



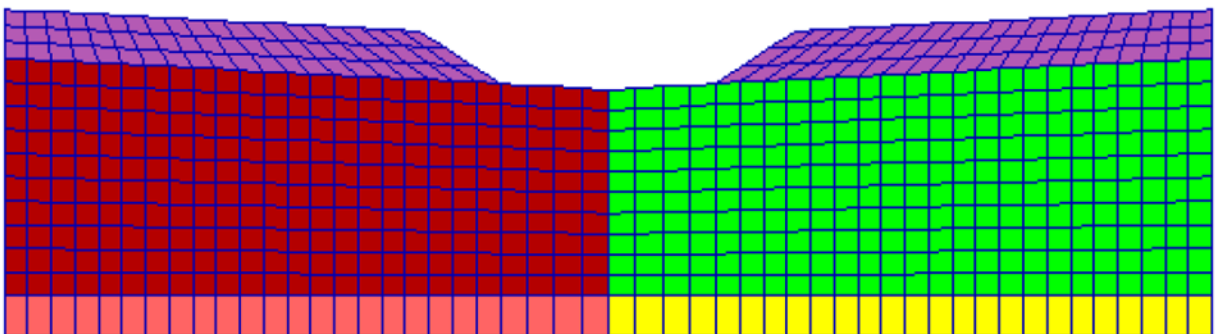
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΕΤΑ
ΑΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Παυλοπούλου Αναστασία

Επιβλέπων: Αχιλλέας Γ. Παπαδημητρίου, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.



DIPLOMA THESIS

NUMERICAL SIMULATION OF THE RESPONSE OF SOILS AND FOUNDATIONS
AFTER THEIR STABILIZATION WITH COLLOIDAL SILICA AGAINST LIQUEFACTION

Pavlopoulou Anastasia

Supervisor: Achilleas G. Papadimitriou, Associate Professor NTUA

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Ευχαριστίες

Με την παράδοση αυτής της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ο κύκλος των σπουδών μου στο Ε.Μ.Π. και σηματοδοτείται μια νέα αρχή. Θα ήθελα, λοιπόν, να δώσω ένα ολόψυχο ευχαριστώ σε όσους και όσες ήταν στο πλάι μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον Αναπλ. Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Παπαδημητρίου Αχιλλέα που ήταν και ο επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεχής και υποδειγματική του καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική του κατάρτιση, διαμόρφωσαν τις πιο ευνοϊκές συνθήκες για τη διεξαγωγή της έρευνάς μου. Η διδασκαλία και οι συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου με εφοδίασαν με το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο για την ενασχόληση με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην υποψήφια διδάκτορα Ε.Μ.Π. Ταξιαρχούλα Λημναίου, για την αμέριστη βοήθεια, τη καθοδήγηση και τη συνεχή συμπαράστασή της από την πρώτη μέχρι και την τελευταία μέρα. Με πολλή υπομονή και επιμονή με βοήθησε όχι μόνο στο επιστημονικό κομμάτι της εργασίας, αλλά με στήριξε και σε φιλικό επίπεδο και γι' αυτό την ευχαριστώ πολύ.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και την αδερφή μου και υποψήφια διδάκτορα του Ε.Μ.Π Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου που με δεν σταμάτησε να με στηρίζει και να με βοηθάει καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αναστασία

Περίληψη

Σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών, η χρήση των πλέον διαδεδομένων μεθόδων αποτροπής της σεισμικής ρευστοποίησης (π.χ. δονητική συμπύκνωση, χρήση στραγγιστηρίων) είναι είτε δύσκολη είτε αδύνατη. Σε τέτοιες θέσεις, για την αποτροπή της ρευστοποίησης συνήθως επιλέγονται μικροπάσσαλοι, ενέματα υψηλού ιξώδους, ή προκατασκευασμένα στραγγιστήρια που τοποθετούνται περιμετρικά της κατασκευής. Τέτοιες μέθοδοι 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 κάτω από την κατασκευή), που όμως αυξάνει ραγδαία μετά από ελεγχόμενο χρόνο (όταν φθάσει στη θέση θεμελίωσης). Η αύξηση του ιξώδους μετατρέπει το υγρό των 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 αυτής μεθόδου βελτίωσης εδαφών στην πράξη χρειάζεται και μια μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής συμπεριφοράς του σταθεροποιημένου εδάφους. Μέχρι στιγμής υπάρχει μόνο μία τέτοια μεθοδολογία (Αγαπουλάκη 2017), η οποία προτείνει τη σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας K του υγρού των πόρων, συγκριτικά με το μέτρο συμπίεστικότητας του νερού K_w ($= 2 \times 10^6$ kPa) χωρίς άλλη επέμβαση στις παραμέτρους του καταστατικού προσομοιώματος που αφορά στον εδαφικό σκελετό. Σε κάθε περίπτωση, η εν λόγω προσπάθεια παραμένει σε ερευνητικό στάδιο διεθνώς, καθώς η ως άνω απομείωση είναι μεγαλύτερη από τις λίγες πειραματικές μετρήσεις αυτής. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προταθεί μια καινούργια μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης μέσω συγκρίσεων με πειραματικές μετρήσεις, κυρίως από δυναμικές δοκιμές σε φυγοκεντριστή της βιβλιογραφίας που αφορούν στη σεισμική απόκριση σταθεροποιημένων άμμων. Ελλείψει ενός εξειδικευμένου καταστατικού προσομοιώματος για τέτοια εδάφη, επιχειρήθηκε η «ευφυής» χρήση του προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) που αφορά σε φυσικές άμμους.

Αυτή η νέα μεθοδολογία προσομοίωσης προέκυψε εν μέρει από την επεξεργασία των πρόσφατων πειραματικών αποτελεσμάτων μιας σειράς μονοτονικών και ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών (σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά από σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία) των Ρανιορούλου and Georgiannou (2021). Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εν λόγω δοκιμών προέκυψαν η βαθμονόμηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31. Δεδομένου ότι οι διαθέσιμες δοκιμές φυγοκεντριστή έχουν εκτελεστεί σε άμμο Nevada και όχι σε άμμο M31 και το προσομοίωμα NTUA-SAND έχει βαθμονομηθεί για φυσική άμμο Nevada έγινε η παραδοχή μιας αναλογίας μεταξύ σταθεροποιημένης και φυσικής άμμου ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι της σταθεροποιημένης άμμου Nevada (με βάση την βαθμονόμηση της άμμου M31).

Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις τριών (3) προβλημάτων συνοριακών τιμών, ώστε να διακριβωθεί η αξιοπιστία της νέας μεθοδολογίας, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών μέσω των λογισμικών FLAC και FLAC^{3D}. Ειδικότερα, προσομοιώθηκαν τρεις (3) σειρές δυναμικών δοκιμών φυγοκεντριστή, 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). Έτσι, καλύφθηκε ένα αρκετά μεγάλο εύρος

προβλημάτων ρευστοποίησης, ώστε να ληφθεί μια ξεκάθαρη εικόνα για την καταλληλότητα εφαρμογής τριών (3) μεθοδολογιών προσομοίωσης της σταθεροποιημένης άμμου. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν: (α) η αναβαθμονόμηση ενός καταστατικού προσομοιώματος που αφορά στον εδαφικό σκελετό (εδώ εμμέσως για της σταθεροποιημένη άμμο Nevada), (β) η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Αγαπουλάκη (2017) για την αποτύπωση της αλλαγής της φύσης του υγρού των πόρων λόγω της εισπίεσης και (γ) μία προσέγγιση που συνδυάζει τις (α) και (β), δηλαδή την αναβαθμονόμηση του προσομοιώματος ταυτόχρονα με μια ελαφρά μόνο μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K του υγρού των πόρων. Από τις παραπάνω συγκριτικές αναλύσεις προσομοιώσεων των δοκιμών φυγοκεντρική συμπεραίνονται τα κάτωθι:

- 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 εξετασμένων δοκιμών σε επίπεδο μετακινήσεων, επιταχύνσεων, υπερπίεσεων πόρων, αλλά και καμπτικών ροπών της πασσαλομάδας του πειράματος των Ramuk et al. (2007).
- Η αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος λόγω σταθεροποίησης της άμμου, χωρίς αλλαγή στο μέτρο συμπίεστότητας του υγρού πόρων συγκριτικά με την τιμή του K_w για το νερό, οδηγεί σε ποιοτικώς ορθά αποτελέσματα, αλλά δεν προσφέρει ποσοτική ακρίβεια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ρευστοποίηση καθυστερεί μεν χρονικά, αλλά δεν αποφεύγεται τελικώς σε καμία από τις προσομοιώσεις, ενώ υπερεκτιμούνται οι μετακινήσεις των σταθεροποιημένων εδαφών σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.
- Ο συνδυασμός της αναβαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K (μικρότερη εκείνης της Αγαπουλάκη 2017) οδηγεί σε ελαφρώς ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη πρόταση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι επιτυγχάνεται ελαφρώς ακριβέστερη προσομοίωση των μετακινήσεων των σταθεροποιημένων άμμων.

Abstract

At areas of existing structures, the mitigation of seismic liquefaction via conventional ground improvement methods (e.g., vibro-compaction, use of drains) is either difficult or impossible to implement. In such cases, the most common mitigation methods (micropiles, high viscosity grouting, perforated drains) applied at the perimeter of the structure 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 and promising 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 (thus allowing its easy injection). Its viscosity gradually increases after well-controlled time, when the material 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 this new improvement method in practice requires a methodology for numerical simulation of the seismic response of stabilized soils. Until now there is only one pertinent methodology (Agapoulaki 2017), which proposes the significant reduction of the compressibility modulus of the pore fluid in comparison to that of the water K_w ($= 2 \times 10^6$ kPa) without altering the constants of the constitutive model that refers to the sand skeleton. The scope of this thesis is to propose a new numerical methodology based on 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 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.

This new simulation methodology came about partly from the processing of the recent series of monotonic and cyclic triaxial tests performed by Pavlopoulou and Georgiannou (2021) on both untreated and treated M31 sand samples. The processing of the results led to the calibration of the treated and untreated sand M31. Since the available centrifuge tests were performed on Nevada sand rather than M31 and the NTUA-SAND model was calibrated for untreated Nevada sand, a calibration ratio between model parameters for treated and untreated sand was assumed in order to calculate the parameters of the treated Nevada sand (on the basis of the calibration of M31 sand).

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 problems where liquefaction occurs, thus providing a reliable validation procedure of the examined simulation methodologies. These include: (a) the re-calibration of a constitutive model for the sand skeleton (here indirectly for stabilized Nevada sand), (b) the significant reduction of the pore fluid bulk modulus K (the optimal existing methodology according to Agapoulaki 2017) for reflecting the change in nature of the pore fluid due to gelation and (c) a combination of (a) and (b) above, i.e. the re-calibration of the constitutive model concurrently with a mild reduction of the pore fluid bulk modulus K . From the above comparison of numerical simulations, the following conclusions were driven:

- The significant reduction of the pore fluid modulus K , without any 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 re-calibration of the constitutive model due to sand stabilization, without any change in the pore fluid bulk modulus from its value K_w for water, leads to qualitatively accurate results, but does not provide quantitative accuracy. Indicatively, liquefaction is delayed, but is not avoided in any of the simulations, while displacements of stabilized sands are over-predicted in comparison to experimental measurements.
- The combination of re-calibration of the constitutive model 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 of stabilized sands is ensured.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή.....	1
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος.....	1
1.2 Στόχος της Εργασίας.....	3
1.3 Διάρθρωση της Εργασίας.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Παθητική Σταθεροποίηση στην Βιβλιογραφία.....	5
2.1 Κολλοειδής Πυριτία ως σταθεροποιητής.....	5
2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών.....	5
2.1.2 Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM.....	5
2.1.3 Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που αφορούν στην παθητική σταθεροποίηση.....	6
2.2 Εργαστηριακές μελέτες Παθητικής Σταθεροποίησης.....	7
2.2.1 Μελέτη των Gallagher and Mitchell (2002).....	7
2.2.2 Μελέτη των Diaz-Rodriquez et al. (2008).....	8
2.2.3 Μελέτες των Porcino et al. (2011) και Porcino et al. (2012).....	10
2.3.4 Μελέτη των Pavaloroulou και Georgiannou (2021).....	17
2.3 Αριθμητική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών με κολλοειδή πυριτία.....	21
2.3.1 Προσέγγιση των Andrianopoulos et al. (2016).....	21
2.3.2 Προσέγγιση του Τυπτηρή (2017).....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Καταστατική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς φυσικής άμμου.....	25
3.1 Γενικά.....	25
3.2 Μηχανική συμπεριφορά φυσικής άμμου.....	25
3.2.1 Η άμμος M31.....	25
3.2.2 Στραγγιζόμενες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης.....	26
3.2.2 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης.....	30
3.2.3 Αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική δοκιμή.....	31
3.3 Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND.....	33
3.4 Προσομοίωση της άμμου M31 με χρήση του NTUA-SAND.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Καταστατική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένης άμμου.....	45
4.1 Γενικά.....	45
4.2 Μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένης άμμου.....	45
4.2.1 Στραγγιζόμενες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης.....	45
4.2.2 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης.....	48

4.2.3 Αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική δοκιμή.....	50
4.3 Προσομοίωση της σταθεροποιημένης άμμου M31 με χρήση του NTUA-SAND	52
4.4 Προσομοίωση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada με χρήση του NTUA-SAND	60
4.4.1 Στραγγιζόμενες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης	61
4.4.2 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης	64
4.4.3 Αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική δοκιμή.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αριθμητική προσομοίωση μονοδιάστατης σεισμικής απόκρισης οριζόντιας σταθεροποιημένης εδαφική στρώσης.....	71
5.1. Περιγραφή δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρισης των Gallagher et al. (2007)	71
5.2 Προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρισης των Gallagher et al. (2007)	72
5.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος (προσέγγιση 1)	73
5.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με συνδυασμό αναβαθμονόμησης προσομοιώματος και μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού πόρων (προσέγγιση 2).....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό ήπια κλίση	79
6.1. Περιγραφή δυναμικών δοκιμών φυγοκέντρισης των Conlee et al. (2012)	79
6.2 Προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρισης CTC01 των Conlee et al. (2012).....	81
6.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος (Προσέγγιση 1).....	84
6.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με συνδυασμό αναβαθμονόμησης προσομοιώματος και μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού πόρων (Προσέγγιση 2)	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης ομάδας πασσάλων σε σταθεροποιημένη αμμώδη στρώση υπό μικρή κλίση	93
7.1. Περιγραφή δυναμικών δοκιμών φυγοκέντρισης των Pamuk et al. (2007)	93
7.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκεντρική για σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε πλευρικός εξαπλούμενο έδαφος.....	94
7.3 Προσομοίωση πλευρικής εξάπλωσης για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε φυσική αμμώδη στρώση	97
7.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος (Προσέγγιση 1).....	100
7.5 Προσομοίωση σταθεροποίησης με συνδυασμό αναβαθμονόμησης προσομοιώματος και μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού πόρων (Προσέγγιση 2)	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	107
8.1 Περίληψη – Συμπεράσματα	107
8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	108
Βιβλιογραφία.....	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Η ρευστοποίηση χονδρόκοκκων εδαφών (άμμοι, αμμοχάλικα, μη πλαστικές αμμοιούλες) θεωρείται μία από τις πιο επιβλαβείς φυσικές καταστροφές για τα δομικά έργα και τα έργα υποδομής, κυρίως κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων. Την ώρα της δυναμικής φόρτισης, το κορεσμένο χονδρόκοκκο έδαφος αδυνατεί να συμπιεστεί (λόγω αδυναμίας διαφυγής του νερού στα λίγα δευτερόλεπτα της διέγερσης), με αποτέλεσμα την αύξηση των πιέσεων πόρων του νερού. Σύμφωνα λοιπόν, με την αρχή της ενεργού τάσης, όσο η πίεση πόρων αυξάνει, η ενεργός τάση μειώνεται, και μπορεί εν δυνάμει να μηδενιστεί. Στην περίπτωση αυτή, η διατμητική αντοχή του εδάφους γίνεται σχεδόν μηδενική, παρατηρείται απότομη αύξηση παραμορφώσεων του εδάφους, άρα και μεγάλες μετακινήσεις στα έργα 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), την σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) και τη διευκόλυνση της αποτόνωσης των υπερ-πιέσεων των πόρων (π.χ. με χρήση στραγγιστηρίων). Το μεγάλο πρόβλημα προκύπτει σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών, κατά τη 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 για τη βελτίωση (π.χ. δονήσεις). Επιπρόσθετα, η παράλληλη λειτουργία της κατασκευής σε συνδυασμό με τις εργασίες αυτές αποτελεί πολλές φορές περιοριστικό παράγοντα (π.χ. νοσοκομεία). Παράλληλα, 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.

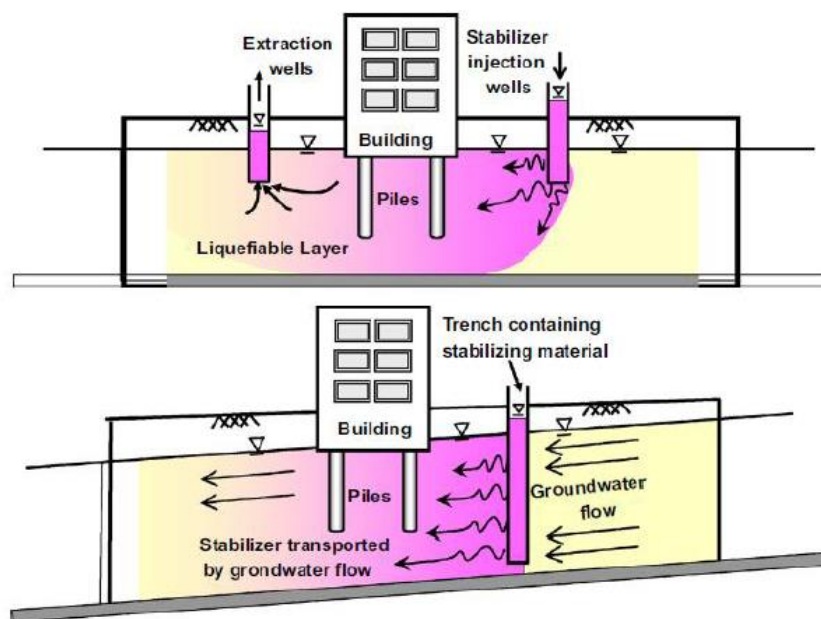
Για τους παραπάνω λόγους, οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για βελτίωση εδαφών έναντι ρευστοποίησης σε υφιστάμενες κατασκευές είναι:

- Τοποθέτηση μικροπασσάλων ή διαφραγματικού τοίχου στην περίμετρο
- Εισπίεση ενέματος (grouting)
- Έμπηξη στραγγιστηρίων με μορφή διακορευμένων σωλήνων περιμετρικά των κτηρίων

Παρόλα αυτά, οι μεθοδολογίες αυτές δε 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. Επιπρόσθετα, έχουν και υψηλό κόστος εφαρμογής, γεγονός που πάντα αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα. Η παθητική στερεοποίηση είναι μια εναλλακτική, πολλά υποσχόμενη μέθοδος βελτίωσης, η οποία δεν παρουσιάζει τα παραπάνω προβλήματα. Μελετήθηκε και παρουσιάστηκε αρχικά από την Gallagher (2000) και έχει αποτελέσει έκτοτε αντικείμενο έρευνας διεθνώς. Η μεθοδολογία συνίσταται στα εξής:

- Εισπίεση με χαμηλή πίεση ενός σταθεροποιητή (stabilizer) στο έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής. Ο σταθεροποιητής αποτελείται από νάνο-σωματίδια 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 βελτίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς. Ο σταθεροποιητής έχει αρχικά πολύ χαμηλό ιξώδες (εφάμιλλο με του νερού) που επιτρέπει την εύκολη εισπίεση του στο έδαφος, ενώ προοδευτικά αυξάνει με την πάροδο του χρόνου μέχρις ότου να φθάσει τη 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 (Pamuk 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. Η εισπίεση στην περιοχή της θεμελίωσης ενός κτιρίου μπορεί να γίνει είτε μέσω γεωτρήσεων εισπίεσης και άντλησης 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 (Σχήμα 1.1). Το κόστος της μεθόδου θεωρείται συγκρίσιμο με αυτά των υπάρχουσών μεθοδολογιών εδαφοπασσάλων (grouting) 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 21ου αιώνα. Επομένως τα υλικά που χρησιμοποιούνται 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 κολλοειδούς πυριτίας ως υλικού 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. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατοχύρωση μιας νέας μεθοδολογίας αριθμητικής προσομοίωσης, βασιζόμενη σε συγκρίσεις με πειραματικές μετρήσεις σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου και σε πειράματα φυγοκεντριστή, 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 1D σεισμική απόκριση οριζόντιου σταθεροποιημένου εδάφους.
- Conlee et al. (2012), που αφορά στη 2D σεισμική απόκριση σταθεροποιημένης στρώσης με μικρή κλίση.
- Ramuk et al. (2007), που αφορά στην 3D 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 Πολιτικού Μηχανικού επί σταθεροποιημένων εδαφών.

1.3 Διάρθρωση της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου. Συνοπτικά :

- Στο Κεφάλαιο 2 διερευνάται η υπάρχουσα σχετική βιβλιογραφία, με έμφαση τόσο στα χαρακτηριστικά της κολλοειδούς πυριτίας, όσο και στις υπάρχουσες αριθμητικές προσομοιώσεις.
- Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μεθοδολογία καταστατικής προσομοίωσης της μηχανικής απόκρισης φυσικής άμμου.
- Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η μεθοδολογία καταστατικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένης άμμου.
- Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζεται η ακρίβεια της μεθοδολογίας προσέγγισης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4, σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του πειράματος φυγοκεντριστή των Gallagher et al. (2007), αλλά και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση, αλλά και συνδυασμό των δύο.
- Στο Κεφάλαιο 6 διερευνάται η αξιοπιστία των ίδιων μεθοδολογιών προσομοίωσης στην προσομοίωση πειράματος φυγοκεντριστή των Conlee et al. (2012).

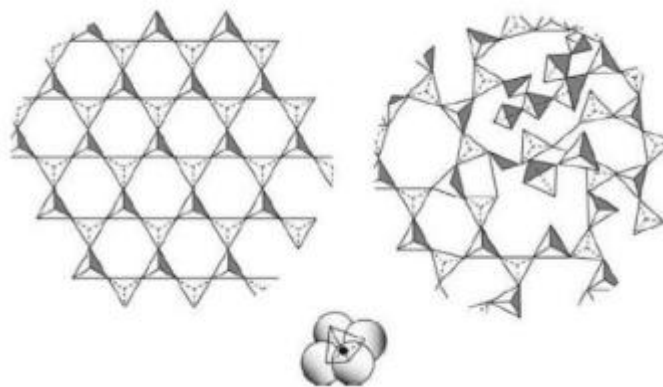
- Στο Κεφάλαιο 7 εξετάζεται η ορθότητα και η ακρίβεια των εν λόγω μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με τις μετρήσεις του πειράματος φυγοκεντριστή των Ramuk et al. (2007).
- Στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα της εν λόγω εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, επί του ίδιου αντικειμένου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Παθητική Σταθεροποίηση στην Βιβλιογραφία

2.1 Κολλοειδής Πυριτία ως σταθεροποιητής

2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών

Η κολλοειδής επιστήμη μελετά συστήματα που αποτελούνται από κινητικές ομάδες, οι οποίες έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από τις ατομικές διαστάσεις ($>1\text{nm}$) και ταυτόχρονα αρκετά μικρό ($<1\mu\text{m}$), ώστε να μην επηρεάζονται από τις βαρυτικές δυνάμεις. Συνεπώς, με βάση αυτές τις διαστάσεις τα κολλοειδή σωματίδια διαφοροποιούνται από τα αιωρήματα και από τα πραγματικά διαλύματα. Τα κολλοειδή σωματίδια χωρίζονται σε διακριτικά και μη διακριτά. Η διάταξη της δομής των ατόμων ενός κολλοειδούς σωματιδίου μπορεί να είναι είτε κρυσταλλική είτε άμορφη, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Κρυσταλλική και άμορφη διάταξη της βασικής δομικής ιοντικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$
(Bergna και Roberts 2006)

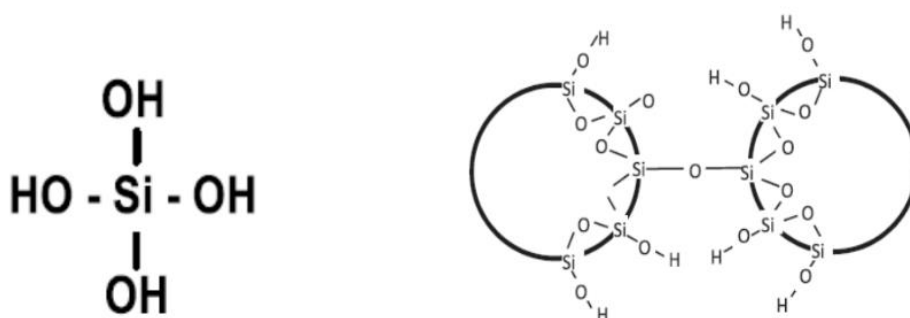
Εξαιτίας των μικροσκοπικών διαστάσεων τους, ο λόγος επιφάνειας/όγκου προς μάζα ή επιφάνειας/μάζας είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές για την πυριτία Ludox-SM (που χρησιμοποιείται στο Ε.Μ.Π., βλ. παρ. 2.1.2) ο λόγος αυτός ισούται με $345\text{ m}^2/\text{g}$. Οι ιδιότητες των επιφανειών και των διεπιφανειών καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα αλληλοεπιδράσουν τα σωματίδια. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μπορεί να είναι είτε απωστικές (ηλεκτροστατικές) είτε ελκτικές (Van der Waals). Ανάλογα με το ποιες υπερτερούν καθορίζεται και η φύση του διαλύματος.

2.1.2 Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM

Η κολλοειδής πυριτία που έχει χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών στο Ε.Μ.Π. ονομάζεται Ludox-SM στο εμπόριο και είναι μια υδάτινη διασπορά διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας μεγέθους 7 nm . Τα σωματίδια είναι συμπαγή και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή. Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας, όπως έρχεται από το εμπόριο, έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 ίση με 30% κατά βάρος και είναι σταθεροποιημένο σε βασικό $\text{pH}=10$ με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na_2O . Το ιξώδες του υγρολύματος ισούται με $5,5\text{ cP}$ (το ιξώδες του νερού σε συνήθη θερμοκρασία ισούται με 1cP). Το ιξώδες του υγρολύματος μπορεί να μειωθεί με αραίωση, η οποία οδηγεί και σε ποσοστά κατά βάρος πυριτίας μικρότερα από 30%, ανάλογα με τη χρήση.

Η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευση της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Η διάρκεια ζωής

της μπορεί να υπερβεί τα 25 χρόνια και παράλληλα προτείνεται για την καλύτερη δυνατή διατήρηση της να αποθηκεύεται σε ξηρό περιβάλλον θερμοκρασίας 20-25°C.



Σχήμα 2.2 (α) Δομή μονομερούς σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας, (β) δεσμοί σιλοξάνης μεταξύ σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά την γελοποίηση (Moridis et al. 1995)

2.1.3 Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που αφορούν στην παθητική σταθεροποίηση

Μερικές από τις φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας σχετίζονται άμεσα με την παθητική σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών, η οποία επιτυγχάνεται μέσω διοχέτευσης κολλοειδούς πυριτίας στους εδαφικούς πόρους. Λόγω του χαμηλού ιξώδους της η πυριτία μπορεί να διοχετευτεί στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών υπό χαμηλή υδραυλική κλίση. Παράλληλα, η πυριτία έχει την δυνατότητα (με την ρύθμιση του pH της και της περιεκτικότητας σε άλατα) να σχηματίσει αρκετά γρήγορα γέλη. Η ταχεία αυτή γελοποίηση καθιστά εφικτή την πλήρωση των εδαφικών πόρων με το υγρόλυμα της πυριτίας χωρίς αυτό να αντικατασταθεί αργότερα από το νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Οι κύριες φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που αφορούν στην παθητική σταθεροποίηση κατά τους Brinker και Scherer (1990) παρουσιάζονται παρακάτω:

A) 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 πολύ μεγαλύτερο σύμπλεγμα. Την ώρα που δημιουργείται η γέλη (gel point) υπάρχουν ακόμη ελεύθερα συμπλέγματα εκτός σκελετικής δομής, που αναμένεται να ενωθούν με αυτή μεταγενέστερα προσδίδοντας της επιπλέον στιβαρότητα.

B) 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 περαιτέρω. 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.

Γ) Ξήρανση (Drying)

Είναι η απομάκρυνση του νερού από τους πόρους της γέλης υπό συνθήκες συνήθους θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή σχεδόν αλλάζει τη διφασικότητα του υλικού, κάνοντας το εν γένει τριφασικό και η συμπεριφορά του θα μπορούσε να προσομοιαστεί με αυτή ενός ακόρεστου εδάφους.

Δ) Μηχανισμός αυτό-ίασης του σταθεροποιημένου εδάφους (self-healing mechanism)

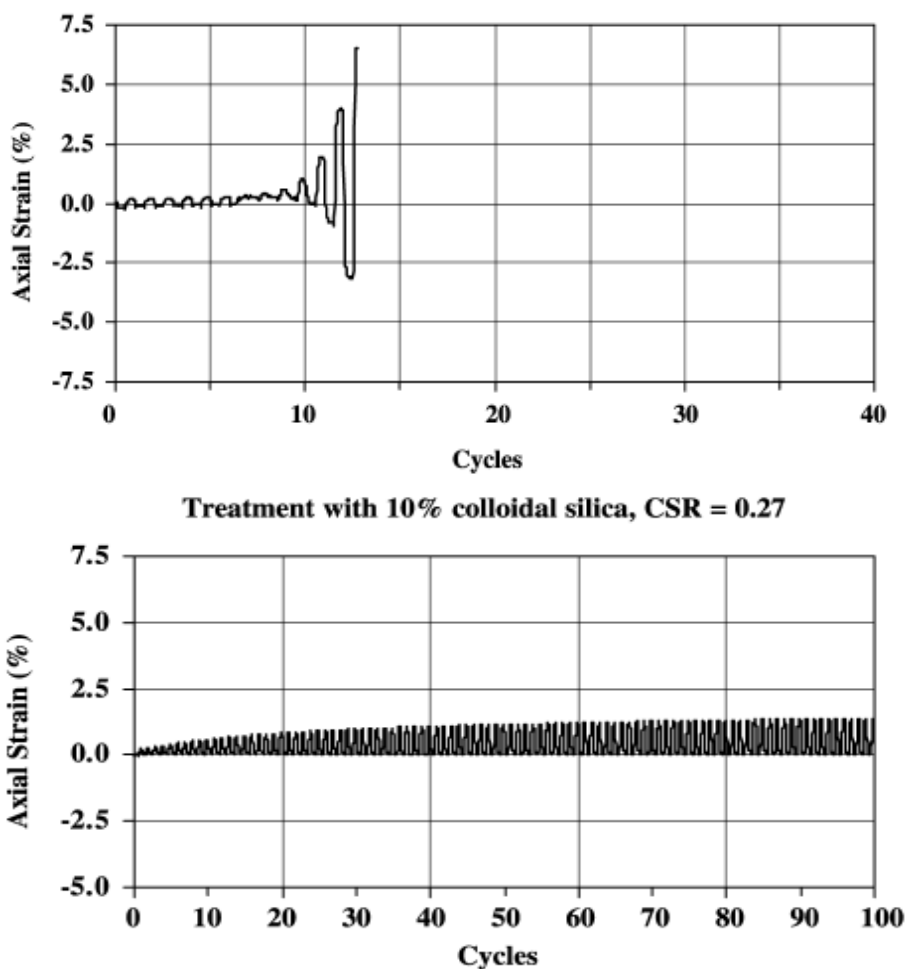
Μετά από μερική καταστροφή των δεσμών του σκελετικού δικτύου (π.χ. ένα έντονο σεισμικό γεγονός), το σταθεροποιημένο έδαφος θα εκτονώσει αργά τις παραμένουσες πιέσεις, μέσω καθιζήσεων που θα φέρουν πιο κοντά τα «σπασμένα κομμάτια» του δικτύου (πυριτικές αλυσίδες), με συνέπεια να δημιουργηθούν νέοι δεσμοί σιλοξάνης, και το δίκτυο να αρχίσει να αποκτά ξανά στιβαρότητα, ενώ γίνεται λιγότερο διαπερατό. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται αυτό-ίαση και μπορεί να παρατηρηθεί εργαστηριακά και κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων εδαφών.

2.2 Εργαστηριακές μελέτες Παθητικής Σταθεροποίησης

Για να εξακριβωθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου έχουν διεξαχθεί διάφορες εργαστηριακές μελέτες που επικεντρώνονται σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστεί η αντίσταση του σταθεροποιημένου (με κολλοειδή πυριτία) εδάφους στην ρευστοποίηση. Συγκεκριμένα, η αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση ορίζεται από τους κύκλους ανακυκλικής φόρτισης συγκεκριμένου εύρους τάσεων που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους (DA) καθορισμένης τιμής (π.χ. 3%). Για παράδειγμα, σε ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές ως DA ορίζεται η μέγιστη διαφορά σε παραμόρφωση που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου κύκλου θλίψης και εφελκυσμού. Ιστορικά, στις περισσότερες εργαστηριακές μελέτες, η αντίσταση σε ρευστοποίηση καταγραφόταν χωρίς να γίνεται μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων (Gallagher και Mitchell 2002). Όμως, σε πιο πρόσφατες μελέτες (Porcino et al. 2012, Pavnlorouliou και Georgiannou 2021) πραγματοποιείται μέτρηση της πίεσης πόρων, και έτσι γίνεται πιο κατανοητή η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων.

2.2.1 Μελέτη των Gallagher and Mitchell (2002)

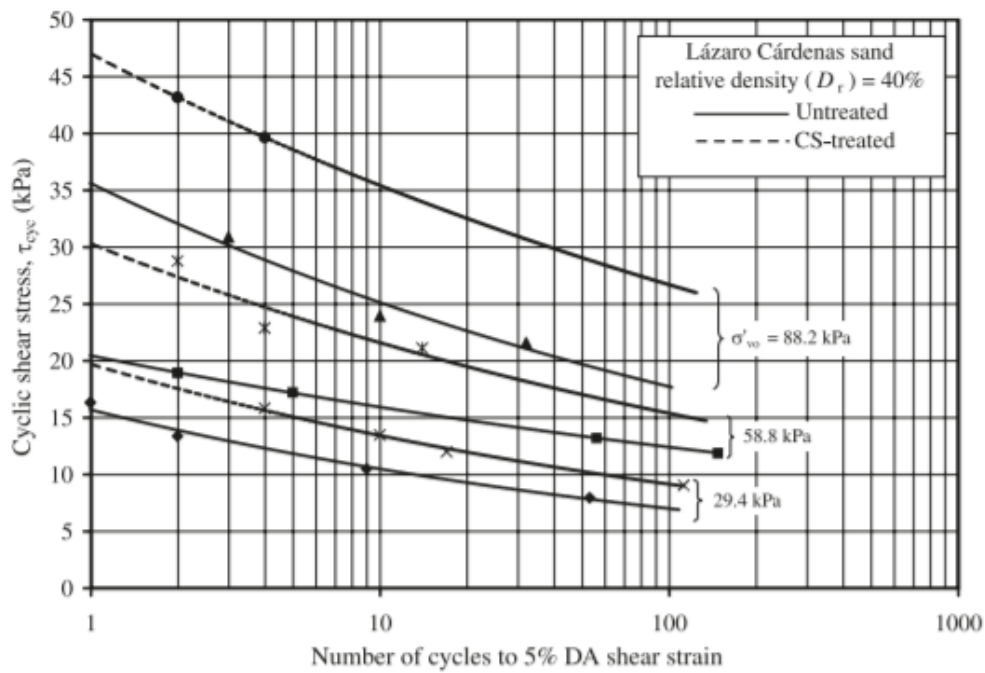
Οι Gallagher και Mitchell (2002) διεξήγαγαν ιστορικά τις πρώτες σχετικές μελέτες με χρήση αστράγγιστων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια άμμου Monterey No. 0/30 με και χωρίς προσθήκη κολλοειδούς πυριτίας. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφύσηση της ξηρής άμμου στο υγρόλυμα πυριτίας από συγκεκριμένο ύψος για να εξασφαλιστεί ο κορεσμός σε πυριτία του δοκιμίου. Τα δοκίμια έχουν σχετική πυκνότητα $D_r=22\%$ και εύρος ποσοστού σταθεροποιητή 5-20% κατά βάρος. Η σταθεροποίηση με Ludox-SM οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίησης συγκριτικά με τα δοκίμια άμμου χωρίς πυριτία. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι αξονικές παραμορφώσεις για καθαρή και σταθεροποιημένη άμμο σε λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.27$, όπου CSR για τριαξονικές δοκιμές δίνεται ως ο λόγος $\Delta q/2r'_i$, με Δq το επιβαλλόμενο εύρος της αποκλίνουσας τάσης $q = (\sigma_v - \sigma_h)$ και r'_i είναι η μέση ενεργός τάση $= (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$ στην αρχή της δοκιμής. Η άμμος ανέπτυξε αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους (double amplitude) $DA=5\%$ σε 12 κύκλους φόρτισης και κατέρρευσε στους 13. Αντίθετα, η σταθεροποιημένη άμμος με ποσοστό κατά βάρος πυριτίας $CS = 10\%$ ανέπτυξε μικρές αξονικές παραμορφώσεις που συσσωρεύονταν κατά την διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης, φτάνοντας την τιμή $DA=5\%$ έπειτα από 276 κύκλους χωρίς το δοκίμιο να οδηγηθεί σε κατάρρευση.



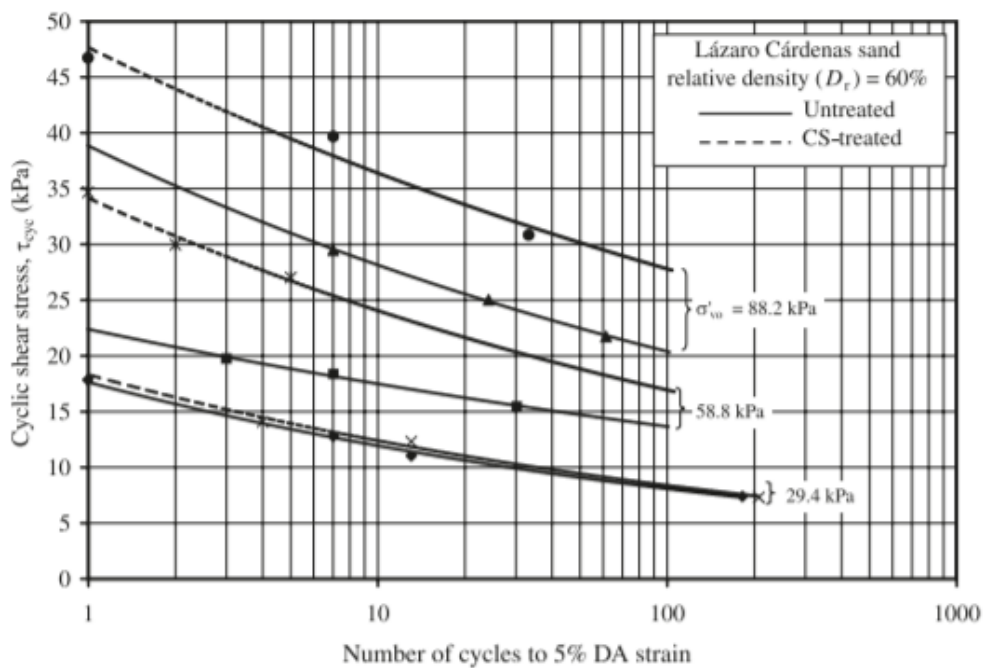
Σχήμα 2.3 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές: (α) άμμος, (β) σταθεροποιημένη άμμος (Gallagher and Mitchell (2002))

2.2.2 Μελέτη των Diaz-Rodriguez et al. (2008)

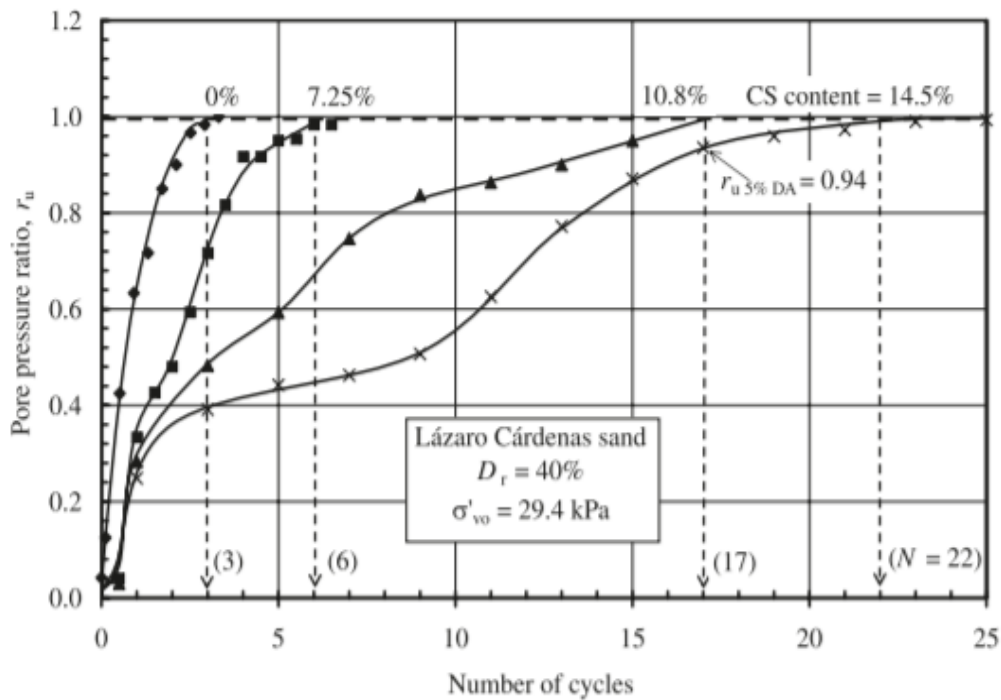
Οι Diaz-Rodriguez et al. (2008) διεξήγαγαν μια σειρά από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης υπό σταθερό όγκο για να αποφύγουν την μέτρηση της πίεσης πόρων κατά την αστράγγιστη φόρτιση σύμφωνα με τους Finn and Vaid (1977). Στην εργαστηριακή μελέτη των Diaz-Rodriguez et al. 2008 χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια άμμου Lazaro Carenas και σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό κατά βάρος πυριτίας στο σταθεροποιητή CS=14.5%, της οποίας ο τύπος δε διευκρινίζεται στη δημοσίευση (δεν ήταν αναγκαστικά Ludox-SM). Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε είναι κακής διαβάθμισης, με 11.5% ποσοστό λεπτόκοκκων με $e_{max}=1.17$, $e_{min}=0.77$ και $D_{50}=0.17mm$. Τα δοκίμια άμμου και σταθεροποιημένης άμμου είχαν αρχικές ενεργές τάσεις $\sigma'_{v0}=29.4$ kPa, $\sigma'_{v0}=58.8$ kPa και $\sigma'_{v0}=88.2$ kPa. Ακόμη, για να γίνει μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σχετικής πυκνότητας $Dr=40\%$ και $Dr=60\%$. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών στα Σχήματα 2.4 και 2.5 προκύπτει σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους έναντι αυτής της φυσικής άμμου για 10 κύκλους φόρτισης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε αύξηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου έναντι του φυσικού εδάφους με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης. Ωστόσο η βελτίωση αυτή είναι πολύ μικρή σε χαμηλές τάσεις ($\sigma'_{v0} < 50kPa$). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι χρειάζονται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στο σταθεροποιημένο έδαφος έναντι του φυσικού ώστε να γίνει ο λόγος υπερπίεσης πόρων ($r_u = \Delta u / \sigma'_{v0}$) ίσος με 1, όπου Δu είναι η υπερπίεση πόρων και σ'_{v0} η αρχική ενεργός τάση. Τέλος, η αύξηση του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας στο σταθεροποιητή οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντίστασης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης (βλ. Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.4 Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=40\%$ (Diaz-Rodriquez et al. 2008).



Σχήμα 2.5 Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=60\%$ (Diaz-Rodriquez et al. 2008).

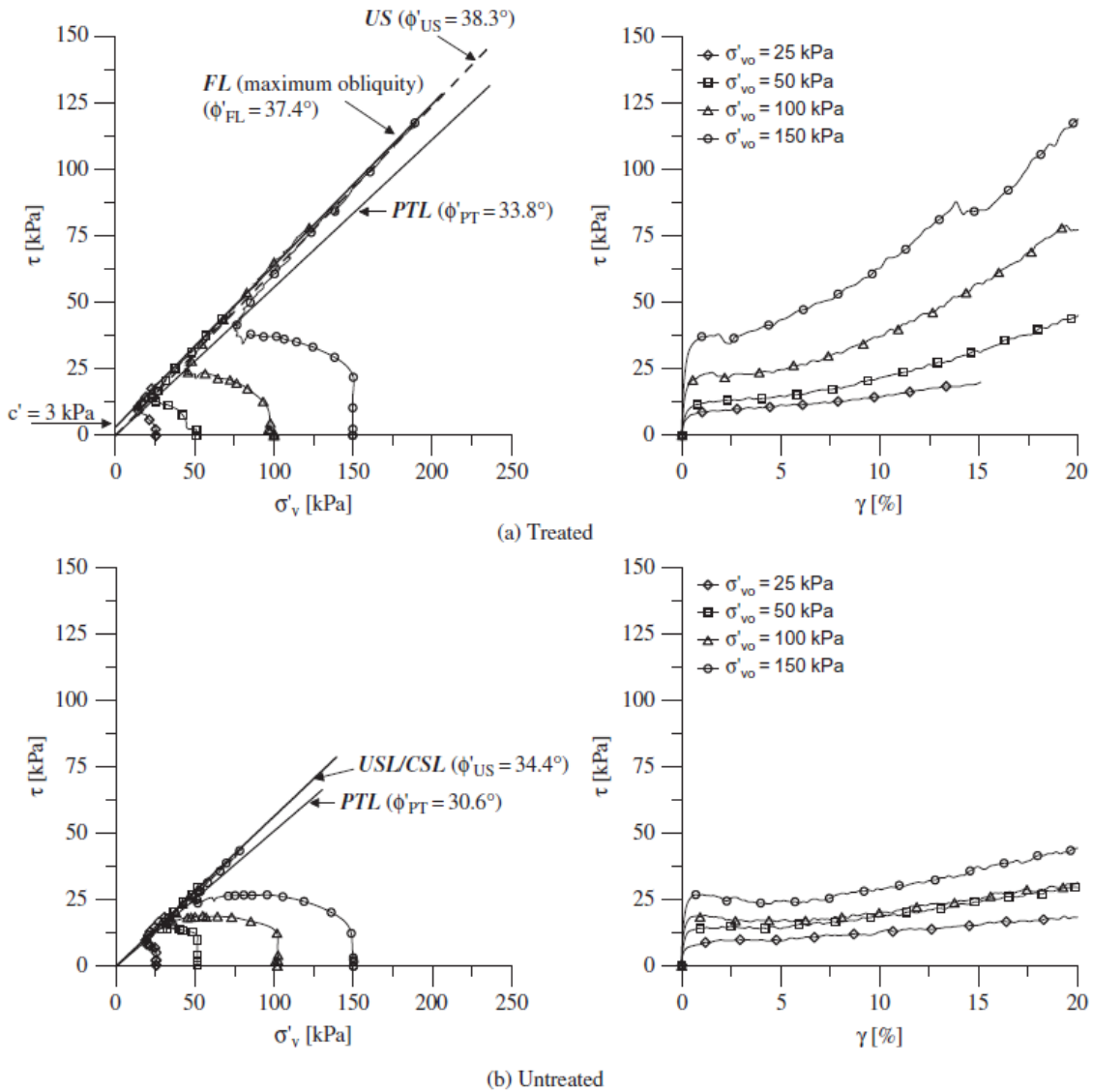


Σχήμα 2.6 Ρυθμός ανάπτυξης του λόγου υπερπίεσης των πόρων r_u συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά πυριτίας κατά βάρος στον σταθεροποιητή, για δοκίμια με $D_r=40\%$ και $\sigma'_{vo}=29.4\text{kPa}$ (Díaz-Rodriguez et al. 2008).

2.2.3 Μελέτες των Porcino et al. (2011) και Porcino et al. (2012)

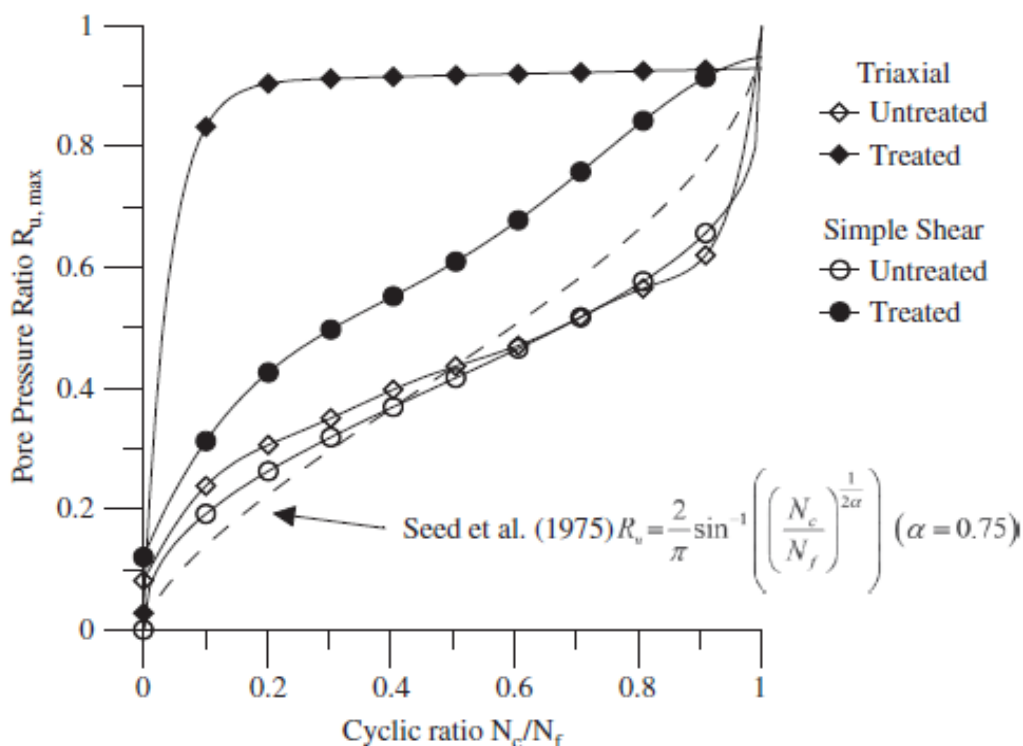
Οι εργαστηριακές μελέτες των Porcino et al. (2011) και Porcino et al. (2012) έδωσαν βάση στην μέτρηση της πίεσης του υγρού των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου. Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Porcino et al. (2011) εκτελέστηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, μονοτονικές και ανακυκλικές δοκιμές αστράγγιστης απλής διάτμησης, και αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου Ticino silica και σε σταθεροποιημένα με sodium-silicate δοκίμια της ίδιας άμμου. Τα δοκίμια άμμου παρασκευάστηκαν σε σχετικές πυκνότητες $D_r=45\%$ και $D_r=75\%$. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με ξηρή εμφόλιση εδαφικού υλικού και εισπίεση του υγρού υπό κατακόρυφη τάση 10 kPa σε σχετική πυκνότητα $D_r=45\%$. Στη συνέχεια, το σταθεροποιημένο δοκίμιο αφήνεται να ωριμάσει για 24 ώρες. Ο κορεσμός των δοκιμίων στην τριαξονική συσκευή εξασφαλίζεται με την εφαρμογή αντιπίεσης (back pressure) 300 kPa για 12 ώρες. Έπειτα το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα και αφήνεται σε ισορροπία για 3 ώρες πριν γίνει η διάτμηση. Οι ερευνητές θεώρησαν ότι ο χρόνος αυτός είναι αρκετός για την ολοκλήρωση της στράγγισης και την αποφυγή φαινομένων ερπυσμού.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7, στις αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης στα δοκίμια άμμου παρατηρείται ελάχιστη διαστολική συμπεριφορά (μετά τη γραμμή αλλαγής φάσης στο χώρο των τάσεων), σε αντίθεση με τα σταθεροποιημένα δοκίμια τα οποία αναπτύσσουν μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις καθώς και αρκετά σημαντικότερη διαστολικότητα. Επιπλέον παρατηρείται ότι η γραμμή αλλαγής φάσης των σταθεροποιημένων δοκιμίων έχει πάντα υψηλότερη κλίση στο χώρο των τάσεων από τη αντίστοιχη γραμμή των δοκιμίων φυσικής άμμου.



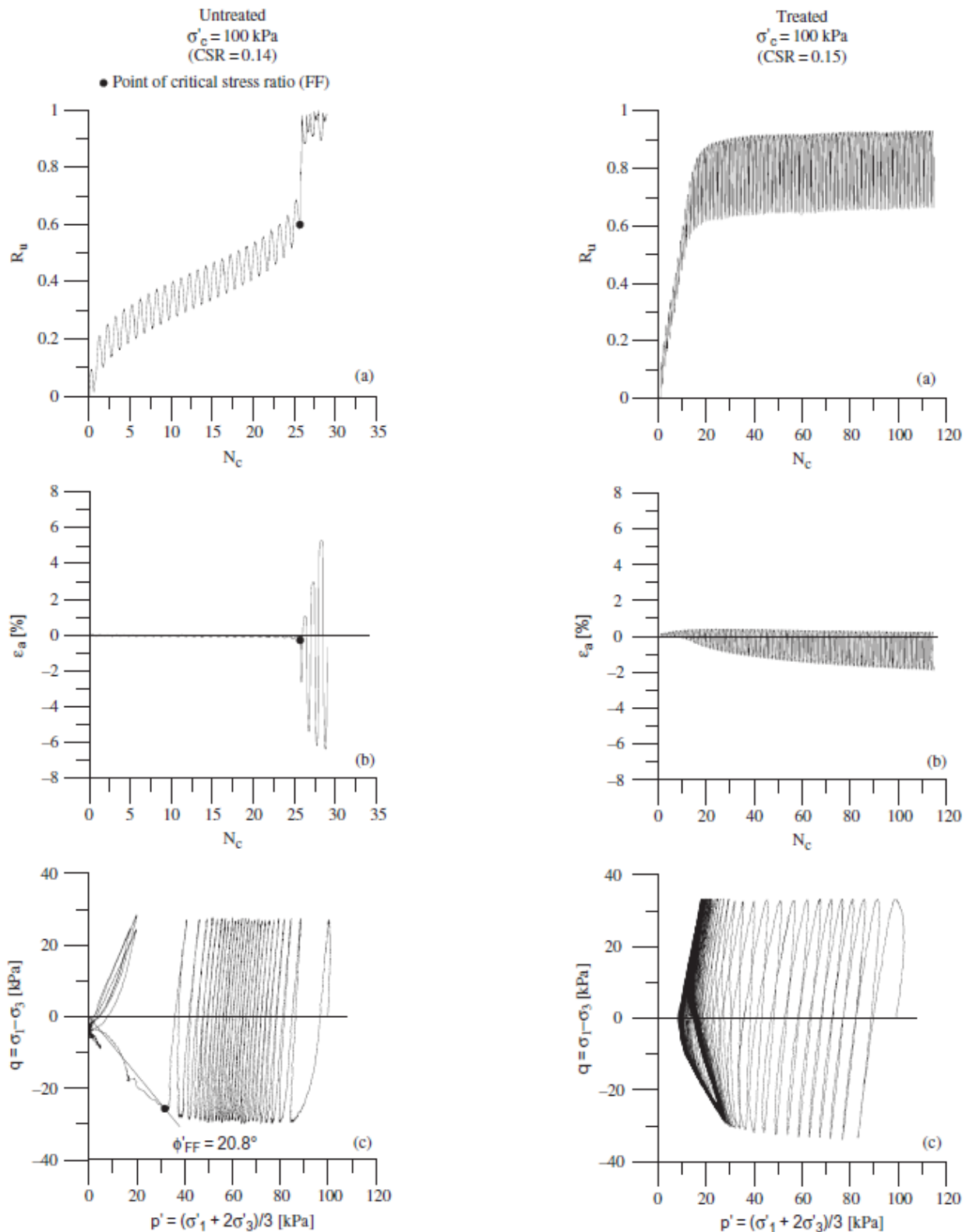
Σχήμα 2.7 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης σε (α) σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου, (β) δοκίμια άμμου (Porcino et al. 2011)

Οι ερευνητές παρατήρησαν διαφορές στην ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων και στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις κατά την αστράγγιστη ανακυκλική φόρτιση τους, ειδικά στην τριαξονική συσκευή (Σχήμα 2.8). Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ποσοστό της πίεσης του υγρού των πόρων αναπτύσσεται στο αρχικό στάδιο της φόρτισης και μετά από αυτό ελάχιστη επιπρόσθετη πίεση αναπτύσσεται παρά την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Αυτό δεν είναι το ίδιο έντονο σε δοκιμές απλής διάτμησης, ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης των υπερπίεσεων πόρων είναι ταυτόσημος σε μη σταθεροποιημένα δοκίμια, ανεξάρτητα της δοκιμής, και λιγότερο έντονος απ' ό,τι για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Συνεπώς, οι ερευνητές επισημαίνουν ότι οι υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις που προβλέπουν την ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων δεν είναι κατάλληλες για τα σταθεροποιημένα εδάφη.



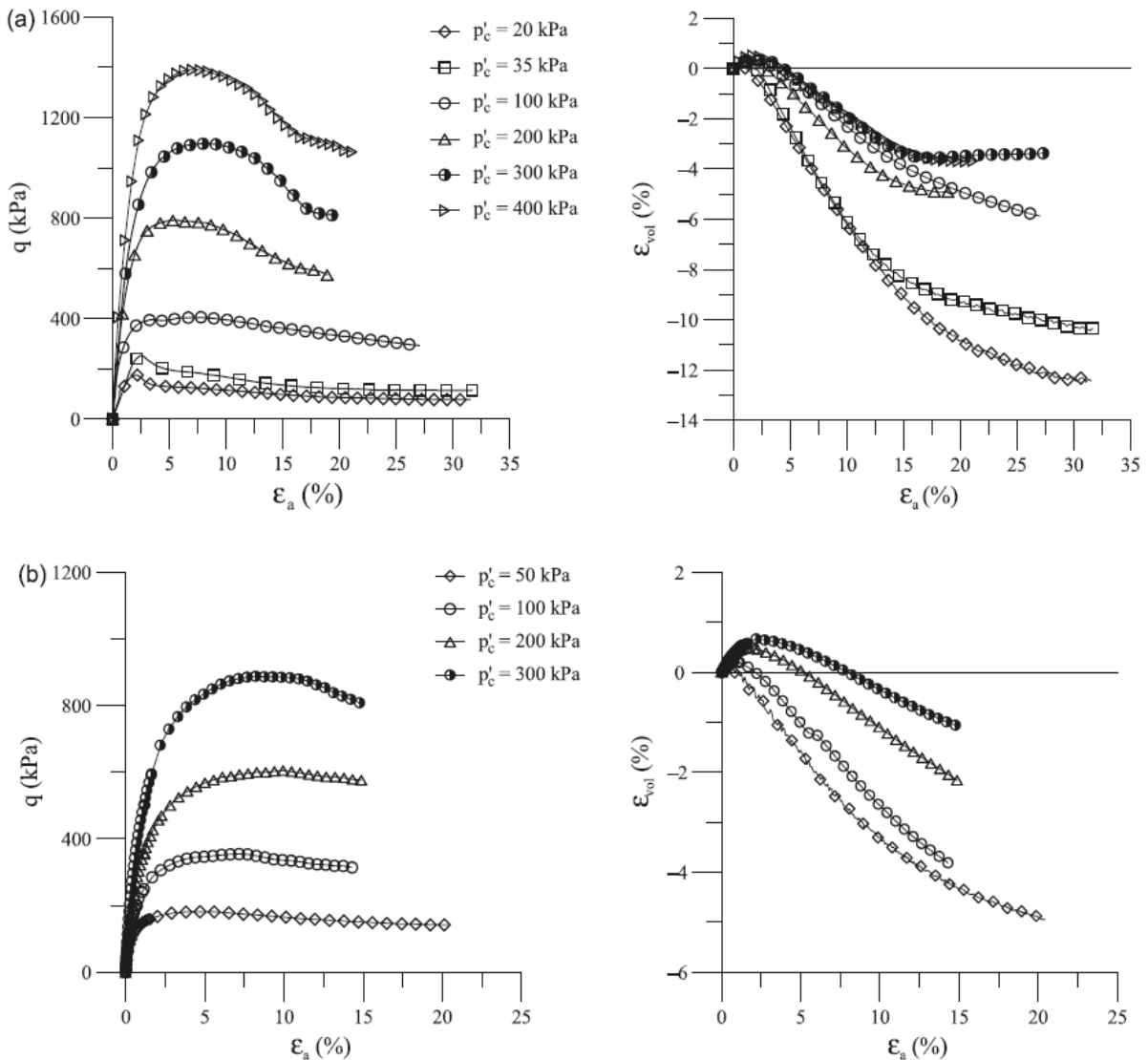
Σχήμα 2.8 Ρυθμός ανάπτυξης του λόγου υπερπιέσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (όπου $R_u = 1$ για $N_c = N_f$) για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου, υπό φόρτιση τριαξονική και απλής διάτμησης (Porcino et al. 2011)

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 2.9 συγκρίνονται πιο αναλυτικά ο ρυθμός ανάπτυξης υπερπιέσεων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης (άνω σχήματα), η συσσώρευση παραμορφώσεων (μεσαία σχήματα) και η ενεργός τασική όδευση (κάτω σχήματα) σε συγκρίσιμες δοκιμές σε δοκίμια άμμου (αριστερά) και δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου (δεξιά). Τα πάνω σχήματα αποτυπώνουν το διαφορετικό ρυθμό ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων λόγω σταθεροποίησης, που είδαμε και στο Σχήμα 2.8, ενώ τα μεσαία σχήματα δείχνουν ότι στα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν υπάρχει κατάρρευση του δοκιμίου λόγω υπερβολικής συσσώρευσης παραμορφώσεων. Τέλος, τα κάτω σχήματα δείχνουν παρόμοια ενεργό τασική όδευση, με τη διαφορά ότι δεν προκύπτει ποτέ $R_u = 1$ στα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου.



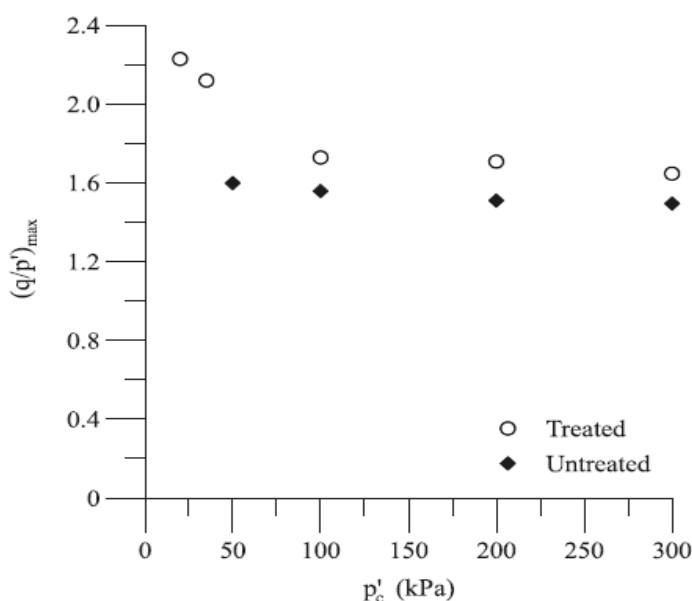
Σχήμα 2.9 Αποτελέσματα αστράγγιστης τριαξονικής ανακυκλικής δοκιμής: (αριστερά) σε φυσικό δοκίμιο άμμου, (δεξιά) σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (Porcino et al. 2011)

Οι Porcino et al. (2012) μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου, διεξάγοντας τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης και ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές απλής διάτμησης. Ο τρόπος παρασκευής των δοκιμών καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κοινά με την αντίστοιχη έρευνα των Porcino et al. (2011). Σε αυτή την έρευνα συγκρίνεται η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών με αυτή των δοκιμών φυσικής άμμου σε ένα εύρος αρχικής ενεργού τάσης $p'_c=40$ έως $p'_c=400$ (Σχήμα 2.10). Στα σταθεροποιημένα δοκίμια το εύρος της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης από την τελική τιμή είναι μεγαλύτερο από το εύρος των τάσεων στα φυσικά δοκίμια. Ακόμη, στα σταθεροποιημένα δοκίμια αφού επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή, εμφανίζεται ένας κλάδος χαλάρωσης (strain softening) που συνοδεύεται από ανάπτυξη διατμητικών επιπέδων (shear bands).

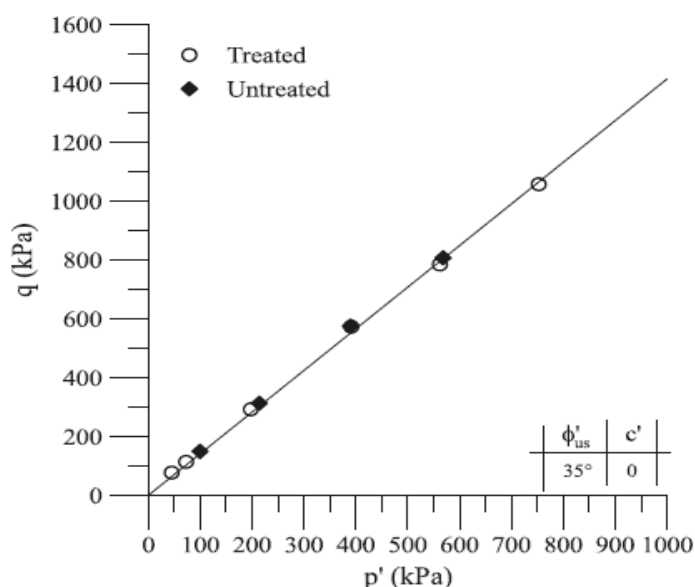


Σχήμα 2.10 Μηχανική συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης δοκιμών σε όρους διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων και διαστολικότητας: (άνω) σταθεροποιημένης άμμου, (κάτω) φυσικής άμμου (Porcino et al. 2012)

Ταυτόχρονα, στο Σχήμα 2.11 παρατηρήθηκε αύξηση της διατμητικής αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμών έναντι των φυσικών. Επιπλέον, προκύπτει μείωση του μέγιστου λόγου των τάσεων $(q/p')_{max}$ όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης (p'_c) στα σταθεροποιημένα δοκίμια, ενώ στα φυσικά ο εν λόγω λόγος τάσεων παραμένει σταθερός. Οι ερευνητές αναφέρουν στην δημοσίευσή τους ότι αυτή η τάσης μείωσης υποδεικνύει την έντονη καμπύλωση της περιβάλλουσας αστοχίας των σταθεροποιημένων εδαφών στο εύρος των μικρών τάσεων, ενώ η αντίστοιχη περιβάλλουσα για τα φυσικά είναι γραμμική. Αντίθετα, η κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας στην Κρίσιμη Κατάσταση δεν δείχνει επηρεασμένη από τη σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία (Σχήμα 2.12).

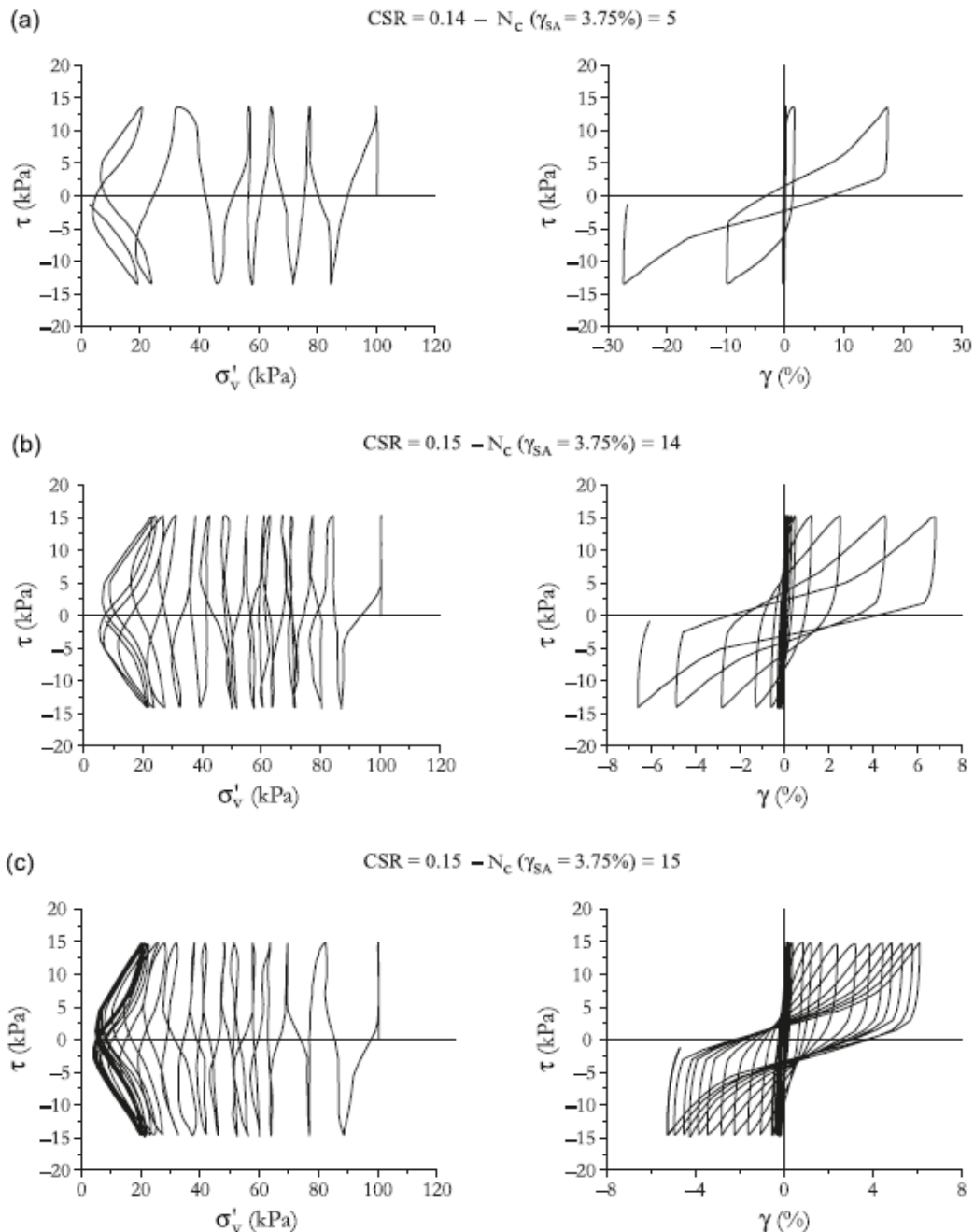


Σχήμα 2.11 Επίδραση της μέσης ενεργού τάσεως στο μέγιστο λόγο τάσεων για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου (Porcino et al. 2012)



Σχήμα 2.12 Περιβάλλουσα αστοχίας στην κρίσιμη κατάσταση (σε διαγράμμο $q-p'$) για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al. 2012)

Επιπλέον, η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων και φυσικών δοκιμών από τις αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13. Το φυσικό δοκίμιο μικρής πυκνότητας παρουσιάζει γρήγορα μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις και ρευστοποιείται μετά από λίγους κύκλους φόρτισης ($N_f=5$). Το σταθεροποιημένο δοκίμιο μικρότερης πυκνότητας δεν καταρρέει και διατηρεί ένα χαμηλό επίπεδο ανάπτυξης διατμητικών παραμορφώσεων, ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης. Επίσης, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου με πυριτία χαλαρού δοκιμίου προσομοιάζει τη συμπεριφορά του πυκνού δοκιμίου. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι αυτό ίσως οφείλεται στην αυξημένη διαστολικότητα που προκύπτει από το σπάσιμο των δεσμών.

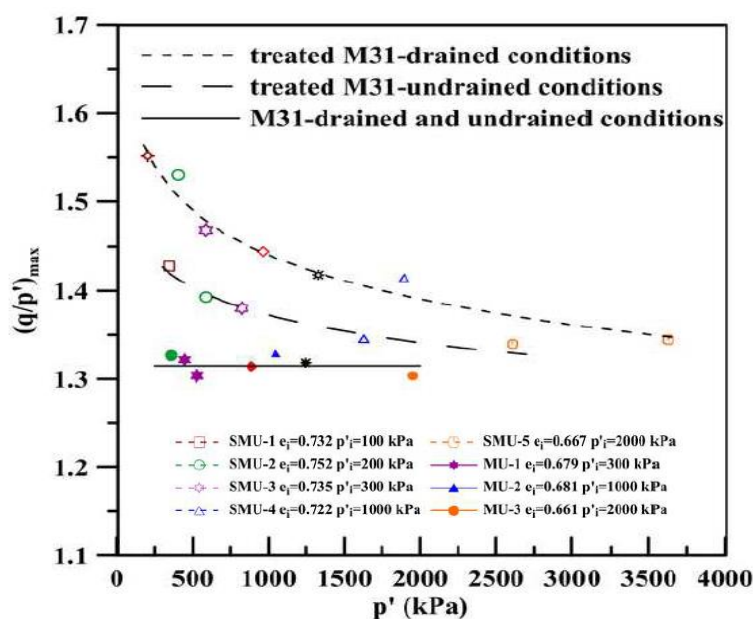


Σχήμα 2.13 Σύγκριση ενεργών τασικών οδεύσεων και σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε δοκίμια: α) χαλαρής φυσικής άμμου, β) χαλαρής σταθεροποιημένης άμμου, και γ) πυκνής φυσικής άμμου (Porcino et al. 2012)

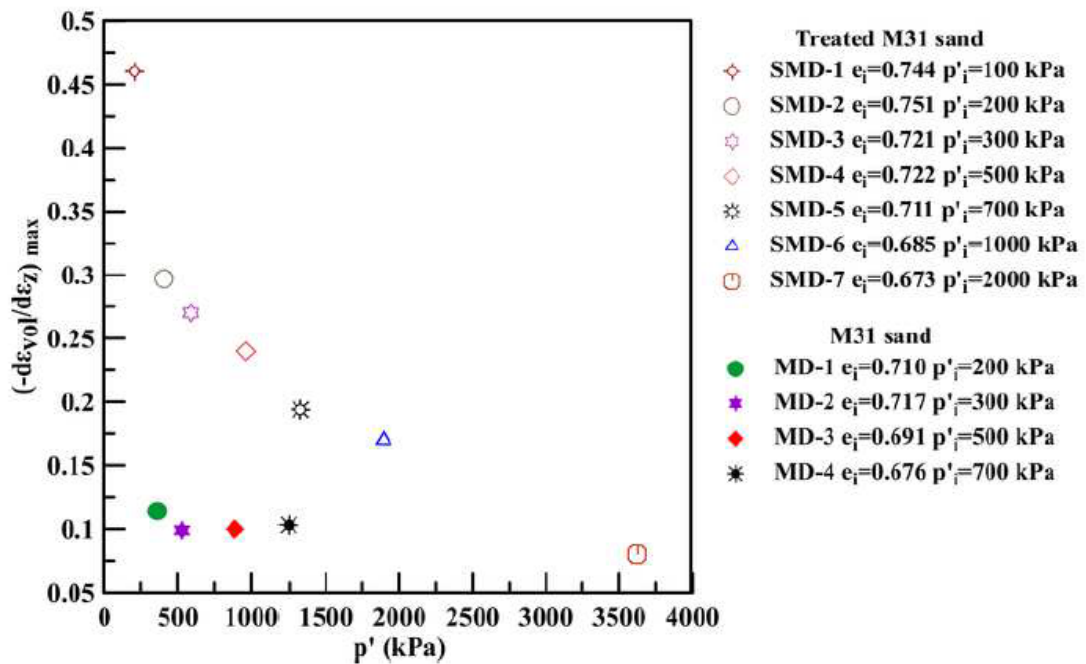
2.3.4 Μελέτη των Ρανλορουλου και Georgiannου (2021)

Στην δημοσίευση των Ρανλορουλου και Georgiannου (2021) εξετάζεται η συμπεριφορά της άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία (Ludox-SM) για μια σειρά από διάφορες φορτίσεις ώστε να αναπτυχθεί μια τυποποιημένη μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου και να επιβεβαιωθεί η ανθεκτικότητα της όταν αυξάνεται η διατμητική της αντοχή. Χρησιμοποιήθηκε η άμμος M31 με στρογγυλεμένους και η άμμος Longstone (LS) με γωνιώδεις κόκκους. Εφαρμόστηκε εμβάπτιση του εδαφικού ξηρού υλικού σε απαερωμένο νερό (water pluviation) για την παρασκευή δοκιμών άμμου και εμβάπτιση σε υγρόλυμα πυριτίας για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την παρασκευή ομοιόμορφων δοκιμών με δομή που προσομοιάζει τη δομή των εδαφικών υλικών στη φύση (Vaid et al.1999).. Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε ποσοστό σταθεροποιητή κατά βάρος CS=10%. Ως χρόνος γέλης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για την αύξηση του ιξώδους σε 100 cP και υπολογίστηκε ότι είναι 10 ώρες (Agaroulaki and Papadimitriou 2018).

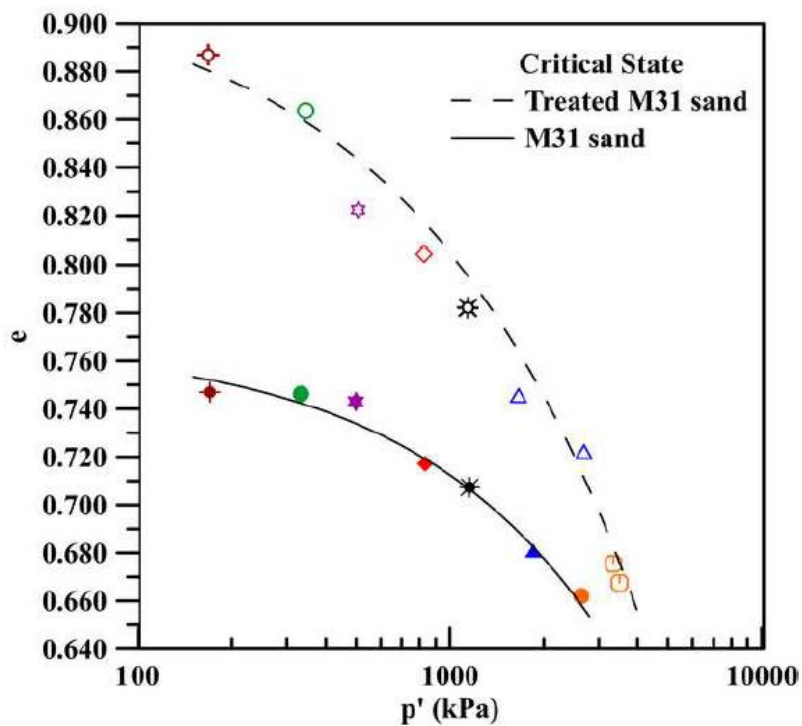
Σε αυτήν την έρευνα εκτελέστηκαν μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές στην φυσική και σταθεροποιημένη άμμο με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) και μέτρηση της πίεσης πόρων. Επισημαίνεται στο στάδιο του κορεσμού η επιβολή μεγάλης τιμής αντιπίεσης (back pressure) δε φαίνεται να καταστρέφει τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Στις τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τα δοκίμια άμμου, καθώς και μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου λόγου των τάσεων q/p' (Σχήμα 2.14). Η μέγιστη τιμή της διαστολικότητας αναπτύσσεται ταυτόχρονα με την επίτευξη του μέγιστου λόγου των τάσεων και στα σταθεροποιημένα και στα φυσικά δοκίμια άμμου M31, με τα πρώτα να αναπτύσσουν πολύ μεγαλύτερη από τα δεύτερα (Σχήμα 2.15). Η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης CSL στο χώρο $(e-p')$ είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω εκφράζοντας την έντονη διαστολή των σταθεροποιημένων δοκιμών (Σχήμα 2.16). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι οι δυο γραμμές CSL στο χώρο $(e-p')$ για τα φυσικά και τα σταθεροποιημένα δοκίμια συγκλίνουν για μεγάλες τάσεις που οδηγούν σε πιθανή θραύση κόκκων.



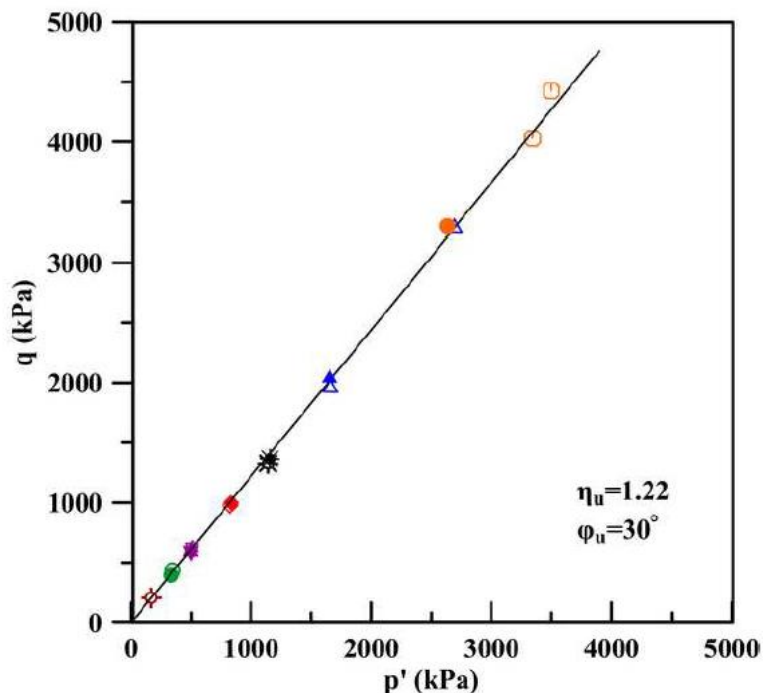
Σχήμα 2.14 Επίδραση μέσης ενεργού τάσης στον μέγιστο λόγο τάσεων q/p' για σταθεροποιημένη και φυσική άμμου M31 σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης, υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες (Ρανλορουλου and Georgiannου 2021)



Σχήμα 2.15 Επίδραση της μέσης ενεργού τάσης στις τιμές μέγιστης διαστολικότητας σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 (Pavloroulou and Georgiannou 2021)

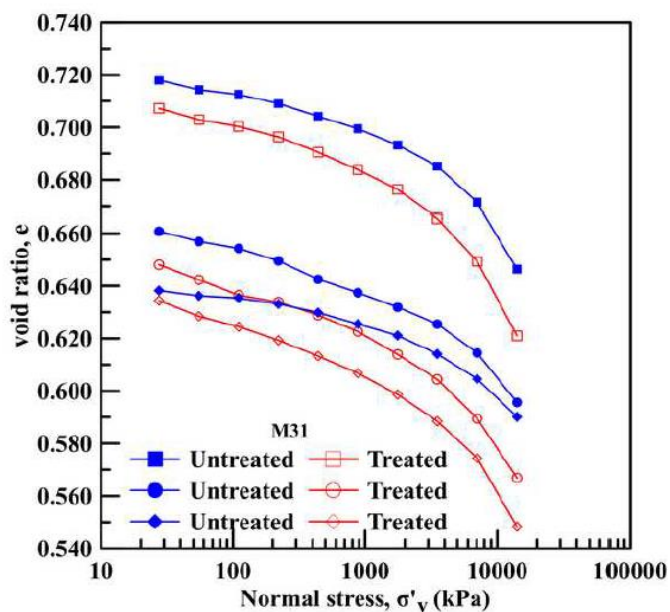


Σχήμα 2.16 Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο χώρο δείκτη πόρων e – μέσης ενεργού τάσης p' για φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 (Pavloroulou and Georgiannou 2021)



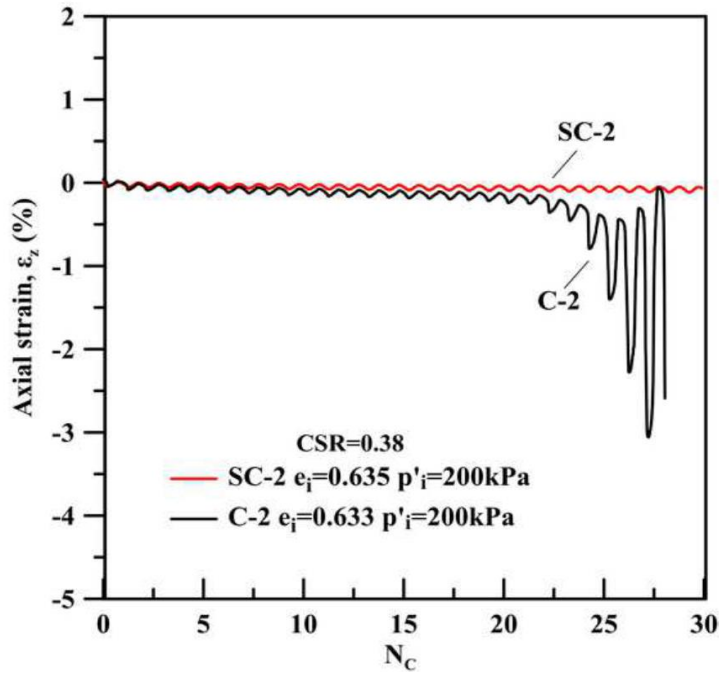
Σχήμα 2.17 Περιβάλλουσα Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεργού τάσης p' για φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 (Ρανλοπούλου and Georgiannou 2021)

Τέλος, όπως προκύπτει από το Σχήμα 2.17, η περιβάλλουσα κρίσιμης κατάστασης στο χώρο των τάσεων είναι κοινή για τα σταθεροποιημένα και τα φυσικά δοκίμια, όπως και η γωνία κρίσιμης κατάστασης (για την άμμο M31, $\phi_u=30^\circ$). Κλείνοντας την αναφορά στη μονοτονική φόρτιση, οι μελετητές συμπεράναν ότι σε συνθήκες συμπίεσμού τα πυκνά σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου εμφανίζουν μεγαλύτερες ογκομετρικές μεταβολές σε σχέση με τα αντίστοιχα φυσικά, ενώ δε συμβαίνει το ίδιο με τα σχετικά χαλαρά τα οποία εμφανίζουν ταυτόσημη συμπίεστικότητα (βλ. Σχήμα 2.18).

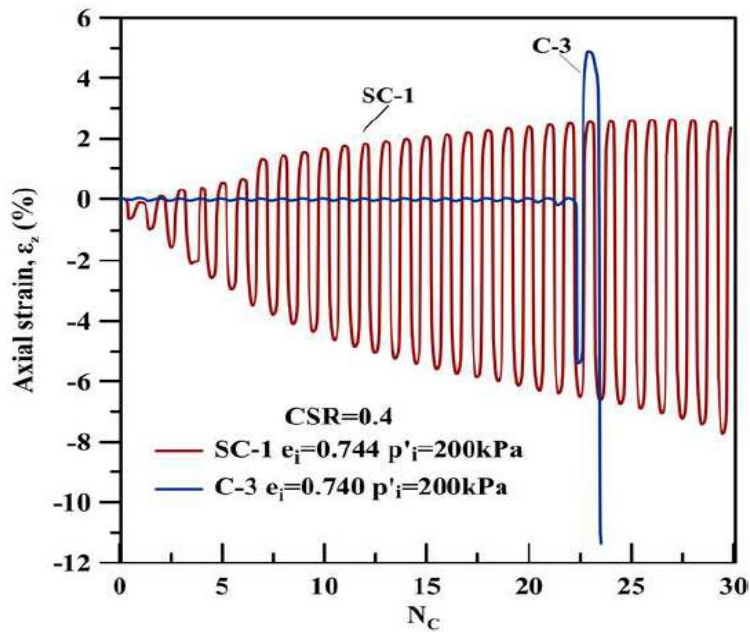


Σχήμα 2.18 Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 (Ρανλοπούλου and Georgiannou 2021)

Μελετώντας την ανακυκλική συμπεριφορά, οι Ρανλιουλου and Georgiannou (2021), και σε συμφωνία με όλη τη βιβλιογραφία, παρατήρησαν ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν καταρρέουν με την αύξηση της πίεσης πόρων και τη συσσώρευση αξονικών παραμορφώσεων. Επίσης, προέκυψε αύξηση του αριθμού κύκλων για ρευστοποίηση λόγω σταθεροποίησης στα πυκνά δοκίμια, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία (βλ. Σχήμα 2.19). Ωστόσο, στα χαλαρά σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 παρατηρήθηκε ότι αναπτύσσονται μεγαλύτερες αξονικές παραμορφώσεις στους πρώτους κύκλους φόρτισης από αυτές της άμμου (βλ. Σχήμα 2.20).



Σχήμα 2.19 Συσσώρευση αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε πυκνή φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 (Ρανλιουλου and Georgiannou 2021)



Σχήμα 2.20 Συσσώρευση αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε χαλαρή φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 (Ρανλιουλου and Georgiannou 2021)

2.3 Αριθμητική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών με κολλοειδή πυριτία

Ο μηχανισμός βελτίωσης που προσφέρει ο εμπλουτισμός του υγρού των πόρων με κολλοειδή πυριτία στο επίπεδο της μικροδομής δεν έχει κατανοηθεί πλήρως. Μέχρι πρόσφατα δεν έχει κατοχυρωθεί στη βιβλιογραφία κάποια καταστατική προσομοίωση της απόκρισης των σταθεροποιημένων εδαφών. Ωστόσο παρακάτω θα παρουσιαστούν κάποιες προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης με συζευγμένες αναλύσεις, που κάνουν χρήση υπάρχοντων καταστατικών προσομοιωμάτων και επεμβαίνουν στη συμπιεστότητα του υγρού πόρων των κορεσμένων εδαφών.

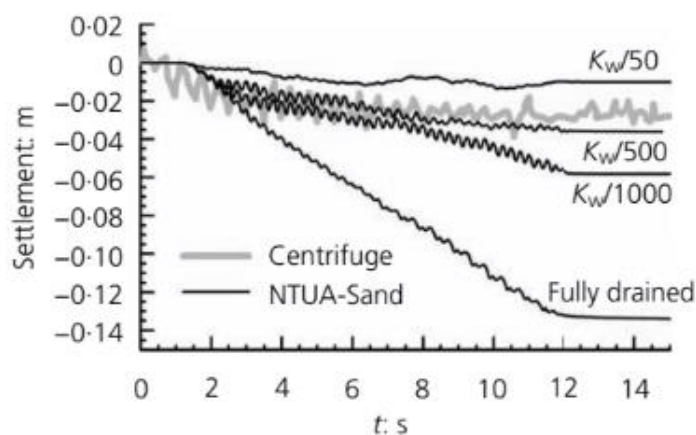
2.3.1 Προσέγγιση των Andrianopoulos et al. (2016)

Η μελέτη των Andrianopoulos et al. (2016) επικεντρώνεται στην χρήση του προσομοιώματος NTUASAND (Andrianopoulos et al. 2010a, b) ώστε να μπορέσει να προσομοιώσει και τη συμπεριφορά παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών. Ειδικότερα, διερευνώνται δύο μηχανισμοί συμβολής που θα οδηγήσουν στην αύξηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση των παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι α) οι ισχυροί αναπτυσσόμενοι δεσμοί μεταξύ των κόκκων και της γέλης και β) η μειωμένη ανάπτυξη υπερπιέσεων 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:

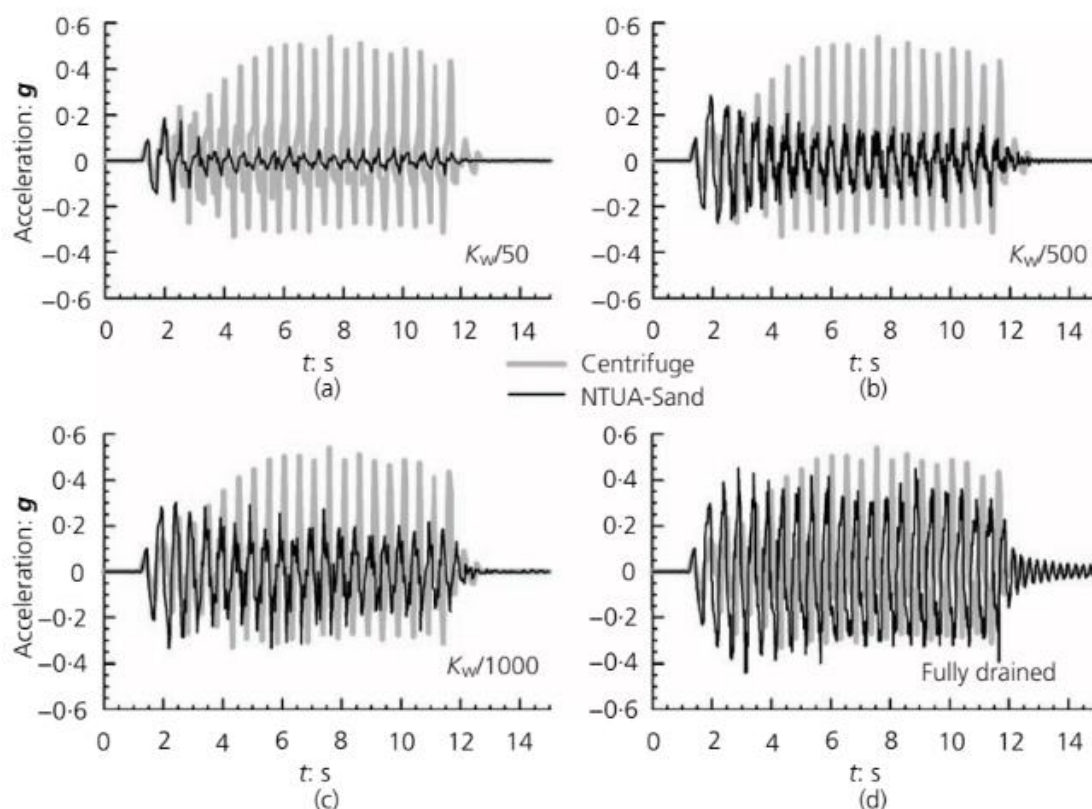
$$K = \frac{K_w}{n}$$

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.



Σχήμα 2.21 Σύγκριση χρονιστοριών καθιζήσεων επιφάνειας σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό διέγερση βάσης από πείραμα και αναλύσεις για διάφορες τιμές του συντελεστή n (Andrianopoulos 2016)

Επιπλέον, επιχειρήθηκε η προσομοίωση του πειράματος φυγοκεντριστή των Gallagher et al. (2007) που αφορά στη 1Δ σεισμική απόκριση σταθεροποιημένης στρώσης με αυτή την προσέγγιση, και προέκυψε ότι τιμές $n = 500 - 1000$ δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια σε όρους καθιζήσεων (βλ. Σχήμα 2.21) και επιταχύνσεων (βλ. Σχήμα 2.22). Στο Σχήμα 2.22 ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξαιρετική προσομοίωση των επιταχύνσεων που προκύπτει για τιμές $n \rightarrow \infty$, μια προσέγγιση που δεν μπορεί να υιοθετηθεί όμως, καθώς τέτοιες τιμές του μέτρου K είτε προσομοιώνουν απολύτως στραγγιζόμενες συνθήκες (που δεν υπάρχουν στη φύση, ειδικά για γέλη στους πόρους της άμμου που σχεδόν μηδενίζει τη διαπερατότητα του σταθεροποιημένου εδάφους), είτε οδηγούν σε αφύσικα μεγάλες καθιζήσεις που δε συνάδουν με τις πειραματικές μετρήσεις (βλ. Σχήμα 2.21).



Σχήμα 2.22 Σύγκριση χρονιοστοριών επιταχύνσεων σε βάθος 2m εντός σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό διέγερση βάσης από πείραμα και αναλύσεις για διάφορες τιμές του συντελεστή n (Andrianoopoulos 2016)

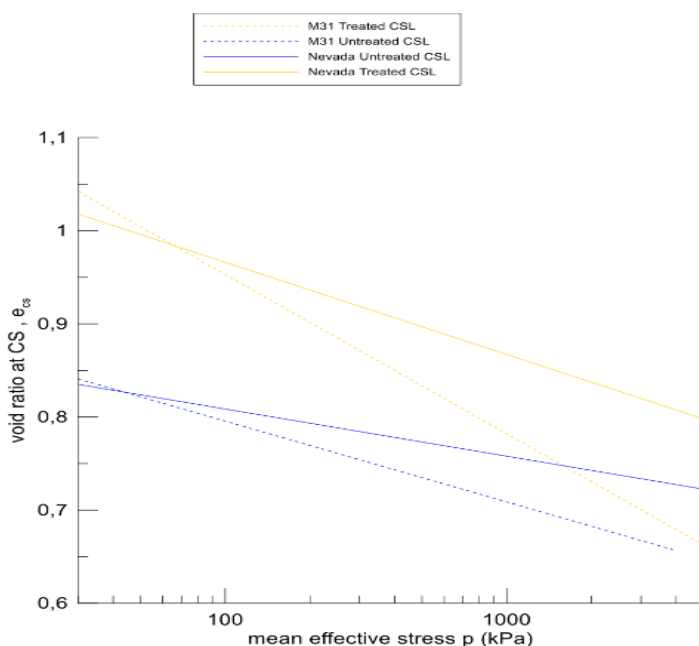
2.3.2 Προσέγγιση του Τιπτηρή (2017)

Μια ακόμη αξιόλογη προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής απόκρισης των παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών παρουσιάστηκε στη διπλωματική εργασία ΕΜΠ του Ιωάννη Τιπτηρή (2017). Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η κολλοειδής πυριτιτιά ως σταθεροποιητής. Έγινε προσπάθεια εύρεσης μια νέα μεθοδολογίας προσομοίωσης η οποία εν μέρει λειτούργησε. Αυτή προέκυψε από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων μιας σειράς μονοτονικών τριαξονικών δοκιμών (σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά από σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτιτιά) 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. Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης της σταθεροποιημένης άμμου εμφανίζεται μετατοπισμένη σε μεγαλύτερους δείκτες πόρων και να έχει μεγαλύτερη κλίση, ποσοτικοποιώντας την αύξηση της στιβαρότητας και τη μείωση της συστολικότητας λόγω σταθεροποίησης που όμως φθίνει σε μεγάλες τιμές μέσης τάσης. Επειδή οι

διαθέσιμες δοκιμές φυγοκεντριστή έχουν εκτελεστεί σε άμμο Nevada και όχι M31, και το προσομοίωμα NTUA-SAND έχει βαθμονομηθεί για φυσική άμμο Nevada, έγινε η παραδοχή ότι η σταθεροποίηση της Nevada θα οδηγεί 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.

Επιπλέον, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις τριών 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 σειρές δυναμικών δοκιμών φυγοκεντριστή, μία για τη 1Δ σεισμική απόκριση οριζόντιου 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 (Ramuk 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 (βλέπε Σχήμα 2.23),



Σχήμα 2.23 Γραφική απεικόνιση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης (CSLs) για την φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada μετά από επεξεργασία των CSL της άμμου M31 (Τιπτηλής 2017)

(β) η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση που έγκειται στην σημαντική μείωση του μέτρου συμπιεστότητας K του υγρού των πόρων (Αγαπουλάκη 2017, Andrianopoulos et al. 2016) και (γ) μία προσέγγιση που συνδυάζει τις (α) και (β), δηλαδή τον επαναπροσδιορισμό της CSL ταυτόχρονα με μια ελαφρά μόνο μείωση του μέτρου συμπιεστότητας K του υγρού των πόρων. Τα αποτελέσματα των εν λόγω προσομοιώσεων κατέδειξαν τα εξής:

- Η σημαντική μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων K, χωρίς αλλαγή στις σταθερές του προσομοιώματος για τον εδαφικό σκελετό (Αγαπουλάκη 2017, Andrianopoulos et al. 2016), προβλέπει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα όλων των εξετασθέντων δοκιμών σε επίπεδο μετακινήσεων, επιταχύνσεων, υπερπίεσεων 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 συμπίεστικότητας 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 συμπίεστικότητας K_w (μικρότερης από αυτό που προτείνουν οι Αγαπουλάκη 2017, Andrianoopoulos et al. 2016) 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Καταστατική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς φυσικής άμμου

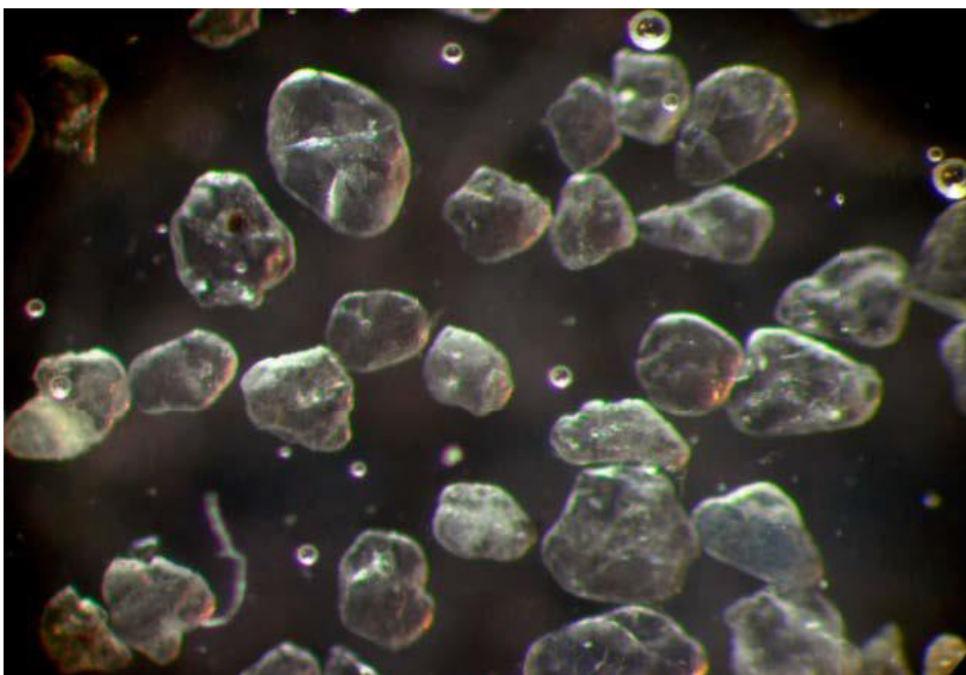
3.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) για την άμμο M31, επί τη βάση των πειραμάτων των Pavlopoulou and Georgiannou (2021). Στόχος της βαθμονόμησης αυτής είναι να αποτελέσει τη βαθμονόμηση αναφοράς, πριν την αντίστοιχη βαθμονόμηση του ίδιου προσομοιώματος, για την ίδια άμμο, μετά την παθητική σταθεροποίησή της, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών στην άμμο M-31, ενώ στην ενότητα 3.3 δίνονται οι βασικές αρχές και οι καταστατικές εξισώσεις του προσομοιώματος NTUA-SAND. Τέλος, στην ενότητα 3.4 παρουσιάζονται η βαθμονόμηση του προσομοιώματος για την εν λόγω φυσική άμμο, καθώς και η προσομοίωση των συγκεκριμένων πειραμάτων ως ένδειξη της επιτευχθείσας ακρίβειας.

3.2 Μηχανική συμπεριφορά φυσικής άμμου

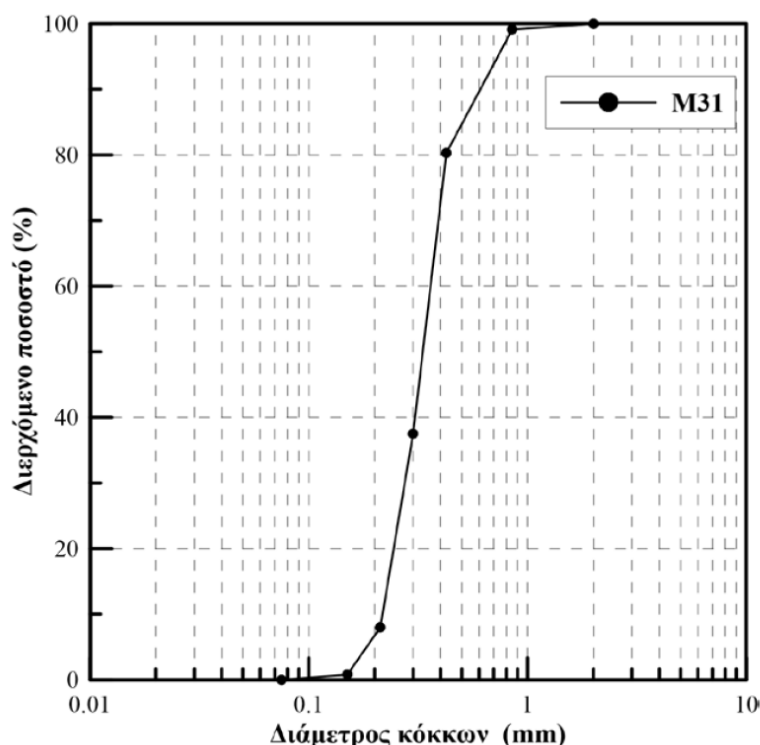
3.2.1 Η άμμος M31

Η άμμος που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την εργασία είναι η άμμος M31. Πρόκειται για μία καθαρή άμμο, με σχετικά ομοιόμορφα σιλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται φωτογραφίες της άμμου M31 από το μικροσκόπιο (Georgiannou and Konstadinnou, 2014).



Σχήμα 3.1 Εικόνα κόκκων χαλαζιακής άμμου M31 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Georgiannou and Konstadinnou, 2014).

Η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου M31 προσδιορίστηκε σύμφωνα με της προδιαγραφές British Standards 1377 (BS1377) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 (Παυλοπούλου, 2017).



Σχήμα 3.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31 (Παυλοπούλου, 2017)

Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι $D_{10}=0.218$ mm, $D_{30}=0.275$ mm, $D_{60}=0.361$ mm. Η μορφή της κοκκομετρικής καμπύλης και η τιμή του $C_u=d_{60}/d_{10}=1.65 < 5$ υποδεικνύουν ότι το υλικό είναι κακώς διαβαθμισμένο, δηλαδή επικρατεί ένα μέγεθος κόκκων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγάλα κενά και να είναι επιρρεπές σε ρευστοποίηση. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διαπερατότητας στο εύρος $k = (1.09-3.40) \cdot 10^{-4}$ m/s και η πυκνότητα των στερεών κόκκων $\rho_s = 2.66$ Mg/m³. Ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών προκύπτουν $e_{max}=0.870$ (ο δείκτης πόρων στην πιο χαλαρή κατάσταση) και $e_{min}=0.528$ (ο δείκτης πόρων στην πιο πυκνή κατάσταση) αντίστοιχα (Παυλοπούλου and Georgiannou, 2021).

3.2.2 Στραγγιζόμενες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης

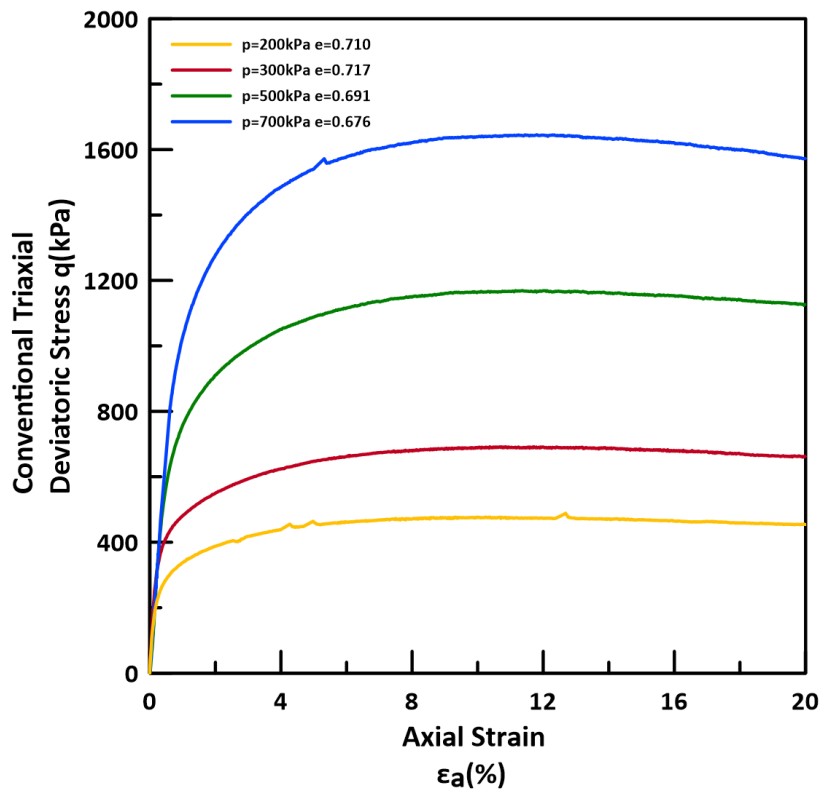
Στην ενότητα 3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες που εκτελέστηκαν σε δοκίμια άμμου M31 (Παυλοπούλου and Georgiannou 2021) και επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Σε όλες αυτές τις μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης στο στάδιο του κορεσμού επιβλήθηκε αντιπίεση (back pressure) 700 kPa και η παράμετρος Skempton προκύπτει $B > 0.97$ ($B = \Delta u / \Delta \sigma$) υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμίων άμμου. Τα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα και εδώ εξετάζονται 4 δοκιμές με αρχικές ενεργές τάσεις $p_0' = 200, 300, 500$ και 700 kPa και με δείκτες πόρων $e = 0.710, e = 0.717, e = 0.691, e = 0.676$ αντίστοιχα. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμίων έχουν εύρος τιμών $D_r = 45-57\%$. Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης, η άμμος M31 φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τις 4 εξεταζόμενες δοκιμές σε όρους αποκλίνουσας τάσης, q' – αξονικής παραμόρφωσης, ε_a . Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως ως αποκλίνουσα τάση, για όλες τις τριαξονικές δοκιμές που θα παρουσιασθούν στη συνέχεια, ορίζεται ως η διαφορά της ορθής ενεργού ακτινικής τάσης (σ'_r) από την ορθή ενεργό αξονική τάση (σ'_a), ($q = \sigma'_a - \sigma'_r$) όπως αυτές εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Με βάση την εικόνα της απόκρισης σε όρους τάσεων - παραμορφώσεων διαφαίνεται η διαστολική συμπεριφορά της άμμου για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς τάσης – δείκτη πόρων που εξετάζονται. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αρχική αύξηση της αποκλίνουσας τάσης q μέχρι μία μέγιστη τιμή, και στη συνέχεια πτώση αυτής (χαλάρωση) με τη διαρκή αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης. Η αποκλίνουσα τάση τείνει να σταθεροποιηθεί για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_a > 30\%$ προσεγγίζοντας την κρίσιμη κατάσταση.

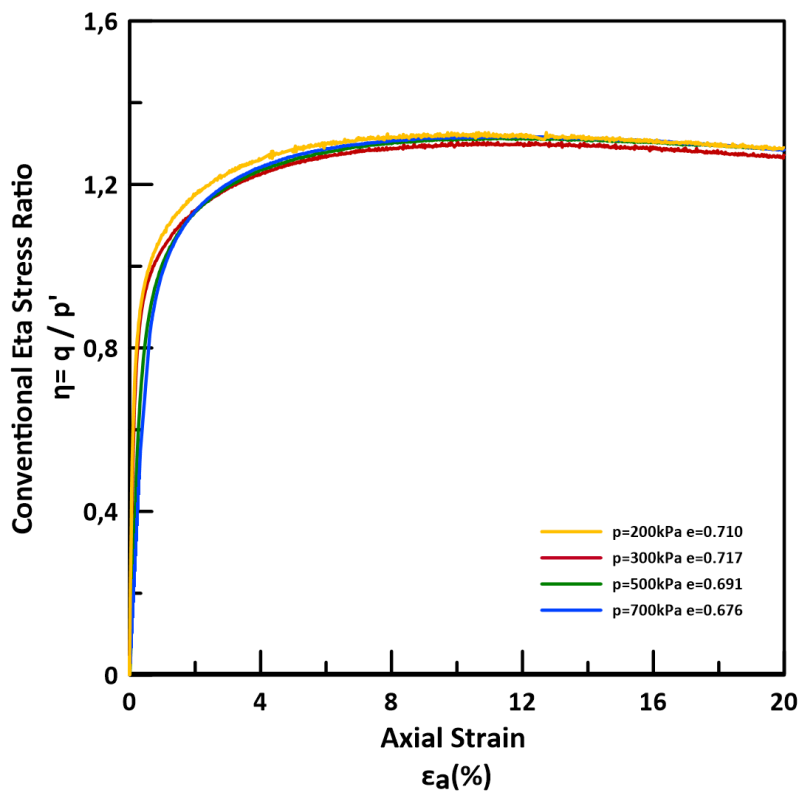
Αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου της αποκλίνουσας τάσης (q) προς την μέση ορθή ενεργό τάση p' ($p' = \sigma'_a + 2 \sigma'_r$) συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης ε_a . Χάρη συντομίας ορίζεται ο λόγος αποκλίνουσας τάσης $\eta = q/p'$, ο οποίος αρχικά αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται. Χαρακτηριστικό είναι πως όλες οι δοκιμές καταλήγουν σε κοινή μοναδική τιμή λόγου η σε μεγάλη παραμόρφωση, προσεγγίζοντας την κρίσιμη κατάσταση. Ωστόσο, δεν παρατηρείται διαφοροποίηση της μέγιστης τιμής του λόγου η ανάλογα με το επίπεδο τάσης στερεοποίησης ή τον αρχικό δείκτη πόρων του δοκιμίου.

Επιπλέον, στο Σχήμα 3.5 για τις παραπάνω δοκιμές παρουσιάζεται η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης (ε_{vol}) συναρτήσει της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης (ε_a) κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Όπου ε_{vol} ορίζεται το άθροισμα της αξονικής (ε_a) και της διπλής ακτινικής παραμόρφωσης ($2\varepsilon_r$) ($\varepsilon_{vol} = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$) κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Και για τις 4 δοκιμές παρατηρείται αρχικά συστολική συμπεριφορά (θετική ογκομετρική παραμόρφωση – μείωση όγκου), ενώ στη συνέχεια η συμπεριφορά μεταβαίνει σε διαστολική (αρνητική ογκομετρική παραμόρφωση – αύξηση όγκου). Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο, πως δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ούτε στο σημείο μετάβασης από συστολική σε διαστολική συμπεριφορά, ούτε στη συσσώρευση της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ανάλογα με το επίπεδο τάσης στερεοποίησης ή τον αρχικό δείκτη πόρων του δοκιμίου.

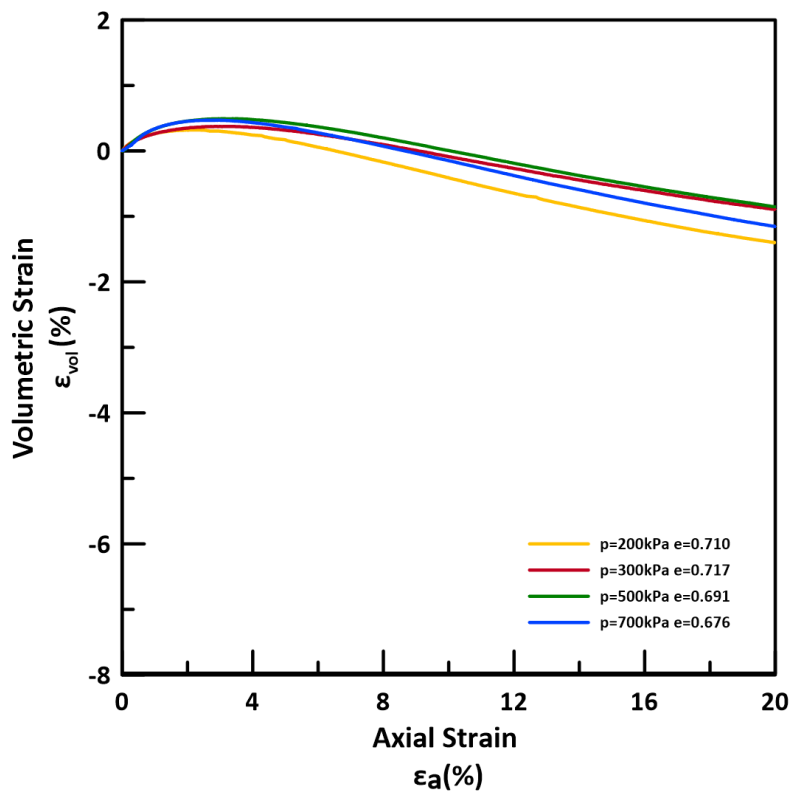
Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται διαδρομές ενεργών τάσεων στον χώρο q - p' για το εύρος ενεργών τάσεων 200 έως 700 kPa. Και στις 4 δοκιμές εφαρμόστηκαν στραγγιζόμενες συνθήκες για αυτό και έχουν σταθερή κλίση. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ενεργός τάση αυξάνεται και η μέγιστη τιμή της αποκλίνουσας τάσης. Σημειώνεται ότι αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης ισοδυναμεί και σε μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q . Ενδεικτικά, το πείραμα με αρχική ενεργό τάση $p = 200$ kPa αναπτύσσει μέγιστη αποκλίνουσα τάση $q = 460$ kPa ενώ το πείραμα με αρχική ενεργό τάση $p = 700$ kPa αναπτύσσει $q = 1620$ kPa. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κορυφές των τεσσάρων καμπυλών ορίζουν μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων..



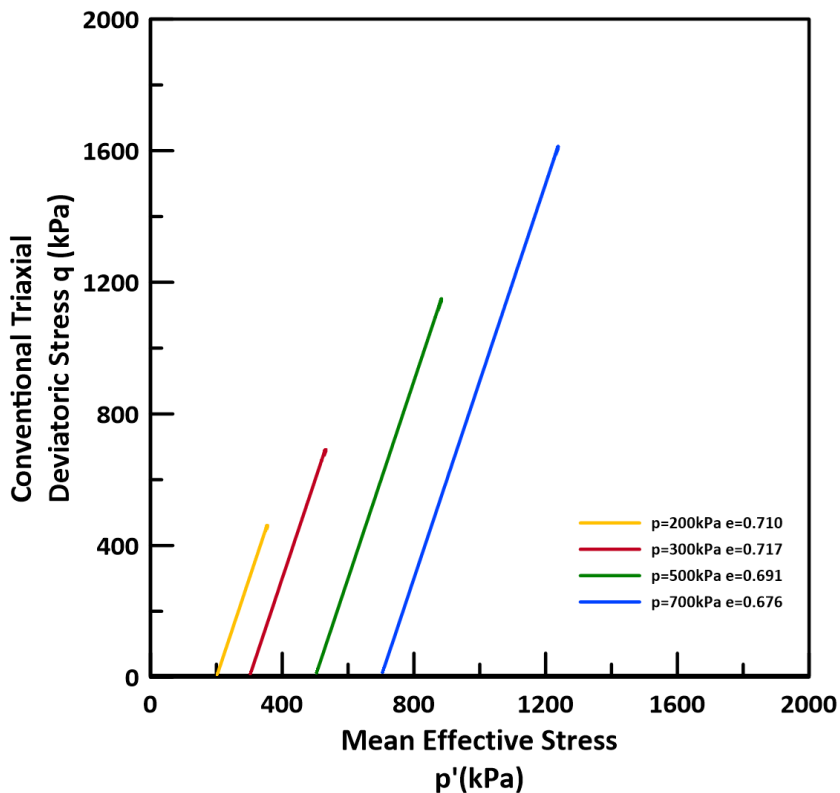
Σχήμα 3.3 Καμπύλη αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης (q - ϵ_a) για δοκιμές τριαξονικής θλίψης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Ρανλιουλου and Georgiannou, 2021)



Σχήμα 3.4 Διαγράμματα λόγου τάσεων – αξονικής παραμόρφωσης (η - ϵ_a) για δοκιμές τριαξονικής θλίψης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Ρανλιουλου and Georgiannou, 2021).



Σχήμα 3.5 Καμπύλες εξέλιξης ογκομετρικής παραμόρφωσης ($\epsilon_{voι}-\epsilon_a$) για δοκιμές τριαξονικής θλίψης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Ρανλιουλιου and Georgiannου, 2021)



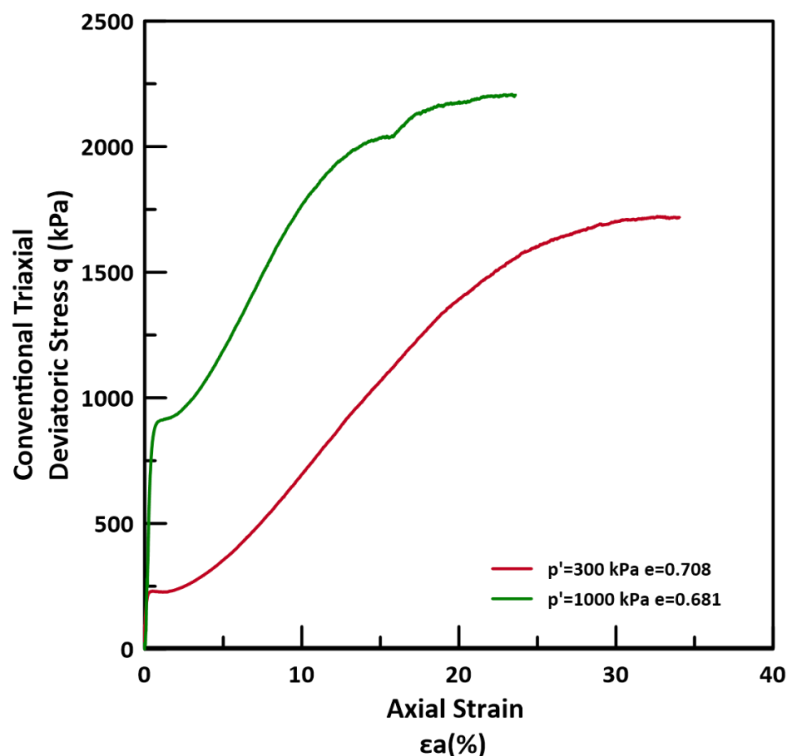
Σχήμα 3.6 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο χώρο ($q-p'$) για δοκιμές τριαξονικής θλίψης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Ρανλιουλιου and Georgiannου, 2021)

3.2.2 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης

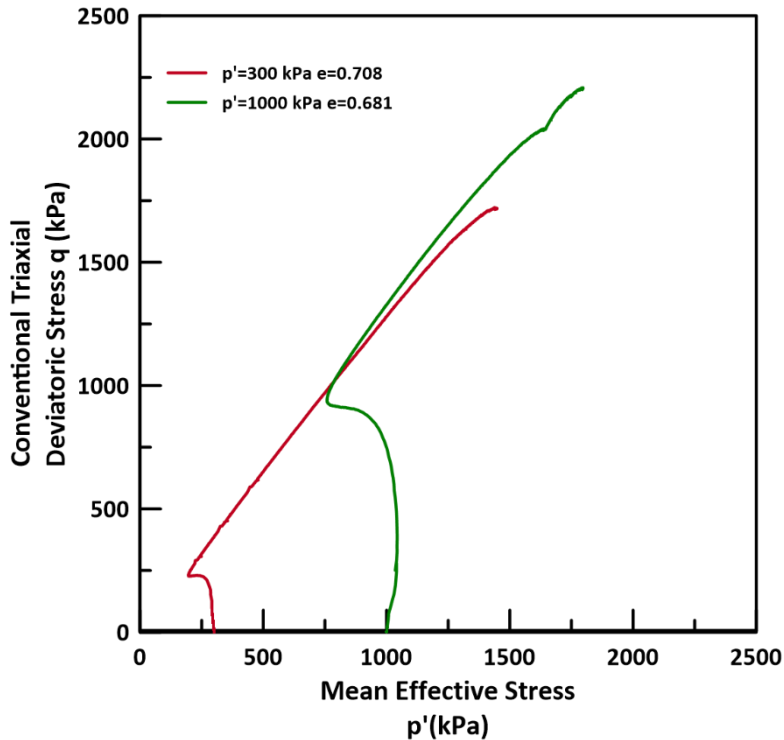
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες που εκτελέστηκαν σε δοκίμια άμμου M31 (Pavlopoulou and Georgiannou, 2021) και επελέγησαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Σε όλες τις μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης στο στάδιο του κορεσμού επιβλήθηκε αντιπίεση (back pressure) 700 kPa και η παράμετρος Skempton προκύπτει $B > 0.97$ ($B = \Delta u / \Delta \sigma$) υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμίων άμμου. Εξετάζονται 2 πειραματικές δοκιμές με τάσεις ισότροπης στερεοποίησης $p' = 300$ και 1000 kPa και με δείκτες πόρων $e=0.708$ και $e=0.681$, αντίστοιχα. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμίων έχουν εύρος τιμών $D_r=47-55\%$. Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης, η άμμος M31 φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τις 2 εξεταζόμενες δοκιμές σε όρους αποκλίνουσας τάσης, q' – αξονικής παραμόρφωσης, ϵ_a Και για τις δύο δοκιμές παρατηρείται αρχική αύξηση της αποκλίνουσας τάσης q μέχρι μία μέγιστη τιμή, και στη συνέχεια σταθεροποίησή με αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης. Η δοκιμή με αρχική ενεργό τάση $p=1000$ kPa αναπτύσσει μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τη δοκιμή με αρχική ενεργό τάση $p=300$ kPa και εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της σε μικρότερη αξονική παραμόρφωση.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται διαδρομές τάσεων στον χώρο q - p' για τις δοκιμές με αρχικές ενεργές τάσεις $p=300$ και $p=1000$ kPa. Και στις 2 δοκιμές εφαρμόστηκαν συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης και για αυτό και δεν έχουν σταθερή κλίση. Πριν το σημείο αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά (Phase Transformation) παρατηρείται πιο έντονη τάση για συστολή για τη δοκιμή με τη μεγαλύτερη αρχική ενεργό τάση. Οι δύο καμπύλες συγκλίνουν καθώς οι δοκιμές πλησιάζουν στην κρίσιμη κατάσταση.



Σχήμα 3.7 Διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης (q - ϵ_a) για τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (δεδομένα από Pavlopoulou and Georgiannou, 2021)



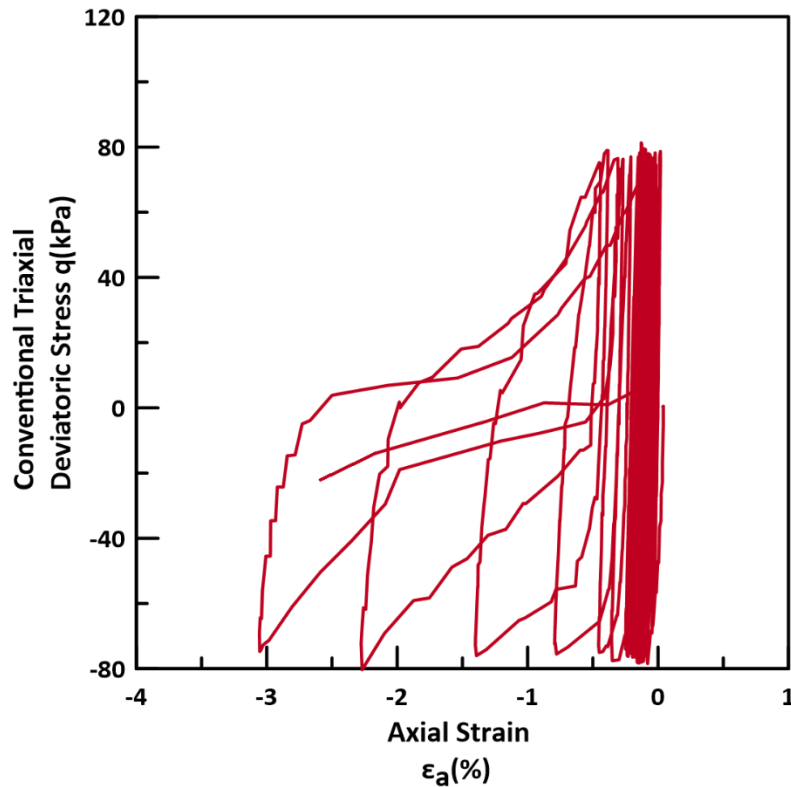
Σχήμα 3.8 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο χώρο ($q - p'$) για τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (δεδομένα από Pavlou and Georgiannou, 2021)

3.2.3 Αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική δοκιμή

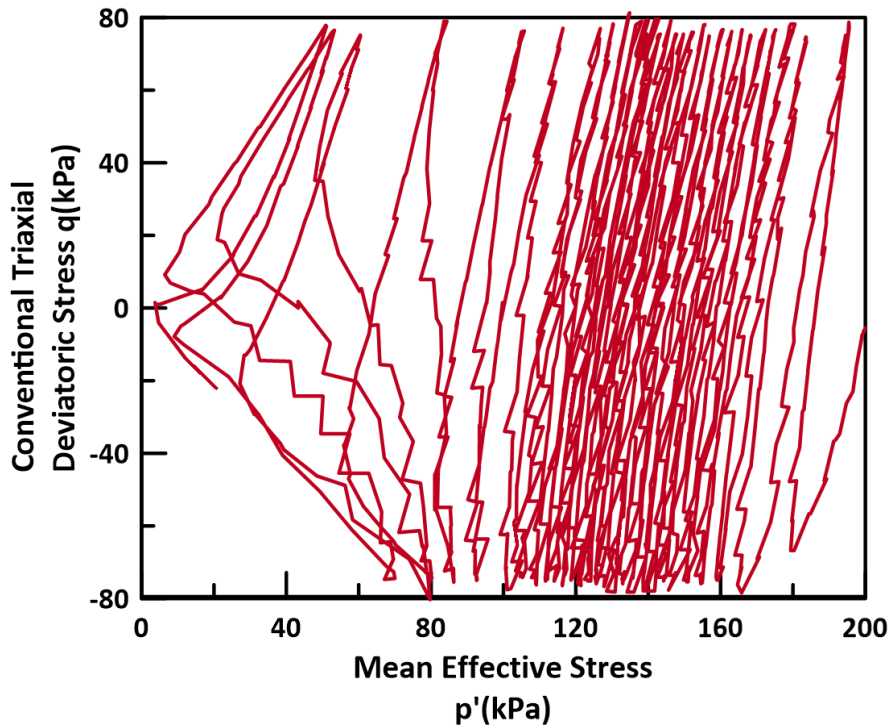
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανακυκλικής δοκιμής υπό αστράγγιστες συνθήκες που εκτελέστηκε σε δοκίμιο άμμου M31 (Pavlou and Georgiannou (2021) που επιλέχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Το δοκίμιο της άμμου M31 στερεοποιήθηκε ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_o = 200$ kPa και έπειτα ακολούθησε το στάδιο της ανακυκλικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες. Το πλάτος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής αποκλίνουσας τάσης ήταν $q_c = 76$ kPa, η οποία αντιστοιχεί σε πλάτος λόγου CSR = $q_c/p'_o = 0.38$. Ο δείκτης πόρων e είναι αυτός που έχει το δοκίμιο μετά το πέρας του σταδίου της στερεοποίησης ($e = 0.633$), που αντιστοιχεί σε σχετική πυκνότητα $D_r = 69\%$. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης ε_a για τη συγκεκριμένη δοκιμή. Παρατηρείται ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης αναπτύσσεται μικρή αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_a < 0.5\%$, ενώ στη συνέχεια η παραμόρφωση αυξάνεται ραγδαία έως και $\varepsilon_a = -3\%$. Η συσσώρευση γίνεται προς αρνητικές τιμές της παραμόρφωσης, γεγονός που οδηγεί την παραμένουσα παραμόρφωση να είναι εφελκυστική (αρνητική). Αυτό υποδηλώνει πως η αντοχή της άμμου είναι μικρότερη σε εφελκυσμό απ' ό,τι σε θλίψη. Η ξαφνική και ραγδαία αύξηση της παραμόρφωσης οφείλεται στη ρευστοποίηση του δοκιμίου.

Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η ενεργός τασική διαδρομή ($q - p'$) της ίδιας δοκιμής. Κατά την ανακυκλική φόρτιση παρατηρείται απομείωση της μέσης ενεργού τάσης p' , λόγω των υπερπλίσεων πόρων που αναπτύσσονται λόγω των αστράγγιστων συνθηκών. Στους πρώτους κύκλους φόρτισης ο ρυθμός απομείωσης του p' είναι φθίνων, ενώ όταν η μέση ενεργός τάση φθάσει τα 100 kPa για τους επόμενους κύκλους, ο ρυθμός αυξάνεται έντονα και τελικά η μέση ενεργός τάση p' οδηγείται σε μηδενισμό και το δοκίμιο έχει ρευστοποιηθεί. Υπό την επιβολή του συγκεκριμένου ανακυκλικού λόγου τάσης CSR = 0.38, το δοκίμιο χρειάστηκε αριθμό κύκλων $N = 27.5$ για να φθάσει σε αρχική ρευστοποίηση. Σε αυτό το σημείο να

επισημανθεί πως, με βάση τον ορισμό της, η αρχική ρευστοποίηση προκύπτει όταν ο λόγος υπερπίεσης πόρων $r_u = \Delta u / \sigma'_{vo}$ (όπου Δu η υπερπίεση των πόρων) φθάνει τιμή μεγαλύτερη του 0.95.



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης ($q-\epsilon_a$) για ανακυκλική τριαξονική δοκιμή άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (δεδομένα από Pavlouroulou and Georgiannou, 2021)



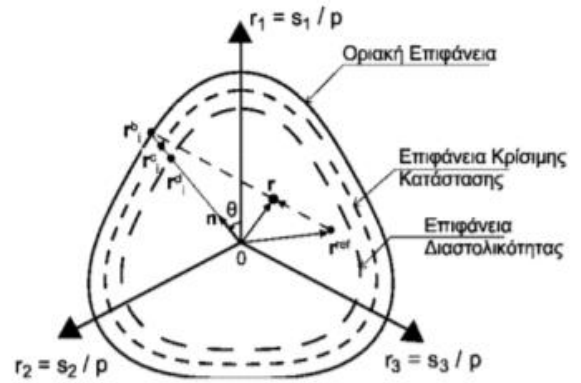
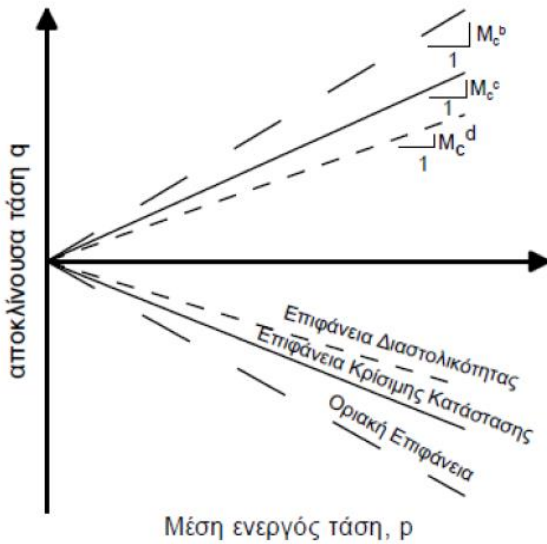
Σχήμα 3.10 Διαδρομή τάσεων στο χώρο ($q - p'$) για τριαξονική δοκιμή άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (δεδομένα από Pavlouroulou and Georgiannou, 2021)

3.3 Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) για χονδρόκοκκα υλικά που επιλέχθηκε για της ανάγκες της παρούσας εργασίας 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 στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Παπαδημητρίου (1999) και στις δημοσιεύσεις των Paradimitriou et al. (2001), Paradimitriou 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. Τελικά, 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 και διαστολικότητας (η οποία αποτελεί γενίκευση της Γραμμής Αλλαγής Φάσης (Phase Transformation Line, PTL) των Ishihara et al. 1975) με την παράμετρο ψ (Been and Jefferies 1985). Αυτή η αλληλεξάρτηση επιτρέπει τη χρήση ενιαίου σετ παραμέτρων ανά άμμο ανεξάρτητα από την αρχική τάση και την αρχική σχετική πυκνότητα.
- Μια τροποποιημένη έκφραση του μη-γραμμικού απολύτως υστερητικού προσομοιώματος Ramberg-Osgood (1943) για το «ελαστικό» μέτρο διάτμησης, 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 του χονδρόκοκκου εδάφους 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 χονδρόκοκκων 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 *FLAC* και *FLAC^{3D}* στην προσομοίωση του φαινομένου της ρευστοποίησης και της απόκρισης συστήματος εδάφους-κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.11 φαίνονται οι μορφές των επιφανειών του προσομοιώματος για τριαξονική εντατική κατάσταση στο χώρο τάσεων q - p' και στην προβολή τους στο αποκλινόν επίπεδο π του γενικευμένου χώρου των τάσεων.



Σχήμα 3.11 Επιφάνειες του προσομοιώματος NTUA-SAND στο χώρο q-p' και η προβολή τους στο επίπεδο - π

(Andrianopoulos et al. 2010)

Στο προσομοίωμα NTUA-SAND, η Γραμμή Κρίσιμη 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 ο δείκτης πόρων. Η μορφή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης δίνεται από σχέση :

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

όπου:

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

Η παράμετρος θέσης ψ ορίστηκε από τους Been and Jefferies (1985) ως εξής:

$$\psi = e - e_{cs} \tag{3.2}$$

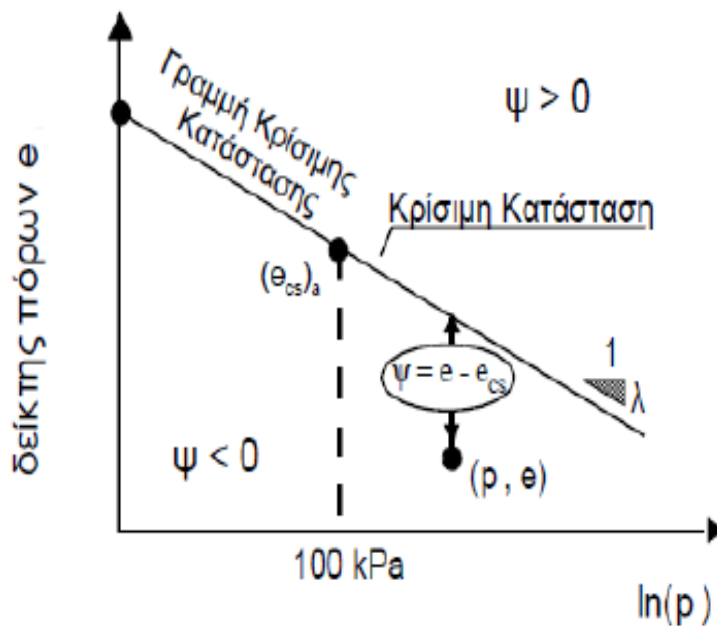
όπου e ο δείκτης πόρων της τρέχουσας κατάστασης και e_{cs} ο δείκτης πόρων στην κρίσιμη κατάσταση για την ίδια ενεργό τάση p' . Η παράμετρος ψ συνδυάζει την επίδραση της πυκνότητας (μέσω αναλογίας του δείκτη e) και της ενεργού τάσης (μέσω του p'), δηλαδή για $\psi < 0$ η απόκριση είναι διαστολική (π.χ., πυκνή άμμος υπό χαμηλές τάσεις), ενώ η απόκριση είναι συστολική (π.χ., χαλαρή άμμος υπό υψηλές τάσεις) για $\psi > 0$,

όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Τέλος για $\psi = 0$ η άμμος είναι δυνητικά σε κρίσιμη κατάσταση. Η κλίση της επιφάνειας κρίσιμης κατάστασης M_c παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της Αντίθετα, οι κλίσεις των επιφανειών οριακής τάσης και διαστολικότητας δεν παραμένουν σταθερές κατά τη φόρτιση, αλλά καθορίζονται με βάση την τρέχουσα τιμή της παραμέτρου θέσης ψ και της αντίστοιχης τιμής M_c σύμφωνα με τις εξισώσεις που πρότειναν οι Manzari and Dafalias (1997):

$$M_{c,e}^d = M_{c,e}^c + k_{c,e}^d \psi \quad (3.3)$$

$$M_{c,e}^b = M_{c,e}^c + k_{c,e}^b \langle -\psi \rangle \quad (3.4)$$

όπου $k_{c,e}^b, k_{c,e}^d$ θετικές σταθερές. Σύμφωνα με το σύμβολο $\langle \rangle$ αν $A > 0$ τότε $\langle A \rangle = A$ ενώ αν $A < 0$ τότε $\langle A \rangle = 0$. Εδώ να διευκρινιστεί πως οι εκθέτες c,b,d αντιστοιχούν στην κρίσιμη επιφάνεια, στην οριακή επιφάνεια και στην επιφάνεια διαστολικότητας αντίστοιχα. Ενώ οι δείκτες c,e στην κλίση των επιφανειών που αντιστοιχεί σε τριαξονική θλίψη και τριαξονικό εφελκυσμό αντίστοιχα. Οι κλίσεις των επιφανειών σε τριαξονική θλίψη και τριαξονικό εφελκυσμό συσχετίζονται με βάση την παράμετρο c του προσομοιώματος.



Σχήμα 3.12: Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο $e-\ln p$ και ορισμός της παραμέτρου κατάστασης ψ .

Η μεταβολή της ενεργού τάσης $\Delta \sigma$ για δεδομένη παραμόρφωση $\Delta \epsilon = [\Delta e + (\frac{\Delta \epsilon_p}{3}) I]$ ορίζεται από την σχέση:

$$\Delta\sigma = 2 G_t \Delta\mathbf{e} + K_t \Delta\varepsilon_p \mathbf{I} - \langle \Lambda \rangle (2 G_t \mathbf{n} + K_t D \mathbf{I}) \quad (3.5)$$

όπου,

- G_t το εφαπτομενικό (ελαστικό) μέτρο διάτμησης
- K_t το εφαπτομενικό (ελαστικό) μέτρο ισότροπης συμπίεσης
- \mathbf{n} το μοναδιαίο διάνυσμα διεύθυνσης φόρτισης
- D ο συντελεστής διαστολικότητας
- $\Delta\varepsilon_p$ ο ογκομετρικός συντελεστής αύξησης της παραμόρφωσης
- \mathbf{I} ο μοναδιαίος τανυστής δεύτερης τάξης
- $\Delta\mathbf{e}$ η αποκλίνουσα συνιστώσα αύξησης της παραμόρφωσης
- Λ ο δείκτης φόρτισης σε όρους εφαρμοζόμενης αύξησης της τάσης

Για την προσομοίωση της μη γραμμικής απόκρισης άμμου σε μικρές και μεσαίες ανακυκλικές τάσεις χρησιμοποιείται μια σχέση που βασίζεται στο απολύτως υστερητικό προσομοίωμα Ramberg - Osgood. Για αυτό, το NTUA-SAND χρησιμοποιεί εφαπτομενικό (ελαστικό) μέτρο διάτμησης που δίδεται ως :

$$G_T = G_{max}/T \quad (3.6)$$

με την παράμετρο $T \geq 1$ να απομειώνει το G_t σε σχέση με το μέγιστο μέτρο διάτμησης G_{max} .

Οι παράμετροι του NTUA-SAND συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1, μαζί με το σύνολο των εξισώσεων του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND. Σημειώνεται ότι το προσομοίωμα απαιτεί τη βαθμονόμηση 13 συνολικά αδιάστατων και θετικών παραμέτρων, από τις οποίες οι 11 αναφέρονται σε μονοτονική φόρτιση και οι πρόσθετες 2 σε ανακυκλική. Όσον αφορά στη διαδικασία βαθμονόμησης, οι τιμές των παραμέτρων προκύπτουν από επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές για τις 10 από τις 13 παραμέτρους, και από δοκιμαστικές αναλύσεις (trial-and-error) που προσομοιώνουν πειραματικά αποτελέσματα για τις υπόλοιπες 3.

Περιγραφή	Εξίσωση	Σταθερές
Κλίση της Οριακής Επιφάνειας για τριαξονική θλίψη (TC)	$M_c^b = M_c^c + k_c^b \langle -\psi \rangle$	M_c^c, k_c^b
Κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	$M_c^d = M_c^c + k_c^d \psi$	k_c^d
Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης	$\psi = e - e_{cs} = e - \Gamma_{cs} + \lambda \ln(p)$	Γ_{cs}, λ
Γενίκευση των επιφανειών στον χώρο των τάσεων	$M_o^{c,b,d} = g(\theta, c^e) M_c^{c,b,d}$	$c = M_o^c / M_c^c$
Σχήμα των επιφανειών του προσομοιώματος στο επίπεδο π	$\xi(\theta, c) = \frac{4c}{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)} \left[\frac{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)}{2} \right]$	
Γωνία Lode θ	$\cos(3\theta) = (3/2)\sqrt{3} (r_{ij}^p r_{ij}^p) / (0.5 r_{ij}^p)^2$	
Μοναδιαίο διάνυσμα για τη διεύθυνση φόρτισης	$n_{ij} = r_{ij}^p / \sqrt{r_{kl}^p r_{kl}^p}$	
Συζυγές σημείο στις επιφάνειες του προσομοιώματος	$r_{ij}^{p,c,b,d} = \sqrt{2/3} M_o^{c,b,d} n_{ij}$	
Απόσταση συζυγούς σημείου από την τρέχουσα κατάσταση	$d^{c,b,d} = (r_{ij}^{p,c,b,d} - r_{ij}^p) n_{ij}$	
Απόσταση αναφοράς	$d_{ref}^{b,d} = \sqrt{2/3} (M_o^{b,d} + M_{\sigma-z}^{b,d})$	
Αρχικό μέτρο διάτμησης	$G_{max} = B p_a \sqrt{p/p_a} / (0.3 + 0.7e)$	B
Εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης	$G_t = G_{max} / T$ $T = 1 + \left(\frac{1}{a_1} - 1 \right) \left(\frac{\sqrt{0.5(r_{ij} - r_{ij}^{ref})(r_{ij} - r_{ij}^{ref})}}{a_1 (G_{max}^{LR} / p^{LR}) \gamma_1} \right)$	a_1, γ_1
Εφαπτομενικό μέτρο ισότροπης συμπίεσης	$K_t = (2/3) G_t (1 + \nu) / (1 - 2\nu)$	ν
Επαύξηση "ελαστικών" παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}_i^e = \dot{\epsilon}_i^e + (\dot{\epsilon}_{vol}^e / 3) \delta_{ij} = (\dot{\epsilon}_{ij} / 2G_t) + (\dot{p} / K_t) \delta_{ij}$	
Επαύξηση πλαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}_i^p = \dot{\epsilon}_i^p + (\dot{\epsilon}_{vol}^p / 3) \delta_{ij} = \langle \Lambda \rangle R_{ij}$	
Διεύθυνση φόρτισης	$L_{ij} = n_{ij} - (V/3) \delta_{ij} = n_{ij} - (n_{kl} r_{kl} / 3) \delta_{ij}$	
Διεύθυνση επαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης	$R_{ij} = n_{ij} + (D/3) \delta_{ij}$	
Επαύξηση της ενεργού τάσης	$\dot{\sigma}_{ij} = 2G_t \dot{\epsilon}_{ij} + K_t \dot{\epsilon}_{vol} \delta_{ij} - \langle \Lambda \rangle (2G_t n_{ij} + K_t D \delta_{ij})$	
Δείκτης φόρτισης	$\Lambda = \frac{2G_t n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - V K_t \dot{\epsilon}_{vol}}{K_p + 2G_t - V K_t D}$	
Συντελεστής διαστολικότητας	$D = A_o d^d \left(2 - \sqrt{(d^d) / d_{ref}^d} \right)$	A_o
Πλαστικό μέτρο κράτυσης	$K_p = \rho h_b h_f d^b$	
Εξίσωση νόμου παρεμβολής	$h_b = h_o d^b ^3 / \langle d_{ref}^b - d^b \rangle$	h_o
Επίδραση της αλλαγής της δομής	$h_f = (1 + \langle f_p \rangle^2) / (1 + \langle f_{ij} n_{ij} \rangle)$ $\dot{f}_p = N \dot{\epsilon}_{vol}^p$ $\dot{f}_{ij} = -N \langle -\dot{\epsilon}_{vol}^p \rangle \left[(4 \max f_p ^2) n_{ij} + f_{ij} \right]$ $N = N_o (\sigma_{1,c} / p_a) \langle -\psi_o \rangle$	N_o

Πίνακας 3.1 Εξισώσεις καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND.

3.4 Προσομοίωση της άμμου M31 με χρήση του NTUA-SAND

Η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων άμμου M31 (της παραγράφου 3.2) έγινε με το λογισμικό FLAC 7.0 (Itasca Inc.), με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND, το οποίο είχε βαθμονομηθεί κατάλληλα μόνο για άμμο Nevada από τους Andrianopoulos et al. (2010). Συνεπώς για την άμμο M31 χρειάστηκαν να γίνουν κάποιες αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων. Στον παρακάτω Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές των παραμέτρων για άμμο Nevada, καθώς και οι τιμές που επιλέχθηκαν για την άμμο M31 για τις μονοτονικές και τις ανακυκλικές δοκιμές που ενδιαφέρουν.

Παράμετροι	Άμμος Nevada	Άμμος M31
M_c^c	1.25	1.32
M_c^e	0.90	1.19
$e_{cs,a}$	0.809	0.77
λ	0.022	0.021
B (monotonic/cyclic)	180/600	150/750
ν	0.33	0.33
k_c^b	1.45	1.30
k_c^d	0.30	1.60
γ_1	0.00025	0.00025
α_1 (monotonic/cyclic)	1.00/0.60	1.00/0.7
A_o	0.80	2.00
h_o	15000	15000
N_o	40000	66000

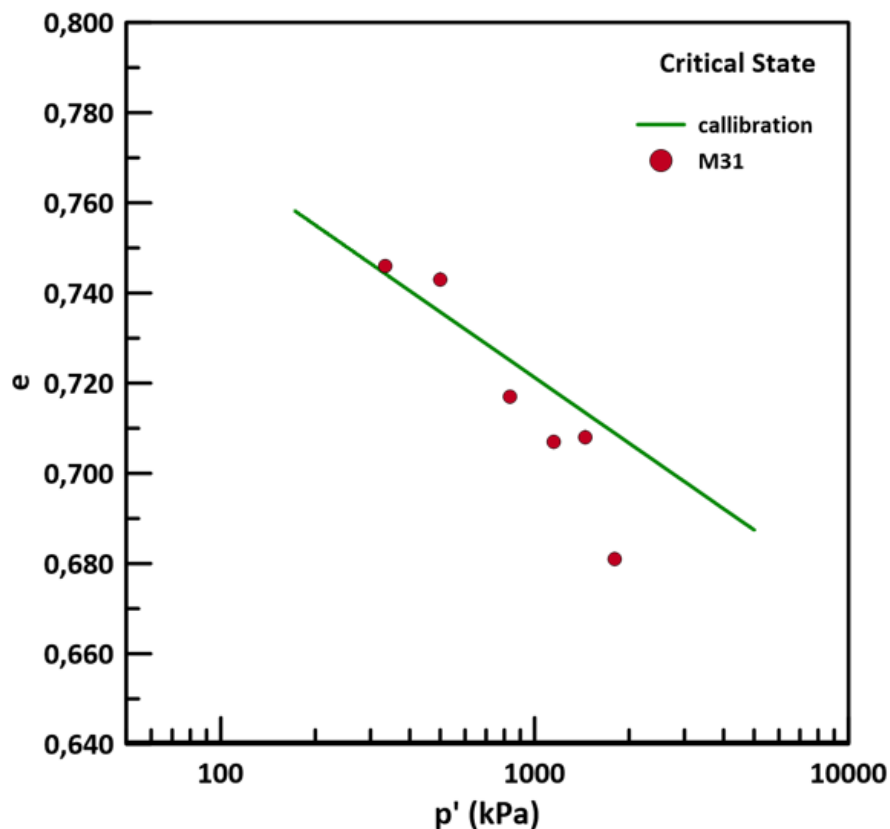
Πίνακας 3.2 Τιμές παραμέτρων NTUA-SAND για άμμο Nevada (Andrianopoulos et al, 2010) και για την άμμο M31.

Αναλυτικότερα, για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα για την κρίσιμη αντοχή και το μέτρο διάτμησης της άμμου M31 χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι M_c^c , M_c^e και B αντίστοιχα σε τιμές 1.32, 1.19 και 150. Παράλληλα για να οριστεί η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης στο χώρο $e-p'$ επιλέχθηκαν οι παράμετροι e_{csa} και λ (0.77 και 0.02), ενώ τα k_c^b και k_c^d επιλέχθηκαν στις τιμές 1.30 και 1.60 για να προσδιοριστεί η γραμμή της οριακής επιφάνειας και η γραμμή της διαστολικής επιφάνειας αντίστοιχα. Επιπλέον, οι παράμετροι h_o και N_o ορίστηκαν σε τιμές 15000 και 66000 για να προσομοιώσουν το πόσο στιβαρό είναι το υλικό. Τέλος, η τιμή $A_o = 2$ χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η διαστολικότητα που θα έχει η άμμος M31.

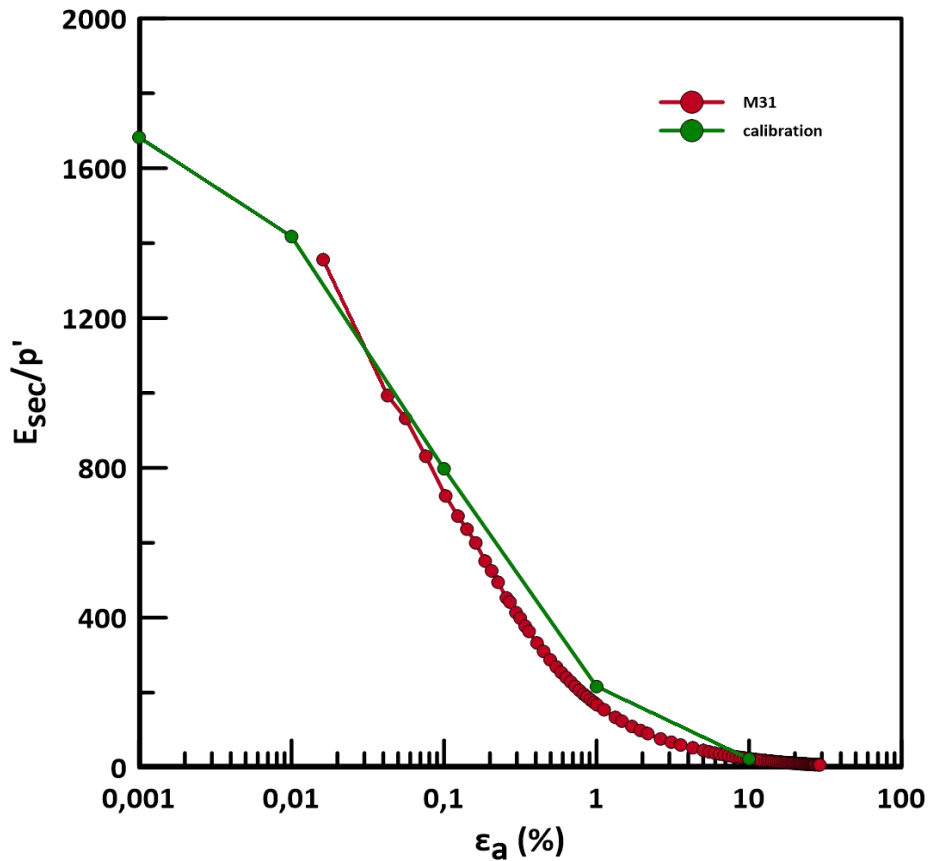
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την άμμο M31. Ειδικότερα, στο Σχήμα 3.13 τοποθετήθηκαν στο χώρο $e-p'$ με λογαριθμικό άξονα τα σημεία των πειραμάτων που προσέγγισαν την κρίσιμη κατάσταση και η γραμμή κρίσιμης κατάστασης της αριθμητικής προσομοίωσης. Η εξίσωση 3.1 χρησιμοποιήθηκε για τη χάραξη της γραμμής προσομοίωσης με $e_{cs,a}=0.77$ και $\lambda=0.021$. Παρατηρούμε ότι τα σημεία των πειραμάτων προσομοιώνονται ορθά εκτός από το σημείο που αντιστοιχεί στη δοκιμή θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες

με $e = 0.681$ και $p = 1000$ kPa που παρεκκλίνει από την ευθεία, αλλά δεν μας ενδιαφέρει πολύ καθώς αντιστοιχεί σε σχετικά μεγάλες τάσεις.

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα δυσκαμψίας της άμμου M31, μέσω του τεμνόμενου μέτρου ελαστικότητας διαιρεμένο με την αρχική ενεργό τάση (E_{sec}/p'). Εμφανίζονται τα αποτελέσματα της μονοτονικής δοκιμής τριαξονικής θλίψης ελεύθερης στράγγισης με αρχική ενεργό τάση $p' = 200$ kPa και με δείκτη πόρων $e = 0.710$ σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης. Επισημαίνεται ότι για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας στην περίπτωση της προσομοίωσης λήφθηκαν συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα προσομοιώνονται επιτυχώς.

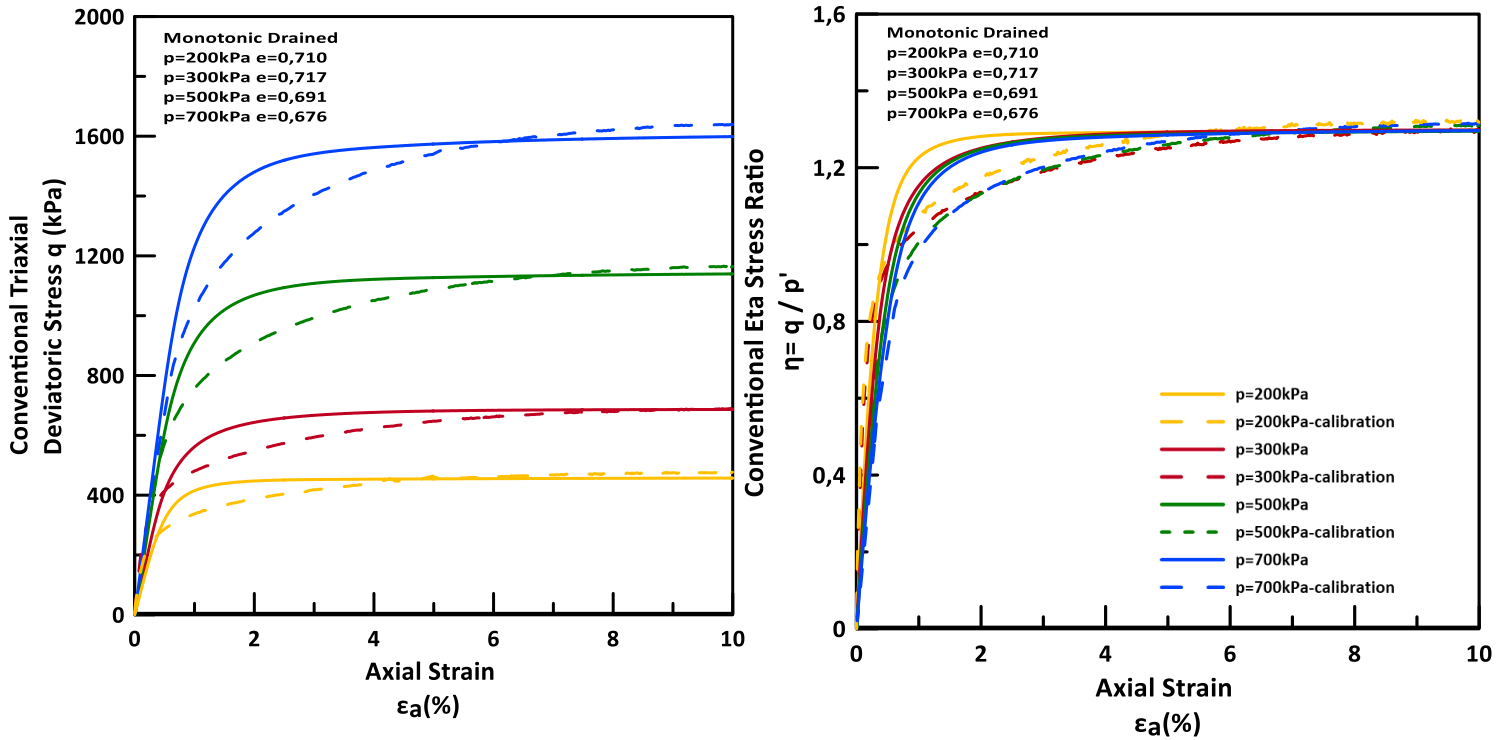


Σχήμα 3.13 Γραμμή κρίσιμης κατάστασης στο χώρο $e-p'$ της άμμου M31 (σημεία) συγκριτικά με την αριθμητική προσομοίωση (συνεχής γραμμή)

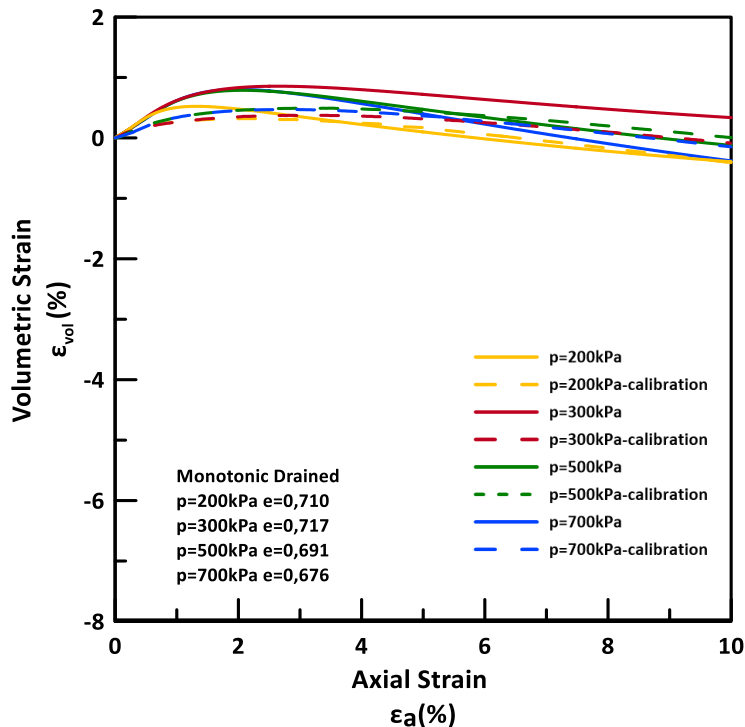


Σχήμα 3.14 Κανονικοποιημένη στιβαρότητα ως συνάρτηση της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a της άμμου M31 (σημεία) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 3.15α παρουσιάζονται οι καμπύλες διατμητικών τάσεων q – αξονικών παραμορφώσεων ϵ_a των μονοτονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης με αρχικές ενεργές τάσεις $p=200\text{kPa}$, $p=300\text{kPa}$, $p=500\text{kPa}$ και $p=700\text{kPa}$ ($e=0.710$, $e=0.717$, $e=0.691$, $e=0.676$ αντίστοιχα) και οι καμπύλες που προέκυψαν από την προσομοίωσή τους. Επιπλέον, στο Σχήμα 3.15β απεικονίζονται οι αντίστοιχες καμπύλες λόγου αποκλινουσών τάσεων η - αξονικών παραμορφώσεων ϵ_a . Παρατηρείται ότι η προσομοίωση είναι επιτυχής στις μικρές παραμορφώσεις ($\epsilon_a < 0.5\%$), ενώ στη συνέχεια είναι οι τιμές της αποκλινουσας τάσης και του λόγου τάσεων αντίστοιχα είναι λίγο μικρότερες από αυτές του πειράματος μέχρι την επίτευξη του μεγίστου όπου και πάλι συγκλίνουν. Παράλληλα, στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται οι καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης των παραπάνω μονοτονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης με τις αντίστοιχες καμπύλες της αριθμητικής τους προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι η προσομοίωση είναι ορθή με την εμφάνιση λίγο μικρότερων ογκομετρικών παραμορφώσεων σε σχέση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

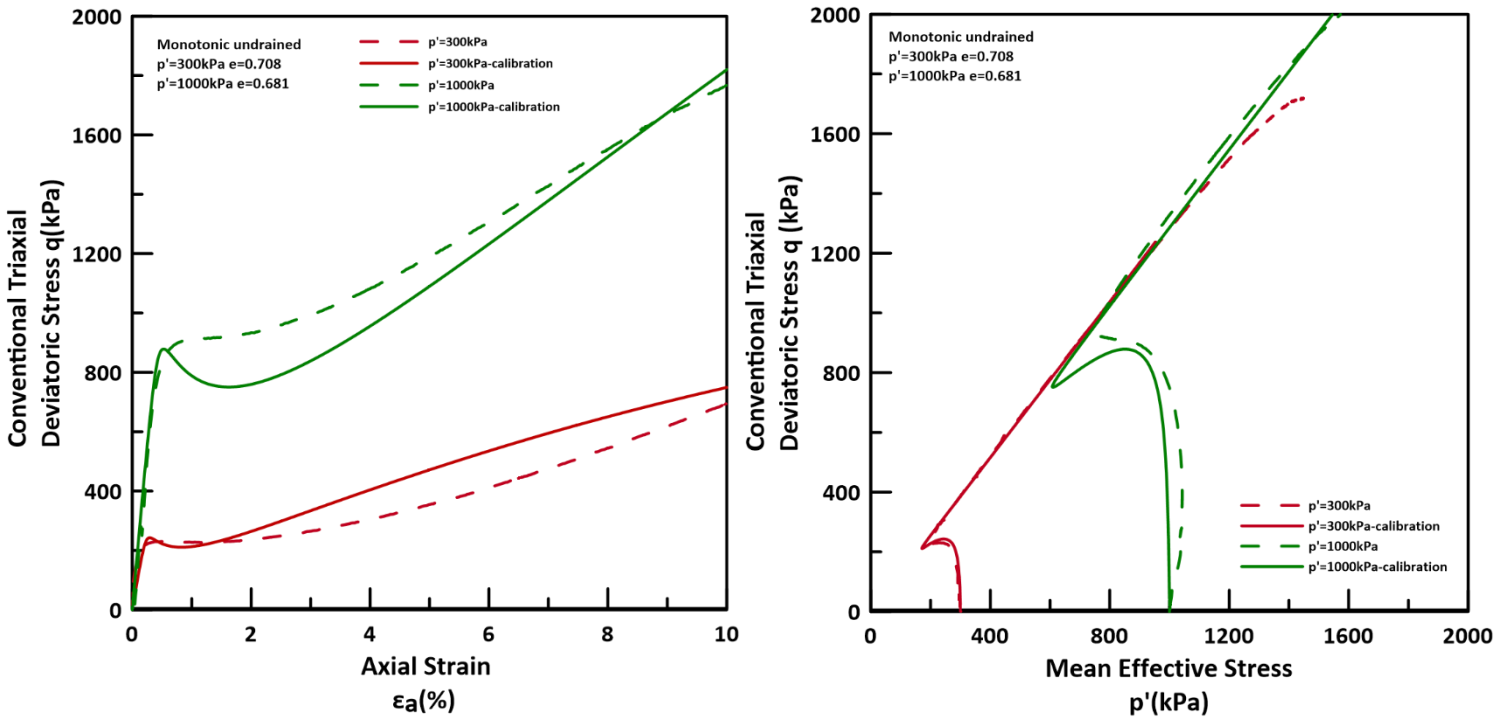


Σχήμα 3.15 Πειραματικές μετρήσεις της άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : α) (αριστερά) καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων, β) (δεξιά) καμπύλες λόγου τάσεων- παραμορφώσεων.



Σχήμα 3.16 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης της άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) συγκριτικά με τις καμπύλες της αριθμητικής προσομοίωσης

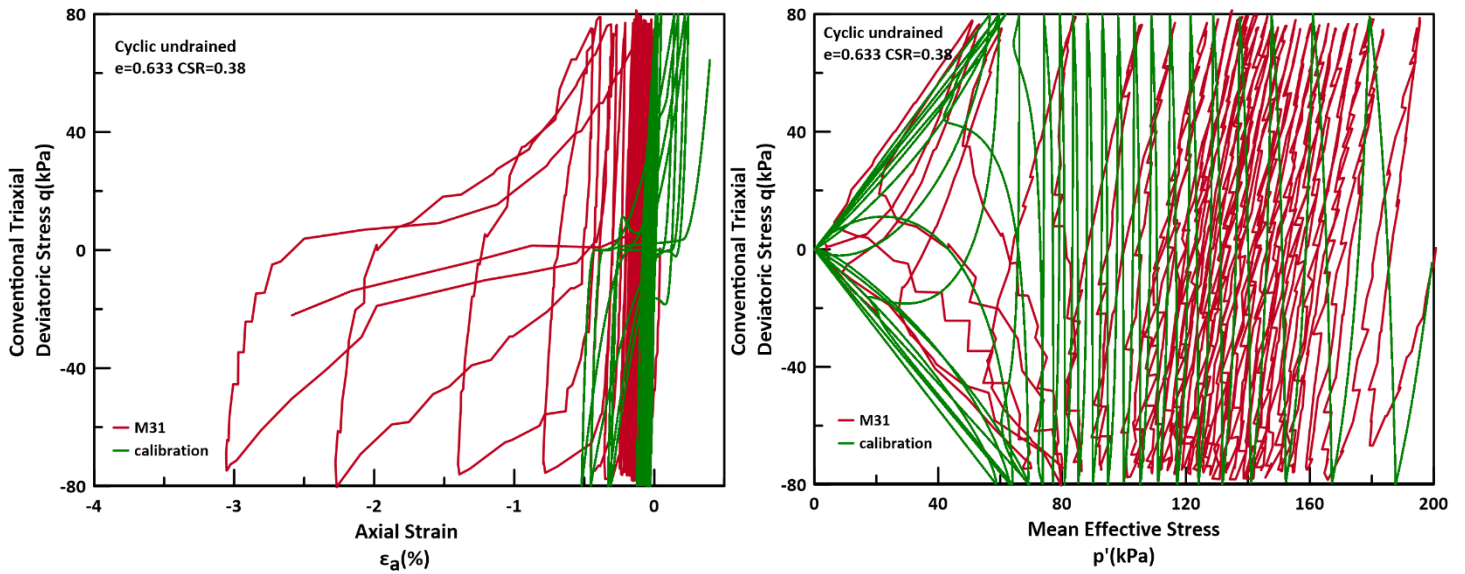
Στα Σχήματα 3.17α και 3.17β παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μονοτονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης με αρχικές ενεργές τάσεις $p=300\text{kPa}$ και $p=1000\text{kPa}$ και με δείκτες πόρων $e=0.708$ και $e=0.681$ και των αντίστοιχων προσομοιώσής τους. Στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων (Σχήμα 3.17α) παρατηρούμε πλήρη ταύτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραμάτων μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης, ενώ στη συνέχεια επιτυγχάνεται μια καλή σύγκλιση και για τις δύο δοκιμές. Στο Σχήμα 3.17β παρουσιάζεται το διάγραμμα των ενεργών τασικών οδεύσεων στο επίπεδο $q-p'$. Παρατηρούμε πλήρη ταύτιση προσομοίωσης-πειράματος και για τις δύο δοκιμές.



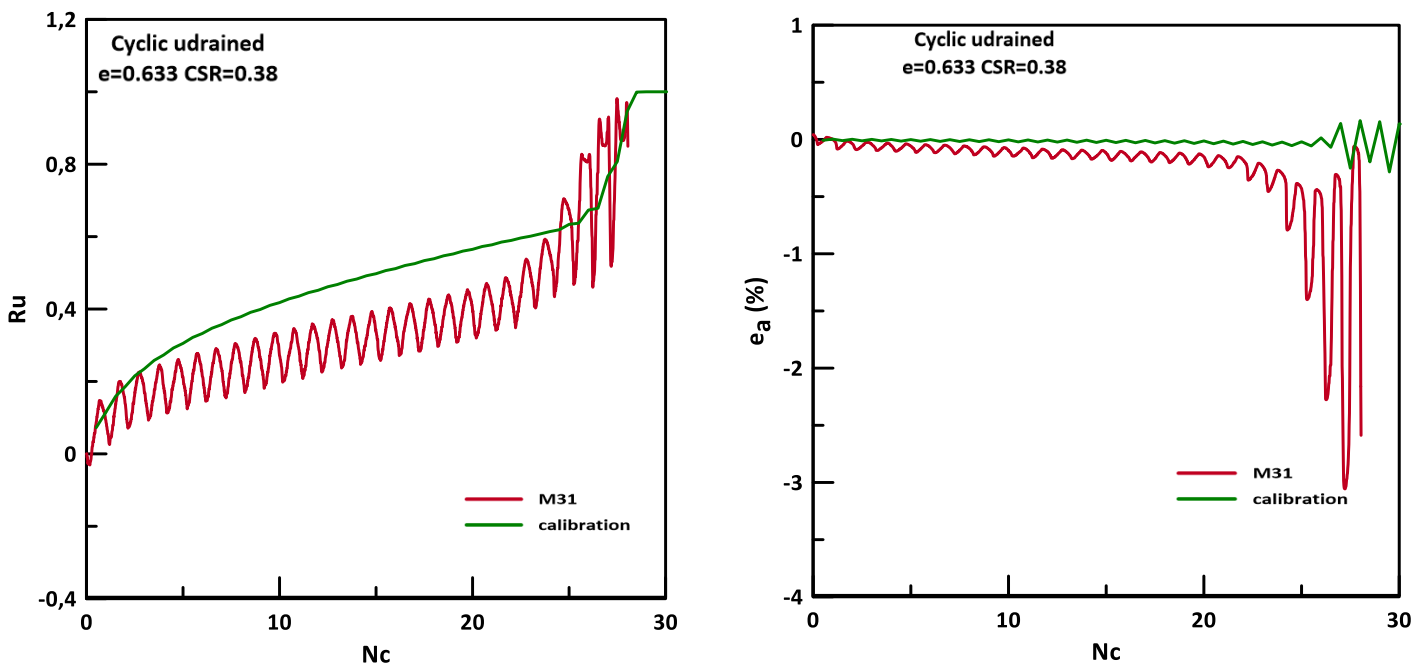
Σχήμα 3.17 Πειραματικές μετρήσεις της άμμου M31 υπό αστράγγιστες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : α) (αριστερά) καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων , β) (δεξιά) ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο $q-p'$

Στη συνέχεια στα Σχήματα 3.18α και 3.18β εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ανακυκλικής δοκιμής της άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με αρχική ενεργό τάση $p=200\text{ kPa}$ και δείκτη πόρων $e=0.633$ και της αντίστοιχης προσομοίωσής της. Υπογραμμίζεται η αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων α_1 και B_0 στην προσομοίωση αυτής της ανακυκλικής δοκιμής, σύμφωνα και με τον Πίνακα 3.2. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.18α απεικονίζονται οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων και στο Σχήμα 3.18β οι ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο $q-p'$.

Επιπλέον, στο Σχήμα 3.19α συγκρίνονται η πειραματική και η αριθμητική καμπύλη του λόγου υπερπίεσης πόρων $R_u=\Delta u/p$ με το αριθμό των κύκλων N_c , ενώ στο Σχήμα 3.19β συγκρίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a με το αριθμό των κύκλων N_c . Παρατηρούμε ότι και στα 4 διαγράμματα προσομοιώνεται ικανοποιητικά το πείραμα μέχρι τη ρευστοποίηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ρευστοποίηση του πειράματος και της προσομοίωσης απαιτεί σχεδόν τον ίδιο αριθμό κύκλων φόρτισης.



Σχήμα 3.18 Πειραματικές μετρήσεις της άμμου M31 (ανακυκλική δοκιμή εμποδιζόμενης στράγγισης) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : α) (αριστερά) καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων , β) (δεξιά) ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο $q-p'$.



Σχήμα 3.19 Πειραματικές μετρήσεις της άμμου M31 (ανακυκλική δοκιμή εμποδιζόμενης στράγγισης) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : α) (αριστερά) καμπύλες $Ru = \Delta u / p'$ με τον αριθμό των κύκλων N_c , β) (δεξιά) καμπύλες παραμόρφωσης ϵ_a με τον αριθμό των κύκλων N_c .

Σελίδα επίτηδες κενή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Καταστατική προσομοίωση μηχανικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένης άμμου

4.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND για την σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31, επί τη βάση των πειραμάτων των Ρανιουρούλου and Georgiannou (2021). Στόχος της βαθμονόμησης αυτής είναι να διερευνήσει πως αλλάζει η βαθμονόμηση αναφοράς για την ίδια άμμο (που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3) όταν αυτή σταθεροποιηθεί με κολλοειδή πυριτία. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών στη σταθεροποιημένη άμμο M-31, ενώ στην ενότητα 4.3 παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του προσομοιώματος για την εν λόγω σταθεροποιημένη άμμο, καθώς και η προσομοίωση των συγκεκριμένων πειραμάτων ως ένδειξη της επιτευχθείσας ακρίβειας. Υπογραμμίζεται εδώ ότι η χρήση του προσομοιώματος NTUA-SAND και για τη σταθεροποιημένη άμμο υπονοεί ότι οι βασικές αρχές της συμπεριφοράς σταθεροποιημένων άμμων παραμένουν ίδιες με αυτές των φυσικών, και ότι η σταθεροποίηση οδηγεί μόνο σε ποσοτικές και όχι ποιοτικές διαφορές στη μηχανική συμπεριφορά.

4.2 Μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένης άμμου

4.2.1 Στραγγιζόμενες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης

Στην ενότητα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες που εκτελέστηκαν σε δοκίμια σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου M31 (Ρανιουρούλου and Georgiannou 2021) και επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Σε όλες αυτές τις μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης στο στάδιο του κορεσμού επιβλήθηκε αντιπίεση (back pressure) 700 kPa και η παράμετρος Skempton προκύπτει $B > 0.97$ ($B = \Delta u / \Delta \sigma$) υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμίων άμμου. Τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα και εδώ εξετάζονται 5 δοκιμές με αρχική ενεργό μέση τάση $p'_o = 100, 200, 300, 500$ και 700 kPa και με δείκτη πόρων $e=0.744, e=0.751, e=0.721, e=0.722, e=0.711$ αντίστοιχα. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμίων έχουν εύρος τιμών $D_r = 35-47\%$. Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης, η σταθεροποιημένη άμμος φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.025 mm/min

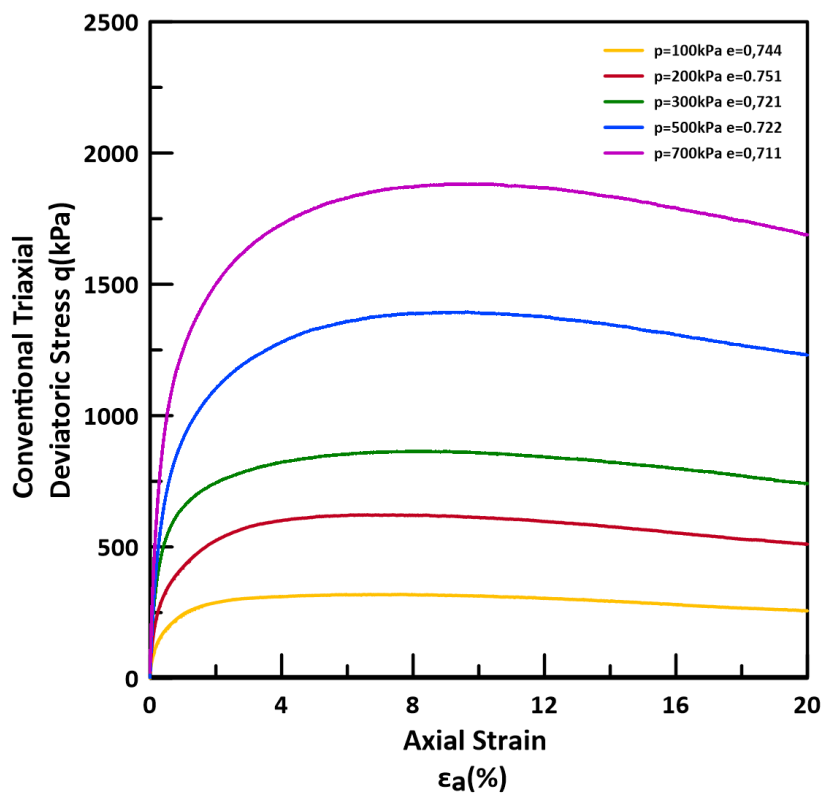
Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τις 5 εξεταζόμενες δοκιμές σε όρους αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a . Με βάση την εικόνα της απόκρισης σε όρους τάσεων - παραμορφώσεων διαφαίνεται η διαστολική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς τάσης – δείκτη πόρων που εξετάζονται. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αρχική αύξηση της αποκλίνουσας τάσης q μέχρι μία μέγιστη τιμή, και στη συνέχεια πτώση αυτής (χαλάρωση) με τη διαρκή αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης. Η αποκλίνουσα τάση τείνει να σταθεροποιηθεί για μεγάλη αξονική παραμόρφωση ϵ_a , καθώς προσεγγίζεται η κρίσιμη κατάσταση. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρείται μεγαλύτερη τιμή μέγιστης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της άμμου M31 (Σχήμα 3.3).

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.2, για τις παραπάνω δοκιμές παρουσιάζεται η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_{vol} συναρτήσει της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a κατά τη διάρκεια της

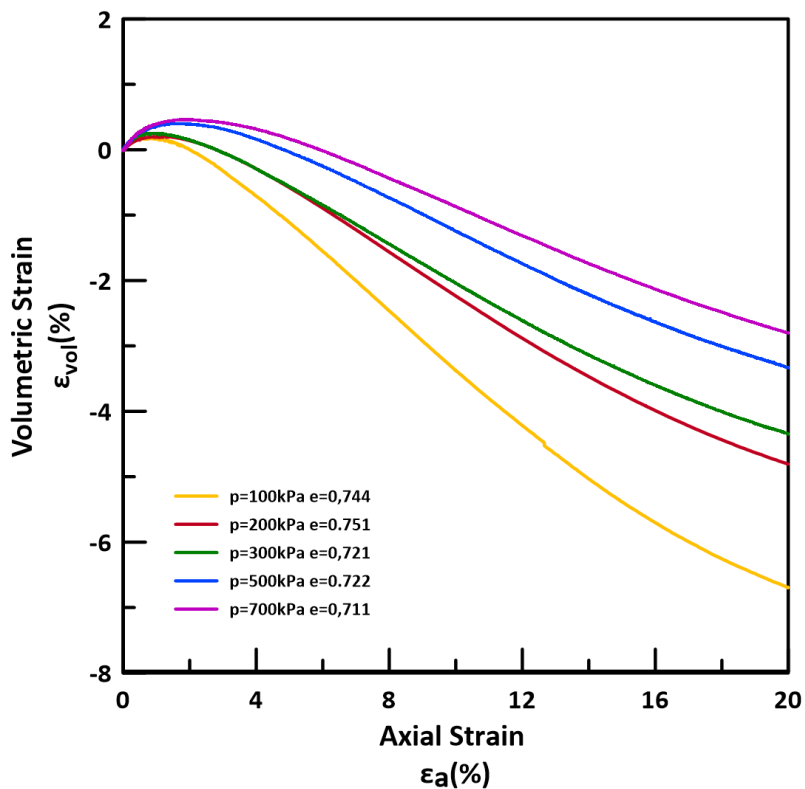
δοκιμής. Και για τις 5 δοκιμές παρατηρείται αρχικά συστολική συμπεριφορά (θετική ογκομετρική παραμόρφωση – μείωση όγκου), ενώ στη συνέχεια η συμπεριφορά μεταβαίνει σε διαστολική (αρνητική ογκομετρική παραμόρφωση – αύξηση όγκου) και τελικά παρατηρείται μία τάση σταθεροποίησης των ογκομετρικών παραμορφώσεων όσο προσεγγίζεται η κρίσιμη κατάσταση. Με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης εμφανίζεται μείωση της διαστολικότητας και των τελικών τιμών της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ποιοτικά ίδια με τη φυσική άμμο. Όμως η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη διαστολικότητα σε σχέση με τη φυσική άμμο M31 (Σχήμα 3.4) για όλες τις τάσεις στερεοποίησης.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου η της αποκλίνουσας τάσης q προς τη μέση ενεργό τάση p' συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a . Ο λόγος η αρχικά αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται, ενώ είναι χαρακτηριστικό είναι πως όλες οι δοκιμές τείνουν να καταλήξουν σε κοινή μοναδική τιμή λόγου η σε μεγάλη παραμόρφωση, προσεγγίζοντας την κρίσιμη κατάσταση. Παρατηρείται επίσης διαφοροποίηση της μέγιστης τιμής του λόγου ανάλογα με την αρχική ενεργό τάση p' . Συγκεκριμένα για μικρότερες αρχικές ενεργές τάσεις παρατηρείται μεγαλύτερη μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων. Η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων για όλες τις δοκιμές είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της άμμου M31.

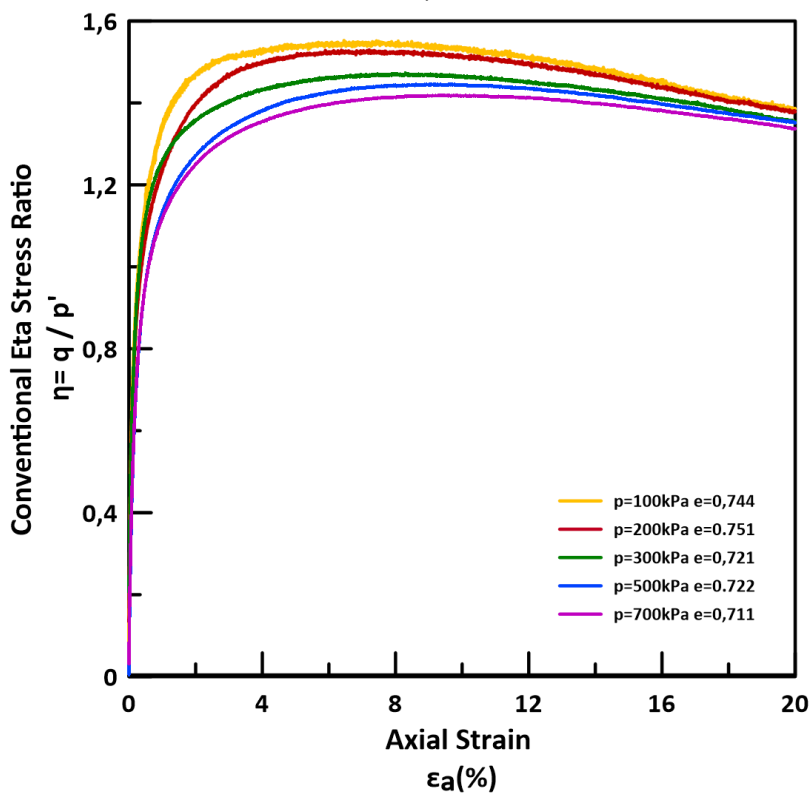
Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι ενεργές τασικές οδεύσεις στον χώρο $q-p'$ για το εύρος ενεργών τάσεων από 100 έως 700 kPa. Η στράγγιση γι' αυτές τις δοκιμές είναι ελεύθερη, συνεπώς και οι 5 δοκιμές παρουσιάζουν σταθερή κλίση στην τασική οδεύση. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ενεργός τάση αυξάνεται και η μέγιστη τιμή της αποκλίνουσας τάσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κορυφές των τεσσάρων καμπυλών ορίζουν μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων με κλίση μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ευθεία της άμμου M31, σε συμφωνία με όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω για τη μεγαλύτερη αντοχή σε όρους q που επιδεικνύει η σταθεροποιημένη άμμος.



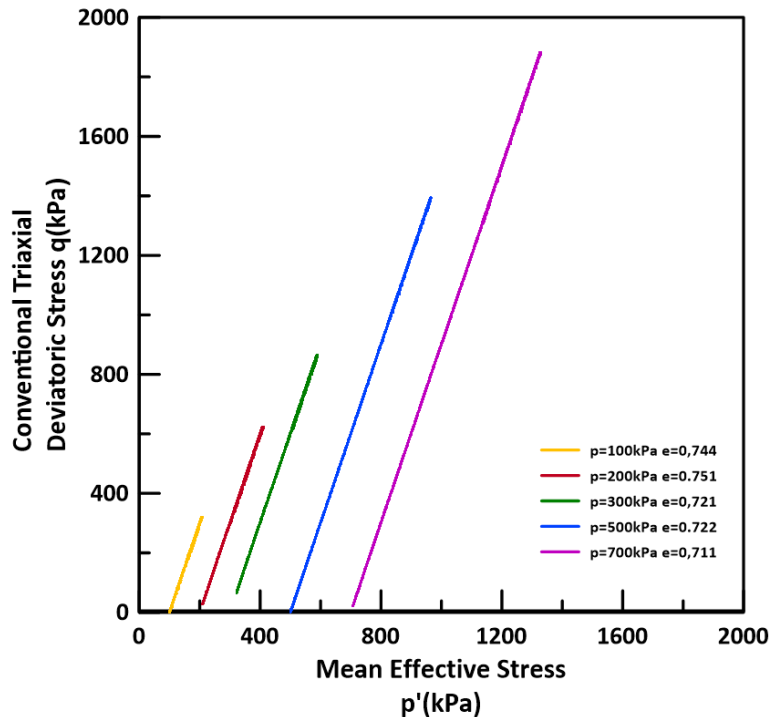
Σχήμα 4.1 Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για δοκιμές τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Pavlouroulou and Georgiannou, 2021)



Σχήμα 4.2 Καμπύλες εξέλιξης ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_{vol} – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για δοκιμές τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Panolroulou and Georgiannou, 2021).



Σχήμα 4.3 Καμπύλες λόγου τάσεων – αξονικής παραμόρφωσης (η - ϵ_a) για δοκιμές τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Panolroulou and Georgiannou, 2021).



Σχήμα 4.4 Διαδρομές τάσεων στο χώρο $(q-p')$ για δοκιμές τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (δεδομένα από Ρανλιουρούλου and Georgiannou, 2021).

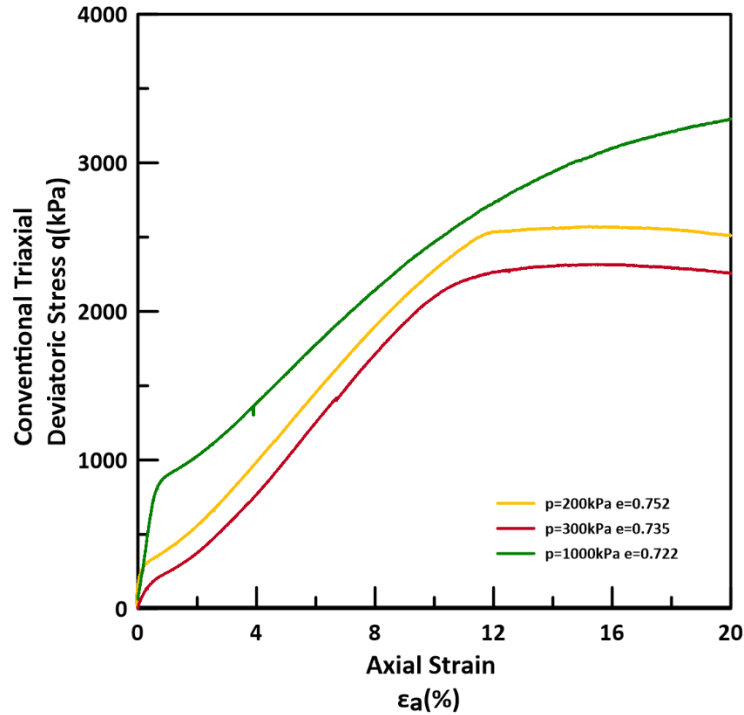
4.2.2 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες που εκτελέστηκαν σε δοκίμια σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτιτιά άμμου M31. Σε όλες τις μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης στο στάδιο του κορεσμού επιβλήθηκε αντιπίεση (back pressure) 700 kPa και η παράμετρος Skempton προκύπτει $B > 0.97$ ($B = \Delta u / \Delta \sigma$) υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμίων άμμου. Τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα και εξετάζονται 3 πειραματικές δοκιμές με αρχική μέση ενεργό τάση στερεοποίησης $p' = 200, 300$ και 1000 kPa και με δείκτη πόρων $e=0.752, e=0.735$ και $e=0.722$, αντίστοιχα. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμίων έχουν εύρος τιμών $D_r = 35-43\%$. Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης, η σταθεροποιημένη άμμος φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.025 mm/min.

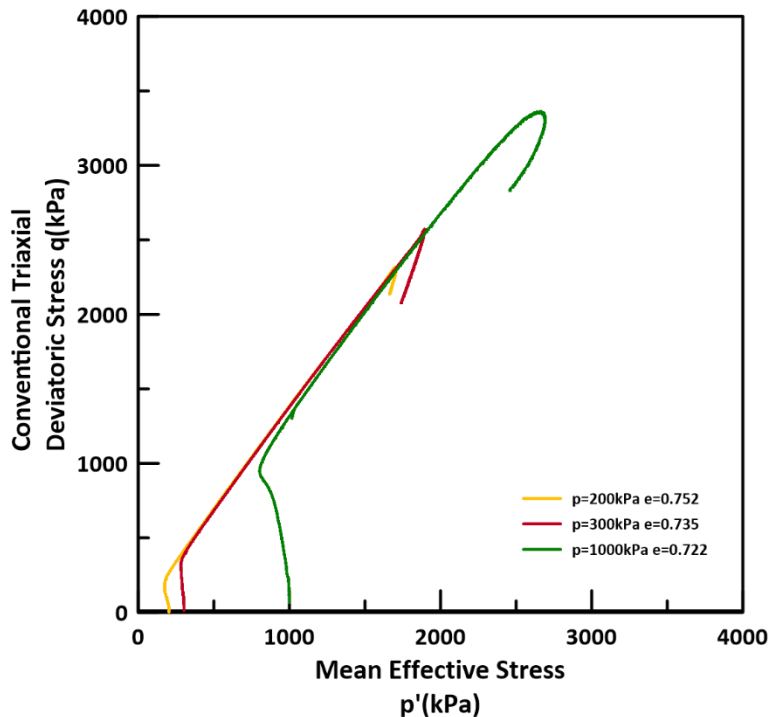
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για τις 3 εξεταζόμενες δοκιμές. Και για τις 3 δοκιμές παρατηρείται αρχικά αύξηση της αποκλίνουσας τάσης q μέχρι μία μέγιστη τιμή, και στη συνέχεια μικρή μείωση αυτής με τη διαρκή αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης. Η δοκιμή με αρχική ενεργό τάση $p'_o = 1000$ kPa αναπτύσσει μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τη δοκιμή με αρχική ενεργό τάση $p'_o = 300$ kPa και εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της σε μικρότερη αξονική παραμόρφωση. Αντίστοιχα, η δοκιμή με αρχική ενεργό τάση $p'_o = 300$ kPa αναπτύσσει μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τη δοκιμή με αρχική ενεργό τάση $p'_o = 200$ kPa και εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της σε μικρότερη αξονική παραμόρφωση.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων στον χώρο $q-p'$ για τις δοκιμές με αρχική μέση ενεργό τάση στερεοποίησης $p'_o = 200, 300$ και 1000 kPa. Καθώς οι συνθήκες στράγγισης είναι εμποδιζόμενες, η κλίση δεν είναι σταθερή. Εν γένει, στην αρχή παρατηρείται μείωση της μέσης ενεργού τάσης p' , μέχρι ένα σημείο όπου η συμπεριφορά αντιστρέφεται και από εκεί και πέρα πλέον η p' αυξάνεται. Το σημείο αυτό ισοδυναμεί

με το σημείο όπου η συμπεριφορά μετατρέπεται από συστολική σε διαστολική, και ονομάζεται σημείο αλλαγής φάσης. Κατά τη φάση της συστολής, παρατηρείται πιο έντονα τάση συστολική συμπεριφορά, όσο η αρχική μέση ενεργός τάση στερεοποίησης p'_0 είναι μεγαλύτερη. Από μία παραμόρφωση και πέρα, οι 3 καμπύλες συγκλίνουν καθώς οι δοκιμές πλησιάζουν στην κρίσιμη κατάσταση. Επισημαίνεται ότι η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει λιγότερη τάση για συστολή σε σχέση με την άμμο M31 (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 4.5 Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για δοκιμές τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό αστράγγιστες συνθήκες (δεδομένα από Ρανλορούλου and Georgiannou, 2021).



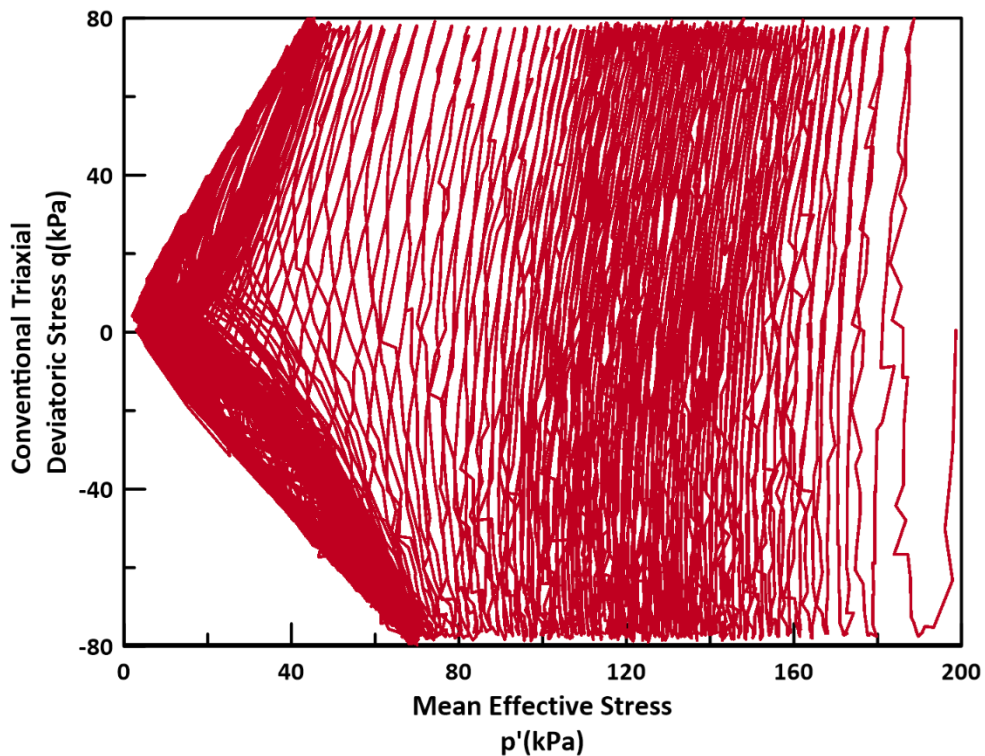
Σχήμα 4.6 Ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο $(q - p')$ για δοκιμές άμμου τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης M31 υπό αστράγγιστες συνθήκες (δεδομένα από Ρανλορούλου and Georgiannou, 2021).

4.2.3 Αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική δοκιμή

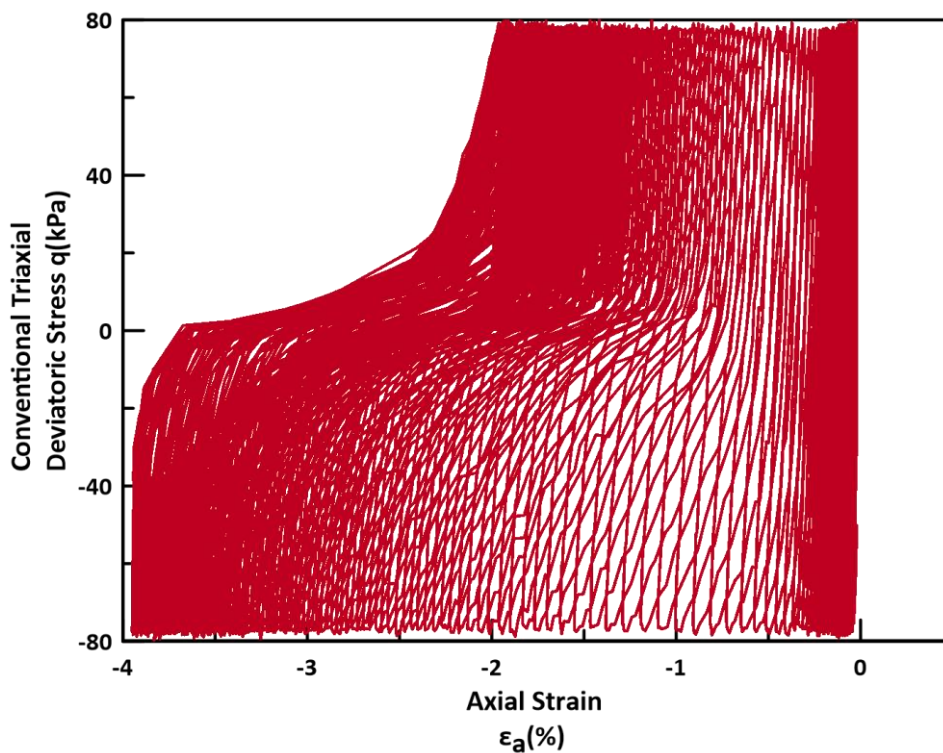
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανακυκλικής τριαξονικής δοκιμής υπό αστράγγιστες συνθήκες που εκτελέστηκε σε δοκίμιο σταθεροποιημένης άμμου M31 (Pavlopoulou and Georgiannou, 2021) που επιλέχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Το δοκίμιο της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου M31 στερεοποιήθηκε ισότροπα σε αρχική μέση ενεργό τάση $p'_0 = 200$ kPa και έπειτα ακολούθησε το στάδιο της ανακυκλικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες. Το πλάτος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής αποκλίνουσας τάσης ήταν $q = 76$ kPa, η οποία αντιστοιχεί σε λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR = q/p'_0 = 0.38$. Ο δείκτης πόρων, e , είναι αυτός που έχει το δοκίμιο μετά το πέρας του σταδίου της στερεοποίησης ($e=0.635$).

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η ενεργός τασική όδευση ($q - p'$) της δοκιμής αυτής. Κατά την ανακυκλική φόρτιση παρατηρείται απομείωση της μέσης ενεργού τάσης p' , καθώς λόγω των αστράγγιστων συνθηκών αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων, που συμβάλλουν στη μείωση των ενεργών τάσεων. Στους πρώτους κύκλους φόρτισης ο ρυθμός απομείωσης του p' είναι φθίνων, ενώ όταν η μέση ενεργός τάση φθάσει τα 100 kPa και για τους επόμενους κύκλους, ο ρυθμός αυξάνεται έντονα και τελικά η μέση ενεργός τάση p' οδηγείται σε μηδενισμό και το δοκίμιο έχει ρευστοποιηθεί. Υπό την επιβολή του συγκεκριμένου ανακυκλικού λόγου τάσης $CSR = 0.38$, το δοκίμιο χρειάστηκε αριθμό κύκλων $N = 96.4$ για να φθάσει σε ρευστοποίηση. Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί πως ο ορισμός της ρευστοποίησης εδώ, γίνεται με βάση το κριτήριο όπου ο λόγος υπερπίεσης πόρων $r_u = \Delta u / \sigma'_{vo}$ (όπου Δu η υπερπίεση των πόρων), φθάνει τιμή μεγαλύτερη του 0.95.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η σχέση τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης ε_a για τη συγκεκριμένη δοκιμή. Παρατηρείται ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης αναπτύσσεται μικρή αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_a < 0.5\%$, ενώ στη συνέχεια η παραμόρφωση αυξάνεται ραγδαία έως και $\varepsilon_a = -4\%$. Η συσσώρευση γίνεται προς αρνητικές τιμές της παραμόρφωσης, γεγονός που οδηγεί την παραμένουσα παραμόρφωση να είναι εφελκυστική (αρνητική). Αυτό υποδηλώνει πως η αντοχή της άμμου είναι μικρότερη σε εφελκυσμό απ' ότι σε θλίψη. Η ξαφνική και ραγδαία αύξηση της παραμόρφωσης οφείλεται στην αύξηση της υπερπίεσης των πόρων και στην τελική ρευστοποίηση του δοκιμίου, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως η παραμόρφωση συσσωρεύεται βαθμιαία και συνεχώς αυξάνεται, χωρίς το δοκίμιο να καταρρέει.



Σχήμα 4.7 Ενεργός τασική όδευση στο χώρο ($q - p'$) για ανακυκλική τριαξονική δοκιμή σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό αστράγγιστες συνθήκες.



Σχήμα 4.7 Σχέση αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για ανακυκλική τριαξονική δοκιμή σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό αστράγγιστες συνθήκες.

4.3 Προσομοίωση της σταθεροποιημένης άμμου M31 με χρήση του NTUA-SAND

Η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων σταθεροποιημένης άμμου M31 έγινε με το λογισμικό FLAC 7.0 (Itasca Inc.) σε επίπεδο μοναδιαίου στοιχείου, με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND όπως έγινε και για την φυσική άμμο. Έγινε νέα βαθμονόμηση του προσομοιώματος, ώστε να προσομοιώνει την συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31. Στόχος ήταν να προσομοιωθεί η διαφοροποιημένη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με τη μη - σταθεροποιημένη, βαθμονομώντας κατάλληλα συγκεκριμένες παραμέτρους του προσομοιώματος. Προσπάθεια έγινε, ώστε οι απαιτούμενες αλλαγές μεταξύ των δύο ομάδων παραμέτρων να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Στον παρακάτω Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές που επιλέχθηκαν για τη βαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου για τις μονοτονικές και τις ανακυκλικές δοκιμές, ενώ χάριν σύγκρισης παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές για τη φυσική άμμο M31 (από Κεφάλαιο 3). Με έντονα γράμματα εντοπίζονται οι παράμετροι στις οποίες αλλάχθηκε η τιμή της παραμέτρου λόγω σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτρία.

Παράμετροι	Σταθεροποιημένη άμμος M31	Φυσική άμμος M31
M_c^c	1.45	1.32
M_c^e	1.16	1.19
$e_{cs,a}$	0.905	0.77
λ	0.05	0.021
B (monotonic/cyclic)	130/580	150/750
ν	0.33	0.33
k_c^b	1.30	1.30
k_c^d	0.80	1.60
γ_1	0.00025	0.00025
α_1 (monotonic/cyclic)	1.00/0.70	1.00/0.70
A_o	2.00	2.00
h_o	15000	15000
N_o	18000	66000

Πίνακας 4.1 Τιμές παραμέτρων NTUA-SAND για σταθεροποιημένη άμμο M31, και σύγκριση με τις αντίστοιχες για τη φυσική άμμο M31

Αναλυτικότερα, για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα για την κρίσιμη αντοχή και το μέτρο διάτμησης της σταθεροποιημένης με πυριτρία άμμου M31 χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι M_c^c , M_c^e και B αντίστοιχα σε τιμές 1.45, 1.16 και 130 (μονοτονικές δοκιμές). Παράλληλα για να οριστεί η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης στο χώρο e - p' επιλέχθηκαν οι παράμετροι e_{csa} και λ (0.905 και 0.05), ενώ τα k_c^b και k_c^d επιλέχθηκαν στις τιμές 1.30 και 0.80 για να προσδιοριστεί η κλίση της οριακής επιφάνειας και η κλίση της επιφάνειας διαστολικότητας. Επιπλέον, οι παράμετροι h_o και N_o ορίστηκαν σε τιμές 15000 και 18000 για να προσομοιάσουν το πόσο στιβαρό είναι το υλικό. Τέλος, η τιμή $A_o = 2$ χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η διαστολικότητα που θα έχει η σταθεροποιημένη άμμος.

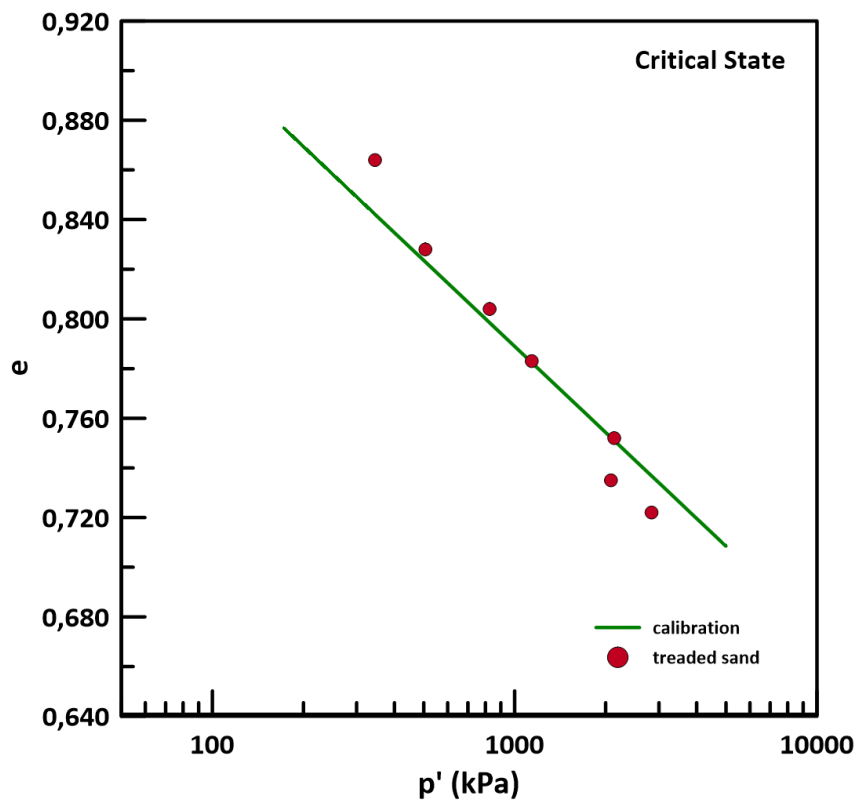
Μια σύγκριση της σταθεροποιημένης με πυριτρία και της φυσικής άμμου υποδεικνύει ότι η πρώτη έχει μεγαλύτερη αντοχή και μεγαλύτερη διαστολικότητα. Συνεπώς, αυξήθηκε σημαντικά η γωνία τριβής στην

κρίσιμη κατάσταση (M_c^c και μικρο-διόρθωση στην τιμή M_e^c) και η θέση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο χώρο $e-p'$ ($e_{cs,a}$ και λ). Επιπλέον, η σταθεροποιημένη άμμος προκύπτει και πιο στιβαρή, άρα θα ήταν λογικό να αυξηθεί και το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης G_t μέσω της παραμέτρου B . Ωστόσο επειδή αυξηθήκαν σημαντικά οι παράμετροι που επηρεάζουν την κρίσιμη κατάσταση (βλ. ανωτέρω), τελικώς χρειάστηκε να μειωθεί ελαφρώς η παράμετρος B για να εξισορροπηθεί η ως άνω υπερβολική αύξηση. Μια άλλη διαφορά σταθεροποιημένης με φυσική άμμο είναι ότι στην πρώτη η αλλαγή φάσης από την συστολή στην διαστολή γίνεται σε χαμηλότερη τιμή του λόγου η . Συνεπώς, η παράμετρος που επηρεάζει την επιφάνεια της διαστολικότητας στο χώρο των τάσεων, δηλαδή η kc^d , έπρεπε να μειωθεί, παρά το γεγονός ότι έχει προκύψει αλγεβρική μείωση της τιμής της παραμέτρου ψ μέσω της μετάθεσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο χώρο $e-p'$. Τέλος, η σταθεροποιημένη άμμος χρειάζεται περισσότερους κύκλους φόρτισης μέχρι την ρευστοποίηση και άρα θα ήταν λογικό να αυξηθεί η παράμετρος N_o . Ωστόσο, επειδή έχει εξασφαλιστεί σημαντική αύξηση της στιβαρότητας μέσω αλλαγών στις παραμέτρους M_c^c , $e_{cs,a}$ και λ , τελικώς προκύπτει ανάγκη μείωσης της τιμής για να εξισορροπηθεί η ως άνω υπερβολική αύξηση. Οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμεναν ίδιες με την φυσική άμμο. Επ' αυτού, αξιοσημείωτη είναι η διατήρηση της τιμής των h_o και A_o καθώς η αύξηση της στιβαρότητας και της διαστολικότητας φαίνεται να προσομοιώνεται επαρκώς μέσω αλλαγών στις τιμές των (M_c^c , $e_{cs,a}$ και λ). Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την σταθεροποιημένη άμμο M31.

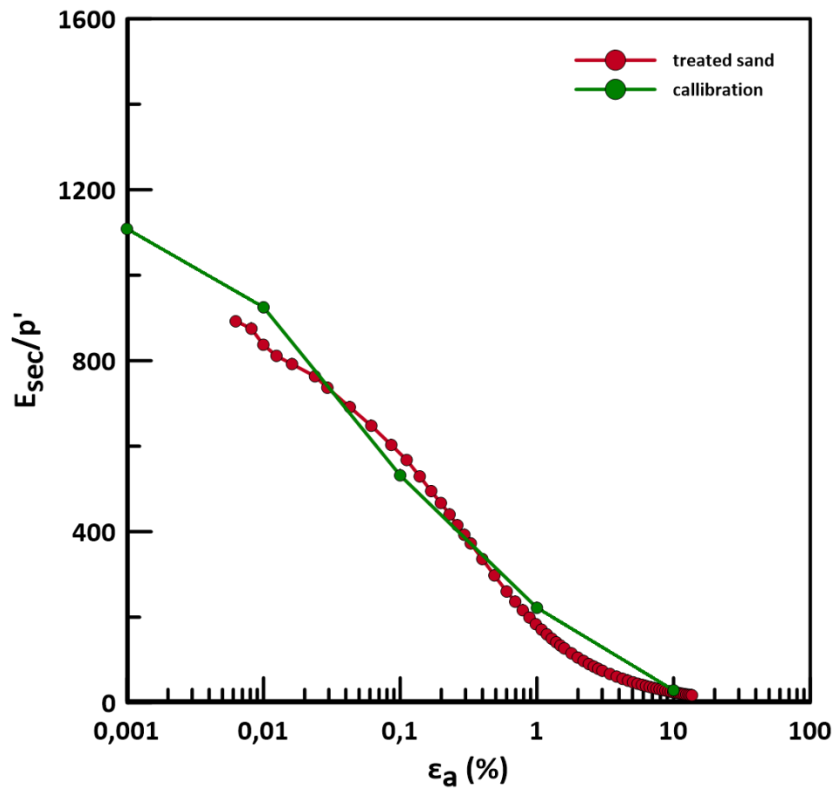
Ειδικότερα, στο Σχήμα 4.9 τοποθετήθηκαν στο χώρο $e-p'$ τα σημεία των πειραμάτων που προσέγγισαν την κρίσιμη κατάσταση και η γραμμή κρίσιμης κατάστασης της αριθμητικής προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, η εξίσωση 3.1 χρησιμοποιήθηκε για τη χάραξη της γραμμής προσομοίωσης με $e_{cs,a} = 0.905$ και $\lambda = 0.05$. Παρατηρείται ότι η γραμμή κρίσιμης κατάστασης που επιλέχθηκε διέρχεται από όλα σχεδόν τα σημεία των δοκιμών, και είναι αρκετά αντιπροσωπευτική.

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η απομείωση της (κανονικοποιημένης) στιβαρότητας της σταθεροποιημένης άμμου M31 με την αξονική παραμόρφωση ϵ_a , όπου η κανονικοποίηση αφορά στο τέμνον μέτρο ελαστικότητας κανονικοποιημένο με την αρχική ενεργό τάση (E_{sec}/p_o'). Εμφανίζονται τα αποτελέσματα της μονοτονικής δοκιμής τριαξονικής θλίψης ελεύθερης στράγγισης με αρχική ενεργό τάση $p_o' = 300$ kPa και με δείκτη πόρων $e = 0.721$ και το μέτρο ελαστικότητας και τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης. Από τη σύγκριση προκύπτει σωστή βαθμονόμηση του μέτρου ελαστικότητας.

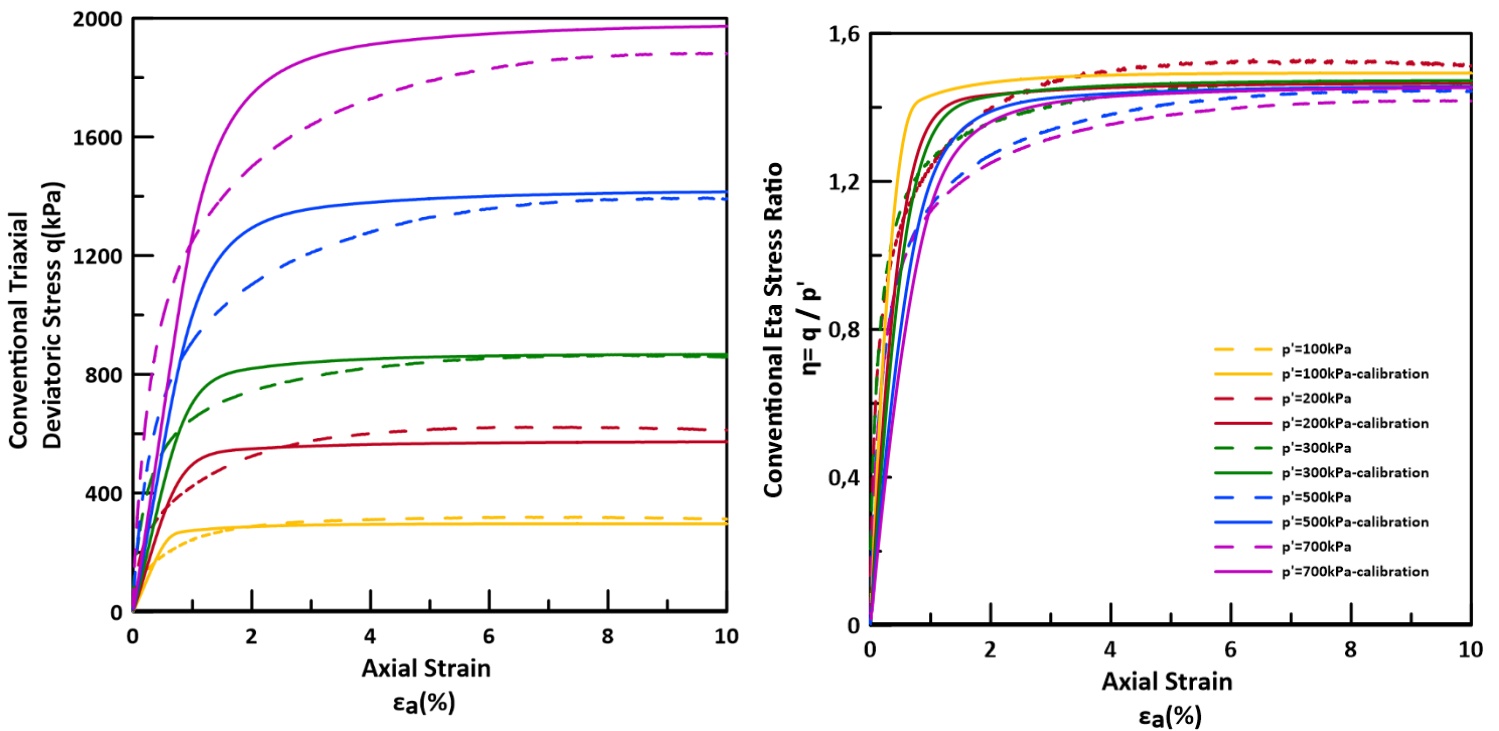
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.11α παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων των μονοτονικών δοκιμών υπό στραγγιζόμενες συνθήκες με αρχικές ενεργές τάσεις $p = 100$ kPa, $p = 200$ kPa, $p = 300$ kPa, $p = 500$ kPa και $p = 700$ kPa και $e = 0.744$, $e = 0.752$, $e = 0.721$, $e = 0.722$, $e = 0.711$ αντίστοιχα, και συγκρίνονται με τις καμπύλες από την αριθμητική προσομοίωσή τους. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.11β απεικονίζονται οι αντίστοιχες καμπύλες του λόγου τάσεων η - παραμορφώσεων. Η σύγκριση είναι αρκετά ικανοποιητική για όλο το εύρος τάσεων και δεικτών πόρων. Παράλληλα, στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται οι καμπύλες ογκομετρικής - αξονικής παραμόρφωσης των μονοτονικών δοκιμών υπό στραγγιζόμενες συνθήκες για τις παραπάνω δοκιμές με τις αντίστοιχες καμπύλες της αριθμητικής προσομοίωσης. Εν γένει η σύγκριση είναι και πάλι αρκετά καλή.



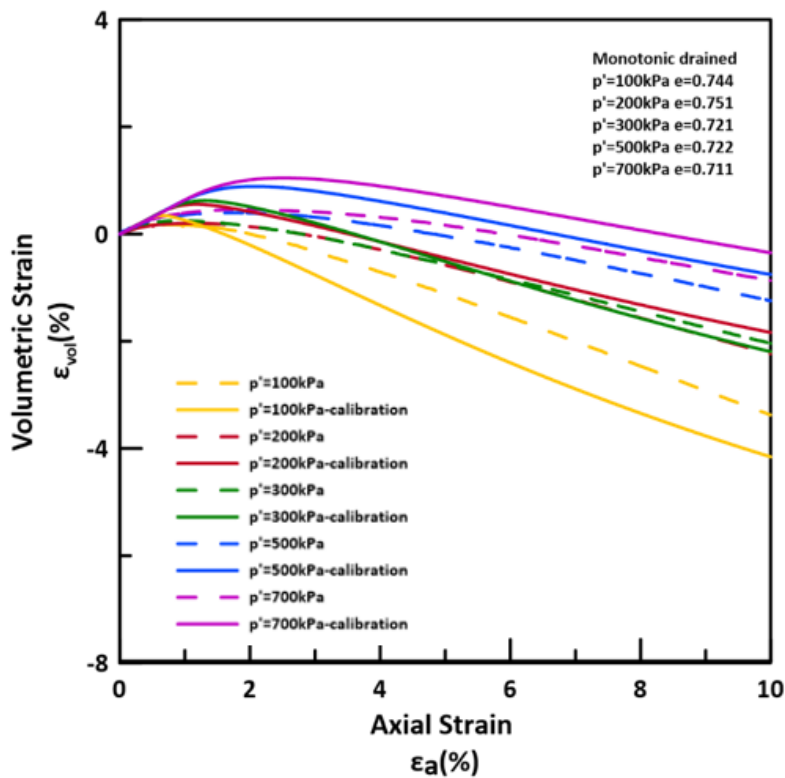
Σχήμα 4.9 Γραμμή κρίσιμης κατάστασης στο χώρο e - p' της σταθεροποιημένης άμμου M31 (σημεία) συγκριτικά με την αριθμητική προσομοίωση (συνεχής γραμμή).



Σχήμα 4.10 Κανονικοποιημένη στιβαρότητα ως συνάρτηση της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a της σταθεροποιημένης άμμου M31 (σημεία) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης.

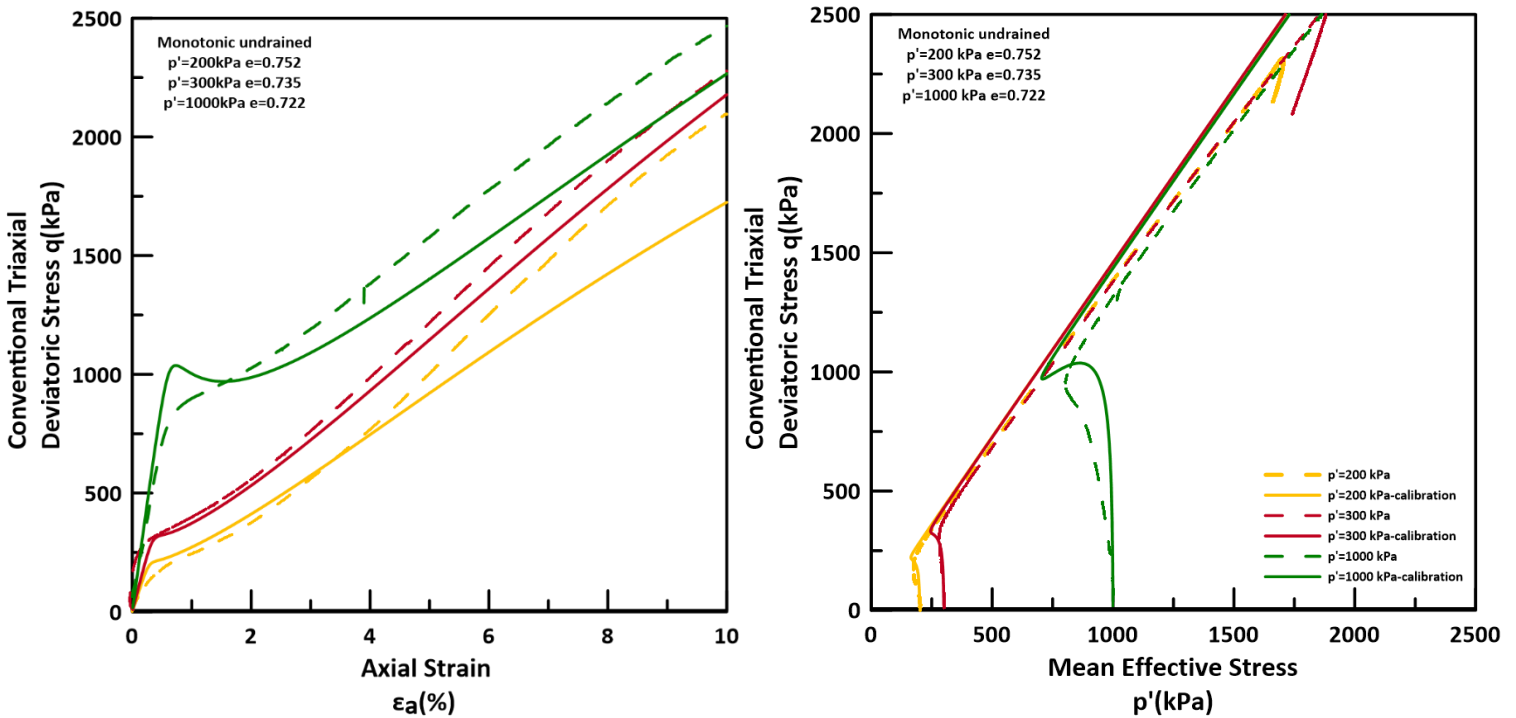


Σχήμα 4.11 Πειραματικές μετρήσεις της σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : α) (αριστερά) καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων, β) (δεξιά) καμπύλες λόγου τάσεων- παραμορφώσεων.



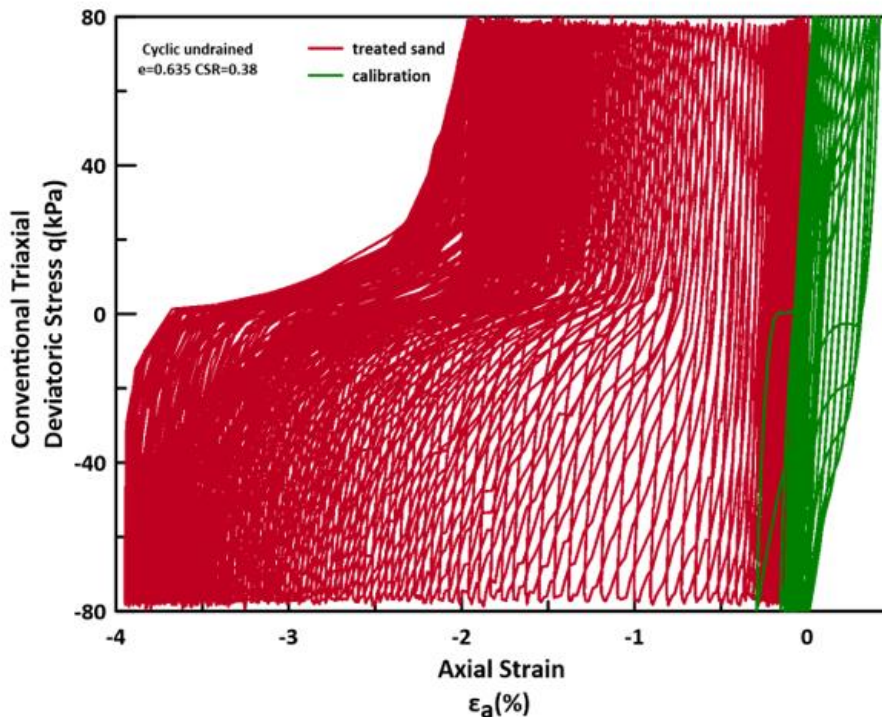
Σχήμα 4.12 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) συγκριτικά με τα διαγράμματα της αριθμητικής προσομοίωσης

Στα Σχήματα 4.13α και 4.13β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης με αρχικές ενεργές τάσεις $p'_o=200\text{kPa}$, 300kPa και 1000kPa και με δείκτες πόρων $e=0.752$, 0.735 και 0.722 αντίστοιχα, καθώς και τα αποτελέσματα από την προσομοίωσή τους. Στο διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων (Σχήμα 4.13α) παρατηρούμε πολύ καλή σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραμάτων. Στο Σχήμα 4.13 β παρουσιάζεται το διάγραμμα των διαδρομών τάσεων στο επίπεδο q - p' . Παρατηρούμε καλή σύγκλιση προσομοίωσης-πειράματος και για τις 3 δοκιμές.

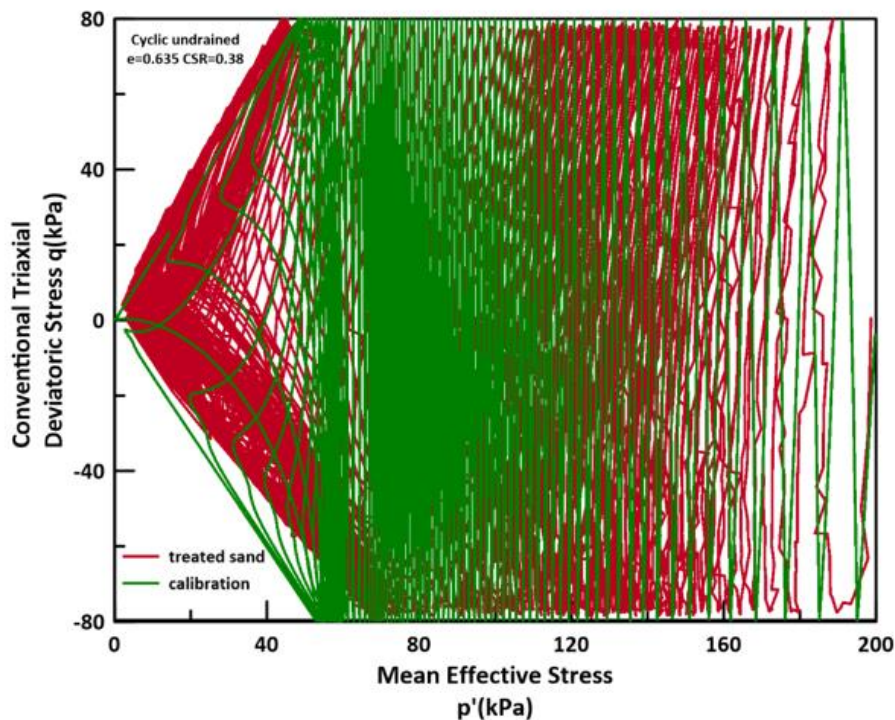


Σχήμα 4.13 Πειραματικές μετρήσεις της σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό αστράγγιστες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : α) (αριστερά) καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων , β) (δεξιά) ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο q - p' .

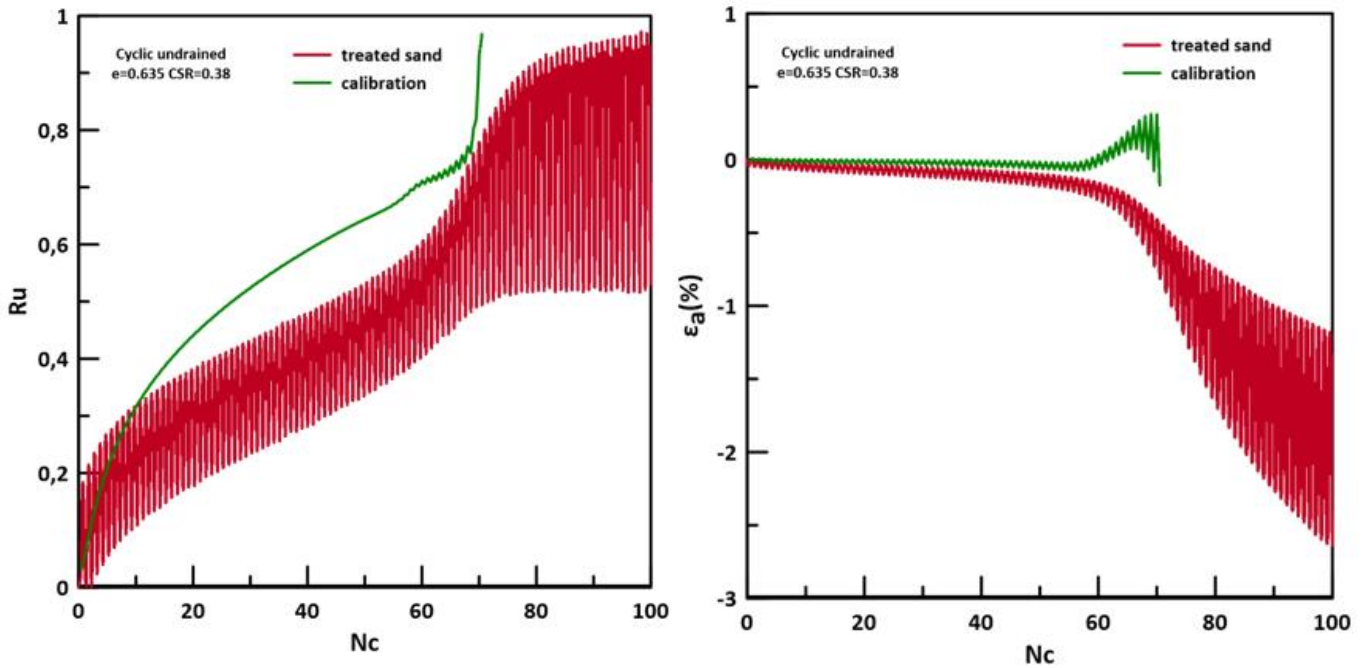
Στη συνέχεια, στα Σχήματα 4.14 και 4.15 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ανακυκλικής δοκιμής της άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με αρχική ενεργό τάση $p'_o=200\text{kPa}$ και δείκτη πόρων $e=0.635$ και της αντίστοιχης προσομοίωσής της. Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και στο Σχήμα 4.15 οι ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο q - p' . Στο Σχήμα 4.16α παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου υπερπίεσης πόρων $R_u=\Delta u/p'_o$ με τον αριθμό των επιβαλλόμενων κύκλων N_c . Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση έχει πέτυχει μέχρι τους 65 κύκλους φόρτισης. Το πείραμα φτάνει στην ρευστοποίηση εκεί που αρχίζει να αλλάζει ο ρυθμός της παραμόρφωσης. Στην φυσική άμμο η ρευστοποίηση γίνεται εκεί που ο λόγος υπερπίεσης πόρων R_u ξεπερνάει την τιμή 95%, ενώ στην σταθεροποιημένη με πυριττία άμμο από την στιγμή που φτάνει την τιμή $R_u=95\%$ την διατηρεί και συνεχίζει να συσσωρεύει παραμορφώσεις, δηλαδή πρακτικά το δοκίμιο δεν καταρρέει όπως της μη σταθεροποιημένης άμμου. Συνεπώς, προκύπτει ικανοποιητική σύγκριση, αφού πείραμα και προσομοίωση δείχνουν ρευστοποίηση χονδρικά στον ίδιο αριθμό κύκλων. Στο Σχήμα 4.16β παρουσιάζονται οι καμπύλες παραμόρφωσης ϵ_a με το αριθμό των κύκλων N_c για το πείραμα και την προσομοίωση. Παρατηρείται ότι η σύγκλιση με το πείραμα είναι ικανοποιητική μέχρι τους 65 κύκλους φόρτισης περίπου, όταν εμφανίζεται η ρευστοποίηση στην προσομοίωση. Από εκεί και πέρα, το προσομοίωμα αδυνατεί να προσομοιώσει τη διαρκή συσσώρευση παραμόρφωσης χωρίς κατάρρευση που δείχνει το πείραμα. Το γεγονός αυτό δεν μπορεί να διορθωθεί με άλλη βαθμονόμηση, καθώς οφείλεται στη δομή του προσομοιώματος NTUA-SAND, μια αλλαγή της οποίας ξεφεύγει από το πλαίσιο της εργασίας.



Σχήμα 4.14 Πειραματικές μετρήσεις της σταθεροποιημένης άμμου M31 (ανακυκλική δοκιμή εμποδιζόμενης στράγγισης) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων

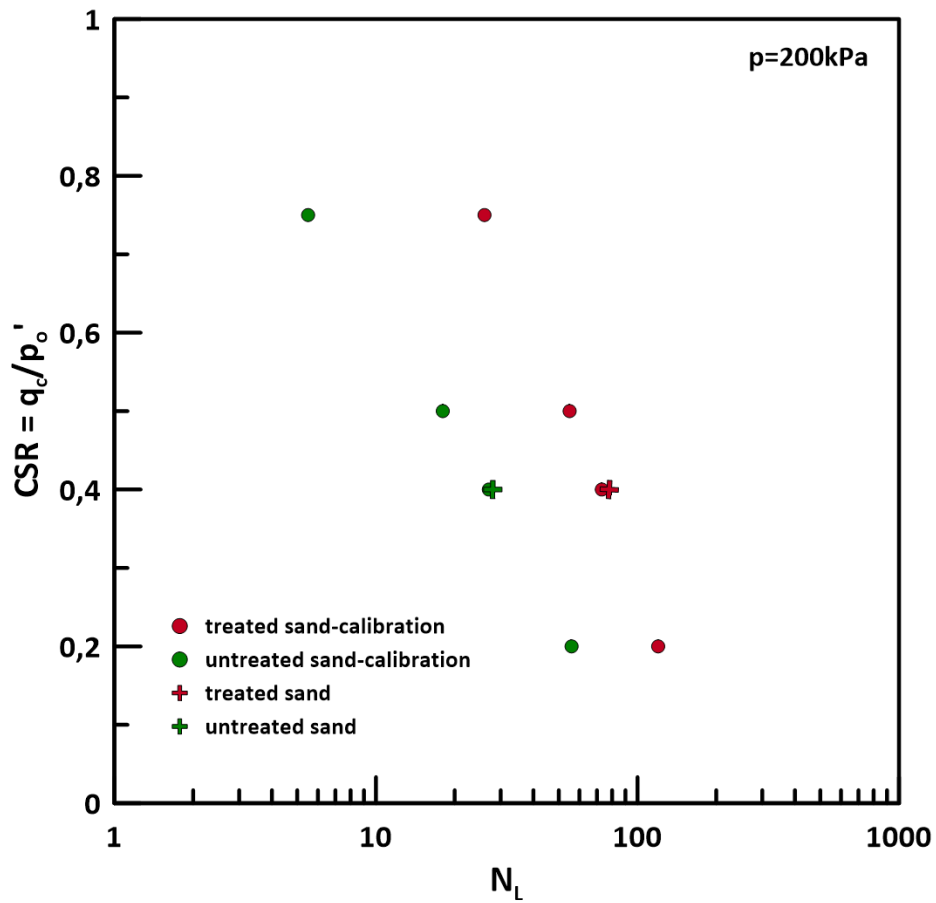


Σχήμα 4.15 Πειραματικές μετρήσεις της σταθεροποιημένης άμμου M31 (ανακυκλική δοκιμή εμποδιζόμενης στράγγισης) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης: ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο q-p'.



Σχήμα 4.16 Πειραματικές μετρήσεις της σταθεροποιημένης άμμου M31 (ανακυκλική δοκιμή εμποδιζόμενης στράγγισης) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης : α) (αριστερά) καμπύλες $R_u = \Delta u / p'$ με τον αριθμό των κύκλων N_c , β) (δεξιά) καμπύλες παραμόρφωσης ϵ_v με τον αριθμό των κύκλων N_c .

Τέλος, στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η καμπύλη του λόγου ανακυκλικής τάσης $CSR = q / p'_o$ με το αριθμό των κύκλων ρευστοποίησης της αριθμητικής προσομοίωσης για την φυσική και για την σταθεροποιημένη άμμο M31. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη ρευστοποίησης. Παρατηρείται ότι η καμπύλη ρευστοποίησης της σταθεροποιημένης άμμου είναι μετατοπισμένη πιο δεξιά σε σχέση με εκείνη της φυσικής άμμου, γεγονός που σημαίνει ότι για τον ίδιον CSR ο αριθμός των κύκλων ρευστοποίησης είναι αρκετά μεγαλύτερος. Συνεπώς η σταθεροποιημένη άμμος ρευστοποιείται πιο δύσκολα από την φυσική.



Σχήμα 4.17 Καμπύλες αντοχής στη ρευστοποίησης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31, όπως προκύπτουν από αριθμητική προσομοίωση με το NTUA-SAND (κύκλος) σε σύγκριση με τα πειράματα των Ρανίορουλου και Georgiannou, 2021 (σταυρός).

4.4 Προσομοίωση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada με χρήση του NTUA-SAND

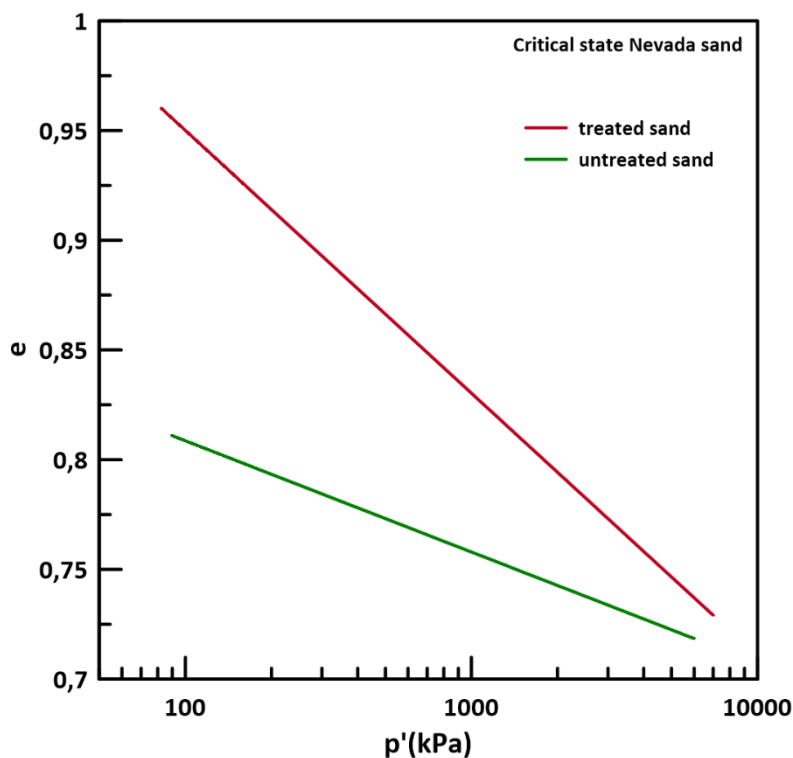
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η προσπάθεια βαθμονόμησης της σταθεροποιημένης άμμου Nevada. Η βαθμονόμηση αυτή είναι απαραίτητη διότι τα πειράματα φυγοκεντριστή για τα οποία θα γίνει η αριθμητική προσομοίωση (θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια) έγιναν για άμμο Nevada. Ελλείψει πειραματικών δεδομένων για σταθεροποιημένη άμμο Nevada, η συσχέτιση μεταξύ των δύο ομάδων παραμέτρων του NTUA-SAND που προέκυψαν για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 χρησιμοποιήθηκε ώστε να υπολογιστούν εμμέσως οι τιμές των παραμέτρων του NTUA-SAND για τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada, με δεδομένες τις τιμές για τη φυσική. Είναι σαφές ότι πρόκειται για παραδοχή, αλλά τουλάχιστον θεωρείται μια εύλογη παραδοχή. Ιδανικά είτε τα πειράματα φυγοκεντριστή θα έπρεπε να έχουν γίνει με άμμο M31 (φυσική και σταθεροποιημένη), ή να υπήρχαν δεδομένα και για σταθεροποιημένη άμμο Nevada.

Συγκεκριμένα, για κάθε παράμετρο του προσομοιώματος υπολογίστηκε ο λόγος της τιμής της για σταθεροποιημένη προς την τιμή της για φυσική άμμο M31 (βλ. τιμές στον Πίνακα 4.1). Στη συνέχεια, έγινε πολλαπλασιασμός αυτού του λόγου με την αντίστοιχη παράμετρο της φυσικής άμμου Nevada, ώστε να προκύψει η αντίστοιχη τιμή για την σταθεροποιημένη άμμο Nevada. Στον παρακάτω Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές της σταθεροποιημένης άμμου Nevada όπως αυτές προέκυψαν με βάση την παραπάνω διαδικασία, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές για τη φυσική άμμο Nevada (Andrianopoulos et al. 2010). Με έντονα γράμματα εντοπίζονται οι παράμετροι στις οποίες αλλάχθηκε η τιμή της παραμέτρου λόγω σταθεροποίησης με κolloειδή πυριτία.

Παράμετροι	Σταθεροποιημένη άμμος Nevada	Φυσική άμμος Nevada
M_c^c	1.37	1.25
M_c^e	0.99	0.90
$e_{cs,a}$	0.951	0.809
λ	0.052	0.022
B (monotonic/cyclic)	156/464	180/600
ν	0.33	0.33
k_c^b	1.45	1.45
k_c^d	0.15	0.3
γ_1	0.00025	0.00025
α_1 (monotonic/cyclic)	1.00/0.6	1.00/0.6
A_o	0.8	0.8
h_o	15000	15000
N_o	10909	40000

Πίνακας 4.2 Τιμές παραμέτρων NTUA-SAND για σταθεροποιημένη άμμο Nevada, και σύγκριση με τις αντίστοιχες για τη φυσική άμμο Nevada

Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζεται στο χώρο $e-p'$ η γραμμή κρίσιμης κατάστασης της αριθμητικής προσομοίωσης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Nevada. Συγκεκριμένα, η εξίσωση 3.1 χρησιμοποιήθηκε για τη χάραξη και των 2 γραμμών με $e_{cs,a} = 0.951$ και $\lambda = 0.052$ για την σταθεροποιημένη και με $e_{cs,a} = 0.809$ και $\lambda = 0.022$ για την φυσική άμμο.

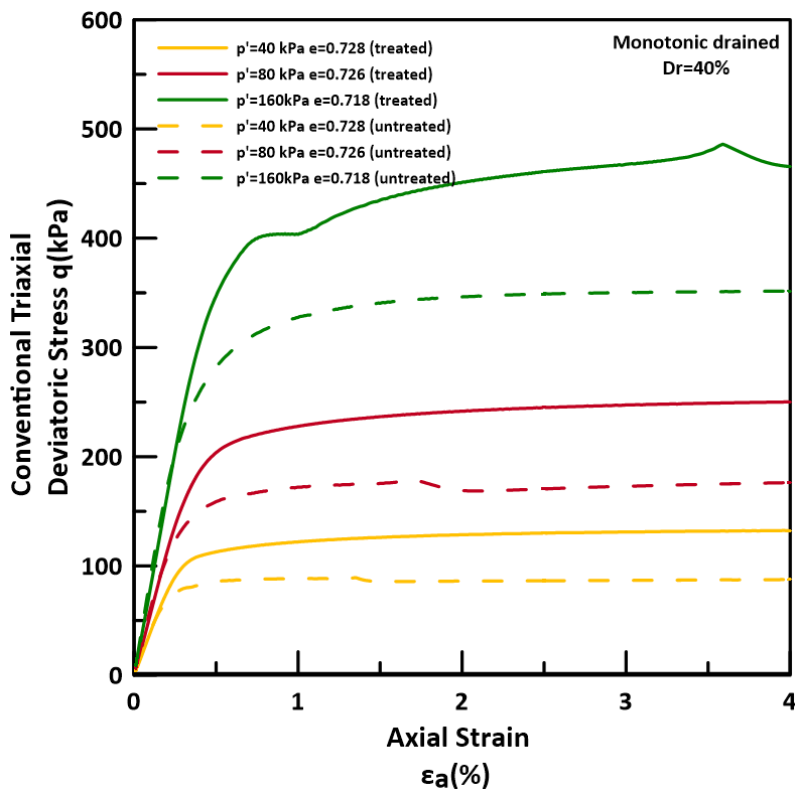


Σχήμα 4.18 Γραμμή κρίσιμης κατάστασης στο χώρο $e-p'$ της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada, με βάση τη βαθμονόμηση του NTUA-SAND (Πίνακας 4.2)

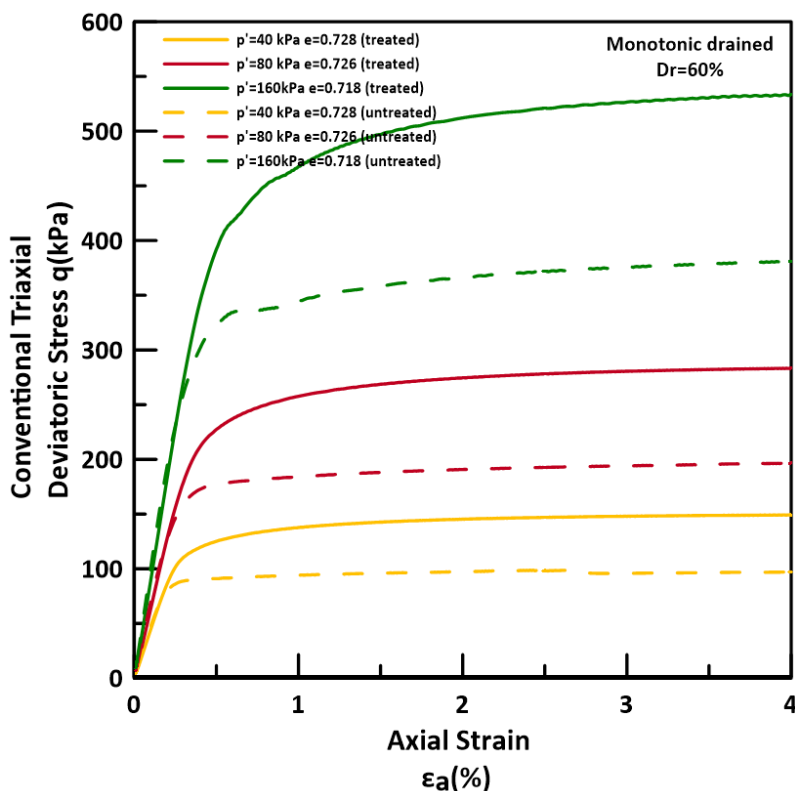
4.4.1 Στραγγιζόμενες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης

Παρακάτω παρουσιάζεται η απόκριση για στραγγιζόμενη τριαξονική θλίψη που προέκυψε για τη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Nevada με χρήση του NTUA-SAND χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Πίνακα 4.2. Εξετάζονται 3 δοκιμές σταγγιζόμενων συνθηκών για φυσική και 3 για σταθεροποιημένη άμμο με αρχικές ενεργές τάσεις $p' = 40 \text{ kPa}$, $p' = 80 \text{ kPa}$, $p' = 160 \text{ kPa}$. Οι αναλύσεις αυτές έγιναν για 2 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r , η μια για 40% και η άλλη για 60%.

Ειδικότερα, στα Σχήματα 4.19 και 4.20 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων σε όρους αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a . Με βάση την εικόνα της απόκρισης σε όρους τάσεων - παραμορφώσεων διαφαίνεται η μεγαλύτερη αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς τάσης – δείκτη πόρων που εξετάζονται. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μέγιστη αντοχή, η οποία είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση της σταθεροποιημένης άμμου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada στα Σχήματα 4.19 και 4.20 είναι απόλυτα συμβατή με την αντίστοιχη σύγκριση μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 (στα Σχήματα 4.11 και 3.15).

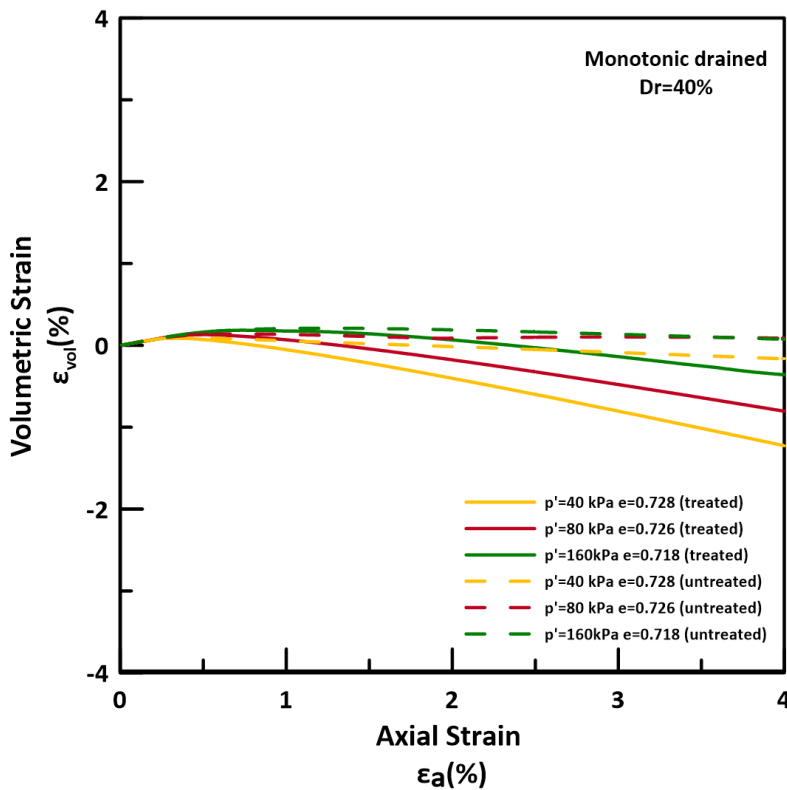


Σχήμα 4.19 Αριθμητικές προβλέψεις για τις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για δοκιμές τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης άμμου και φυσικής άμμου Nevada υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. ($Dr=40\%$)

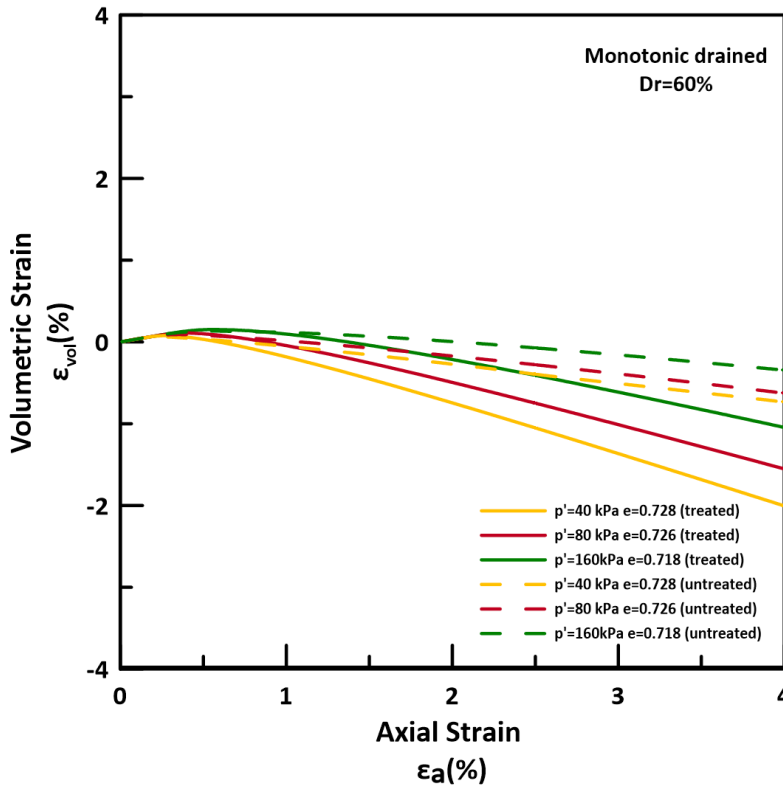


Σχήμα 4.20 Αριθμητικές προβλέψεις για τις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για δοκιμές τριαξονικής θλίψης σταθεροποιημένης άμμου και φυσικής άμμου Nevada υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. ($Dr=60\%$)

Αντίστοιχα, στα Σχήματα 4.21 και 4.22, για τις παραπάνω δοκιμές παρουσιάζεται η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_{vol} συναρτήσει της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Για όλες τις δοκιμές παρατηρείται αρχικά πολύ μικρή συστολική συμπεριφορά (θετική ογκομετρική παραμόρφωση – μείωση όγκου), ενώ στη συνέχεια η συμπεριφορά μεταβαίνει σε διαστολική (αρνητική ογκομετρική παραμόρφωση – αύξηση όγκου). Με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης εμφανίζεται μείωση της διαστολικότητας και των τελικών τιμών της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ποιοτικά ίδια με τη φυσική άμμο. Όμως η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη διαστολικότητα σε σχέση με τη φυσική άμμο Nevada για όλες τις τάσεις στερεοποίησης. Και εδώ, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada είναι απόλυτα συμβατή με την αντίστοιχη σύγκριση μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.



Σχήμα 4.21 Αριθμητικές προβλέψεις για τις καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης και φυσικής άμμου Nevada υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) ($Dr=40\%$).



Σχήμα 4.22 Αριθμητικές προβλέψεις για τις καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης και φυσικής άμμου Nevada υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (μονοτονική δοκιμή) ($D_r=60\%$).

Στα Σχήματα 4.22 και 4.23 παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου η της αποκλίνουσας τάσης q προς τη μέση ενεργό τάση p' συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a . Ο λόγος η αρχικά αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται, ενώ είναι χαρακτηριστικό πως όλες οι δοκιμές τείνουν να καταλήξουν σε κοινή μοναδική τιμή λόγου η σε μεγάλη παραμόρφωση, προσεγγίζοντας την κρίσιμη κατάσταση. Παρατηρείται επίσης διαφοροποίηση της μέγιστης τιμής του λόγου ανάλογα με την αρχική ενεργό τάση p' . Συγκεκριμένα για μικρότερες αρχικές ενεργές τάσεις παρατηρείται μεγαλύτερη μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων. Η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων της σταθεροποιημένης άμμου Nevada για όλες τις δοκιμές είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της φυσικής άμμου, αποδεικνύονται τη μεγαλύτερη αντοχή σε όρους μέγιστης αντοχής και την πιο έντονη διαστολικότητα της σταθεροποιημένης άμμου.

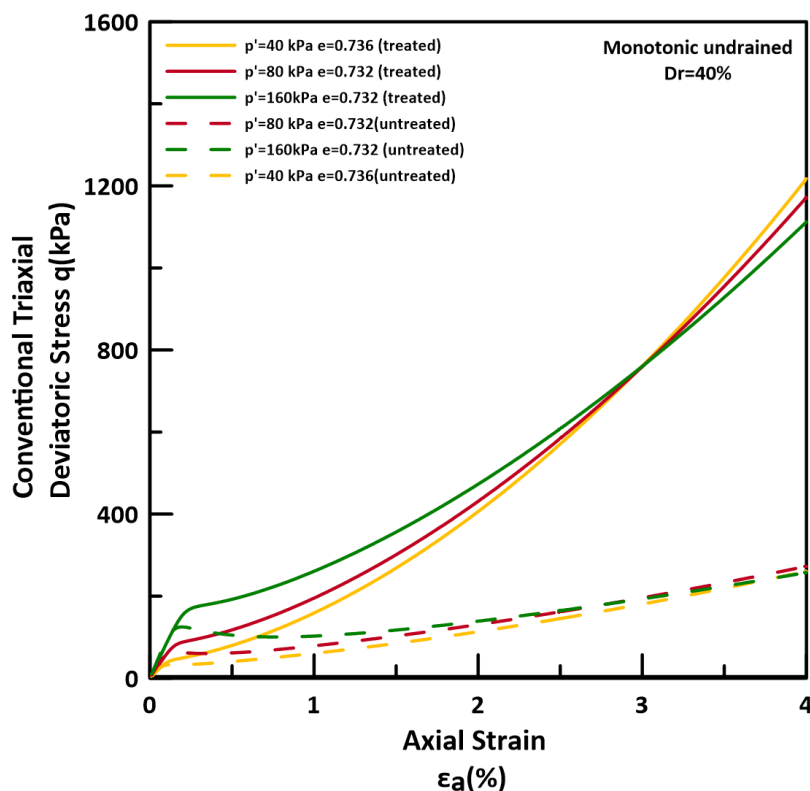
4.4.2 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης

Παρακάτω παρουσιάζεται η απόκριση για αστράγγιστη τριαξονική θλίψη που προέκυψε για τη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Nevada με χρήση του NTUA-SAND χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Πίνακα 4.2. Εξετάζονται 3 δοκιμές αστράγγιστων συνθηκών για φυσική και 3 για σταθεροποιημένη άμμο Nevada με αρχικές ενεργές τάσεις $p'=40\text{kPa}$, $p'=80\text{kPa}$, $p'=160\text{kPa}$. Οι αναλύσεις αυτές έγιναν για 2 τιμές σχετικής πυκνότητας D_r η μια για 40% και η άλλη για 60%.

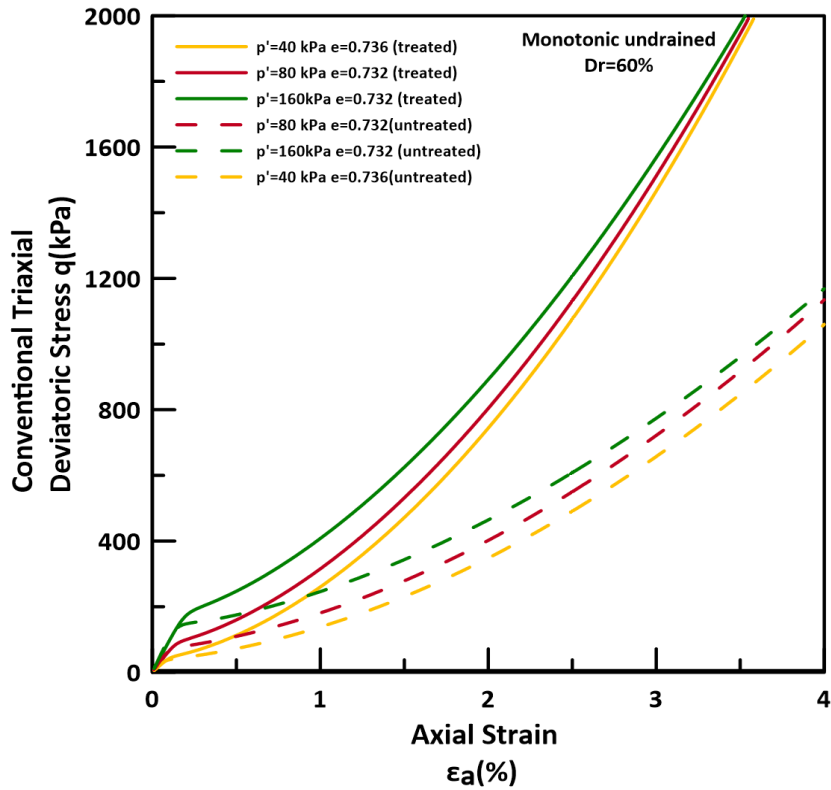
Ειδικότερα, στα Σχήμα 4.22 και 4.23 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για εξεταζόμενες δοκιμές. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρείται αύξηση της αποκλίνουσας τάσης q με τη διαρκή αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης. Η σταθεροποιημένη άμμος παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε όρους μέγιστης τάσης, καθώς και πιο έντονα διαστολική συμπεριφορά.

Και εδώ, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada είναι απόλυτα συμβατή με την αντίστοιχη σύγκριση μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.

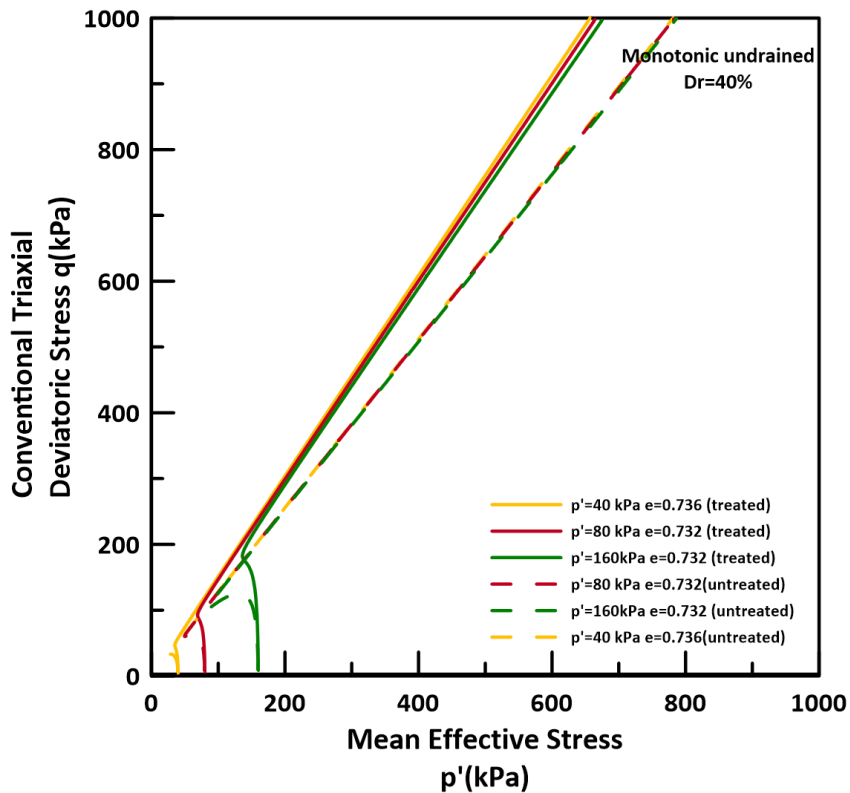
Στα Σχήματα 4.24 και 4.25 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων στον χώρο q - p' για τις δοκιμές με αρχική μέση ενεργό τάση στερεοποίησης $p' = 40, 80$ και 160 kPa. Καθώς οι συνθήκες στράγγισης είναι εμποδιζόμενες, η κλίση δεν είναι σταθερή. Εν γένει, στην αρχή παρατηρείται μείωση της μέσης ενεργού τάσης p' , μέχρι ένα σημείο όπου η συμπεριφορά αντιστρέφεται και από εκεί και πέρα πλέον η p' αυξάνεται.



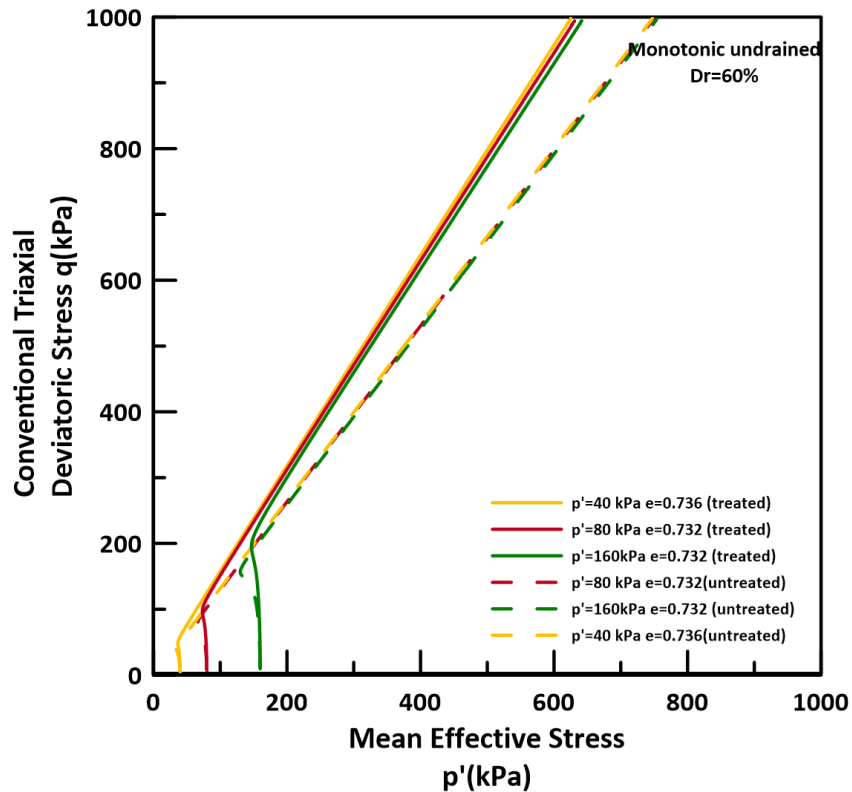
Σχήμα 4.23 Αριθμητικές προβλέψεις για τις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για δοκιμές τριαξονικής θλίψης φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($Dr=40\%$).



Σχήμα 4.24 Αριθμητικές προβλέψεις για τις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης $q - \alpha$ ξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για δοκιμές τριαξονικής θλίψης φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($Dr=60\%$).



Σχήμα 4.25 Αριθμητικές προβλέψεις για τις ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο ($q - p'$) για δοκιμές τριαξονικής θλίψης φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($Dr=40\%$).



Σχήμα 4.26 Αριθμητικές προβλέψεις για τις ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο ($q - p'$) για δοκιμές τριαξονικής θλίψης φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($Dr=60\%$).

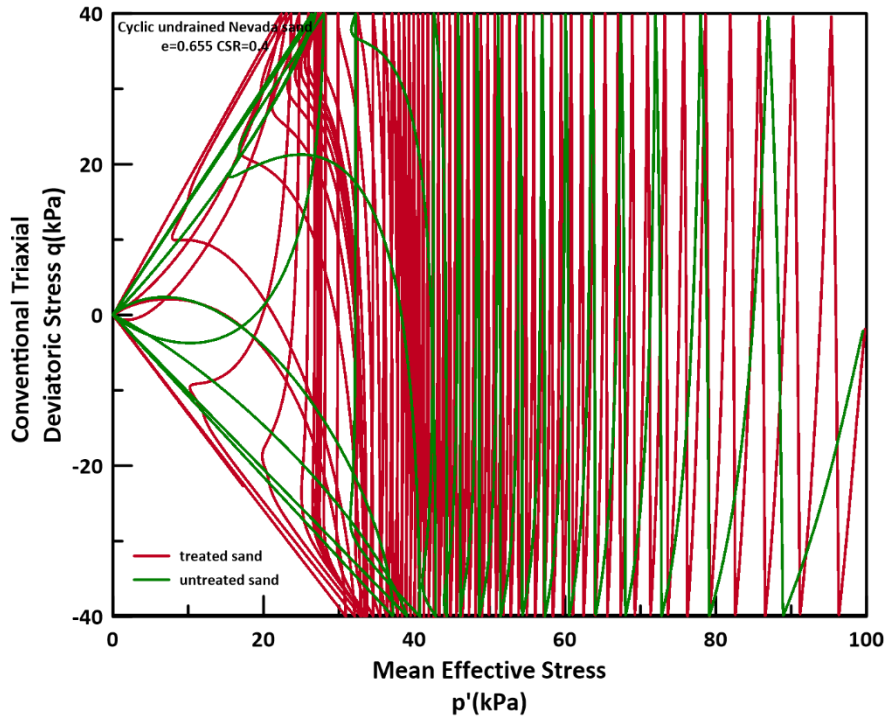
4.4.3 Αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική δοκιμή

Παρακάτω παρουσιάζεται η απόκριση για ανακυκλική αστράγγιστη τριαξονική φόρτιση που προέκυψε για τη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Nevada με χρήση του NTUA-SAND χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Πίνακα 4.2. Εξετάζονται 2 δοκιμές αστράγγιστων ανακυκλικών συνθηκών για φυσική και 2 για σταθεροποιημένη άμμο Nevada με αρχική ενεργό τάση $p'=100\text{kPa}$ (η μια έχει δείκτη πόρων $e=0.655$ και η άλλη $e=0.724$).

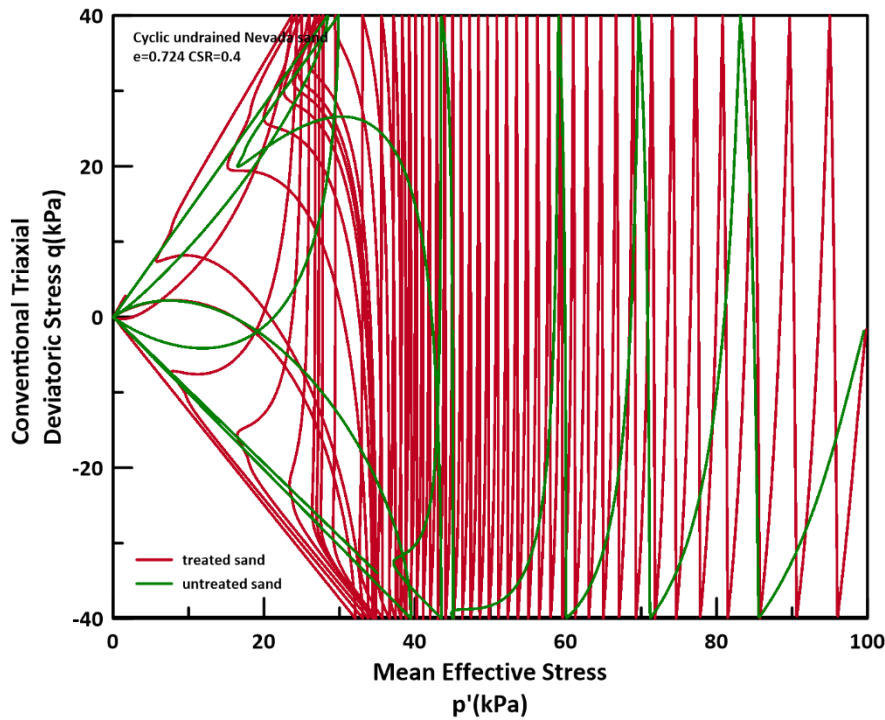
Στα Σχήματα 4.30 και 4.31 παρουσιάζεται η ενεργός τασική οδεύση ($q - p'$) της δοκιμής αυτής για τους 2 δείκτες πόρων ($e=0.655$ και $e=0.724$). Κατά την ανακυκλική φόρτιση παρατηρείται απομείωση της μέσης ενεργού τάσης p' (μέχρι να φτάσει σε μηδενισμό και αρά σε ρευστοποίηση), καθώς λόγω των αστράγγιστων συνθηκών αναπτύσσονται υπερπλίσεις πόρων, που συμβάλλουν στη μείωση των ενεργών τάσεων. Παρατηρούμε επίσης ότι η φυσική άμμος Nevada φτάνει αρκετά πιο γρήγορα στην ρευστοποίηση σε σχέση με την σταθεροποιημένη. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada είναι απόλυτα συμβατή με την αντίστοιχη σύγκριση μεταξύ φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.

Στο Σχήμα 4.31 και 4.32 παρουσιάζεται η σχέση τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για τη συγκεκριμένη δοκιμή. Τέλος, στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζεται η καμπύλη του λόγου ανακυκλικής τάσης $CSR=q/p'$ με το αριθμό των κύκλων ρευστοποίησης της αριθμητικής προσομοίωσης για την φυσική και για την σταθεροποιημένη άμμο Nevada. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη ρευστοποίησης. Παρατηρείται ότι η καμπύλη ρευστοποίησης της σταθεροποιημένης άμμου είναι μετατοπισμένη πιο δεξιά σε σχέση με εκείνη

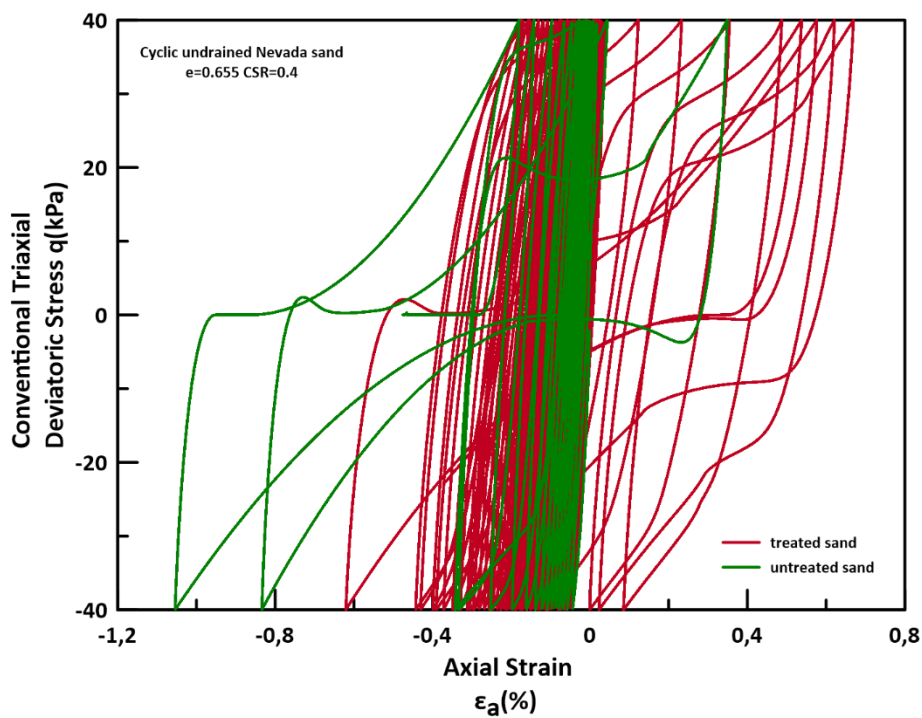
της φυσικής άμμου, γεγονός που σημαίνει ότι για τον ίδιον CSR ο αριθμός των κύκλων ρευστοποίησης είναι αρκετά μεγαλύτερος. Συνεπώς η σταθεροποιημένη άμμος ρευστοποιείται πιο δύσκολα από την φυσική.



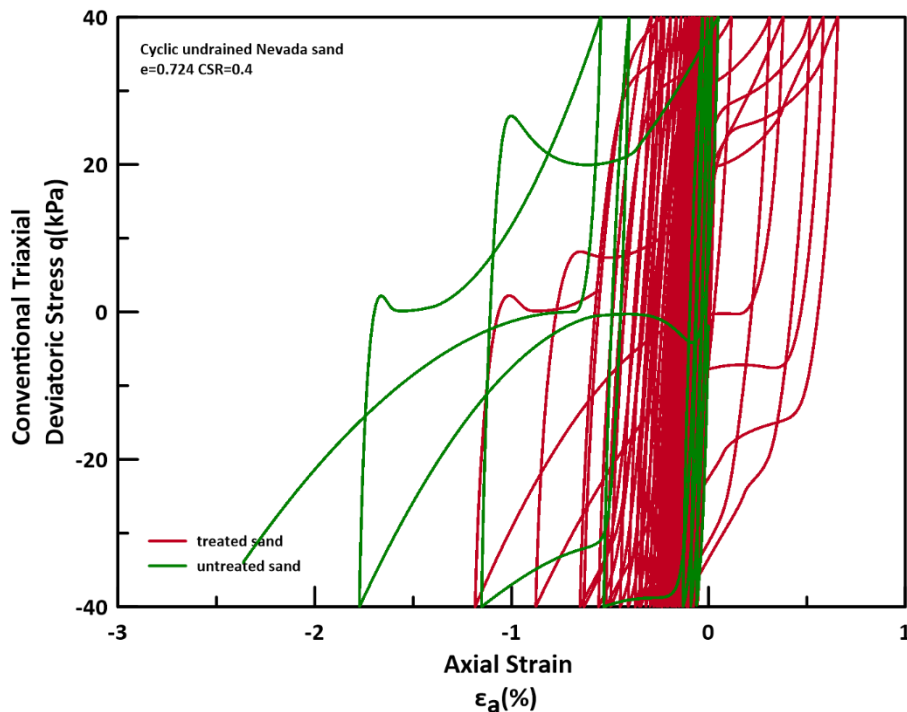
Σχήμα 4.29 Αριθμητικές προβλέψεις για την ενεργό τασική όδευση στο χώρο ($q - p'$) για ανακυκλική τριαξονική δοκιμή φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($Dr=60\%$).



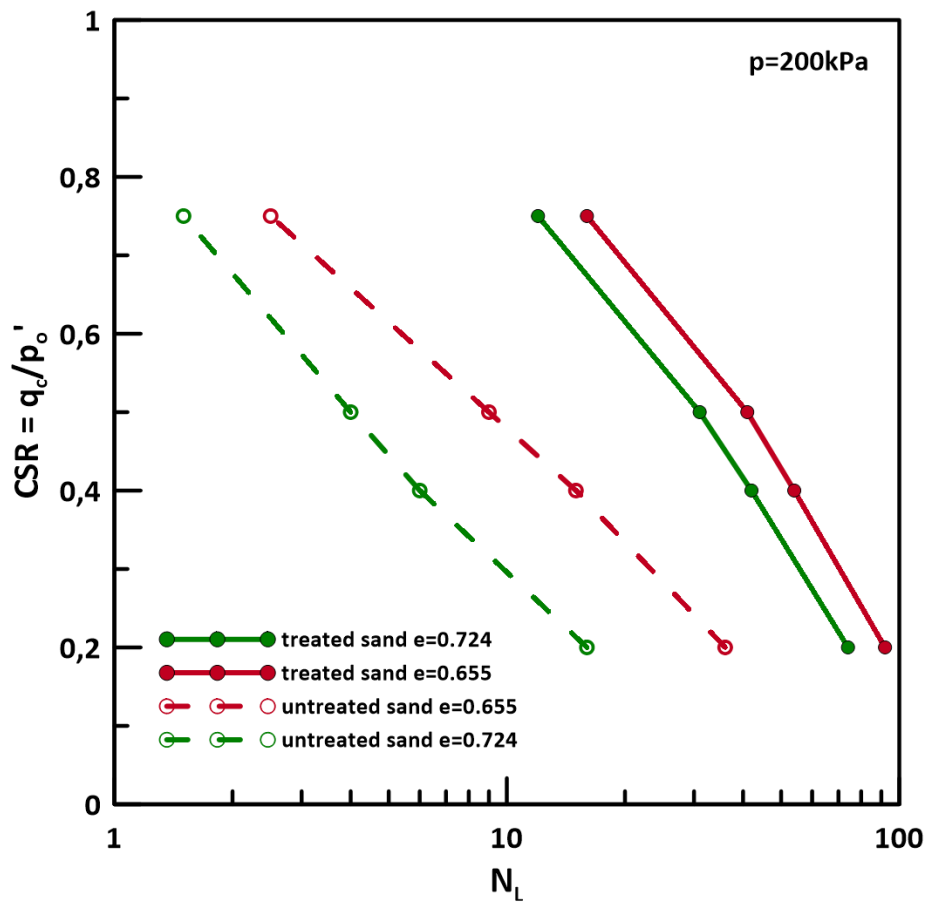
Σχήμα 4.30 Αριθμητικές προβλέψεις για την ενεργό τασική όδευση στο χώρο ($q - p'$) για ανακυκλική τριαξονική δοκιμή φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($Dr=40\%$).



Σχήμα 4.31 Αριθμητικές προβλέψεις για τη σχέση αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για ανακυκλική τριαξονική δοκιμή φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($D_r=60\%$).



Σχήμα 4.32 Αριθμητικές προβλέψεις για τη σχέση αποκλίνουσας τάσης q – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a για ανακυκλική τριαξονική δοκιμή φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Nevada υπό αστράγγιστες συνθήκες ($D_r=40\%$).



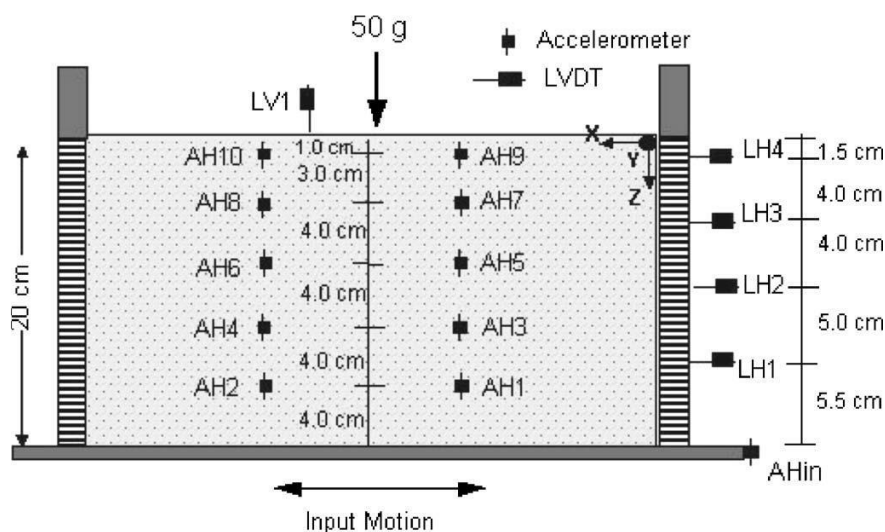
Σχήμα 4.33 Καμπύλες αντοχής στη ρευστοποίησης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Nevada, όπως προκύπτουν από αριθμητική προσομοίωση με το NTUA-SAND

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αριθμητική προσομοίωση μονοδιάστατης σεισμικής απόκρισης οριζόντιας σταθεροποιημένης εδαφική στρώσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτρία εδαφών με «ευφυή» χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010), σε σύγκριση με τις μετρήσεις από δυναμική δοκιμή φυγοκέντρισης σταθεροποιημένης επίπεδης εδαφικής στρώσης υπό διεγερση βάσης, που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (Gallagher et al., 2007). Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις και τα αποτελέσματα αυτών, οι προηγούμενες προσπάθειες προσομοίωσης από άλλους ερευνητές, καθώς και η νέα μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης. Στη συνέχεια η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολογείται ως προς την αποτελεσματικότητά της μετά από σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και με τις προηγούμενες προσπάθειες-μεθοδολογίες προσομοίωσης.

5.1. Περιγραφή δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρισης των Gallagher et al. (2007)

Οι Gallagher et al. (2007) πραγματοποίησαν δοκιμές φυγοκεντριστή σε ρευστοποιήσιμη άμμο Nevada No. 120 μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτρία Ludox-SM περιεκτικότητας 6% υπό διεγερση βάσης. Η πειραματική διάταξη, συμπεριλαμβανομένων των οργάνων που χρησιμοποιούνται, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Το κουτί διαστάσεων 460 mm επί 370 mm στην κάτοψη και 260 mm στο ύψος θεωρείται εύκαμπτο, καθώς τα τοιχώματά του διαμορφώνονται από μια στοιβα ορθογώνιων δακτυλίων αλουμινίου, χωρισμένα με γραμμικά ρουλεμάν που είναι διευθετημένα ώστε να επιτρέπουν σχετικές κινήσεις μεταξύ δακτυλίων με ελάχιστη τριβή. Κατά το πείραμα, αρχικά επετεύχθη κορεσμός του δοκιμίου με το διάλυμα πυριτίας και ακολούθως η διάταξη υποβλήθηκε σε δύο διαδοχικές σεισμικές διεγέρσεις που προσομοίωναν σεισμό πεδίου με επιταχύνσεις βάσης 0.20g και 0.25g συχνότητας 20Hz και αριθμού κύκλων ίσου με 20. Το μοντέλο ήταν εξοπλισμένο με πέντε ζεύγη από επιταχυνσιόμετρα τοποθετημένα σε διαφορετικά βάθη (2, 4, 6, 8 και 10 m) κοντά στον άξονα συμμετρίας του μοντέλου και εκατέρωθεν αυτού (Σχήμα 5.1). Επιπλέον, είχαν τοποθετηθεί πέντε μετρητές μετατόπισης (LVDTs) πλευρικής (στους δακτυλίους) και κάθετης (στην κορυφή). Η άμμος Nevada No. 120 που χρησιμοποιήθηκε είχε σχετική πυκνότητα $D_r = 40\%$, ενώ το εν λόγω μοντέλο προσομοιάζει ένα στρώμα άμμου πάχους 10m.



Σχήμα 5.1 Διάταξη πειράματος συμπεριλαμβανομένων και των οργάνων μέτρησης (Gallagher et al 2007). Τα μήκη αντιστοιχούν στο μοντέλο, όχι στο πρωτότυπο.

Η εισαγωγή της πυριτίας στο μοντέλο έγινε από τον πυθμένα προς την επιφάνεια με χρήση αναρροφητήρα. Ο χρόνος γέλης του ενέματος της πυριτίας 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 όπως του νερού, ενώ στο τέλος απέκτησε το χρώμα του ενέματος.

5.2 Προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρισης των Gallagher et al. (2007)

Η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος φυγοκεντριστή των Gallagher et al. (2007) έγινε με χρήση του λογισμικού FLAC 7.0 (Itasca Inc. 2011) και του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND, το οποίο έχει βαθμονομηθεί κατάλληλα τόσο για φυσική, όσο και για σταθεροποιημένη άμμο Nevada. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη φυσική, καθώς και για την σταθεροποιημένη άμμο Nevada παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Για την προσομοίωση του πειράματος φυγοκεντριστή των Gallagher et al. (2007), δημιουργήθηκε αρχικά κάρναβος με διαστάσεις 23x10m και ζώνες εμβαδού 1x1m. Με άλλα λόγια, η προσομοίωση έγινε για το φυσικό πρόβλημα στην κλίμακα πρωτοτύπου, και όχι του μοντέλου. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ορίστηκε 1m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, μέσω επιβολής πίεσης πόρων ίσης με 9.81kPa στην επιφάνεια, ώστε να εξασφαλιστεί ο κορεσμός του εδάφους κατά την επιβολή της σεισμικής διέγερσης. Η συνοριακή συνθήκη των κόμβων της βάσης του καννάβου - σε βάθος 10m - αντιστοιχεί σε αυτή της άρθρωσης. Στα πλευρικά σύνορα δεσμεύτηκαν καθ' ύψος οι ακραίοι κόμβοι του καννάβου (μέθοδος tied nodes) στο ίδιο ύψος ώστε να δίνουν κοινή οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση στο ίδιο ύψος. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ορθή προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλει το εύκαμπτο δοχείο (Laminar box) του φυγοκεντριστή. Στη βάση του καννάβου επιβλήθηκε ημιτονοειδής οριζόντια διέγερση 20 κύκλων με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης 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.

Η μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα εργασία περιλαμβάνει δύο προσεγγίσεις. Κατά την πρώτη προσέγγιση, η απόκριση του σταθεροποιημένου εδάφους προσομοιώνεται αποκλειστικά με κατάλληλη αναβαθμονόμηση των παραμέτρων του προσομοιώματος για την σταθεροποιημένη άμμο Nevada όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Κατά τη δεύτερη προσέγγιση έγινε συνδυασμός του αναβαθμονομημένου προσομοιώματος (της προσέγγισης 1) με ταυτόχρονη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων $K=K_w/n$, όπου K το νέο μέτρο συμπίεστότητας του υγρού πόρων ως γέλη, K_w το αρχικά θεωρούμενο μέτρο συμπίεστότητας του νερού (με βάση τη βιβλιογραφία) και $n (> 1)$ ο θεωρούμενος διαιρέτης. Η λογική της μείωσης του K_w έχει εισαχθεί πρώτα από τους Αγαπουλάκη (2017) και Andrianopoulos et al. (2016) και χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια στην διπλωματική εργασία του Τιπτηρή (2017). Η μεθοδολογία των Agaroulaki (2017) και Andrianopoulos et al. (2016) βασίζεται αποκλειστικά στη μείωση του K_w , ενώ ο Τιπτηρής (2017) εφάρμοσε το συνδυασμό μείωσης του K με ταυτόχρονο επαναπροσδιορισμό της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης για τη σταθεροποιημένη άμμο χωρίς πλήρη βαθμονόμηση. Υπογραμμίζεται εδώ ότι η λογική της χρήσης $K < K_w$ υπονοεί ότι η γέλη στους πόρους της άμμου έχει συμπίεστικότητα μεγαλύτερη από εκείνη του νερού K_w , σύμφωνα με τις ποιοτικές (έμμεσες) μετρήσεις του Towhata (2008). Η θεώρηση υπονοεί ότι αυξημένη συμπίεστικότητα σημαίνει μειωμένη τάση για ανάπτυξη υπερπείσεων πόρων, και συνεπώς μειωμένη τάση για ρευστοποίηση.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, για καθεμία από τις δύο προσεγγίσεις, σε όρους εδαφικών επιταχύνσεων, λόγων υδατικών υπερπείσεων, αλλά και καθιζήσεων της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι μετρήσεις των επιταχυνσιογράφων που βρίσκονται στην αριστερή πλευρά του άξονα συμμετρίας της πειραματικής διάταξης, όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.1 (AH10, AH8, AH6, AH4, AH2) με τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες

επιταχύνσεων που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση στις θέσεις των μετρητών αυτών. Ταυτόχρονα γίνεται παράθεση των προβλέψεων για τις χρονοϊστορίες του λόγου υπερπιέσεων πόρων u στα ίδια βάθη, αλλά δυστυχώς χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης με το πείραμα καθώς δεν υπήρχαν εκεί μετρητές πιέσεων πόρων. Επίσης, συγκρίνεται η καθίζηση που μετρήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους από το μετρητή LV1 (βλ. Σχήμα 5.1) με την καθίζηση που προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση στην ίδια θέση.

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

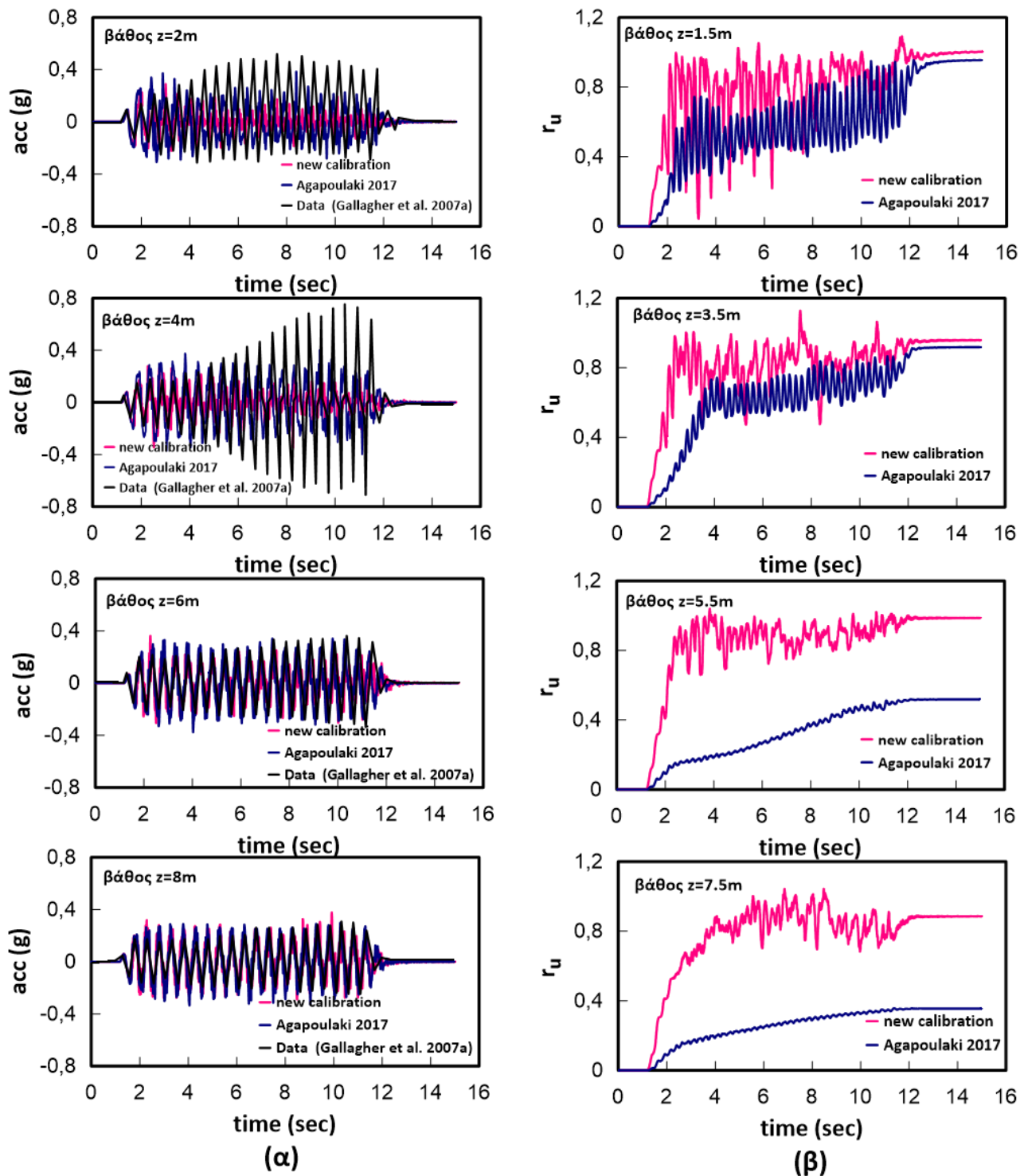
(α) τη διατήρηση των τιμών των παραμέτρων όπως προκύπτουν για τη φυσική άμμο Nevada (Andrianopoulos et al., 2010),

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

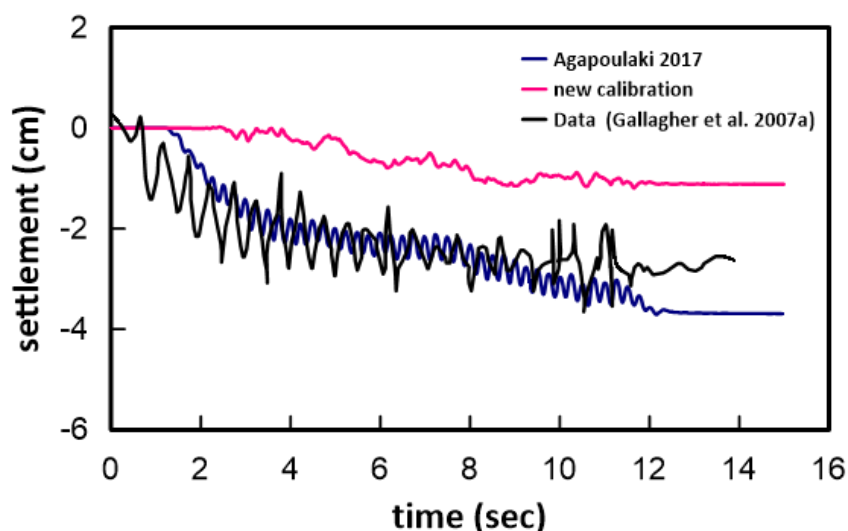
$$n = 100 \cdot [2.25 + CS (\%)] \quad \text{όπου } CS (\%) \text{ η περιεκτικότητα κατά βάρος σε κολλοειδή πυριτία}$$

5.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος (προσέγγιση 1)

Στην ενότητα αυτή διερευνάται η ακρίβεια της προσομοίωσης της σταθεροποίησης αποκλειστικά μέσω αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος για σταθεροποιημένη άμμο Nevada, όπως αυτή περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Αυτό γίνεται εδώ μέσω συγκρίσεων για τη δυναμική δοκιμή φυγοκέντρισης των Gallagher et al. (2007). Η σύγκριση περιλαμβάνει τις πειραματικές μετρήσεις και τις προσομοιώσεις με την προηγούμενη βέλτιστη προσέγγιση (Αγαπουλάκη 2017 και Andrianopoulos et al. 2016). Έτσι, στο Σχήμα 5.2 παρατίθενται οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και υπερπιέσεων πόρων του πειράματος και των αριθμητικών προβλέψεων που προέκυψαν από την Προσέγγιση 1, καθώς και από την προηγούμενη βέλτιστη προσέγγιση. Ακολουθεί, στο Σχήμα 5.3, η αντίστοιχη σύγκριση για την καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους.



Σχήμα 5.2 (α) Σύγκριση των χρονιοιστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν σε διαφορετικά βάθη στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K = Kw/825$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada (Προσέγγιση 1). (β) Οι χρονιοιστορίες του λόγου υπερπύεσης πόρων r_u όπως προέκυψαν από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις στα διάφορα βάθη μέτρησης της επιτάχυνσης.



Σχήμα 5.3 Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθίζησης όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K = Kw/825$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada (Προσέγγιση 1).

Παρατηρώντας το Σχήμα 5.2 προκύπτει ότι η Προσέγγιση 1 είναι ποιοτικώς ορθή, αλλά οδηγεί σε υψηλότερες τιμές υπερπιέσεων πόρων απ' ό,τι η μεθοδολογία των Αγαπουλάκη (2017) και Andrianopoulos et al. (2016) και τελικά δεν αποτρέπει τη ρευστοποίηση ($ru=1$) σε κανένα βάθος. Σε όρους επιταχύνσεων, οι μεγαλύτερες τιμές των υπερπιέσεων πόρων στην Προσέγγιση 1, οδηγεί σε συγκριτικά μικρότερες επιταχύνσεις σε σχέση με αυτές της πρότερης βέλτιστης προσέγγισης, ενώ και οι προσεγγίσεις αποτυγχάνουν να προσομοιώσουν τις σημαντικές επιταχύνσεις του πειράματος σε βάθη $z = 2m$ και $z = 4m$. Σε μεγαλύτερα βάθη η σύγκριση με το πείραμα είναι καλύτερη. Επιπλέον, από το Σχήμα 5.3 προκύπτει ότι η βέλτιστη υπάρχουσα προσέγγιση προβλέπει ικανοποιητικά τη μικρή καθίζηση του πειράματος, αντίθετα με την Προσέγγιση 1 που υποεκτιμά την καθίζηση. Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι τόσο σημαντικό γιατί είναι γνωστό ότι το NTUA-SAND δεν προβλέπει σωστά τις καθιζήσεις ελευθέρου πεδίου, ούτως ή άλλως. Σε κάθε περίπτωση όμως, με βάση τα αποτελέσματα αυτά, κρίνεται πως η Προσέγγιση 1 είναι ποιοτικά ορθή, αλλά ποσοτικά υπολείπεται της βέλτιστης υπάρχουσας σε ακρίβεια και υποεκτιμά την επίδραση της σταθεροποίησης στη σεισμική απόκριση του εδάφους.

5.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με συνδυασμό αναβαθμονόμησης προσομοιώματος και μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων (προσέγγιση 2)

Η δεύτερη προσέγγιση της προσομοίωσης της σταθεροποίησης είναι ο συνδυασμός των δύο μεθοδολογιών, δηλαδή της αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος για σταθεροποιημένη άμμο Nevada σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση της συμπίεστότητας του υγρού των πόρων. Στη διδακτορική διατριβή της Αγαπουλάκη (2017), αλλά και στη διπλωματική εργασία των Πανάγου–Σιάμπου (2015), στο πλαίσιο της διερεύνησης της επίδρασης της μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας K_w του υγρού των πόρων, προτάθηκε η εμπειρική σχέση 5.3 που συνδέει την μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K_w του υγρού των πόρων, με το ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας κατά βάρος που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διάταξη. Η σχέση αυτή προέκυψε μέσω δοκιμαστικών προβλέψεων και αναλύσεων (trial and error) επί των πειραμάτων των Gallagher et al. (2007a) και των Conlee et al. (2012), ένα πείραμα που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6 που ακολουθεί. Εδώ, η λογική συνδυασμού μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας και επαναπροσδιορισμού

κάποιων παραμέτρων όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη διπλωματική εργασία του Τιπτηρή (2017). Η ιδέα αυτή προέκυψε έτσι ώστε η προσομοίωση της σταθεροποίησης σε προβλήματα συνοριακών τιμών να βασιστεί όχι αποκλειστικά στη φαινομενολογική προσέγγιση που προτείνουν η Αγαπουλάκη (2017) και Andrianopoulos et al. (2016), αλλά παράλληλα και σε πειραματικά αποτελέσματα σταθεροποιημένων δοκιμών. Καθώς στη συγκεκριμένη εργασία έχει γίνει πλήρης αναβοθμονόμηση του προσομοιώματος για σταθεροποιημένη άμμο, η μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων και η σημασία αυτής στην προσομοίωση αναμένεται να υποβαθμιστούν σημαντικά σε σχέση με τη μεθοδολογία των Αγαπουλάκη (2017) και Τιπτηρή (2017).

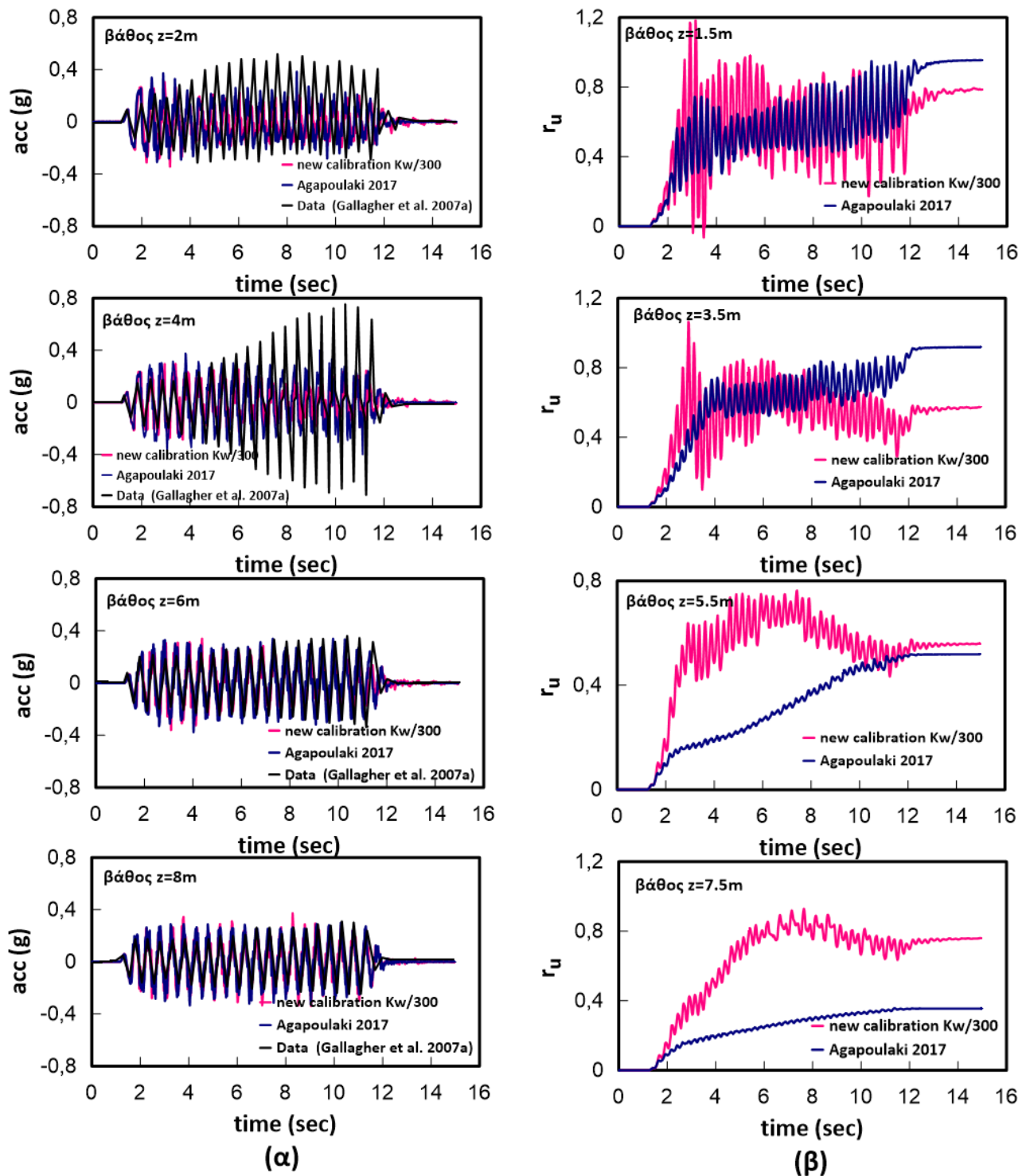
Συγκεκριμένα, μέσω δοκιμαστικών προβλέψεων και αναλύσεων (trial and error) επί του πειράματος των Gallagher et al. (2007a) και των μετέπειτα εξεταζόμενων πειραμάτων των Conlee et al. (2012) και Pamuk et al. (2007), προέκυψε η σχέση (5.4) για το διαιρέτη n ($K=Kw/n$):

$$n = \left[\frac{1}{2} \cdot CS (\%) \right] * 100 \quad (5.4)$$

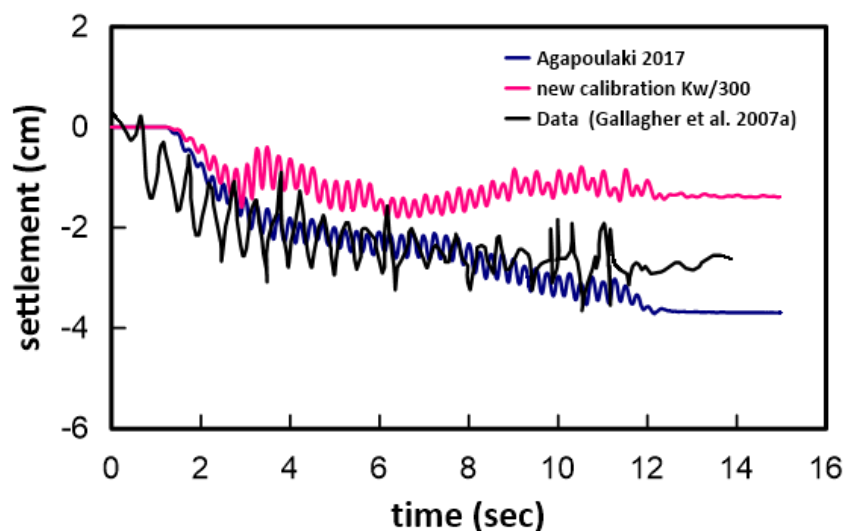
Για την τιμή της συγκέντρωσης κολλοειδούς πυριτίας $CS = 6\%$ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα των Gallagher et al. (2007a), προκύπτει από την ανωτέρω σχέση η τιμή 300 για τον διαιρέτη n του μέτρου συμπίεστότητας του νερού των πόρων Kw , έναντι της τιμής 825 που προκύπτει με βάση την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση (σχέση 5.3), και της τιμής 400 που προέκυψε από την εργασία του Τιπτηρή (2017). Στο Σχήμα 5.4 παρατίθενται οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και υπερπιέσεων πόρων του πειράματος και των αριθμητικών προβλέψεων που προέκυψαν από την Προσέγγιση 2 (συνδυασμός νέας βαθμονόμησης και μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας Kw), καθώς και από την προηγούμενη βέλτιστη προσέγγιση. Ακολουθεί, στο Σχήμα 5.5, η αντίστοιχη σύγκριση για την καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους.

Παρατηρώντας το Σχήμα 5.4 συμπεραίνουμε ότι η Προσέγγιση 2, πέρα από ποιοτικά ορθή, είναι και ποσοτικά ελαφρώς ακριβέστερη σε σχέση με την Προσέγγιση 1, καθώς οδηγεί σε μικρότερες υπερπιέσεις πόρων και σε αποφυγή της ρευστοποίησης ($ru < 1$) κοντά στην επιφάνεια ($z=2m$), μετά από τον χρόνο $t = 3sec$, ενώ και στα υπόλοιπα βάθη οδηγεί σε ελαφρώς μικρότερες υπερπιέσεις (βλ. Σχήμα 5.2). Βέβαια, η επίδραση αυτών των ελαφρά μειωμένων υπερπιέσεων δεν δίνει απτά διαφορετικές επιταχύνσεις με το βάθος. Ακόμη, από το Σχήμα 5.5 προκύπτει ελαφρώς μικρότερη καθίζηση με την Προσέγγιση 2, συγκριτικά με την Προσέγγιση 1 (βλ. Σχήμα 5.3), και σε κάθε περίπτωση μικρότερη από εκείνη του πειράματος ή της υπάρχουσας βέλτιστης προσέγγισης.

Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα αυτά, η Προσέγγιση 2 είναι ποιοτικώς ορθή, και ελαφρώς πιο ακριβής σε σχέση με την Προσέγγιση 1 (δηλαδή χωρίς την μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των Kw), για το συγκεκριμένο πείραμα φυγοκεντρική. Συνολικά, δεν μπορεί να θεωρηθεί ποσοτικά ακριβέστερη της πρότερης βέλτιστης προσέγγισης από τη βιβλιογραφία (Αγαπουλάκη 2017).



Σχήμα 5.4 (α) Σύγκριση των χρονιοιστοριών επιταχύνσεων όπως μετρήθηκαν για διαφορετικά βάθη στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K = Kw/825$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού πόρων $K=Kw/125$ (Προσέγγιση 2). (β) Οι χρονιοιστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u όπως προέκυψαν από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις στα διάφορα βάθη μέτρησης της επιτάχυνσης.



Σχήμα 5.5 Σύγκριση των χρονοϊστοριών καθίζησης όπως μετρήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα (Gallagher et al. 2007a) με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K = Kw/825$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων $K=Kw/125$ (Προσέγγιση 2).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό ήπια κλίση

Σε συνέχεια του Κεφαλαίου 5, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτρία εδαφών με «ευφυή» χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianoopoulos et al. 2010), σε σύγκριση με τις μετρήσεις από δυναμική δοκιμή φυγοκέντρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης υπό ήπια κλίση των Conlee et al. (2012). Στην παράγραφο 6.1 γίνεται η περιγραφή των δοκιμών και στην παράγραφο 6.2 παρουσιάζονται οι παραδοχές των αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν με στόχο την προσομοίωση μίας εκ των 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 6.3. Τέλος, στην παράγραφο 6.4 μελετάται και ο συνδυασμός των μεθοδολογιών αναβαθμονόμησης για τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada και μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας K , όπως και στο Κεφάλαιο 5.

6.1. Περιγραφή δυναμικών δοκιμών φυγοκέντρισης των Conlee et al. (2012)

Οι Conlee et al. (2012) πραγματοποίησαν σειρά από πειράματα φυγοκεντριστή με σκοπό να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της κολλοειδούς πυριτίας στον περιορισμό της ρευστοποίησης σε αμμώδεις στρώσεις υπό ήπια κλίση, και την αντιμετώπιση του συνεπακόλουθου φαινομένου πλευρικής εξάπλωσης. Επιταχυνσιόμετρα, μετρητές πίεσης πόρων, γραμμικά ποτενσιόμετρα και γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (LVDT) ήταν τοποθετημένοι στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Τα όργανα στο ρευστοποιήσιμο στρώμα αποτελούνται από 10 πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα και εννέα μετρητές πίεσης πόρων και είναι τοποθετημένα σε κάθετη συστοιχία σε κάθε πλευρά του μοντέλου. Η διάταξη του πειράματος περιλαμβάνει δύο συμμετρικά πρηνή με κλίση επιφάνειας ίσης με 3° προς ένα κεντρικό κανάλι πλάτους 3m. Τα προσομοίωμα του πειράματος αποτελείται 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 No. 120
- μία επιφανειακή στρώση πάχους 1m συμπαγούς ιλυώδους αργίλου Yolo loam στην οποία δημιουργούνται τα πρηνή.

Στόχος της σειράς πειραμάτων ήταν η σύγκριση, σε όρους υπερπίεσεων πόρων, επιταχύνσεων και (οριζόντιων και κατακόρυφων) μετακινήσεων σταθεροποιημένων εδαφών με ποσοστά πυριτίας Ludox®- SM κατά βάρος 4%, 5% και 9% με την αντίστοιχη συμπεριφορά ενός μη-σταθεροποιημένου φυσικού εδάφους.

Στην πρώτη δοκιμή (CTC01) οι άμμοι Nevada και Monterey στο αριστερό πρηνές (σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας της διάταξης) σταθεροποιήθηκαν με Ludox-SM® περιεκτικότητας CS=9% κατά βάρος, ενώ στο δεξί πρηνές παρέμειναν τα αντίστοιχα «φυσικά» μη σταθεροποιημένα εδάφη. Στη δεύτερη δοκιμή (CTC02) οι ίδιες στρώσεις του αριστερού πρηνούς σταθεροποιήθηκαν με Ludox-SM® περιεκτικότητας CS = 4% αυτή τη φορά, ενώ στο δεξί πρηνές οι εν λόγω στρώσεις σταθεροποιήθηκαν με Ludox-SM® περιεκτικότητας CS=5% (Conlee 2010). Η χρήση ενέματος κολλοειδούς πυριτίας με διαφορετικά ποσοστά έγινε προκειμένου να ερευνηθεί η επίδραση της συγκέντρωσης στην απόκριση. Επιβλήθηκαν συνολικά 8 σεισμικές διεγέρσεις σε κάθε ένα από τα δύο πειράματα σε διάφορες επιταχύνσεις στον φυγοκεντριστή. Κάθε διεγέρση αποτελούνταν από 20 ημιτονοειδείς κύκλους φόρτισης συχνότητας 2Hz. Οι επιταχύνσεις βάσης για κάθε σεισμικό γεγονός φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η γενική διάταξη των πειραμάτων, συμπεριλαμβανομένου και του μετρητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.

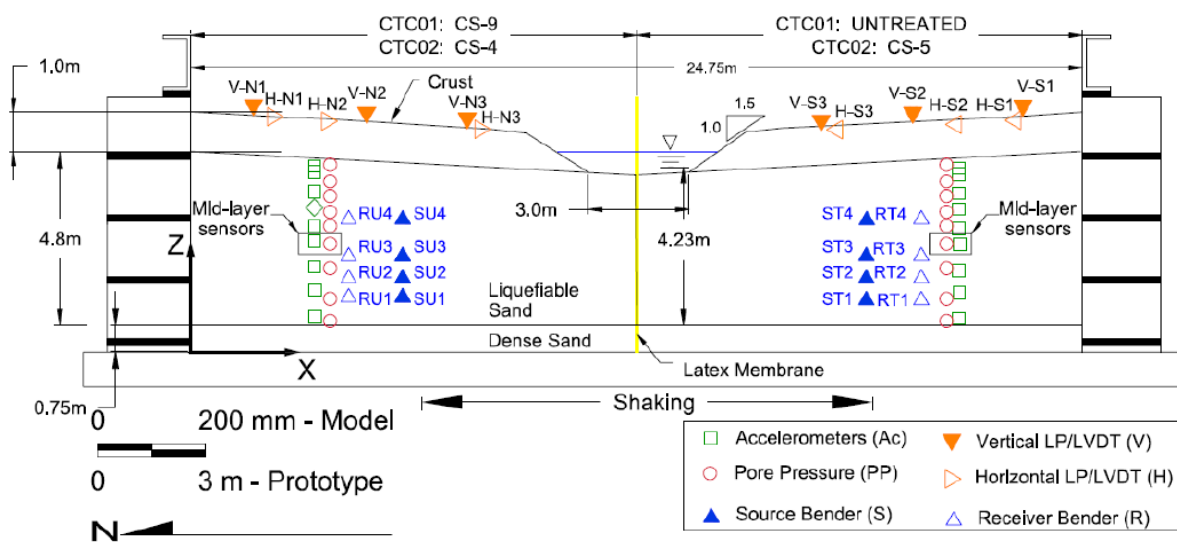
Πίνακας 6.1 Σεισμικές διεγέρσεις για κάθε πείραμα (Conlee et al. 2012)

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)	0.03	CTC02_02	0.03
(pulse wave test)		(Shake 2) (bender test)	
CTC01_03 (Shake 3)	0.1	CTC02_03	0.15
(pulse wave test)		(Shake 3) (bender test)	
CTC01_04 (Shake 4)	0.2	CTC02_04	0.25
(pulse wave test)		(Shake 4) (bender test)	
CTC01_05 (Shake 5)	0.56	CTC02_05	0.69
(pulse wave test)		(Shake 5) (bender test)	
CTC01_06 (Shake 6)	0.03	CTC02_06	0.03
(pulse wave test)		(Shake 6) (bender test)	
CTC01_07 (Shake 7)	0.2	CTC02_07	0.25
(pulse wave test)		(Shake 7) (bender test)	
CTC01_08 (Shake 8)	1.28	CTC02_08	1.37
(pulse wave test)		(Shake 8) (bender test)	

^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.

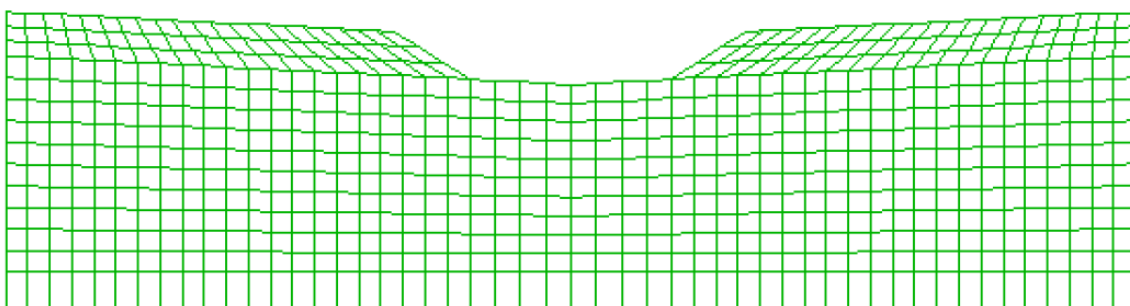


Σχήμα 6.1 Διάταξη πειραμάτων συμπεριλαμβανομένων των θέσεων τοποθέτησης οργάνων (Conlee et al. 2012)

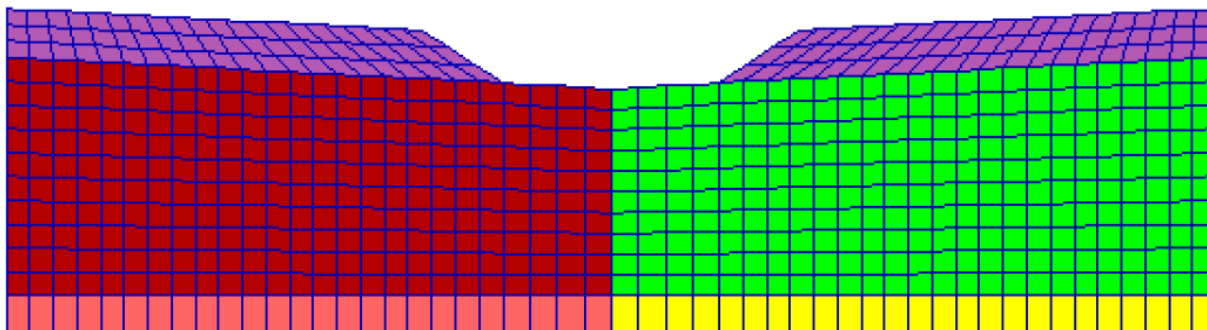
6.2 Προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκέντρησης CTC01 των Conlee et al. (2012)

Για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος CTC01 των Conlee et al. (2012) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FLAC (Itasca Inc. 2011). Συγκεκριμένα από τις διάφορες σεισμικές διεγέρσεις που επιβλήθηκαν επιλέχθηκε η προσομοίωση του Shake 3 (μέγιστης επιτάχυνσης 0.1 g). Ο κώνναβος που επιλέχθηκε, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2, και έχει συνολικό πλάτος 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 πρωτότυπου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2 (συμμετρικά πρηνή κλίση 3°). Οι συγκεκριμένες διαστάσεις επιλέχθηκαν ως βέλτιστη προσέγγιση, καθώς στη βιβλιογραφία υπάρχουν μικροδιαφορές στη γεωμετρία του μοντέλου, όπως αυτή παρουσιάζεται στις μελέτες των Conlee (2010) και 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 6.3. 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 για το σταθεροποιημένο πρηνές και πράσινο για το φυσικό) 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 και του σταθεροποιημένου πρηνούς.

Ως συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν αρχικά κατακόρυφες κυλίσεις στα κατακόρυφα σύνορα, ώστε να επιτρέπονται οι καθιζήσεις και αρθρώσεις στους κάτω κόμβους για τη στατική ισορροπία και την εφαρμογή του γεωστατικού πεδίου. 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. Στο μέσο του προσομοιώματος και κατά μήκος της κάθετης διεύθυνσης στην πειραματική διάταξη είχε τοποθετηθεί μεμβράνη, ώστε να χωρίζει τα 2 πρηνή. Η μεμβράνη αυτή αριθμητικά 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 προς το άλλο.



Σχήμα 6.2 Κώνναβος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό FLAC για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος CTC01 των Conlee et al. (2012).



Σχήμα 6.3 Η στρωματογραφία του καννάβου: Στο αριστερό σταθεροποιημένο πρανές παρουσιάζεται με μωβ: η επιφανειακή στρώση Yolo loam, κόκκινο: η ενδιάμεση στρώση άμμου Nevada, ροζ: η κατώτερη στρώση άμμου Monterey. Στο δεξί «φυσικό» πρανές παρουσιάζεται με μωβ: η επιφανειακή στρώση Yolo loam, πράσινο: η ενδιάμεση στρώση άμμου Nevada, κίτρινο: η κατώτερη στρώση άμμου Monterey.

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND χρησιμοποιήθηκε τόσο για την άμμο Nevada, όσο και για την άμμο Monterey καθώς θεωρείται ότι έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει και τη σεισμική απόκριση της πυκνής άμμου Monterey που βρίσκεται στη βάση των δύο πρανών, αλλάζοντας 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. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν τόσο για τη φυσική, όσο και για την σταθεροποιημένη άμμο Nevada παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για την προσομοίωση της επιφανειακής στρώσης Yolo loam χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, οι σταθερές του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για την αριθμητική προσομοίωση του σταθεροποιημένου εδάφους (αριστερό πρανές) χρησιμοποιήθηκε η λογική που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, δηλαδή χρησιμοποιώντας τις δύο (2) προσεγγίσεις που προαναφέρθηκαν και συγκεκριμένα:

- αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada (Προσέγγιση 1)
- συνδυασμός της αναβαθμονόμησης της σταθεροποιημένης άμμου Nevada με μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων $K = K_w/n$ (Προσέγγιση 2)

Τέλος, στη βάση του καννάβου επιβλήθηκε ημιτονοειδής διέγερση με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης ίση με 0.10g και συχνότητας 2Hz, που αντιστοιχεί στην τρίτη διέγερση της ακολουθίας (Shake 3) που θα μελετηθεί στις παραγράφους 6.3 και 6.4. 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.

Πίνακας 6.2 Τιμές των σταθερών του Mohr-Coulomb για τη στρώση Yolo loam

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°

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που έγιναν για τις 2 προσεγγίσεις προσομοίωσης της σταθεροποίησης σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις. Τα πειραματικά δεδομένα που παρατίθενται στα ακόλουθα σχήματα προέκυψαν για τη CTC01 (Πίνακας 6.1) από τις μετρήσεις:

- των επιταχυνσιογράφων του σταθεροποιημένου αριστερού πρανούς T21, T4, T1 και C49 σε βάθη από την επιφάνεια ίσα με $z=0.6\text{m}$, $z=3.5$, $z=5.7$ 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 (άξονας 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.

Παρατίθενται επίσης, οι ιστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων ru 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 – Shake3 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 λανθασμένες μετρήσεις ή μετατοπισμένα όργανα που εντοπίζονται από τους ίδιους τους εκτελεστές των δοκιμών (Conlee 2010, Conlee et al. 2012). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται και σε αυτό το κεφάλαιο με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση που έχει προκύψει από τη διδακτορική διατριβή της Agaroulaki (2017), δηλαδή:

(α) τη διατήρηση των τιμών των παραμέτρων όπως προκύπτουν για τη φυσική άμμο Nevada (Andrianopoulos et al., 2010),

(β) τη σημαντική μείωση του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων, $K=K_w/n$, με βάση τη σχέση 5.3.

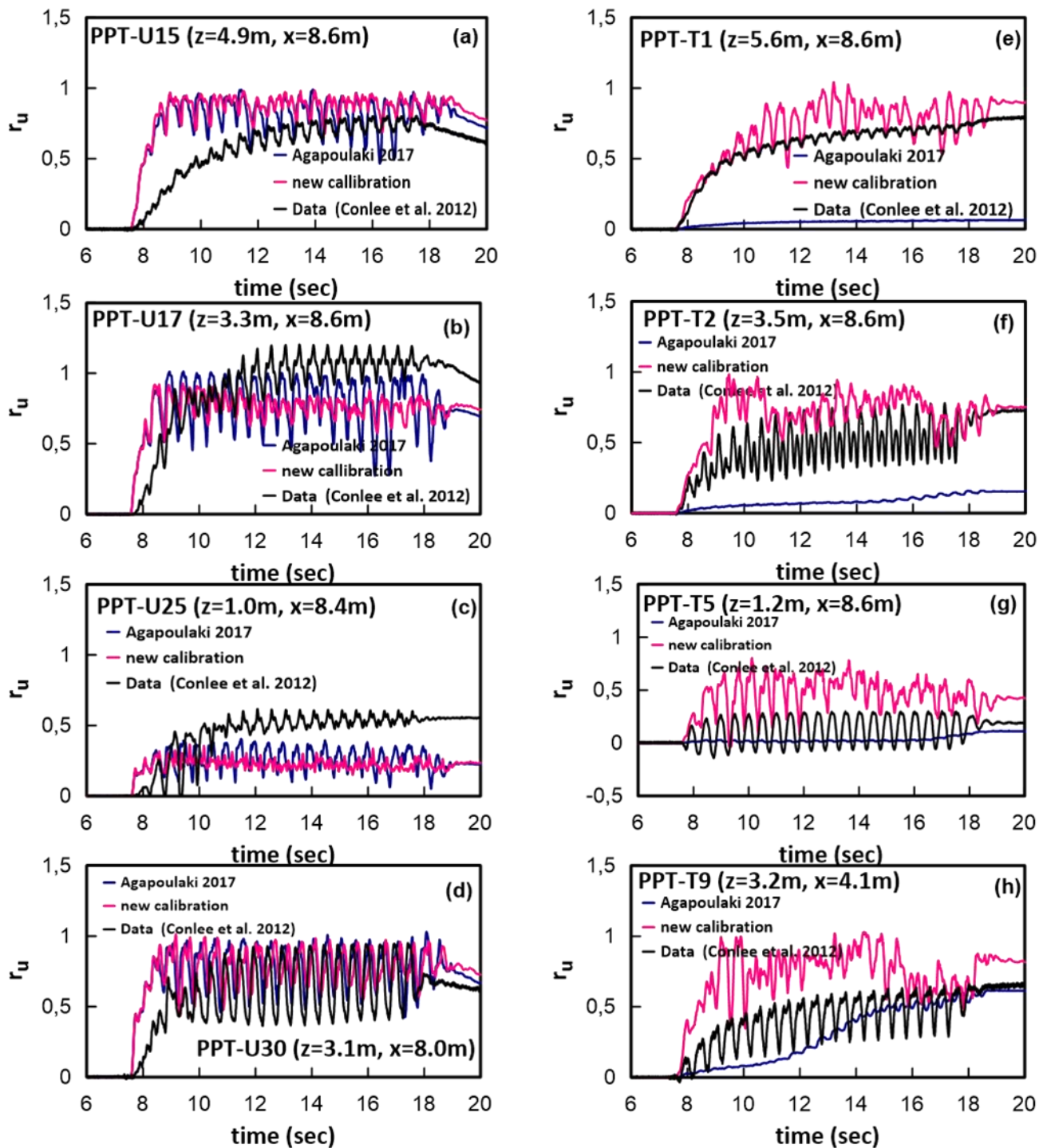
6.3 Προσομοίωση σταθεροποίησης αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος (Προσέγγιση 1)

Παρακάτω διερευνάται η ακρίβεια της προσομοίωσης της σταθεροποίησης αποκλειστικά μέσω αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος για σταθεροποιημένη άμμο Nevada, όπως αυτή περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Αυτό γίνεται εδώ μέσω συγκρίσεων για τη δυναμική δοκιμή φυγοκέντρησης CTC01-Shake3 των Conlee et al. (2012). Η σύγκριση περιλαμβάνει τις πειραματικές μετρήσεις και τις προσομοιώσεις με την προηγούμενη βέλτιστη προσέγγιση (Agaroulaki 2017 και Andrianopoulos et al. 2016). Συνεπώς, στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης των χρονοϊστοριών λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u σε διάφορα σημεία του καννάβου. Από τις συγκρίσεις προκύπτει ότι στο πείραμα στα μη-σταθεροποιημένα σημεία το έδαφος (σε ίδια βάθη και απόσταση) εμφανίζει μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων, ακόμη και ρευστοποίηση ($r_u=1$), συγκριτικά με ό,τι συμβαίνει στα σταθεροποιημένα σημεία. Από το διαγράμματα προκύπτει επίσης ότι οι 2 προσεγγίσεις δίνουν συγκρίσιμες τιμές r_u στο φυσικό πρανές (κοντά στις πειραματικές μετρήσεις), ενώ η Προσέγγιση 1 δίνει μεγαλύτερες υπερπιέσεις στο σταθεροποιημένο πρανές συγκριτικά με την πρότερη βέλτιστη (Αγαπουλάκη 2017), και μάλλον πιο κοντά στις πειραματικές μετρήσεις.

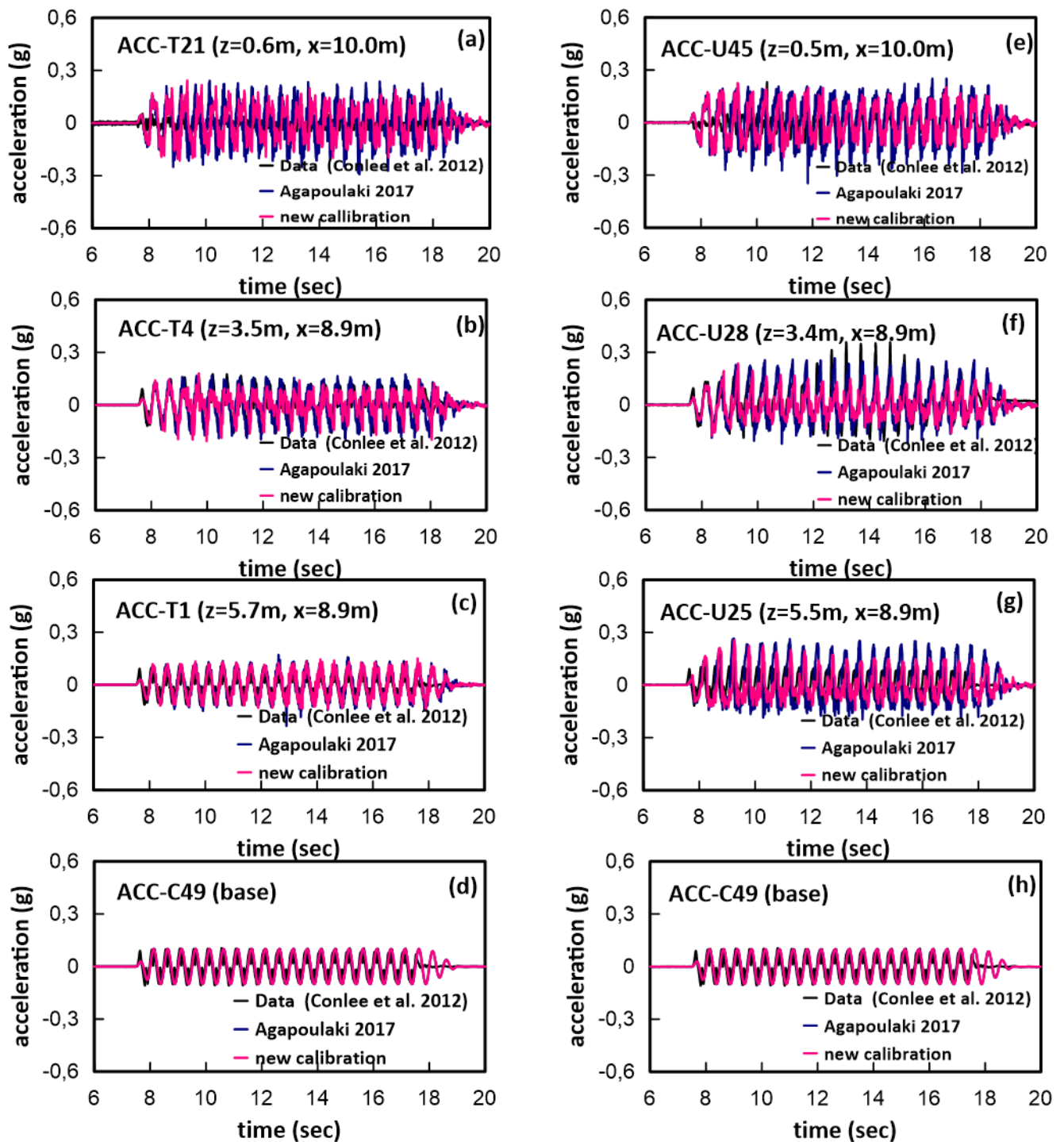
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 6.5 γίνεται αντίστοιχη σύγκριση μετρήσεων – αριθμητικών προβλέψεων για τις χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα σημεία και βάθη στο σταθεροποιημένο και το μη-σταθεροποιημένο τμήμα. Από το Σχήμα αυτό προκύπτει ότι η Προσέγγιση 1 είναι ποιοτικώς ορθή, και οδηγεί σε λίγο μικρότερες επιταχύνσεις ειδικά πλησίον της επιφάνειας συγκριτικά με τη βέλτιστη υπάρχουσα προσομοίωση. Αυτή η μείωση είναι υπέρ της ακρίβειας στα πολύ μικρά βάθη ($z=0.5m$, μέσα στη στρώση Yolo loam), αλλά γενικότερα αυτό δεν ισχύει 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 των Conlee et al. (2012). Αυτές οι μικρότερες επιταχύνσεις για την Προσέγγιση 1 σχετίζονται με τις συγκριτικά μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων (βλ. Σχήμα 6.4). Επισημαίνεται ότι γενικά 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 προσεγγιστικό τρόπο προσομοίωσης της στρώσης Yolo loam (με Mohr-Coulomb, χωρίς να υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα).

Σε αντίθεση με τις επιταχύνσεις, στις μετατοπίσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6 οι διαφορές μεταξύ μετρήσεων και προβλέψεων είναι μεγαλύτερες. Ειδικότερα, προκύπτει ότι η Προσέγγιση 1 δίνει μεγαλύτερες καθιζήσεις κοντά στην επιφάνεια στο σταθεροποιημένο πρανές (VT1, 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 σχεδόν ταυτόσημες. όμως, λόγω της αλληλεπίδρασης των 2 πρανών, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις προβλέψεις των μετατοπίσεων και στο φυσικό πρανές κοντά στην επιφάνεια, όπου η Προσέγγιση 1 υποεκτιμά τις μετρήσεις (VU1, HU3)

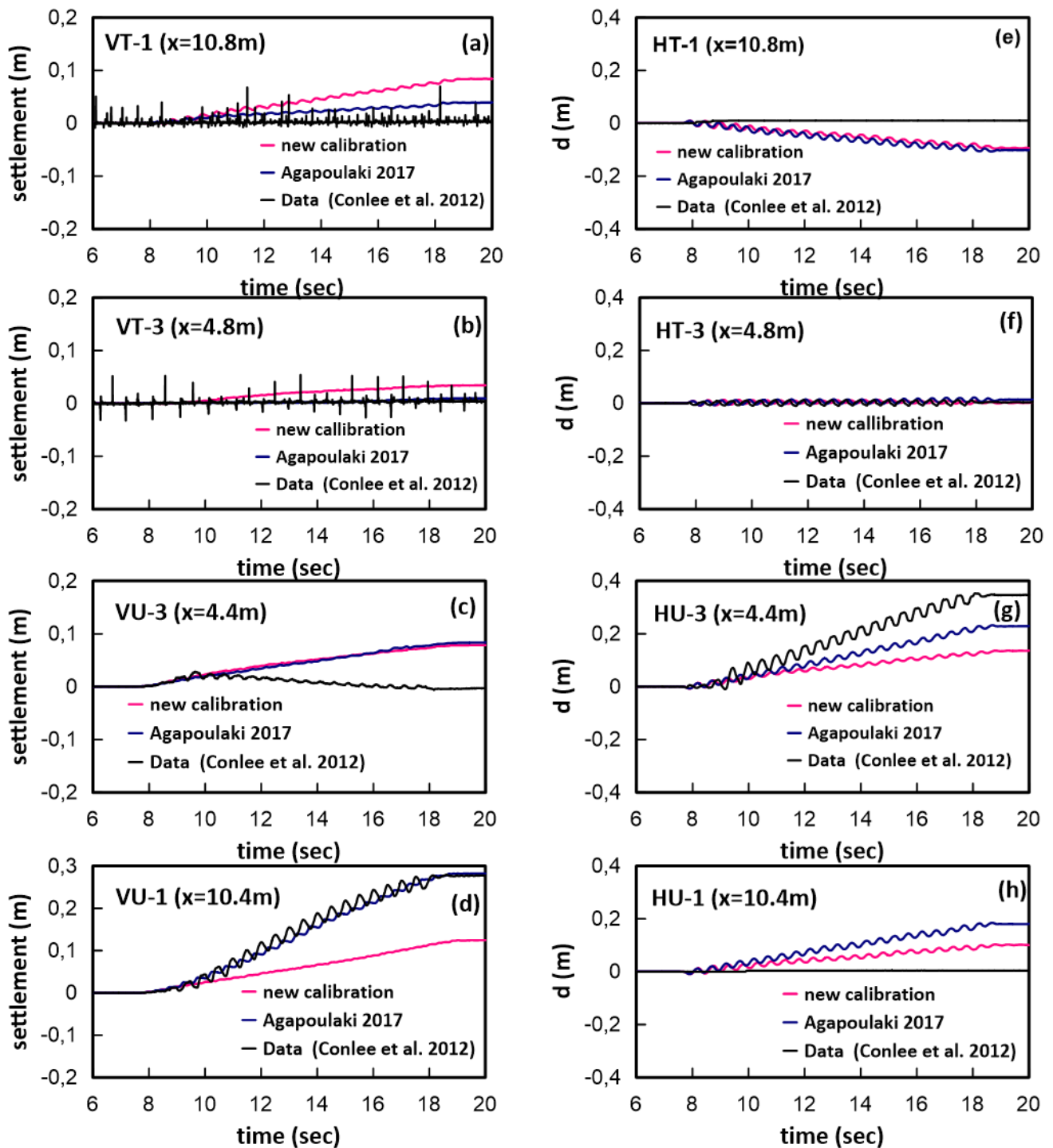
Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα αυτά η Προσέγγιση 1 είναι ποιοτικώς ορθή, αλλά οδηγεί σε οριακά λιγότερο ακριβή αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη της Agaroulaki (2017).



Σχήμα 6.4 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 $K=K_w/1125$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την Προσέγγιση 1 (αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada).



Σχήμα 6.5 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 $K=Kw/1125$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την Προσέγγιση 1 (αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada).



Σχήμα 6.6 Σύγκριση των χρονιοιστοριών καθιζήσεων (α έως δ) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (ε έως η) 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 $K=K_w/1125$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την Προσέγγιση 1 (αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada).

6.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης με συνδυασμό αναβαθμονόμησης προσομοιώματος και μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού πόρων (Προσέγγιση 2)

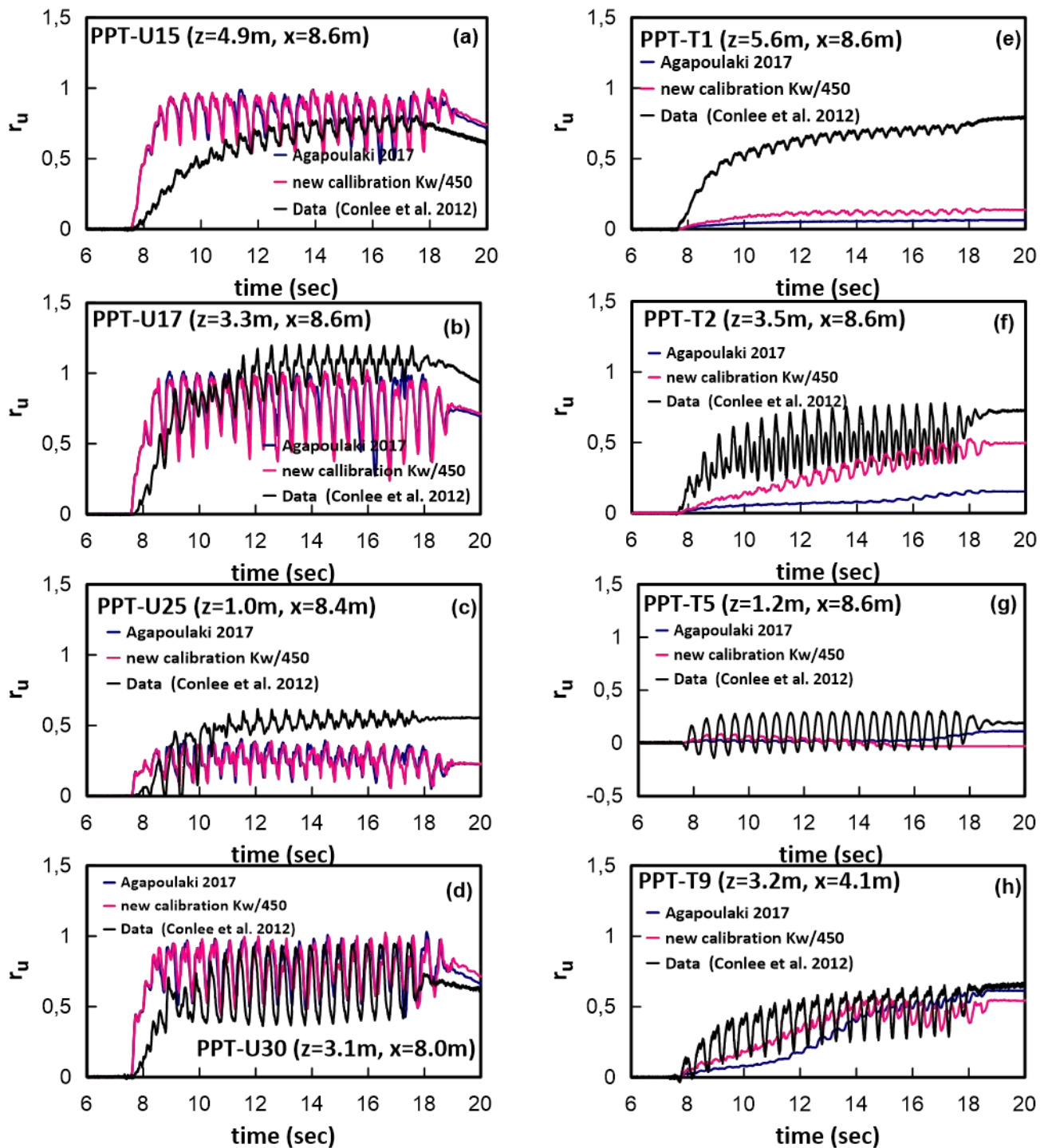
Όπως και στο Κεφάλαιο 5, η δεύτερη προσέγγιση για την προσομοίωση της σταθεροποίησης είναι ο συνδυασμός των δύο μεθοδολογιών, δηλαδή της αναβαθμονόμησης των παραμέτρων του NTUA-SAND για τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada (Κεφάλαιο 4) σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση της συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων. Για την εν λόγω ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων Κ συγκριτικά με την τιμή για το νερό K_w , για την τιμή της συγκέντρωσης κολλοειδούς πυριτιτιάς $CS = 9\%$ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα των Conlee et al. (2012) προκύπτει από την σχέση 5.4 η τιμή 450 για τον διαιρέτη του K_w . Υπενθυμίζεται εδώ ότι μια αντίστοιχη προσέγγιση (χωρίς πλήρη αναβαθμονόμηση του NTUA-SAND) είχε διερευνηθεί και από τον Τιπτηρή (2017), όπου ο διαιρέτης του K_w είχε θεωρηθεί ίσος με 600 (βλ. και Κεφάλαιο 5).

Έτσι, στο Σχήμα 6.7 παρατίθενται οι χρονοϊστορίες υπερπίεσεων πόρων του πειράματος και των αριθμητικών προβλέψεων που προέκυψαν από την Προσέγγιση 2 (συνδυασμός νέας βαθμονόμησης και μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας K_w), καθώς και από την προηγούμενη βέλτιστη προσέγγιση της Αγαπουλάκη (2017). Από το Σχήμα 6.7 προκύπτει ότι οι δύο προσεγγίσεις δίνουν συγκρίσιμες τιμές στις υπερπίεσεις πόρων στο φυσικό πρανές και μάλιστα πολύ κοντά στην τιμές των μετρήσεων που προκύπτουν από το πείραμα. Στο σταθεροποιημένο πρανές οι τιμές της Προσέγγισης 2, είναι υψηλότερες σε σχέση με τις προβλεπόμενες από τη βέλτιστη υπάρχουσα προσέγγιση, και προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων ru του πειράματος, παραμένουν. Υπενθυμίζεται εδώ πως η σύγκριση σε όρους ru με τις πειραματικές μετρήσεις είναι μάλλον ενδεικτική, καθώς οι εν λόγω μετρήσεις έχουν γίνει με μετρητές σχεδιασμένους για νερό ως υγρό πόρων και είναι άγνωστη η ακρίβειά τους σε χρήση υγρού με πολύ μεγαλύτερο ιξώδες όπως η γέλη κολλοειδούς πυριτιτιάς.

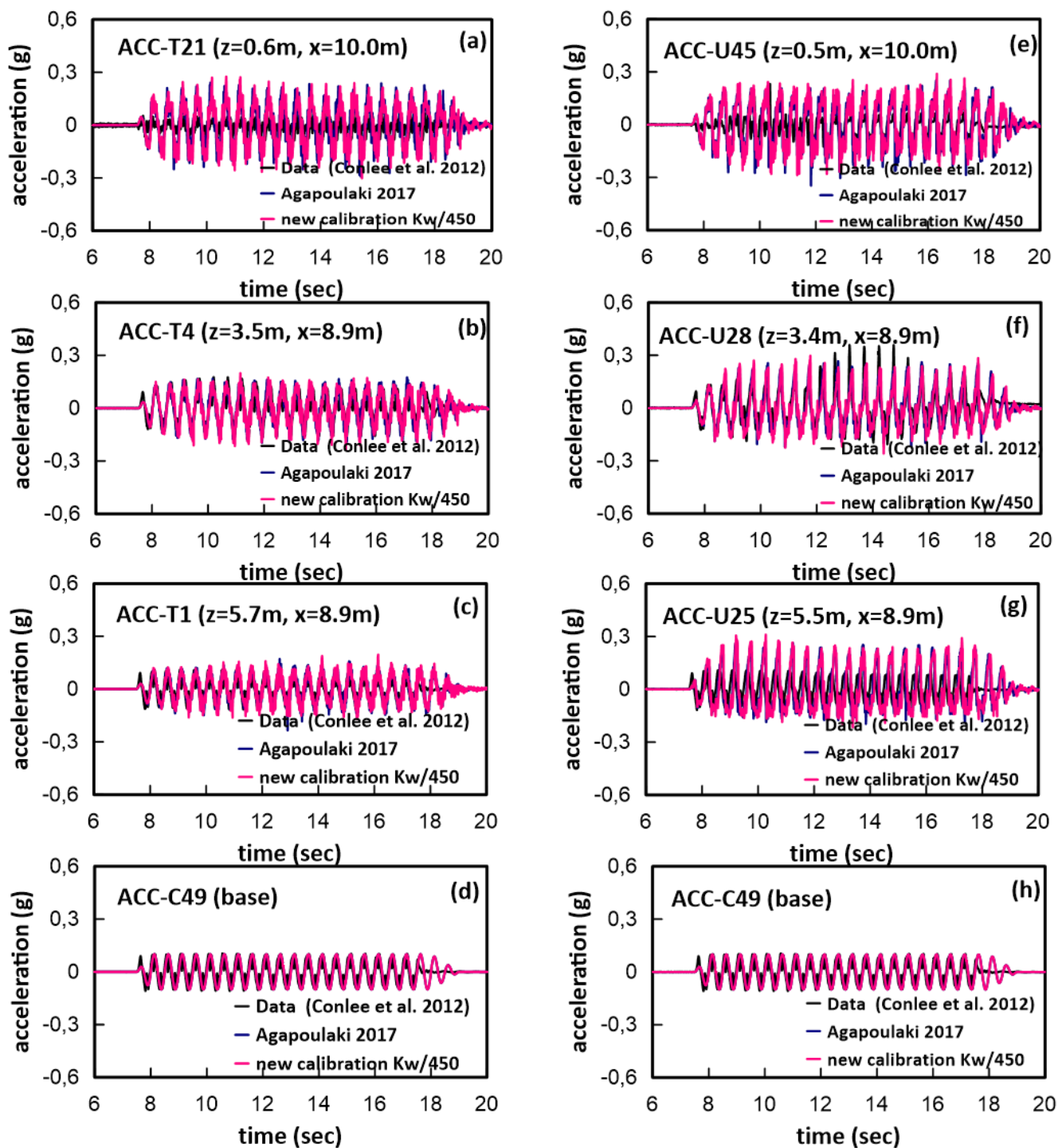
Στο Σχήμα 6.8 γίνεται μια αντίστοιχη σύγκριση μετρήσεων και αριθμητικών προβλέψεων για τις χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα σημεία και βάθη. Από το Σχήμα 6.9 προκύπτει ότι η Προσέγγιση 2 είναι ποιοτικώς ορθή, και οδηγεί σε συγκρίσιμες επιταχύνσεις με τη βέλτιστη υπάρχουσα προσομοίωση, σε όλα τα 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 προσεγγιστικό τρόπο προσομοίωσης του Yolo loam (με Mohr-Coulomb, χωρίς να υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα).

Τέλος, στο Σχήμα 6.9 γίνεται η σύγκριση μετρήσεων και αριθμητικών προβλέψεων σε όρους χρονοϊστοριών οριζοντίων και κατακόρυφων μετατοπίσεων. Από το Σχήμα 6.9 προκύπτει ότι οι 2 προσεγγίσεις δίνουν παραπλήσιες τιμές καθιζήσεων στο σταθεροποιημένο πρανές (VT1, VT3), και μάλιστα πολύ κοντινές με τις τιμές των μετρήσεων. Στις οριζόντιες μετατοπίσεις του σταθεροποιημένου πρανούς (HT1, HT3), οι δύο προσεγγίσεις είναι συγκρίσιμες, με την Προσέγγιση 2 να δίνει και πάλι παραπλήσιες μετακινήσεις με τη βέλτιστη. Ωστόσο, λόγω της αλληλεπίδρασης των δύο πρανών, προκύπτουν διαφορές στις προβλέψεις μετατοπίσεων στο φυσικό πρανές, όπου η Προσέγγιση 2 υποεκτιμά ελαφρώς τις μετρήσεις (VU1, HU1, HU3).

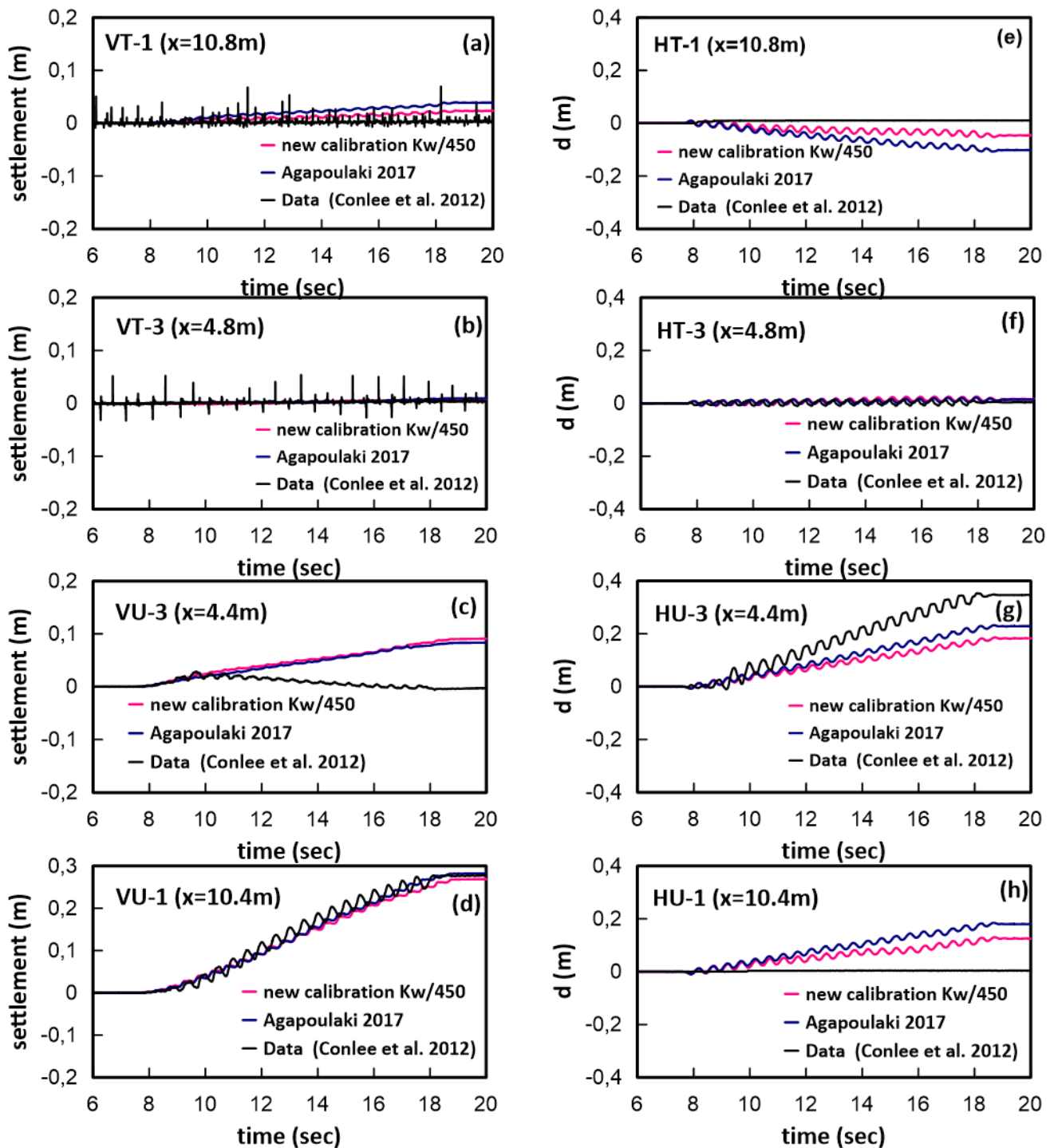
Συνεπώς, με βάση τα νέα αποτελέσματα, η Προσέγγιση 2 είναι ποιοτικώς ορθή, ακριβέστερη από την Προσέγγιση 1 και οδηγεί σε συγκρίσιμα αποτελέσματα συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη της Αγαπουλάκη (2017).



Σχήμα 6.7 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 $K=Kw/1125$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεσιτότητας του υγρού πόρων $K=Kw/450$ (Προσέγγιση 2).



Σχήμα 6.8 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 $K=Kw/1125$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεσιτότητας του υγρού πόρων $K=Kw/450$ (Προσέγγιση 2)



Σχήμα 6.9 Σύγκριση των χρονιοιστοριών καθιζήσεων (α έως δ) και των οριζόντιων μετατοπίσεων (ε έως η) όπως μετρήθηκαν στο πείραμα CTC01 Shake3 (Conlee et al. 2012) στην επιφάνεια του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις χαπό την κεντρική μεμβράνη, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την πρότερη βέλτιστη προσέγγιση $K=Kw/1125$ (Αγαπουλάκη 2017) και για την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεσιτότητας του υγρού πόρων $K=Kw/450$ (Προσέγγιση 2).

Σελίδα επίτηδες κενή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης ομάδας πασσάλων σε σταθεροποιημένη αμμώδη στρώση υπό μικρή κλίση

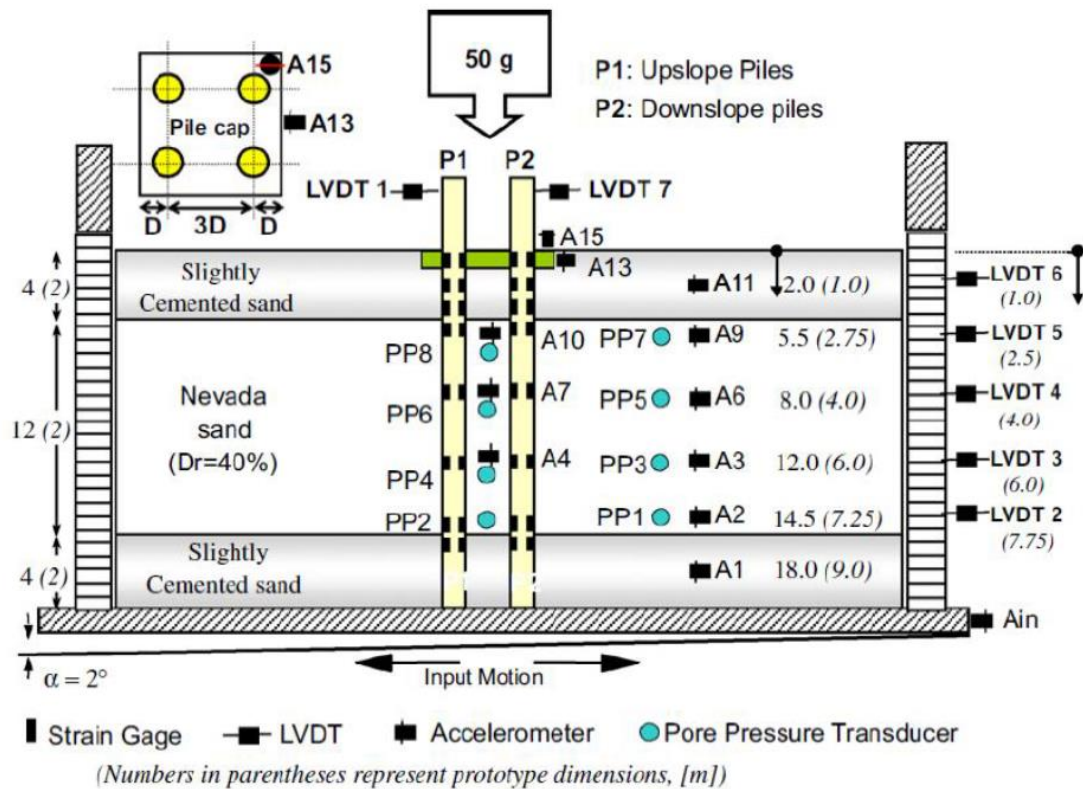
Σε συνέχεια των αριθμητικών προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα δύο κεφάλαια και με γνώμονα την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, επιχειρείται στο παρόν κεφάλαιο η προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους, αλλά και η αλληλεπίδραση αυτού με πασσαλομάδα. Το πρόβλημα αυτό είναι ένα αμιγώς τρισδιάστατο (3D) πρόβλημα και για το λόγο αυτό οι αναλύσεις εκπονήθηκαν στο λογισμικό FLAC^{3D} σε αντίθεση με των προηγούμενων κεφαλαίων που προσομοιώθηκαν σε FLAC. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μια σειρά από δοκιμές φυγοκέντρισης σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης των Pamuk et al. (2007). Με αυτήν την προσομοίωση θα εξεταστεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας της σταθεροποίησης σε ένα ακόμα πρόβλημα συνωριακών τιμών. Αρχικά, στην παράγραφο 7.1 περιγράφεται το πείραμα των Pamuk et al. (2007). Στη συνέχεια, στην παράγραφο 7.2 παρουσιάζονται οι παραδοχές των 3D αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν με στόχο την προσομοίωση των εν λόγω δοκιμών. Η παράγραφος 7.3 επεξηγεί την προσπάθεια βαθμονόμησης και ελέγχου της 3D προσομοίωσης, με έμφαση στη δοκιμή σε πασσαλομάδα μη σταθεροποιημένου εδάφους το οποίο υπέστη πλευρική εξάπλωση. Έπειτα στην παράγραφο 7.4, παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την προσέγγιση που αφορά την αναβαθμονόμηση των παραμέτρων της σταθεροποιημένης άμμου Nevada, ενώ στην παράγραφο 7.5 εξετάζεται ο συνδυασμός της αναβαθμονόμησης των παραμέτρων της σταθεροποιημένης άμμου Nevada με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του νερού K_w . Οι εν λόγω προσομοιώσεις της σταθεροποίησης συγκρίνονται με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση της σταθεροποίησης της Agaroulaki (2017).

7.1. Περιγραφή δυναμικών δοκιμών φυγοκέντρισης των Pamuk et al. (2007)

Οι Pamuk et al. (2007) εκτέλεσαν δύο δοκιμές σε φυγοκεντρική σε επιτάχυνση βάσης 0.25g, προσομοιώνοντας την αλληλεπίδραση πασσαλομάδας με το έδαφος. Σε διαστάσεις πρωτότυπου, το εδαφικό προφίλ αποτελούνταν από:

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

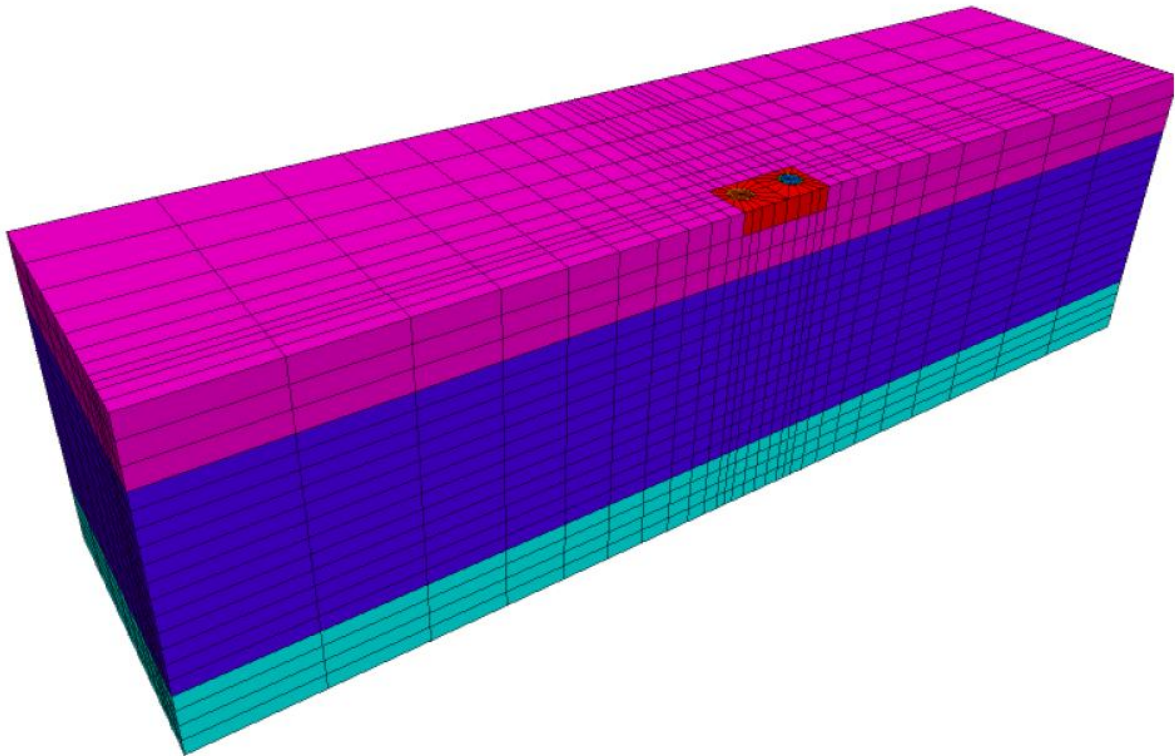
Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 7.1, όπου διαχωρίζονται οι 3 προαναφερθείσες στρώσεις. Στο εδαφικό προφίλ του μοντέλου δόθηκε μία μικρή κλίση 2° , που επαρκεί για πλευρική εξάπλωση σε περίπτωση ρευστοποίησης της μεσαίας ρευστοποιήσιμης στρώσης. Οι πάσσαλοι διαμέτρου $d=0.60\text{m}$, ακαμψίας $EI=8.000\text{kNm}^2$ με μεταξύ τους απόσταση 2m στο πρωτότυπο, θεμελιώνονται στην κατώτατη στρώση και ο κεφαλόδεσμος τους, διαστάσεων $W=3\text{m}$, $L=3\text{m}$ και $H=0.7\text{m}$, βρίσκεται στην ανώτατη στρώση. Η ενδιάμεση ρευστοποιήσιμη στρώση Nevada στο πρώτο πείραμα παρέμεινε «φυσική» (μη-σταθεροποιημένη), ενώ στο δεύτερο πείραμα σταθεροποιήθηκε με κολλοειδή πυριτία συγκέντρωσης $CS=5\%$ κατά βάρος, τύπου Ludox-SM. Όλοι οι πάσσαλοι εφοδιάστηκαν με όργανα μέτρησης καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων, πυκνώνοντας στις θέσεις κοντά στις διεπιφάνειες των στρωμάτων.



Σχήμα 7.1 Διάταξη πειράματος και οργάνων μέτρησης (Pamuk et al. 2007).

7.2 Αριθμητική προσομοίωση δυναμικής δοκιμής φυγοκεντριστή για σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε πλευρικώς εξαπλούμενο έδαφος

Για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος των Pamuk et al. (2007) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FLAC^{3D} (Itasca Inc. 2005). Λόγω της φύσης του προβλήματος, η δημιουργία του καννάβου αποτέλεσε ένα εξαιρετικά σύνθετο πρόβλημα. Απαιτείται η σωστή διακριτοποίηση 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 7.2. 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 7.1. Οι κάτω κόμβοι του καννάβου δεσμεύτηκαν σε μετακίνηση κατά τους 2 οριζόντιους άξονες, καθώς μέσω αυτών επιβλήθηκε η διέγερση σύμφωνα με τη δοκιμή. 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. Με αυτό τον τρόπο, επετεύχθη η ορθή προσομοίωση των συνοριακών συνθήκων που επιβάλλει το εύκαμπτο δοχείο (Laminar box) του φυγοκεντριστή. Η ελαφρά κλίση των 2° που εν δυνάμει οδηγεί σε πλευρική εξαπλωση επετεύχθη με στροφή του διανύσματος της βαρύτητας, ενώ ελήφθη υπόψη η επίδραση αυτής της στροφής στα πλευρικά σύνορα.



Σχήμα 7.2 Κάνναβος που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό $FLAC^{3D}$ για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος των *Ratuk et al. (2007)*

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 σιμεντοποιημένη άμμο Nevada, στην οποία θεμελιώνεται 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 δε ρευστοποιείται.

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

1. Για τους πασσάλους επιλέχθηκε ελαστικό προσομοίωμα με μέτρο διάτμησης $G = 23.56 \times 10^4$ kPa, μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K=31.31 \times 10^4$ 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 μέτρο διάτμησης $G=70.68 \times 10^4$ kPa και μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K= 93.93 \times 10^4$ kPa. Η διαπερατότητα του κεφαλόδεσμου επιλέχθηκε ίση με $k = 10^{-9}$ m/s (πρακτικώς αδιαπέρατος).

1. Για τησιμεντοποιημένη 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).
2. Για την 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 υπόλοιποι 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 $k=6.6 \times 10^{-5}$ m/s και το μέτρο συμπίεστικότητας του νερού ίσο με $K_w = 2 \times 10^6$ kPa.
 - Για σταθεροποιημένη στρώση, η διαπερατότητα επιλέχθηκε ίση με $k=4 \times 10^{-9}$ m/s (πρακτικώς αδιαπέρατη, αλλά περισσότερο διαπερατή από τη σιμεντοποιημένη στρώση βάσης) και το μέτρο συμπίεστικότητας του υγρού πόρων ίσο με K_w/n (στις περιπτώσεις που επελέγη να προσομοιωθεί μέσω αυτού η σταθεροποίηση).
3. Για τη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλων επιλέχθηκε γωνία τριβής $\delta=36^\circ$.
4. 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).
5. Οι παράμετροι επιλέχθηκαν με γνώμονα τη λογική και το αρχικό αποτέλεσμα. Ωστόσο ήταν σαφές ότι για αυτή την σιμεντοποιημένη 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 $k= 6.6 \times 10^{-6}$ 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 4, δηλαδή χρησιμοποιώντας τις δύο προσεγγίσεις που προαναφέρθηκαν και συγκεκριμένα:

- Τον επαναπροσδιορισμό των παραμέτρων της σταθεροποιημένης άμμου Nevada που προέκυψαν από το Κεφάλαιο 4.
- Τον επαναπροσδιορισμό των παραμέτρων της σταθεροποιημένης άμμου Nevada που προέκυψαν από το Κεφάλαιο 4 σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων $K= K_w/n$.

Τα παραπάνω αποτελέσματα που αφορούν την απόκριση του σταθεροποιημένου εδάφους συγκρίνονται πάντα με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση που έχει προκύψει από τη διδακτορική διατριβή της Agaroulalki (2017), δηλαδή:

(α) τη διατήρηση της της βαθμονόμησης του προσομοιωμάτος για φυσική άμμο Nevada

(β) τη σημαντική μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων $K= K_w/n$, με βάση τη σχέση 5.3.

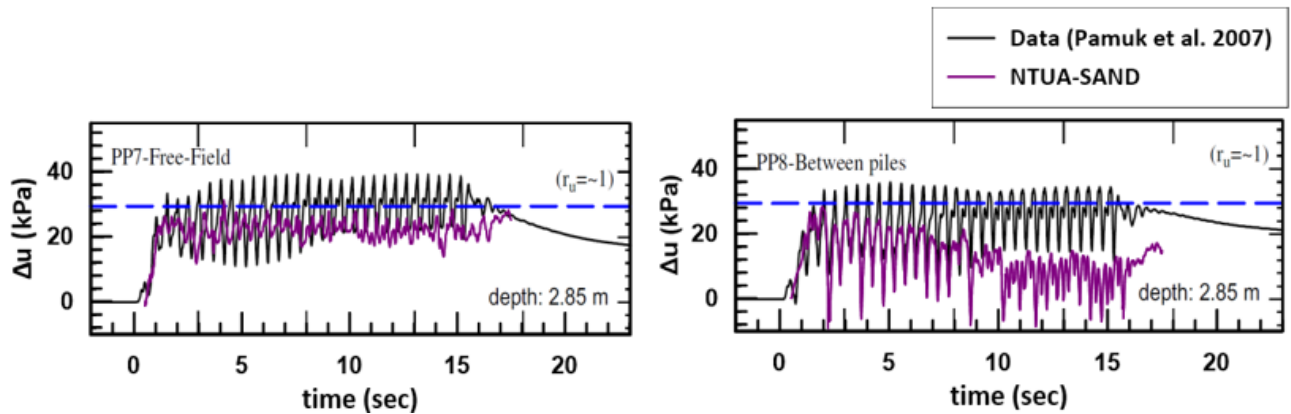
Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η διάταξη της δοκιμής (σε τομή), με τη θέση της πασσαλομάδας και των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήσαν οι Ramuk et al. (2007). Οι συγκρίσεις πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων γίνεται για συγκεκριμένα φυσικά μεγέθη, και σε επιλεγμένες θέσεις μετρητών. Ειδικότερα, η σύγκριση θα γίνει 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. Συγκεκριμένα:

- Για τις υπερπιέσεις πόρων λήφθηκαν τα αποτελέσματα των μετρητών PP7 και PP8 για τις αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις μακριά και εντός της περιοχής των πασσάλων αντίστοιχα. Οι μετρητές αυτοί αντιστοιχούν σε βάθος 2.85m περίπου, δηλαδή εντός της μεσαίας αμμώδους στρώσης.
- Για τις επιφανειακές οριζόντιες μετακινήσεις συγκρίνονται τα αποτελέσματα των επιφανειακών μηκυσιομέτρων LVDT-6 για τη μετακίνηση του ελεύθερου πεδίου και LVDT-1, LVDT-7 για τις μετακινήσεις του κεφαλόδεσμου (upslope και downslope αντίστοιχα).
- Για τις μετακινήσεις του εδάφους με το βάθος χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των μηκυσιομέτρων 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.

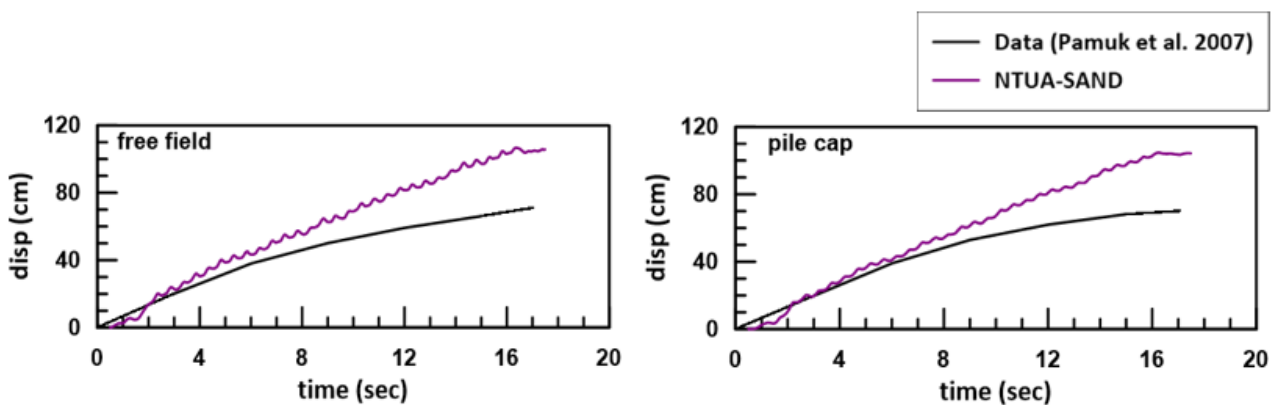
7.3 Προσομοίωση πλευρικής εξάπλωσης για τη δοκιμή πασσαλομάδας σε φυσική αμμώδη στρώση

Αρχικά γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης της δοκιμής των Ramuk 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 ειδικότερα στα Σχήματα 7.3, 7.4, 7.5 και 7.6 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. Στόχος είναι η εξακρίβωση και η επαλήθευση της αριθμητικής μεθοδολογίας για την περίπτωση της ρευστοποιήσιμης άμμου.

Σύμφωνα με το Σχήμα 7.3, 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 7.4 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.

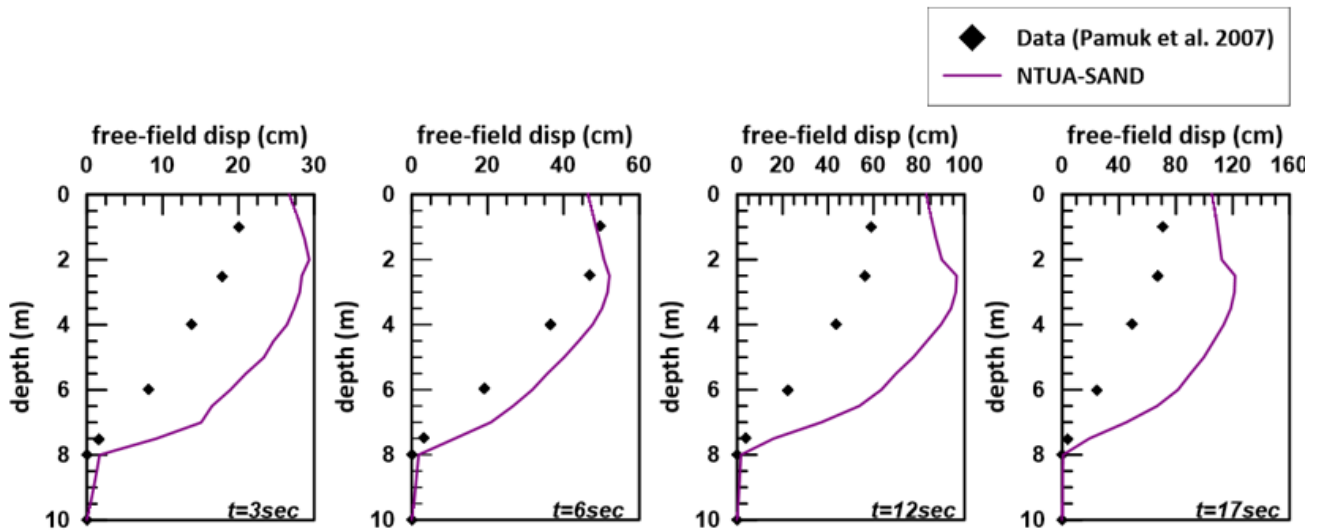


Σχήμα 7.3 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονοϊστορίες υπερπλίσεων πόρων εντός της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους.



Σχήμα 7.4 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.

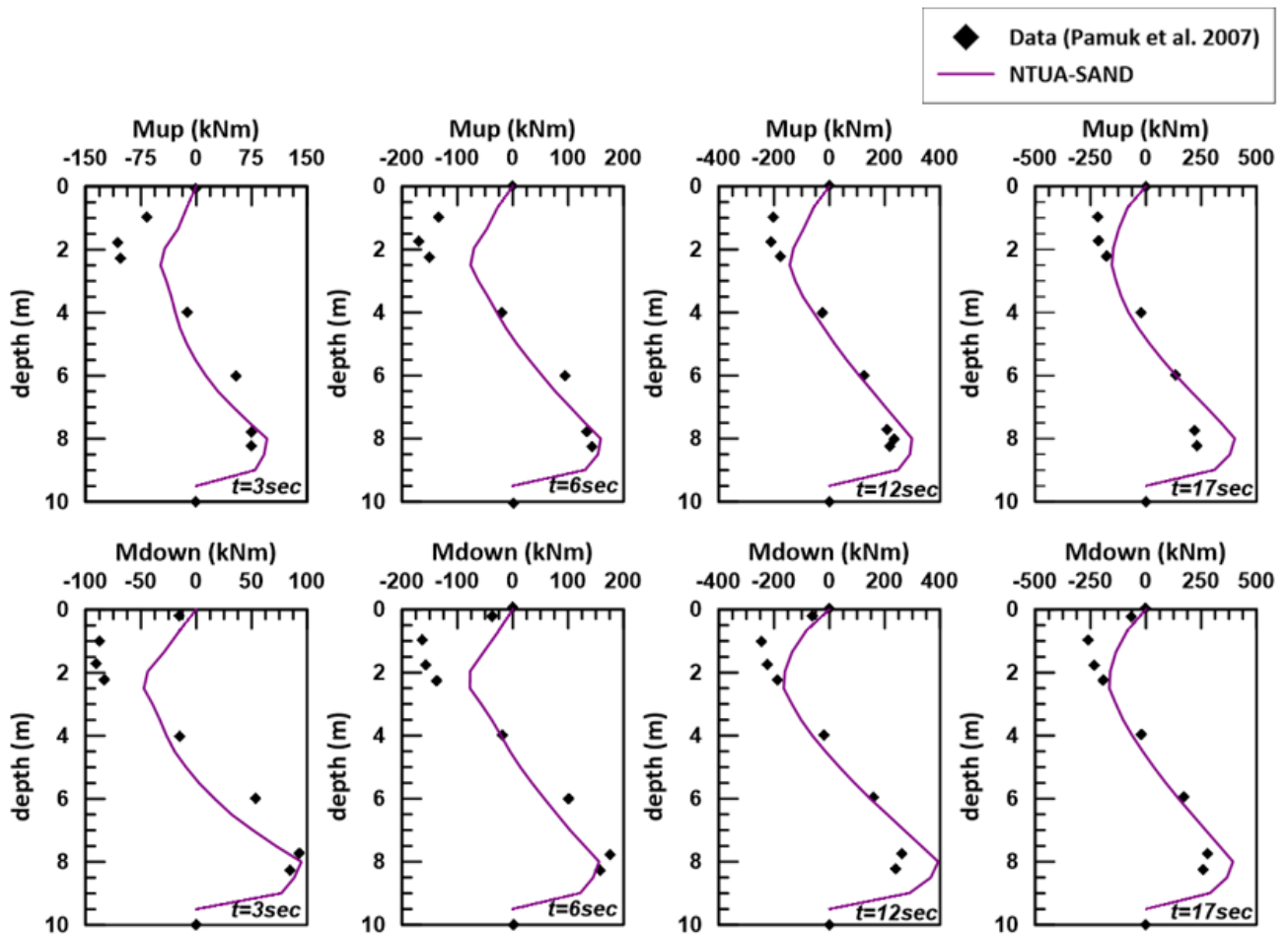
Σύμφωνα με το Σχήμα 7.5, η οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους οφείλεται πρακτικώς στη μετατόπιση της πλευρικά εξαπλωμένης αμμώδους στρώσης που ρευστοποιήθηκε και αυτό επιβεβαιώνεται σε όλα τα χρονικά στιγμιότυπα. Η αριθμητική ανάλυση επιβεβαιώνει αυτή τη μορφή παραμόρφωσης του εδάφους με 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 ποσοτικούς επιβεβαιώνεται η ικανοποιητική συμφωνία μέχρι το μέσο της διέγερσης (για $t = 3, 6$ sec) και η υπερεκτίμηση των μετατοπίσεων για χρόνους μεγαλύτερους των 8sec, που είχε διαπιστωθεί και στο Σχήμα 7.4



Σχήμα 7.5 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.

Τέλος, από το Σχήμα 7.6 προκύπτει ότι οι μεγάλες οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης οδηγούν και σε σημαντικές ροπές στους πασσάλους, ειδικά στη διεπιφάνεια της ρευστοποιημένης στρώσης με τις 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. Ειδικότερα, η μέγιστη ροπή στην άνω διεπιφάνεια υποεκτιμάται ελαφρώς στην αρχή της δόνησης, με την υποεκτίμηση να εξαλείφεται όσο προχωρά η δόνηση. Αντίθετα, η μέγιστη ροπή στην κάτω διεπιφάνεια προβλέπεται πολύ ικανοποιητικά στην αρχή της δόνησης, μα προκύπτει μια σχετική υπερεκτίμηση όσο προχωρά η δόνηση.

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

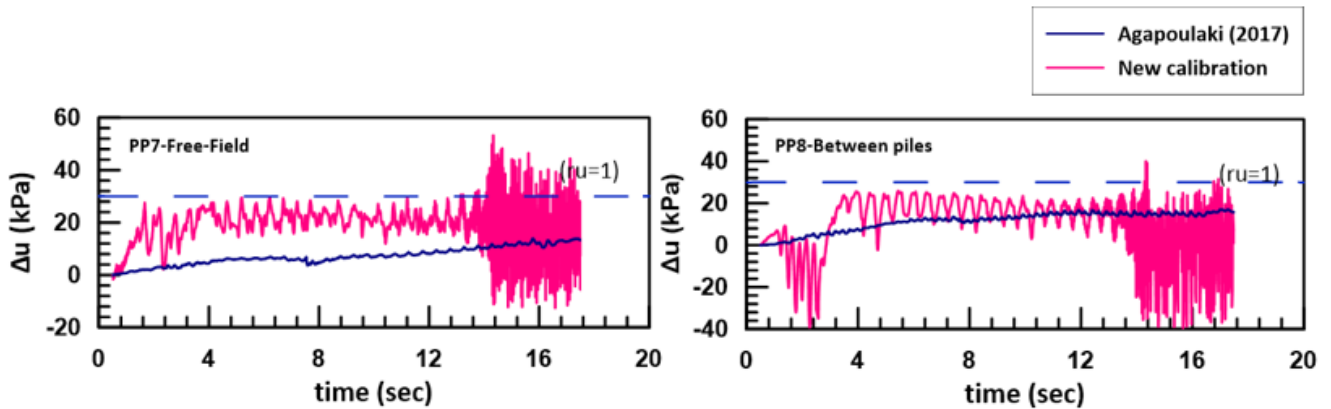


Σχήμα 7.6 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις καμπτικές ροπές των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη ρευστοποιήσιμη στρώση.

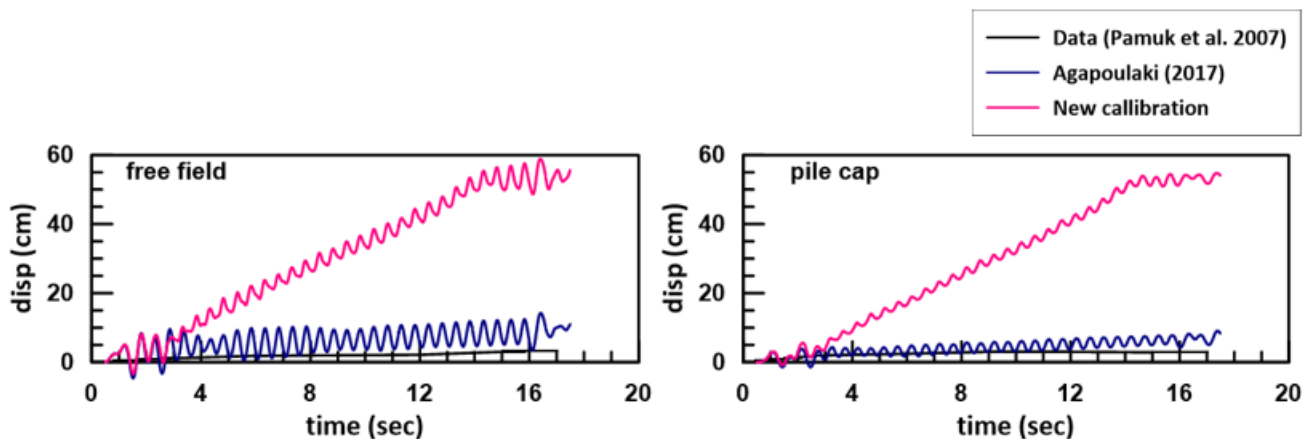
7.4 Προσομοίωση σταθεροποίησης αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος (Προσέγγιση 1)

Όπως και στα Κεφάλαια 5-6, 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 (Προσέγγιση 1) συνίσταται αποκλειστικά από την αναβαθμονόμηση του προσομοιώματος για σταθεροποιημένη άμμο Nevada, και συγκρίνεται με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση μέσω έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεσότητας του υγρού πόρων (Agaroulaki 2017). Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύγκριση των πειραματικών δεδομένων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για αυτή τη δοκιμή. Πιο συγκεκριμένα, στα Σχήματα 7.7, 7.8, 7.9 και 7.10 η σύγκριση πραγματοποιείται 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.

Από το Σχήμα 7.7, προκύπτει ότι η νέα μεθοδολογία προσομοίωσης αναπτύσσει μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων (μάλιστα με τοπικές εξάρσεις μεγαλύτερες από $r_u=1$) συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη. Σε κάθε περίπτωση δεν υπήρχαν μετρήσεις πιέσεων πόρων στο πείραμα με το σταθεροποιημένο έδαφος, οπότε η σύγκριση είναι σχετική. Πιο σημαντικά, σύμφωνα με το Σχήμα 7.8 προκύπτει ότι η νέα πρόβλεψη απέχει πολύ από τις μετρήσεις του πειράματος, καθώς εμφανίζει αρκετά μεγάλες οριζόντιες μετατοπίσεις. Συνεπώς, η καλύτερη προσομοίωση είναι αυτή της υπάρχουσας βέλτιστης προσέγγισης (Agaroulaki 2017).

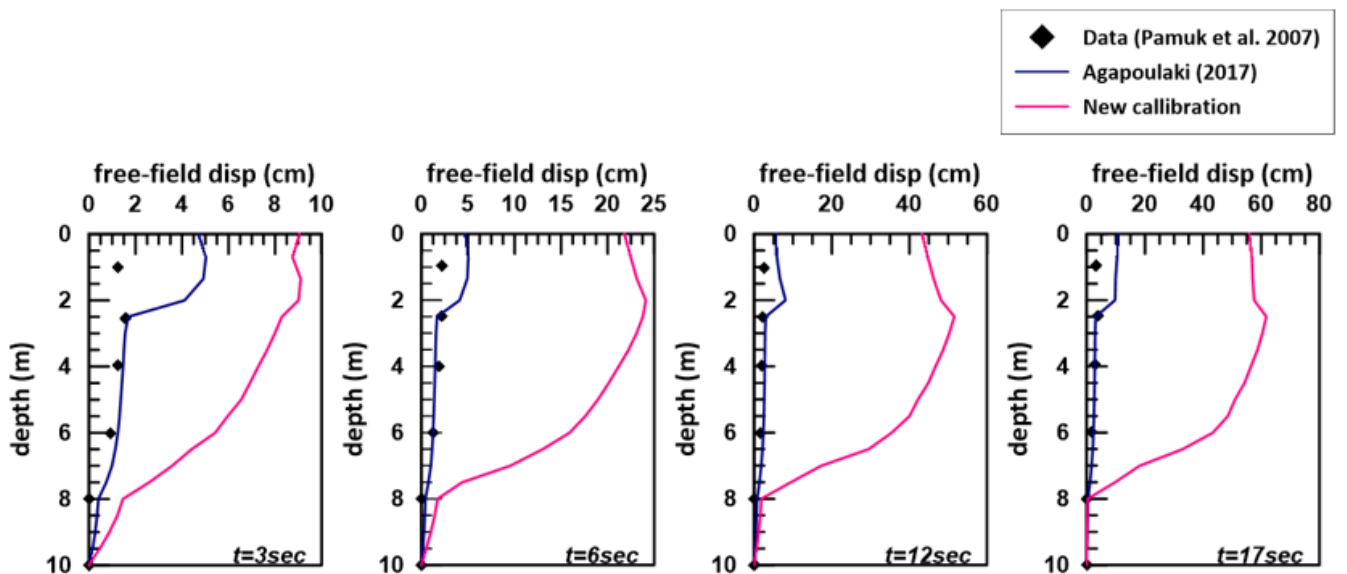


Σχήμα 7.7 Συγκριτικά διαγράμματα 2 αριθμητικών προσεγγίσεων για τις χρονοϊστορίες υπερπιέσεων πόρων εντός της σταθεροποιημένης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αντιστοιχούν στην Προσέγγιση 1 (αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada) και στην υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων $K=K_w/725$ (Agaroulaki 2017).



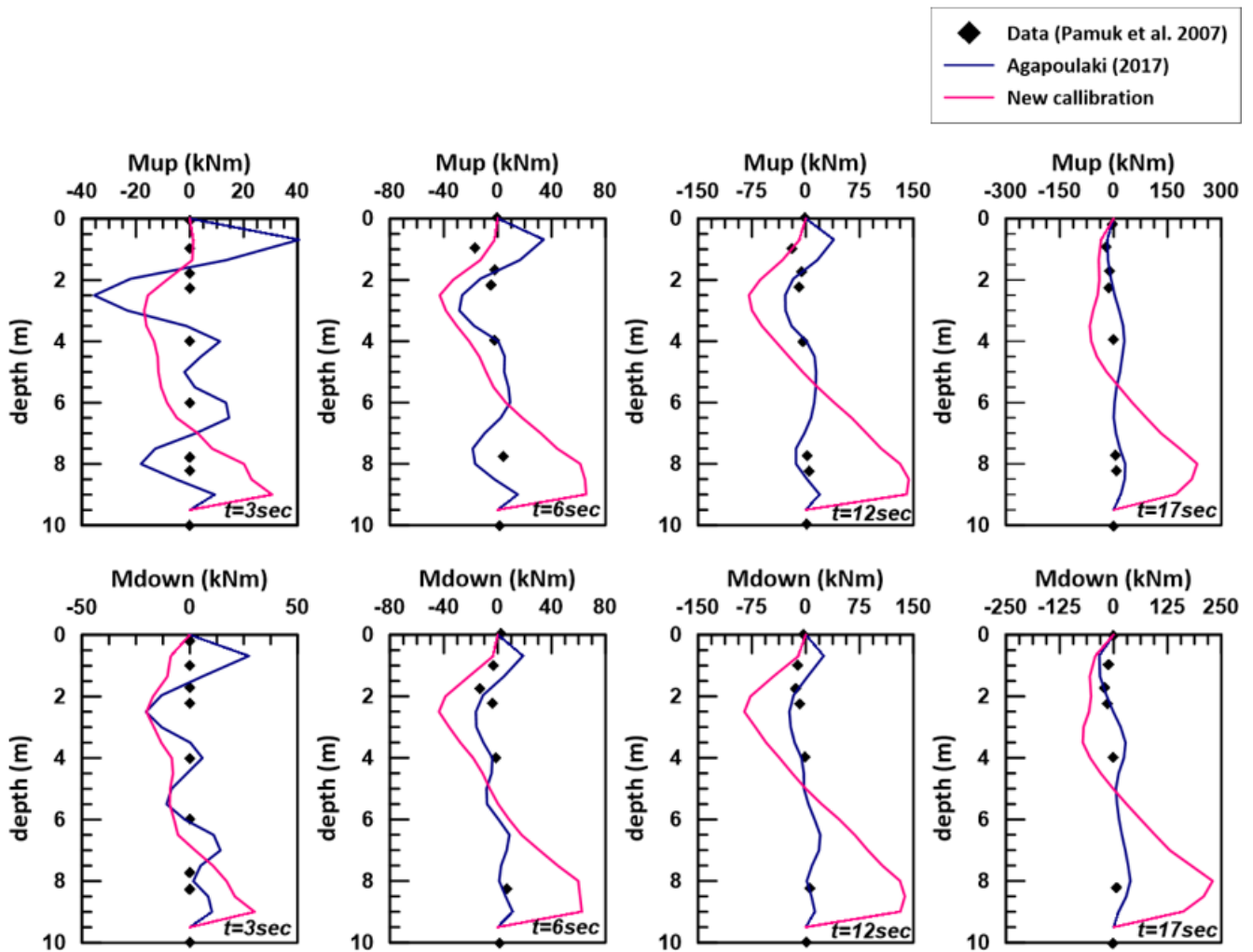
Σχήμα 7.8 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών προσεγγίσεων για τις χρονοϊστορίες οριζόντιων μετατοπίσεων επιφανείας, στο ελεύθερο πεδίο (free field) και επί του κεφαλόδεσμου (pile cap) αντίστοιχα, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αντιστοιχούν στην Προσέγγιση 1 (αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada) και στην υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπιεστότητας του υγρού των πόρων $K=K_w/725$ (Agaroulaki 2017)

Σύμφωνα με το Σχήμα 7.9, 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 προσεγγίσεις 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 κοντά στην επιφάνεια. Η νέα μεθοδολογία στα μικρά βάθη αποκλίνει αρκετά σε σύγκριση με τις μετατοπίσεις του πειράματος κάτι που δεν ισχύει για την υπάρχουσα βέλτιστη λύση, η οποία πέρα από την επιφάνεια πετυχαίνει μια αρκετά καλή προσομοίωση. Η ανωτέρω ποιοτική συμφωνία είναι σημαντική για την αξιοπιστία και των 2 αναλύσεων.



Σχήμα 7.9 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών προσεγγίσεων 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 αντιστοιχούν στην Προσέγγιση 1 (αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada) και στην υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού των πόρων $K=K_w/725$ (Agaroulaki 2017)

Τέλος, από το Σχήμα 7.10 προκύπτει ότι οι πολύ μικρές οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω σταθεροποίησης οδηγούν και σε ασήμαντες ροπές στους πασσάλους. Η υπάρχουσα βέλτιστη ανάλυση (Agaroulaki 2017) δίνει μικρότερες τιμές στις καμπτικές ροπές των πασσάλων λόγω σταθεροποίησης και μάλιστα αρκετά κοντά σε αυτές του πειράματος, συγκριτικά με την νέα μεθοδολογία η οποία υπερεκτιμά τις ροπές ως αποτέλεσμα των μεγάλων προβλεπόμενων μετακινήσεων. Συνολικά λοιπόν προκύπτει ότι η υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση (Agaroulaki 2017) είναι πιο ακριβής.



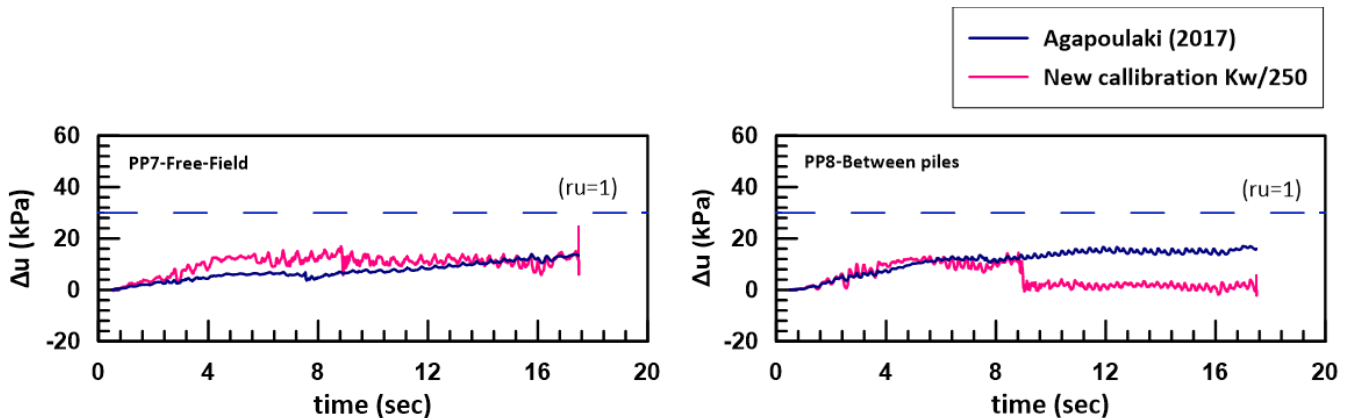
Σχήμα 7.10 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών προσεγγίσεων για τις καμπτικές ροπές των (ανάντη και κατάντη) πασσάλων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές της διέγερσης, για τη δοκιμή με τη σταθεροποιημένη στρώση. Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αντιστοιχούν στην Προσέγγιση 1 (αποκλειστικά με αναβαθμονόμηση της σταθεροποιημένης άμμου Nevada) και στην υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της έντονης μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων $K=K_w/725$ (Agapoulaki 2017).

7.5 Προσομοίωση σταθεροποίησης με συνδυασμό αναβαθμονόμησης προσομοιώματος και μείωσης του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού πόρων (Προσέγγιση 2)

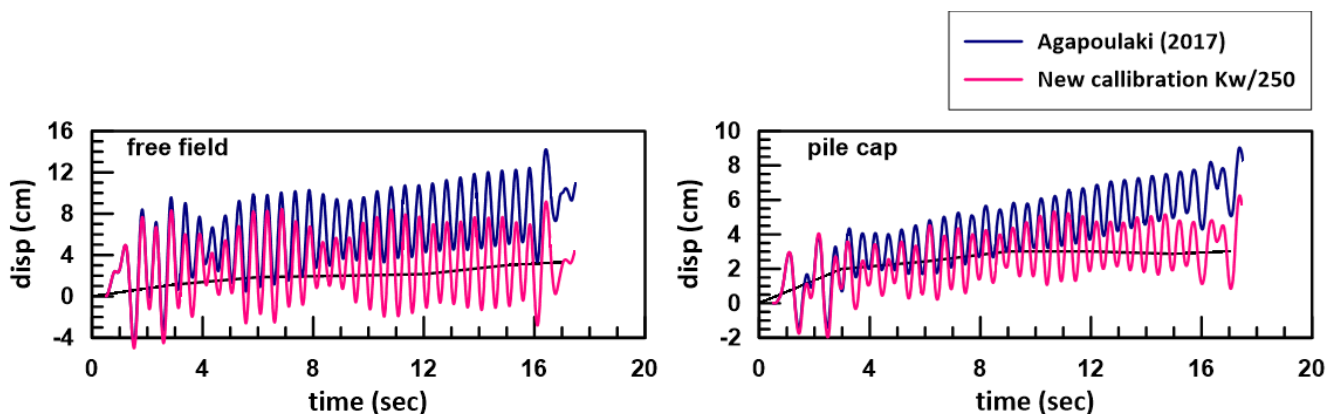
Όπως και στα Κεφάλαια 5 και 6, η δεύτερη προσομοίωση της σταθεροποίησης (Προσέγγιση 2) είναι ο συνδυασμός των δύο μεθοδολογιών, δηλαδή της αναβαθμονόμησης των παραμέτρων του NTUA-SAND για τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada (Κεφάλαιο 4) σε συνδυασμό με ελαφρά μείωση της συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων. Για την εν λόγω ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστικότητας του υγρού των πόρων K , για την τιμή της συγκέντρωσης κολλοειδούς πυριτιίας $CS=5\%$ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα των Pamuk et al. (2007), προκύπτει από τη σχέση 5.4 η τιμή 250 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 7.11, 7.12, 7.13 και 7.14 η σύγκριση γίνεται σε όρους ιστορικών

υπερπιέσεων πόρων, χρονιοιστοριών 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.

Από το Σχήμα 7.11 προκύπτει ότι η αμμώδης στρώση δε ρευστοποιείται και αυτό προβλέπεται και από τις 2 αριθμητικές αναλύσεις και μάλιστα οι αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις είναι κοντά σε αυτές της Agaroulaki (2017). Έπειτα, με βάση το Σχήμα 7.12 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. Η νέα προσέγγιση είναι ελαφρώς πιο ακριβής σε σχέση με την υπάρχουσα βέλτιστη (Agaroulaki 2017).

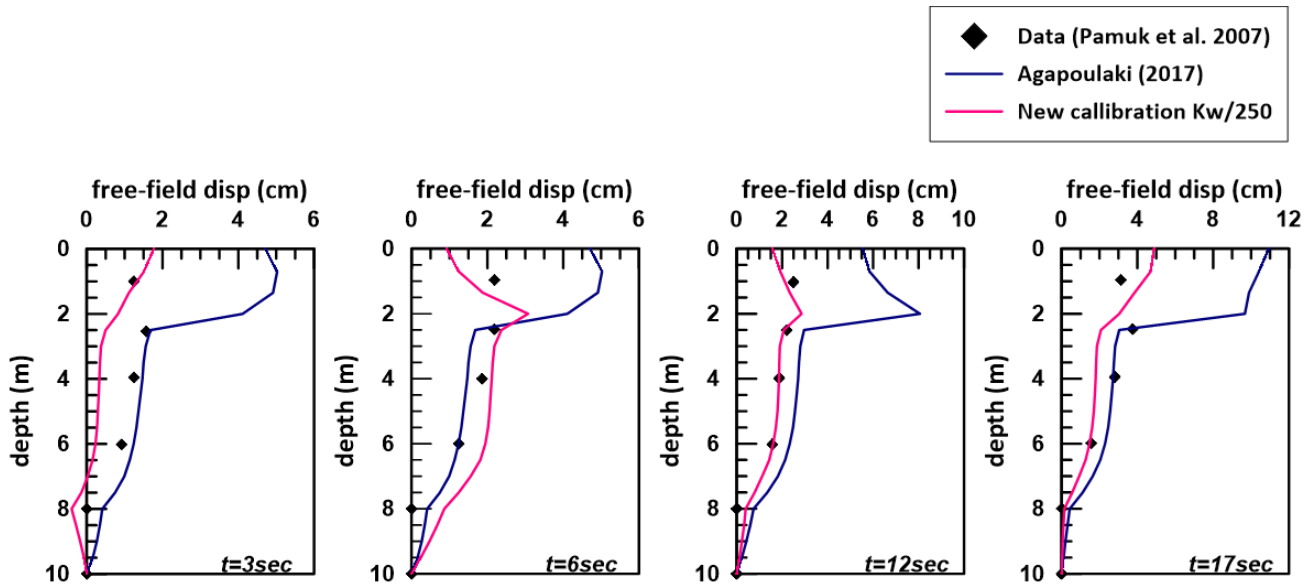


Σχήμα 7.11 Συγκριτικά διαγράμματα 2 αριθμητικών προσεγγίσεων για τις χρονιοιστορίες υπερπιέσεων πόρων εντός της σταθεροποιημένης στρώσης άμμου, στο ελεύθερο πεδίο και ανάμεσα στους πασσάλους (τα πειραματικά αποτελέσματα ($r_u=1$) αφορούν τη δοκιμή με τη ρευστοποιημένη στρώση άμμου, και παρουσιάζονται εδώ ενδεικτικά). Οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις αφορούν την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεσιμότητας του υγρού πόρων $K=K_w/250$ (Προσέγγιση 2) και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017).



Σχήμα 7.12 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις χρονιοιστορίες 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 την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεσιμότητας του υγρού πόρων $K=K_w/250$ (Προσέγγιση 2) και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017).

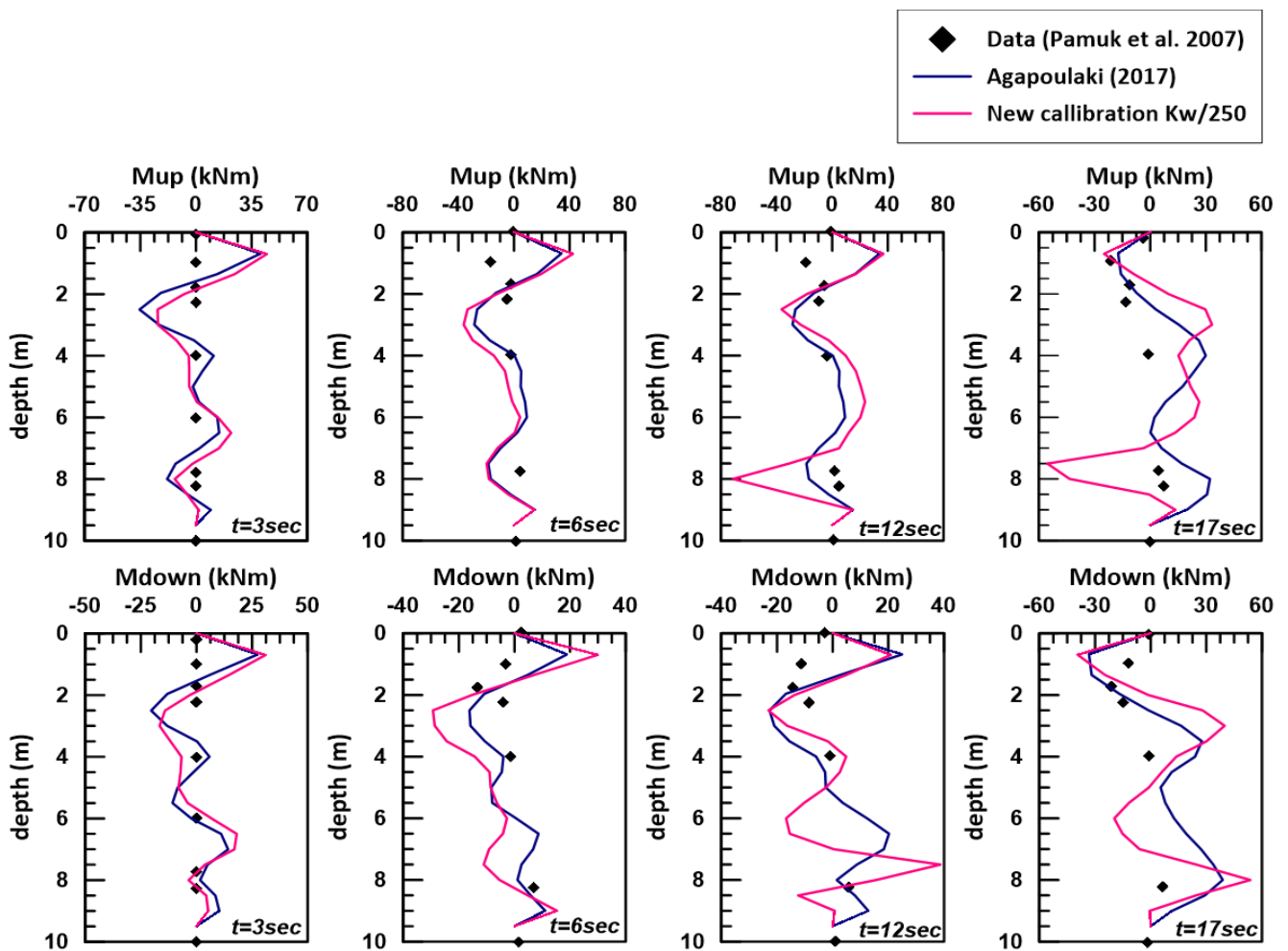
Σύμφωνα με το Σχήμα 7.13, και οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις επιβεβαιώνουν τις μικρές εδαφικές μετατοπίσεις, με την υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση να αποδίδει καλύτερα τις μετατοπίσεις της σταθεροποιημένης στρώσης αλλά να υπερεκτιμά την επιφανειακή μετατόπιση. Αντιθέτως, η νέα προσέγγιση προβλέπει ορθότερα τις επιφανειακές μετατοπίσεις και υπερεκτιμά ελάχιστα τις μετατοπίσεις στα μεγαλύτερα βάθη.



Σχήμα 7.13 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών προσεγγίσεων 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 την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεσιότητας του υγρού πόρων $K=K_w/250$ (Προσέγγιση 2) και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agapoulaki (2017).

Τέλος, από το Σχήμα 7.14 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, που είναι σαφώς μικρότερες εκείνων όταν η στρώση μένει μη-βελτιωμένη.

Συνεπώς, προκύπτει ότι και οι 2 αριθμητικές προσεγγίσεις 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 (Agapoulaki 2017), λόγω ακριβέστερης εκτίμησης των επιφανειακών μετατοπίσεων, αν και οι 2 προσεγγίσεις θα μπορούσαν να θεωρηθούν πρακτικώς ισοδύναμες για την εν λόγω δοκιμή φυγοκεντρική.



Σχήμα 7.14 Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων και 2 αριθμητικών προσεγγίσεων 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 την περίπτωση αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος της σταθεροποιημένης άμμου Nevada σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του μέτρου συμπίεσιότητας του υγρού πόρων $K=K_w/250$ (Προσέγγιση 2) και την υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agapoulaki (2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

8.1 Περίληψη – Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής απόκρισης αμμώδους εδάφους σταθεροποιημένου με κολλοειδή πυριτρία. Η νέα αυτή μεθοδολογία βασίζεται στο συνδυασμό αναβαθμονόμησης ενός καταστατικού προσομοιώματος που αφορά στον εδαφικό σκελετό και στην ελαφρά μείωση του μέτρου συμπίεστότητας του υγρού πόρων σε πλήρως συζευγμένες αριθμητικές αναλύσεις. Η ορθότητα και η ακρίβεια της εν λόγω μεθοδολογίας εξετάσθηκε με βάση μετρήσεις σε προβλήματα συνοριακών τιμών σταθεροποιημένα αμμώδη εδάφη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη αυτή.

Η νέα μεθοδολογία προσομοίωσης που προτείνεται προέκυψε εν μέρει από την επεξεργασία των πρόσφατων πειραματικών αποτελεσμάτων μιας σειράς μονοτονικών και ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών (σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά από σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτρία) των Pavloroulou and Georgiannou (2021). Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εν λόγω δοκιμών προέκυψαν η βαθμονόμηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31. Δυστυχώς οι διαθέσιμες δοκιμές φυγοκεντριστή έχουν εκτελεστεί σε άμμο Nevada και όχι σε άμμο M31, ενώ δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για τη σταθεροποιημένη άμμο Nevada σε επίπεδο μοναδιαίου στοιχείου που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για βαθμονόμηση. Από την άλλη, καθώς το διαθέσιμο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND έχει ήδη βαθμονομηθεί για φυσική άμμο Nevada, έγινε η παραδοχή μιας αναλογίας στην επίδραση της σταθεροποίησης στις παραμέτρους του προσομοιώματος, ώστε να εκτιμηθούν εμμέσως οι παράμετροι της σταθεροποιημένης άμμου Nevada, με βάση τη βαθμονόμηση στην άμμο M31.

Στη συνέχεια εκτελέσθηκαν παραμετρικές προσομοιώσεις προβλημάτων συνοριακών τιμών, προκειμένου να διακριβωθεί αν επαρκεί η ως άνω αναβαθμονόμηση που αφορά στον εδαφικό σκελετό, ή θα πρέπει να συμπληρωθεί με επέμβαση στο μέτρο συμπίεστότητας K του υγρού πόρων, καθώς υπάρχουν ενδείξεις Towhata (2018) και περιορισμένες μετρήσεις (Vranna et al. 2021) που δείχνουν μικρή μείωση του μέτρου K συγκριτικά με την τιμή K_w για το νερό. Για το σκοπό αυτό, έγινε χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών με τα λογισμικά FLAC και FLAC^{3D}. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν τρεις (3) σειρές δυναμικών δοκιμών φυγοκεντριστή, 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). Χάριν πληρότητας, εξετάσθηκε παραμετρικά η ακρίβεια προσομοίωσης με τις εξής μεθοδολογίες:

- A) η υπάρχουσα βέλτιστη μεθοδολογία προσομοίωσης (Agaroulaki 2017) που θεωρεί μεγάλη μείωση του μέτρου συμπίεστότητας $K = K_w/n$ (με $n \gg 1$), χωρίς αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος που αφορά στον εδαφικό σκελετό,
- B) η χρήση της αναβαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος λόγω σταθεροποίησης, χωρίς αλλαγή στην τιμή του K , που παραμένει ίση με K_w για το νερό (Προσέγγιση 1)
- Γ) ο συνδυασμός της ως άνω αναβαθμονόμησης του προσομοιώματος, με μέτρια μείωση του μέτρου συμπίεστότητας K συγκριτικά με την τιμή K_w (Προσέγγιση 2)

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτουν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Η υπάρχουσα βέλτιστη προσομοίωση (Agaroulaki 2017) 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, αποτελεσματική και αξιόπιστη προσέγγιση.

- Η Προσέγγιση 1 οδηγεί σε ποιοτικώς ορθά αποτελέσματα, αλλά υπάρχουν προβλήματα ποσοτικής ακρίβειας. Για παράδειγμα, η ρευστοποίηση καθυστερεί χρονικά αλλά δεν αποφεύγεται τελικώς σε κανένα από τα 3 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' ότι μετρήθηκε στα πειράματα. Έτσι συνολικά κρίνεται ότι αυτή η προσέγγιση υπολείπεται σε ακρίβεια της υπάρχουσας βέλτιστης προσέγγισης της Agaroulaki (2017). Δηλαδή, ενώ σε επίπεδο απόκρισης μοναδιαίου στοιχείου η αναβαθμονόμηση του προσομοιώματος φαίνεται να αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε ρευστοποίηση, σε επίπεδο απόκρισης συστήματος αυτή η αναβαθμονόμηση δε διαφαίνεται να επαρκεί.
- Η Προσέγγιση 2 οδηγεί και πάλι σε ποιοτικώς ορθά αποτελέσματα, αλλά και σε μικρή αύξηση της ποσοτικής ακρίβειας συγκριτικά με την υπάρχουσα βέλτιστη πρόταση της Agaroulaki (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 Agaroulaki (2017). Ειδικά για το πείραμα των Ramuk et al. (2007), αναφέρεται ότι η Προσέγγιση 2 αποδίδει τόσο τη σημαντικότερη μείωση 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 υπερτερεί σε σχέση με τις προβλέψεις της μεθοδολογίας της Agaroulaki (2017).

Διασαφηνίζεται εδώ ότι η ανεπάρκεια της Προσέγγισης 1 οφείλεται, εν μέρει τουλάχιστον, στο γεγονός ότι η αναβαθμονόμηση για την άμμο Nevada έγινε εμμέσως, καθώς δεν υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές μοναδιαίου στοιχείου σε σταθεροποιημένα δοκίμια της άμμου αυτής. Επιπλέον, υπογραμμίζεται ότι η τιμή του διαιρέτη n του μέτρου K στη μέθοδο της Agaroulaki (2017) κυρίως, και στην Προσέγγιση 2 δευτερευόντως, είναι πολύ μεγαλύτερη από τις λίγες υπάρχουσες μετρήσεις της συμπεριστασίας του υγρού πόρων με κολλοειδή πυριτία. Τέλος επισημαίνεται ότι η χρήση της Προσέγγισης 2 είναι δυσχερέστερη της υπάρχουσας βέλτιστης, καθώς χρειάζεται και αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος λόγω σταθεροποίησης για την άμμο των επιτόπου συνθηκών.

8.2 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. Στο πλαίσιο 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.

Η άρση αυτών των περιορισμών συνοψίζει τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Για παράδειγμα, για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία της αναβαθμονόμησης κρίνεται αναγκαία και η εκτέλεση δοκιμών μοναδιαίου στοιχείου (π.χ. τριαξονικές) στο ίδιο σταθεροποιημένο έδαφος που χρησιμοποιείται και σε δοκιμές φυγοκέντρισης. Μόνο έτσι η αναβαθμονόμηση θεωρείται ακριβής, και μόνο έτσι μπορεί να ελεγχθεί πραγματικά η ακρίβεια ή μη της Προσέγγισης 1. Επιπλέον, το ζήτημα της χρήσης $K = K_w/n$ με τιμές $n > 20-30$ είναι μια φαινομενολογική προσέγγιση του προβλήματος που μπορεί να βοηθάει στην ακρίβεια προσομοίωσης, αλλά δεν είναι συμβατό με τις λίγες υπάρχουσες μετρήσεις. Το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο στην υπάρχουσα βέλτιστη προσέγγιση της Agaroulaki (2017), καθώς η χρησιμοποιηθείσα αναβαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος στην Προσέγγιση 2 μετριάζει την τιμή του n , ο οποίος παραμένει σημαντικά μεγαλύτερος από τις τιμές της βιβλιογραφίας.

Βιβλιογραφία

- ✓ Agapoulaki G.I. and Papadimitriou A.G. (2018), Rheological Properties of Colloidal Silica Grout for Passive Stabilization Against Liquefaction. *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (10): 1-11.
- ✓ 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.
- ✓ 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
- ✓ Díaz-Rodríguez J.A., Antonio-Izarraras V.M., Bandini P. and López-Molina J.A. (2008), Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout. *Canadian Geotechnical Journal* 45(10): 1345–1355, <http://dx.doi.org/10.1139/T08-072>.
- ✓ Gallagher P.M. and 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(9–12): 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.M. and Bikos Z. (2017), Mechanical behaviour of sand stabilised with colloidal silica, *Geotechnical Research*, <http://dx.doi.org/10.1680/jgere.16.00017>
- ✓ Kolbuszewski J.J. (1948), An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sand. *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, 21-30 June 1948, 158-165.
- ✓ Moradi G. and S.Seyedi (2015), Effect of Sampling Method on Strength of Stabilized Silty Sands with Colloidal Nano Silica. *J.Civ.Eng.Res.*5 (6): 129-135.
- ✓ 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
- ✓ Pavlopoulou E.M , Georgiannou V.N. (2021), The effect of colloidal silica aqueous gel on the monotonic and cyclic response of sands, *Geotechnical Research* (under publication).

- ✓ Porcino D., Marciandò V. and Granata R. (2011), Undrained cyclic response of a silicate-grouted sand for liquefaction mitigation purposes. *Geomechanics and Geoengineering: an International Journal* 6(3): 155–170, <http://dx.doi.org/10.1080/17486025.2011.560287>.
- ✓ Porcino D., Marciandò V. and Granata R. (2012), Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand. *Canadian Geotechnical Journal* 49(10): 1117– 1133, <http://dx.doi.org/10.1139/T2012-069>.
- ✓ Αγαπουλάκη Γ.Ι. (2017), Παθητική Σταθεροποίηση εδαφών έναντι ρευστοποίησης: πειραματική διερεύνηση εισπρεσιμότητας 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 πυριτία, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- ✓ Τυπτηρής Ι. (2017), Αριθμητική προσομοίωση σεισμικής απόκρισης εδαφών και βαθιών θεμελιώσεων μετά από παθητική σταθεροποίηση έναντι ρευστοποίησης, Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.