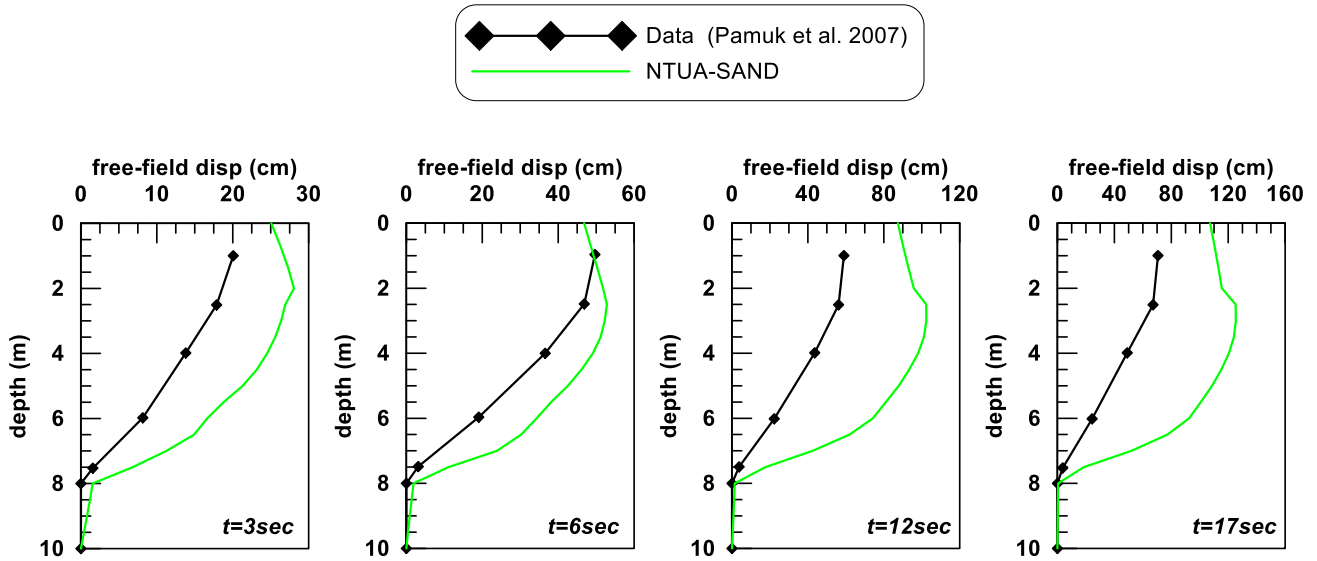


Σχήμα 6.3: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων εντός της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους.



Σχήμα 6.4: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες οριζόντιων μετατοπίσεων επιφάνειας, στο ελεύθερο πεδίο (free field) και επί του κεφαλόδεσμου (pile cap) αντίστοιχα, για τη δοκιμή με τη ρευστοποιήσιμη στρώση.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.3**, η αμμώδης στρώση ρευστοποιείται και αυτό προβλέπεται επακριβώς από την αριθμητική ανάλυση. Επιπλέον, προβλέπεται η πιο έντονη διαστολική συμπεριφορά ανάμεσα στους πασσάλους (βλ. έντονες πτώσεις του r_u), αν και η αριθμητική ανάλυση μάλλον την υπερεκτιμά ελαφρώς. Στη συνέχεια, με βάση το **Σχήμα 6.4** προκύπτει ότι η αμμώδης στρώση υπόκειται σε σημαντική πλευρική εξάπλωση πολλών δεκάδων cm, η οποία προβλέπεται από την αριθμητική ανάλυση. Η ακρίβεια της πρόβλεψης είναι πρακτικώς τέλεια μέχρι το μέσο της διέγερσης (περί τα 8sec), αλλά από εκεί και πέρα η οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους υπερεκτιμάται, καθώς στο πείραμα παύει να αυξάνει με τον ίδιο ρυθμό όπως στην ανάλυση.

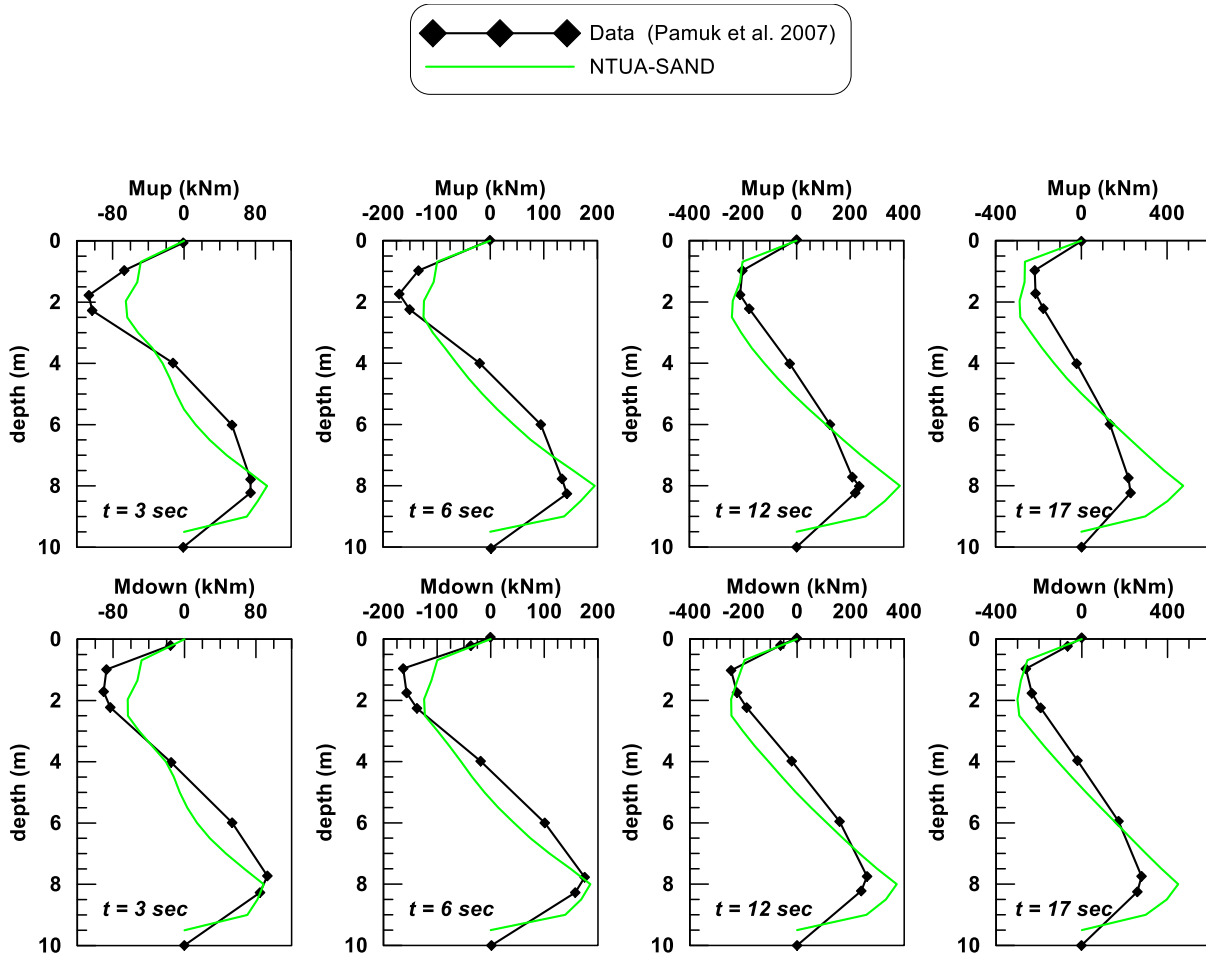


Σχήμα 6.5: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις με το βάθος στο ελεύθερο πεδίο σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη ρευστοποιήσιμη στρώση.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.5**, η οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους οφείλεται πρακτικώς στη μετατόπιση της πλευρικής εξάπλωμένης αμμώδους στρώσης που ρευστοποιήθηκε και αυτό επιβεβαιώνεται σε όλα τα χρονικά στιγμιότυπα. Η αριθμητική ανάλυση επιβεβαιώνει αυτή τη μορφή παραμόρφωσης του εδάφους με το βάθος, καθώς οι μετατοπίσεις παραμένουν πρακτικώς μηδενικές σε βάθος 8m, και παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους πλησίον της επιφάνειας. Η ανωτέρω ποιοτική συμφωνία είναι σημαντική για την αξιοπιστία της ανάλυσης, και σε όρους ποσοτικών επιβεβαιώνεται η ικανοποιητική συμφωνία μέχρι το μέσο της διέγερσης (για $t = 3, 6 \text{ sec}$) και η υπερεκτίμηση των μετατοπίσεων για χρόνους μεγαλύτερους των 8sec, που είχε διαπιστωθεί και στο **Σχήμα 6.4**.

Τέλος, από το **Σχήμα 6.6** προκύπτει ότι οι μεγάλες οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης οδηγούν και σε σημαντικές ροπές στους πασσάλους, ειδικά στη διεπιφάνειες της ρευστοποιημένης στρώσης με την άνω και κάτω σιμεντοποιημένες αμμώδεις στρώσεις που δε ρευστοποιούνται. Το διάγραμμα των ροπών με το βάθος έχει μορφή “S” και οι ροπές μεγαλώνουν όσο προχωρά η δόνηση, καθώς μεγαλώνουν και οι οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις που τις προκαλούν. Δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των κατάντη και ανάντη πασσάλων σε όρους ροπών. Όλες αυτές οι πειραματικές παρατηρήσεις προβλέπονται πολύ ικανοποιητικά από την αριθμητική ανάλυση ποιοτικά. Ποσοτικά, η σύγκριση είναι και πάλι ικανοποιητική. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη ροπή στην άνω διεπιφάνεια υποεκτιμάται ελαφρώς στην αρχή της δόνησης, με την υποεκτίμηση να εξαλείφεται όσο προχωρά η δόνηση. Αντιθέτως, η μέγιστη ροπή στην κάτω διεπιφάνεια προβλέπεται πολύ ικανοποιητικά στην αρχή της δόνησης, μα προκύπτει μια σχετική υπερεκτίμηση όσο προχωρά η δόνηση.

Συνολικά λοιπόν προκύπτει ότι η αριθμητική προσομοίωση είναι ποιοτικώς ορθή, και ποσοτικά είναι επακριβής τουλάχιστον μέχρι το μέσο της δόνησης (έως $t=8\text{sec}$). Όσο προχωρά η δόνηση, προκύπτει μια υπερεκτίμηση των μετατοπίσεων και των μεγίστων ροπών στους πασσάλους, η οποία όμως κρίνεται ως αποδεκτή, δεδομένης της έλλειψης πληροφορικών για τις 2 σιμεντωμένες αμμώδεις στρώσεις στο άνω και κάτω μέρος της ρευστοποιημένης άμμου Nevada.

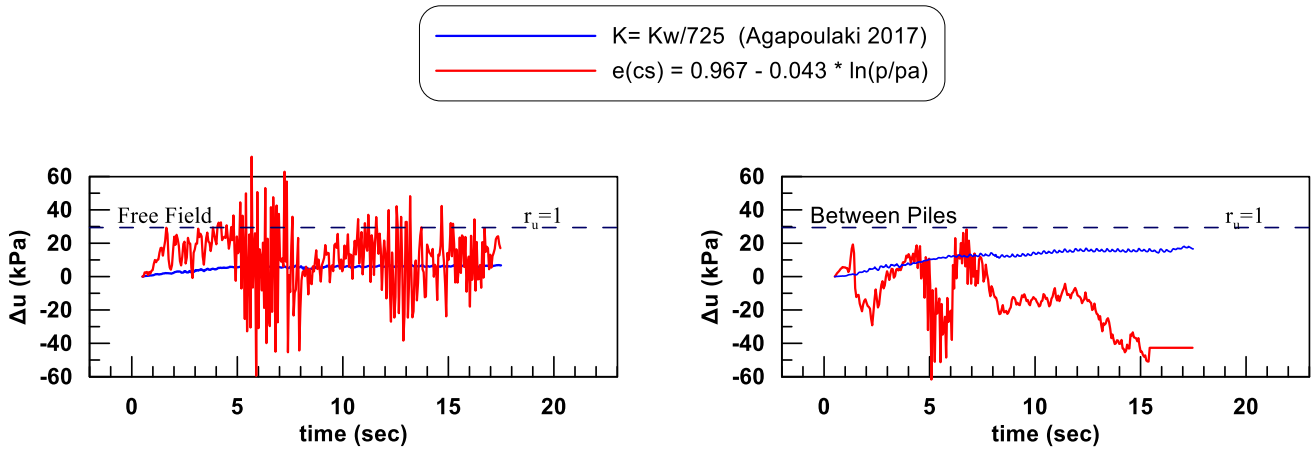


Σχήμα 6.6: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις καμπτικών ροπών των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη ρευστοποιήσιμη στρώση.

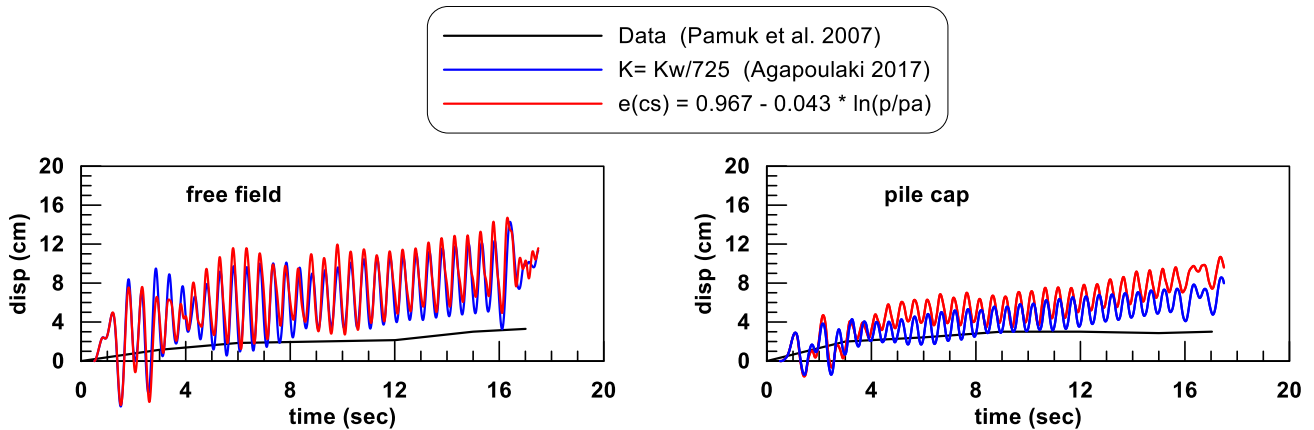
6.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε σταθεροποιημένη στρώση

Κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα δύο κεφάλαια, παρουσιάζεται παρακάτω η πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της δοκιμής των Pamuk et al. (2007) με τη σταθεροποιημένη στρώση, η οποία δε ρευστοποιείται και έτσι δεν προκαλούνται μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις και ροπές στους πασσάλους. Η πρώτη αυτή προσπάθεια συνίσταται στον επαναπροσδιορισμό της CSL του σταθεροποιημένου εδάφους, και συγκρίνεται με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση μέσω έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων (Agaroulaki 2017).

Συνεπώς, στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύγκριση πειραματικών δεδομένων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για αυτή τη δοκιμή, και πιο συγκεκριμένα στα Σχήματα 6.7, 6.8, 6.9 και 6.10 η σύγκριση γίνεται σε όρους ιστοριών υπερπίεσεων πόρων, ιστοριών μετακινήσεων επιφάνειας εδάφους και κεφαλόδεσμου, μετατοπίσεων του εδάφους συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές, και καμπτικών ροπών των πασσάλων συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές, αντίστοιχα.



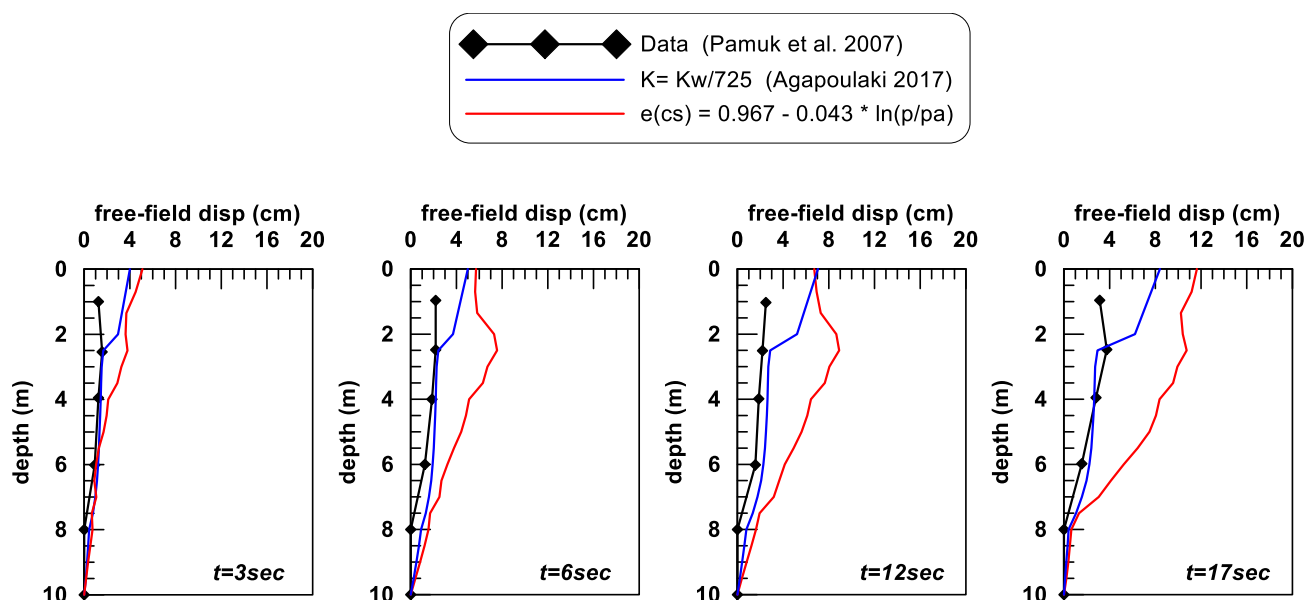
Σχήμα 6.7: Συγκριτικά διαγράμματα 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις ιστορίες υπερπίεσεων πόρων εντός της σταθεροποιημένης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους (τα πειραματικά αποτελέσματα ($r_u=1$) αφορούν τη δοκιμή με τη ρευστοποιημένη στρώση άμμου, και παρουσιάζονται εδώ ενδεικτικά). Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017).



Σχήμα 6.8: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις ιστορίες οριζόντιων μετατοπίσεων επιφάνειας, στο ελεύθερο πεδίο (*free field*) και επί του κεφαλόδεσμου (*pile cap*) αντίστοιχα, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017).

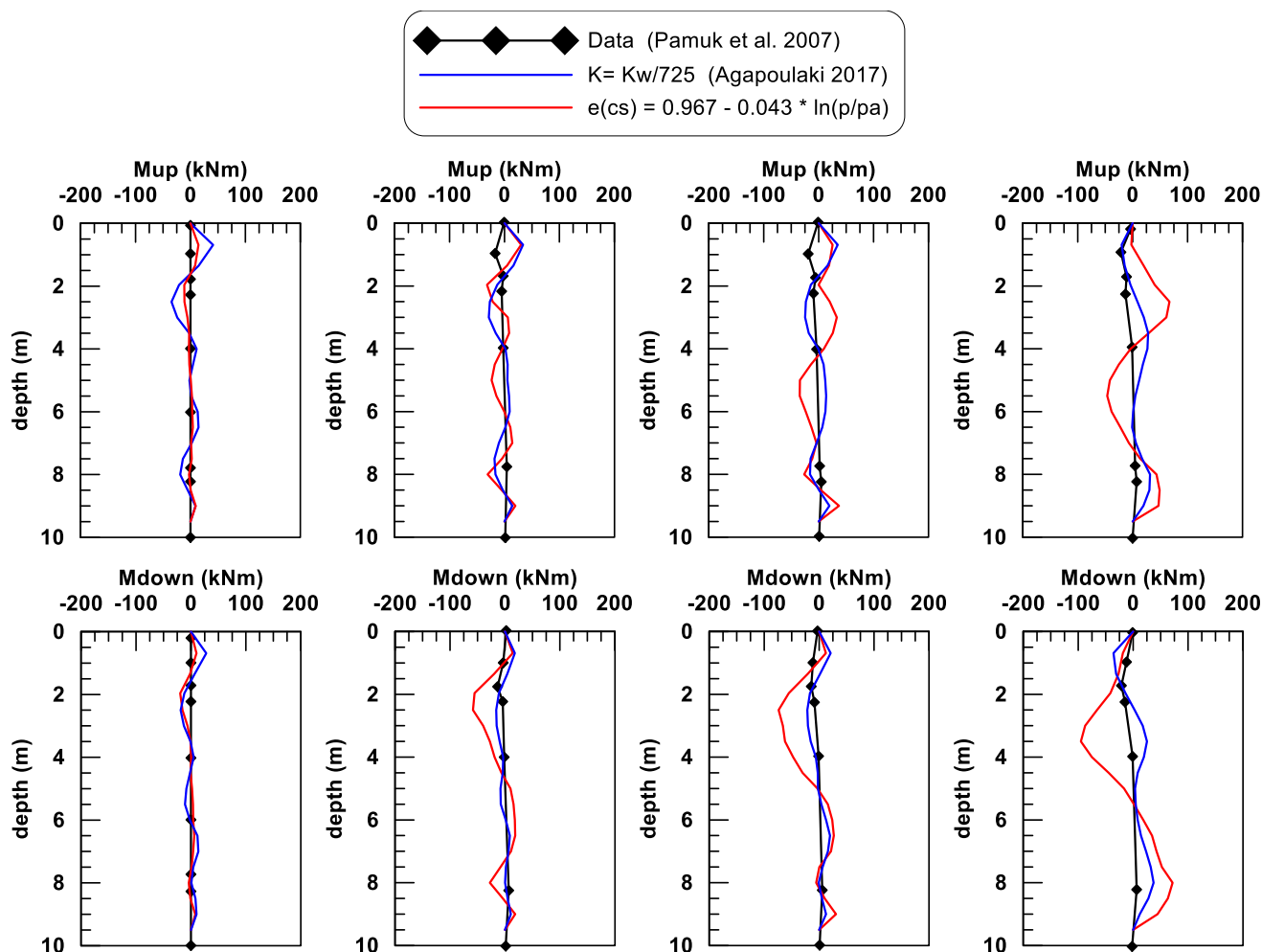
Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.7**, η αμμώδης στρώση αναπτύσσει μεγαλύτερες υπερπίεσεις πόρων (μάλιστα με τοπικές εξάρσεις μεγαλύτερες από $r_u=1$) συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη, ενώ το αντίθετο συμβαίνει ενδιάμεσα στους πασσάλους. Σε κάθε περίπτωση δεν υπήρχαν μετρήσεις πιέσεων πόρων στο πείραμα με το σταθεροποιημένο έδαφος, είναι σαφές όμως ότι δεν υπήρξε ρευστοποίηση ούτε ανάμεσα ούτε εκτός των πασσάλων. Στη συνέχεια, με βάση το **Σχήμα 6.8** προκύπτει ότι η σταθεροποιημένη αμμώδης στρώση

εμφανίζει εξαιρετικά μικρές οριζόντιες μετατοπίσεις, συγκριτικά με τις πολλές δεκάδες cm που προκύπτουν υπό πλευρική εξάπλωση. Οι 2 αριθμητικές προβλέψεις δίνουν και αυτές συγκριτικά πολύ μικρότερες μετατοπίσεις λόγω σταθεροποίησης, αλλά και οι 2 υπερεκτιμούν τις πειραματικές μετατοπίσεις. Συγκριτικά, η καλύτερη προσομοίωση προκύπτει, με πολύ μικρή διαφορά, από την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση (Agaroulaki 2017).



Σχήμα 6.9: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις με το βάθος στο ελεύθερο πεδίο σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.9**, η έστω και μικρή οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους οφείλεται πρακτικώς στη μικρή μετατόπιση της σταθεροποιημένης αμμώδους στρώσης και αυτό επιβεβαιώνεται σε όλα τα χρονικά στιγμιότυπα. Και οι 2 αριθμητικές αναλύσεις επιβεβαιώνουν αυτή τη μορφή μικρής παραμόρφωσης του εδάφους με το βάθος, καθώς οι μετατοπίσεις παραμένουν πρακτικώς μηδενικές σε βάθος 8m, και παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους πλησίον της επιφάνειας. Η ανωτέρω ποιοτική συμφωνία είναι σημαντική για την αξιοπιστία και των 2 αναλύσεων. Σε ποσοτικούς όρους, η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση (Agaroulaki 2017) προβλέπει εξαιρετικά τις μετατοπίσεις του σταθεροποιημένου εδάφους, και η υπερεκτίμηση που εμφανίζεται και στο **Σχήμα 6.8** οφείλεται στην επιφανειακή στρώση. Από την άλλη, η νέα προσέγγιση επιβεβαιώνει την υπερεκτίμηση των μετατοπίσεων που εμφανίζεται και στο **Σχήμα 6.8**, αλλά αυτή αφορά όλα τα βάθη έως τα 8m.



Σχήμα 6.10: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις καμπτικές ροπές των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων K (Agaroulaki 2017).

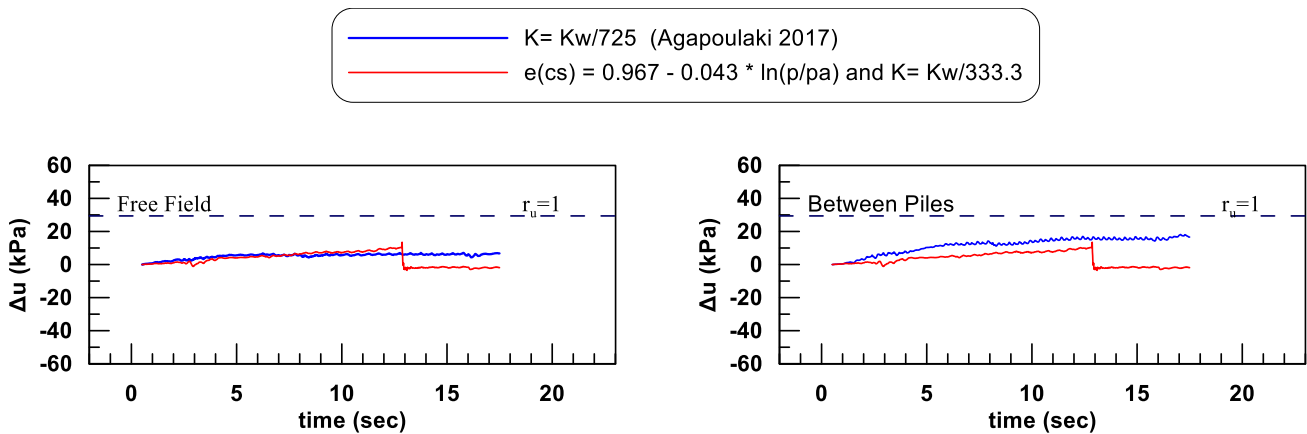
Τέλος, από το **Σχήμα 6.10** προκύπτει ότι οι πολύ μικρές οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω σταθεροποίησης οδηγούν και σε ασήμαντες ροπές στους πασσάλους. Οι 2 αναλύσεις αποδίδουν την τεράστια μείωση της καμπτικής ροπές των πασσάλων λόγω σταθεροποίησης, με την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση (Agaroulaki 2017) να οδηγεί σε πιο ακριβείς (μικρότερες) τιμές, λόγω και των μικρότερων μετατοπίσεων που αυτή προβλέπει.

Συνολικά λοιπόν προκύπτει ότι και οι 2 αριθμητικές προσομοιώσεις είναι ποιοτικώς ορθές, και αποδίδουν την μεγάλη μείωση οριζόντιων μετατοπίσεων και καμπτικών ροπών στους πασσάλους λόγω σταθεροποίησης. Ποσοτικά όμως, η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση (Agaroulaki 2017) δείχνει πιο ακριβής, καθώς υπερεκτιμά ελαφρώς μόνο τις μικρές οριζόντιες μετατοπίσεις και ροπές πασσάλων της δοκιμής.

6.5 Προσομοίωση σταθεροποίησης με επαναπροσδιορισμό της CSL και ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε σταθεροποιημένη στρώση

Όπως και στα Κεφάλαια 4 και 5, η δεύτερη προσομοίωση της σταθεροποίησης είναι ο συνδυασμός των δύο μεθοδολογιών, δηλαδή του επαναπροσδιορισμού της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) του σταθεροποιημένου εδάφους σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση της συμπίεστότητας του υγρού των πόρων. Για την εν λόγω ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων K_w , για την τιμή της συγκέντρωσης κολλοειδούς πυριτίας $CS= 5\%$ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα των Ramuk et al. (2007), προκύπτει από την σχέση 4.4 η τιμή 333,3 για τον διαιρέτη του K_w .

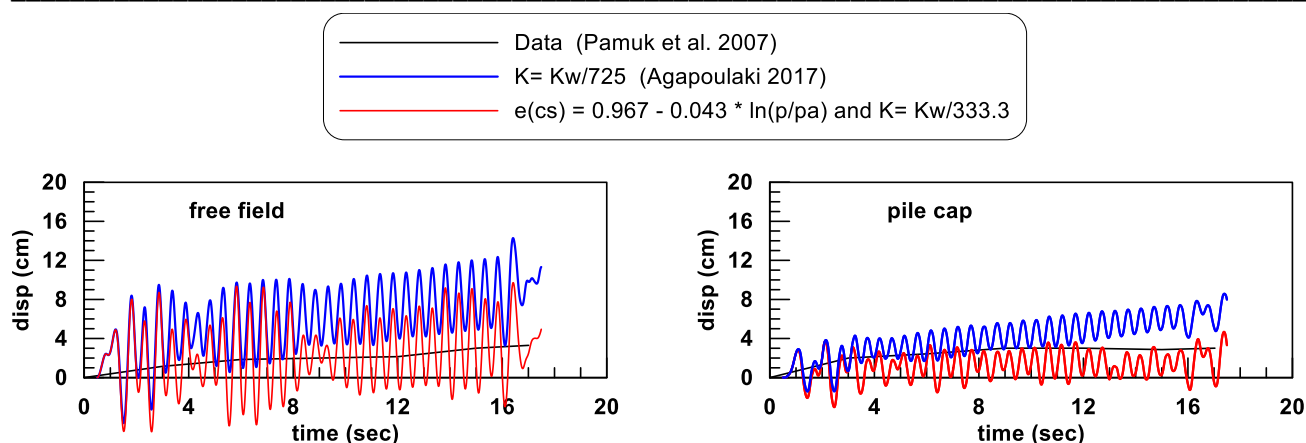
Συνεπώς, στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύγκριση πειραματικών δεδομένων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για αυτή τη δοκιμή, και πιο συγκεκριμένα στα Σχήματα 6.11, 6.12, 6.13 και 6.14 η σύγκριση γίνεται σε όρους ιστοριών υπερπίεσεων πόρων, ιστοριών μετακινήσεων επιφάνειας εδάφους και κεφαλόμετρου, μετατοπίσεων του εδάφους συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές, και καμπυλών ροπών των πασσάλων συναρτήσει του βάθους σε διάφορες χρονικές στιγμές, αντίστοιχα.



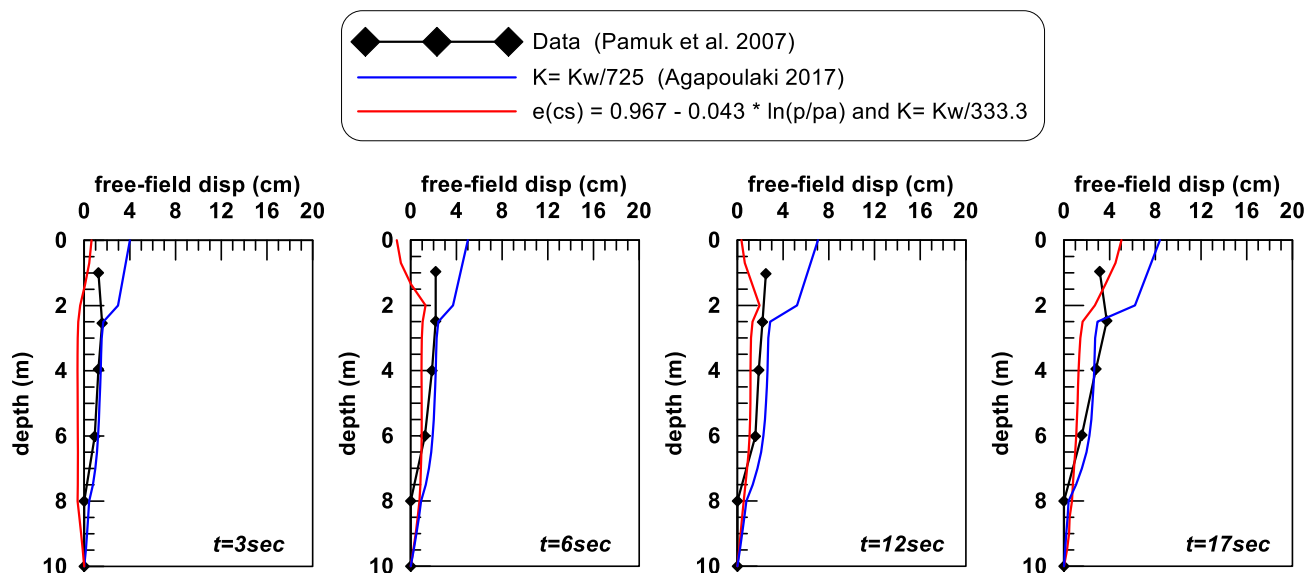
Σχήμα 6.11: Συγκριτικά διαγράμματα 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις ιστορίες υπερπίεσεων πόρων εντός της σταθεροποιημένης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους (τα πειραματικά αποτελέσματα ($r_u=1$) αφορούν τη δοκιμή με τη ρευστοποιημένη στρώση άμμου, και παρουσιάζονται εδώ ενδεικτικά). Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.11**, η αμμώδης στρώση δεν ρευστοποιείται και αυτό προβλέπεται και από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις, με τις (τελικές έστω) υπερπίεσεις πόρων να είναι μικρότερες με τη νέα προσέγγιση (σχεδόν $r_u = 0$). Στη συνέχεια, με βάση το Σχήμα 6.12 προκύπτει ότι και οι 2 αριθμητικές προβλέψεις δίνουν και αυτές συγκριτικά πολύ μικρότερες μετατοπίσεις λόγω σταθεροποίησης, αλλά με σχετική διακύμανση λόγω ταλάντωσης που δεν προκύπτει στο πείραμα. Παρόλα αυτά, η νέα προσέγγιση πρακτικώς συμπίπτει με τις μετρήσεις, κατά μέση τιμή, και συνεπώς θεωρείται ακριβέστερη.

Κεφάλαιο 6: Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης ομάδας πασσάλων σε σταθεροποιημένη αμμώδη στρώση υπό μικρή κλίση

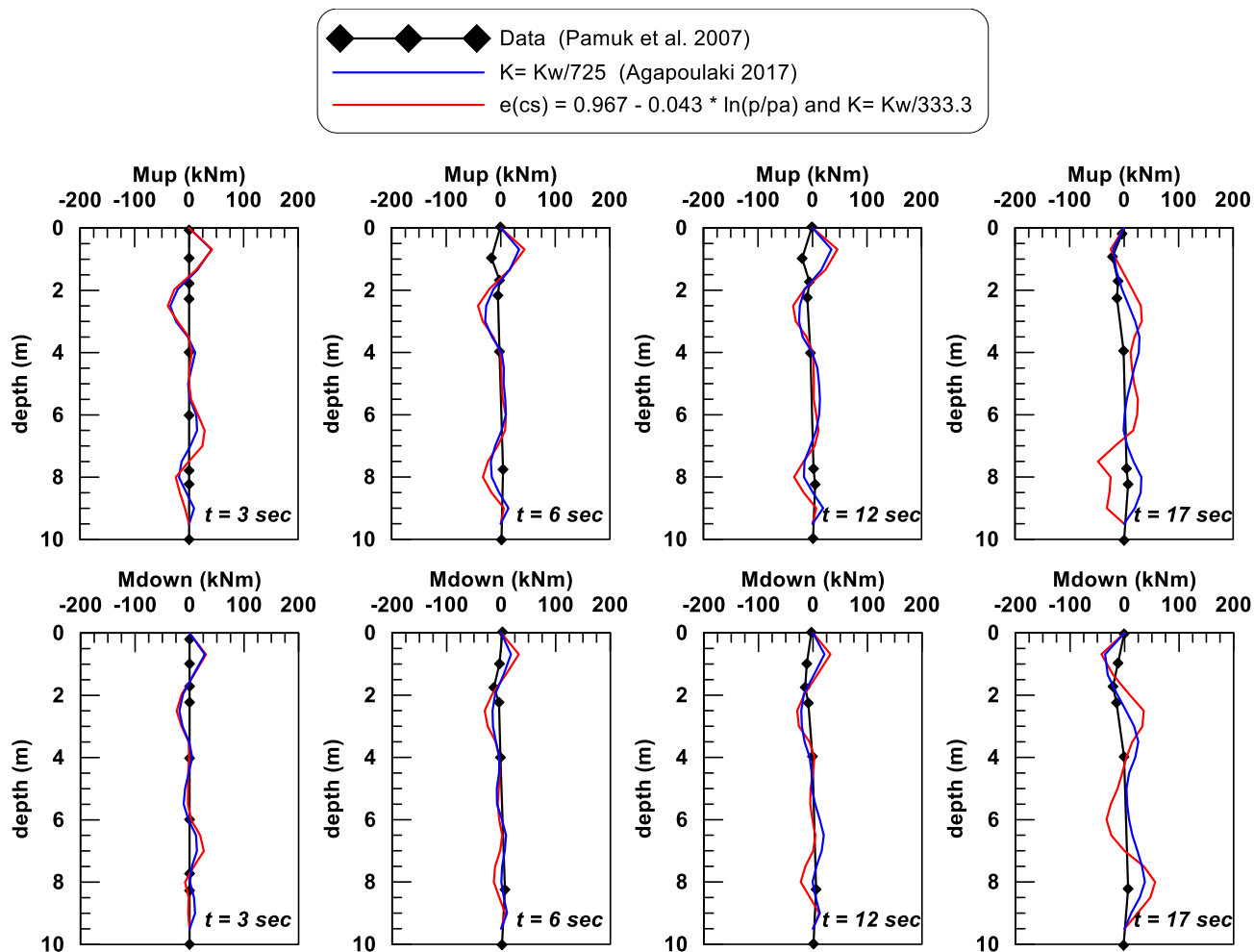


Σχήμα 6.12: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες οριζόντιων μετατοπίσεων επιφανείας, στο ελεύθερο πεδίο (*free field*) και επί του κεφαλόδεσμου (*pile cap*) αντίστοιχα, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017).



Σχήμα 6.13: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις με το βάθος στο ελεύθερο πεδίο σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.13**, και οι 2 αριθμητικές αναλύσεις επιβεβαιώνουν τις μικρές εδαφικές μετατοπίσεις, με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση να αποδίδει καλύτερα τις μετατοπίσεις της σταθεροποιημένης στρώσης αλλά να υπερεκτιμά την επιφανειακή μετατόπιση. Αντιθέτως, η νέα προσέγγιση προβλέπει ακόμη μικρότερες μετατοπίσεις της σταθεροποιημένης στρώσης και τελικώς προβλέπει ορθότερα τις επιφανειακές μετατοπίσεις, υποεκτιμώντας τες ελάχιστα.



Σχήμα 6.14: Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις καμπτικών ροπών των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν τον επαναπροσδιορισμό της CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017).

Τέλος, από το **Σχήμα 6.14** προκύπτει ότι και οι 2 αναλύσεις αποδίδουν την τεράστια μείωση στις καμπτικές ροπές των πασσάλων λόγω σταθεροποίησης. Ποσοτικά, οι 2 αναλύσεις δίνουν συγκρίσιμες τιμές ροπών.

Συνολικά λοιπόν προκύπτει ότι και οι 2 αριθμητικές προσομοιώσεις είναι ποιοτικώς ορθές, και αποδίδουν την μεγάλη μείωση οριζόντιων μετατοπίσεων και καμπτικών ροπών στους πασσάλους λόγω σταθεροποίησης. Ποσοτικά όμως, η νέα προσέγγιση δείχνει να έχει ένα μικρό προβάδισμα ακρίβειας έναντι της υπάρχουσας βέλτιστης προσέγγισης (Agaroulaki 2017), λόγω ακριβέστερης εκτίμησης των επιφανειακών μετατοπίσεων, αν και οι 2 προσεγγίσεις θα μπορούσαν να θεωρηθούν πρακτικώς ισοδύναμες για την εν λόγω δοκιμή φυγοκεντρική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

7.1 Περίληψη – Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία κατοχυρώθηκε αρχικώς μια μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής απόκρισης εδάφους σταθεροποιημένου με κολλοειδή πυριτία. Η νέα αυτή μεθοδολογία έγκειται στον επαναπροσδιορισμό της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) του εδάφους (στο χώρο $e - p$) λόγω σταθεροποίησης, και η χρήση αυτής με υπάρχοντα καταστατικά προσομοιώματα για (μη-σταθεροποιημένες) άμμους (NTUA-SAND, Andrianoopoulos et al. 2010), ελλείπει εξειδικευμένου προσομοιώματος για το νέο γεωϋλικό (σταθεροποιημένο έδαφος). Η ορθότητα και η ακρίβεια της εν λόγω μεθοδολογίας εξετάσθηκε τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, όσο και σε προβλήματα συνοριακών τιμών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη αυτή.

Με εφαλτήριο τη μελέτη των Georgiannou et al. (2017) και την διπλωματική εργασία της Παυλοπούλου (2017) έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων μιας σειράς τριαξονικών δοκιμών σε (φυσική και σταθεροποιημένη) άμμο M31 και προσδιορίσθηκαν ο δείκτης πόρων e_{cs} και η μέση ενεργός τάση p_{cs} στην Κρίσιμη Κατάσταση. Έτσι προέκυψε η νέα θέση της CSL για την σταθεροποιημένη άμμο M31, που είναι μετατοπισμένη σε υψηλότερες τιμές δείκτη πόρων και έχει μεγαλύτερη κλίση. Θεωρώντας ότι η επίδραση της σταθεροποίησης είναι η ίδια για όλες τις άμμους, δηλαδή θεωρώντας ίση μετάθεση και αντίστοιχη αύξηση κλίσης της CSL, προσδιορίσθηκε μια νέα θέση της CSL για την άμμο Nevada για την οποία δεν υπάρχουν αντίστοιχα δεδομένα. Εν συνεχεία, έγιναν προσομοιώσεις ανακυκλικών δοκιμών απλής διάτμησης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Nevada, για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της νέας CSL στις καμπύλες αντοχής στη ρευστοποίηση ($CSR - N_L$, όπου CSR ο λόγος ανακυκλικών τάσεων και N_L ο αριθμός κύκλων για ρευστοποίηση). Όπως ήταν αναμενόμενο, η αντοχή σε ρευστοποίηση αυξάνει σημαντικά, και ποσοτικοποιείται σε όρους διαφοράς του CSR (ΔCSR) και λόγου αύξησης του CSR (RCSR) μεταξύ φυσικού και σταθεροποιημένου εδάφους, για τον ίδιο αριθμό κύκλων N_L . Αποδεικνύεται ότι οι αριθμητικές προβλέψεις της αύξησης της αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους ΔCSR και RCSR) σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου βρίσκονται στο άνω όριο του εύρους της βιβλιογραφίας, όπως έχει προκύψει από ανακυκλικές δοκιμές στο εργαστήριο (για άλλες άμμους).

Στη συνέχεια εκτελέσθηκαν προσομοιώσεις τριών (3) προβλημάτων συνοριακών τιμών, προκειμένου να διακριβωθεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών με τα λογισμικά FLAC και FLAC^{3D}. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν τρία (3) σειρές δυναμικών δοκιμών φυγοκεντρική, μία για τη 1Δ σεισμική απόκριση επίπεδου εδάφους (Gallagher et al. 2007), μία για τη 2Δ σεισμική απόκριση εδάφους υπό μικρή κλίση (Conlee et al. 2012) και μία για την 3Δ σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε έδαφος υπό μικρή κλίση (Pamuk et al. 2007). Ειδικότερα, εξετάσθηκαν η προτεινόμενη μεθοδολογία, δηλαδή ο επαναπροσδιορισμός της CSL του σταθεροποιημένου υλικού, η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση που έγκειται στην σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας K του υγρού των πόρων (Αγαπουλάκη 2017) και μία τρίτη προσέγγιση που αποτελεί τον συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων προσεγγίσεων, δηλαδή τον επαναπροσδιορισμό της CSL παράλληλα με μια ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας K του υγρού των πόρων. Στόχος ήταν η επίτευξη μιας καλύτερης προσέγγισης από την υπάρχουσα βέλτιστη.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτουν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Η προσέγγιση της Αγαπουλάκη (2017) που έγκειται στη σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού των πόρων K (χωρίς αλλαγή στις σταθερές του προσομοιώματος για τον εδαφικό σκελετό) δείχνει να προβλέπει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα όλων των εξετασθέντων δοκιμών τόσο σε επίπεδο μετακινήσεων όσο και σε επίπεδο επιταχύνσεων και ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων. Επισημαίνεται ότι πιστοποιείται η ακρίβειά της και στο νέο προς εξέταση πρόβλημα των Ramuk et al. (2007), το οποίο δεν είχε εξετασθεί στη διδακτορική διατριβή της, προβλέποντας με μεγάλη ακρίβεια τόσο τις προκύπτουσες μετακινήσεις όσο και τα εντατικά μεγέθη των πασσάλων. Συνολικά λοιπόν κρίνεται ως μια αξιόλογη προσέγγιση.
- Ο επαναπροσδιορισμός της CSL του σταθεροποιημένου υλικού (χωρίς αλλαγή στο μέτρο συμπίεσότητας του υγρού πόρων K) οδηγεί σε ποιοτικώς ορθά αποτελέσματα, αλλά υπάρχουν προβλήματα ποσοτικής ακρίβειας. Για παράδειγμα, η ρευστοποίηση καθυστερεί χρονικά αλλά δεν αποφεύγεται τελικώς σε κανένα από τα τρία πειράματα που εξετάστηκαν. Σαν συνέπεια αυτού παρατηρείται μικρή μείωση των επιταχύνσεων πλησίον της επιφάνειας, που δεν είναι συμβατή με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, ούτε οι μετακινήσεις εκτιμώνται σωστά, καθώς γενικώς το σταθεροποιημένο έδαφος προσομοιώνεται πιο ενδόσιμο, απ' ό,τι μετρήθηκε στα πειράματα. Έτσι συνολικά κρίνεται ότι αυτή η προσέγγιση υπολείπεται σε ακρίβεια της υπάρχουσας βέλτιστης προσέγγισης της Αγαπουλάκη (2017).
- Ο συνδυασμός της επαναπροσδιορισμένης CSL με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας K (ελαφρότερη εκείνης της Αγαπουλάκη 2017) οδηγεί και πάλι σε ποιοτικώς ορθά αποτελέσματα, αλλά και σε μικρή αύξηση της ποιοτικής ακρίβειας συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη πρόταση της Αγαπουλάκη (2017) και στα τρία πειράματα που μελετήθηκαν. Αρχικά, αποφεύγεται η ρευστοποίηση (σε συμφωνία με τα πειράματα), και για το λόγο αυτό προβλέπεται ενίσχυση της ταλάντωσης πλησίον της επιφάνειας, σε συμφωνία με τις μετρήσεις στις δοκιμές των Gallagher et al. (2007) και Conlee et al. (2012). Επιπλέον παρατηρείται ελαφρώς καλύτερη εκτίμηση τόσο των οριζοντίων μετατοπίσεων όσο και των καθιζήσεων στα εν λόγω πειράματα, συγκριτικά με τις προβλέψεις της μεθοδολογίας της Αγαπουλάκη (2017).
- Ειδικά για το πείραμα των Ramuk et al. (2007), αναφέρεται ότι ο ως άνω συνδυασμός επαναπροσδιορισμένης CSL με ελαφρά μείωση του K αποδίδει τόσο τη σημαντικότερη μείωση τόσο των μετακινήσεων του εδάφους και των πασσάλων, όσο και την προκύπτουσα μείωση των εντατικών μεγεθών των πασσάλων λόγω σταθεροποίησης. Ποσοτικά, για το εν λόγω πείραμα, η ακρίβεια αυτής της μεθόδου είναι συγκρίσιμη με τις προβλέψεις της μεθοδολογίας της Αγαπουλάκη (2017).

Συνολικά προκύπτει ότι ο επαναπροσδιορισμός της CSL των σταθεροποιημένων εδαφών είναι μια προσέγγιση που ποιοτικώς οδηγεί σε ορθή προσομοίωση της απόκρισής τους. Σε προβλήματα συνοριακών τιμών όμως οδηγεί στην προσομοίωση ενός πιο ενδόσιμου εδάφους συγκριτικά με ό,τι προκύπτει από τις πειραματικές καταγραφές, και αυτό παρά το γεγονός ότι σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου η προβλεπόμενη αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση αντιστοιχεί στο άνω όριο του εύρους της βιβλιογραφίας. Όμως, ο συνδυασμός του επαναπροσδιορισμού της CSL με μια ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας K του υγρού πόρων οδηγεί σε ικανοποιητική ποσοτική ακρίβεια στα προβλήματα συνοριακών τιμών, η οποία είναι συγκρίσιμη και ελαφρώς καλύτερη από την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση των σταθεροποιημένων εδαφών (Αγαπουλάκη 2017) που συνίσταται στη σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού των πόρων K , χωρίς αλλαγή στις σταθερές του προσομοιώματος για τον εδαφικό σκελετό.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παθητική σταθεροποίηση εδαφών με κολλοειδή πυριτία αποτελεί μια σχετικά νέα μέθοδο βελτίωσης εδαφών και επομένως υπάρχουν ακόμα πολλά ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω έρευνας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε μια προσπάθεια κατοχύρωσης μιας νέας μεθοδολογίας αριθμητικής προσομοίωσης των σταθεροποιημένων εδαφών, η οποία βασίστηκε στα αποτελέσματα των περιορισμένων σε αριθμό δοκιμών της βιβλιογραφίας, και συνεπώς προτείνεται προς χρήση με τους περιορισμούς που έχουν οι δοκιμές στις οποίες στηρίχθηκε.

Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία για την προσομοίωση της σταθεροποιημένης άμμου που προέκυψε από συγκρίσεις με δοκιμές φυγοκέντρισης για μικρής έως σχετικώς μεγάλης έντασης διεγέρσεις έχει δύο σκέλη:

- τον επαναπροσδιορισμό της CSL του εδαφικού υλικού
- την ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεσότητας K του υγρού των πόρων.

Όσον αφορά το πρώτο σκέλος, η νέα CSL της άμμου Nevada που εξετάσθηκε στα προβλήματα συνοριακών τιμών δεν μετρήθηκε, αλλά εκτιμήθηκε με βάση αποτελέσματα για άμμο M31 (Georgiannou et al. 2017). Συνεπώς, η ακρίβεια αυτής χρήζει διακρίβωσης. Επιπλέον είναι αναγκαία η εκτέλεση και ανακυκλικών δοκιμών σε σταθεροποιημένη άμμο Nevada, για τη διακρίβωση της αξιοπιστίας στην προβλεπόμενη αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση.

Ένα ακόμα ζήτημα που προκύπτει βάσει του δεύτερου σκέλους της προτεινόμενης μεθοδολογίας και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης είναι η πραγματική τιμή του μέτρου συμπίεσότητας K της κολλοειδούς πυριτίας (ως υγρού πόρων). Αυτό επειδή τόσο η σημαντική μείωση αυτού που προτείνει η Αγαπουλάκη (2017), όσο και η ελαφρότερη μείωση που προτείνεται εδώ βασίζεται σε φαινομενολογική προσέγγιση με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τριών προβλημάτων συνοριακών τιμών, και όχι σε απευθείας μέτρηση του K . Λόγω της φύσης του, η μέτρηση δεν μπορεί να γίνει ευχερώς σε εργαστήρια Πολιτικών Μηχανικών, και χρειάζεται η συνδρομή εργαστηριακών μετρήσεων άλλων ειδικοτήτων μηχανικών (Χημικοί Μηχανικοί, Μηχανικοί Υλικών κλπ.).

Υπογραμμίζεται εδώ ότι όλες οι προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης σταθεροποιημένης άμμου που έχουν γίνει ως τώρα, βασίστηκαν στην «ευφυή» χρήση υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος, ελλείψει κάποιου στοχευμένου προσομοιώματος για το νέο γεωϋλικό (σταθεροποιημένο έδαφος). Η εν λόγω προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι η εφαρμογή της δεν περιορίζεται από τη χρήση του NTUA-SAND, αλλά μπορεί να γίνει με χρήση οποιουδήποτε καταστατικού προσομοιώματος για άμμους. Παρόλα αυτά, η κατάρτιση ενός εξειδικευμένου καταστατικού προσομοιώματος για σταθεροποιημένα εδάφη, αποτελεί την πιο αξιόπιστη λύση για την πρόβλεψη της απόκρισης σταθεροποιημένων εδαφών.

Βιβλιογραφία

- Agapoulaki, G.I, Papadimitriou, A.G. (2015). Numerical analysis of the seismic response of sand passively stabilized against liquefaction, *In Proceedings: XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Edinburgh
- Andrianopoulos K. I., Agapoulaki G. I., Papadimitriou A. G. (2016), “Simulation of seismic response of passively stabilized sand”, *Geotechnical Research*, ICE Publishing, 3(2): 40-53
- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G., Bouckovalas, G.D. (2010a). Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, p. 895-911
- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G., Bouckovalas, G.D. (2010b). Explicit integration of bounding surface model for the analysis of earthquake soil liquefaction. *Intern. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34, p. 1586-1614
- Brinker C.J. and Scherer G.W. (eds) (1990), *Sol-Gel Science: the Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing* . Academic Press, Cambridge, MA, USA.
- Conlee C.T, Gallagher P.M., Boulanger R.W. and Kamai R. (2012) ,Centrifuge Modeling for Liquefaction Mitigation Using Colloidal Silica Stabilizer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 138, p. 1334 – 1348
- Diaz-Rodriguez, J. A., Antonio-Izarraras, V.M., Bandini, P. and Lopez- Molina, J.A., (2008). Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout. *NRC Research Press Canadian Geotechnical Journal*, 45, p. 1345 – 1355
- Gallagher, P.M., Conlee, C.T., Rollins, K.M., (2007a). Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, p. 186-196
- Gallagher, P.M., Mitchell J.K. (2002). Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, p. 1017- 1026
- Gallagher P.M, Pamuk A. and Abdoun T. (2007b), Stabilization of Liquefiable Soils Using Colloidal Silica Grout, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, p. 33-40
- Georgiannou ,V.N, Pavlopoulou E. and Bikos Z. (2017), Mechanical behaviour of sand stabilised with colloidal silica. *Institutions of Civil Engineers (ICE), Geotechnical Research Volume 4 Issue GR1*, p. 1-11
- Kodaka, T., Oka, F., Ohno, Y., Takyu, T., Yamasaki, N. (2005). Modelling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand. *In Proceedings, 1st Japan – US Workshop on Testing, Modelling, and Simulation (GSP 143)*
- Pamuk A., Gallagher P.M, Thomas Z.F, (2007) Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, p. 864–874
- Porcino D. , Marcianò V. and Granata R. (2012). Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand. *NRC Research Press Canadian Geotechnical Journal* , 49, p. 1117–1133

Porcino D., Marcianò V. and Granata R. (2015) Cyclic liquefaction behavior of a moderately cemented grouted sand under repeated loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* ,79, p. 36–46

Vranna A.D. and Tika Th. (2015), Cyclic resistance and shear stiffness properties of a clean sand stabilized with colloidal silica, *Proceedings of the 24th European Young Geotechnical Engineers Conference (EYGEC), Durham, UK*, p. 1-6

Vranna A.D. and Tika Th. (2015), The mechanical behaviour of a clean sand stabilized with colloidal silica, *ICE Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, p. 3443-3448

Vranna A.D. and Tika Th. (2015), Undrained Monotonic and Cyclic Behaviour of a Silty Sand Stabilized with Colloidal Silica, *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*.

Αγαπουλάκη Γ.Ι. (2017), Παθητική Σταθεροποίηση εδαφών έναντι ρευστοποίησης: πειραματική διερεύνηση εισπνευσιμότητας σταθεροποιητή – αριθμητική διερεύνηση σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένων εδαφών και θεμελιώσεων. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Πανάγου Η. – Σιάμπου Δ. (2015), Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης εδαφών και αβαθών θεμελιώσεων μετά από παθητική σταθεροποίηση έναντι ρευστοποίησης. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Παυλοπούλου Ε. (2017), Μηχανική συμπεριφορά άμμων σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτρία, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.