



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

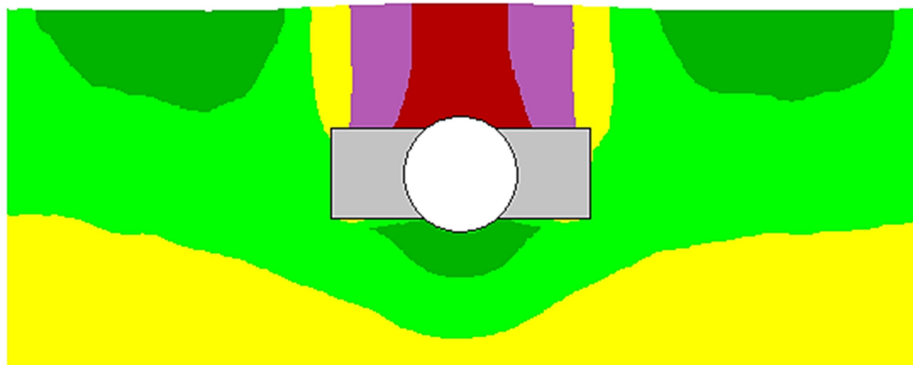
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΕΠΙΠΛΕΥΣΗΣ
ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Μαντώ Κυμπούρη

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



DIPLOMA THESIS

**PASSIVE STABILIZATION OF BURIED PIPELINES AGAINST UPLIFT DUE TO
SEISMIC LIQUEFACTION**

Manto Kypouri

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

Ιούλιος 2018 / July 2018

Με την παράδοση αυτής της εργασίας σηματοδοτείται και το τέλος των χρόνων μου ως φοιτήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και γι' αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που ήταν στο πλάι μου.

Πρώτα απ' όλα θέλω να ευχαριστήσω θερμά στους ανθρώπους που συνέβαλαν στη δημιουργία αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ, λοιπόν, τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, ο οποίος με τη μεθοδικότητα, την προθυμία και τις γνώσεις του με οδήγησε με σιγουριά στην ολοκλήρωση των σπουδών μου, μέσα από μια άψογη συνεργασία. Τον ευχαριστώ εξίσου και για όσα μου έμαθε ως καθηγητής όλα αυτά τα χρόνια πάνω στα θέματα της γεωτεχνικής μηχανικής, με την απίστευτη μεταδοτικότητα που τον διακρίνει. Ακόμη, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα Ταξιαρχούλα Λημναίου, όχι μόνο για την πολύτιμη βοήθειά της στο κομμάτι του λογισμικού, αλλά και για την υποστήριξη, την επιμονή και την υπομονή της από την αρχή μέχρι το τέλος αυτής της εργασίας.

Έπειτα θέλω να ευχαριστήσω με όλη μου την καρδιά και τους δικούς μου ανθρώπους. Αρχικά την υπέροχη οικογένειά μου, τους γονείς μου, Ελένη και Γιώργο, και τη μικρότερη αδερφή μου Αθανασία, οι οποίοι με στηρίζουν με όλη τους τη δύναμη σε κάθε μου βήμα και βοηθούν τα όνειρά μου να γίνονται πραγματικότητα. Στη συνέχεια, θέλω να πω ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στη αγαπημένη μου φίλη Ιωάννα, με την οποία εκτός από την ίδια τρέλα, τα ίδια όνειρα και τις ίδιες ανησυχίες, είχα την τύχη να μοιραστώ και την ίδια σχολή. Για το τέλος, ένα μεγάλο και ειλικρινές ευχαριστώ στην Πόπη, στις κοντινές μου φίλες Δήμητρα και Ράνια, αλλά και σε όλους αυτούς που ήταν δίπλα μου σ' αυτήν την προσπάθεια.

Μαντώ

Οι υπόγειοι αγωγοί αντιμετωπίζουν το φαινόμενο της ανύψωσης, και πιθανώς επίπλευσης, εξαιτίας ρευστοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους κατά τη διάρκεια έντονων σεισμικών διεγέρσεων. Ο κίνδυνος αυτός αφορά εγκιβωτισμό αγωγών σε κορεσμένα, χαλαρά μη συνεκτικά εδάφη για τα οποία ελλοχεύει ο κίνδυνος σεισμικής ρευστοποίησης. Ειδικά για την αποφυγή ανύψωσης λόγω ρευστοποίησης σε υφιστάμενους υπόγειους αγωγούς, ενδείκνυται η εκσκαφή και επανεπίχωση με μη-ρευστοποιήσιμα υλικά, ή η τοποθέτηση σταθεροποιητικών κατασκευών, στραγγιστηρίων, ή αγκυρώσεων. Μια εναλλακτική μέθοδος αποφυγής της ανύψωσης για υφιστάμενους αγωγούς αποτελεί η παθητική σταθεροποίηση του εδάφους γύρω από τον αγωγό με εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας, η χρήση της οποίας για το σκοπό αυτό έχει διερευνηθεί από τους Towhata et al. (2013). Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ταχεία εφαρμογή χωρίς απαίτηση εκσκαφής, ή διακοπή λειτουργίας του αγωγού.

Έτσι, στην εργασία αυτή έγινε αριθμητική διερεύνηση της παθητικής σταθεροποίησης ως μεθόδου αποφυγής της ανύψωσης, και βελτιστοποίηση της αναγκαίας ποσότητας κολλοειδούς πυριτίας χάριν μείωσης κόστους, με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (FLAC). Η ανάλυση έγινε ευχερώς με χρήση του υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος για άμμους NTUA-Sand (Andrianoopoulos et al. 2010a, b). Ως πρώτο βήμα, διερευνήθηκε η αξιοπιστία της αριθμητικής μεθοδολογίας μέσω σύγκρισης με το δυναμικό πρόβλημα φυγοκεντριστή των Chian et al. (2014) που αφορά σε υπόγειο αγωγό σε ρευστοποιήσιμο έδαφος μεγάλης έκτασης, και υπέδειξε ικανοποιητική ακρίβεια πρόβλεψης των πειραματικών αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η βαθμονομημένη αριθμητική μεθοδολογία έδειξε ότι ένας υπόγειος αγωγός σε καθεστώς ρευστοποίησης ανυψώνεται μόνο κατά τη διάρκεια της δόνησης, με το μέγεθος της τελικής ανύψωσης να αυξάνει με τη διάμετρο του αγωγού, τη διάρκεια, την ένταση και την περίοδο της διέγερσης, ενώ μειώνεται με το βάθος εγκιβωτισμού του σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία (π.χ. Marinatou et al. 2017). Επιπλέον υποδείχθηκε ότι για μικρά βάθη εγκιβωτισμού, η περιοχή πάνω από τον αγωγό δε ρευστοποιείται αλλά εμφανίζει μικρές υπερπιέσεις πόρων.

Η προσομοίωση της ύπαρξης της κολλοειδούς πυριτίας στο υγρό πόρων έγινε με απομείωση του μέτρου συμπίεστότητάς του (Andrianoopoulos et al. 2016, Αγαπουλάκη 2017) σε συζευγμένες δυναμικές αναλύσεις. Οι αριθμητικές αναλύσεις επιβεβαίωσαν ότι η παθητική σταθεροποίηση του εδάφους με χρήση κολλοειδούς πυριτίας βοηθάει στη μείωση της ανύψωσης του αγωγού υπό σεισμική διέγερση, καθώς μειώνονται οι υπερπιέσεις των πόρων στη γειτονιά του αγωγού. Βρέθηκε επίσης ότι η εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης είναι αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σε περιοχές με υψηλές τιμές λόγου υδατικών υπερπιέσεων, και συγκεκριμένα όταν $r_u > 0.5$. Συνεπώς, καθώς οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύσσονται πάνω από τον αγωγό είναι

Περίληψη

σημαντικά μικρότερες, η ανάγκη για σταθεροποίηση του εδάφους εμφανίζεται κυρίως πλευρικά και κάτω από τον αγωγό, σε αδρή συμφωνία με τα πειράματα του Towhata et al. (2013).

Παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις υπέδειξαν ότι θεωρώντας τη σταθεροποιημένη περιοχή ένα ορθογώνιο με ύψος L και πλάτος B , προκύπτει ανάγκη σχετικά μεγάλου εμβαδού A ($= 6.8 A_{\text{αγωγού}}$, όπου $A_{\text{αγωγού}}$ το εμβαδό της διατομής του αγωγού) ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απομείωση της ανύψωσης (που προκύπτει για σταθεροποίηση όλου του εδάφους). Ειδικότερα βρέθηκε ότι για αγωγούς με σχετικά μικρό λόγο εγκιβωτισμού, καθοριστικό ρόλο παίζει το πλάτος B , διότι διευρύνει την περιοχή των χαμηλών υπερπιέσεων πάνω από τον αγωγό, η οποία δρα σταθεροποιητικά γι' αυτόν. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη ύψους L περίπου ίσο με τη διάμετρο D του αγωγού (έτσι ώστε να τον καλύπτει πλευρικά) κρίνεται αναγκαία για την αποτελεσματική απομείωση της ανύψωσης.

Οι αναλύσεις υπέδειξαν επίσης ότι η μέθοδος παθητικής σταθεροποίησης γίνεται συγκριτικά πιο αποτελεσματική όταν μικραίνει η αναμενόμενη ανύψωση σε καθεστώς ρευστοποίησης, π.χ. για μικρούς ή βαθιά εγκιβωτισμένους αγωγούς, ή για μικρής έντασης διεγέρσεις. Αυτό το συμπέρασμα σχετίζεται και με τον τρόπο που προσομοιώνεται αριθμητικά η παθητική σταθεροποίηση, και όχι με την ίδια τη μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης που διαφαίνεται ποσοτικά πιο αποτελεσματική στα πειράματα (π.χ. Towhata et al. 2013) απ' ότι στις αριθμητικές αναλύσεις. Αυτό υποδεικνύει και ένα περιορισμό της παρούσας εργασίας, δηλαδή ότι οι αναλύσεις δεν έγιναν με εξειδικευμένο καταστατικό προσομοίωμα για σταθεροποιημένες άμμους, καθώς δεν υφίσταται κάποιο τέτοιο στη βιβλιογραφία. Άλλος περιορισμός είναι ότι οι αναλύσεις είχαν ως αφετηρία το δυναμικό πείραμα φυγοκεντριστή των Chian et al. (2014), και αφορούσαν μεγάλης διαμέτρου αγωγό και μεγαλο-περίοδη αρμονική διέγερση σε ένα ευρύ και βαθύ έδαφος (χωρίς τάφρο). Συνεπώς, τα συμπεράσματα που προέκυψαν θα πρέπει να επαληθευτούν για πιο συνήθεις αγωγούς, που υποβάλλονται σε ρεαλιστικές σεισμικές διεγέρσεις και βρίσκονται εγκιβωτισμένοι σε τάφρους. Σε κάθε περίπτωση, αναμένονται αποκλειστικά ποσοτικές και όχι ποιοτικές αλλαγές στα βασικά συμπεράσματα της εργασίας.

Buried pipelines face the hazard of uplift – and possibly floatation – due to soil liquefaction during strong seismic excitation. This hazard concerns pipelines embedded into saturated, loose non-cohesive soils, which are vulnerable to liquefaction. Particularly for the mitigation of liquefaction-induced uplift of existing pipelines, measures such as excavation and backfilling with non-liquefiable materials, installation of stabilizing structures or anchorage are usually prescribed. An alternative method for mitigating uplift of existing pipelines is the passive stabilization with colloidal silica of the soil surrounding the pipeline, an alternative that has been examined experimentally in the literature by Towhata et al. (2013). The major advantage of this method is its quick application without need of backfill excavation or stopping the pipeline operation.

For this purpose, this thesis presents a numerical investigation of passive stabilization against pipeline uplift and the optimization of the necessary amount of colloidal silica for reasons of cost reduction. The investigation was executed via the finite difference method (FLAC) and by employing the existing constitutive model for sands NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010a, b). Firstly, the reliability of the numerical methodology was investigated by comparing its results with the dynamic centrifuge test by Chian et al. (2014), an experiment related to a buried pipeline in liquefiable soil under seismic shaking, and satisfactory simulation of the experimental results was obtained. The parametric use of the calibrated numerical methodology indicated that a buried pipeline in liquefiable soil uplifts only during the seismic shaking. It also showed that uplift displacement seems to increase with pipe diameter, as well as with the duration, the intensity and the period of the seismic excitation, while it decreases with an increase of the embedment ratio, all in accordance with the literature (e.g. Marinatou et al. 2017). In addition, the analyses showed that for shallow embedment the area above the pipe does not liquefy but develops small excess pore pressures.

The simulation of colloidal silica in the sand pores is implemented via a decrease of the fluid bulk modulus when performing coupled dynamic analyses (Andrianopoulos et al. 2016, Agapoulaki 2017). Such numerical analyses verified that passive stabilization using colloidal silica in the area of the pipe reduces its uplift displacement under seismic excitation, since the excess pore pressures in the region of the pipe is reduced. It was also found that the application of passive stabilization is efficient only at locations where the excess pore pressure ratio is quite high, i.e. when $r_u > 0.5$. Consequently, given that excess pore pressures in the region above the pipe are rather small, the need for stabilization occurs mostly at the sides and below the pipe, in general accordance with the experimental findings of Towhata et al. (2013).

Parametric numerical analyses indicated that if the stabilized area is considered as a rectangular of height L and width B , a large value of area $A (= 6.8A_{\text{pipe}}$, where A_{pipe} stands for the area of the pipe) is required in order to achieve the maximum possible uplift reduction (which appears when all the liquefiable soil is stabilized). More specifically, it was found that for buried pipelines with a

Abstract

relatively low embedment ratio, it is useful to have a large width B of the stabilized region, since in this way the region of low excess pore pressures above the pipe becomes wider, thus further resisting the uplift. In any case, setting the height L of the stabilized region almost equal to the pipe diameter (so that the pipe is covered at its sides) is considered to necessary for an efficient uplift reduction.

Furthermore, the analyses showed that the method of passive stabilization is comparatively more efficient when the expected uplift due to liquefied soil is lower, e.g. for smaller or deeply embedded pipelines, or excitations of small intensity. This conclusion is related to the manner by which passive stabilization is simulated herein, since it seems to underestimate the effectiveness of the method in comparison to the experiments (e.g. Towhata et al. 2013). This also indicates a limitation of this thesis, i.e. that the analyses were not conducted via a dedicated constitutive model for stabilized sands since such model does not exist in literature so far. Another limitation of the thesis is that the performed analyses were based on the centrifuge test by Chian et al. (2014), that referred to a pipe of large diameter that was embedded in a wide and deep liquefiable layer (without trench) and underwent a large period harmonic excitation. As a consequence, the foregoing conclusions should also be verified for smaller diameter pipelines embedded in trenches filled with liquefiable soil, undergoing more realistic seismic excitations. However, it is believed that in such cases the differences in the conclusion will only be only quantitative and not qualitative.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Περίληψη	i
2. Abstract	iii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενικό πρόβλημα και στόχος εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας	2
2. Βιβλιογραφική Έρευνα	5
2.1 Ανύψωση υπόγειων αγωγών λόγω ρευστοποίησης εδάφους	5
2.1.1 Περιγραφή του φαινομένου ανύψωσης.....	5
2.1.2 Αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού αγωγών έναντι ανύψωσης.....	5
2.1.3 Πειράματα φυγοκεντριστή για την προσομοίωση της ανύψωσης αγωγών.....	8
2.1.4 Αριθμητικές αναλύσεις για την προσομοίωση της ανύψωσης αγωγών	9
2.2 Μέτρα αποφυγής της ανύψωσης υπόγειων αγωγών λόγω ρευστοποίησης εδάφους	10
2.2.1 Συνοπτική περιγραφή μεθόδων	10
2.2.2 Παθητική σταθεροποίηση ως μέθοδος αποφυγής της ανύψωσης	12
3. Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας	15
3.1 Γενικά.....	15
3.2 Αριθμητική Μεθοδολογία	15
3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC.....	15
3.2.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand	16
3.3 Σύγκριση με αποτελέσματα δοκιμής φυγοκεντριστή	20
3.3.1 Περιγραφή πειράματος φυγοκεντριστή.....	20
3.3.2 Περιγραφή και παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης	22
3.3.3 Σύγκριση αριθμητικών αναλύσεων με πειραματικά αποτελέσματα.....	27
4. Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος	29
4.1 Μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης σταθεροποίησης	29
4.2 Σεισμική απόκριση υπόγειου αγωγού σε πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος	30
4.2.1 Απόκριση αναφοράς σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.....	30
4.2.2 Απόκριση σε πλήρως σταθεροποιημένο και πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος.....	36
4.3 Αποτελεσματικότητα μερικής παθητικής σταθεροποίησης	38
4.4 Βελτιστοποίηση μερικής σταθεροποίησης	41
4.4.1 Αποτελεσματικότητα παθητικής σταθεροποίησης κάτω από τον αγωγό	41
4.4.2 Αποτελεσματικότητα παθητικής σταθεροποίησης πάνω από τον αγωγό	43

4.4.3	Αποτελεσματικότητα παθητικής σταθεροποίησης κάτω και πλευρικά του αγωγού	44
4.4.4	Επιλογή βέλτιστης γεωμετρίας εφαρμογής της παθητικής σταθεροποίησης.....	46
4.5	Συμπεράσματα - Σχόλια	50
5.	Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση	51
5.1	Γενικά.....	51
5.2	Επίδραση των παραμέτρων ενδιαφέροντος πριν από τη σταθεροποίηση.....	51
5.2.1	Επίδραση επιβαλλόμενης μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης.....	51
5.2.2	Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου σεισμικής διέγερσης.....	54
5.2.3	Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού	57
5.2.4	Επίδραση του λόγου εγκιβωτισμού του αγωγού	60
5.3	Επίδραση των παραμέτρων ενδιαφέροντος στην αποδοτικότητα της παθητικής σταθεροποίησης	62
5.3.1	Επίδραση των παραμέτρων της σεισμικής διέγερσης	62
5.3.2	Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού	64
5.4	Συμπεράσματα – Σχόλια	65
6.	Συμπεράσματα – Προτάσεις	67
6.1	Γενικά.....	67
6.2	Συμπεράσματα.....	67
6.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	68
7.	Βιβλιογραφία.....	70
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Αναλυτικά Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων	73

1.1 Γενικό πρόβλημα και στόχος εργασίας

Τα δίκτυα ύδρευσης – αποχέτευσης και οι αγωγοί μεταφοράς ενεργειακών πόρων, αποτελούν έργα Πολιτικού Μηχανικού ζωτικής σημασίας για την εξυπηρέτηση των αναγκών των πόλεων. Τα έργα αυτά είναι κατά κύριο λόγο υπόγεια και καλύπτουν συνολικά μεγάλες χιλιομετρικές αποστάσεις. Όταν πρόκειται για σεισμογενείς περιοχές, μια σοβαρή μορφή αστοχίας που κινδυνεύουν να αντιμετωπίσουν τέτοιου είδους κατασκευές είναι η ανύψωση και πιθανή ανάδυσή τους στην επιφάνεια λόγω ρευστοποίησης του εδάφους κατά τη σεισμική διέγερση.

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης αποτελεί αντικείμενο έρευνας της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, το οποίο μελετάται εκτενώς τα τελευταία χρόνια και αφορά τα κορεσμένα μη συνεκτικά εδάφη (χάλικες, αμμοχάλικα, άμμοι, ιλυώδεις άμμοι, μη πλαστικές ιλύες). Κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων με αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργού τάσης. Όταν αυτή μηδενιστεί, το έδαφος χάνει πολύ σημαντικό μέρος της διατμητικής αντοχή του και συμπεριφέρεται βραχυχρόνια σαν «παχύρευστο υγρό». Τυπικές συνέπειες της ρευστοποίησης είναι οι καθιζήσεις που οφείλονται στη διατμητική ταλάντωση και στη μετ' έπειτα αποτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων, οι αστοχίες θεμελιώσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης και η ανάδυση υπόγειων ελαφριών κατασκευών εξαιτίας φαινομένων άνωσης στο ρευστοποιημένο έδαφος. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορά στην τελευταία από τις ανωτέρω συνέπειες της ρευστοποίησης, δηλαδή στην ανύψωση των υφιστάμενων υπόγειων κατασκευών, και συγκεκριμένα αγωγών, μελετώντας τη λύση της παθητικής σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία ως μέτρο αντιμετώπισης του φαινομένου.

Σε νέες κατασκευές ο κίνδυνος της ανύψωσης λόγω ρευστοποίησης μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με τη λήψη μέτρων για βελτίωση του εν δυνάμει ρευστοποιήσιμου εδάφους κατά τη φάση της κατασκευής. Ωστόσο, κάτι τέτοιο είναι πρακτικά ανέφικτο για υφιστάμενα δίκτυα δεδομένης της έκτασης που καλύπτουν, ενώ θα απαιτούσε επιπλέον και τη διακοπή της λειτουργίας τους. Από την άλλη, οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται σήμερα για βελτίωση των εδαφών έναντι ρευστοποίησης σε υφιστάμενες κατασκευές περιλαμβάνουν σταθεροποιητικές κατασκευές, τοποθέτηση στραγγιστηρίων και εισπίεση ενέματος (grouting).

Σε μια εναλλακτική προσπάθεια αντιμετώπισης της ανύψωσης υπόγειων αγωγών και των επακόλουθων καταστροφικών συνεπειών (διαρροές και επιδράσεις τους, κόστος επισκευής κτλ.), εξετάζεται η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης, η οποία συνίσταται στην εισπίεση ενός σταθεροποιητή (κολλοειδούς πυριτίας) στο έδαφος, καθιστώντας το ανθεκτικό στη ρευστοποίηση. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η γρήγορη ολοκλήρωση των εργασιών και μάλιστα χωρίς την απαίτηση γενικής εκσκαφής και επανεπίχωσης διακόπτοντας τη λειτουργία των δικτύων. Πρόκειται για νέα μέθοδο, η οποία έχει δώσει θετικά αποτελέσματα στη μέχρι τώρα μελέτη της, καθώς δεν έχει ακόμη βρει πρακτική εφαρμογή μεγάλης έκτασης.

Έτσι, σκοπός της εργασίας αυτής είναι να ποσοτικοποιηθεί η απαιτούμενη έκταση του παθητικά σταθεροποιημένου εδάφους γύρω από τον αγωγό για την οποία επιτυγχάνεται ικανοποιητική μείωση της ανύψωσης, καθώς και η εύρεση της βέλτιστης λύσης ώστε η μέθοδος να είναι αποτελεσματική με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Περίληπτικά, οι επιμέρους εργασίες που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι οι ακόλουθες:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται οι δημοσιευμένες στη βιβλιογραφία εργασίες σχετικά με τα μέτρα που λαμβάνονται για τη αποτροπή ανύψωσης υφιστάμενων υπόγειων αγωγών λόγω ρευστοποίησης. Επιπλέον, μελετάται η σχετική βιβλιογραφία για τη μελέτη της παθητικής σταθεροποίησης ως μεθόδου βελτίωσης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης για διαφόρων ειδών κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων και των υπόγειων αγωγών.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται αναλυτικά η αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του φαινομένου της ανύψωσης υπόγειων αγωγών και γίνεται αναφορά στις παραδοχές που υιοθετήθηκαν. Η αξιολόγηση της αριθμητικής μεθοδολογίας γίνεται σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του πειράματος φυγοκεντριστή των Chian et al. (2014) που αφορά αγωγό σε ρευστοποιήσιμο έδαφος και αποτελεί την ανάλυση αναφοράς έναντι της οποίας θα μελετηθεί η βελτίωση της απόκρισης.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης της παθητικής σταθεροποίησης, σύμφωνα με τη διδακτορική διατριβή της Αγαπουλάκη (2017), καθώς και η σεισμική απόκριση του αγωγού εντός πλήρως σταθεροποιημένου εδάφους. Στη συνέχεια, ερευνάται η αποτελεσματικότητα της μερικής σταθεροποίησης και ποσοτικοποιείται η βέλτιστη γεωμετρία παθητικής σταθεροποίησης γύρω από τον αγωγό.

Στο **Κεφάλαιο 5** διερευνάται η επίδραση των χαρακτηριστικών της διέγερσης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού στην αποτελεσματικότητα της σταθεροποίησης του εδάφους στην περιοχή του αγωγού.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται αντικείμενα μελλοντικής έρευνας σχετικά με το θέμα της.

2.1 Ανύψωση υπόγειων αγωγών λόγω ρευστοποίησης εδάφους

2.1.1 Περιγραφή του φαινομένου ανύψωσης

Ένα έδαφος το οποίο έχει ρευστοποιηθεί συμπεριφέρεται αδρά σαν «παχύρευστο» υγρό, διότι οι κόκκοι του δε βρίσκονται εντελώς σε επαφή και ο εδαφικός σκελετός έχει χάσει τη δομή του. Έτσι, αν μέσα στη ρευστοποιημένη ζώνη βρίσκεται μια εγκιβωτισμένη κατασκευή με ειδικό βάρος μικρότερο του ειδικού βάρους του ρευστοποιημένου εδάφους, αυτή θα αρχίσει να ανυψώνεται λόγω της άνωσης που υφίσταται από το περιβάλλον έδαφος. Επιπλέον, οι αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων συνεπάγονται μείωση της ενεργού τάσης και κατά συνέπεια της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Η μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους διευκολύνει σημαντικά την ανύψωση της κατασκευής, η οποία τελικά δεν είναι απίθανο να αναδυθεί στην επιφάνεια. Τέτοιες «ελαφριές» κατασκευές αποτελούν και οι υπόγειοι αγωγοί – μεταφοράς λυμάτων, παροχής νερού, ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμων (πετρελαίου ή φυσικού αερίου) – η απόκριση των οποίων μελετάται στην παρούσα εργασία. Η τελική ανύψωση του αγωγού επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με το λόγο εγκιβωτισμού του αγωγού, δηλαδή το λόγο που προκύπτει ως το βάθος τοποθέτησης του άξονα του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους, προς τη διάμετρό του, αλλά και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης.

2.1.2 Αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού αγωγών έναντι ανύψωσης

Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της ανύψωσης υπόγειων κατασκευών εξαιτίας ρευστοποίησης του εδάφους έχουν προταθεί από τους O'Rourke and Liu (2012) και Sasaki and Tamura (2004). Οι πρώτοι προτείνουν τον υπολογισμό της μέγιστης ανύψωσης μέσω της ακόλουθης σχέσης, η οποία βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας:

$$A\delta_{\max}^3 + 16 \cdot I \cdot \delta_{\max}^3 = \frac{16 \cdot P_{\text{uplift}} \cdot W_s^4}{E\pi^5} \quad 2.1$$

Όπου:

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική έρευνα

δ_{max} η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού

A το εμβαδό της τομής του αγωγού

I η ροπή αδράνειας του αγωγού

W_s^4 η απόσταση των διαδοχικών στηρίξεων κατά μήκος του αγωγού

E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού

P_{uplift} η δύναμη άνωσης ανά μονάδα μήκους που δρα στον αγωγό εντός του ρευστοποιημένου στρώματος και προτείνεται να υπολογίζεται κατά τους Hou et al. (1990), από τη σχέση:

$$P_{uplift} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (\gamma_{soil} - \gamma_{contents}) - \pi \cdot D \cdot t \cdot \gamma_{pipe} \quad 2.2$$

Όπου:

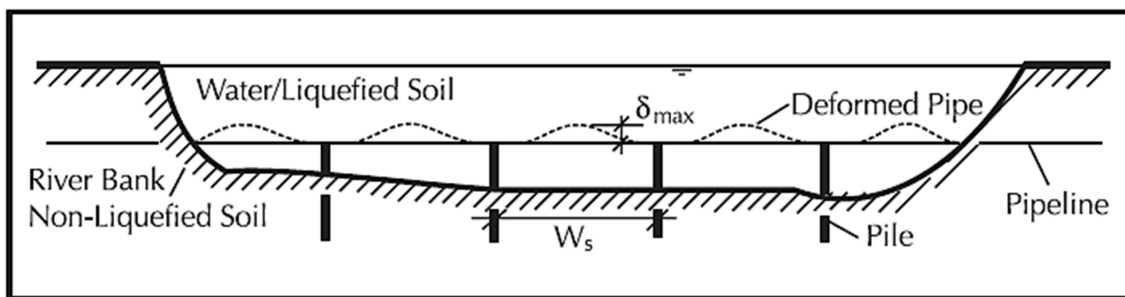
γ_{soil} το ειδικό βάρος του ρευστοποιήσιμου εδάφους

$\gamma_{contents}$ το ειδικό βάρος του περιεχόμενου του αγωγού (π.χ. αέριο, νερό κτλ.)

γ_{pipe} το ειδικό βάρος του αγωγού

t το πάχος του αγωγού

D η διάμετρος του αγωγού



Σχήμα 2.1: Παραμόρφωση υπόγειου αγωγού εντός ρευστοποιημένης ζώνης (O'Rourke and Liu 2012)

Οι Sasaki and Tamura (2004), βασιζόμενοι σε πειράματα φυγοκεντρική μίμωσαν τη διαφορική εξίσωση της κατακόρυφης κίνησης μιας υπόγειας κατασκευής υπό δυναμική φόρτιση που προκαλεί ρευστοποίηση στο έδαφος, θεωρώντας ότι η δύναμη αντίστασης από το περιβάλλον

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική έρευνα

έδαφος είναι ανάλογη της ταχύτητας ανύψωσης του αγωγού. Η επίλυση της εξίσωσης αυτής δίνει την παρακάτω αναλυτική σχέση υπολογισμού της ανύψωσης του αγωγού:

$$x = \frac{[\{\rho_t h_w + \rho_{sat}(h_0 - h_w)\}b - M]g}{\rho_{sat} b g} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-\rho_{sat} g b}{c} t\right) \right\} \quad 2.3$$

h_w το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τον Υ.Ο

h_0 το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τη βάση της κατασκευής

M το συνολικό βάρος της κατασκευής και του υπερκείμενου εδάφους

b το πλάτος της κατασκευής

C συντελεστής αντίστασης του εδάφους στην κίνηση της κατασκευής, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά από τα αποτελέσματα των πειραμάτων φυγοκεντρική βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$C [Mgr/m \cdot s] = 50.000 b [m] \cdot \left(\frac{b}{h_b} + 1\right) \cdot \left(\frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2\sigma'_h}\right)^{0.5} \cdot CRR \cdot FS_L^{1.5} \quad 2.4$$

Όπου:

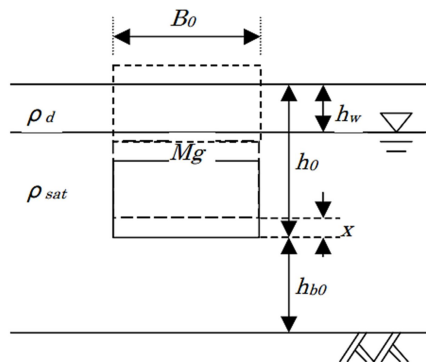
h_b η απόσταση από τη βάση της κατασκευής ως το τέλος του ρευστοποιήσιμου στρώματος

σ'_v η κατακόρυφη ενεργός τάση στον πάτο της κατασκευής

σ'_h η οριζόντια ενεργός τάση στον πάτο της κατασκευής

CRR ο κανονικοποιημένος λόγος της αντίστασης σε ρευστοποίηση

FS_L ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης



Σχήμα 2.2: Μοντέλο υπολογισμού της ανύψωσης υπόγειας κατασκευής υπό δυναμική φόρτιση εξαιτίας ρευστοποίησης του εδάφους (Sasaki and Tamura 2004)

2.1.3 Πειράματα φυγοκεντριστή για την προσομοίωση της ανύψωσης αγωγών

Οι Chian et al. (2014) πραγματοποίησαν πειράματα σε φυγοκεντριστή για άμμο τύπου Hostun (με σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$) με σκοπό την προσομοίωση των φαινομένων ανύψωσης υπόγειων αγωγών σε σχετικά μικρά βάθη. Επιπλέον, πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις για την προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων, με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος των Wang et al. (1990). Το πείραμα των Chian et al. (2014) επικεντρώνεται στη διερεύνηση της ανύψωσης του αγωγού για διαφορετικά βάθη εγκιβωτισμού, καθώς και στην επιρροή του μεγέθους της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα για να καλύψουν την επιρροή των δύο παραμέτρων. Οι λόγοι εγκιβωτισμού που εξετάστηκαν ήταν $H/D=1.1$ και $H/D=1.5$, όπου το H αναφέρεται στην απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους έως τον άξονα του αγωγού, και αντίστοιχα οι μέγιστες επιταχύνσεις της διέγερσης βάσης ήταν $a_{max}=0.22g$ και $a_{max}=0.10g$. Μια σύνοψη των πειραμάτων φαίνεται στον **Πίνακας 2.1**.

Πίνακας 2.1: Βασικά χαρακτηριστικά πειραμάτων φυγοκεντριστή των Chian et al. (2014)

a_{max} (g)	H/D
0.22	1.1
0.22	1.5
0.10	1.5

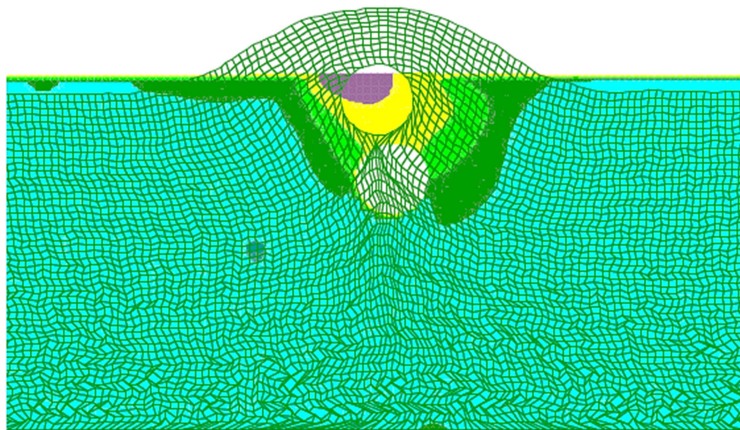
Λεπτομέρειες επί των πειραμάτων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3, όπου γίνεται και η αριθμητική τους προσομοίωση. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν εδώ τα βασικά συμπεράσματα του πειράματος που παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- i. Για μικρότερο βάθος εγκιβωτισμού παρατηρείται μεγαλύτερη ανύψωση του αγωγού, λόγω χαμηλότερης διατμητικής αντίστασης και μικρότερου φορτίου από το υπερκείμενο έδαφος, το οποίο δρα σταθεροποιητικά για τον αγωγό.
- ii. Για μεγαλύτερη επιτάχυνση της διέγερσης βάσης παρατηρείται μεγαλύτερη ανύψωση του αγωγού.
- iii. Η ανύψωση απαιτεί ταυτόχρονα την ύπαρξη υψηλών υπερπιέσεων πόρων και μεγάλων τιμών επιταχύνσεων και για τον λόγο αυτό σταματάει με το πέρας της διέγερσης, κι αν μην έχουν προλάβει να αποτονωθούν οι υπερπιέσεις.

- iv. Κοντά στην κατασκευή παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές υπερπιέσεων απ' ότι στο ελεύθερο πεδίο, το οποίο πιθανόν οφείλεται στην ευεργετική επίδραση του αγωγού και στην τοπική μείωση των επιταχύνσεων.

2.1.4 Αριθμητικές αναλύσεις για την προσομοίωση της ανύψωσης αγωγών

Οι μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της ανύψωσης των αγωγών υποθέτουν ότι κατά τη ρευστοποίηση το κορεσμένο έδαφος μετατρέπεται σε ένα «παχύρευστο» υγρό με μηδενική διατμητική αντίσταση, όμως κοντά στην περιοχή του αγωγού δε συμβαίνει το ίδιο. Οι Marinatou et al. (2017), βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του πειράματος των Chian et al (2014), διερεύνησαν την περιοχή γύρω από τον αγωγό και κατέδειξαν πως δε ρευστοποιείται πλήρως. Οι αναλύσεις τους, για τις οποίες έκαναν χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand (Andrianopoulos et al. 2010a,b), υποδεικνύουν ότι πάνω από τον αγωγό δημιουργείται μια επιφάνεια μορφής ανεστραμμένου τραπεζίου, η οποία διατηρεί σημαντικό ποσοστό της διατμητικής αντοχής του εδάφους συμβάλλοντας θετικά στην αντίσταση έναντι ανύψωσης του αγωγού (**Σχήμα 2.3**). Πιο συγκεκριμένα, πάνω από την στέψη του αγωγού παρατηρούνται αρκετά χαμηλότερες τιμές υπερπιέσεων στο αρχικό στάδιο της διέγερσης σε σύγκριση με την περιοχή πλευρικά του αγωγού και κάτω από αυτόν, οι οποίες έπειτα μειώνονται τείνοντας στο μηδέν καθώς η διέγερση συνεχίζεται. Αυτό πιθανώς οφείλεται, σύμφωνα με τους συγγραφείς, σε ταχύτερη στράγγιση πάνω από τον αγωγό ή/και σε αυξημένη διαστολικότητα του εδάφους στην περιοχή αυτή, λόγω των χαμηλότερων τάσεων που επικρατούν. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η ανύψωση του αγωγού ουσιαστικά σταματάει με το πέρας της σεισμικής διέγερσης παρόλο που οι υπερπιέσεις πόρων δεν έχουν ακόμα εκτονωθεί, γεγονός που σημαίνει ότι αυτή εξαρτάται καθαρά από τη διέγερση και όχι μόνο από τις ανωστικές δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό, λόγω των διαφορετικών πιέσεων πάνω και κάτω από αυτόν.



Σχήμα 2.3: Περιγράμματα λόγω υπερπιέσεων πόρων εδάφους στην περιοχή υπόγειου αγωγού

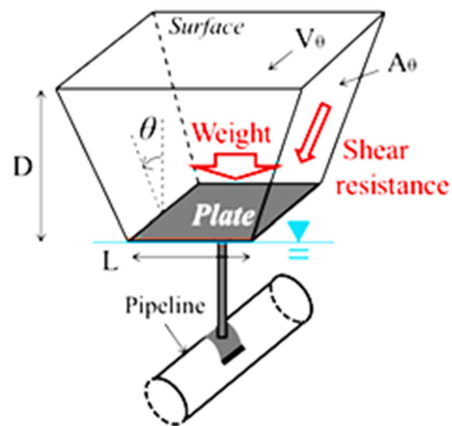
2.2 Μέτρα αποφυγής της ανύψωσης υπόγειων αγωγών λόγω ρευστοποίησης εδάφους

2.2.1 Συνοπτική περιγραφή μεθόδων

Η ανύψωση των αγωγών λόγω της ρευστοποίησης μπορεί να επιφέρει αλλαγή στην κλίση του αγωγού και περιμετρικές ρωγμές, αλλά και αστοχία των συνδέσμων. Αυτές οι ζημιές μπορεί αν προκαλέσουν απώλεια πίεσης ή/και διαρροή του μεταφερόμενου υγρού ή αερίου. Μια μέθοδος αποφυγής της ανύψωσης σε υφιστάμενους αγωγούς είναι η εκσκαφή κι επανεπίχωση με εδαφικό υλικό ενισχυμένο με τσιμέντο, μέθοδος που έχει αξιολογηθεί επιτυχώς σε πραγματικά περιστατικά. Ωστόσο, η διαδικασία που απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου είναι αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα, ενώ η εκσκαφή του υλικού αυτού για συντήρηση του αγωγού είναι αρκετά δύσκολη.

Πιο ευέλικτες μέθοδοι που απαιτούν περιορισμένη ή και καθόλου εκσκαφή είναι αυτές που ακολουθούν (Otshubo et al. 2016):

- i. Μηχανική συγκράτηση με κατάλληλη κατασκευή κερατοειδούς σχήματος (**Σχήμα 2.4**), η οποία συνδέει τον αγωγό με την επιφάνεια του εδάφους και μεταφέρει τη δύναμη ανύψωσης από τον αγωγό στην επιφάνεια μέσω ενός κατακόρυφου στύλου και μιας πλάκας στο άνω μέρος της κατασκευής, που συμπεριφέρεται σαν ανεστραμμένο επιφανειακό θεμέλιο.

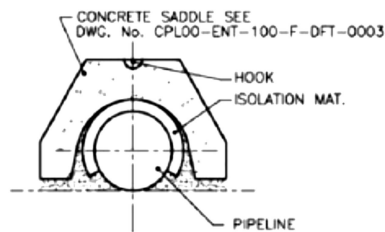


Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση κερατοειδούς κατασκευής άνωθεν υφιστάμενου αγωγού

- ii. Τοποθέτηση σωλήνων στράγγισης σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους ώστε να επιτυγχάνεται ροή μέσα από αυτούς βοηθώντας στη γρήγορη αποτόνωση των αναπτυσσόμενων υπερπίεσεων πόρων περί τον αγωγό.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική έρευνα

- iii. Εισαγωγή πλαστικού αγωγού-θήκης μέσα στον υφιστάμενο αγωγό με σκοπό την αποφυγή εισροής ρευστοποιημένης άμμου σε περίπτωση αστοχίας του τελευταίου. Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται για αγωγούς υψηλών πιέσεων.
- iv. Τοποθέτηση σταθεροποιητικής κατασκευής από σκυρόδεμα πάνω από τον αγωγό, η οποία αυξάνει μεν σημαντικά το ισοδύναμο βάρος του αγωγού (**Σχήμα 2.5**), όμως πιθανώς να οδηγήσει σε καθιζήσεις (το ανάποδο πρόβλημα).



Σχήμα 2.5: Σταθεροποιητική κατασκευή από σκυρόδεμα περί τον υφιστάμενο αγωγό

- v. Χρήση αγκυρίων, η οποία εξασφαλίζει αύξηση του συντελεστή ασφαλείας μέσω της προσφερόμενης τριβής στη διεπιφάνεια αγκυρίου-εδάφους που δε ρευστοποιείται και μέσω της δύναμης αντίστασης στην επιφάνεια της έλικας του αγκυρίου (βλ. **Σχήμα 2.6**)



Σχήμα 2.6: Χρήση αγκυρίου για αντιμετώπιση ανύψωσης αγωγού

- vi. Παθητική σταθεροποίηση του εδάφους γύρω από τον αγωγό με εισπίεση χημικού ενέματος (π.χ. κολλοειδούς πυριτίας), το οποίο έχει την ικανότητα να καθιστά το έδαφος ανθεκτικό στη ρευστοποίηση.

Η τελευταία αυτή μέθοδος αποτελεί βασικό πεδίο έρευνας της παρούσας εργασίας. Ως χημικό ένεμα χρησιμοποιείται η γνωστή για την σταθεροποιητική της δράση κολλοειδής πυριτία, γι' αυτόν το λόγο ακολουθεί παρουσίαση της σχετικής βιβλιογραφίας στην επόμενη παράγραφο.

2.2.2 Παθητική σταθεροποίηση ως μέθοδος αποφυγής της ανύψωσης

2.2.2.1 Χαρακτηριστικά σταθεροποιητή

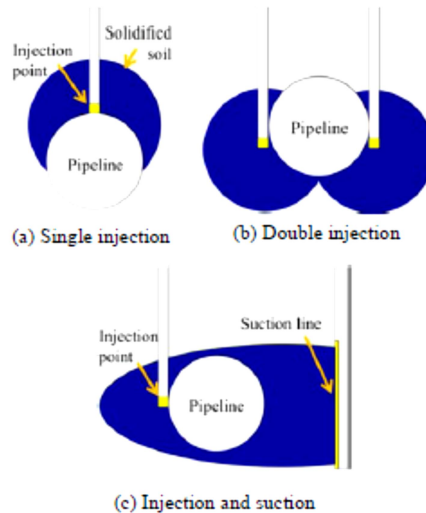
Για την επίτευξη της παθητικής σταθεροποίησης είναι απαραίτητη η χρήση ενός σταθεροποιητή αποτελούμενου από νανοσωματίδια, ο οποίος αλληλεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό και το υγρό των πόρων προσδίδοντας του βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά. Η κολλοειδής πυριτία, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως ως σταθεροποιητής, συνίσταται από κολλοειδή σωματίδια πυριτίας, το μέγεθος των οποίων είναι μεγαλύτερο των ατομικών διαστάσεων ($> 1\text{nm}$) και ταυτόχρονα αρκετά μικρό ώστε να μην επηρεάζεται από βαρυτικές δυνάμεις ($< 1\mu\text{m}$), διαφοροποιώντας την έτσι τόσο από τα αιωρήματα όσο και από τα πραγματικά διαλύματα. Το βασικό χαρακτηριστικό της κολλοειδούς πυριτίας είναι ότι τη στιγμή που εισάγεται στο έδαφος έχει ιξώδες εφάμιλλο του νερού (1cP), ενώ μετά από ένα ελεγχόμενο χρονικό διάστημα (χρόνος γέλης) το ιξώδες αυξάνεται απότομα μετατρέποντας το υγρό των πόρων σε γέλη. Η διαδικασία της γελοποίησης, όπως ονομάζεται, συνεχίζεται για αρκετό διάστημα μετά τον χρόνο γέλης, δημιουργώντας τελικώς ένα σταθεροποιημένο κοκκώδες έδαφος με σημαντικά βελτιωμένη αντοχή σε ρευστοποίηση.

2.2.2.2 Πείραμα παθητικής σταθεροποίησης για αποφυγή ανύψωσης αγωγών

Οι Towhata et al. (2013) μελέτησαν την εφαρμογή της μεθόδου σταθεροποίησης με ένεμα κολλοειδούς πυριτίας σε δίκτυο υπόγειων αγωγών. Για τη μελέτη αυτή εκτέλεσαν πειράματα εξετάζοντας τρεις πιθανές περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου, όπως φαίνονται και στο **Σχήμα 2.7**:

- Εισπίεση σε ένα σημείο – ένεμα στην στέψη του αγωγού.
- Εισπίεση σε δύο σημεία αντιδιαμετρικά.
- Εισπίεση ανάντη-άντληση κατόντη.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική έρευνα



Σχήμα 2.7: Μέθοδος εισπίεσης ενέματος κολλοειδούς πυριτίας με (a) εισπίεση σε ένα σημείο – ένεμα στην στέψη του αγωγού, (b) εισπίεση σε δύο σημεία αντιδιαμετρικά και (c) εισπίεση ανάντη – άντληση κατάντη.

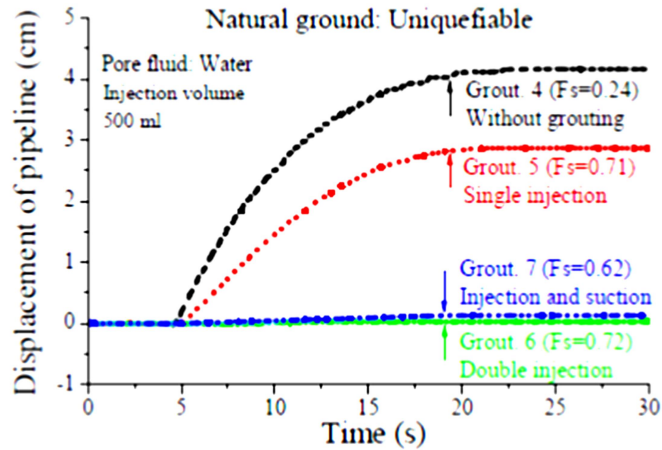
Πραγματοποίησαν πειράματα για επτά (7) διαφορετικές διατάξεις, των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον **Πίνακα 2.2**. Στις τρεις από αυτές εξετάστηκε η επίδραση του όγκου του ενέματος που εισπίζεται σε ρευστοποιήσιμη άμμο (Liq.) πυκνότητας $D_r=30\%$, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εισπίεσης σε ένα σημείο στην στέψη του αγωγού (περιπτώσεις Grout. 1~3). Στις επόμενες τέσσερις έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μεθόδων εισπίεσης, σε μη ρευστοποιήσιμη άμμο (Unliq.) για πυκνότητες $D_r=30\%$ και $D_r=80\%$ (περιπτώσεις Grout. 4~7).

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά πειραμάτων σταθεροποίησης εδάφους με εισπίεση ενέματος κολλοειδούς πυριτίας γύρω από αγωγό.

Case	Injection volume (ml)	Injection Method	Natural ground
Grout. 1	0	-	
Grout. 2	500	Single Injection	Liq.
Grout. 3	1000	Single Injection	
Grout. 4	0	-	
Grout. 5	500	Single Injection	Unliq.
Grout. 6	500	Double Injection	
Grout. 7	500	Injection & Suction	

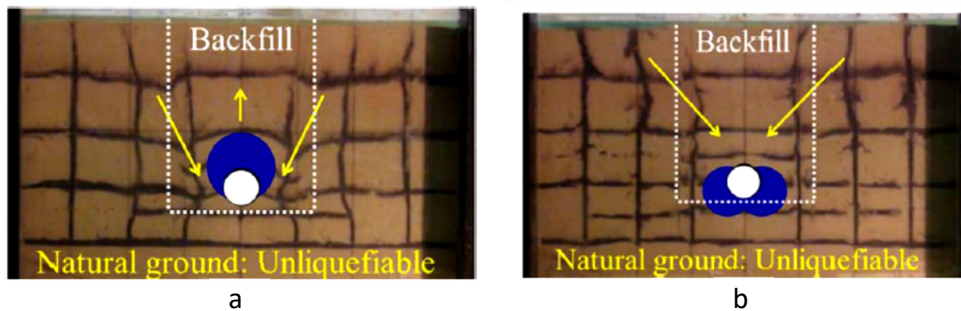
Για τις περιπτώσεις εισπίεσης σε δύο σημεία αντιδιαμετρικά και εισπίεσης ανάντη – άντλησης κατάντη παρατηρήθηκε πρακτικά μηδενική μετακίνηση του αγωγού, σε αντίθεση με την περίπτωση εισπίεσης σε ένα σημείο με ένεμα στην στέψη του αγωγού, για την οποία σημειώθηκε μείωση, αλλά όχι μηδενισμός της μετακίνησης (βλ. **Σχήμα 2.8**).

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική έρευνα



Σχήμα 2.8: Σύγκριση της αποτελεσματικότητας εισπίεσης ενέματος ως προς τη χρονοϊστορία της ανύψωσης του αγωγού.

Η εξήγηση που δίνουν οι συγγραφείς έγκειται στο ότι το σημείο εισπίεσης στην περίπτωση της μονής εισπίεσης βρίσκεται πάνω από τον αγωγό, με συνέπεια το κέντρο βάρους του συστήματος αγωγού-σταθεροποιημένου εδάφους να βρίσκεται πάνω από τον αγωγό, διαμορφώνοντας έτσι ένα πιο ασταθές συνθήκες για τον αγωγό (**Σχήμα 2.9a**). Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος διπλής εισπίεσης πραγματοποιείται σε δύο σημεία κάτω από τον αγωγό, με αποτέλεσμα το σταθεροποιημένο έδαφος να ενώνει το φυσικό έδαφος με το έδαφος επανεπίχωσης, λειτουργώντας έτσι ως ένα είδος αγκύρωσης κατά τη διάρκεια της διέγερσης (**Σχήμα 2.9b**), το οποίο δρα ευεργετικά.



Σχήμα 2.9: Παθητική σταθεροποίηση εδάφους στη γειτονία αγωγού με τη μέθοδο (a) εισπίεσης σε ένα σημείο – ένεμα στην στέψη του αγωγού και (b) εισπίεσης σε δύο σημεία αντιδιαμετρικά

Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας

3.1 Γενικά

Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η αναλυτική περιγραφή και η διακρίβωση της αριθμητικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του προβλήματος της ανύψωσης ενός εγκιβωτισμένου αγωγού, λόγω ρευστοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι, γίνεται αρχικά συνοπτική αναφορά στις παραδοχές του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC v7.0 (Itasca Inc. 2011) και του καταστατικού προσομοιώματος NTUA- Sand (Andrianoπουλος et al. 2010a,b), που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις. Η εν λόγω αριθμητική μεθοδολογία εφαρμόστηκε, ακολούθως, για να προσομοιωθούν τα σχετικά πειράματα φυγοκεντριστή που πραγματοποίησαν οι Chian et al. (2014), με στόχο την ποιοτική και ποσοτική σύγκρισή τους. Για το λόγο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων αυτών καθώς επίσης και οι συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων.

3.2 Αριθμητική Μεθοδολογία

3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC

Για την εκτέλεση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC v7.0, το οποίο είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων διαφορών με εφαρμογή σε προβλήματα γεωτεχνικής φύσης και παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων που σχετίζονται κυρίως με μέσα σε δύο διαστάσεις. Η βασική διαφορά του FLAC έναντι άλλων λογισμικών είναι η διατύπωση των εξισώσεων σε μη πεπλεγμένη μορφή (explicit mode). Κύριο χαρακτηριστικό του λογισμικού είναι ότι δεν απαιτείται να επιτευχθεί ισορροπία από το ένα υπολογιστικό βήμα στο επόμενο, η οποία προϋποθέτει επαναληπτική διαδικασία και αντιστροφή μητρώων όπως συμβαίνει στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, καθιστώντας το σημαντικά πιο αποτελεσματικό για επίλυση έντονων μη γραμμικών προβλημάτων, όπως αυτά που σχετίζονται με τη ρευστοποίηση.

Το συνεχές μέσο διακριτοποιείται σε τμήματα πεπερασμένων διαστάσεων, τα οποία στο FLAC ονομάζονται ζώνες (zones), ενώ οι εξισώσεις ισορροπίας επιλύονται στα σημεία που ορίζονται από το δίκτυο των ζωνών, δηλαδή τους κόμβους (gridpoints). Κάθε ζώνη υπακούει σε κάποιον

καταστατικό νόμο συμπεριφοράς, ο οποίος είτε είναι ενσωματωμένος στο πρόγραμμα (π.χ. Mohr-Coulomb), είτε εισάγεται από το χρήστη (π.χ. NTUA-Sand), και βάσει αυτού υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις των κόμβων εξαιτίας των επιβαλλόμενων φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών.

3.2.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των ζωνών του δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί πληθώρα καταστατικών νόμων συμπεριφοράς, όπως για παράδειγμα προσομοιώματα που περιγράφουν ελαστοπλαστικά υλικά και ο νόμος αστοχίας τους καθορίζεται από το κριτήριο Mohr - Coulomb. Περαιτέρω, μπορούν να εισαχθούν καταστατικά προσομοιώματα ορισμένα εξ' ολοκλήρου από το χρήστη, όπως το NTUA-Sand που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

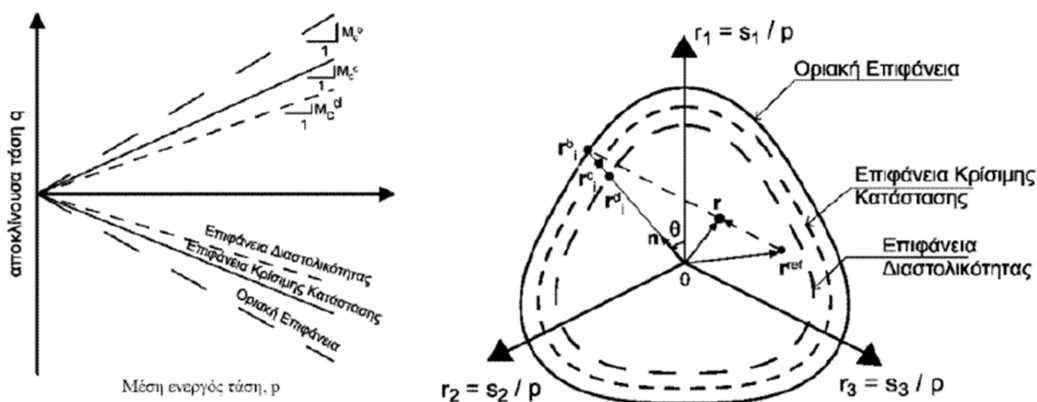
Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand αναπτύχθηκε από τους Paradimitriou and Bouckovalas (2002) και πήρε την οριστική του μορφή στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Andrianopoulos (2006). Η τελική μορφή του διατυπώθηκε από τους Andrianopoulos et al. (2010a,b). Το καταστατικό προσομοίωμα βασίζεται στις αρχές της θεωρίας Πλαστικότητας της Κρίσιμης Κατάστασης, ενώ θεωρεί σημειακή επιφάνεια διαρροής. Πρόκειται για ένα προσομοίωμα που εξετάζει την απόκριση των μη-συνεκτικών εδαφών υπό συνθήκες μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης, στραγγιζόμενων και αστράγγιστων φορτίσεων, καθώς επίσης και μικρών, μεσαίων και μεγάλων ανακυκλικών παραμορφώσεων.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του προσομοιώματος είναι τα ακόλουθα:

- Περιλαμβάνει τρεις επιφάνειες στο χώρο των τάσεων: την επιφάνεια Διαστολικότητας, Κρίσιμης Κατάστασης και την Οριακή, που αντιστοιχούν στην Γραμμή Αλλαγής Φάσης, Κρίσιμης Κατάστασης και Οριακής Αντοχής, φάσεις από τις οποίες διέρχεται το υλικό κατά τη διάρκεια της διατμητικής του φόρτισης. Στο **Σχήμα 3.1** φαίνονται οι μορφές των επιφανειών του προσομοιώματος για τριαξονική εντατική κατάσταση καθώς και οι προβολές των επιφανειών στο αποκλίνον επίπεδο.
- Οι κλίσεις της επιφάνειας Διαστολικότητας και της Οριακής επιφάνειας, M_c^d και M_c^b αντίστοιχα, ορίζονται μέσω της παραμέτρου κατάστασης $\psi = e - e_{cs}$ των Been & Jefferies (1985) – όπου e ο δείκτης πόρων και e_{cs} ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για την ίδια ενεργό τάση p' – μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη τόσο η επίδραση της σχετικής πυκνότητας όσο και της αρχικής ενεργού τάσης με ένα μοναδικό σετ παραμέτρων. Η κλίση M_c^c της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης εισάγεται ως παράμετρος του προσομοιώματος.
- Χαρακτηρίζεται από ένα κέντρο προβολής του τανυστή του λόγου αποκλινουσών τάσεων r^{ref} , του οποίου η θέση επαναπροσδιορίζεται αυτόματα κατά την εκάστοτε τελευταία αντιστροφή της φόρτισης και το οποίο χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για να προσδιορίζεται η προβολή της θέσης της τρέχουσας κατάστασης r στις επιφάνειες του προσομοιώματος (νόμος προβολής).

Κεφάλαιο 3: Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας

- Η χρήση καταστατικού προσομοιώματος τύπου Ramberg – Osgood για την οριζική ελαστική απόκριση άμμων σε μικρές παραμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση του μέτρου διάτμησης και την επακόλουθη υστερητική απόσβεση.
- Η θεώρηση σημειακής επιφάνειας διαρροής και η επακόλουθη απουσία ελαστικής περιοχής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ελαστοπλαστική απόκριση του υλικού σε κάθε υπολογιστικό βήμα και η ομαλή μετάβαση σε μεγάλες παραμορφώσεις αποκομίζοντας οφέλη αριθμητικής ευστάθειας και εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου.
- Η χρήση ενός εμπειρικού δείκτη που εκφράζει μακροσκοπικά την επίδραση της αλλαγής της δομής στο πλαστικό μέτρο κράτυνσης προβλέποντας με ακρίβεια την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων και την εκδήλωση της ρευστοποίησης.



Σχήμα 3.1: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο $p - q$, και η προβολή τους στο αποκλίνον επίπεδο όπου ορίζεται και ο νόμος προβολής.

Στον **Πίνακα 3.1** συνοψίζεται το σύνολο των εξισώσεων και των βασικών παραμέτρων που ορίζουν το καταστατικό προσομοίωμα. Παρατηρούμε ότι απαιτείται η βαθμονόμηση 16 συνολικά αδιάστατων παραμέτρων από τις οποίες οι 14 αφορούν μονοτονική φόρτιση και οι λοιπές 2 ανακυκλική. Όσον αφορά στη διαδικασία βαθμονόμησης, οι τιμές των παραμέτρων προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές και από δοκιμαστικές αναλύσεις (trial and error), στις οποίες προσομοιώνονται πειραματικά αποτελέσματα.

Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος έχει πραγματοποιηθεί από τους Andrianopoulos et al. (2010a,b), για άμμο τύπου Nevada. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος VELACS (Arulmoli et al. 1992), και συγκεκριμένα δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους με αρχική μέση ενεργό τάση $p_0=40\pm 320$ kPa και ανακυκλικές δοκιμές ρευστοποίησης (απλής διάτμησης και τριαξονικές) με $p_0=40\pm 160$ kPa και σχετικές πυκνότητες $D_r=40$ και 60 %. Η ακρίβεια της εν λόγω βαθμονόμησης έχει επαληθευτεί μέσω της επιτυχούς σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών αναλύσεων τόσο

Κεφάλαιο 3: Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας

σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, όσο και σε μεγάλης κλίμακας πειράματα φυγοκεντριστή που έχουν πραγματοποιηθεί με άμμο Nevada.

Ο Πίνακας 3.2 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων μαζί με μια επιγραμματική περιγραφή της φυσικής τους σημασίας.

Πίνακας 3.1: Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-Sand (Andrianopoulos et al. 2010a,b)

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	$M_{\theta}^{c,b,d} = g(\theta, c^c) M_c^{c,b,d}$	$c = M_e^c / M_c^c$
Σχήμα των επιφανειών του προσομοιώματος στο επίπεδο π	$g(\theta, c) = \frac{4c}{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)} \left[\frac{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)}{2} \right]$	
Γωνία Lode θ	$\cos(3\theta) = (3/2) \sqrt{3} (r_{ij} r_{ij}) / (0.5 r_{ij} r_{ij})^{3/2}$	
Μοναδιαίο διάνυσμα για τη διεύθυνση φόρτισης	$n_{ij} = r_{ij}^{pp} / \sqrt{r_{kl}^{pp} r_{kl}^{pp}}$	
Συζυγές σημείο στις επιφάνειες του προσομοιώματος	$r_{ij}^{pp,c,b,d} = \sqrt{2/3} M_{\theta}^{c,b,d} n_{ij}$	
Απόσταση συζυγούς σημείου από την τρέχουσα κατάσταση	$d^{c,b,d} = (r_{ij}^{pp,c,b,d} - r_{ij}) n_{ij}$	
Απόσταση αναφοράς	$d_{ref}^{b,d} = \sqrt{2/3} (M_{\theta}^{b,d} + M_{\theta_{\sigma+\pi}}^{b,d})$	
Αρχικό μέτρο διάτμησης	$G_{max} = B p_s \sqrt{p/p_s} / (0.3 + 0.7e)$	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	$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \dot{\epsilon}_{ij}^e + (\dot{\epsilon}_{vol}^e / 3) \delta_{ij} = (\dot{s}_{ij} / 2G_t) + (\dot{p} / K_t) \delta_{ij}$	
Επαύξηση πλαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^p + (\dot{\epsilon}_{vol}^p / 3) \delta_{ij} = \langle \Lambda \rangle R_{ij}$	
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	$\Lambda = \frac{2G_t n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - VK_t \dot{\epsilon}_{vol}}{K_p + 2G_t - VK_t D}$	
Συντελεστής διαστολικότητας	$D = A_o d^d \left(2 - \sqrt{d^d} / d_{ref}^d \right)$	A_o
Πλαστικό μέτρο κράτνησης	$K_p = \rho h_b h_t d^b$	
Εξίσωση νόμου παρεμβολής	$h_b = h_o d^b / d_{ref}^b ^{A_1} / \langle 1 - d^b / d_{ref}^b \rangle^{A_2}$	h_o, A_1, A_2
Επίδραση της αλλαγής της δομής	$h_t = (1 + \langle f_p \rangle^2) / (1 + \langle f_{ij} n_{ij} \rangle^{B_2})$ $\dot{f}_p = N \dot{\epsilon}_{vol}^p$ $\dot{f}_{ij} = -N \langle -\dot{\epsilon}_{vol}^p \rangle \left[(4 \max f_p ^2) n_{ij} + f_{ij} \right]$ $N = N_o (\sigma_{1o} / p_s) \langle -\psi_o \rangle$	B_2, N_o

Κεφάλαιο 3: Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας

Πίνακας 3.2: Παράμετροι προσομοιώματος NTUA-Sand για την άμμο Nevada (Andrianopoulos et al. 2010a,b)

#	Φυσική Σημασία	VELACS
M_c^c	Κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονική θλίψη (TC)	1.25
c	Λόγος της κλίσης της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονικό εφελκυσμό (TE) προς την αντίστοιχη κλίση για τριαξονική θλίψη (TC)	0.72
Γ_{cs}	Δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για $p=1kPa$	0.910
λ	Κλίση της γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο $[e-\ln p]$	0.022
B	Σταθερά του ελαστικού μέτρου διάτμησης	600*
ν	Λόγος Poisson	0.33
k_c^b	Επίδραση του ψ στην κλίση της Οριακής Επιφάνειας για TC	1.45
k_c^d	Επίδραση του ψ στην κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	0.30
γ_1	Χαρακτηριστική διατμητική παραμόρφωση	0.025%
α_1	Ρυθμός απομείωσης του ελαστικού μέτρου διάτμησης	0.6*
A_o	Σταθερά του συντελεστή διαστολικότητας	0.8
N_o	Σταθερά της επίδρασης της αλλαγής της δομής	40000
h_o	Σταθερά του πλαστικού μέτρου κράτυνσης	70000
A_1	Εκθέτης στον αριθμητή του νόμου παρεμβολής	3
A_2	Εκθέτης στον παρονομαστή του νόμου παρεμβολής	1
B_2	Εκθέτης της εξίσωσης για την επίδραση της αλλαγής της δομής	1

*για μονοτονική φόρτιση: $B=180$, $\alpha_1=1.0$

Χάριν πληρότητας, στο σημείο αυτό γίνεται μια πιο λεπτομερής αναφορά στην Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (Critical State Line), η οποία θεωρείται μοναδική και έχει εξίσωση ευθείας στον χώρο $[e - \ln(p)]$. Η μορφή της παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.2** και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

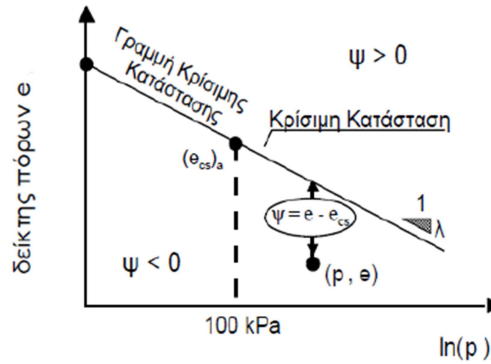
όπου:

e_{cs} ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για μέση ενεργό τάση p

p_a η ατμοσφαιρική πίεση ($p_a = 98.1kPa$)

$e_{cs,a}$ ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για $p=p_a$

λ η κλίση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης CSL στον χώρο $[e - \ln(p)]$

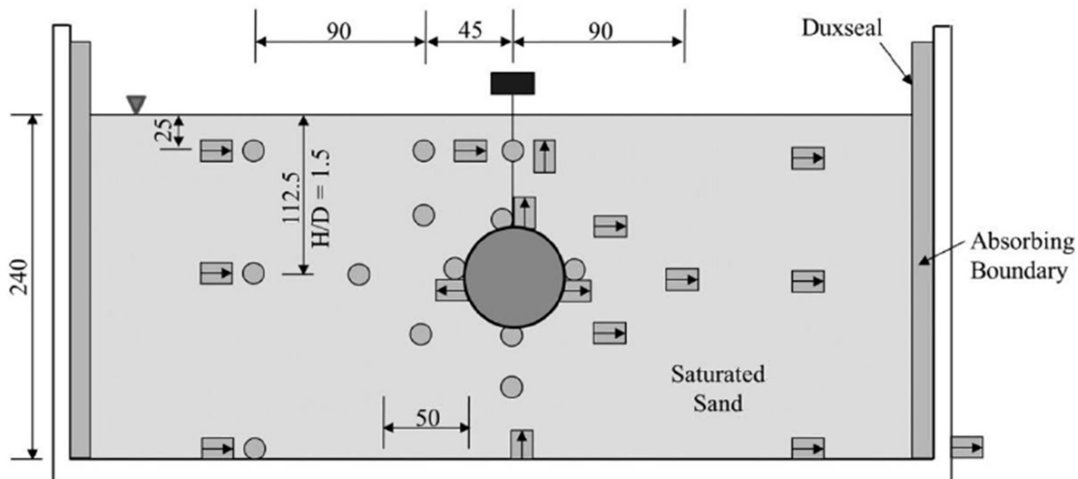


Σχήμα 3.2: Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης στον χώρο $e - \ln p$ και ορισμός της παραμέτρου κατάστασης ψ των Been & Jefferies (1985)

3.3 Σύγκριση με αποτελέσματα δοκιμής φυγοκεντριστή

3.3.1 Περιγραφή πειράματος φυγοκεντριστή

Για τη διακρίβωση της αριθμητικής μεθοδολογίας, που περιγράφηκε προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του πειράματος των Chian et al. (2014) για την προσομοίωση του φαινομένου ανύψωσης του αγωγού. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κουτί από αλουμίνιο με διαστάσεις 670 mm x 240 mm και άκαμπτα τοιχώματα, στα οποία τοποθετήθηκαν 25 mm κατάλληλο υλικό (Duxseal) για τη μείωση της ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων. Για την προσομοίωση του αγωγού χρησιμοποιήθηκε δακτυλιοειδής διατομή με κλειστά τα δύο άκρα και διάμετρο 75 mm. Στο **Σχήμα 3.3** φαίνεται η διάταξη του πειράματος για λόγο εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$.



Σχήμα 3.3: Πειραματική διάταξη φυγοκεντριστή (οι διαστάσεις δίνονται σε mm σε κλίμακα μοντέλου, από Chian et al. (2014))

Κεφάλαιο 3: Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας

Δεδομένου ότι μία κατασκευή σε συνθήκες 1g παρουσιάζει την ίδια εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση με την αντίστοιχη κατασκευή σε κλίμακα 1:N, όταν η τελευταία υποβληθεί σε επιτάχυνση $N \times g$, η επιτάχυνση του φυγοκεντριστή που επιλέχθηκε, ήταν 66.7g, ώστε σε πραγματική κλίμακα να προσομοιώνεται κατασκευή διαμέτρου 5m ($0.075m \times 66.7=5m$). Το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού ήταν 75mm, το οποίο επίσης αντιστοιχεί σε βάθος 5m σε κλίμακα πρωτότυπου, αλλά ο λόγος εγκιβωτισμού παραμένει ίσος με 1.5.

Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι το βάρος της κατασκευής που προσομοιώνεται στην πραγματικότητα είναι 60kN/m. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το εμβαδό της διατομής της κατασκευής είναι $19.64m^2$, προκύπτει ότι το ισοδύναμο ειδικό βάρος της κατασκευής είναι $\gamma_{equiv}=3.0KN/m^3$.

Το εδαφικό προφίλ αποτελούνταν από ένα ομοιογενές στρώμα κορεσμένου, χαλαρού, αμμώδους υλικού, πάχους 16m ($0.24m \times 66.7=16m$) σε κλίμακα πρωτότυπου. Η πειραματική συσκευή πληρώθηκε με άμμο Hostun, οι ιδιότητες της οποίας παρουσιάζονται στους **Πίνακας 3.3** και **Πίνακας 3.4**, ενώ για τον κορεσμό της χρησιμοποιήθηκε υγρό κατάλληλου ιξώδους, το οποίο εξασφαλίζει ότι, σε κλίμακα πρωτότυπου, η διαπερατότητα της άμμου Hostun είναι $k=10^{-3}$ m/s. Η άμμος τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί ότι η δομή της θα είναι χαλαρή, ενώ ακολουθήθηκε κατάλληλη διαδικασία για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερων συνθηκών κορεσμού. Η σεισμική διέγερση που εφαρμόστηκε στην βάση της συσκευής, αποτελούνταν από ημιτονοειδείς παλμούς, συχνότητας $f=0.75$ Hz ($T=1.33sec$) και είχε διάρκεια περίπου 27 sec, ενώ η μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση είχε τιμή 0.22g.

Πίνακας 3.3: Ιδιότητες της άμμου Hostun

Ιδιότητες	Hostun sand
ϕ_{crit} (degrees)	33 ^a
e_{min}	0.555 ^a
e_{max}	1.01 ^a
G_s	2.65 ^a
K ($\times 10^{-3}$ m/s)	1 ^b

^a Δεδομένα από Mitrani (2006)
^b Δεδομένα από Haigh et al. (2012)

3.3.2 Περιγραφή και παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης

Για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FLAC και στον **Πίνακα 3.4** παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι για τις ιδιότητες του εδάφους που ορίστηκαν για την αριθμητική προσομοίωση, βάσει των στοιχείων που δίνονται από τους Chian et al. (2014) στην περιγραφή του πειράματός τους.

Οι Chian et al. (2014) έκαναν και αριθμητική ανάλυση του πειράματός τους με χρήση του λογισμικού FLAC και του καταστατικού προσομοιώματος Wang (Wang et al. 1990) και έδειξαν ικανοποιητική ακρίβεια προσομοίωσης της ανύψωσης. Αντίστοιχα, η Marinatou (2016) και οι Marinatou et al. (2017) έκαναν και αυτοί αριθμητική ανάλυση του πειράματος των Chian et al. (2014) με χρήση του λογισμικού FLAC και του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand με ικανοποιητική ακρίβεια. Εκεί η προσομοίωση έγινε για διακρίβωση της μεθοδολογίας, ενώ εδώ η προσομοίωση αυτή θα αποτελέσει την ανάλυση αναφοράς για τη διερεύνηση της βελτίωσης έναντι ανύψωσης. Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της προσομοίωσης του πειράματος των Chian et al. (2014) που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Λεπτομερής σύγκριση με εκείνες των Marinatou (2016) και Marinatou et al. (2017) δεν κρίνεται αναγκαία. Συνοπτικά αναφέρεται ότι οι δύο προσεγγίσεις είναι πρακτικώς ταυτόσημες και ομοίως ταυτόσημα είναι και τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Η επανάληψη είναι αναγκαία εδώ, καθώς πραγματοποιήθηκε από την αρχή, ώστε να αποτελέσει το σημείο αναφοράς στις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν.

Πίνακας 3.4: *Ιδιότητες της άμμου που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική ανάλυση*

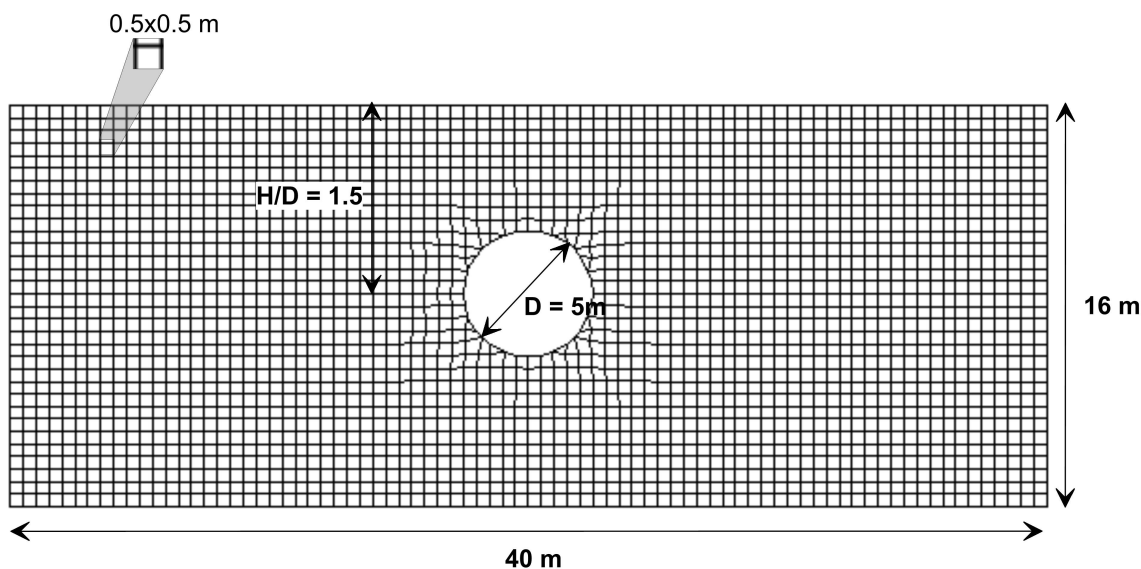
Παράμετροι	Τιμές
Dry density (ρ_d)	1450 kg/m ³
Saturated density (ρ_{sat})	1860 kg/m ³
Bulk modulus (K)	1.5x10 ⁷ Pa
Shear modulus (G)	5.5x10 ⁶ Pa
Internal friction angle (ϕ)	33°
Cohesion (c)	0 Pa
Initial void ratio (e)	0.8
Permeability	1x10 ⁻³ m/s

3.3.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος

Στο **Σχήμα 3.4** παρουσιάζεται ο κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του πειράματος των Chian et al. (2014) στο λογισμικό FLAC. Ακολουθώντας τη γεωμετρία της

Κεφάλαιο 3: Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας

πειραματικής συσκευής στην κλίμακα πρωτότυπου, ο κάνναβος έχει οριζόντιο μήκος 40m ($0.63\text{m} \times 66.7=40\text{m}$) και 16m ύψος ($0.24\text{m} \times 66.7= 16\text{m}$), ο αγωγός έχει διάμετρο 5m και είναι τοποθετημένος σε βάθος 7.5m, μετρώντας από την επιφάνεια του εδάφους έως τον άξονά του. Το εδαφικό στοιχείο προσομοιώνεται από ζώνες με διαστάσεις 0.5m x 0.5m, διαστάσεις που αντιστοιχούν στο 1/10 της διαμέτρου του αγωγού. Εδώ σημειώνεται ότι, δεδομένου ότι στο πρόβλημα αυτό αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις, χρησιμοποιήθηκε θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων (set large on), καθώς και μία υπορουτίνα διόρθωσης-εξομάλυνσης (smoothing) του καννάβου, η οποία ενεργοποιείται όταν οι ζώνες του καννάβου έχουν παραμορφωθεί έντονα.



Σχήμα 3.4: Κάνναβος αριθμητικής προσομοίωσης στο FLAC.

3.3.2.2 Συνοριακές συνθήκες

Για να προσομοιωθούν στην αριθμητική ανάλυση οι συνθήκες ελεύθερου πεδίου στα κατακόρυφα σύνορα του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα η μέθοδος των «συνδεδεμένων κόμβων» (tied nodes). Πρόκειται για ιδεατά καλώδια (cables), με πρακτικώς μηδενική πυκνότητα, δυσκαμψία και διατομή, τα οποία εξασφαλίζουν την ίση μετακίνηση των κόμβων των κατακόρυφων ορίων που βρίσκονται στο ίδιο ύψος. Το λογισμικό FLAC παρέχει εναλλακτικά τη δυνατότητα χρήσης συνθηκών ελεύθερου πεδίου (free field) βάσει της οποίας ασκούνται στα πλευρικά σύνορα του προσομοιώματος οι ίδιες τάσεις που θα ασκούνταν εάν υπήρχε μια στήλη εδάφους ίδιων ιδιοτήτων. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι ακριβής όταν τα καταστατικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για το εδαφικό υλικό είναι απλά (π.χ. ελαστικά). Επομένως, στις παρούσες αριθμητικές αναλύσεις που χρησιμοποιείται το σοφιστεμένο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand, ήταν απαραίτητη η εισαγωγή καλωδίων.

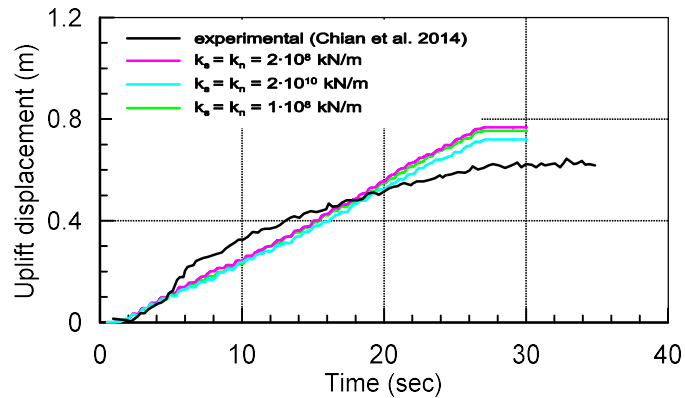
Στη βάση του καννάβου δεσμεύτηκε η κατακόρυφη μετακίνηση, αφού δεν επιβάλλεται κατακόρυφη συνιστώσα σεισμικής διέγερσης, ενώ στην οριζόντια διεύθυνση η μετακίνηση ορίστηκε με βάση τη χρονοϊστορία επιτάχυνσης. Ομοίως, στα πλευρικά σύνορα επιβλήθηκε δέσμευση της κατακόρυφης μετακίνησης και ελευθερία της οριζόντιας υπό τους περιορισμούς, όμως, που επιβάλλουν τα καλώδια (tied nodes).

3.3.2.3 Ιδιότητες αγωγού

Για την προσομοίωση του αγωγού στο FLAC διαφοροποιήθηκαν οι ιδιότητες των ζωνών του καννάβου εντός του κύκλου, ενώ μεταξύ των ζωνών του εδάφους και του αγωγού τοποθετήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας (interface elements), οι ιδιότητες των οποίων περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο. Το ειδικό βάρος του αγωγού, βάσει των Chian et al. (2014) είναι $\gamma_{\text{equiv}}=3.0 \text{ kN/m}^3$. Δεδομένου ότι ο αγωγός είναι μεταλλικός, και άρα αδιαπέρατος, χρησιμοποιήθηκε διαπερατότητα $k=10^{-9} \text{ m/s}$ (έξι τάξεις μεγέθους διαφορά από το περιβάλλον έδαφος) για τις ζώνες εντός του αγωγού και ελέγχθηκε ότι η τιμή αυτή ήταν αρκετά μικρή, ώστε να μην υπάρχει ροή μέσα από τον αγωγό.

3.3.2.4 Ιδιότητες στοιχείων διεπιφάνειας

Μια διεπιφάνεια ορίζεται στο FLAC, μέσω των παραμέτρων αντοχής και δυσκαμψίας της. Η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας υπακούει σε νόμο αστοχίας Mohr-Coulomb, επομένως αρκεί να προσδιοριστεί η συνοχή και η γωνία τριβής της. Δεδομένου ότι έχουμε αμμώδες υλικό, χρησιμοποιήθηκε μηδενική συνοχή, ενώ επιλέχθηκε γωνία τριβής $\phi=16.5^\circ$, η οποία αντιστοιχεί στο 1/2 της γωνίας τριβής της άμμου Hostun. Η εν λόγω απομείωση θεωρείται λογική, εφόσον ο αγωγός είναι λείος και δεν αναφέρονται περαιτέρω μέτρα για την αύξηση της τριβής μεταξύ της επιφάνειάς του και του περιβάλλοντος εδάφους. Ταυτόχρονα αποτρέπεται η αποκόλληση του εδάφους από τον αγωγό, μέσω της εισαγωγής μεγάλης εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας, ώστε να μη δημιουργηθούν ασυνέχειες στις αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων ή και αναρρόφηση. Όσον αφορά στην ορθή και στη διατμητική δυσκαμψία της διεπιφάνειας, ύστερα από αναλύσεις ευαισθησίας, επιλέχθηκε η τιμή $2 \cdot 10^8 \text{ kN/m}$, βάσει των δυσκαμψιών των στοιχείων γειτονικά της διεπιφάνειας και της σχέσης υπολογισμού που δίνεται από το FLAC. Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 3.5**, η απόκλιση στη μετακίνηση του αγωγού όταν η τιμή της δυσκαμψίας μεταβάλλεται από $2 \cdot 10^{10} \text{ kN/m}$ σε $2 \cdot 10^8 \text{ kN/m}$ είναι αρκετά μικρή και μάλιστα υπερεκτιμά τη μετακίνηση προς τα άνω του αγωγού (ανύψωση), ενώ όταν η τιμή μεταβάλλεται από $2 \cdot 10^8 \text{ kN/m}$ σε $1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}$ παρατηρείται αμελητέα διαφορά στο διάγραμμα μετακίνησης με το χρόνο. Επομένως, κρίθηκε καταλληλότερη η τιμή $2 \cdot 10^8 \text{ kN/m}$, αφενός διότι είναι επιθυμητή μια όσο το δυνατόν πιο δύσκαμπτη επιφάνεια και αφετέρου διότι μειώνεται πολύ ο υπολογιστικός χρόνος.



Σχήμα 3.5: Επίδραση της δυσκαμψίας της διεπιφάνειας εδάφους - αγωγού στην ανύψωση του αγωγού για την ανάλυση αναφοράς

3.3.2.5 Ιδιότητες εδάφους

Οι τιμές της διαπερατότητας και της πυκνότητας του εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές που χρησιμοποίησαν οι Chian et al. (2014) στο πείραμά τους, δηλαδή $k=10^{-3}$ m/s και $\rho = 1.86$ Mg/m³ αντίστοιχα. Ακόμη, το εδαφικό προφίλ ήταν πλήρως κορεσμένο σε όλο του το βάθος. Για να εξασφαλιστεί ότι θα παραμείνει κορεσμένο κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης, στην αριθμητική ανάλυση τοποθετήθηκε ένα υπερκείμενο στρώμα νερού, πάχους 1m (που δεν αλλάζει το ενεργό τασικό πεδίο).

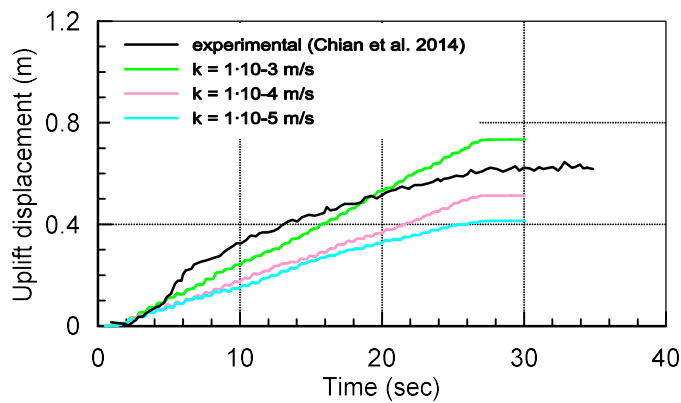
Ο υπολογισμός των γεωστατικών τάσεων έγινε με χρήση της θεωρίας ελαστικότητας. Οι ελαστικές παράμετροι του μέτρου διάτμησης και του μέτρου ογκομετρικής παραμόρφωσης, για τον υπολογισμό της αρχικής εντατικής κατάστασης, υπολογίστηκαν για ταχύτητα σεισμικού κύματος $V_s = 600$ m/s και προέκυψαν $G = 6.7 \cdot 10^5$ kPa και $K = 1.8 \cdot 10^6$ kPa αντίστοιχα, για ελαστική τιμή του λόγου poisson $\nu = 0.33$.

Σημαντική ιδιότητα του εδάφους για τη μελέτη της συμπεριφοράς του υπό δυναμικές φορτίσεις είναι η απόσβεσή του. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand είναι ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο που προσομοιώνει την συμπεριφορά του εδάφους υπό ανακυκλική φόρτιση, μέσω των βρόχων υστέρησης. Επιπρόσθετα, στον παρόντα κώδικα χρησιμοποιήθηκε “τοπική” απόσβεση (local damping) σταθερή και ίση με 2% για το έδαφος, ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του για πρακτικά μηδενικές διατμητικές παραμορφώσεις, που αντιστοιχεί σε μη-μηδενική απόσβεση. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί στο FLAC η απόσβεση Rayleigh. Ωστόσο, στα σύνθετα προβλήματα συνηθίζεται η εφαρμογή της τοπικής απόσβεσης, γιατί η απόσβεση Rayleigh αυξάνει πολύ τον υπολογιστικό χρόνο, ενώ έχει διαφορετικό μέτρο ανά τιμή συχνότητας, κάτι που δε χαρακτηρίζει την υστερητική απόσβεση.

Όσον αφορά τη σχετική πυκνότητα του εδάφους, αυτή λαμβάνεται υπόψη στο NTUA-Sand μέσω του δείκτη πόρων e . Για το πείραμα των Chian et al. (2014) η τιμή που μετρήθηκε ήταν $e = 0.8$, η οποία αντιστοιχεί σε σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$, βάσει της μέγιστης ($e_{max} = 1.01$) και της

ελάχιστης ($e_{min} = 0.555$) τιμής που δίνονται από τους συγγραφείς για την άμμο Hostun που χρησιμοποίησαν. Ωστόσο, ενώ το πείραμα πραγματοποιήθηκε για άμμο Hostun, το καταστατικό προσομοίωμα έχει βαθμονομηθεί και επαληθευτεί πειραματικά για άμμο Nevada, καθιστώντας έτσι αναγκαία την τροποποίηση κάποιου παραμέτρου του για την προσομοίωση της άμμου Hostun. Μετά από διερεύνηση που έγινε στην προηγούμενη εργασία της Marinatou (2016), προέκυψε ότι απαιτείται αύξηση της σχετικής πυκνότητας, καθώς η άμμος Hostun είναι σημαντικά πιο χονδρόκοκκη από την άμμο Nevada. Έτσι η τιμή $D_r = 55\%$ ($e = 0.68$) κρίθηκε ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα συνολικά για την άμμο Hostun.

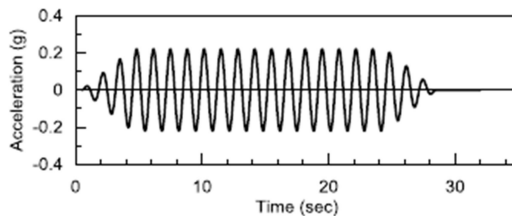
Όσον αφορά την διαπερατότητα του εδάφους αρχικά επιλέχθηκε η ίδια τιμή με αυτήν που χρησιμοποιούν οι Chian et al. (2014) στο πείραμά τους, δηλαδή $k=10^{-3}$ m/s. Για την επαλήθευση της τιμής αυτής ελέγχθηκαν δύο ακόμα τιμές διαπερατότητας, $k=10^{-4}$ m/s και $k=10^{-5}$ m/s, τα αποτελέσματα των οποίων στην ανύψωση του αγωγού φαίνονται στο **Σχήμα 3.6**. Όπως είναι φανερό οι τιμές διαπερατότητας $k=10^{-4}$ m/s και $k=10^{-5}$ m/s υποεκτιμούν την ανύψωση του αγωγού στην ανάλυση αναφοράς. Επομένως, διατηρείται η αρχική τιμή διαπερατότητας $k=10^{-3}$ m/s.



Σχήμα 3.6: Ανάλυση ευαισθησίας για τιμές διαπερατότητας εδάφους στην ανύψωση του αγωγού για την ανάλυση αναφοράς

3.3.2.6 Χαρακτηριστικά σεισμικής διέγερσης

Η σεισμική διέγερση επιβλήθηκε μέσω μιας υπορουτίνας FISH – γλώσσας προγραμματισμού στο FLAC – και είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με τη σεισμική διέγερση του πειράματος των Chian et al. (2014), δηλαδή περίοδο $T = 1.33$ s διάρκεια περίπου 27s και $a_{max} = 0.22g$ (βλ. **Σχήμα 3.7**).



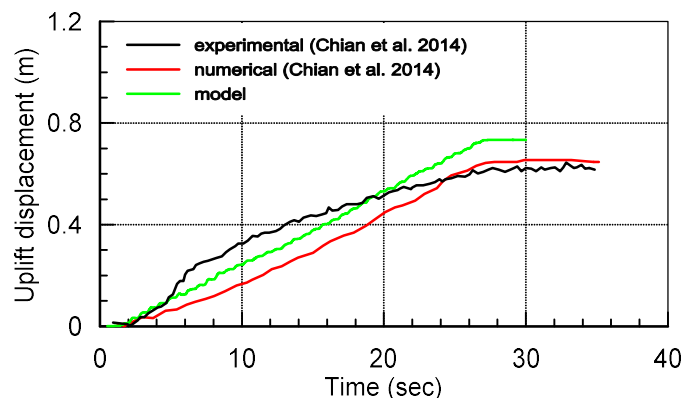
Σχήμα 3.7: Επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση στη βάση του προσομοιώματος για την ανάλυση αναφοράς

3.3.3 Σύγκριση αριθμητικών αναλύσεων με πειραματικά αποτελέσματα

Μετά τις αναλύσεις ευαισθησίας για τη δυσκαμψία της διεπιφάνειας και για την διαπερατότητα του εδάφους και την επιλογή των τιμών για τις παραμέτρους αυτές, συγκρίθηκε η χρονοϊστορία της ανύψωσης που προβλέπει η αριθμητική ανάλυση με την ανύψωση του αγωγού που μετρήθηκε στο πείραμα. Στη συνέχεια ακολούθησε σύγκριση των προβλεπόμενων υπερπιέσεων πόρων με τις μετρηθείσες του πειράματος, για να διακριβωθεί η αξιοπιστία της αριθμητικής μεθοδολογίας.

3.3.3.1 Ανύψωση του αγωγού

Στο **Σχήμα 3.8** φαίνεται η χρονοϊστορία της κατακόρυφης μετατόπισης (ανύψωσης) του αγωγού από την παρούσα ανάλυση σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του πειράματος και της αριθμητικής ανάλυσης των Chian et al. (2014). Η σύγκριση είναι ικανοποιητική και αντίστοιχης ακρίβειας με την ανάλυση των Chian et al. (2014).



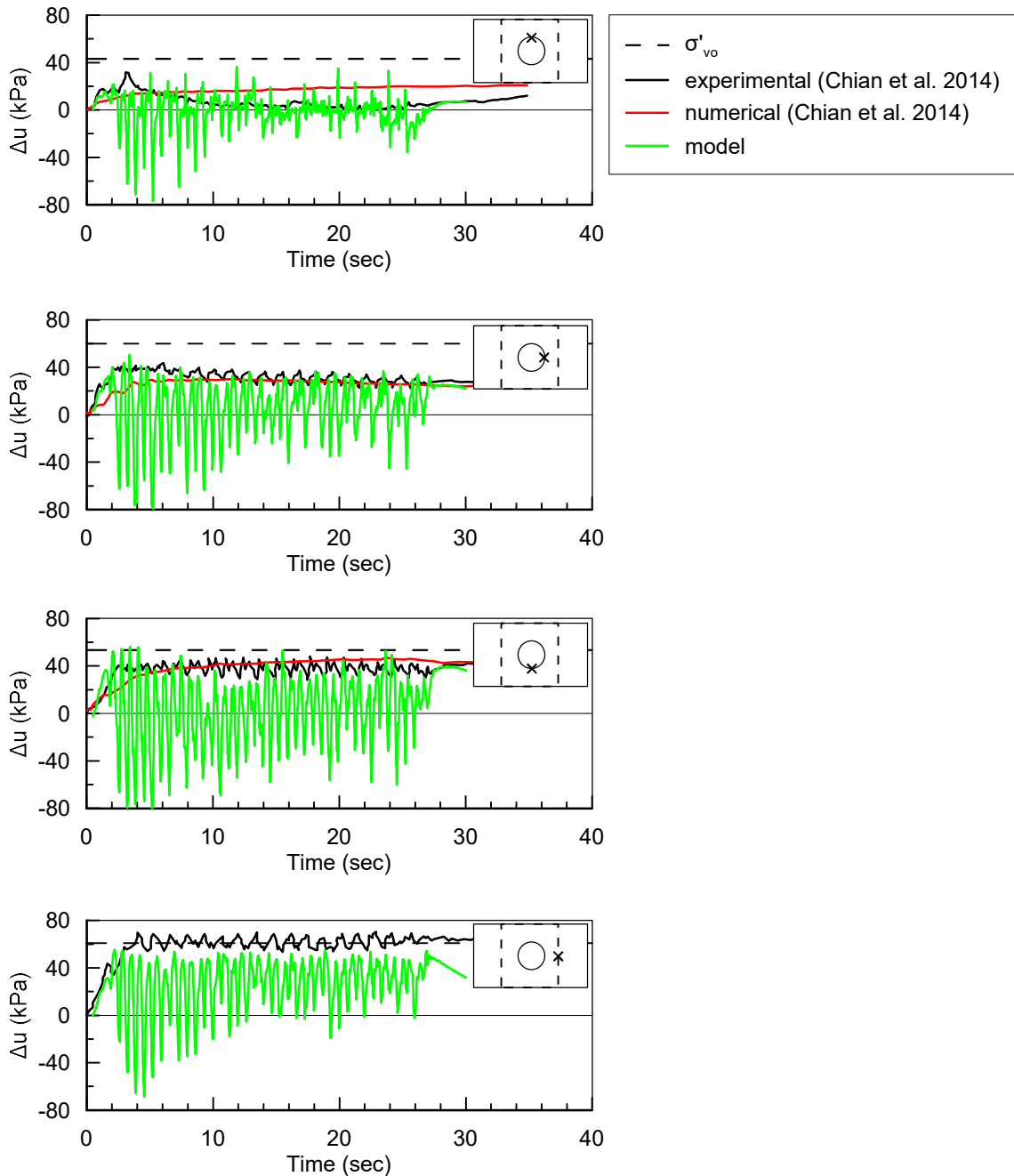
Σχήμα 3.8: Σύγκριση χρονοϊστορίας ανύψωσης αγωγού στην ανάλυση αναφοράς με τις αντίστοιχες από την αριθμητική ανάλυση (numerical) και τις πειραματικές μετρήσεις (experimental) των Chian et al. (2014)

3.3.3.2 Υπερπιέσεις πόρων περί τον αγωγό

Στο **Σχήμα 3.9** απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες των υπερπιέσεων πόρων όπως προκύπτουν από το αριθμητικό μας προσομοίωμα (model) για την ανάλυση αναφοράς, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του πειράματος και της αριθμητικής ανάλυσης των Chian et al. (2014). Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση ώστε να είναι εμφανές το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Παρατηρείται ότι η ανάλυση αναφοράς προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του εδάφους, τόσο στο ελεύθερο πεδίο όσο και περί τον αγωγό. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται μικρές υπερπιέσεις στη στέψη του αγωγού βάσει των μετρήσεων του πειράματος, οι οποίες αποτυπώνονται και στην ανάλυση αναφοράς. Ακόμα, συγκρίνοντας τις υπερπιέσεις πόρων πλευρικά του αγωγού με τις αντίστοιχες στο ίδιο βάθος αλλά μακριά από αυτόν (οιωνεί ελεύθερο πεδίο) παρατηρείται μείωση των τιμών κοντά στην περιοχή του αγωγού, η οποία

Κεφάλαιο 3: Διακρίβωση Αριθμητικής Μεθοδολογίας

αναπαριστάται και από την αριθμητική ανάλυση. Η βασική διαφορά της ανάλυσης αναφοράς με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι η μεγαλύτερη προβλεπόμενη διαστολικότητα εντός κάθε κύκλου διέγερσης, συγκριτικά με το πείραμα. Όμως οι μέγιστες θετικές υπερπιέσεις είναι λίγο έως πολύ ίδιες με εκείνες του πειράματος, γεγονός που οδηγεί και στην ικανοποιητική πρόβλεψη της ανύψωσης (βλ. **Σχήμα 3.8**).



Σχήμα 3.9: Σύγκριση χρονιοιστοριών υπερπιέσεων πόρων σε διάφορες θέσεις περί τον αγωγό στην ανάλυση αναφοράς με τις αντίστοιχες από την αριθμητική ανάλυση (numerical) και τις πειραματικές μετρήσεις (experimental) των Chian et al. (2014)

4

Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος

4.1 Μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης σταθεροποίησης

Ο μηχανισμός βελτίωσης που προσφέρει η προσθήκη κολλοειδούς πυριτίας στο υγρό των πόρων δεν έχει κατανοηθεί πλήρως ακόμα. Έτσι δεν έχει κατοχυρωθεί ακόμα στη βιβλιογραφία κάποια καταστατική προσομοίωση της απόκρισης των σταθεροποιημένων εδαφών, ενώ έχουν γίνει προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης με τροποποίηση ήδη υπαρχόντων καταστατικών προσομοιωμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις που έχουν επιχειρηθεί μέχρι σήμερα με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand (Andrianopoulos et al. 2010a,b), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια αυτής της εργασίας.

Συγκεκριμένα, η προσομοίωση της συμπεριφοράς παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών έχει μελετηθεί από τους Andrianopoulos et al. (2016) κάνοντας «ευφυή» χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη επικεντρώνεται σε δύο μηχανισμούς συμβολής, τους ισχυρούς δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων και της γέλης και τη μειωμένη ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων λόγω της συμπιεστότητας της γέλης των πόρων. Από τη μελέτη προέκυψε ότι δεσπάζοντα ρόλο παίζει η συμπιεστότητα της γέλης, επομένως αρκεί αυτή να εισαχθεί ως ιδιότητα στη συγκεκριμένη αριθμητική ανάλυση μέσω της σχέσης:

$$K = \frac{K_w}{n} \quad 4.1$$

Όπου

K το μέτρο συμπιεστότητας του υγρού των πόρων,

K_w το μέτρο συμπιεστότητας του νερού (ίσο με $2 \cdot 10^6$ kPa),

και n μια σταθερά μεγαλύτερη της μονάδας η οποία απομειώνει τη συμπιεστότητα του υγρού των πόρων (εδώ της γέλης) συγκριτικά με το νερό. Στην ίδια εργασία, επιχειρήθηκε η προσομοίωση του πειράματος φυγοκεντριστή των Gallagher et al. (2007) με αυτήν την προσέγγιση και προέκυψε ότι τιμές $n=500-1000$ δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια σε όρους επιταχύνσεων και καθιζήσεων.

Στη συνέχεια, στη διδακτορική διατριβή της Γεωργίας Αγαπουλάκη (2017) εκτελέστηκε αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων των Gallagher et al. (2007) και Conlee et al. (2012) με «ευφυή» χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand στο λογισμικό FLAC, κατ' αντιστοιχία με τους Andrianopoulos et al. (2016). Η παραμετρική διερεύνηση κατέληξε στη χρήση της σχέσης (2.1), αλλά με τιμή του διαιρέτη n , η οποία σχετίζεται με το ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS(%) και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n = 100 \cdot [24.1.25 + CS(\%)] \quad 4.2$$

Σύμφωνα με τη σχέση (2.2), η κατάλληλη τιμή του n προκύπτει ίση με $n = 825$ για τη δοκιμή των Gallagher et al. (2007), που έχουν χρησιμοποιήσει ποσοστό πυριτίας CS=6%, ενώ αντίστοιχα για τη δοκιμή των Conlee et al. (2012) με ποσοστό πυριτίας CS=9% ο δείκτης n λαμβάνει τιμή $n = 1125$. Για εφαρμογή μιας ενιαίας τιμής του συντελεστή n θα μπορούσε να επιλεγεί η μέση τιμή των δύο παραπάνω, δηλαδή $n = 975$, η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό CS = 7.5% που αποτελεί και τη μέση τιμή των ορίων εφαρμογής στην παθητική σταθεροποίηση (όρια εφαρμογής 5-10%). Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται εδώ.

Επιπλέον, σημειώνεται εδώ ότι καθώς η γέλη στους πόρους κάνει το έδαφος πρακτικά αδιαπέρατο, κατά τις αναλύσεις λήφθηκε τιμή διαπερατότητας για το σταθεροποιημένο έδαφος ίση με $k = 10^{-9}$ m/s .

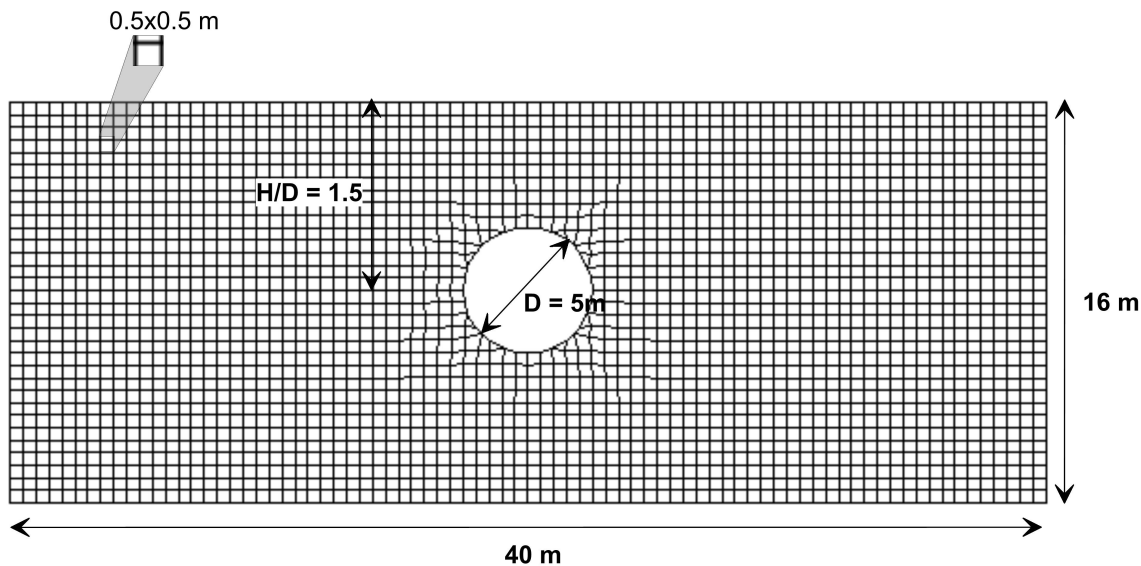
4.2 Σεισμική απόκριση υπόγειου αγωγού σε πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος

4.2.1 Απόκριση αναφοράς σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

Ως μέτρο σύγκρισης της αποτελεσματικότητας της βελτίωσης χρησιμοποιείται η απόκριση του αγωγού σε ρευστοποιήσιμο έδαφος που εκτελέστηκε για την προσομοίωση του πειράματος των Chian et al. (2014), όπως αυτή παρουσιάστηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3 (ανάλυση αναφοράς).

Συγκεκριμένα, ο κάνναβος που χρησιμοποιήθηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα έχει διαστάσεις 40m x 16 m με διακριτοποίηση σε στοιχεία διαστάσεων 0.5m x 0.5 m. Ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε βάθος $H = 7.5$ m, μετρούμενο από την επιφάνεια του εδάφους ως τον άξονα του αγωγού, και έχει διάμετρο $D = 5$ m και πάχος $t = 0.729$ m (Σχήμα 4.1).

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία καννάθου αριθμητικής ανάλυσης αναφοράς

Η διαπερατότητα και η πυκνότητα του εδάφους είναι ίδιες με αυτές των Chian et al., δηλαδή $k = 10^{-3}\text{ m/s}$ και $\rho = 1.86\text{ Mgr/m}^3$ αντίστοιχα. Για τη διαπερατότητα του αγωγού επιλέχθηκε η τιμή $k = 10^{-9}\text{ m/s}$, η οποία και ελέγχθηκε ώστε να εξασφαλιστεί ότι είναι αδιαπέρατος. Ως σχετική πυκνότητα του εδάφους χρησιμοποιείται η τιμή $D_r = 55\%$, η επιλογή της οποίας έχει αιτιολογηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, και συνεπώς ο δείκτης πόρων που εισάγεται στο προσομοίωμα είναι $e = 0.6802$ βάσει του μεγίστου ($e_{\max} = 0.887$) και του ελάχιστου ($e_{\min} = 0.511$) που αντιστοιχούν στην άμμο Nevada.

Οι ελαστικές παράμετροι για το μέτρο διάτμησης και το μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων με χρήση της θεωρίας ελαστικότητας, αντιστοιχούν σε ταχύτητα σεισμικού κύματος $V_s = 600\text{ m/s}$ και έχουν τιμές $G = 6.7 \cdot 10^5\text{ kPa}$ και $K = 1.8 \cdot 10^6\text{ kPa}$ αντίστοιχα.

Για την εισαγωγή των στοιχείων διεπιφάνειας δόθηκαν αρχικά μεγάλες τιμές δυσκαμψίας ($k_s = k_n = 2 \cdot 10^8\text{ kN/m}$), με σκοπό αυτά να μην επηρεάζουν μέσω της παραμόρφωσής τους την ανάπτυξη των τάσεων. Η επιλογή της τιμής αυτής, όπως εξετάστηκε Κεφάλαιο 3, αποδείχθηκε ότι προσδίδει την επιθυμητή μεγάλη δυσκαμψία, ενώ ταυτόχρονα εξοικονομείται υπολογιστικός χρόνος. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των πιο ρεαλιστικών τιμών δυσκαμψίας των στοιχείων της διεπιφάνειας αγωγού-εδάφους χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εξίσωση, όπως προτείνεται από το εγχειρίδιο του FLAC:

$$k_n = k_s = \frac{K + \frac{4}{3} \cdot G}{\Delta z} \quad 4.3$$

όπου:

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος

k_n : η τιμή της αξονικής δυσκαμψίας

k_s : η τιμή της διατμητικής δυσκαμψίας

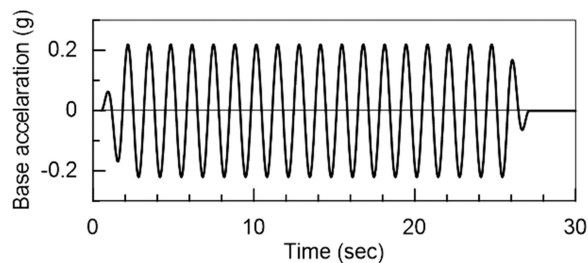
K : το μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης του εδάφους

G : το μέτρο διάτμησης του εδάφους

Δz : το μήκος των στοιχείων του καννάβου

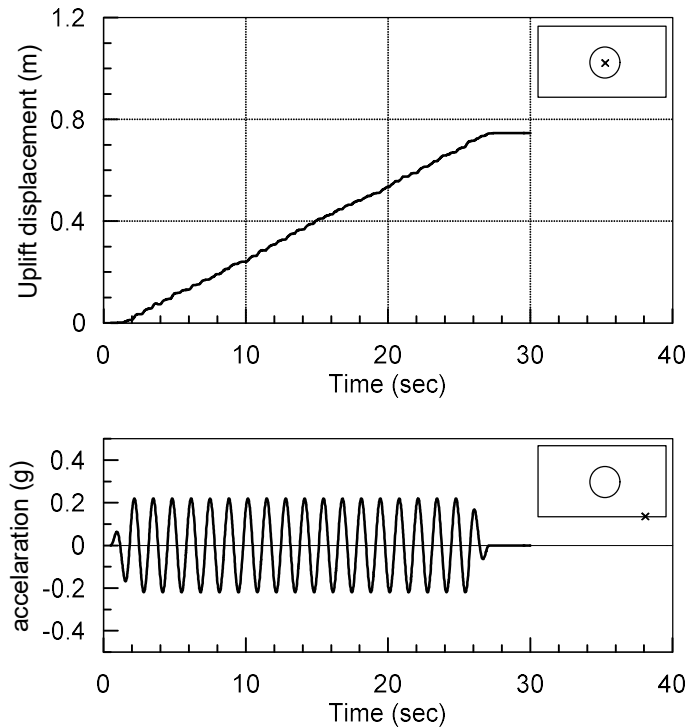
Οι τιμές δυσκαμψίας που προκύπτουν, για τις τιμές των μέτρων ογκομετρικής παραμόρφωσης και διάτμησης που αναφέρονται παραπάνω (υπολογισμένα στο βάθος του αγωγού) και για μήκος στοιχείων του καννάβου 0.5 m, είναι της τάξης των $k_s = k_n = 5 \cdot 10^6$ kN/m.

Τέλος, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης διατηρήθηκαν αυτά του πειράματος των Chian et al.(2014). Συγκεκριμένα, επιβλήθηκε σεισμική διέγερση με περίοδο $T = 1.33$ sec και διάρκεια περίπου 27 sec (20 κύκλοι φόρτισης) με μέγιστη επιτάχυνση στη βάση $a_{max} = 0.22g$ (**Σχήμα 4.2**)



Σχήμα 4.2: Επιβαλλόμενη διέγερση στη βάση του προσομοιώματος

Με βάση το διάγραμμα ανύψωσης του αγωγού του **Σχήματος 4.3** προκύπτει ότι η ανύψωση του αγωγού αρχίζει με το ξεκίνημα της σεισμικής διέγερσης ($t = 0.5$ sec) διατηρεί σταθερό ρυθμό αύξησης και σταθεροποιείται στη μέγιστη τιμή που έχει αποκτήσει μόλις σταματήσει η διέγερση, ενώ δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα η αποτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων στην περιοχή του αγωγού. Αυτό υποδηλώνει την εξάρτηση του φαινομένου καθαρά από τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, γεγονός που επιτρέπει την εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων με διάρκεια όση και η διάρκεια του σεισμού μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος τους. Μάλιστα, στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Chian et al. (2014). Για τον λόγο αυτό όλες οι αναλύσεις που περιγράφονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν για χρονική διάρκεια ίση με τη διάρκεια του σεισμού.

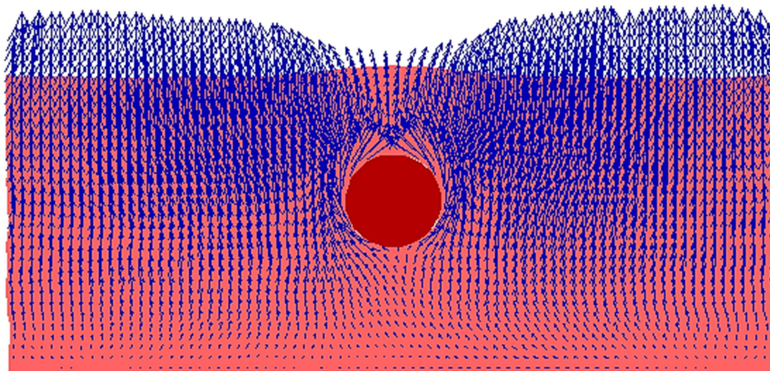


Σχήμα 4.3: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης βάσης και ανύψωσης υπόγειου αγωγού σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζεται η εικόνα των ισοκαμπυλών του λόγου υπερπιέσεων πόρων $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}}$ στο τέλος της διέγερσης, τα οποία καταδεικνύουν το φαινόμενο της ρευστοποίησης τόσο μακριά όσο και κοντά στον αγωγό. Παρατηρείται ότι μακριά από τον αγωγό και σε όλο το βάθος από την επιφάνεια ως τον άξονα του αγωγού οι υπερπιέσεις υπερβαίνουν το 75% της ενεργού τάσης ($r_u > 0.75$), το οποίο υποδηλώνει την εκδήλωση γενικευμένης ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο. Ωστόσο, κοντά στην περιοχή του αγωγού αυτή η εικόνα διαφοροποιείται. Συγκεκριμένα, κάτω από τον αγωγό παρατηρούνται ελαφρώς αυξημένες υπερπιέσεις συγκριτικά με αυτές στο ελεύθερο πεδίο στο αντίστοιχο βάθος, ενώ αντίθετα πλευρικά και πάνω από τον αγωγό οι υδατικές υπερπιέσεις πόρων είναι αισθητά μειωμένες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αγωγός είναι σημαντικά πιο δύσκαμπτος από το έδαφος, επομένως τα ανερχόμενα σεισμικά κύματα που φτάνουν σε αυτόν ανακλώνται σε μεγάλο βαθμό κι έτσι αναπτύσσονται μικρότερες διατμητικές παραμορφώσεις πάνω από τον αγωγό. Επίσης, εφόσον ο αγωγός είναι αδιαπέρατος, το νερό των πόρων, κινούμενο προς την επιφάνεια, αναγκάζεται να τον παρακάμψει προκαλώντας έτσι μειωμένη ροή και ταχύτερη στράγγιση σε μια σχεδόν κατακόρυφη στήλη εδάφους πάνω από τον αγωγό, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.5**. Αντίστοιχες παρατηρήσεις για την ανάπτυξη των υπερπιέσεων πόρων κοντά στην περιοχή του αγωγού έχουν αναφερθεί και στη βιβλιογραφία (Chian et al. (2014), Marinatou et al.(2017)).



Σχήμα 4.4: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u της αριθμητικής ανάλυσης αναφοράς για υπόγειο αγωγό σε ρευστοποιήσιμο έδαφος στο τέλος της διέγερσης



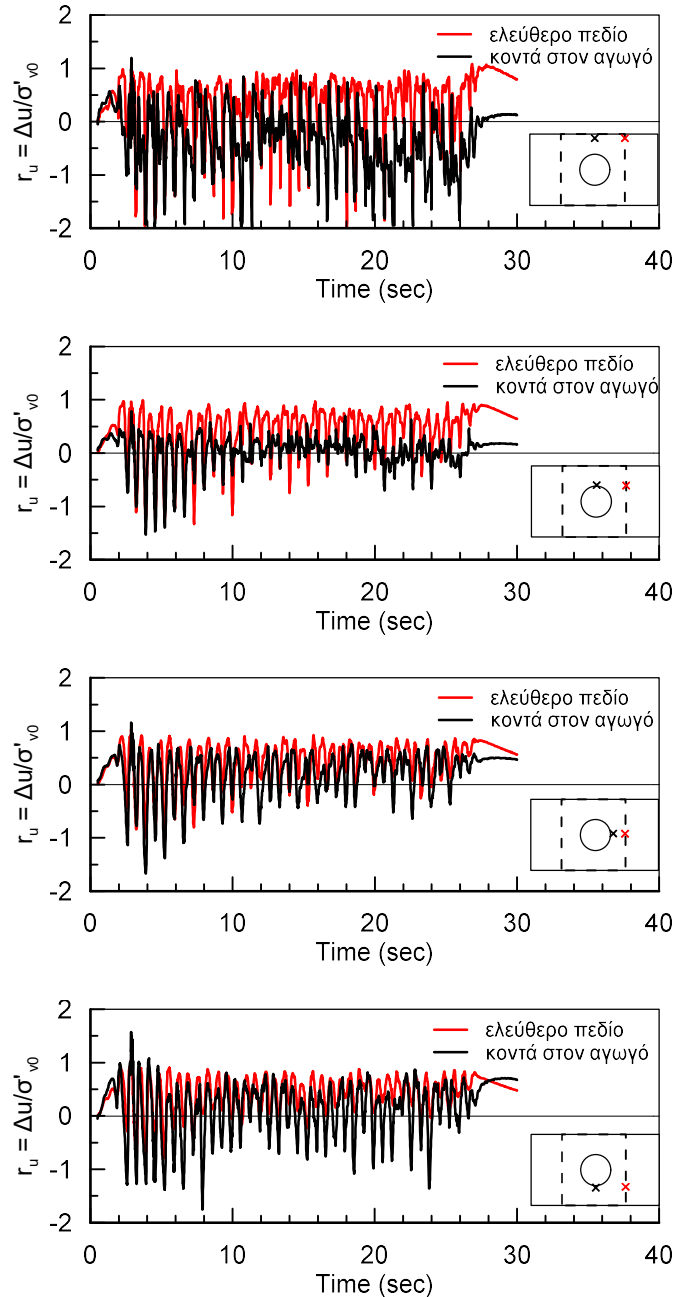
Σχήμα 4.5: Διανύσματα υπόγειας ροής στην αριθμητική ανάλυση αναφοράς γύρω από υπόγειο αγωγό σε ρευστοποιήσιμο έδαφος στο τέλος της διέγερσης

Επιπλέον, από το **Σχήμα 4.4** εξάγονται δύο βασικά συμπεράσματα: (α) υπάρχει έντονη διαφοροποίηση στις υπερπιέσεις πόρων κοντά στον αγωγό σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο και (β) το υπερκείμενο έδαφος δε ρευστοποιείται πλήρως, το οποίο σημαίνει ότι διατηρεί μέρος της διατμητικής του αντοχής προσφέροντας ικανή αντίσταση στην ανύψωση του αγωγού.

Ως συνέπεια των παραπάνω και έχοντας μια γενική ιδέα της κατανομής των r_u στο έδαφος κρίνεται απαραίτητο να εστιάσουμε στη μεταβολή των υπερπιέσεων τόσο κοντά όσο και μακριά από την περιοχή του αγωγού. Γι' αυτό στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται οι ιστορίες του λόγου υπερπιέσεων των πόρων σε τρεις χαρακτηριστικές θέσεις κοντά στον αγωγό (στην κάτω άντυγα, πλευρικά και στη στέψη του), στα αντίστοιχα βάθη μακριά από αυτόν, καθώς και κοντά στην επιφάνεια του εδάφους σε δύο θέσεις, μία πάνω από τον αγωγό και μία στο ελεύθερο πεδίο. Οι θέσεις αυτές θεωρούνται τυπικές και διατηρούνται σε όλες τις αναλύσεις που ακολουθούν, χάρη σύγκρισης. Πράγματι, συγκρίνοντας τις υπερπιέσεις που αναπτύσσονται στη στέψη του αγωγού με αυτές του ελεύθερου πεδίου στο ίδιο βάθος, παρατηρούμε ότι οι πρώτες είναι σημαντικά μικρότερες, ενώ το ίδιο συμβαίνει και για τις αντίστοιχες θέσεις κοντά στην επιφάνεια του

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος

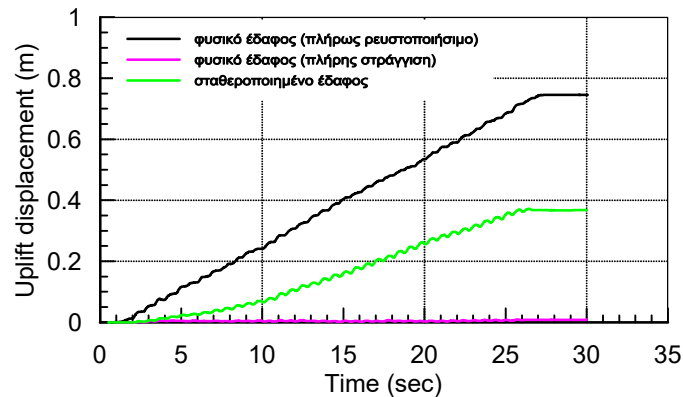
εδάφους. Πλευρικά του αγωγού παρατηρείται μειωμένη απόκριση στην ανάπτυξη των υπερπιέσεων καθ' όλη τη διάρκεια της διέγερσης. Κάτω από τον αγωγό, ενώ μετά το πέρας του σεισμού οι υπερπιέσεις των πόρων φαίνονται αυξημένες σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο, κάτι το οποίο συμφωνεί με τη γενική εικόνα του **Σχήματος 4.4**, οι τιμές κατά τη διάρκεια της διέγερσης είναι και πάλι χαμηλότερες απ' ότι στο ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 4.6: Σύγκριση χρονοϊστοριών του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u σε χαρακτηριστικές θέσεις κοντά στον αγωγό και μακριά από αυτόν για την αριθμητική ανάλυση αναφοράς υπόγειου αγωγού σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

4.2.2 Απόκριση σε πλήρως σταθεροποιημένο και πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απόκρισης του αγωγού σε δύο ακραίες συνθήκες αποτροπής της ρευστοποίησης που λειτουργούν ως καταστάσεις αναφοράς. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.7**, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες ανύψωσης του αγωγού για την περίπτωση που αυτός βρίσκεται εντός πλήρως ρευστοποιήσιμου, πλήρως σταθεροποιημένου και πλήρως στραγγιζόμενου εδάφους κατά τη διέγερση. Όπως παρατηρείται στο **Σχήμα 4.7** για συνθήκες πλήρους στράγγισης η ανύψωση του αγωγού είναι πρακτικά μηδενική. Συνεπώς, η βασική αιτία της ανύψωσης του αγωγού είναι η ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων, η οποία οφείλεται στις συνθήκες αδυναμίας πλήρους στράγγισης που επικρατούν κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Αυτή είναι και η αιτία για την ιδέα της χρήσης κολλοειδούς πυριτίας ως μέσο αντιμετώπισης της ανύψωσης. Στην περίπτωση σταθεροποιημένου εδάφους η ανάπτυξη υπερπιέσεων είναι μειωμένη αλλά όχι μηδενική, και έτσι παρατηρείται σημαντικά μειωμένη αλλά όχι μηδενική ανύψωση.



Σχήμα 4.7: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) φυσικό έδαφος υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες και (γ) πλήρως παθητικά σταθεροποιημένο έδαφος

Τονίζεται εδώ ότι η σταθεροποίηση ολόκληρης της εξεταζόμενης περιοχής οδηγεί στο μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό μείωσης της μετακίνησης του αγωγού με χρήση της προσομοίωσης κατά Αγαπουλάκη (2017), ενώ στα πρώτα δευτερόλεπτα της διέγερσης η ανύψωση είναι πρακτικώς μηδενική. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση προκύπτει 51% μείωση της τελικής ανύψωσης του αγωγού. Αυτό το ποσοστό θεωρείται ότι υποεκτιμά την πραγματική αποτελεσματικότητα της μεθόδου, καθώς η μέγιστη επιτάχυνση των 0.22g είναι στο άνω όριο εφαρμογής της προσομοίωσης κατά Αγαπουλάκη (2017). Παρόλα αυτά, το αποτέλεσμα αυτό θα αποτελέσει όριο αναφοράς για την αποτελεσματικότητα άλλων γεωμετρικών βελτίωσης παρακάτω.

Εξετάζοντας την ανάπτυξη των υδατικών υπερπιέσεων εντός του σταθεροποιημένου εδάφους (**Σχήμα 4.8**), παρατηρούμε ότι είναι σαφώς μειωμένες σε όλη την περιοχή πλησίον του αγωγού και μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Ο λόγος είναι και πάλι η ίδια η παρουσία του αγωγού, ο οποίος ανακλά τα σεισμικά κύματα που κατευθύνονται προς την επιφάνεια εκτρέποντάς τα από την

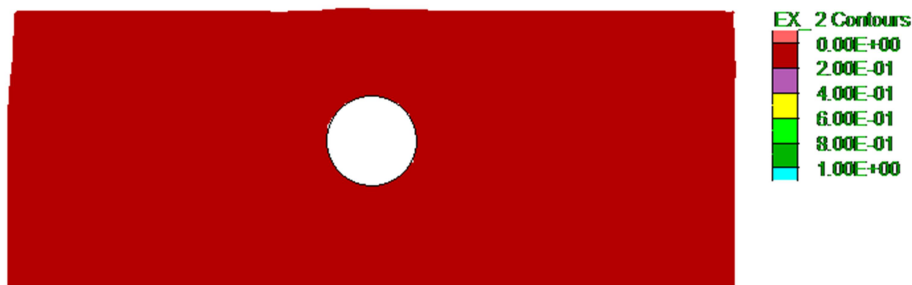
Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος

κατακόρυφη πορεία τους. Αλλά και στις πιο απομακρυσμένες από τον αγωγό περιοχές, οι τιμές των υπερπιέσεων που αναπτύσσονται είναι σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες για το φυσικό έδαφος (βλ. **Σχήμα 4.4**).



Σχήμα 4.8: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u για υπόγειο αγωγό σε πλήρως παθητικά σταθεροποιημένο έδαφος στο τέλος της διέγερσης

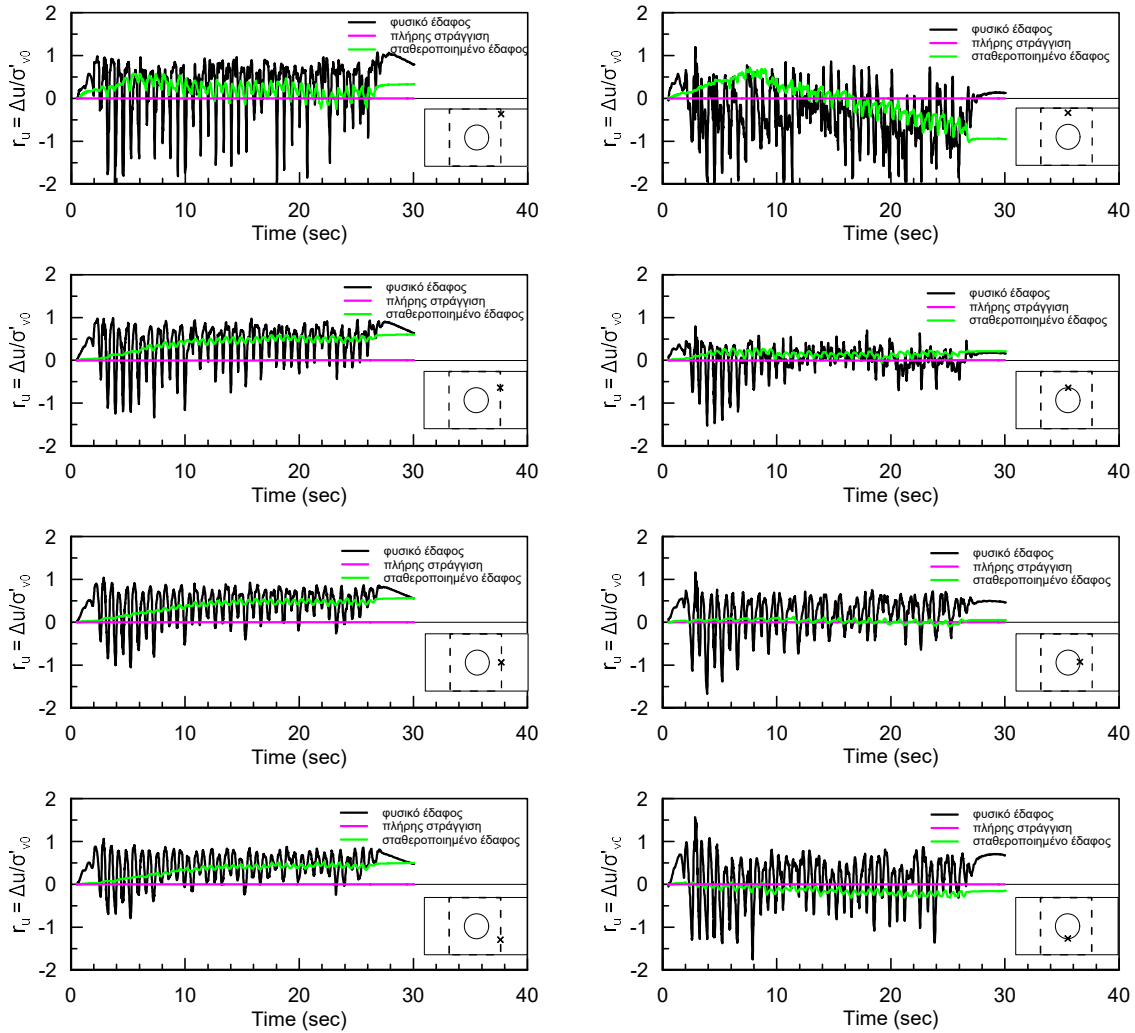
Η μηδενική ανύψωση του αγωγού για πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες σχετίζεται με την απουσία υδατικών υπερπιέσεων σε όλη την έκταση του καννάβου (**Σχήμα 4.9**).



Σχήμα 4.9: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u για υπόγειο αγωγό σε πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος στο τέλος της διέγερσης

Εστιάζοντας περαιτέρω στην ανάπτυξη των υπερπιέσεων, παρατίθενται στο **Σχήμα 4.10** οι ιστορίες των λόγων υδατικών υπερπιέσεων για τις περιπτώσεις του ρευστοποιήσιμου, του πλήρως σταθεροποιημένου και του πλήρως στραγγιζόμενου εδάφους. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για πλήρη στράγγιση δεν προκύπτει ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων, ενώ είναι φανερή η απομείωση που προσφέρει το σταθεροποιημένο έδαφος. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η σταθεροποίηση του εδάφους επιφέρει εκτός από σημαντική μείωση στην ανάπτυξη υπερπιέσεων και μείωση της διαστολικότητας του εδάφους όπως υποδεικνύουν οι κατά πολύ μικρότερες αιχμές των καμπυλών συγκριτικά με το φυσικό έδαφος. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη συμπίεσότητα της γέλης των πόρων και είναι συμβατή με τη βιβλιογραφία.

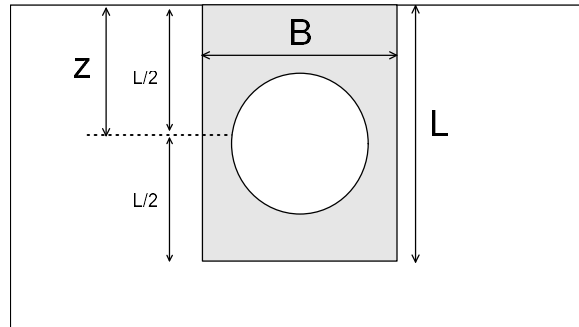
Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος



Σχήμα 4.10: Χρονοϊστορίες λόγου υπερπίεσεων r_u για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) φυσικό έδαφος υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες και (γ) πλήρως παθητικά σταθεροποιημένο έδαφος

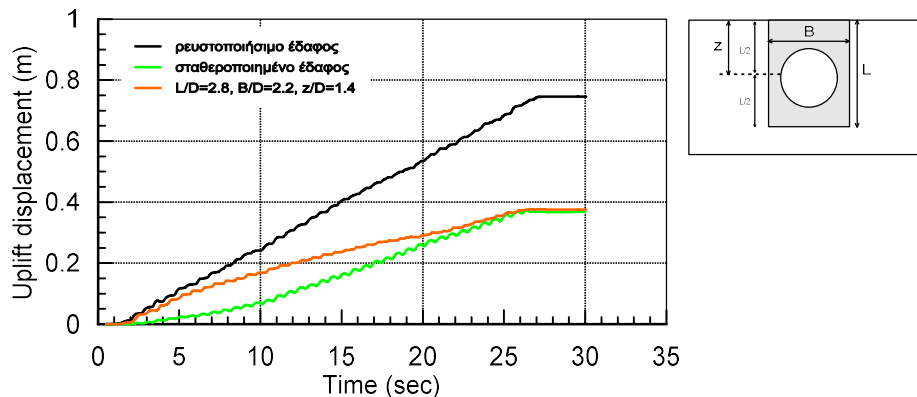
4.3 Αποτελεσματικότητα μερικής παθητικής σταθεροποίησης

Έχοντας κατανοήσει τη μηχανική συμπεριφορά και τα αποτελέσματα του σταθεροποιημένου εδάφους που επιφέρει η παθητική σταθεροποίηση στην ανύψωση του αγωγού εξετάζεται στη συνέχεια η απόδοση αυτής της μεθοδολογίας όχι πια για καθολική, αλλά για τοπική εφαρμογή της, δηλαδή μόνο στην περιοχή πλησίον του αγωγού (μερική σταθεροποίηση). Επιλέγεται έτσι μια γεωμετρία σταθεροποιημένης περιοχής μορφής τάφρου, στην οποία εγκιβωτίζεται ο αγωγός. Η γεωμετρία αυτή μπορεί να περιγραφεί από το πλάτος της L , το ύψος της B , και το βάθος της z , το οποίο μετράται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το κέντρο βάρους της σταθεροποιημένης περιοχής. Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζεται μια τυπική γεωμετρία της τάφρου με τις διαστάσεις της, ενώ στη συνέχεια τα μεγέθη αυτά θα αναφέρονται αδιαστατοποιημένα ως προς τη διάμετρο D του αγωγού.



Σχήμα 4.11: Γενική γεωμετρία και διάταξη σταθεροποιημένης περιοχής γύρω από τον αγωγό διαμέτρου D

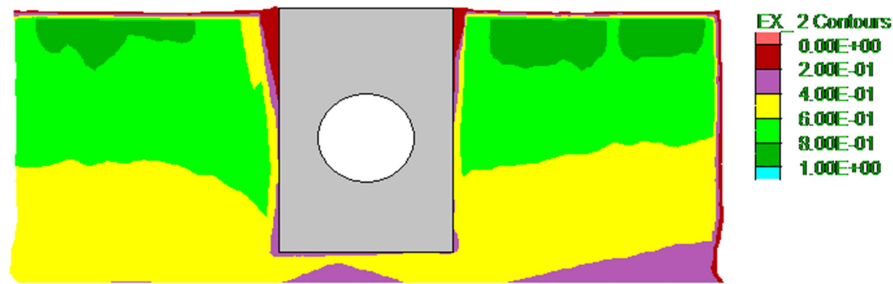
Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία ανύψωσης του αγωγού για την παραπάνω περίπτωση μερικής σταθεροποίησης συγκριτικά με τις χρονοϊστορίες ανύψωσης του φυσικού και του πλήρως σταθεροποιημένου εδάφους. Αυτό που γίνεται αμέσως αντιληπτό είναι ότι η σταθεροποίηση του εδάφους αρκετά μακριά από τον αγωγό δεν έχει ουσιαστική επίδραση στην τελική του ανύψωση, καθώς ο αγωγός δεν αλληλεπιδρά με το έδαφος σε μακρινή απόσταση, και συνεπώς είναι άδικο κόστος η σταθεροποίηση πέραν του όγκου που αντιστοιχεί σε $B/D = 2.2$ και $L/D = 2.8$.



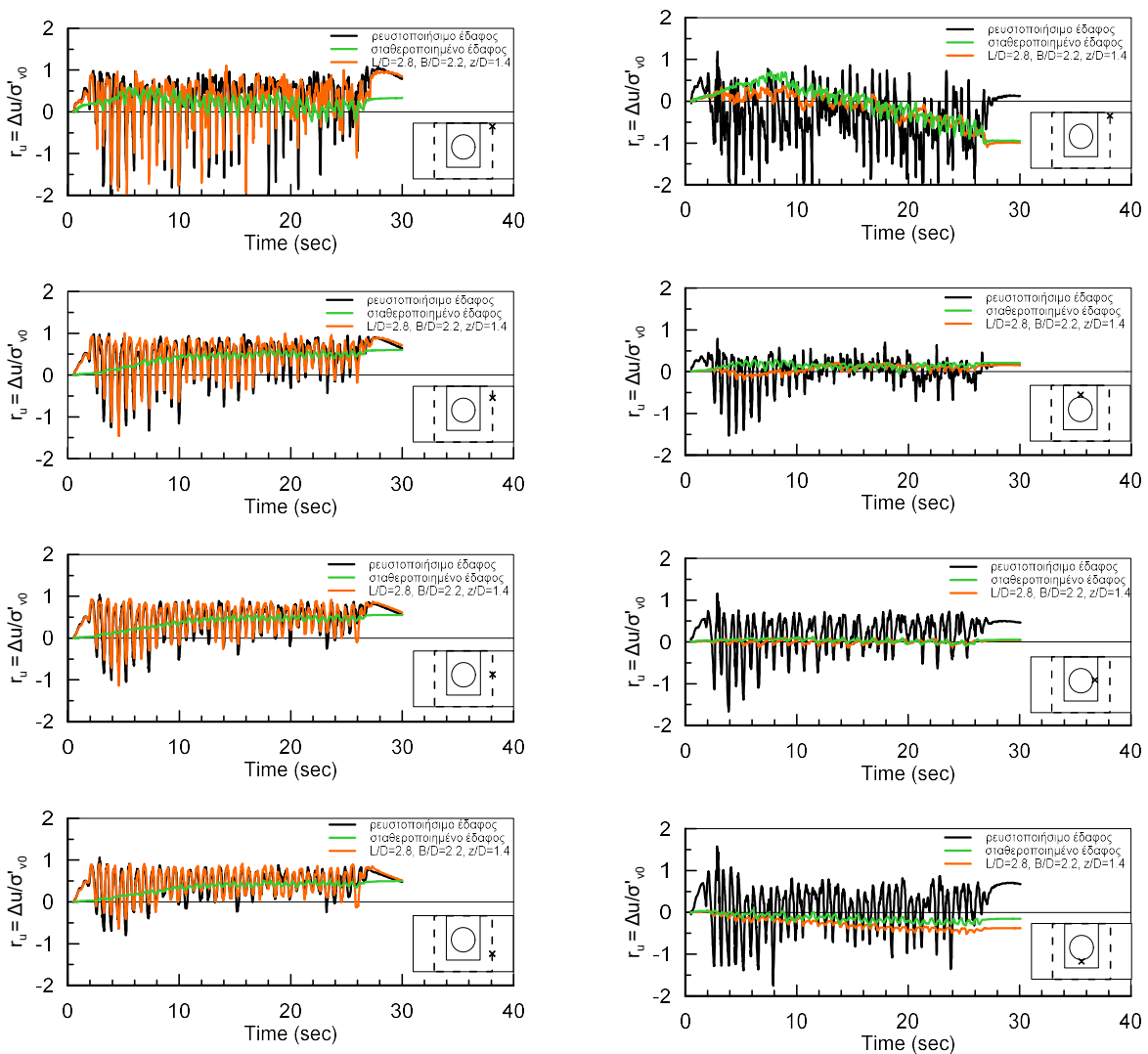
Σχήμα 4.12: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος και (γ) μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος πλάτους $B=2.2D$ και ύψους $L=2.8D$

Στα **Σχήμα 4.13** και **4.14** που ακολουθούν φαίνονται οι ισοκαμπύλες των λόγων των υδατικών υπερπιέσεων και οι χρονοϊστορίες τους στις χαρακτηριστικές θέσεις γύρω από τον αγωγό και στο ελεύθερο πεδίο αντίστοιχα. Η εκδήλωση της ρευστοποίησης είναι ορατή στο ελεύθερο πεδίο, ενώ εντός της σταθεροποιημένης περιοχής οι καμπύλες υποδεικνύουν σχεδόν μηδενική ανάπτυξη υπερπιέσεων.

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος

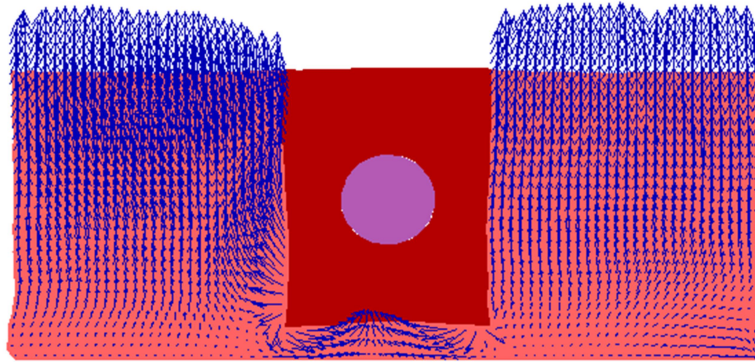


Σχήμα 4.13: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος, πλάτους $B=2.2D$ και ύψους $L=2.8D$, στο τέλος της διέγερσης



Σχήμα 4.14: Χρονοϊστορίες λόγου υπερπίεσεων r_u για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) πλήρως παθητικά σταθεροποιημένο έδαφος και (γ) μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος πλάτους $B=2.2D$ και ύψους $L=2.8D$

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και την κατεύθυνση της ροής εντός του εδάφους του **Σχήματος 4.15** παρατηρούμε ότι το νερό, κινούμενο προς την επιφάνεια, αναγκάζεται να παρακάμψει το σταθεροποιημένο κομμάτι με τη σχεδόν μηδενική διαπερατότητα και οδηγείται να εκτονωθεί στην ελεύθερη επιφάνεια πλευρικών αυτού.



Σχήμα 4.15: Διανύσματα υπόγειας ροής γύρω από υπόγειο αγωγό σε μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος πλάτους $B=2.2D$ και ύψους $L=2.8D$ στο τέλος της διέγερσης

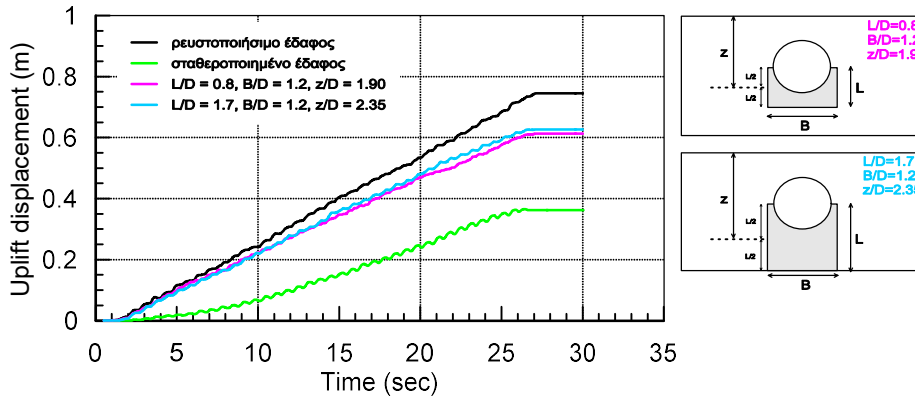
4.4 Βελτιστοποίηση μερικής σταθεροποίησης

Έχοντας εξάγει το συμπέρασμα ότι η μείωση της ανύψωσης – που είναι το ζητούμενο – μπορεί να επιτευχθεί σταθεροποιώντας μόνο μια περιορισμένη περιοχή γύρω από τον αγωγό, αναζητείται μια βέλτιστη προσέγγιση με σκοπό τη μείωση της έκτασης της σταθεροποιημένης περιοχής (για λόγους κόστους) σε συνδυασμό με το ποσοστό βελτίωσης σε όρους ανύψωσης του αγωγού. Για την άμεση σύγκριση με τα προηγούμενα, οι περιπτώσεις που εξετάζονται στη συνέχεια χαρακτηρίζονται από τους λόγους L/D , B/D και z/D που αναφέρθηκαν προηγουμένως και συγκρίνονται, εκτός από την αριθμητική ανάλυση αναφοράς, και με τη μέγιστη δυνατή (καθολική) σταθεροποίηση του εδάφους. Σημειώνεται εδώ ότι τα πλήρη αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα της εργασίας (**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**) και εδώ παρουσιάζονται μόνο στοχευμένα αποτελέσματα.

4.4.1 Αποτελεσματικότητα παθητικής σταθεροποίησης κάτω από τον αγωγό

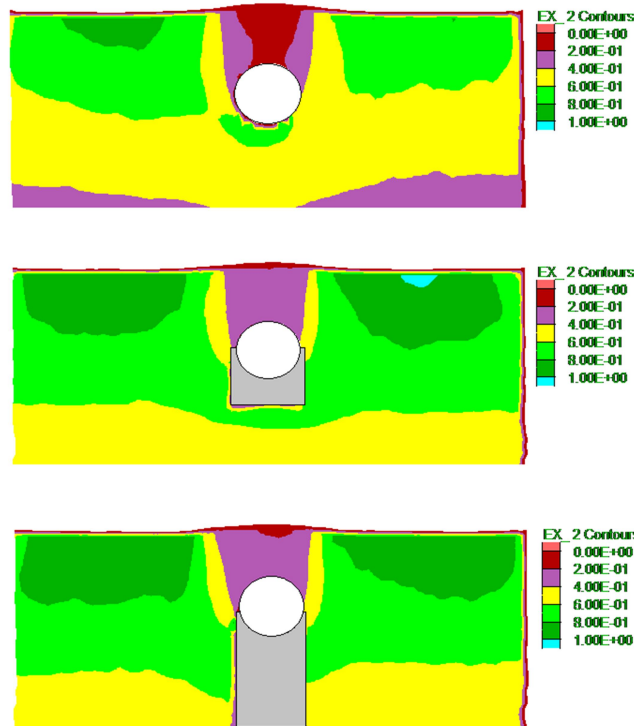
Αρχικά εξετάζεται η απόδοση της μεθόδου για εφαρμογή της μόνο κάτω από τον αγωγό, δηλαδή με σταθερό πλάτος $B = 1.2D$. Στο **Σχήμα 4.16** παρατηρούμε τις χρονοϊστορίες ανύψωσης για ύψη σταθεροποίησης $L = 0.8D$ και $L = 1.7D$, το οποίο εκτείνεται ως τη βάση του καννάβου και επομένως αντιστοιχεί στο μέγιστο δυνατό. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η βελτίωση του εδάφους κάτω από τον αγωγό είναι ικανή να συμβάλλει στη συγκράτησή του, όμως η διάσταση του ύψους δεν έχει καμία επίδραση στη μείωση της μετακίνησης.

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος



Σχήμα 4.16: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος και (γ) μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος ύψους $L=0.8D$ και $1.7D$ αντίστοιχα

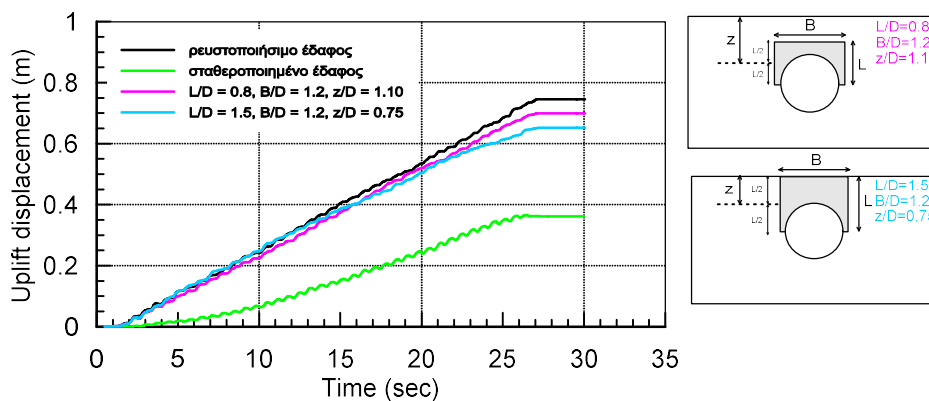
Συγκρίνοντας τις ισοκαμπύλες των λόγων υδατικών υπερπιέσεων r_u στο πέρας της σεισμικής διέγερσης (**Σχήμα 4.17**) παρατηρούμε ότι η εκτόνωση επιβραδύνεται στην περίπτωση της εφαρμογής σταθεροποίησης, καθώς για την ίδια χρονική στιγμή οι τιμές των υπερπιέσεων είναι αυξημένες συγκριτικά με την περίπτωση του φυσικού εδάφους, αλλά όχι και πάνω από τον αγωγό. Σε κάθε περίπτωση το $L = 0.8D$ δείχνει να επαρκεί συγκριτικά, και να μη χρειάζεται η αύξησή του μέχρι το $L = 1.7D$.



Σχήμα 4.17: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος, ύψους $L=0.8D$ και $1.7D$, στο τέλος της διέγερσης

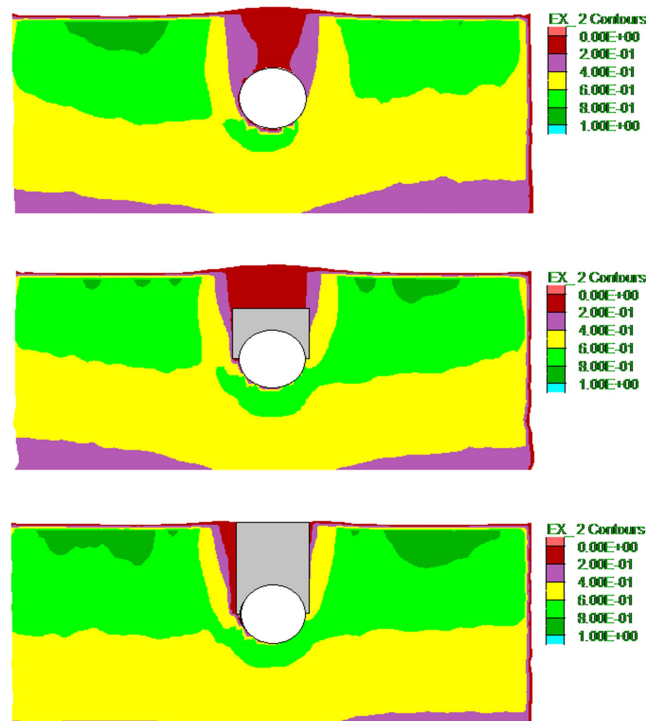
4.4.2 Αποτελεσματικότητα παθητικής σταθεροποίησης πάνω από τον αγωγό

Κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα εξετάζεται η περίπτωση σταθεροποίησης της περιοχής μόνο πάνω από τον αγωγό, για ίδιο πλάτος $B = 1.2D$ και ύψη $L = 0.8D$ και $1.5D$, με τη δεύτερη περίπτωση να αντιστοιχεί επίσης στο μέγιστο δυνατό ύψος εφαρμογής, δηλαδή από το κέντρο του αγωγού ως την επιφάνεια του εδάφους. Από τις χρονοϊστορίες ανύψωσης που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.18** προκύπτει ότι η ανύψωση για την περίπτωση της σταθεροποίησης σε ύψος $L = 0.8D$ είναι πολύ κοντά στην καμπύλη του φυσικού εδάφους, ενώ ακόμα και για μεγιστοποίηση του ύψους δεν παρατηρείται ουσιαστική μείωση της ανύψωσης. Έχοντας κατά νου και τις ανυψώσεις για την περίπτωση σταθεροποίησης κάτω από τον αγωγό καταλήγουμε ότι η μείωση που επιφέρει αυτή η προσέγγιση μερικής σταθεροποίησης πάνω από τον αγωγό δεν είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 4.18: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποίησιμο), (β) πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος και (γ) μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος ύψους $L=0.8D$ και $1.5D$ αντίστοιχα

Η ανάπτυξη των υδατικών υπερπιέσεων στο πέρας του σεισμού, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.19**, είναι και πάλι εντονότερη στο ελεύθερο πεδίο για την περίπτωση όπου εφαρμόζεται η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει μεταφορά των πιέσεων μακριά από τον αγωγό, όπως και στην προηγούμενη προσέγγιση. Ωστόσο, σε αυτήν την προσέγγιση, οι υπερπιέσεις των πόρων στην περιοχή που επιλέγεται να σταθεροποιηθεί είναι ήδη μειωμένες λόγω της παρουσίας του αγωγού και ίσως αυτός είναι ο λόγος που είναι λιγότερο αποδοτική.

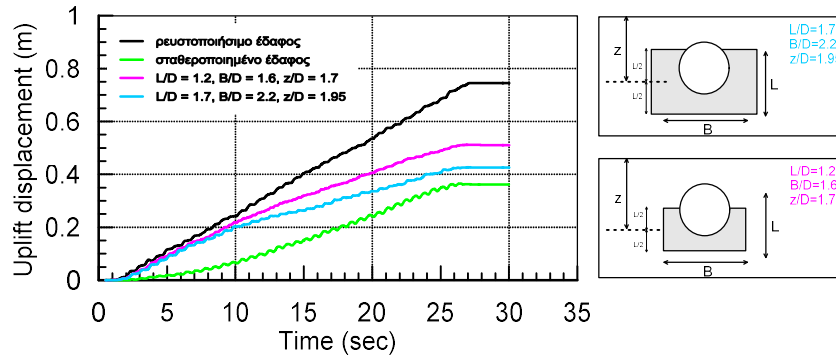


Σχήμα 4.19: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπείσεων πόρων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος, ύψους $L=0.8D$ και $1.5D$, στο τέλος της διέγερσης

4.4.3 Αποτελεσματικότητα παθητικής σταθεροποίησης κάτω και πλευρικά του αγωγού

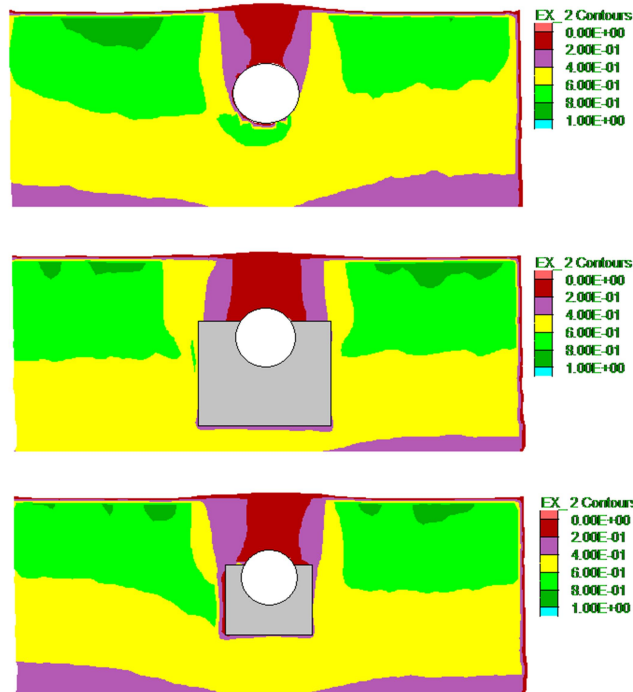
Εφόσον διαπιστώθηκε ότι η συμβολή της σταθεροποίησης πάνω από τον αγωγό δεν είναι ουσιώδης, εξετάζεται στη συνέχεια η ίδια διάταξη αφαιρώντας το άνω τμήμα της σταθεροποιημένης περιοχής. Στο **Σχήμα 4.20** παρουσιάζονται τα διαγράμματα ανύψωσης του αγωγού για πλάτη $B = 2.2D$ και $B = 1.6D$, και ύψη $L = 1.7D$ και $L = 1.2D$ αντίστοιχα. Πράγματι, η σταθεροποίηση πάνω από τον αγωγό έχει μικρό αντίκτυπο στην ανύψωση του αγωγού για την εξοικονόμηση υλικού που προσφέρει η αφαίρεσή του. Επιπλέον παρατηρούμε ότι με ταυτόχρονη αύξηση του πλάτους και του ύψους της σταθεροποιημένης περιοχής μειώνεται η ανύψωση, και δεδομένου ότι το ύψος δεν παίζει ρόλο στη μετακίνηση, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι πιθανόν αυτή η μείωση να οφείλεται αποκλειστικά στην αύξηση του πλάτους.

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος



Σχήμα 4.20: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος και (γ) μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος πλάτους $B=1.6D$ και $B=2.2D$ και ύψους $L=1.2D$ και $1.7D$ αντίστοιχα

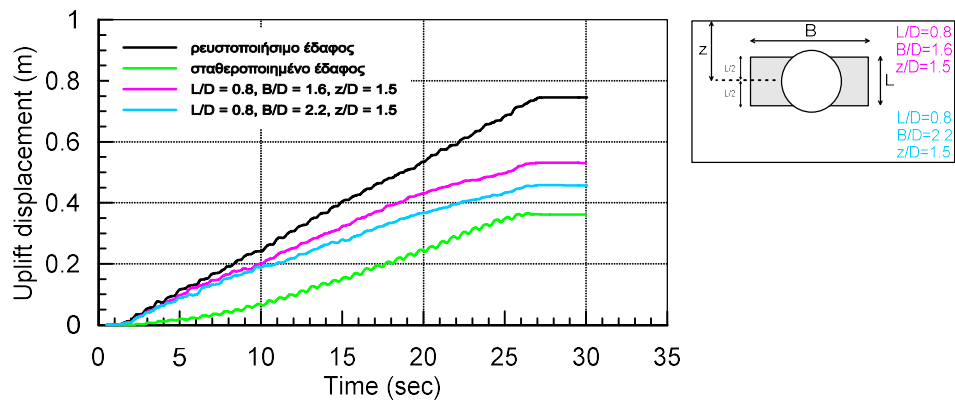
Στο **Σχήμα 4.21** που ακολουθεί, φαίνονται οι ισοκαμπύλες των λόγων υδατικών υπερπιέσεων. Μια σημαντική παρατήρηση εδώ είναι ότι πάνω από τον αγωγό παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές υπερπιέσεων σε μια έκταση ίση με το πλάτος της σταθεροποιημένης περιοχής. Αυτό υποδηλώνει ότι η αύξηση του πλάτους της σταθεροποιημένης περιοχής επιτρέπει την ταχύτερη στράγγιση σε μεγαλύτερη περιοχή πάνω από τον αγωγό.



Σχήμα 4.21: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος, πλάτους $B=1.6D$ και $B=2.2D$ και ύψους $L=0.8D$ και $1.5D$ αντίστοιχα, στο τέλος της διέγερσης

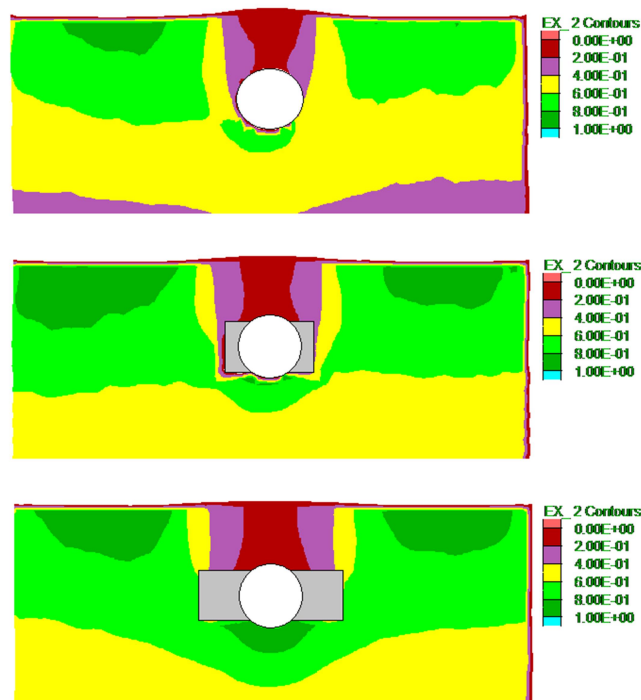
4.4.4 Επιλογή βέλτιστης γεωμετρίας εφαρμογής της παθητικής σταθεροποίησης

Στη συνέχεια επιλέγεται να εξεταστεί η περίπτωση εφαρμογής της σταθεροποίησης μόνο πλευρικά του αγωγού, διατηρώντας τα ίδια πλάτη με πριν, δηλαδή $B = 2.2D$ και $B = 1.6D$. Από τις χρονοϊστορίες ανύψωσης που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.22**, παρατηρείται σημαντική μείωση της ανύψωσης, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται και το πλάτος της σταθεροποιημένης περιοχής. Συγκρίνοντας μάλιστα αυτά τα διαγράμματα με τις χρονοϊστορίες ανύψωσης της προηγούμενης περίπτωσης παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι παρόμοια για επιπλέον σταθεροποίηση κάτω από τον αγωγό.



Σχήμα 4.22: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος και (γ) μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος πλάτους $B=1.6D$ και $B=2.2D$ αντίστοιχα

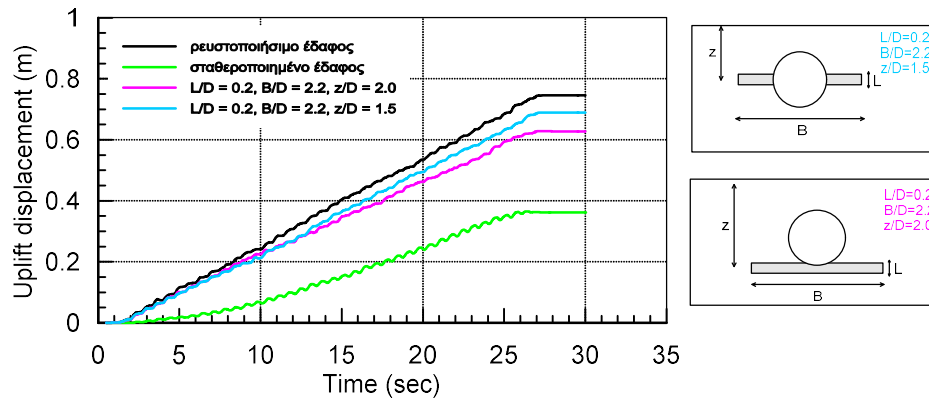
Σε ανάλογο συμπέρασμα καταλήγουμε και από τις ισοκαμπύλες των λόγων υδατικών υπερπιέσεων του **Σχήματος 4.23**, όπου η περιοχή των χαμηλών τιμών υπερπιέσεων πάνω από τον αγωγό αυξάνεται με την αύξηση του πλάτους της σταθεροποιημένης περιοχής. Η εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών υπερπιέσεων κάτω από τον αγωγό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι το αδιαπέρατο τμήμα που συναντά το νερό των πόρων προσπαθώντας να εκτονωθεί προς την επιφάνεια είναι μεγαλύτερο κατά πλάτος μετά την εισπίεση του ενέματος και συνεπώς η αποτόνωση των υπερπιέσεων στο σημείο αυτό καθυστερεί.



Σχήμα 4.23: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπλίσεων πόρων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος, πλάτους $B=1.6D$ και $B=2.2D$, στο τέλος της διέγερσης

Με βάση τα ανωτέρω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η διάσταση που παίζει τον πιο καθοριστικό ρόλο στην τελική ανύψωση του αγωγού είναι το πλάτος της σταθεροποιημένης περιοχής. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη ικανού ύψους L είναι απαραίτητη για την αντίσταση στην ανύψωση, όπως γίνεται φανερό στις ακόλουθες χρονοϊστορίες ανύψωσης (Σχήμα 4.24). Η εφαρμογή σταθεροποίησης με μορφή λωρίδας, δηλαδή μικρού πάχους συγκριτικά με το μήκος, δεν είναι αποδοτική ανεξάρτητα με τη θέση εφαρμογής της ως προς τον αγωγό. Επομένως, απαιτείται ένα ικανό ύψος σταθεροποίησης περίπου ίσο με τη διάμετρο του αγωγού, έτσι ώστε αυτός να καλύπτεται πλευρικά για να μπορέσει να αντισταθεί στην μετακίνηση που του επιβάλλεται από τον σεισμό.

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος




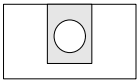
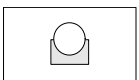
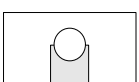
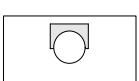
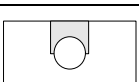
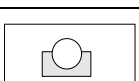
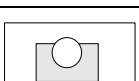
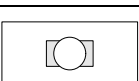
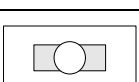
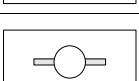
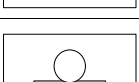
Σχήμα 4.24: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για (α) φυσικό έδαφος (πλήρως ρευστοποιήσιμο), (β) πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος και (γ) μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος ύψους $L=0.2D$ και βάθους $z=1.5D$ και $2.0D$ αντίστοιχα

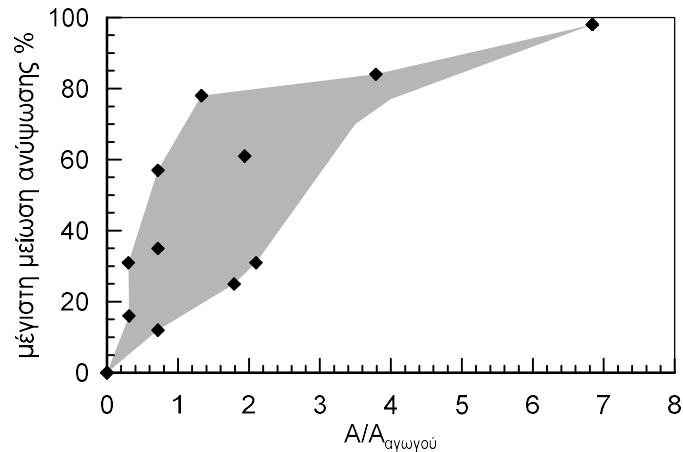
Ολοκληρώνοντας αυτή την ενότητα, στον **Πίνακα 4.1** που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για κάθε γεωμετρία που εξετάστηκε οι διαστάσεις της (L , B , z), το εμβαδό που καταλαμβάνει (A) συγκριτικά με τη διατομή του αγωγού ($A_{\alpha\gamma\omega\gamma\acute{o}\upsilon}$), καθώς και το ποσοστό βελτίωσης που προσφέρει σε όρους ανύψωσης του αγωγού συγκριτικά με το ρευστοποιήσιμο (ποσοστό μείωσης ανύψωσης), αλλά και με το καθολικά σταθεροποιημένο έδαφος (ποσοστό μέγιστης μείωσης ανύψωσης). Στην πρώτη γραμμή του πίνακα φαίνεται το μέγιστο ποσοστό βελτίωσης για το καθολικά σταθεροποιημένο έδαφος. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως τα ποσοστά αυτά αναφέρονται στην ανύψωση που αναπτύσσεται στο τέλος της διέγερσης.

Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο **Σχήμα 4.25**, όπου συσχετίζεται το ποσοστό της μέγιστης μείωσης ανύψωσης με τον λόγο $A/A_{\alpha\gamma\omega\gamma\acute{o}\upsilon}$ με τον οποίο επιτυγχάνεται. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η γεωμετρία εκείνη η οποία θεωρείται ότι προσφέρει ικανοποιητικό ποσοστό βελτίωσης έναντι της ανύψωσης του αγωγού σε συνδυασμό με την απαιτούμενη έκταση και κατά συνέπεια το απαιτούμενο κόστος είναι αυτή με ύψος $L = 0.8D$, πλάτος $B = 2.2D$ και θέση εφαρμογής σε βάθος $z = 1.5D$, μετρούμενο από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο βάρους της σταθεροποιημένης περιοχής.

Κεφάλαιο 4: Διερεύνηση της Απόκρισης Υπόγειου Αγωγού σε Παθητικά Σταθεροποιημένο Έδαφος

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μερικής σταθεροποίησης του εδάφους

	L/D	B/D	z/D	A/A _{αγωγού}	Ποσοστό μείωσης ανύψωσης	Ποσοστό μέγιστης μείωσης ανύψωσης
	-	-	-	-	51%	100%
	2.8	2.2	1.4	6.84	50%	98%
	0.8	1.2	1.9	0.72	18%	35%
	1.7	1.2	2.35	2.10	16%	31%
	0.8	1.2	1.1	0.72	6%	12%
	1.5	1.2	0.75	1.79	13%	25%
	1.2	1.6	1.7	1.94	31%	61%
	1.7	2.2	1.95	3.79	43%	84%
	0.8	1.6	1.5	0.72	29%	57%
	0.8	2.2	1.5	1.33	40%	78%
	0.2	2.2	1.5	0.31	8%	16%
	0.2	2.2	2.0	0.30	16%	31%



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα συσχέτισης του ποσοστού μέγιστης μείωσης ανύψωσης και του λόγου $A/A_{\alpha\omega\gamma\omicron\upsilon}$ με τον οποίο επιτυγχάνεται

4.5 Συμπεράσματα - Σχόλια

Συνοψίζοντας αυτό το κεφάλαιο μπορούμε να καταλήξουμε στα παρακάτω σημαντικά συμπεράσματα:

- vii. Σε φυσικό έδαφος οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στην περιοχή του αγωγού είναι διαφορετικές από αυτές στο ελεύθερο πεδίο. Κοντά στον αγωγό και ιδιαίτερα πάνω από την στέψη του οι υπερπιέσεις είναι μειωμένες συγκριτικά με το ελεύθερο πεδίο, με αποτέλεσμα το έδαφος να διατηρεί μέρος της διατμητικής του αντοχής.
- viii. Η εφαρμογή της σταθεροποίησης με εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας είναι αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται στις περιοχές εκείνες γύρω από τον αγωγό όπου η ανάπτυξη των υπερπιέσεων είναι σημαντική ($r_u > 0.5$). Αυτό υποδηλώνει την ανάγκη για ενίσχυση του εδάφους κυρίως πλευρικά και κάτω από τον αγωγό, καθώς πάνω από τη στέψη του το έδαφος παρουσιάζει ήδη ευνοϊκή απόκριση λόγω της παρουσίας του αγωγού.
- ix. Το πλάτος της σταθεροποιημένης περιοχής αποτελεί την πιο καθοριστική διάσταση για τον περιορισμό της ανύψωσης του αγωγού. Αυτό πιθανώς συμβαίνει διότι αυξάνεται το μήκος παράκαμψης του αδιαπέρατου τμήματος που ακολουθεί η κίνηση του νερού προς την επιφάνεια όπου και εκτονώνεται, επεκτείνοντας έτσι το πλάτος του υπερκείμενου εδάφους που δρα σταθεροποιητικά για τον αγωγό.
- x. Η ύπαρξη ικανού πάχους της ζώνης σταθεροποίησης είναι αναγκαία για τον περιορισμό της ανύψωσης. Το πάχος αυτό πρέπει να είναι περίπου ίσο με τη διάμετρο του αγωγού έτσι ώστε να τον καλύπτει ουσιαστικά πλευρικά, ενώ δε χρειάζεται να εκτείνεται κάτω από αυτόν.

5

Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση

5.1 Γενικά

Οι παράμετροι διέγερσης και τα χαρακτηριστικά του αγωγού που θεωρήθηκαν στην ανάλυση αναφοράς δε θεωρούνται αντιπροσωπευτικά μιας τυπικής περίπτωσης της συνήθους πρακτικής, και υιοθετήθηκαν για λόγους συμβατότητας με τα πειραματικά αποτελέσματα των Chian et al. (2014). Έτσι, κρίνεται χρήσιμη η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της βέλτιστης γεωμετρίας παθητικής σταθεροποίησης για περιπτώσεις που αφορούν είτε αγωγούς μικρότερων διαστάσεων ή συνηθέστερες σεισμικές διεγέρσεις. Κατά συνέπεια, στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται η επίδραση της μείωσης της επιβαλλόμενης μέγιστης επιτάχυνσης, της δεσπόζουσας περιόδου της διέγερσης, της διαμέτρου του αγωγού, καθώς επίσης και η επίδραση της αύξησης του λόγου εγκιβωτισμού του αγωγού. Όλα τα παραπάνω εξετάζονται τόσο για την περίπτωση του φυσικού εδάφους, όσο και για την περίπτωση παθητικής σταθεροποίησης (πλήρους ή μερικής). Σημειώνεται ότι η κάθε παράμετρος εξετάζεται ξεχωριστά, διατηρώντας τις υπόλοιπες ως έχουν στην ανάλυση αναφοράς, έτσι ώστε να είναι άμεση η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

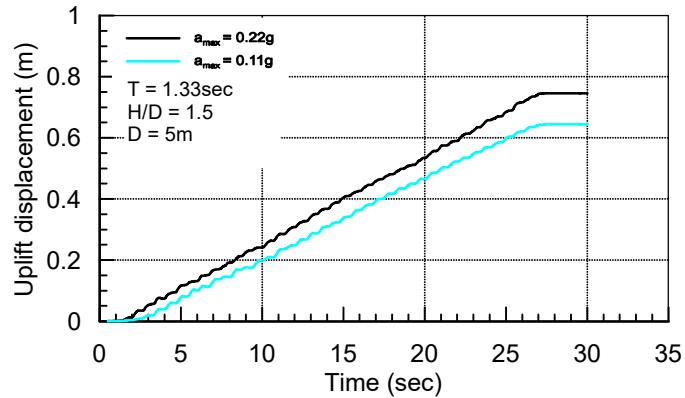
5.2 Επίδραση των παραμέτρων ενδιαφέροντος πριν από τη σταθεροποίηση

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται αρχικά η επίδραση που έχει η αλλαγή της κάθε παραμέτρου πριν τη σταθεροποίηση («φυσικό» έδαφος) σε όρους ανύψωσης αγωγού και ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων γύρω από αυτόν.

5.2.1 Επίδραση επιβαλλόμενης μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης

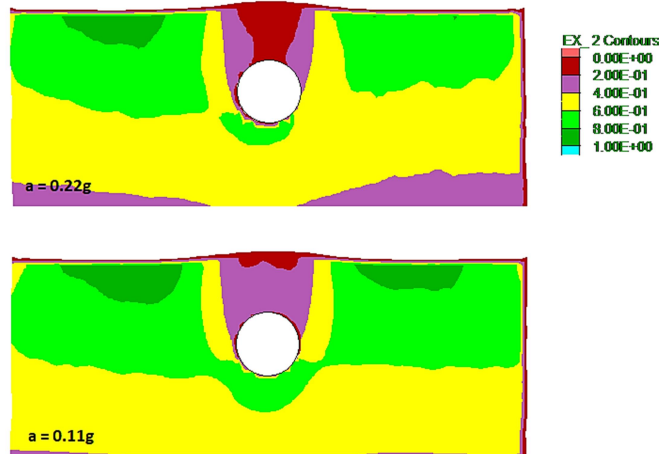
Για την εξέταση της επιρροής της επιβαλλόμενης μέγιστης επιτάχυνσης επιλέγεται η τιμή 0.11g, ενώ η περίοδος της διέγερσης διατηρείται ίδια με αυτή της ανάλυσης αναφοράς ($T = 1.33\text{sec}$). Από τη χρονοϊστορία ανύψωσης του αγωγού στο φυσικό έδαφος (βλ. **Σχήμα 5.1**) φαίνεται ότι η μείωση της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης επιφέρει μικρή μείωση και της τελικής ανύψωσης του αγωγού.

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



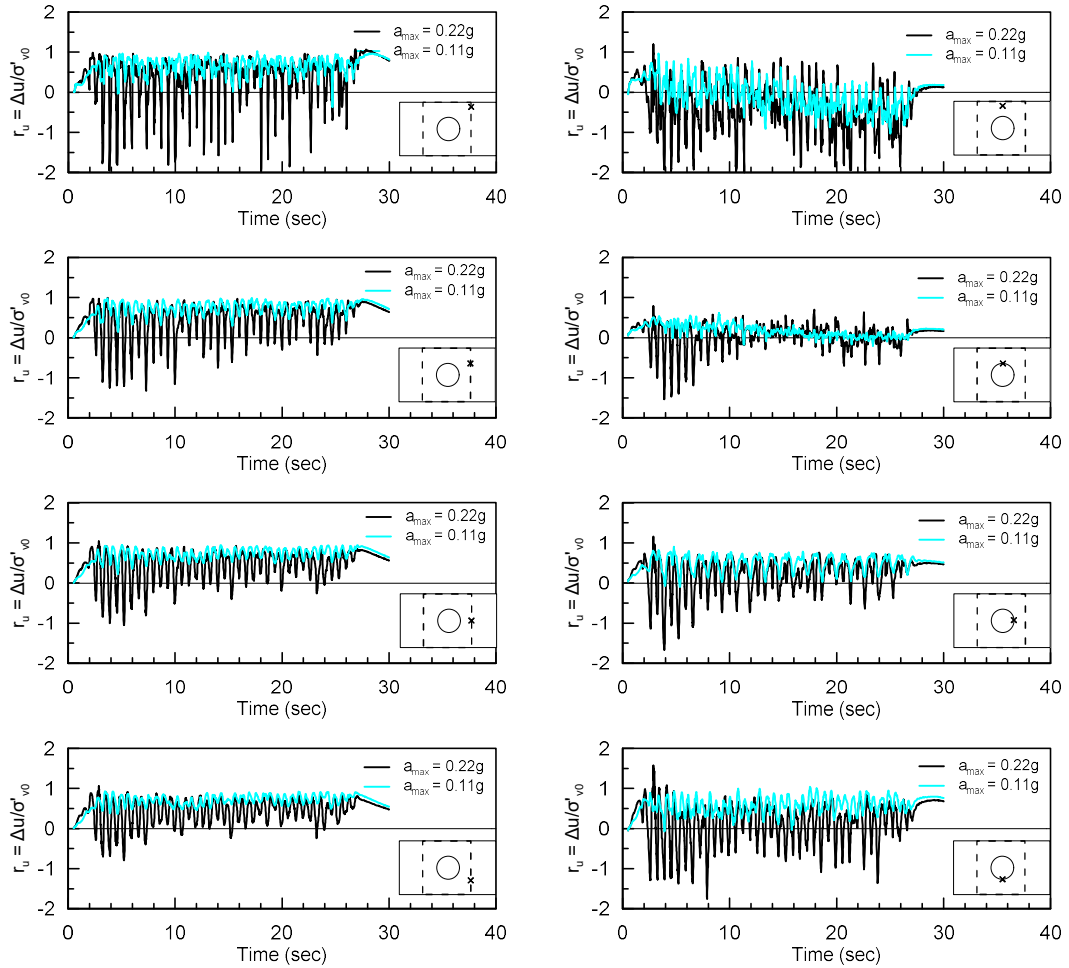
Σχήμα 5.1: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για επιβαλλόμενη μέγιστη επιτάχυνση βάσης 0.11g και 0.22g και δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33\text{sec}$, για υπόγειο αγωγό πριν τη σταθεροποίηση («φυσικό έδαφος»)

Επιπλέον, στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται ισοκαμπύλες των λόγων υδατικών υπερπιέσεων r_u στο τέλος της διέγερσης, από τις οποίες φαίνεται να αναπτύσσονται υψηλότερες υπερπιέσεις πόρων για επιτάχυνση 0.11g. Για τη διερεύνηση αυτού του αντιφατικού αποτελέσματος διερευνώνται οι χρονοϊστορίες των r_u , οι οποίες δε δείχνουν σημαντική διαφοροποίηση στις τιμές των μέγιστων υδατικών υπερπιέσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της διέγερσης, ενώ στην περίπτωση της επιτάχυνσης 0.11g οι αιχμές διαστολικότητας είναι σαφώς μειωμένες, γεγονός που δικαιολογεί και την αύξηση εν τέλει της τιμής των r_u (βλ. **Σχήμα 5.3**). Οι εν λόγω έντονες αιχμές διαστολικότητας για 0.22g οδηγούν σε εντονότερη ταλάντωση του αγωγού που εξηγεί τη σχετικώς αυξημένη ανύψωσή του, υπερνικώντας την αντίθετη επίδραση των μειωμένων r_u στην απόκριση.



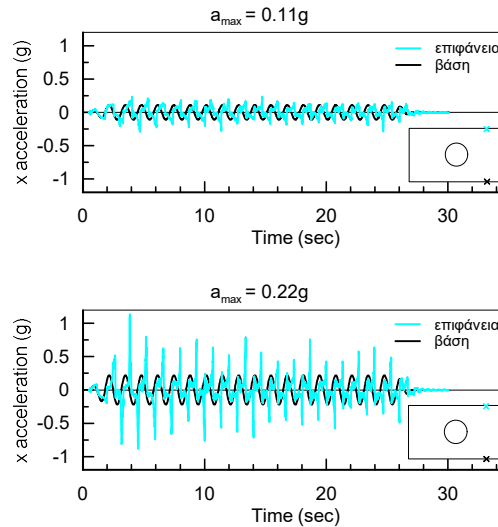
Σχήμα 5.2: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u στο τέλος της διέγερσης για μέγιστη επιτάχυνση βάσης 0.11g και 0.22g και δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33\text{sec}$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



Σχήμα 5.3: Σύγκριση χρονιοιστοριών του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u σε διάφορες θέσεις, για μέγιστη επιτάχυνση βάσης $0.11g$ και $0.22g$ και δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33sec$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

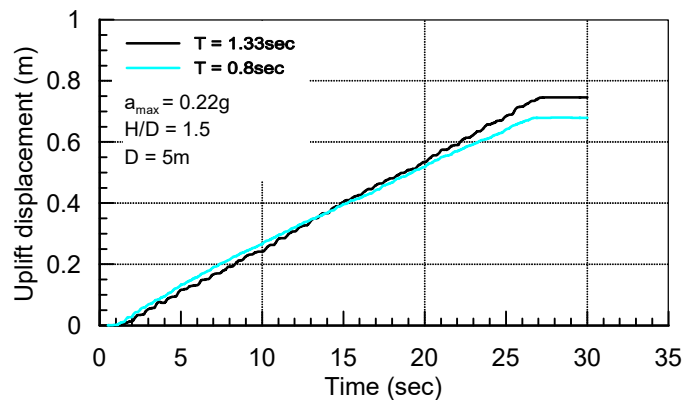
Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



Σχήμα 5.4: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για μέγιστη επιτάχυνση βάσης 0.11g και 0.22g και δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33\text{sec}$ στη βάση και στην επιφάνεια, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

5.2.2 Επίδραση δεσπόζουσας περιόδου σεισμικής διέγερσης

Στη συνέχεια επιχειρείται η εξέταση της απόκρισης του εδάφους για μικρότερη τιμή δεσπόζουσας περιόδου της διέγερσης και συγκεκριμένα για $T = 0.8\text{ sec}$. Κατά την εκτέλεση της ανάλυσης διατηρήθηκε σταθερή η συνολική διάρκεια της διέγερσης μεταβάλλοντας κατάλληλα τον αριθμό των κύκλων φόρτισης ενώ η τιμή της επιβαλλόμενης μέγιστης επιτάχυνσης διατηρήθηκε ίση με αυτή της ανάλυσης αναφοράς ($a_{\text{max}} = 0.22\text{g}$). Από τη χρονοϊστορία της ανύψωσης του αγωγού για το «φυσικό» έδαφος παρατηρείται ότι η μείωση της τιμής της περιόδου T έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή μείωση της τελικής ανύψωσης (βλ. **Σχήμα 5.5**).

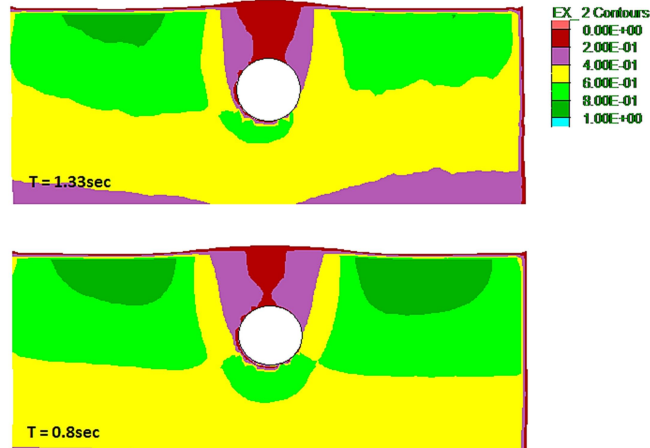


Σχήμα 5.5: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για δεσπόζουσα περίοδο σεισμικής διέγερσης $T = 0.8\text{sec}$ και $T = 1.33\text{sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{\text{max}} = 0.22\text{g}$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

Ωστόσο, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.6**, όπου παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες των λόγων υδατικών υπερπιέσεων στο τέλος της διέγερσης, είναι φανερό ότι οι υπερπιέσεις που έχουν αναπτυχθεί για

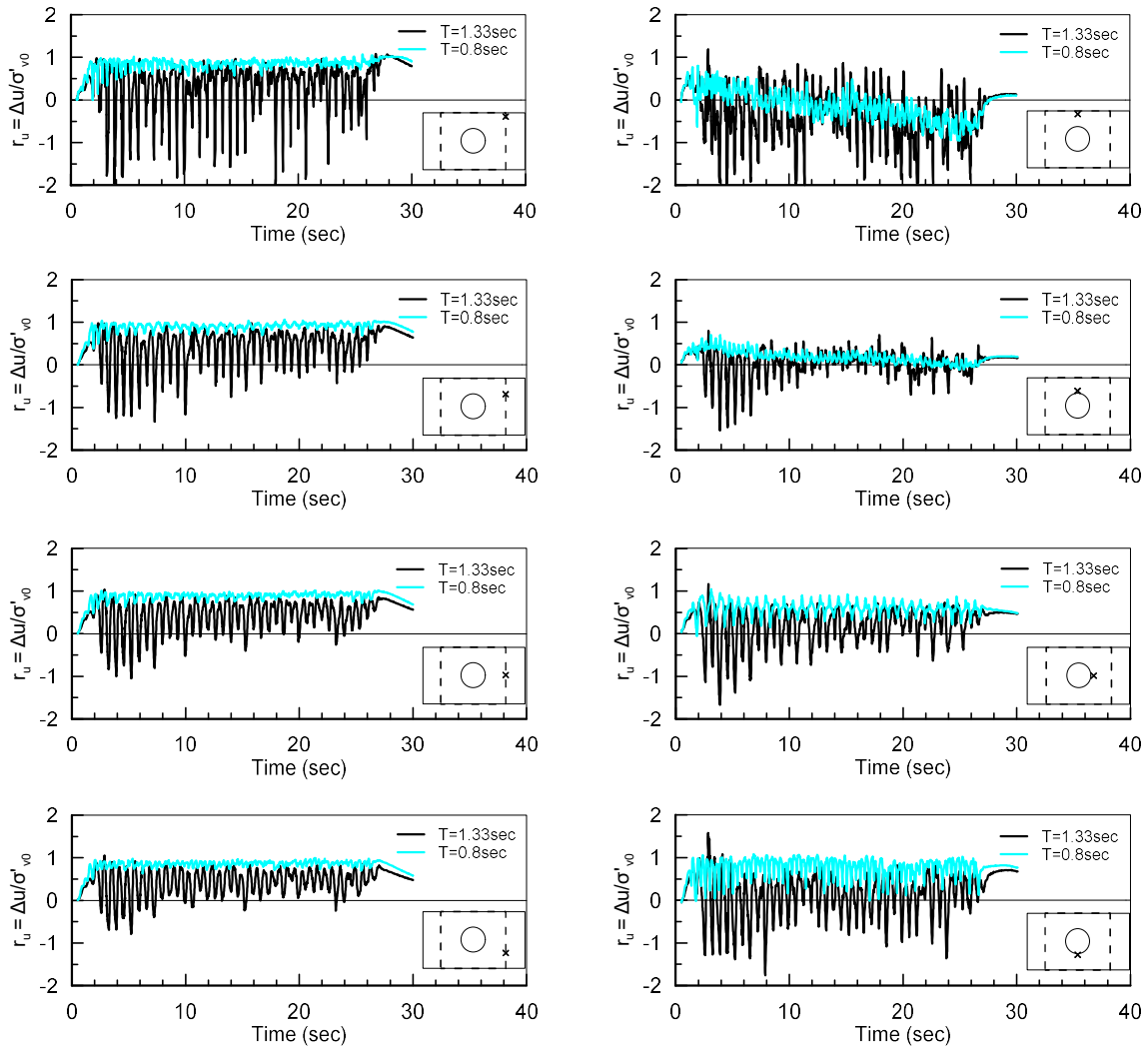
Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση

περίοδο $T = 0.8\text{sec}$ είναι υψηλότερες απ' ό τι για $T = 1.33\text{sec}$. Η εικόνα αυτή διαπιστώνεται και από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες των r_u που ακολουθούν στο **Σχήμα 5.7**, απ' όπου προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές r_u σε όλη τη διάρκεια της διέγερσης για $T = 0.8\text{sec}$, και μάλιστα χωρίς τις αιχμές διαστολικότητας που εμφανίζονται για $T = 1.33\text{sec}$.



Σχήμα 5.6: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u στο τέλος της διέγερσης για δεσπόζουσα περίοδο σεισμικής διέγερσης $T = 0.8\text{sec}$ και $T = 1.33\text{sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, για υπόγειο αγωγό σε φυσικό έδαφος

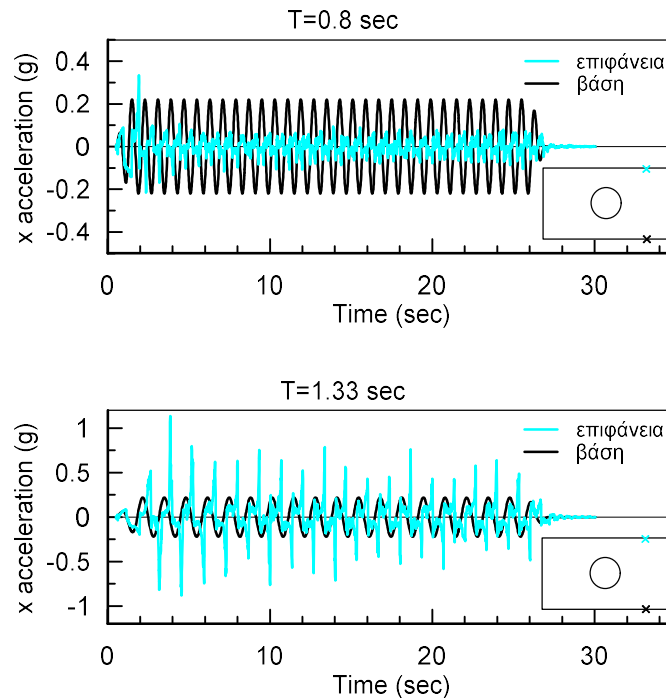
Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



Σχήμα 5.7: Σύγκριση χρονιοιστοριών του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u , για δεσπόζουσα περίοδο σεισμικής διέγερσης $T = 0.8\text{sec}$ και $T = 1.33\text{sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

Ενώ μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων συνεπάγονται αυξημένη διάθεση για ανύψωση, η μικρότερη ανύψωση που παρατηρείται για $T = 0.8\text{sec}$ οφείλεται στη μικρότερη επιτάχυνση που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους λόγω απόσβεσης της σεισμικής ταλάντωσης από την πλήρη ρευστοποίηση ($r_u \rightarrow 1$), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.8**.

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



Σχήμα 5.8: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων για δεσπόζουσα περίοδο σεισμικής διέγερσης $T = 0.8 \text{ sec}$ και $T = 1.33 \text{ sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$ στη βάση και στην επιφάνεια, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

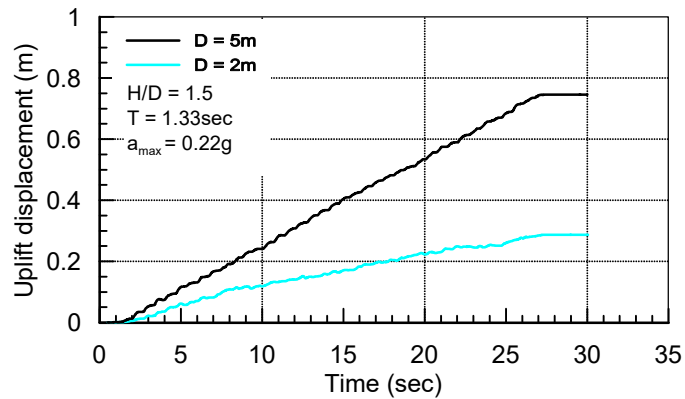
Από τα **Σχήματα 5.3/5.4** και **5.7/5.8** προκύπτει το ακόλουθο συμπέρασμα: για υψηλότερες τιμές υπερπίεσεων ($r_u \rightarrow 1$) αυξάνει και η απόσβεση της σεισμικής ταλάντωσης εντός του ρευστοποιημένου εδαφικού στρώματος και τελικά προκύπτει απομείωση του κραδασμού, ενώ οι αιχμές διαστολικότητας μπορεί να σχετίζονται και με ενίσχυσή του. Αυτό παρατηρήθηκε τόσο στην επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης, όσο και σε εκείνη της δεσπόζουσας περιόδου. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το τελικό αποτέλεσμα στην ανύψωση σχετίζεται και με τις δύο αλληλοαναιρούμενες επιδράσεις, αν και τελικώς η μέγιστη επιτάχυνση και η δεσπόζουσα περίοδος επιδρούν αυξητικά στην ανύψωση, σε συμφωνία με η βιβλιογραφία (Marinatos et al.2017).

5.2.3 Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού

Όσον αφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος, αρχικά εξετάζεται η περίπτωση μιας πιο μικρής (και πιο ρεαλιστικής) διαμέτρου, $D=2\text{m}$, παραμένοντας όμως στην κατηγορία των μεγάλων αγωγών. Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση της ανάλυσης επιβλήθηκε η ίδια διέγερση με την ανάλυση αναφοράς, δηλαδή για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33\text{sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, ενώ διατηρήθηκαν σταθεροί τόσο ο λόγος εγκιβωτισμού του αγωγού $H/D = 1.5$, όσο και το συνολικό ύψος του ρευστοποιήσιμου στρώματος, προκειμένου να αποφευχθεί η ταυτόχρονη επίδραση άλλων παραμέτρων στα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση

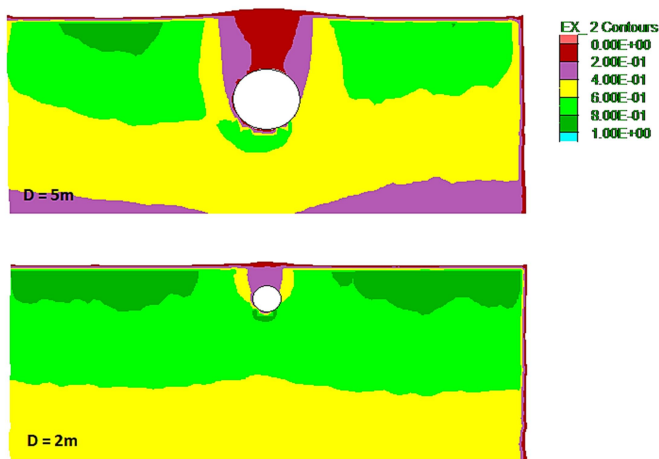
Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.9** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες ανύψωσης για τον αρχικό αγωγό με διάμετρο $D = 5\text{m}$ έναντι του αγωγού με διάμετρο $D = 2\text{m}$. Για τη μεγαλύτερη διάμετρο αγωγού είναι αισθητά μεγαλύτερη και η ανύψωση, παρατήρηση που είναι συμβατή με τις αναφορές στη βιβλιογραφία (Marinatu et al. 2017, Azadi & Hosseini 2010). Δεδομένου ότι ο μεγαλύτερος αγωγός δέχεται μεγαλύτερη δύναμη άνωσης αναμένεται εξ αρχής μεγαλύτερη ανύψωση, αλλά εδώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των επιμέρους παραμέτρων που επιδρούν στην ανύψωση, όπως ο λόγος υπερπιέσεων πόρων r_u και η επιταχύνσεις περί τον αγωγό.



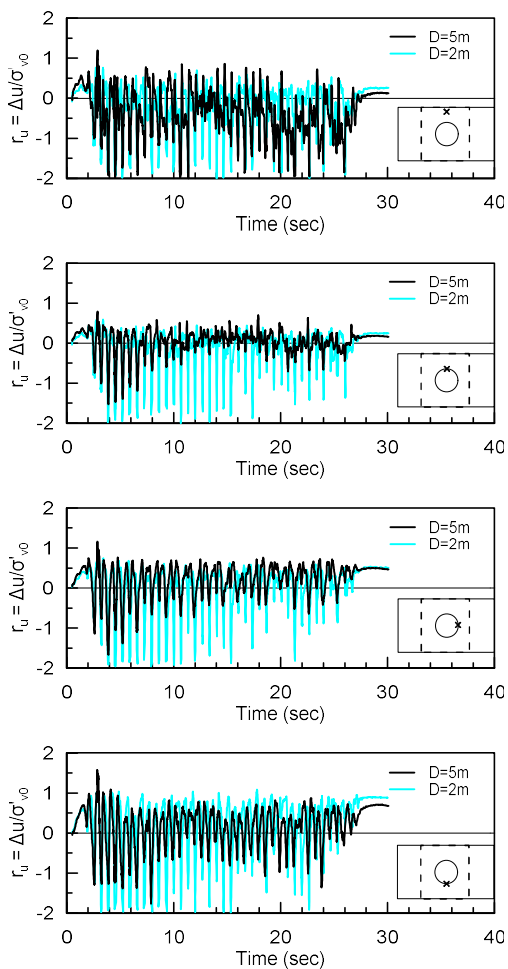
Σχήμα 5.9: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για διάμετρο $D = 5\text{m}$ και $D = 2\text{m}$ (με $H/D = 1.5$), για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33\text{sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22\text{g}$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

Από τις ισοκαμπύλες r_u του **Σχήματος 5.10** και τις χρονοϊστορίες r_u του **Σχήματος 5.11** στις σχετικές θέσεις γύρω από τον αγωγό, οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύσσονται είναι ελαφρώς μεγαλύτερες για την περίπτωση της μικρής διαμέτρου, ειδικά κάτω και πάνω από τον αγωγό. Αυτό οφείλεται πιθανόν στη μεγαλύτερη περιοχή επιρροής που έχει ο αγωγός διαμέτρου 5m συγκριτικά με τον αγωγό διαμέτρου 2m, αλλά και το γεγονός πως ο μικρότερος αγωγός βρίσκεται συγκριτικά πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους σε απόλυτο μέγεθος H (παρ' ότι το $H/D=1.5$ είναι κοινό) και κατά συνέπεια σε περιοχή ανάπτυξης υψηλότερων υπερπιέσεων πόρων.

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



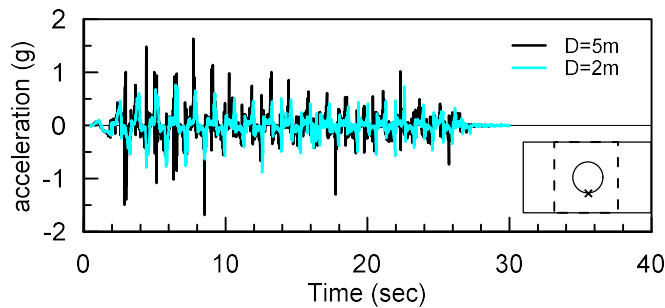
Σχήμα 5.10: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u στο τέλος της διέγερσης για διάμετρο αγωγού $D = 2m$ και $D = 5m$ (με $H/D = 1.5$), για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33sec$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος



Σχήμα 5.11: Σύγκριση χρονιοιστοριών του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u για διάμετρο αγωγού $D = 2m$ και $D = 5m$ για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33sec$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση

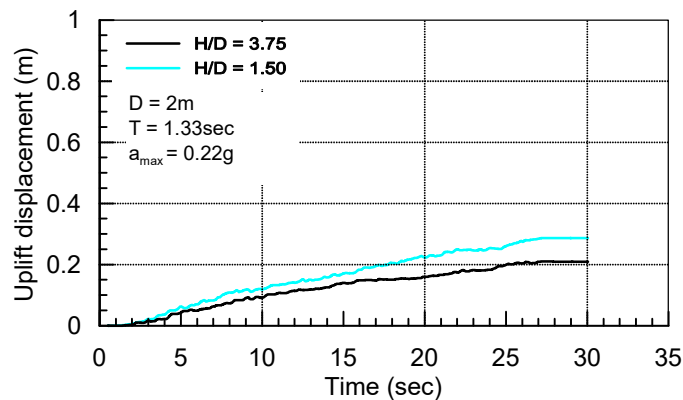
Ομοίως οι μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων στον μικρότερο αγωγό δημιουργούν εν τέλει μεγαλύτερη απόσβεση της ταλάντωσης, όπως επιβεβαιώνεται από το **Σχήμα 5.12**, γεγονός που φαίνεται να καθορίζει τελικώς τη μείωση της ανύψωσής του συγκριτικά με τον μεγαλύτερο αγωγό.



Σχήμα 5.12: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων κάτω από τον αγωγό για διάμετρο αγωγού $D = 2m$ και $D = 5m$ (με $H/D = 1.5$), για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33sec$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, σε φυσικό έδαφος

5.2.4 Επίδραση του λόγου εγκιβωτισμού του αγωγού

Τέλος, εξετάζεται η επίδραση του λόγου εγκιβωτισμού του αγωγού. Σ' αυτό το πλαίσιο μελετήθηκε ένας μεγαλύτερος λόγος εγκιβωτισμού, ίσος με $H/D = 3.75$. Η σύγκριση αφορά αγωγό διαμέτρου $D = 2m$ και παραμένει σταθερό το συνολικό ύψος του ρευστοποιήσιμου στρώματος, καθώς και τα χαρακτηριστικά της διέγερσης ($T = 1.33sec$ και $a_{max} = 0.22g$). Στο **Σχήμα 5.13**, οι χρονιοιστορίες ανύψωσης για λόγους εγκιβωτισμού $H/D = 1.50$ και $H/D = 3.75$ αντίστοιχα δείχνουν ότι για μεγαλύτερο λόγο εγκιβωτισμού προκύπτει μείωση της ανύψωσης του αγωγού, που αναμενόταν καθώς το πάχος του υπερκείμενου εδάφους στη δεύτερη περίπτωση, και κατά συνέπεια το βάρος που ασκείται στον αγωγό, είναι μεγαλύτερο.

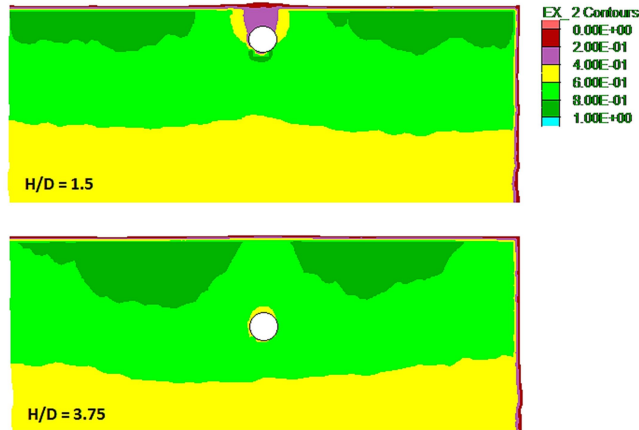


Σχήμα 5.13: Χρονιοιστορίες ανύψωσης αγωγού για λόγο εγκιβωτισμού $H/D = 1.50$ και $H/D = 3.75$ ($D=2m$ κοινό,) για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33sec$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

Σύμφωνα με το **Σχήμα 5.14**, οι ισοκαμπύλες των λόγων υδατικών υπερπιέσεων δείχνουν ότι η ύπαρξη του αγωγού παύει να είναι αισθητή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όταν αυτός είναι

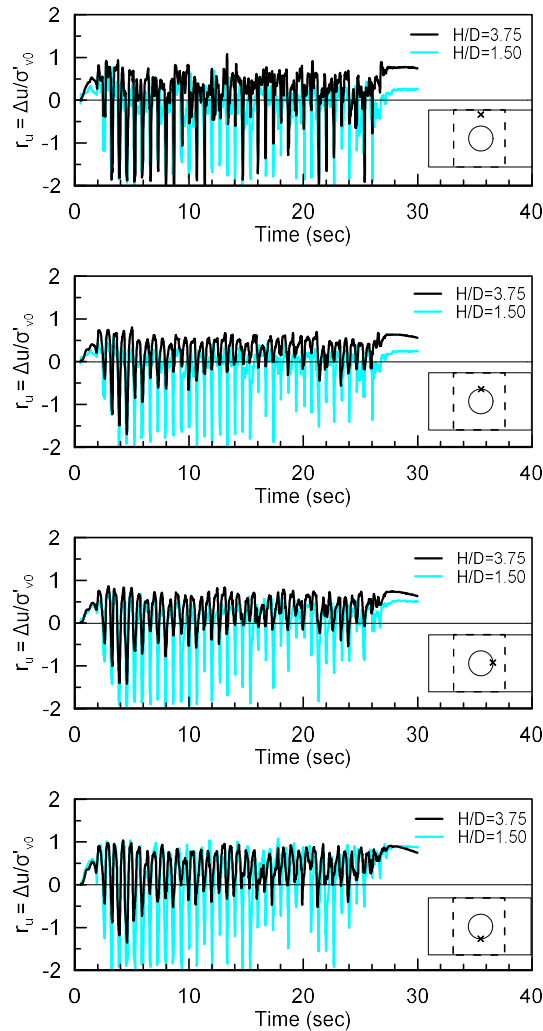
Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση

τοποθετημένος σε σχετικά μεγάλο βάθος. Με άλλα λόγια, πάνω και κάτω από τον αγωγό οι υπερπιέσεις είναι παρόμοιες, γεγονός που οδηγεί σε μείωση των δυνάμεων άνωσης επ' αυτού, όταν το H/D αυξάνει. Στο **Σχήμα 5.15** παρατηρούνται οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπιέσεων των πόρων r_u στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού για τους δύο λόγους εγκιβωτισμού που μελετήθηκαν, απ' όπου προκύπτει ότι για $H/D = 3.75$ οι χρονοϊστορίες δεν αλλάζουν ιδιαίτερα σε διαφορετικά σημεία γύρω από αυτόν.



Σχήμα 5.14: Ισοκαμπύλες του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u στο τέλος της διέγερσης για λόγο εγκιβωτισμού $H/D = 1.50$ και $H/D = 3.75$ ($D=2m$ κοινό), για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33sec$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



Σχήμα 5.15: Σύγκριση χρονοϊστοριών του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u για λόγο εγκιβωτισμού $H/D = 1.50$ και $H/D = 3.75$ ($D=2\text{m}$ κοινό) για δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33\text{sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, για υπόγειο αγωγό σε «φυσικό» έδαφος

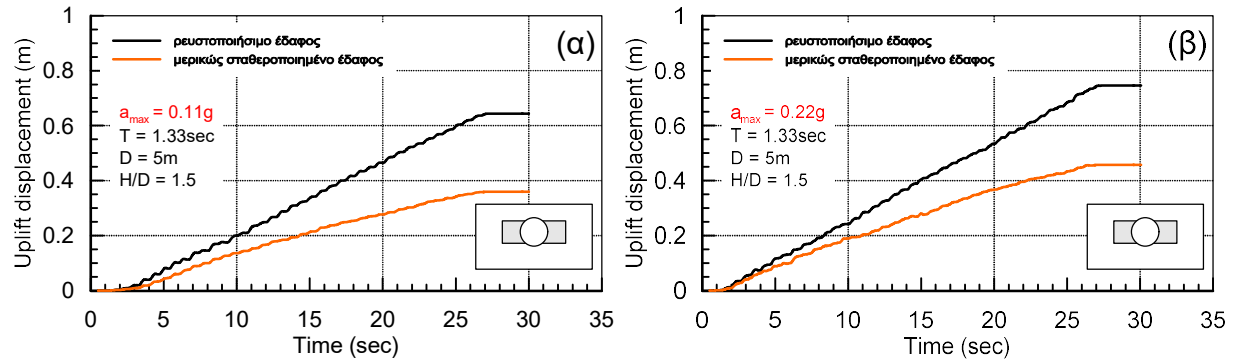
5.3 Επίδραση των παραμέτρων ενδιαφέροντος στην αποδοτικότητα της παθητικής σταθεροποίησης

5.3.1 Επίδραση των παραμέτρων της σεισμικής διέγερσης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες ανύψωσης του αγωγού μετά την εφαρμογή της βέλτιστης γεωμετρίας παθητικής σταθεροποίησης, όπως αυτή επιλέχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για κάθε μία από τις εξεταζόμενες παραμέτρους, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες για «φυσικό» (πριν τη σταθεροποίηση) έδαφος. Επιπλέον, για την περίπτωση του μικρότερου αγωγού ($D = 2\text{m}$) προσδιορίζεται και το νέο εύρος δυνατής μείωσης της ανύψωσης, προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης βέλτιστης γεωμετρίας βελτίωσης και σε αγωγούς μικρότερης διαμέτρου.

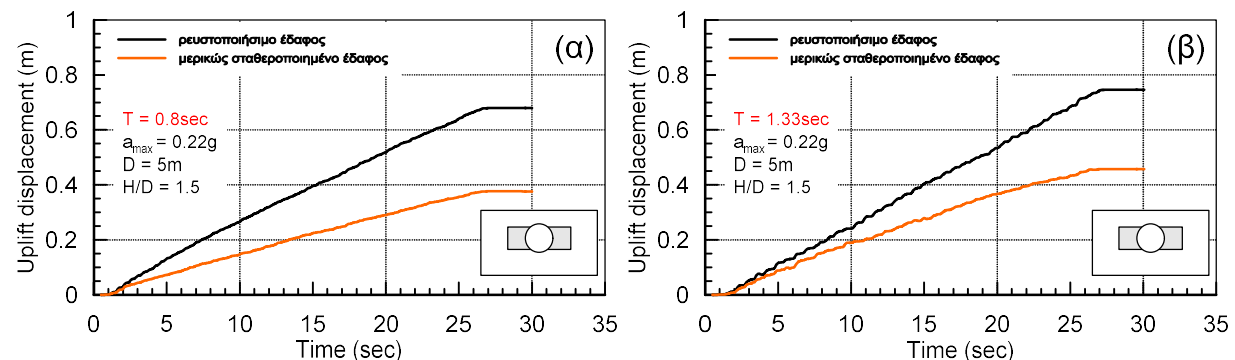
Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.16), συγκρίνονται για την περίπτωση του αγωγού με διάμετρο $D=5\text{m}$ ($H/D = 1.5$) οι χρονοϊστορίες ανύψωσης του αγωγού για μέγιστη επιτάχυνση βάσης 0.11g και 0.22g . Παρατηρείται ότι η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης παρουσιάζει πιο αποτελεσματική συμπεριφορά για διεγέρσεις μικρότερης έντασης, με ποσοστό μείωσης της ανύψωσης 56% έναντι του 40% όπως αυτό προέκυψε για μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.22\text{g}$.



Σχήμα 5.16: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για «φυσικό» και μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος, για διάμετρο αγωγού $D = 5\text{m}$ ($H/D=1.5$), δεσπόζουσα περίοδο $T = 1.33\text{sec}$, μέγιστη επιτάχυνση βάσης: (α) $a_{\max} = 0.11\text{g}$ και (β) $a_{\max} = 0.22\text{g}$

Στο Σχήμα 5.17 συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες ανύψωσης του αγωγού με $D = 5\text{m}$ ($H/D = 1.5$) για περίοδο $T = 0.8\text{sec}$ και $T = 1.33\text{sec}$. Φαίνεται ότι η επιλεγμένη γεωμετρία μερικώς σταθεροποίησης εξακολουθεί να είναι αποτελεσματική για τις πιο υψίσυχνες διεγέρσεις, επιτυγχάνοντας μείωση της ανύψωσης 55% έναντι του 40% για περίοδο διέγερσης $T = 1.33\text{ sec}$.

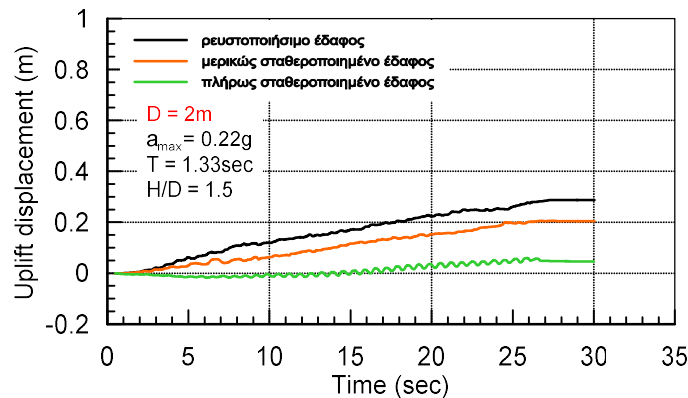


Σχήμα 5.17: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για φυσικό και μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος, για διάμετρο αγωγού $D = 5\text{m}$ ($H/D=1.5$), μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{\max} = 0.22\text{g}$ και δεσπόζουσα περίοδο σεισμικής διέγερσης: (α) $T = 0.8\text{ sec}$ και (β) $T = 1.33\text{ sec}$

Με βάση τα ανωτέρω, η αποδοτικότητα της παθητικής σταθεροποίησης βαίνει ελαφρώς μειούμενη όσο αυξάνει η καταστροφικότητα της διέγερσης. Αυτό το συμπέρασμα σχετίζεται με τον τρόπο προσομοίωσης της σταθεροποίησης και λιγότερο με την αποδοτικότητα της ίδιας της μεθόδου και έχει καταγραφεί στη βιβλιογραφία (Andrianopoulos et al. 2016, Conlee et al. 2012).

5.3.2 Επίδραση της διαμέτρου του αγωγού

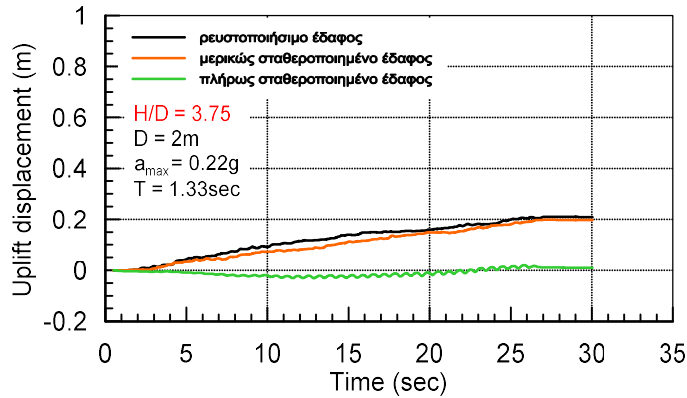
Σε αυτό το σημείο εξετάστηκε η περίπτωση ενός αγωγού μικρότερης διαμέτρου και επί αυτής κρίθηκε η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης γεωμετρίας σταθεροποίησης. Σημειώνεται εδώ ότι εξετάζεται επιπλέον και η περίπτωση της πλήρους σταθεροποίησης έτσι ώστε να προσδιοριστεί το νέο εύρος βελτίωσης που αντιστοιχεί στη μικρότερη διάμετρο αγωγού. Οι χρονοϊστορίες ανύψωσης για την περίπτωση όπου ο αγωγός έχει διάμετρο πλέον $D=2m$ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.18**. Συγκρίνοντας τη μείωση που προσφέρει η επιλεγμένη γεωμετρία μερικής σταθεροποίησης με τη μέγιστη δυνατή μείωση για καθολική σταθεροποίηση του εδάφους, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως σ' αυτή την περίπτωση η προτεινόμενη λύση δεν είναι επαρκής και ότι πιθανώς υπάρχει πιο συμφέρουσα επιλογή διαστάσεων ή/και γεωμετρίας σταθεροποιημένης περιοχής.



Σχήμα 5.18: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για φυσικό, μερικώς και πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος, για επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, περίοδο σεισμικής διέγερσης $T = 1.33 sec$ και διάμετρο αγωγού $D = 2m$

Εξετάζοντας επιπλέον την ίδια διάμετρο αγωγού σε διαφορετικό βάθος εγκιβωτισμού, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.19**, προκύπτει ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία παθητικής σταθεροποίησης για μεγάλο βάθος εγκιβωτισμού παύει πρακτικά να συνεισφέρει στη μείωση της ανύψωσης. Ωστόσο, η καμπύλη της καθολικής σταθεροποίησης υποδεικνύει ότι είναι εφικτή η μείωση της ανύψωσης με σταθεροποίηση του εδάφους και αφήνει περιθώρια για εκ νέου διερεύνηση κατάλληλης γεωμετρίας και διάταξης.

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση



Σχήμα 5.19: Χρονοϊστορίες ανύψωσης αγωγού για φυσικό, μερικώς και πλήρως σταθεροποιημένο έδαφος, για επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.22g$, περίοδο σεισμικής διέγερσης $T = 1.33 \text{ sec}$, διάμετρο αγωγού $D = 2m$ και λόγο εγκιβωτισμού $H/D = 3.75$

Τα παραπάνω αποτελέσματα των ενοτήτων 5.3.1. και 5.3.2. παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.1 σε όρους ποσοστών μείωσης της ανύψωσης, συγκρινόμενα με την ανά περίπτωση ανύψωση που αντιστοιχεί στο φυσικό έδαφος.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επιρροής παραμέτρων στη μείωση της ανύψωσης υπόγειου αγωγού σε μερικώς παθητικά σταθεροποιημένο έδαφος

a_{max} (g)	T (sec)	D (m)	H/D	ποσοστό μείωσης ανύψωσης
0.22	1.33	5	1.5	40%
0.11	1.33	5	1.5	56%
0.22	1.33	5	1.5	40%
0.22	0.8	5	1.5	55%
0.22	1.33	5	1.5	40%
0.22	1.33	2	1.5	29%
0.22	1.33	2	1.5	29%
0.22	1.33	2	3.75	6%

5.4 Συμπεράσματα – Σχόλια

- i. Για το φυσικό έδαφος, η απομείωση των χαρακτηριστικών της διέγερσης (μέγιστης επιτάχυνσης και δεσπόζουσας περιόδου) επιδρά μειωτικά στην τελική ανύψωση του αγωγού, παρόλο που οι αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων είναι ελαφρώς υψηλότερες. Η αιτία είναι η μεγαλύτερη απόσβεση της σεισμικής ταλάντωσης εντός του ρευστοποιημένου εδαφικού

Κεφάλαιο 5: Επιρροή Παραμέτρων Διέγερσης και Χαρακτηριστικών Αγωγού στην Ανύψωση Αγωγού Πριν και Μετά από Παθητική Σταθεροποίηση

στρώματος, αλλά και οι μειωμένες αιχμές διαστολικότητας, που προκαλούν τελικά απομείωση του κραδασμού.

- ii. Μείωση της διαμέτρου του αγωγού συνεπάγεται μείωση της τελικής ανύψωσης. Εκτός των εξ' αρχής μικρότερων δυνάμεων άνωσης που ασκούνται απ' αυτόν, στο εν λόγω αποτέλεσμα συμβάλλει και η μεγαλύτερη απόσβεση της σεισμικής ταλάντωσης λόγω αυξημένων υπερπιέσεων πόρων στην γειτονική περιοχή του αγωγού.
- iii. Αύξηση του λόγου εγκιβωτισμού του αγωγού συνεπάγεται μείωση της τελικής ανύψωσης, καθώς οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύσσονται πάνω και κάτω από αυτόν είναι παρόμοιες, γεγονός που οδηγεί σε μείωση των δυνάμεων άνωσης που ασκούνται επ' αυτόν.
- iv. Η αποδοτικότητα της παθητικής σταθεροποίησης εμφανίζεται ελαφρώς μειούμενη καθώς αυξάνεται η ένταση της σεισμικής διέγερσης. Ωστόσο, αυτό σχετίζεται και με τον τρόπο αριθμητικής προσομοίωσής της.
- v. Η εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης σε αγωγούς μικρότερης διαμέτρου παρουσιάζει τη δυνατότητα σχεδόν εκμηδενισμού της τελικής ανύψωσης του αγωγού. Ωστόσο, όταν μειώνεται η διάμετρος του αγωγού δε διαπιστώνεται η βελτιστοποίηση της μεθόδου της μερικής σταθεροποίησης, καθώς παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη αποδοτικότητα συγκριτικά με τους αγωγούς μεγαλύτερης διαμέτρου.

6

Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Γενικά

Ο κύριος σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της παθητικής σταθεροποίησης ως μέτρο αντιμετώπισης της ανύψωσης υπόγειων αγωγών λόγω ρευστοποίησης του εδάφους, με χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (FLAC). Η ανάλυση γίνεται με συζευγμένες δυναμικές αναλύσεις με χρήση υπαρχόντων καταστατικών προσομοιωμάτων για άμμους (εδώ το NTUA-SAND των Andrianopoulos et al. 2010a, b), ενώ η προσομοίωση της ύπαρξης της κολλοειδούς πυριτίας στο υγρό πόρων γίνεται με απομείωση του μέτρου συμπίεστότητάς του (Andrianopoulos et al. 2016, Αγαπουλάκη 2017). Τα συμπεράσματα που προέκυψαν σε κάθε μία από τις επιμέρους εργασίες αναφέρονται αναλυτικά στην αντίστοιχη παράγραφο κάθε κεφαλαίου. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των βασικότερων συμπερασμάτων της εργασίας με έμφαση στον κύριο σκοπό της, ενώ καταγράφονται και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

6.2 Συμπεράσματα

- i. Συνοπτικά, τα μέτρα που προτείνονται στη βιβλιογραφία για την αποφυγή της ανύψωσης υφιστάμενων υπόγειων αγωγών σε ρευστοποιήσιμα εδάφη αναφέρουν τη μηχανική συγκράτηση, την τοποθέτηση στραγγιστηρίων, τη χρήση αγκυρίων και την παθητική σταθεροποίηση με εισπίεση χημικού ενέματος γύρω από τον αγωγό. Για την τελευταία, έχει γίνει μια σειρά πειραμάτων από τους Towhata et al. (2013), χρησιμοποιώντας ως σταθεροποιητή κολλοειδή πυριτία (colloidal silica). Από τα πειράματα που εκτέλεσαν προέκυψε ότι ο αποτελεσματικότερος τρόπος εφαρμογής της μεθόδου είναι είτε η εισπίεση ενέματος σε αντιδιαμετρικά σημεία κάτω από τον αγωγό ή με εισπίεση και άντληση ώστε να καλυφθεί περιμετρικά ο αγωγός με το ένεμα. Αν αυτό συμβεί, προκύπτει πρακτικά μηδενική ανύψωση του αγωγού, ενώ για εισπίεση σε ένα σημείο πάνω από τον αγωγό παρατηρήθηκε μείωση αλλά όχι μηδενισμός της ανύψωσης.
- ii. Η βαθμονομημένη αριθμητική μεθοδολογία δείχνει ότι ένας υπόγειος αγωγός σε καθεστώς ρευστοποίησης ανυψώνεται μόνο κατά τη διάρκεια της δόνησης, με το μέγεθος της τελικής ανύψωσης να αυξάνει με τη διάμετρο του αγωγού, τη διάρκεια, την ένταση και την

περίοδο της διέγερσης, ενώ μειώνεται με το βάθος εγκιβωτισμού του σε συμφωνία με την βιβλιογραφία (π.χ. Marinatou et al. 2017). Επιπλέον υποδεικνύει ότι για μικρά βάθη εγκιβωτισμού, η περιοχή πάνω από τον αγωγό δε ρευστοποιείται αλλά εμφανίζει μικρές υπερπιέσεις πόρων.

- iii. Οι αριθμητικές αναλύσεις επιβεβαιώνουν ότι η παθητική σταθεροποίηση του εδάφους με χρήση κολλοειδούς πυριτίας βοηθάει στη μείωση της ανύψωσης του αγωγού υπό σεισμική διέγερση, καθώς μειώνονται οι υπερπιέσεις των πόρων στη γειτονιά του αγωγού. Στην πράξη, η εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης είναι αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σε περιοχές με υψηλές τιμές λόγου υδατικών υπερπιέσεων, και συγκεκριμένα όταν $r_u > 0.5$. Συνεπώς, καθώς οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύσσονται πάνω από τον αγωγό είναι σημαντικά μικρότερες, η ανάγκη για σταθεροποίηση του εδάφους εμφανίζεται κυρίως πλευρικά και κάτω από τον αγωγό, σε αδρή συμφωνία με τα πειράματα του Towhata et al. (2013).
- iv. Θεωρώντας τη σταθεροποιημένη περιοχή ένα ορθογώνιο με ύψος L και πλάτος B , προκύπτει ανάγκη σχετικά μεγάλου εμβαδού $A (= 6.8 A_{\text{αγωγού}}$, όπου $A_{\text{αγωγού}}$ το εμβαδό της διατομής του αγωγού) ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απομείωση της ανύψωσης (που αντιστοιχεί στη σταθεροποίηση όλου του εδάφους).
- v. Ειδικότερα, για αγωγούς με σχετικά μικρό λόγο εγκιβωτισμού, καθοριστικό ρόλο παίζει το πλάτος B , διότι διευρύνει την περιοχή των χαμηλών υπερπιέσεων πάνω από τον αγωγό, η οποία δρα σταθεροποιητικά γι' αυτόν. Πάντως, η ύπαρξη ύψους L περίπου ίσο με τη διάμετρο D του αγωγού (έτσι ώστε να τον καλύπτει πλευρικά) κρίνεται αναγκαία για την αποτελεσματική απομείωση της ανύψωσης.
- vi. Η μέθοδος παθητικής σταθεροποίησης γίνεται συγκριτικά πιο αποτελεσματική όταν μικραίνει η αναμενόμενη ανύψωση σε καθεστώς ρευστοποίησης, π.χ. για μικρούς ή βαθιά εγκιβωτισμένους αγωγούς, ή για μικρής έντασης διεγέρσεις. Αυτό το συμπέρασμα σχετίζεται και με τον τρόπο που προσομοιώνεται αριθμητικά η παθητική σταθεροποίηση, και όχι με την ίδια τη μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης που διαφαίνεται ποσοτικά πιο αποτελεσματική στα πειράματα (π.χ. Towhata et al. 2013) απ' ότι στις αριθμητικές αναλύσεις.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τα ανωτέρω συμπεράσματα έχουν περιορισμούς που σχετίζονται με τις παραδοχές των αναλύσεων με βάση τις οποίες προέκυψαν. Η εξάλειψη αυτών των περιορισμών αποτελεί την βασική πρόταση για μελλοντική έρευνα, δηλαδή:

- xi. Οι προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης των παθητικά σταθεροποιημένων εδαφών που έχουν γίνει μέχρι σήμερα βασίζονται στην ευφυή χρήση ήδη υπάρχοντων καταστατικών προσομοιωμάτων, καθώς δεν υπάρχει κάποιο εξειδικευμένο καταστατικό προσομοίωμα για το νέο αυτό υλικό. Συνεπώς, η επανάληψή τους με εξειδικευμένο καταστατικό

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα - Προτάσεις

προσομοίωμα θα αύξανε την αξιοπιστία των συμπερασμάτων, καθώς και η σύγκριση με τα (πολύ περιορισμένα) πειραματικά αποτελέσματα (των Towhata et al. 2013) δείχνει ποιοτική αλλά όχι ποσοτική συμφωνία.

- xii. Οι αναλύσεις που έγιναν είχαν ως αφετηρία (ανάλυση αναφοράς) το δυναμικό πείραμα φυγοκεντριστή των Chian et al. (2014), και αφορούσαν μεγάλης διαμέτρου αγωγό ($D = 5\text{m}$) και μεγαλο-περίοδη αρμονική διέγερση ($T=1.33\text{sec}$) σε ένα μεγάλο εύρους και βάθους έδαφος (χωρίς τάφρο). Συνεπώς, τα συμπεράσματα αυτά θα πρέπει να επαληθευτούν και για πιο συνήθεις αγωγούς που υποβάλλονται σε πιο συνήθεις σεισμικές διεγέρσεις και βρίσκονται εγκιβωτισμένοι σε τάφρους. Σε κάθε περίπτωση, ποιοτικά δεν αναμένονται διαφοροποιήσεις, αλλά ποσοτικά θα μπορούσαν να υπάρξουν αλλαγές.

- Andrianopoulos K. I., Agapoulaki G. I., Papadimitriou A. G. (2016), "Simulation of seismic response of passively stabilized sand", *Geotechnical Research*, ICE Publishing, 3(2): 40-53
- Andrianopoulos, K. I. (2006). "Numerical Modeling of Static and Dynamic Behavior of Elastoplastic Soils." PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, NTUA, Athens.
- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G., Bouckovalas, G.D. (2010a). Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geotechnical structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, p. 895-911
- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G., Bouckovalas, G.D. (2010b). Explicit integration of bounding surface model for the analysis of earthquake soil liquefaction. *Intern. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34, p. 1586-1614
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K. K., Hossain, M. M., and Fruth, L. S. (1992). "VELACS: verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; Laboratory Testing Program – Soil Data Report." Research Report, The Earth. Technology Corporation.
- Chian, S. C., Tokimatsu, K., Asce, M., Phani, S., and Madabhushi, G. (2014). "Soil Liquefaction – Induced Uplift of Underground Structures : Physical and Numerical Modeling." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(10), 1–18.
- 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
- 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
- Gallagher, P.M., Conlee, C.T., Rollins, K.M., (2007a). Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, p. 186-196
- Marinatos, S. M., Zontanou, V. A., Bouckovalas, G. D., and Chaloulos, Y. K. (2017). "Liquefaction induced uplift of pipelines: Numerical modeling and parametric analyses."

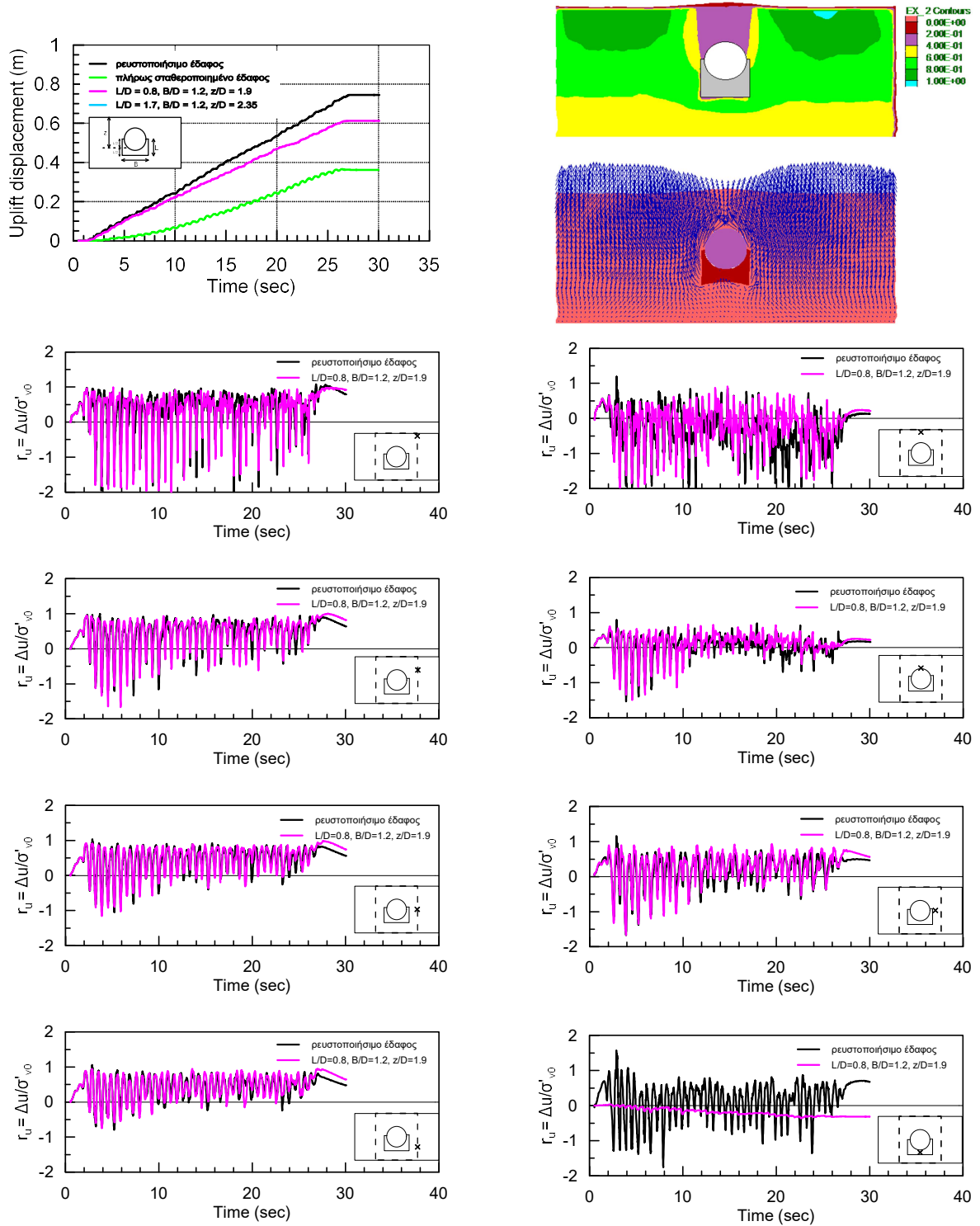
Βιβλιογραφία

- O'Rourke, M. J., & Liu, X. (2012). "Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines." MCEER Technical Reports
- Otsubo, M., Towhata, I., Hayashidac, T., Shimurab,M., Uchimura,T., Liu, B., Taeseri, D., Cauvin, B., and Rattez, H. (2016). "Shaking table tests on mitigation of liquefaction vulnerability for existing embedded lifelines." Journal of Elsevier B.V., Soils and Foundations 2016;56(3):348–364
- Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2002). "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: A multiaxial formulation." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, JOUR, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, 42 Patission Street, 10682 Athens, Greece, 22(3), 191–204.
- Sasaki, T. and Tamura, K. (2004). "Prediction of liquefied-induced uplift displacement of underground structures." 36th Joint Meeting US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects.
- Towhata, I., Masahide, O., Uchimura, T., Shimura, M., Liu, B., and Hayashida, T. (2013). "Protection of underground lifeline from seismic liquefaction problems." 5th International Geotechnical Symposium – Inchon, 1-17.
- Wang, Z.-L., Dafalias, Y. F., and Shen, C.-K. (1990). "Bounding surface hypoplasticity model for sand." J. Eng. Mech., 10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:5(983), 983–1001.
- 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.
- Μαρινάτου Σ. (2016), Φαινόμενα άνωσης υπόγειων αγωγών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

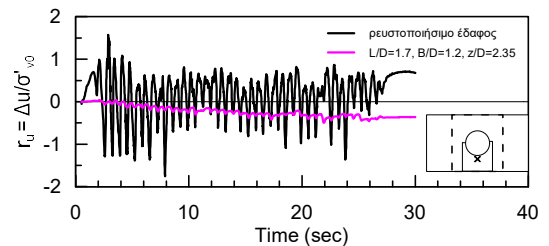
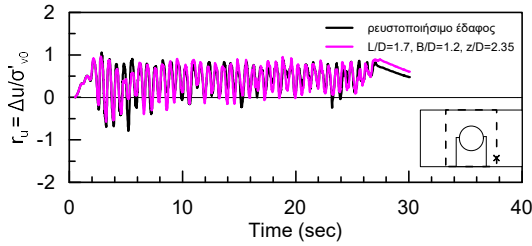
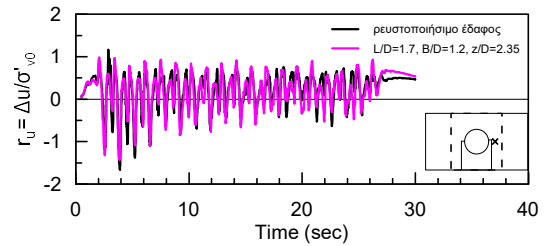
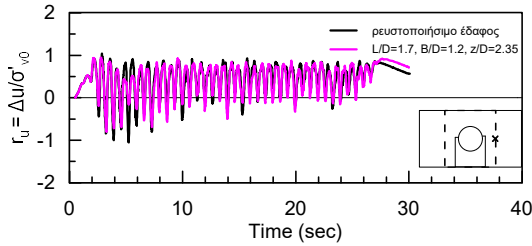
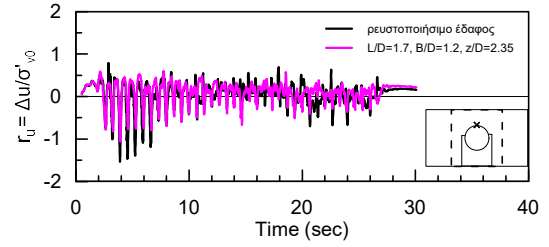
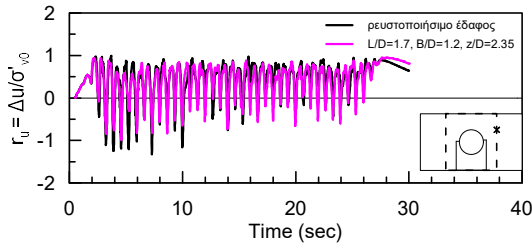
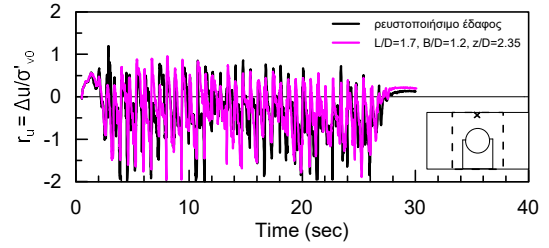
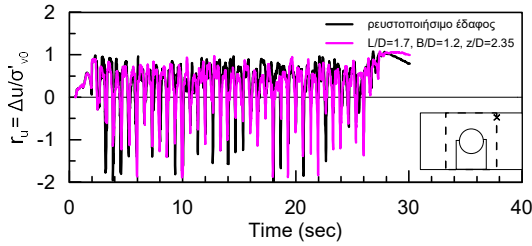
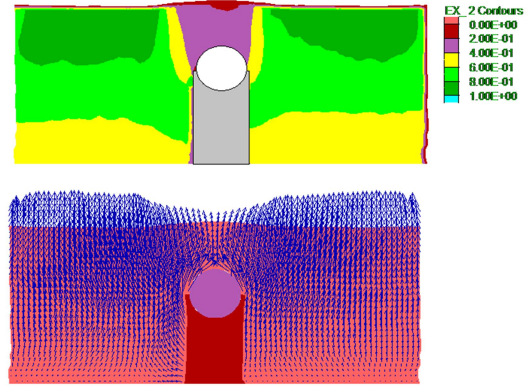
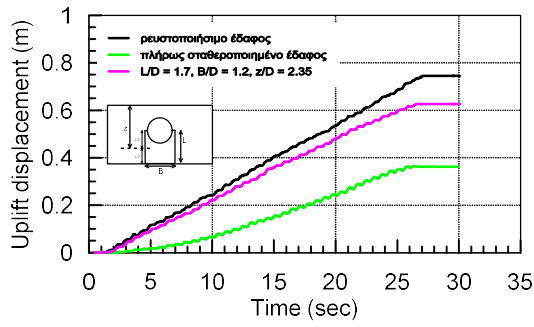
Βιβλιογραφία

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

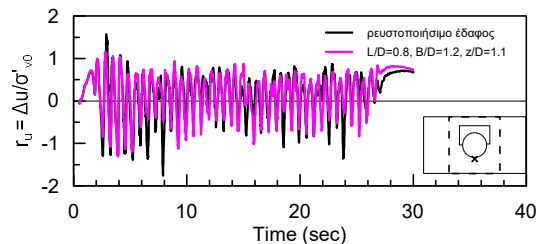
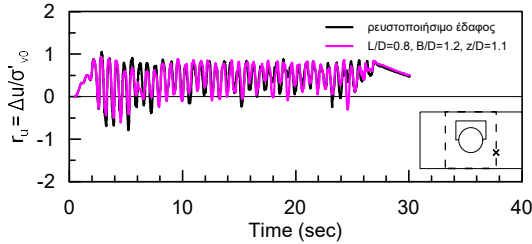
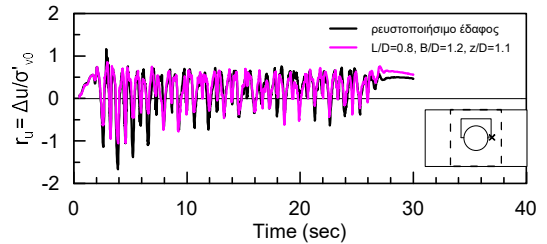
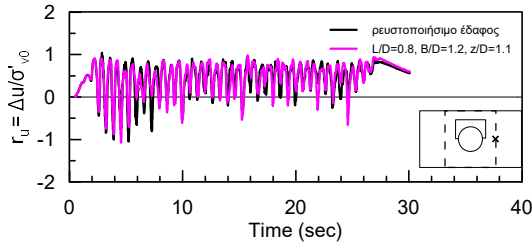
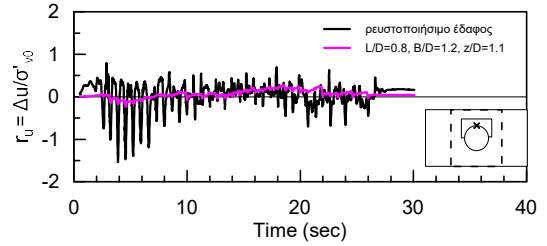
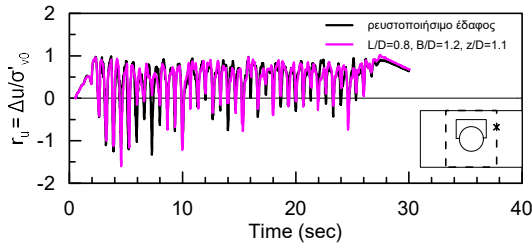
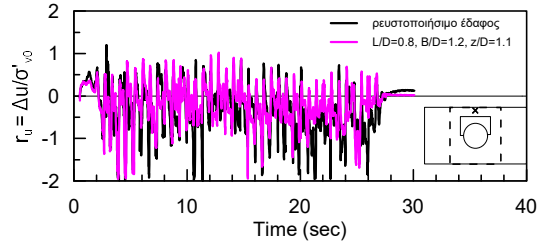
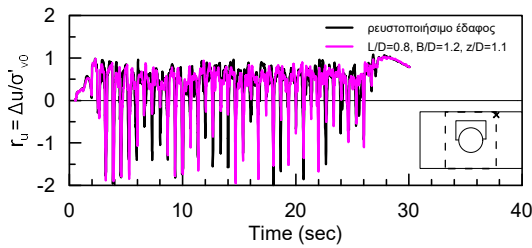
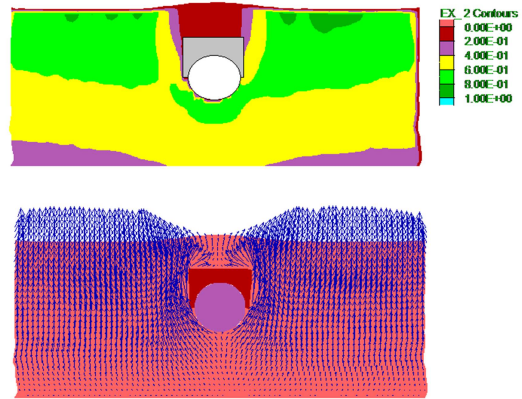
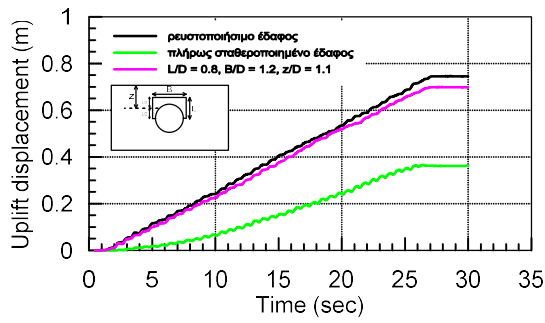
Αναλυτικά Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων



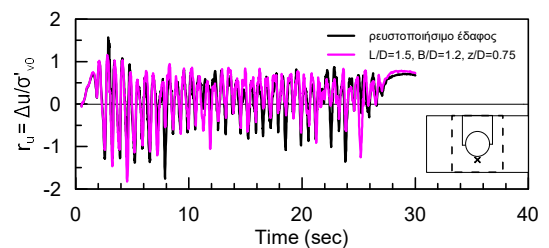
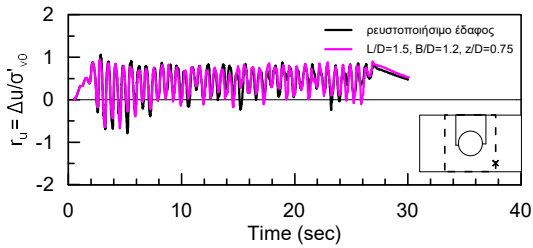
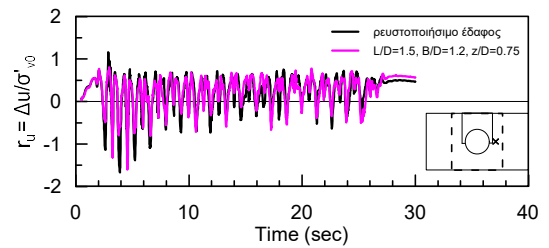
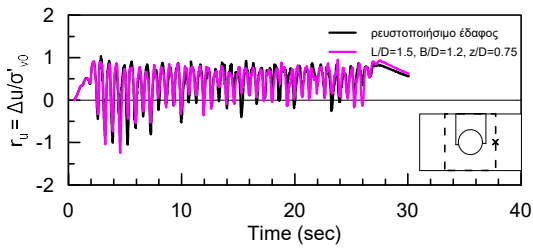
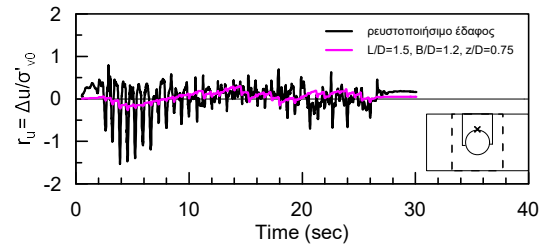
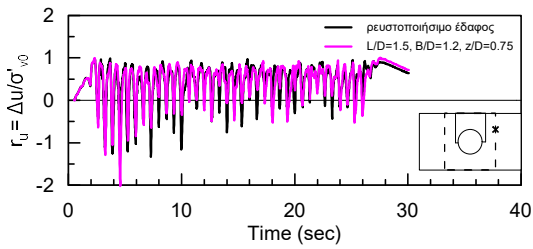
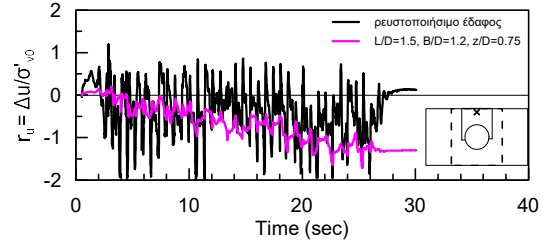
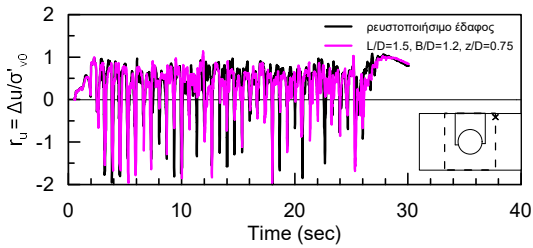
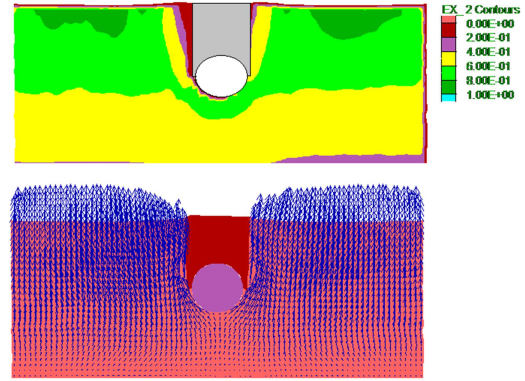
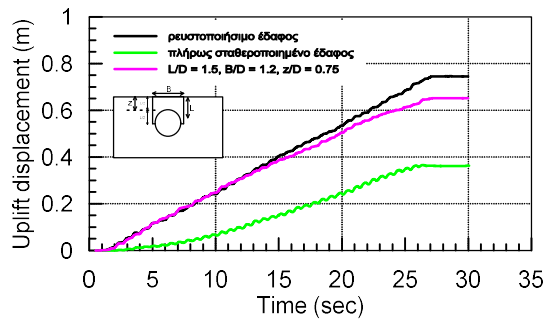
Σχήμα Α.1: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.8$, $B/D = 1.2$ και $z/D = 1.9$



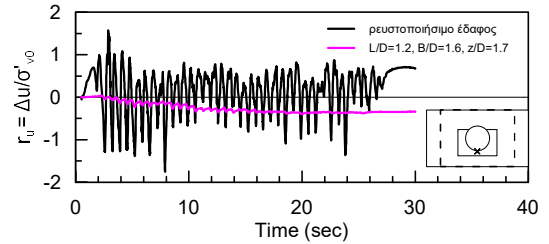
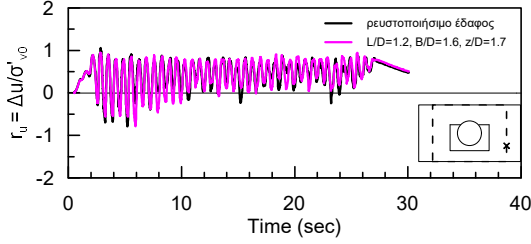
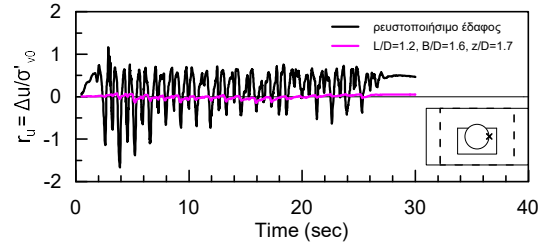
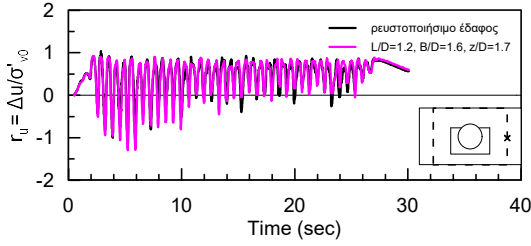
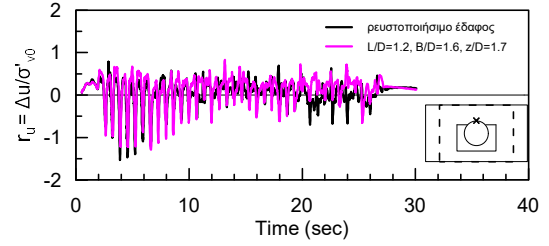
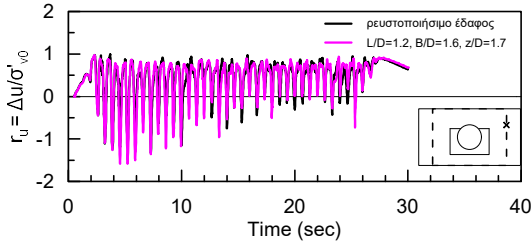
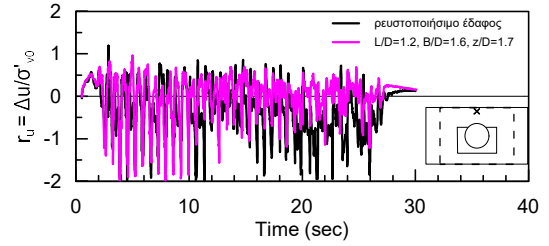
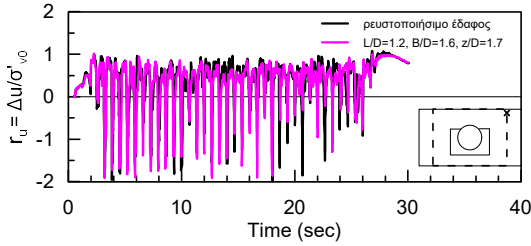
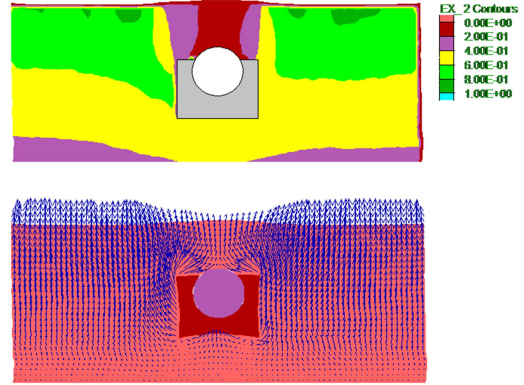
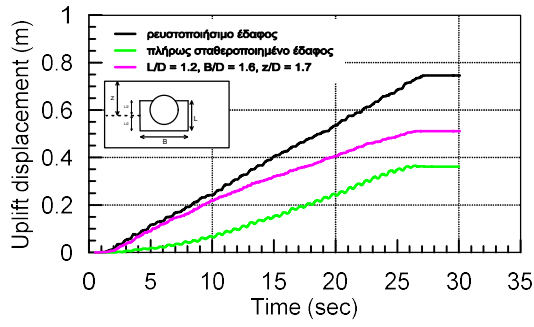
Σχήμα Α.2: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_w , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 1.7$, $B/D = 1.2$ και $z/D = 2.35$



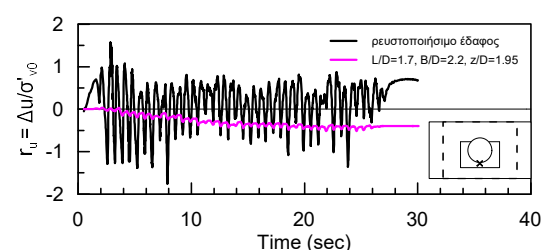
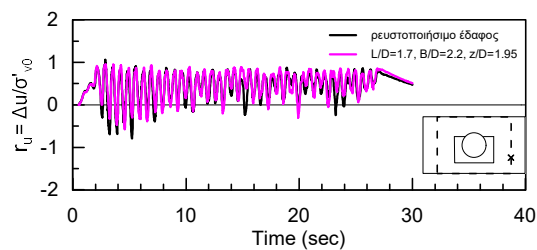
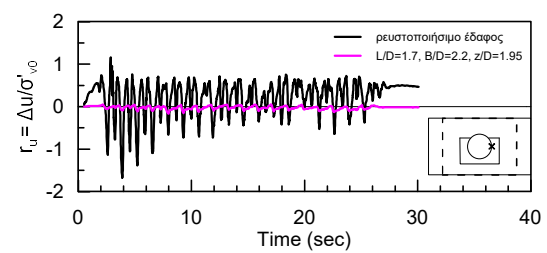
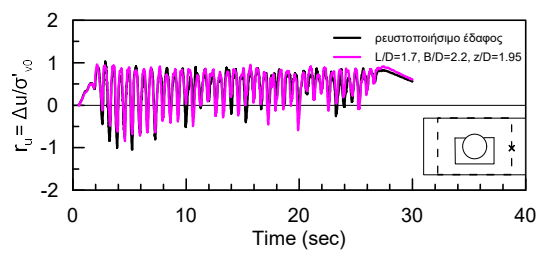
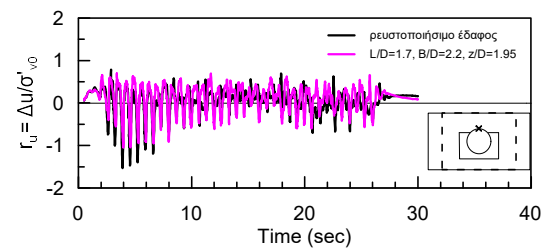
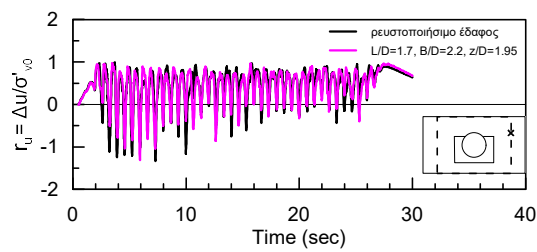
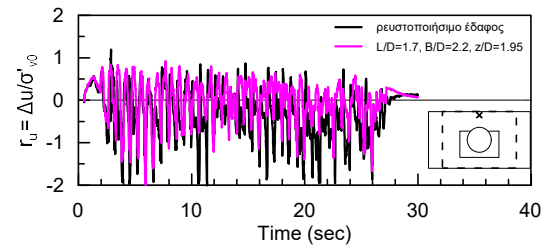
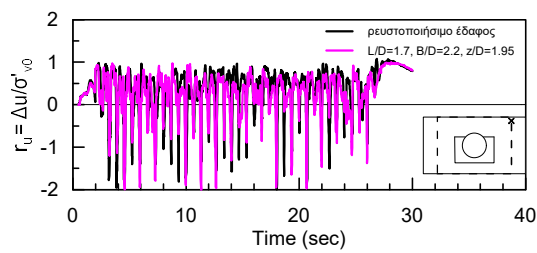
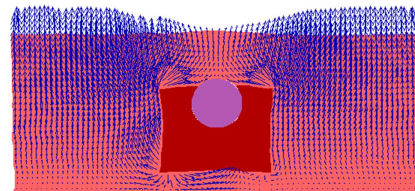
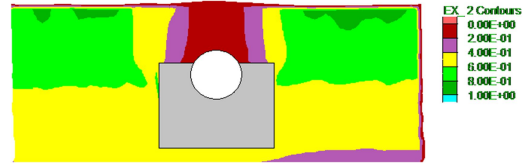
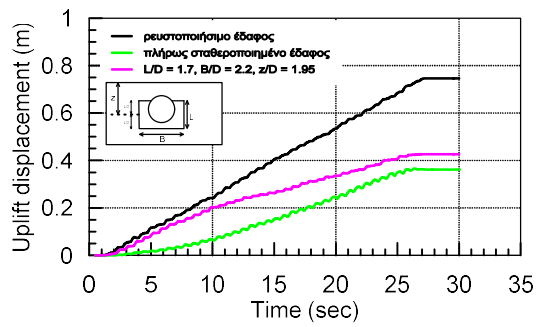
Σχήμα Α.3: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγω υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγω υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.8$, $B/D = 1.2$ και $z/D = 1.1$



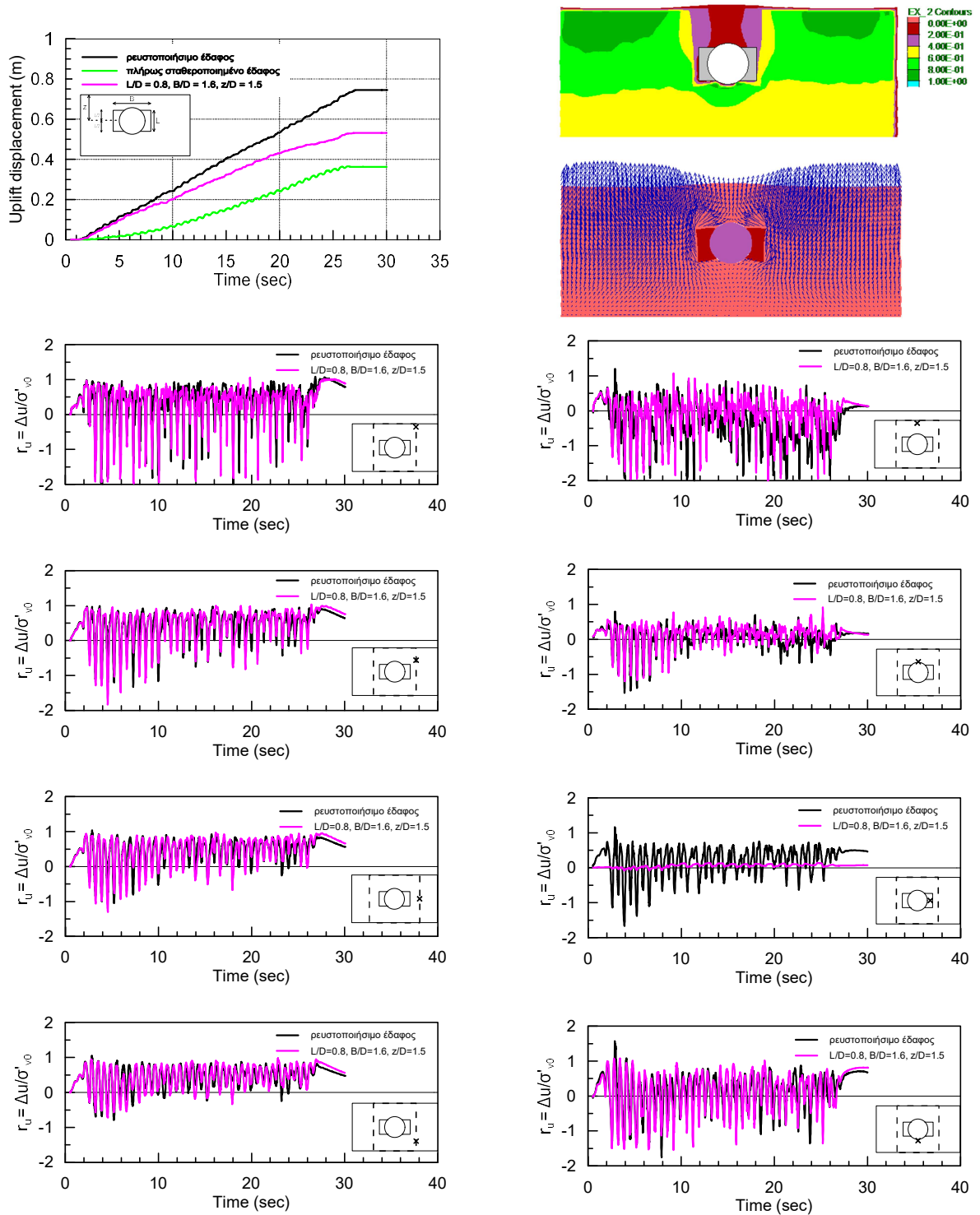
Σχήμα Α.4: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγω υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγω υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 1.5$, $B/D = 1.2$ και $z/D = 0.75$



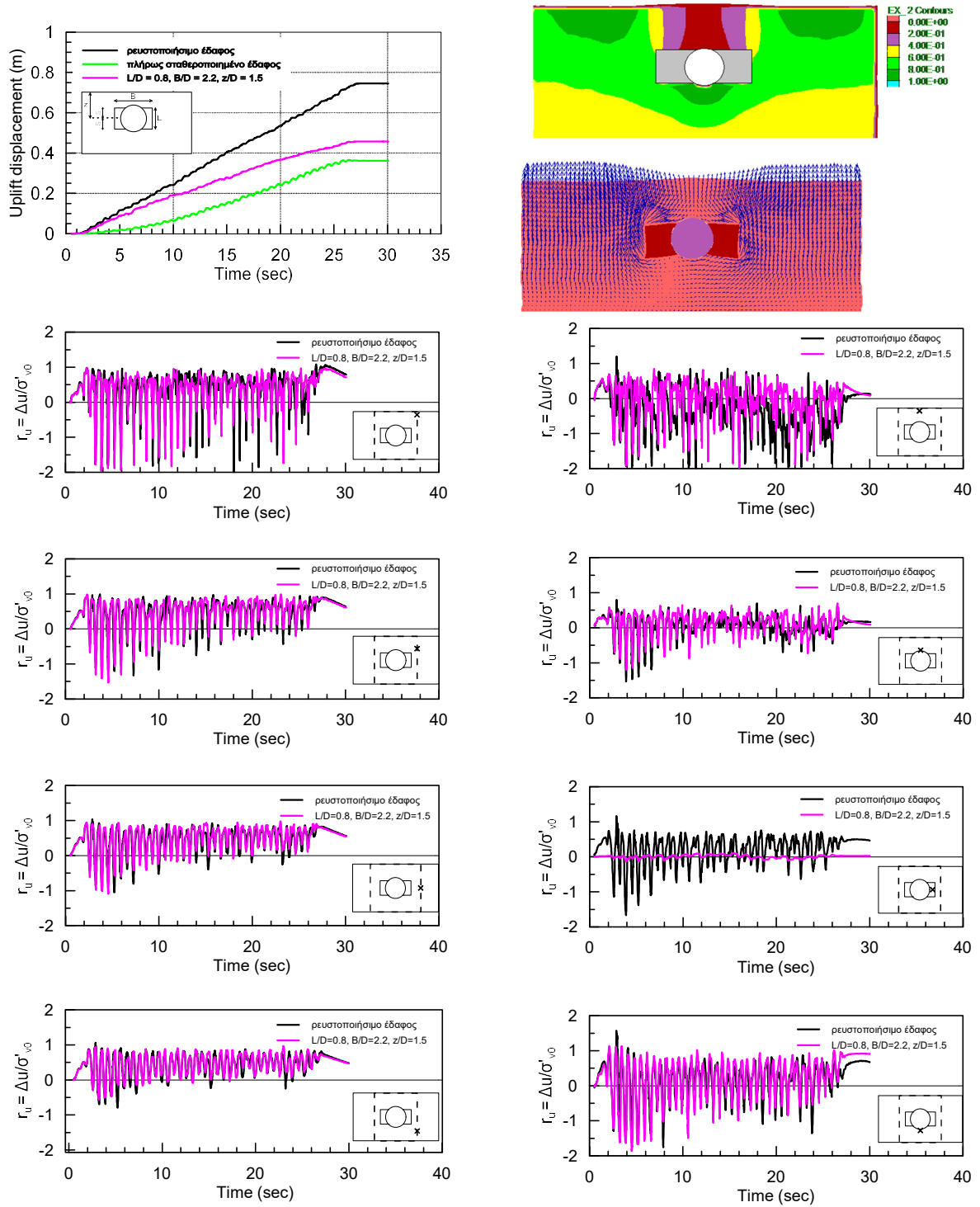
Σχήμα Α.5: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγω υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγω υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 1.2$, $B/D = 1.6$ και $z/D = 1.7$



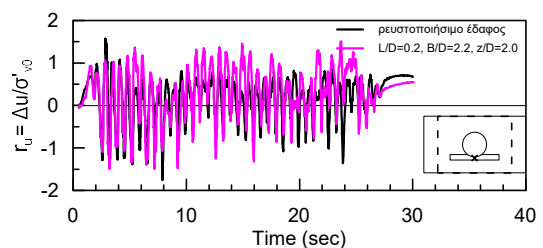
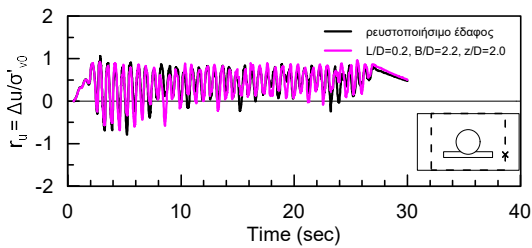
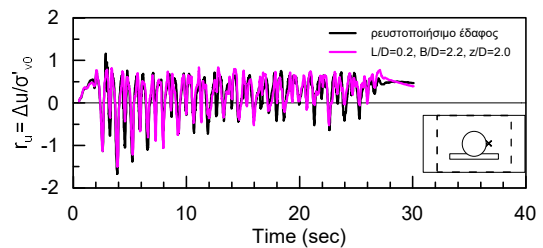
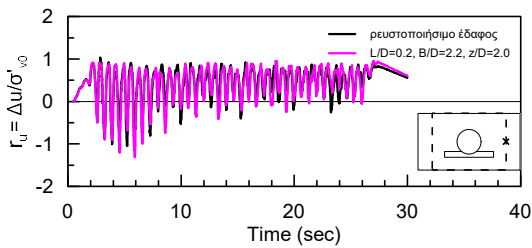
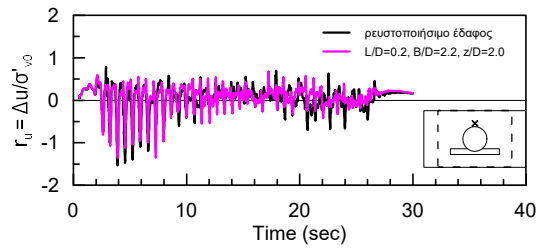
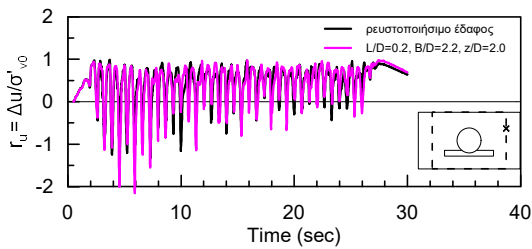
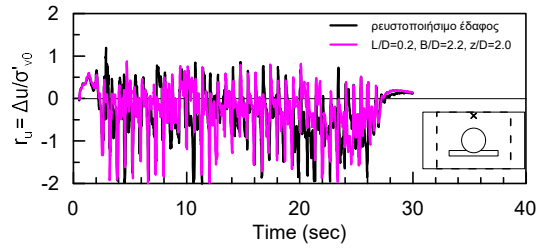
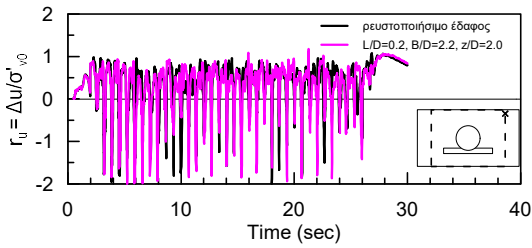
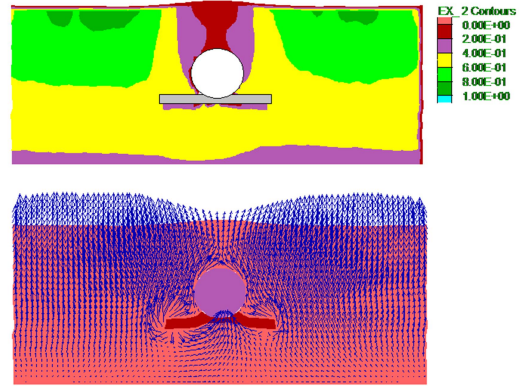
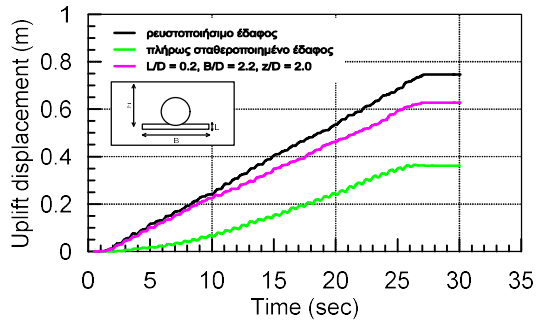
Σχήμα Α.6: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 1.7$, $B/D = 2.2$ και $z/D = 1.95$



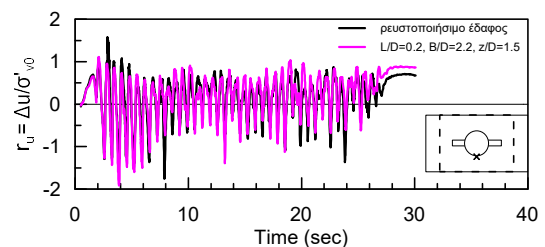
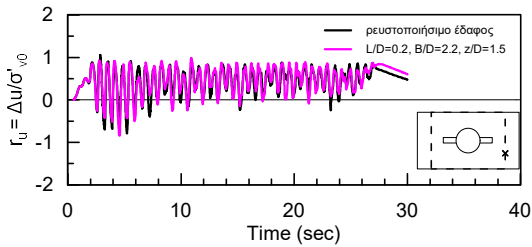
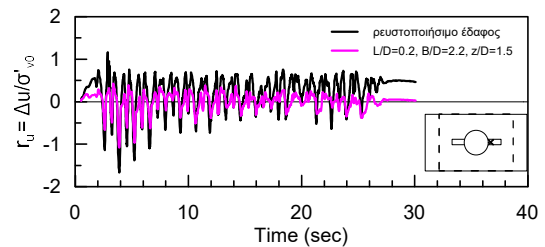
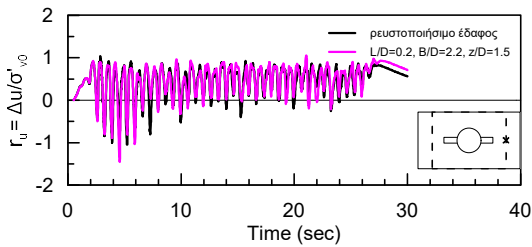
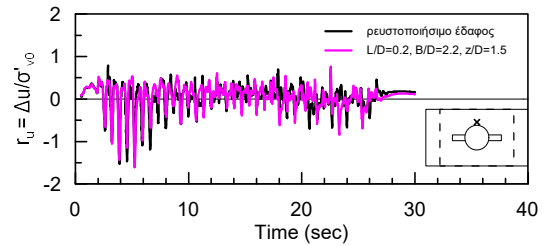
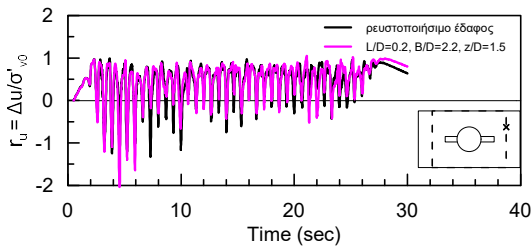
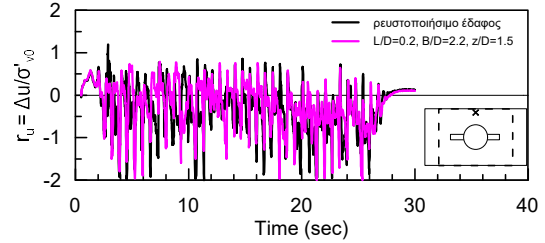
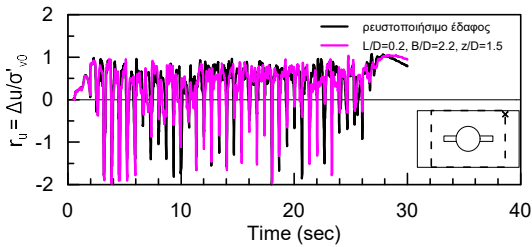
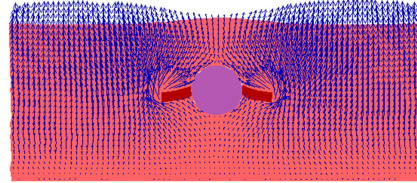
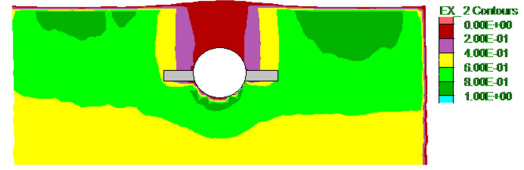
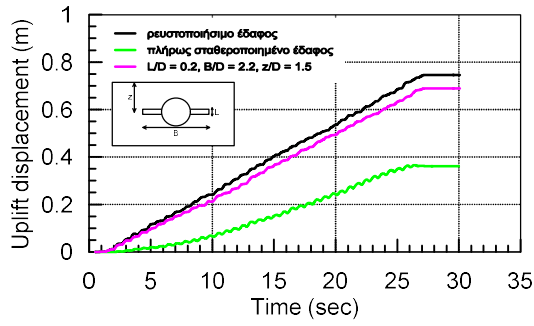
Σχήμα Α.7: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγω υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγω υδατικών υπερπίεσεων r_v για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.8$, $B/D = 1.6$ και $z/D = 1.5$



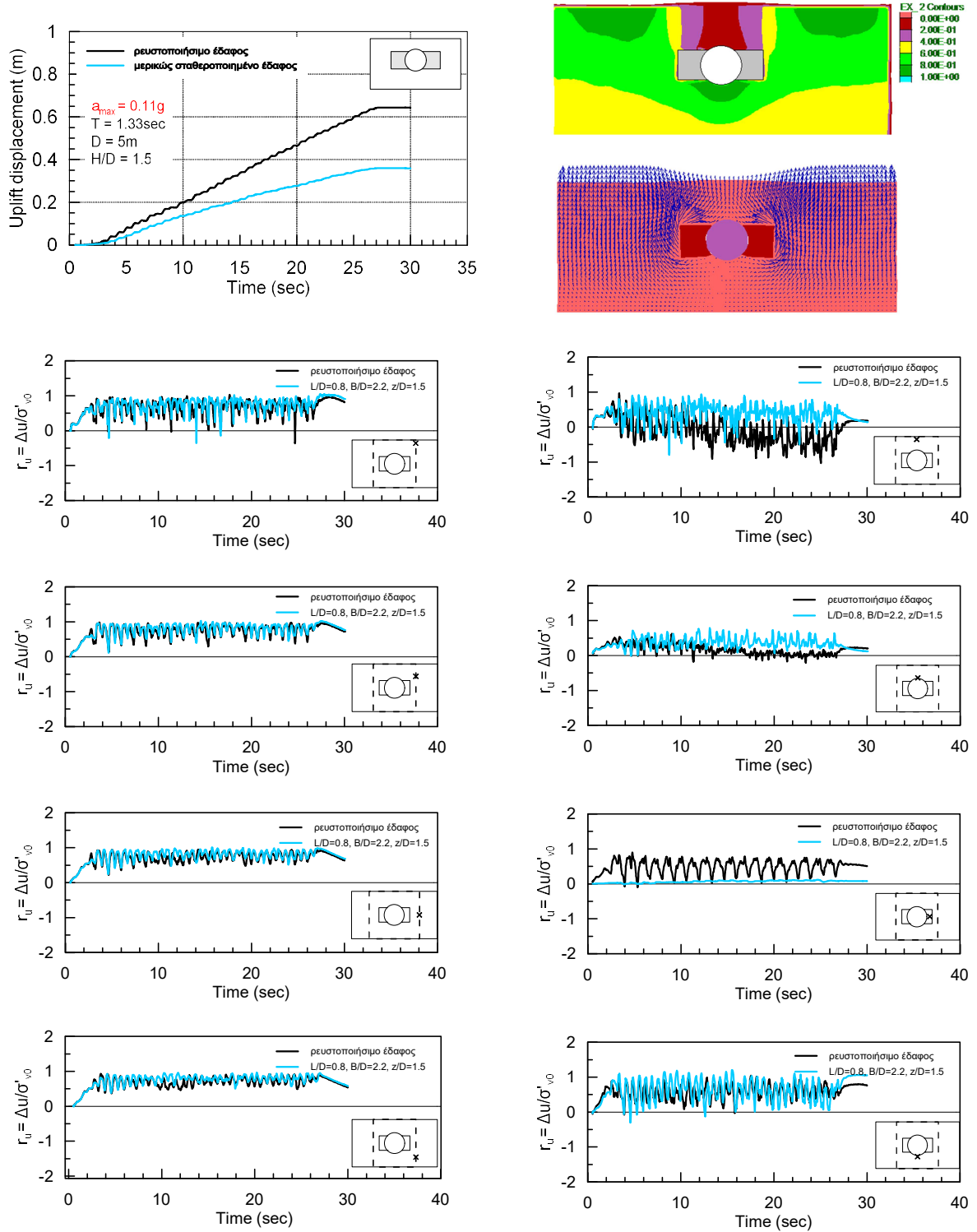
Σχήμα Α.8: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγω υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγω υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.8, B/D = 2.2$ και $z/D = 1.5$



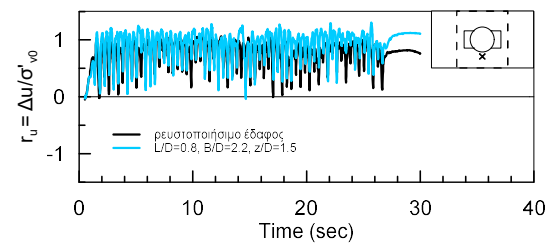
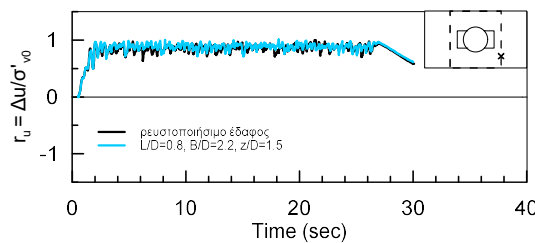
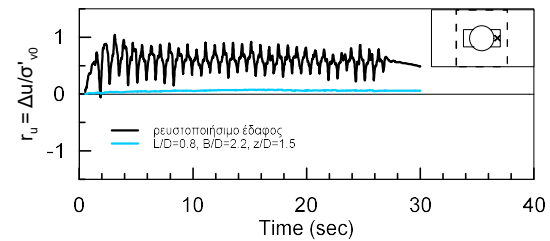
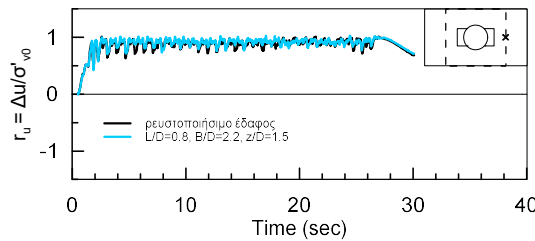
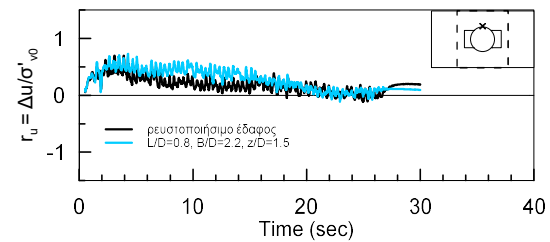
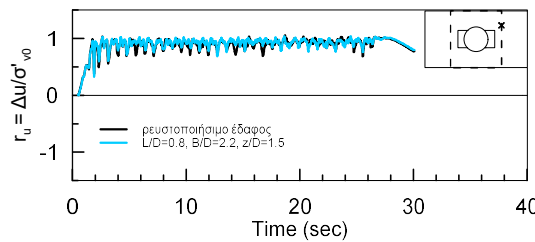
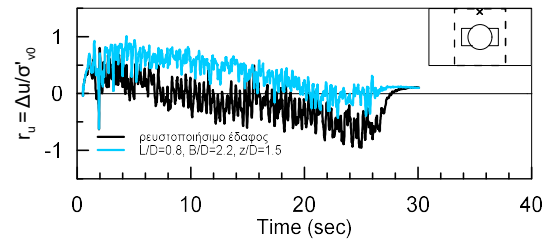
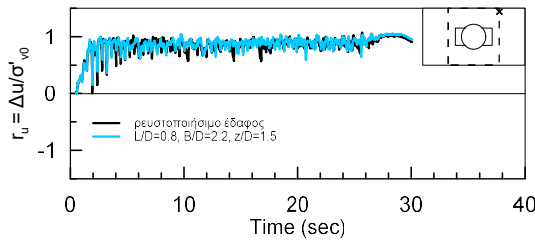
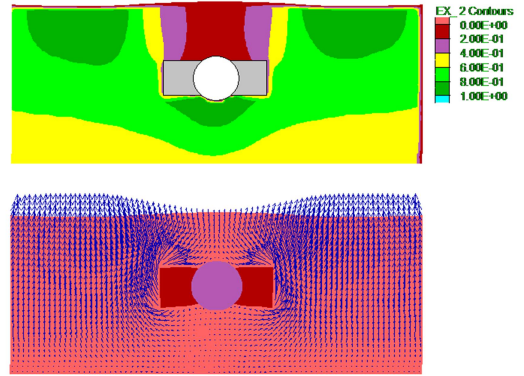
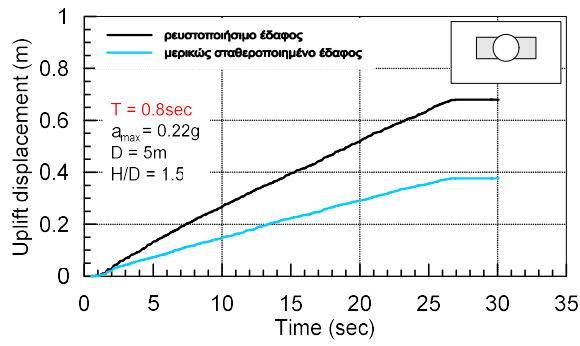
Σχήμα Α.9: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.2$, $B/D = 2.2$ και $z/D = 2.0$



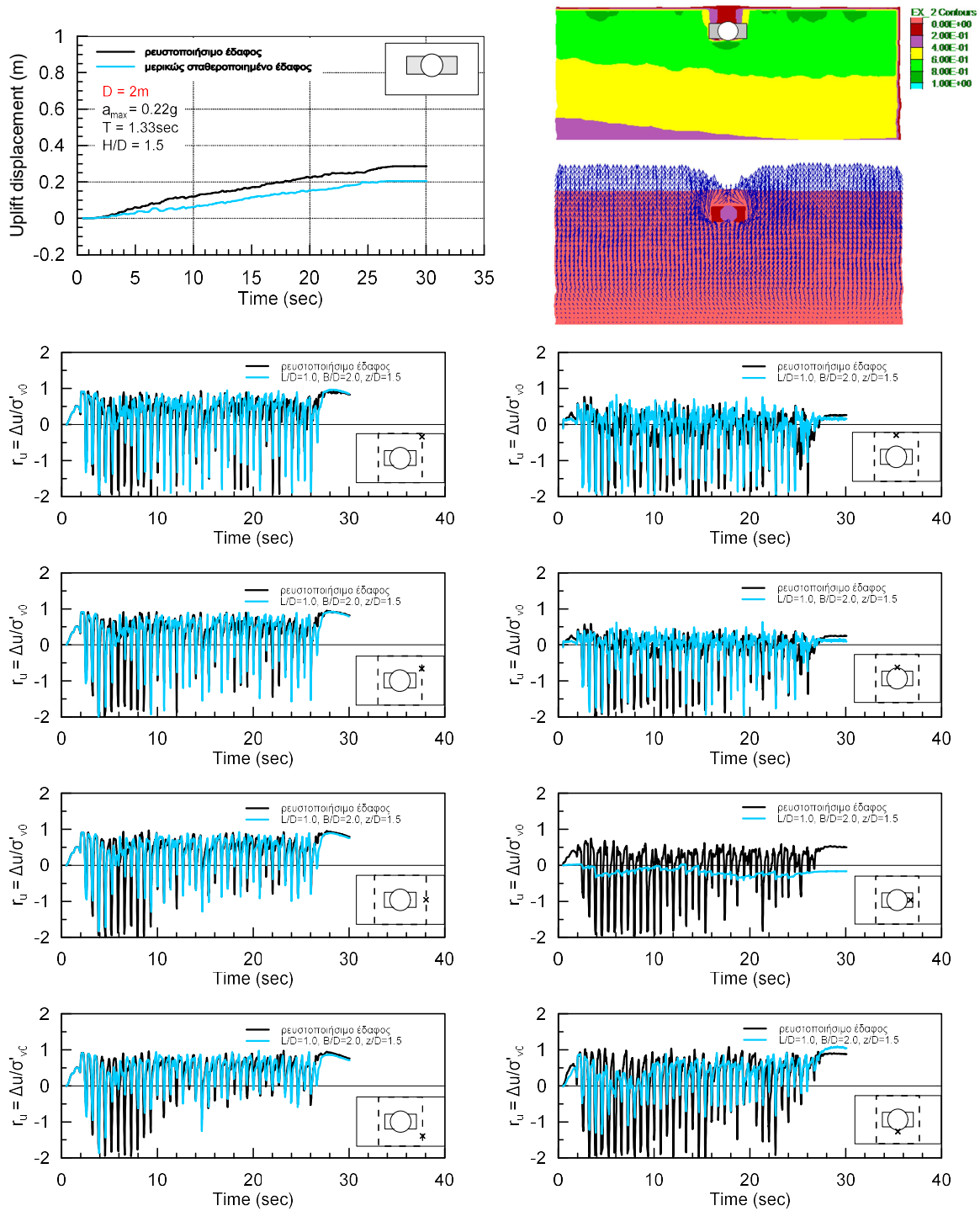
Σχήμα Α.10: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό σε μερικής σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.2$, $B/D = 2.2$ και $z/D = 1.5$



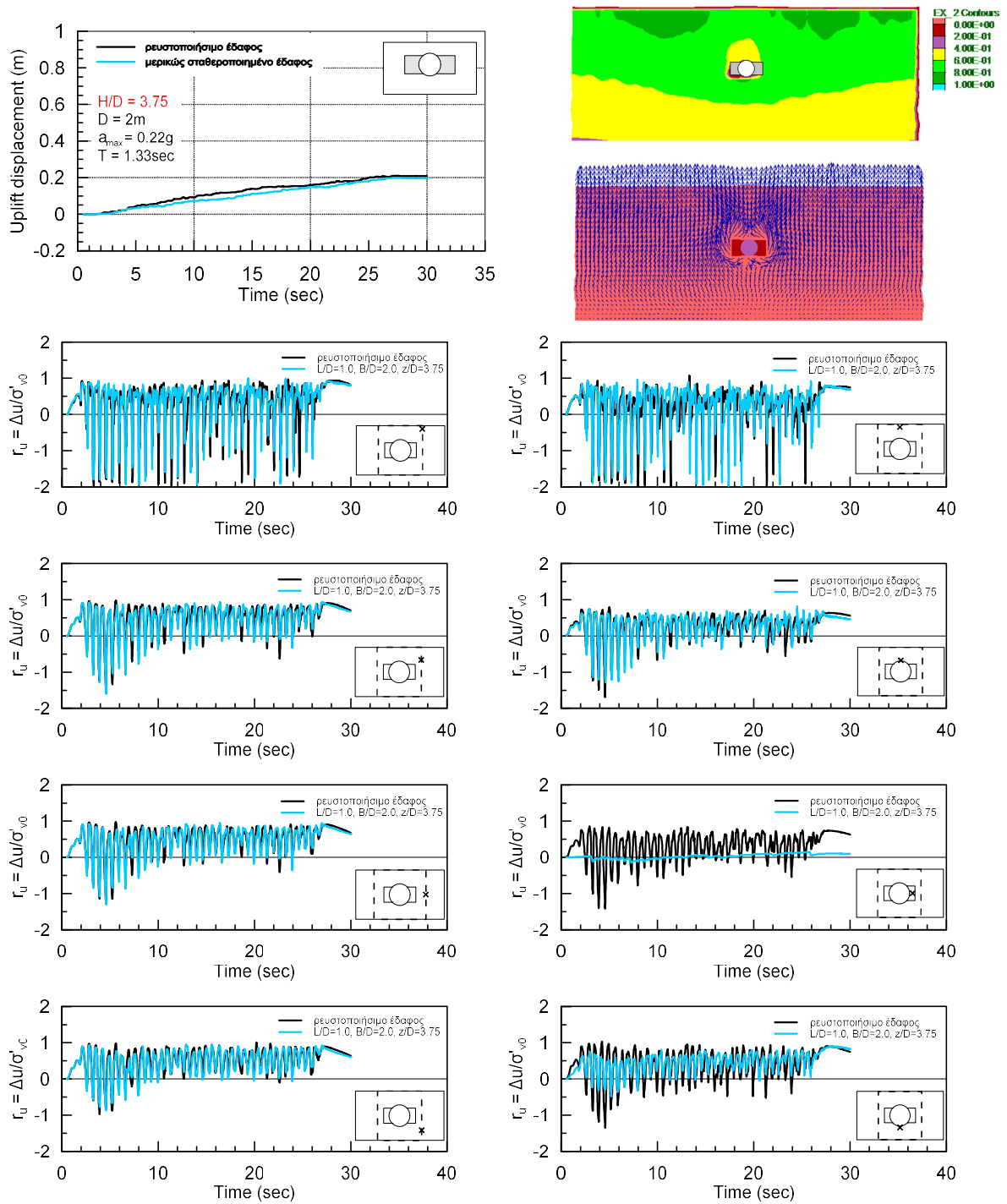
Σχήμα Α.11: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό στο μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.8$, $B/D = 2.2$ και $z/D = 1.5$, για επιτάχυνση βάσης $a_{max} = 0.11g$



Σχήμα Α.12: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό στο μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 0.8$, $B/D = 2.2$ και $z/D = 1.5$, για περίοδο $T = 0.8\text{sec}$



Σχήμα Α.13: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_w , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό στο μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 1.0$, $B/D = 2.0$ και $z/D = 1.5$, για διάμετρο αγωγού $D = 2m$



Σχήμα Α.14: Χρονοϊστορίες ανύψωσης, ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσεων πόρων r_w , διανύσματα ροής και χρονοϊστορίες λόγου υδατικών υπερπίεσεων r_u για υπόγειο αγωγό στο μερικώς σταθεροποιημένο έδαφος διαστάσεων $L/D = 1.0$, $B/D = 2.0$ και $z/D = 3.75$, για λόγο εγκλιωτισμού $H/D = 3.75$