



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ
ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΕΔΑΦΟΣ**

**LOAD – DISPLACEMENT CURVES FOR TRANSVERSE
DISPLACEMENT OF BURIED PIPELINE IN LIQUEFIED SOIL**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΕΛΑΒΙΝΙΑ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επικουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2019

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική εργασία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών και ευελπιστώ να αποτελέσει το εφαλτήριο για τη μετέπειτα ακαδημαϊκή μου πορεία. Η ολοκλήρωσή της δε θα ήταν εφικτή χωρίς τη συμβολή συγκεκριμένων ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Αχιλλέα Παπαδημητρίου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, για την καλή του διάθεση και την καθοδήγησή του σε κάθε στάδιο της εργασίας μου. Τον ευχαριστώ, επίσης, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την υποψήφια Διδάκτορα Ταξιαρχούλα Λημναίου, για την αδιάκοπη καθοδήγηση και στήριξή της όλους αυτούς τους μήνες. Την ευχαριστώ για τη φιλοξενία της και για όλες τις στιγμές χαράς και γέλιου που ζήσαμε μαζί. Ευχαριστώ, ακόμα, το Βασίλη, την Ελένη, τον Κωνσταντίνο και το Φίλιππο, υποψήφιους Διδάκτορες του Τομέα Γεωτεχνικής, για τις όμορφες στιγμές που μοιραστήσαμε κατά τη διάρκεια της παραμονής μου στον τομέα.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου Ιωάννα και Μιχάλη, την αδερφή μου Χριστίνα και όλους τους καλούς μου φίλους για την υπομονή που υπέδειξαν και για τη στήριξη που μου παρείχαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας καθώς και σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στη σχολή.

Δήμητρα

Περίληψη

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των υπόγειων αγωγών έναντι μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων πραγματοποιείται μέσω αριθμητικών αναλύσεων στις οποίες η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού προσομοιώνεται από ανεξάρτητα μεταξύ τους ελαστο-πλαστικά ελατήρια σε κάθε διεύθυνση μετατόπισης. Η συμπεριφορά των ελατηρίων αυτών περιγράφεται από διγραμμικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης που ορίζονται από το οριακό φορτίο και την ελαστική στιβαρότητα. Η ελαστική στιβαρότητα ισούται με το λόγο του οριακού φορτίου προς την αναγκαιά (οριακή) μετατόπιση για την επίτευξη του οριακού φορτίου.

Όταν ένας αγωγός σχεδιάζεται να εγριβωτιστεί σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος (ήτοι με υδροστατικές πιέσεις πόρων), οι παραπάνω καμπύλες προσδιορίζονται επακριβώς από τις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού (ASCE 1984, ALA 2001, PRCI 2009). Όμως, όταν το έδαφος αναμένεται να ρευστοποιηθεί μερικώς ή ολικώς, δεν υπάρχουν σαφείς οδηγίες σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση του μερικώς ρευστοποιημένου εδάφους (συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης, $5.0 > FS_l > 1.0$) δεν υπάρχει καμία διαθέσιμη οδηγία. Ωστόσο, για το πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος ($FS_l \leq 1.0$) η πιο σύγχρονη και αξιόπιστη πρόταση σχεδιασμού (O'Rourke and Liu, 2012) αφορά στην εφαρμογή ενός μειωτικού συντελεστή 3 % στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης των ελατηρίων. Ειδικότερα, προτείνουν αυτός ο μειωτικός συντελεστής να εφαρμόζεται τόσο στο οριακό φορτίο όσο και στην ελαστική στιβαρότητα, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά των αγωγών (διάμετρος, βάθος εγριβωτισμού), τη διεύθυνση των ελατηρίων και την κατεύθυνση μετατόπισης του αγωγού (π.χ. εγιάρσια κατακόρυφη προς τα άνω και εγιάρσια οριζόντια μετατόπιση, οι οποίες εξετάζονται στην παρούσα εργασία).

Στη σχετική βιβλιογραφία αποδεικνύεται ότι η παρουσία ενός ρηχού υπόγειου αγωγού επηρεάζει την κατανομή του λόγου υπερπιέσεων πόρων (r_u) στο περιβάλλον έδαφος. Συγκεκριμένα, όταν το έδαφος μακριά από τον αγωγό (ελεύθερο πεδίο) είναι πλήρως ρευστοποιημένο, το υπερκείμενο έδαφος των ρηχών αγωγών δε ρευστοποιείται και επομένως διατηρεί σημαντικό ποσοστό της διατμητικής του αντοχής και δυσστησίας. Αντιθέτως, σε βαθιούς αγωγούς, το υπερκείμενο έδαφος δεν «προστατεύεται» και ρευστοποιείται αντίστοιχα με το ελεύθερο πεδίο. Ανομοιόμορφες κατανομές του λόγου r_u αναμένονται ακόμα και όταν αναπτύσσονται μεν υπερπιέσεις πόρων στην εδαφική στρώση, αλλά δεν επιτυγχάνεται ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο. Στην παρούσα εργασία, η ένταση των ανομοιόμορφα αναπτυγμένων τιμών r_u ποσοτικοποιείται σε κάθε περίπτωση μέσω της μέσης καθ' ύψος τιμής του λόγου r_u στο ελεύθερο πεδίο (συμβολίζεται ως $r_{u,ff}$). Στη συνέχεια, διερευνάται η επίδραση διαφορετικών τιμών του $r_{u,ff}$ (από 0.0 που αντιστοιχεί σε πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος έως 1.0 που αντιστοιχεί στην πλήρη ρευστοποίηση) στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης των αγωγών.

Οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των αγωγών διερευνώνται σε έδαφος με $r_{u,ff} = 0.0$ έως 1.0, στοχεύοντας στην ποσοτικοποίηση των μειωτικών συντελεστών του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας. Η διερεύνηση γίνεται αριθμητικά με τη μέθοδο

Πεπερασμένων Διαφορών (FLAC) και το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND. Αρχικά, αναπτύσσεται η επιθυμητή τιμή $r_{u,ff}$ ($r_{u,ff} > 0.0$) και στη συνέχεια ο ελάχιστος αγωγός μετατοπίζεται ως άκαμπτο στερεό εντός του (τροποποιημένου εξαιτίας της σεισμικής δόνησης) πεδίου ενεργών τάσεων, εξασφαλίζοντας όμως ότι οι σεισμικώς ανεπτυγμένες υπερπίεσεις πόρων διατηρούνται σταθερές. Σημειώνεται ότι κατά την εγκάρσια μετατόπιση του αγωγού σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης προκύπτει ως η συνισταμένη δύναμη αντίστασης που το γειτονικό έδαφος επιβάλλει στη διεπιφάνεια αγωγού - εδάφους κατά τη διάρκεια της μετατόπισης του αγωγού.

Από τη σύγκριση των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης για διαφορετικούς αγωγούς, διαφορετικές διευθύνσεις και τιμές $r_{u,ff}$, προκύπτει ότι το οριακό φορτίο και η ελαστική στιβαρότητα φθίνουν με την αύξηση του $r_{u,ff}$. Ως αποτέλεσμα, λαμβάνουν την ελάχιστη τιμή τους όταν $r_{u,ff} = 1.0$. Επίσης, διαπιστώνεται ότι οι μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας εξαρτώνται από την κατεύθυνση μετατόπισης των αγωγών και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών, για κάθε τιμή $r_{u,ff}$. Όμως, για κάθε εγκάρσια διεύθυνση, η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού είναι λιγότερο σημαντική από την επίδραση του λόγου $r_{u,ff}$. Επιπλέον, σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική σχεδιασμού, αποδεικνύεται ότι η οριακή μετατόπιση μειώνεται και αυτή με την αύξηση του $r_{u,ff}$, οπότε οι μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας δεν μπορεί να είναι ίδιοι.

Από πρακτικής σκοπιάς, η εφαρμογή ενός μειωτικού συντελεστή 3% στο οριακό φορτίο και την ελαστική στιβαρότητα όταν $r_{u,ff} = 1.0$ ($FS_l \leq 1.0$) κρίνεται μη-συντηρητική, ειδικά για την εγκάρσια οριζόντια μετακίνηση. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τη σύγκριση της τιμής 3% με τις τιμές που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις. Στις περιπτώσεις των εγκάρσια κατακόρυφων για την προς τα άνω μετατόπιση των αγωγών και των εγκάρσια οριζόντιων ελατηρίων, από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψαν τιμές 3.5-11% και 7-14% αντίστοιχα, όλες μεγαλύτερες του 3%. Επίσης, οι μειωτικοί συντελεστές της ελαστικής δυσκαμψίας είναι πολύ διαφορετικές του 3%, δεδομένου ότι οι αριθμητικές αναλύσεις κατέληξαν σε τιμές 11-29% και 18-30%, για τα εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια για την προς τα άνω μετατόπιση των αγωγών και τα εγκάρσια οριζόντια ελατήρια, αντίστοιχα. Επιπλέον, όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο είναι μερικώς ρευστοποιημένο ($1.0 > r_{u,ff} > 0.0$, ή κατά προσέγγιση $5.0 > FS_l > 1.0$) αυτοί οι μειωτικοί συντελεστές έχουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές (παρμένουν, ωστόσο, μικρότεροι του 1.0). Αυτό σημαίνει ότι η θεώρηση ενός μερικώς ρευστοποιημένου εδάφους ως πλήρως ρευστοποιημένου είναι μη-συντηρητική, ενώ αν αγνοηθεί η ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων (δηλαδή αν θεωρηθεί ότι $r_{u,ff} = 0.0$) ο σχεδιασμός θα είναι πιθανότατα υπερσυντηρητικός. Σε κάθε περίπτωση, η παρούσα εργασία προτείνει κατάλληλες τιμές των μειωτικών συντελεστών για όλες τις περιπτώσεις $r_{u,ff}$ (ή ισοδύναμα FS), οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα στην πράξη.

Abstract

The seismic design of buried pipelines against permanent ground displacements is mostly performed numerically with the use of elasto-plastic soil springs that simulate the soil - pipe interaction independently in each direction. Each spring is described by a bilinear load - displacement curve, defined by its ultimate load and its elastic stiffness. The elastic stiffness is defined as the ratio of ultimate load to the (ultimate) displacement required to reach the ultimate soil resistance (ultimate load).

In the case of a pipe embedded in saturated, fully drained soil (with hydrostatic pore pressures), international design guidelines (ASCE 1984, ALA 2001, PRCI 2009) define precisely the above-mentioned curves. However, in the case that the pipeline is buried in a fully or partially liquefied soil, it is unclear how the seismic design should be performed. Specifically, there are no guidelines for the design of pipelines in partially liquefied soil (factor of safety against liquefaction, $5.0 > FS_l > 1.0$). But, for the design of pipelines in fully liquefied soils ($FS_l \leq 1.0$) the most recent and reliable proposal (O'Rourke and Liu, 2012) is to apply a reduction factor of 3% to the soil spring load - displacement curve. Particularly, it is proposed that this reduction factor applies to both the ultimate load and the elastic stiffness, regardless of the characteristics of the pipe (diameter, embedment depth), the direction of the soil springs and the direction of the pipe displacement (e.g. transverse vertical upward and transverse horizontal displacement, studied here).

In pertinent literature it is proved that a shallow embedded pipe affects the excess pore pressure ratio (r_u) distribution in the surrounding soil. In particular, in the case that the soil fully liquefies at the free-field, the area above the shallow pipe does not, so it retains most of its shear strength and stiffness. On the other hand, if the pipe is deeply embedded, the area above it is not similarly "protected" and liquefies similarly to what occurs at the free-field. Likewise, in the case of a seismic excitation that does not liquefy the soil at the free-field, a non-uniform r_u profile around the pipe is expected. In any case, the level of the developed r_u values, despite their variability, is hereby quantified with the average value of r_u over depth in the free-field (denoted as $r_{u,ff}$). Next, the $r_{u,ff}$ effect (0.0 in the case of a fully drained saturated soil, 1.0 in case of a fully liquefied soil in free-field) on the load - displacement curves of the pipes is examined.

The load - displacement curves are investigated in soils with $r_{u,ff}$ values ranging from 0.0 to 1.0, so that the reduction factors of ultimate load and elastic stiffness are pinpointed. This investigation is performed numerically with a Finite Difference program (FLAC) employing the NTUA-SAND constitutive model. Firstly, the desired $r_{u,ff}$ value is achieved ($r_{u,ff} > 0.0$) and then each embedded pipe gets displaced like a rigid body within the (modified due to the shaking) effective stress field, ensuring that the pore pressures developed during shaking remain unchanged. Note that while a pipe is being transversely displaced, the load - displacement curve comes out as the resultant resistant force of the neighboring soil acting on the pipe - soil interface during the displacement of the pipe.

Comparing the load - displacement curves that correspond to different pipes, displacement directions and $r_{n,ff}$ values, it turns out that both the ultimate load and the elastic stiffness decrease when $r_{n,ff}$ increases. As a result, they take their lowest values when $r_{n,ff} = 1.0$. Also, it is found that the reduction factors for the ultimate load and the elastic stiffness depend on the direction of a pipe displacement and the pipe characteristics (diameter, embedment depth), for any given $r_{n,ff}$ value. However, for any given direction of pipe displacement, the pipe characteristics have a much smaller effect on the values of reduction factors than the value of $r_{n,ff}$. Furthermore, unlike common practice, it is proved that the ultimate displacement also decreases when $r_{n,ff}$ increases, which means that the ultimate load can't have the same reduction factor with elastic stiffness.

From a practical perspective, the application of a 3 % reduction factor to both the ultimate load and the elastic stiffness when $r_{n,ff} = 1.0$ (or $FS_l \leq 1.0$) is found to be non-conservative, especially for the transverse horizontal springs. This conclusion arises by comparing the 3% value with the values extracted from the numerical analyses. In the cases of the transverse vertical upward and transverse horizontal soil springs the numerical analyses led to reduction factors with values 3.5-11 % and 7-14 % respectively, i.e. all larger than 3%. Moreover, the reduction factors of elastic stiffness are far different from 3%, given that the numerical analyses concluded to values 11-29 % and 18-30 % in the cases of the transverse vertical upward and transverse horizontal soil springs, respectively. In addition, when the soil is partially liquefied at the free-field ($1.0 > r_{n,ff} > 0.0$, or $5.0 > FS_l > 1.0$ approximately), these reduction factors have much larger values (but remain smaller than 1.0). This means that considering partially liquefied soils as fully liquefied is non-conservative, while disregarding completely the excess pore pressure buildup (i.e. considering $r_{n,ff} = 0.0$) may lead to over-conservative design. In any case, this work proposes appropriate values for the reduction factors for all cases of $r_{n,ff}$ (or FS_l equivalently), which can be readily used in engineering practice.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας.....	2
1.3 Δομή της εργασίας.....	3
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Οδηγίες σχεδιασμού αγωγών εγκιβωτισμένων σε κορεσμένο κοκκώδες έδαφος.....	6
2.2.1 Εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού.....	6
2.2.2 Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού.....	9
2.3 Οδηγίες σχεδιασμού αγωγών εγκιβωτισμένων σε ρευστοποιημένο κοκκώδες έδαφος.....	12
2.4 Επίδραση του αγωγού στη ρευστοποίηση της εδαφικής στρώσης.....	12
2.5 Μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους λόγω μετατόπισης αγωγού.....	15
2.5.1 Εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού.....	15
2.5.2 Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού.....	19
2.6 Συμπεράσματα.....	22
Κεφάλαιο 3 Αριθμητική μεθοδολογία.....	25
3.1 Γενικά.....	25
3.2 Μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης.....	25
3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC.....	25
3.2.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND.....	28
3.3 Αριθμητική προσομοίωση της μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένη, πλήρως στραγγιζόμενη αμμώδη στρώση.....	32
3.3.1 Γεωστατικό πεδίο και πεδίο των τάσεων μετά την κατασκευή του αγωγού.....	32
3.3.2 Μετατόπιση του αγωγού.....	34
3.4 Αριθμητική προσομοίωση της μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένη, με υπερπίεσεις πόρων αμμώδη στρώση.....	36
3.4.1 Γεωστατικό πεδίο και πεδίο των τάσεων μετά την κατασκευή του αγωγού.....	37
3.4.2 Ανάπτυξη υπερπίεσεων στους εδαφικούς πόρους.....	37
3.4.3 Μετατόπιση του αγωγού.....	41

3.5 Διακριβωση αριθμητικής μεθοδολογίας	41
3.5.1 Εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση	41
3.5.2 Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση	45
3.6 Συμπεράσματα	49
Κεφάλαιο 4 Εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος	51
4.1 Γενικά	51
4.2 Κατανομή των υπερπιέσεων πόρων στην εδαφική στρώση	52
4.3 Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης	58
4.4 Ευαισθησία καμπυλών φορτίου - μετατόπισης	64
4.5 Μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης	69
4.6 Συμπεράσματα	72
Κεφάλαιο 5 Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος	75
5.1 Γενικά	75
5.2 Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης	76
5.3 Μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης	80
5.4 Ευαισθησία καμπυλών φορτίου - μετατόπισης	83
5.5 Συμπεράσματα	86
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις	89
6.1 Γενικά	89
6.2 Συμπεράσματα	89
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	92
Κεφάλαιο 7 Βιβλιογραφικές αναφορές	95

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Συντελεστής εγγάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω φέρουσας ικανότητας, N_{qv} , κατά Trautmann et al. (1985a), όπως παρουσιάζεται στους O'Rourke and Liu (2012).	7
Σχήμα 2.2. Συντελεστής εγγάρσιας οριζόντιας φέρουσας ικανότητας, N_{qh} , κατά Trautmann et al. (1985b), όπως παρουσιάζεται στους O'Rourke and Liu (2012).	10
Σχήμα 2.3. Συντελεστής εδαφικής αντοχής για οριζόντια μετατόπιση, N_{qb} , κατά Hansen (1961), όπως παρουσιάζεται στους O'Rourke and Liu, 2012).	10
Σχήμα 2.4. Αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης του πειράματος των Chian et al. (2014) υπό μορφή: (α) ισοκαμπυλών r_n , και (β) διανυσμάτων υπόγειας ροής (από Paradimitriou et al. 2019a).	14
Σχήμα 2.5. Μηχανισμός εδαφικής παραμόρφωσης κορεσμένου σταθερού εδάφους εξαιτίας της ανύψωσης αγωγού με $H/D = 1.5$ και $D = 258$ mm σε πείραμα πραγματικής κλιμακίας (από Chian et al. 2015).	16
Σχήμα 2.6. Πεδίο διανυσμάτων ολικής μετατόπισης και παραμορφωμένη επιφάνεια του ξηρού εδάφους κατά την κατακόρυφη μετατόπιση αγωγού βάρους εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$ (από Huang et al. 2015).	16
Σχήμα 2.7. Διανύσματα ολικής μετατόπισης του ρευστοποιημένου εδάφους κατά την ανύψωση λόγω ρευστοποίησης αγωγού με $H/D = 1.5$ και $D = 5$ m. (από Chian et al. 2014).	18
Σχήμα 2.8. Διανύσματα ολικής μετατόπισης του ρευστοποιημένου εδάφους κατά την ανύψωση λόγω ρευστοποίησης αγωγού εγκιβωτισμένου σε βάθος $H = 2.5D$ (από Huang et al. 2015).	18
Σχήμα 2.9. Μηχανισμοί αστοχίας ξηρής άμμου κατά την εγγάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού εγκιβωτισμένου σε βάθη $H = 1.5 D$, $6.5 D$ και $16 D$ (από Chaloulos et al. 2015). ..	20
Σχήμα 2.10. Διανύσματα επαυξητικής παραμόρφωσης σε μεγάλες τιμές εγγάρσιας οριζόντιας μετατόπισης αγωγού διαμέτρου $D = 254$ mm εντός ξηρής άμμου για λόγους εγκιβωτισμού H/D (α) 1.0 και (β) 3.0 (από Burnett 2015).	21
Σχήμα 2.11. Διανύσματα ταχύτητας κατά την εγγάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού με λόγο $H/D = 1.0$: (α) σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος και (β) σε ρευστοποιημένο έδαφος υπό την ταυτόχρονη δράση σεισμικής διέγερσης (από Ono & Okamura 2019).	21
Σχήμα 3.1. Βασική ακολουθία επίλυσης στον Κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC, σε ένα χρονικό βήμα Δt	26
Σχήμα 3.2. Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο $p - q$ και η προβολή τους στο επίπεδο αποκλινοσών τάσεων.	28

Σχήμα 3.3. Τυπικός κάρναβος αριθμητικής προσομοίωσης στο πρόγραμμα FLAC.....	33
Σχήμα 3.4. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων από τις αναλύσεις και τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού.	42
Σχήμα 3.5. Μηχανισμοί παραμόρφωσης κορεσμένου κοκκώδους εδάφους σε συνθήκες πλήρους στράγγισης ($r_{u,ff} = 0.0$) υπό μορφή διανυσμάτων μετατόπισης όταν αγωγός διαμέτρου D και λόγου εγκιβωτισμού H/D μετατοπίζεται εγκάρσια κατακόρυφα προς τα άνω.....	45
Σχήμα 3.6. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($p - y$) των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων από τις αναλύσεις τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$).	46
Σχήμα 3.7. Μηχανισμοί παραμόρφωσης κορεσμένου κοκκώδους εδάφους σε συνθήκες πλήρους στράγγισης ($r_{u,ff} = 0.0$) υπό μορφή διανυσμάτων μετατόπισης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 0.6$ m και λόγου εγκιβωτισμού H/D μετατοπίζεται προς τα δεξιά κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση.....	48
Σχήμα 4.1. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 1.2$ m εγκιβωτίζεται σε βάθος $H = 1.5 D$ και ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.3, (β) 0.5 και (γ) 1.0.....	53
Σχήμα 4.2. Χρονοϊστορίες του λόγου r_u σε διάφορα σημεία γύρω από τον αγωγό και στο ελεύθερο πεδίο (μακριά από τον αγωγό), κατά τη διάρκεια και μετά το τέλος της σεισμικής διέγερσης που προκαλεί την ανάπτυξη $r_{u,ff} = 1.0$	53
Σχήμα 4.3. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 1.2$ m εγκιβωτίζεται σε βάθος $H = 3 D$ και ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.3, (β) 0.5 και (γ) 1.0.....	55
Σχήμα 4.4. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 1.2$ m εγκιβωτίζεται σε βάθος $H = 1.5 D$ και $r_{u,ff} = 0.3$, υπό τη δράση της σεισμικής διέγερσης (α) $a_{max} = 0.05$ g, $T = 0.05$ s και (β) $a_{max} = 0.007$ g, $T = 0.30$ s.	56
Σχήμα 4.5. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 1.2$ m εγκιβωτίζεται σε βάθος $H = 1.5 D$ και $r_{u,ff} = 0.5$, υπό τη δράση της σεισμικής διέγερσης (α) $a_{max} = 0.12$ g, $T = 0.05$ s και (β) $a_{max} = 0.02$ g, $T = 0.30$ s.	56
Σχήμα 4.6. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.5 και 1.0, ενώ ο αγωγός έχει διάμετρο $D = 0.6$ m και εγκιβωτίζεται σε βάθος H ίσο με (α) $1.5D$, (β) $3.0D$ και (γ) $4.5D$	57
Σχήμα 4.7. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων από τις αναλύσεις και τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 1.2$ m όταν (α) $H/D = 1.5$ και (β) $H/D = 3$, για διάφορες τιμές του $r_{u,ff}$ (0.0, 0.3, 0.5 και 1.0).....	59

Σχήμα 4.8. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων από τις αναλύσεις και τη δι- γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m όταν (α) $H/D = 3.0$ και (β) $H/D = 4.5$, για διάφορες τιμές του $r_{n,ff}$ (0.0, 0.5 και 1.0).	61
Σχήμα 4.9. Συντελεστές απομείωσης συναρτήσει του $r_{n,ff}$ (α) του οριακού φορτίου, (β) της ελαστικής στιβαρότητας και (γ) της οριακής μετατόπισης των ελαστο-πλαστικών (δι-γραμμικών) καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων.	63
Σχήμα 4.10. Ελαστο-πλαστικές (δι-γραμμικές) καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού με $D = 1.2$ m και $H/D = 1.5$, για (α) $r_{n,ff} = 0.3$ και (β) $r_{n,ff} = 0.5$ και τους συνδυασμούς διεγέρσεων (I) και (II).	65
Σχήμα 4.11. Επίδραση των προφίλ του λόγου r_n στους συντελεστές απομείωσης συναρτήσει του $r_{n,ff}$ (α) του οριακού φορτίου, (β) της ελαστικής στιβαρότητας και (γ) της οριακής μετατόπισης των ελαστο-πλαστικών (δι-γραμμικών) καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων, ενδεικτικά για τον αγωγό με $D = 1.2$ m και $H/D = 1.5$	66
Σχήμα 4.12. Ελαστο-πλαστικές (δι-γραμμικές) καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 1.2$ m, λόγου εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$ όταν (α) $r_{n,ff} = 0.0$ και (β) $r_{n,ff} = 1.0$, για δύο διαφορετικά ζεύγη τιμών (B, h_0), δηλαδή δύο διαφορετικές βαθμονομήσεις του NTUA-SAND.	68
Σχήμα 4.13. Μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου και της οριακής μετατόπισης (R_q και R_z) για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 1.2$ m, λόγου εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$ όταν $r_{n,ff} = 1.0$, για δύο διαφορετικά ζεύγη τιμών (B, h_0), δηλαδή δύο διαφορετικές βαθμονομήσεις του NTUA-SAND.	69
Σχήμα 4.14. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 1.2$ m και λόγου $H/D = 1.5$, όταν ο λόγος $r_{n,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.3, (γ) 0.5 και (δ) 1.0.	70
Σχήμα 4.15. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 1.2$ m και λόγου $H/D = 3$, όταν ο λόγος $r_{n,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.3, (γ) 0.5 και (δ) 1.0.	70
Σχήμα 4.16. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 0.6$ m και λόγου $H/D = 3.0$, όταν ο λόγος $r_{n,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.5 και (γ) 1.0.	72
Σχήμα 4.17. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 0.6$ m και λόγου $H/D = 4.5$, όταν ο λόγος $r_{n,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.5 και (γ) 1.0.	72
Σχήμα 5.1. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων από τις	

αναλύσεις και τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m όταν (α) $H/D = 1.5$, (β) $H/D = 3.0$ και (γ) $H/D = 4.5$, για διάφορες τιμές του r_{eff} (0.0, 0.5 και 1.0).....77

Σχήμα 5.2. Μειωτικοί συντελεστές συναρτήσε του r_{eff} (α) του οριακού φορτίου, (β) της ελαστικής σπιβαρότητας και (γ) της οριακής μετατόπισης των ελαστο-πλαστικών (δι-γραμμικών) καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m.....80

Σχήμα 5.3. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον εγκάρσια οριζόντια μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 0.6$ m σε διαφορετικά βάρη εγχιβωτισμού ($H/D = 1.5, 3.0$ και 4.5), όταν ο λόγος r_{eff} ισούται με (α) 0.0, (β) 0.5 και (γ) 1.0.....81

Σχήμα 5.4. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους σε ολόκληρη την εδαφική στρώση κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m σε διαφορετικά βάρη εγχιβωτισμού: (α) $H/D = 1.5$, (β) $H/D = 3.0$ και (γ) $H/D = 4.5$, όταν $r_{eff} = 1.0$82

Σχήμα 5.5. Παραμορφωμένος κάρναβος (μεγεθυμένος κατά 20 φορές) κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού με $D = 0.6$ m και $H/D = 3.0$, όταν $r_{eff} = 1.0$ και οι συνοριακές συνθήκες στα κατακόρυφα σύνορα είναι (α) κατακόρυφες κυλίσεις, (β) οριζόντιες κυλίσεις.....85

Σχήμα 5.6. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων από τις αναλύσεις για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m και λόγου $H/D = 3.0$, όταν οι συνοριακές συνθήκες στα πλευρικά σύνορα είναι κατακόρυφες ή οριζόντιες κυλίσεις.....86

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1. Τιμές των παραμέτρων a , b για τον προσδιορισμό του συντελεστή εγκάρσιας οριζόντιας φέρουσας ικανότητας, N_{qb} , κατά PRCI (2009).....	8
Πίνακας 2.2. Τιμές των παραμέτρων a , b , c , d , e για τον προσδιορισμό του συντελεστή εγκάρσιας οριζόντιας φέρουσας ικανότητας, N_{qb} , κατά ALA (2001).	11
Πίνακας 3.1. Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010)...	29
Πίνακας 3.2. Τιμές βαθμονομημένων παραμέτρων καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND για λεπτή άμμο Nevada (Andrianopoulos et al. 2010).....	31
Πίνακας 3.3. Ιδιότητες της άμμου Nevada που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση.....	33
Πίνακας 3.4. Τιμές ιδιοτήτων χαλύβδινου αγωγού και οι αντίστοιχες τιμές τους (ανεξάρτητες της διαμέτρου D) για την προσομοίωση των δακτυλιοειδών αγωγών ως συμπαγών.	34
Πίνακας 3.5. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (FS) για τις τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ που μελετώνται στην παρούσα εργασία (0.3, 0.5 και 1.0).....	40
Πίνακας 3.6. Σύγκριση των τιμών των οριακών φορτίων q_{ult} που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετακίνηση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$).....	43
Πίνακας 3.7. Σύγκριση των τιμών $z_{ult,b}$ των ελαστο-πλαστικών καμπυλών που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από τη δι-γραμμικοποίηση των καμπυλών $q - z$ της αριθμητικής ανάλυσης για εγκάρσια κατακόρυφη μετατόπιση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$).....	43
Πίνακας 3.8. Σύγκριση των τιμών p_{ult} που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση για εγκάρσια οριζόντια μετακίνηση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$).	46
Πίνακας 3.9. Σύγκριση των τιμών $y_{ult,b}$ των ελαστο-πλαστικών καμπυλών που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από τη δι-γραμμικοποίηση των καμπυλών $p - y$ της αριθμητικής ανάλυσης για εγκάρσια οριζόντια μετακίνηση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$).....	47
Πίνακας 6.1. Μειωτικοί συντελεστές της καμπύλης φορτίου - μετατόπισης των ισοδύναμων εγκάρσιων κατακόρυφων (για την προς τα άνω μετατόπιση) και εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων σε έδαφος με λόγο $r_{u,ff}$ και συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_i	91

Κεφάλαιο 1 | Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Σε περίπτωση σεισμού και όταν εκδηλωθεί ταυτόχρονα ή μεταγενέστερα κάποια μόνιμη εδαφική μετατόπιση (π.χ. καθίζηση, διάρρηξη ενεργού ρήματος, πλευρική εξάπλωση, κατολίπηση), οι υπόγειοι αγωγοί αναπτύσσουν σημαντικές παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις αυτές εξαρτώνται από τις δρώσες δυνάμεις στη διεπιφάνεια αγωγού - εδάφους και συνεπώς από τη μηχανική συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους. Για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των υπόγειων αγωγών με χρήση αριθμητικών μεθόδων, το έδαφος περιμετρικά του αγωγού συνήθως αντικαθίσταται από ανεξάρτητα μεταξύ τους ελαστοπλαστικά ελατήρια στη μία άκρη των οποίων επιβάλλεται η μόνιμη εδαφική μετατόπιση σχεδιασμού, ενώ η άλλη τους άκρη συνδέεται με τον υπό εξέταση αγωγό. Τα ελατήρια αυτά τοποθετούνται σε τρεις διαφορετικές διευθύνσεις: κατά την αξονική, την εγκάρσια οριζόντια και την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση. Μάλιστα, στην περίπτωση της εγκάρσιας κατακόρυφης διεύθυνσης, οι οδηγίες σχεδιασμού (ASCE 1984, ALA 2001, PRCI 2009) προβλέπουν διαφορετικές εδαφικές αντιδράσεις κατά την προς τα άνω και προς τα κάτω μετατόπιση του αγωγού. Οι καμπύλες φορτίου p - εγκάρσιας μετατόπισης y εδάφους - αγωγού των ισοδύναμων εδαφικών ελατηρίων είναι γνωστές ως «καμπύλες $p - y$ ».

Όταν ο αγωγός εγκιβωτίζεται εντός ξηρού ή σταθερού, πλήρως στραγγιζόμενου κορεσμένου εδάφους (με υδροστατικές πιέσεις πόρων), το οριακό φορτίο και η μετατόπιση στην οποία αυτό αντιστοιχεί προσδιορίζονται για κάθε ελατήριο βάσει αναλυτικών σχέσεων και διαγραμμάτων που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία και τους κανονισμούς σχεδιασμού (ASCE 1984, ALA 2001, PRCI 2009). Οι τιμές τους καθορίζονται από τη διάμετρο (D) του αγωγού, το λόγο εγκιβωτισμού (H/D , όπου H είναι η απόσταση του άξονα του αγωγού από την επιφάνεια) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους (π.χ. μέγιστη γωνία τριβής φ). Όταν, ωστόσο, ο αγωγός σχεδιάζεται να εγκιβωτιστεί σε αμμώδες έδαφος το οποίο προβλέπεται να ρευστοποιηθεί, η διεθνή βιβλιογραφία προτείνει την τροποποίηση των καμπυλών που αφορούν στο αντίστοιχο κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η απομείωση της εδαφικής αντοχής και δυστημσίας εξαιτίας της ανάπτυξης των υπερπιέσεων πόρων και επομένως της ελάττωσης των ενεργών τάσεων. Συγκεκριμένα, οι O'Rourke and Liu (2012) προτείνουν οι νέες τιμές τις εδαφικής αντοχής και στιβαρότητας να προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τις τιμές που υπολογίζονται για το αντίστοιχο σταθερό, πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος με ένα μειωτικό συντελεστή ίσο με 3%, για όλα τα εδαφικά ελατήρια ανεξάρτητα από τη διεύθυνση τους, την κατεύθυνση μετατόπισης, τη διάμετρο (D) και το βάθος εγκιβωτισμού (H) του αγωγού, αλλά και τη μέγιστη γωνία τριβής (φ) της αμμώδους στρώσης.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί ο έλεγχος της ορθότητας εφαρμογής του μειωτικού συντελεστή 3% κατά O'Rourke and Liu (2012), για το σχεδιασμό αγωγών που πρόκειται να εγκιβωτιστούν σε ρευστοποιήσιμο αμμώδες έδαφος, δηλαδή σε έδαφος όπου συμβατικοί έλεγχοι αντοχής σε ρευστοποίηση δίνουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο ή ίσο με 1.0 ($FS_l \leq 1.0$). Ο έλεγχος αυτός περιορίζεται, εδώ, στα εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια, για προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού, καθώς και στα εγκάρσια οριζόντια ελατήρια. Συγχρόνως, εξετάζεται και η περίπτωση όπου στο ελεύθερο πεδίο έχουν μεν αναπτυχθεί υπερπιέσεις πόρων, αλλά δεν έχει επέλθει πλήρης ρευστοποίηση. Η κατάσταση αυτή ορίζεται ως «μερική ρευστοποίηση» και αντιστοιχεί σε συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης μεγαλύτερο από 1.0 ($FS_l > 1.0$). Στο πλαίσιο της εργασίας, η κατάσταση της μερικής και πλήρους ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο θα εκφράζεται μέσω της μέσης καθ' ύψος τιμής του λόγου υπερπιέσεων πόρων (r_u) στο ελεύθερο πεδίο –περιοχή σε μεγάλη απόσταση από τον αγωγό ώστε η κατανομή των υπερπιέσεων πόρων σε αυτήν να μην επηρεάζεται από την παρουσία του αγωγού. Το μέγεθος αυτό θα συμβολίζεται στο εξής ως $r_{u,ff}$. Έτσι, ένα μερικώς ρευστοποιημένο έδαφος θα έχει λόγο $r_{u,ff}$ μικρότερο της μονάδας, ενώ σε ένα πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος ο λόγος $r_{u,ff}$ θα είναι ίσος με 1.0.

Πραγματοποιούνται, λοιπόν, αριθμητικές αναλύσεις εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω και εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης αγωγών (απειρου μήκους) διαφόρων τιμών διαμέτρου (D) και λόγου εγκιβωτισμού (H/D) από τις οποίες εξάγονται οι ελαστο-πλαστικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($p - y$) τόσο σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος (περίπτωση αναφοράς), όσο και σε έδαφος πλήρως ή μερικώς ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι παράμετροι των καμπυλών αυτών, δηλαδή το οριακό φορτίο, η οριακή μετατόπιση –πέραν της οποίας το έδαφος διατηρεί το οριακό φορτίο– και η ελαστική στιβαρότητα, θεωρώντας εξιδανικευμένες δι-γραμμικές ελαστο-πλαστικές καμπύλες που προσομοιώνουν εκείνες που προκύπτουν αριθμητικά. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών για το κορεσμένο με υπερπιέσεις πόρων έδαφος συγκρίνονται με εκείνες που αντιστοιχούν σε κορεσμένο, μόνο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος (περίπτωση αναφοράς), ξεχωριστά για κάθε κατεύθυνση εγκάρσιας μετατόπισης των αγωγών. Συγκεκριμένα, για κάθε παράμετρο υπολογίζεται ο λόγος των τιμών της στις δύο καταστάσεις σχεδιασμού (τιμή για έδαφος με υπερπιέσεις πόρων προς την τιμή για περίπτωση αναφοράς), ο οποίος καλείται «μειωτικός συντελεστής», και συγκρίνεται με την πρόταση των O'Rourke and Liu (2012). Στο τέλος, προτείνονται διαγράμματα εκτίμησης του μειωτικού συντελεστή για κάθε εγκάρσια διεύθυνση μετατόπισης αγωγού, που λαμβάνουν υπόψη, εμμέσως, και το συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους.

1.3 Δομή της εργασίας

Οι επιμέρους εργασίες που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας περιγράφονται εν συντομία παρακάτω:

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τις οδηγίες σχεδιασμού εγχιβωτισμένων αγωγών σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος και σε έδαφος με υπερπίεσεις πόρων έως τη ρευστοποίηση, για την εγάρσια κατακόρυφη προς τα άνω και οριζόντια μετατόπισή τους. Συμπληρωματικά, αναζητούνται στη βιβλιογραφία και οι αναμενόμενες κατανομές του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u γύρω από έναν υπόγειο αγωγό, καθώς και οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης εξαιτίας της εγάρσιας μετατόπισης ενός τέτοιου αγωγού για την καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού στα διαφορετικά πεδία πιέσεων πόρων περί αυτόν.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση του προβλήματος της εγάρσιας οριζόντιας και εγάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης ενός αγωγού σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο και σε ρευστοποιημένο –μερικώς και πλήρως– έδαφος. Επίσης, πραγματοποιείται η διακρίβωση της αριθμητικής μεθοδολογίας, συγκρίνοντας τις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης σε κορεσμένο έδαφος με εκείνες που προτείνουν οι διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού, για διαφορετικά χαρακτηριστικά αγωγών.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της εγάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης διαφορετικών αγωγών σε έδαφος με υπερπίεσεις πόρων (κατανομές λόγου r_u , καμπύλες φορτίου - μετατόπισης, μηχανισμοί παραμόρφωσης) και υπολογίζονται οι μειωτικοί συντελεστές των παραμέτρων των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης (οριακό φορτίο, οριακή μετατόπιση, ελαστική στιβαρότητα).

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της εγάρσιας οριζόντιας μετατόπισης διαφορετικών αγωγών και υπολογίζονται οι μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου, της οριακής μετατόπισης και της ελαστικής στιβαρότητας, όπως ακριβώς και στο Κεφάλαιο 4.

Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία και προτείνονται πεδία για μελλοντική έρευνα σχετικά με το εξεταζόμενο αντικείμενο.

Κεφάλαιο 2 | Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός των υπόγειων αγωγών πραγματοποιείται συνήθως μέσω αριθμητικών αναλύσεων (π.χ. πεπερασμένων στοιχείων), όπου το έδαφος προσομοιώνεται με ελαστοπλαστικά ελατήρια, συνήθως δι-γραμμικά. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους επιτυγχάνεται μέσω της ορθής εκτίμησης των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των ελατηρίων αυτών, ευρέως γνωστών ως «καμπύλες $p - y$ ». Η μεθοδολογία προσδιορισμού των καμπυλών αυτών σύμφωνα με τις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού (ASCE 1984, ALA 2001, PRCI 2009) για την περίπτωση της κορεσμένης με υδροστατικές πιέσεις πόρων εδαφικής στρώσης παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.2 του παρόντος κεφαλαίου. Καθώς η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη των καμπυλών $p - y$ σε εδάφη που αναπτύσσουν υπερπιέσεις πόρων λόγω σεισμού, στην παράγραφο αυτή περιλαμβάνονται οι διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών αποκλειστικά για κοκκώδη εδάφη, τα οποία είναι τα μόνα που ρευστοποιούνται υπό σεισμική διέγερση. Επιπλέον, οι κανονισμοί αυτοί χρησιμοποιούνται και για τη διακρίβωση της αριθμητικής μεθοδολογίας προσομοίωσης του προβλήματος στο Κεφάλαιο 3. Οι αλλαγές στη μορφή των καμπυλών για την περίπτωση που το έδαφος αναμένεται να ρευστοποιηθεί πλήρως στο ελεύθερο πεδίο, όπως προτείνονται από τους O'Rourke and Liu (2012), παρουσιάζονται στην παράγραφο 2.3.

Για την κατανόηση των αλλαγών στις καμπύλες $p - y$ στην περίπτωση της πλήρους ρευστοποίησης του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο, στην παράγραφο 2.4 περιγράφεται η κατανομή του λόγου υπερπιέσεων πόρων (r_u) στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Η κατανομή αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις αναμένεται διαφορετική γύρω από τον αγωγό σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο, εξαιτίας των εντόνως διαφορετικών τιμών στιβαρότητας και υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ αγωγού και εδάφους.

Επιπλέον, στην παράγραφο 2.5 παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους που προκύπτουν κατά τη μετατόπιση αγωγού εντός κορεσμένου με υδροστατικές πιέσεις πόρων εδάφους με εκείνους που αντιστοιχούν σε ρευστοποιημένο έδαφος, όπως εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία. Η σύγκριση αυτή είναι απαραίτητη για την κατανόηση της μεταβολής των καμπυλών $p - y$ λόγω της ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων, καθώς το οριακό φορτίο των καμπυλών αυτών καθορίζεται από το βάρος του υπερκείμενου εδάφους, το μήκος των επιφανειών αστοχίας και την κατεύθυνση κίνησης του εδαφικού υλικού, όλα παράμετροι που συναρτώνται με το μηχανισμό παραμόρφωσης του εδάφους.

Τέλος, στην παράγραφο 2.6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τις υπάρχουσες οδηγίες σχεδιασμού των υπόγειων αγωγών σε ρευστοποιημένο έδαφος, καθώς επίσης επισημαίνονται και οι σχετικές ελλείψεις στη βιβλιογραφία σε ό,τι αφορά στους μηχανισμούς ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων γύρω από

αγωγό κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης, και στους μηχανισμούς παραμόρφωσης ρευστοποιημένου εδάφους κατά την εγκάρσια (κατακόρυφη προς τα άνω και οριζόντια) μετατόπιση αγωγών.

2.2 Οδηγίες σχεδιασμού αγωγών εγκιβωτισμένων σε κορεσμένο κοικιώδες έδαφος

Το έδαφος, ως μη-γραμμικό υλικό, χαρακτηρίζεται από μη-γραμμική και συγκεκριμένα υπερβολική σχέση τάσης - παραμόρφωσης, η οποία αντιστοιχεί σε σχέση φορτίου - μετατόπισης αντίστοιχης μορφής στην αλληλεπίδρασή του με έναν αγωγό. Ωστόσο, ο σχεδιασμός των αγωγών βασίζεται στη χρήση ελαστο-πλαστικών εδαφικών ελατηρίων, συνήθως δι-γραμμικών. Κατά συνέπεια, στις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού περιλαμβάνονται σχέσεις προσδιορισμού των υπερβολικών καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των ελατηρίων, ενώ παράλληλα προτείνονται μέθοδοι δι-γραμμικοποίησής τους.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσδιορισμού των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης για την προσομοίωση μόνο της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω και της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης ενός αγωγού, όπως και οι αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Επίσης, παραλείπονται οι οδηγίες σχεδιασμού που αφορούν σε αργιλικά εδάφη, καθώς αυτά δε ρευστοποιούνται υπό σεισμική διέγερση, και κατ' επέκταση δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Όσον αφορά στους συμβολισμούς που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια, υπογραμμίζεται ότι παρά το γεγονός ότι οι καμπύλες εγκάρσιου φορτίου - μετατόπισης είναι ευρέως γνωστές ως «καμπύλες $p - \delta$ », στις επόμενες παραγράφους της παρούσας εργασίας, όπως και στις οδηγίες σχεδιασμού, ο συμβολισμός αυτός υιοθετείται μόνο στην περίπτωση της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης. Στην περίπτωση της εγκάρσιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τα άνω, οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των ελατηρίων περιγράφονται ως «καμπύλες $q - \delta$ ».

2.2.1 Εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού

Για την προσομοίωση της εδαφικής συμπεριφοράς κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση ενός αγωγού, η υπερβολική καμπύλη των εδαφικών ελατηρίων περιγράφεται από τη Σχέση 2.1:

$$q = \frac{z}{A \frac{z_{ult}}{q_{ult}} + B \frac{z}{q_{ult}}} \quad (2.1)$$

όπου A , B σταθερές, ενώ q_{ult} , z_{ult} το οριακό φορτίο και η οριακή μετατόπιση (μετατόπιση για την οποία το φορτίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του), αντίστοιχα. Οι τιμές των σταθερών A , B προσδιορίστηκαν από τους Trautmann et al. (1985a), προσαρμόζοντας την υπερβολική καμπύλη της Σχέσης 2.1 στα αποτελέσματα των πειραμάτων τους, ως ίσες με 0.07 και 0.93,

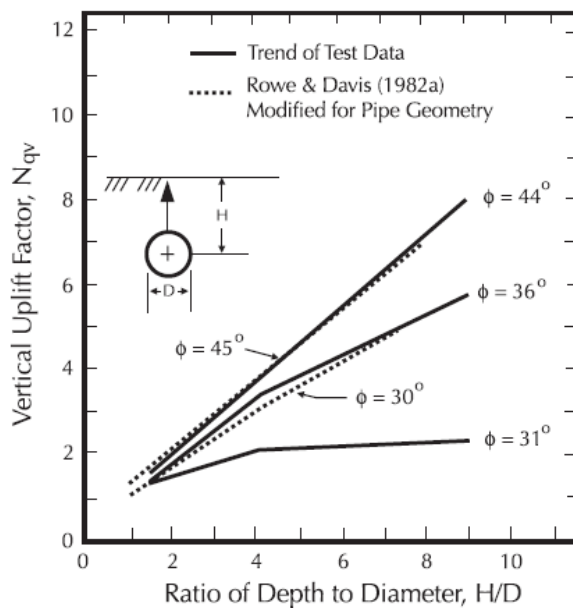
αντίστοιχα. Αντίστοιχα, στις οδηγίες σχεδιασμού του PRCI (2009) προτείνεται να λαμβάνεται $A = 0.03$ και $B = 0.97$.

Το οριακό φορτίο q_{ult} εκφράζεται εν γένει μέσω της Σχέσης 2.2:

$$q_{ult} = \bar{\gamma} H D N_{qv} \quad (2.2)$$

όπου $\bar{\gamma}$ το ενεργό (υπό άνωση) ειδικό βάρος του κορεσμένου εδάφους, H το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο άξονας του αγωγού, D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού και N_{qv} ο συντελεστής εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω φέρουσας ικανότητας, ο οποίος προσδιορίζεται με τις ακόλουθες αναλυτικές σχέσεις και διαγράμματα.

Το διάγραμμα του **Σχήματος 2.1**, το οποίο λήφθηκε από την εργασία των O'Rourke and Liu (2012), βασίζεται στα πειράματα των Trautmann et al. (1985a). Σύμφωνα με αυτό η τιμή του συντελεστή N_{qv} καθορίζεται από την τιμή του λόγου εγκιβωτισμού του αγωγού (H/D) και τη μέγιστη γωνία τριβής του εδάφους (ϕ). Η εφαρμογή του προτείνεται από τις οδηγίες σχεδιασμού της ASCE (1984), όπως αναφέρεται από τους O'Rourke and Liu (2012).



Σχήμα 2.1. Συντελεστής εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω φέρουσας ικανότητας, N_{qv} , κατά Trautmann et al. (1985a), όπως παρουσιάζεται στους O'Rourke and Liu (2012).

Στις οδηγίες του PRCI (2009) ο συντελεστής N_{qv} ορίζεται μέσω της αναλυτικής Σχέσης 2.3:

$$N_{qv} = \tan(0.9\phi) \left(\frac{H}{D} \right) \leq N_{qh} \quad (2.3)$$

όπου ϕ η μέγιστη γωνία τριβής του εδάφους, H το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο άξονας του

αγωγού και D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού. Παρατηρείται επίσης, ότι στις συγκεκριμένες οδηγίες η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή σχεδιασμού για το συντελεστή N_{qh} ορίζεται ίση με τον αντίστοιχο συντελεστή για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού, N_{qb} , ο οποίος προσδιορίζεται μέσω της Σχέσης 2.4:

$$N_{qh} = a + b \left(\frac{H}{D} \right) \quad (2.4)$$

όπου a , b παράμετροι, οι τιμές των οποίων καθορίζονται βάσει της γωνίας τριβής (φ) και του λόγου εγκιβωτισμού (H/D) σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.1**. Για ενδιάμεσες τιμές της γωνίας τριβής φ προτείνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων μέσω γραμμικής παρεμβολής. Επιπλέον, ορίζεται και η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της γωνίας φ . Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι ακόμα και αν οι πειραματικές δοκιμές υποδεικνύουν ότι το έδαφος έχει γωνία τριβής μικρότερη των 35° , στους υπολογισμούς θα χρησιμοποιείται γωνία φ ίση με 35° .

Πίνακας 2.1. Τιμές των παραμέτρων a , b για τον προσδιορισμό του συντελεστή εγκάρσιας οριζόντιας φέρουσας ικανότητας, N_{qh} , κατά PRCI (2009).

φ ($^\circ$)	H/D	a	b	$\max(N_{qh})$ (kN/m)
35	0.5 έως 12	4	0.92	15
40	0.5 έως 6	5	1.43	23
	6 έως 15	8	1.00	
45	0.5 έως 7	5	2.17	30
	7 έως 15	10	1.33	

Το διάγραμμα του **Σχήματος 2.1** προτείνεται και από τις οδηγίες σχεδιασμού ALA (2001). Στις ίδιες οδηγίες υιοθετείται, επιπλέον, η Σχέση 2.5, η οποία αποτελεί προσέγγιση των καμπυλών του **Σχήματος 2.1**:

$$N_{qv} = \left(\frac{\varphi H}{44D} \right) \leq N_q \quad (2.5)$$

όπου φ η μέγιστη γωνία τριβής του εδάφους, H το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο άξονας του αγωγού και D η διάμετρος του αγωγού. Όπως και στις οδηγίες σχεδιασμού του PRCI (2009), έτσι και σε αυτές της ALA (2001) προτείνεται μια μέγιστη τιμή του συντελεστή N_{qv} , η οποία συμβολίζεται ως N_q και εκφράζεται μέσω της Σχέσης 2.6:

$$N_q = \exp(\pi \tan \varphi) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.6)$$

Η τιμή της οριακής μετατόπισης x_{ult} καθορίζεται μέσω της Σχέσης 2.7:

$$z_{ult} = \lambda H < 0.1D \quad (2.7)$$

όπου λ σταθερά που εξαρτάται από την πυκνότητα της άμμου επίχωσης, H το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού (μετρημένο ως προς τον άξονα) και D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού. Η τιμή της παραμέτρου λ λαμβάνει τιμές στο διάστημα (0.01,0.02), όπου η μικρή τιμή αφορά σε πυκνές και η μεγάλη σε χαλαρές άμμους, σύμφωνα με τις οδηγίες σχεδιασμού των ALA (2001) και PRCI (2009), ενώ, σύμφωνα με τους O'Rourke and Liu (2012), στις οδηγίες της ASCE (1984) η παράμετρος λ ισούται με 0.01 έως 0.015.

Τέλος, για τη δι-γραμμικοποίηση των παραπάνω υπερβολικών καμπυλών, η ASCE (1984) προτείνει η μέγιστη ελαστική μετατόπιση (οριακή μετατόπιση) να λαμβάνεται ίση με $0.50z_{ult}$. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η μέγιστη ελαστική μετατόπιση –η μετατόπιση για την οποία συμβαίνει αλλαγή της στιβαρότητας της ελαστο-πλαστικής καμπύλης– θα συμβολίζεται ως $z_{ult,b}$, οπότε $z_{ult,b} = 0.50 z_{ult}$ κατά ASCE (1984). Αντίστοιχα, το PRCI (2009) συμβουλεύει η αλλαγή της στιβαρότητας να ορίζεται για μετατόπιση $z_{ult,b} = 0.15 z_{ult}$, ενώ οι οδηγίες της ALA (2001) δεν περιλαμβάνουν κάποια πρόταση.

2.2.2 Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού

Για την προσομοίωση της εδαφικής συμπεριφοράς κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ενός αγωγού, η υπερβολική καμπύλη των εδαφικών ελατηρίων δίνεται από τη Σχέση 2.8:

$$p = \frac{y}{A \frac{y_{ult}}{p_{ult}} + B \frac{y}{p_{ult}}} \quad (2.8)$$

όπου A, B σταθερές ενώ p_{ult}, y_{ult} το οριακό φορτίο και η οριακή μετατόπιση (η μετατόπιση που αντιστοιχεί στο οριακό φορτίο) αντίστοιχα. Οι τιμές των σταθερών A, B προσδιορίστηκαν από τους Trautmann et al. (1985b), προσαρμόζοντας την υπερβολική καμπύλη της Σχέσης 2.8 στα αποτελέσματα των πειραμάτων τους, ως ίσες με 0.17 και 0.83 αντίστοιχα. Για τις ίδιες σταθερές, στις οδηγίες σχεδιασμού του PRCI (2009) προτείνεται η χρήση των τιμών 0.15 και 0.85 αντίστοιχα, οι οποίες σχεδόν ταυτίζονται με εκείνες των Trautmann et al. (1985b).

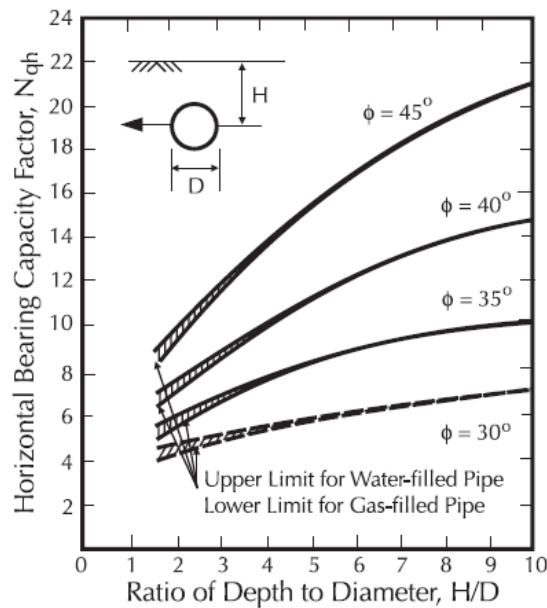
Στη βιβλιογραφία, το οριακό φορτίο εκφράζεται μέσω της Σχέσης 2.9:

$$p_{ult} = \bar{\gamma} H D N_{qh} \quad (2.9)$$

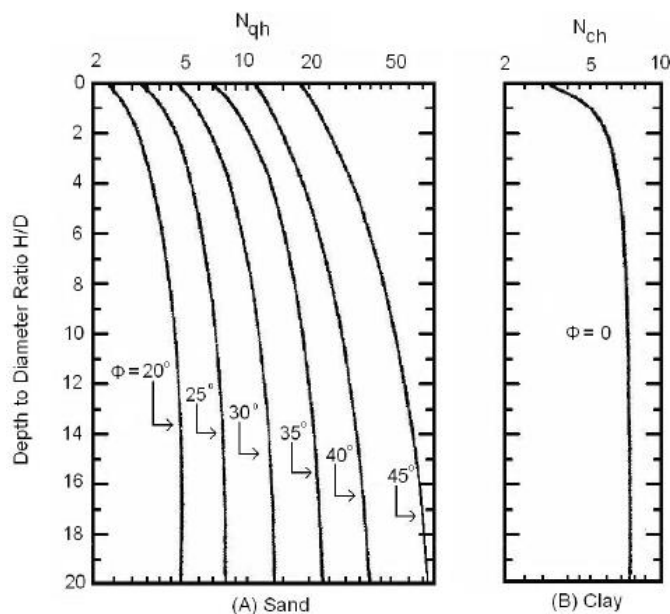
όπου $\bar{\gamma}$ το ενεργό (υπό άνωση) ειδικό βάρος του κορεσμένου εδάφους, H το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο άξονας του αγωγού, D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού και N_{qh} ο συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας ο οποίος προσδιορίζεται με βάση τις αναλυτικές σχέσεις και διαγράμματα που ακολουθούν.

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 2.2** περιλαμβάνονται οι καμπύλες υπολογισμού του συντελεστή

N_{qh} συναρτήσει της μέγιστης γωνίας τριβής (ϕ) και του λόγου εγκιβωτισμού (H/D) κατά Trautmann et al. (1985b), όπως παρουσιάζονται στην εργασία των O'Rourke and Liu (2012). Στην ίδια εργασία αναφέρεται ότι το διάγραμμα αυτό προτείνεται από τις οδηγίες σχεδιασμού της ASCE (1984). Ωστόσο, στις οδηγίες του PRCI (2009) ο συντελεστής N_{qh} ορίζεται μέσω της αναλυτικής Σχέσης 2.4 που παρουσιάστηκε στην υπο-παράγραφο 2.2.1, ενώ στις οδηγίες της ALA (2001) προτείνεται ο προσδιορισμός του μέσω του διαγράμματος κατά Hansen (1961) που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.3**.



Σχήμα 2.2. Συντελεστής εγκάρσιας οριζόντιας φέρουσας ικανότητας, N_{qh} , κατά Trautmann et al. (1985b), όπως παρουσιάζεται στους O'Rourke and Liu (2012).



Σχήμα 2.3. Συντελεστής εδαφικής αντοχής για οριζόντια μετατόπιση, N_{qh} , κατά Hansen (1961), όπως παρουσιάζεται στους O'Rourke and Liu, 2012).

Μάλιστα, στις οδηγίες της ALA (2001) οι καμπύλες του **Σχήματος 2.3** περιγράφονται αναλυτικά μέσω της Σχέσης 2.10:

$$N_{qh} = a + b \frac{H}{D} + c \left(\frac{H}{D} \right)^2 + d \left(\frac{H}{D} \right)^3 + e \left(\frac{H}{D} \right)^4 \quad (2.10)$$

Οι παράμετροι a , b , c , d , e της Σχέσης 2.10 προσδιορίζονται σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.2**. Στην περίπτωση που η γωνία τριβής φ λαμβάνει κάποια ενδιάμεση τιμή, προτείνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών μέσω γραμμικής παρεμβολής. Επισημαίνεται ότι τόσο το διάγραμμα του **Σχήματος 2.3**, όσο και η Σχέση 2.10 αποδεικνύεται ότι οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή N_{qh} , οπότε σε συντηρητικότερο σχεδιασμό.

Πίνακας 2.2. Τιμές των παραμέτρων a , b , c , d , e για τον προσδιορισμό του συντελεστή εγκάρσιας οριζόντιας φέρουσας ικανότητας, N_{qh} , κατά ALA (2001).

φ (°)	a	b	c	d (10^{-3})	e (10^{-4})
20°	2.399	0.439	-0.030	1.059	-1.754
25°	3.332	0.84	-0.090	5.606	-1.319
30°	4.565	1.234	-0.089	4.275	-9.159
35°	6.816	2.019	-0.146	7.651	-1.683
40°	10.959	1.783	0.045	-5.425	-1.153
45°	17.658	3.309	0.048	-6.443	-1.299

Η τιμή της οριακής μετατόπισης y_{ult} καθορίζεται μέσω της Σχέσης 2.11:

$$y_{ult} = \lambda \left(H + \frac{D}{2} \right) < 0.1D \text{ έως } 0.15D \quad (2.11)$$

όπου λ παράμετρος που εξαρτάται από την πυκνότητα της άμμου επίχωσης, H το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού (μετρημένο ως προς τον άξονα του) και D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού. Η τιμή της παραμέτρου λ προτείνεται ίση με 0.04 τόσο στις οδηγίες σχεδιασμού της ALA (2001), όσο και σε εκείνες του PRCI (2009). Στις οδηγίες της ASCE (1984), σύμφωνα με τους O'Rourke and Liu (2012), η παράμετρος λ ισούται με 0.07 έως 0.10 για χαλαρές άμμους, με 0.03 έως 0.05 για άμμους μεσαίας σχετικής πυκνότητας και με 0.02 έως 0.03 για πυκνές άμμους.

Τέλος, για τη μετατροπή των παραπάνω υπερβολικών καμπυλών σε δι-γραμμικές, η ASCE (1984) προτείνει να λαμβάνεται, αντίστοιχα με την περίπτωση της εγκάρσιας κατακόρυφης

προς τα άνω μετατόπισης ενός αγωγού, $y_{ult,b} = 0.50y_{ult}$, όπου $y_{ult,b}$ η μέγιστη ελαστική μετατόπιση της ελαστο-πλαστικής καμπύλης –πέραν της οποίας το φορτίο του εδάφους διατηρείται σταθερό και ίσο με την τιμή του οριακού φορτίου. Το PRCI (2009) συμβουλεύει η μέγιστη ελαστική μετατόπιση $y_{ult,b}$ να λαμβάνεται ίση με $0.46y_{ult}$, ενώ οι οδηγίες της ALA (2001) δεν περιλαμβάνουν κάποια πρόταση.

2.3 Οδηγίες σχεδιασμού αγωγών εγχιβωτισμένων σε ρευστοποιημένο κοκκώδες έδαφος

Όταν ένα κοκκώδες έδαφος ρευστοποιείται πλήρως, δηλαδή αναπτύσσει λόγο υπερπίεσεων πόρων r_u ίσο με τη μονάδα, η διατμητική του αντοχή και δυσμησία θεωρούνται πρακτικώς μηδενικές. Σήμερα, ο σχεδιασμός εγχιβωτισμένων αγωγών εντός ρευστοποιημένου εδάφους πραγματοποιείται απομειώνοντας την εδαφική αντοχή, σε σχέση με την τιμή για το αντίστοιχο πλήρως στραγγιζόμενο κορεσμένο έδαφος (βλέπε παράγραφο 2.2), και διατηρώντας σταθερή την τιμή της σχετικής μετατόπισης αγωγού - εδάφους για την οποία επιτυγχάνεται η οριακή εδαφική αντοχή στο πλήρως στραγγιζόμενο κορεσμένο έδαφος (Papadimitriou et al. 2019b). Ο σχεδιασμός, δηλαδή, σε ρευστοποιημένο έδαφος στηρίζεται στην εφαρμογή ενός ενιαίου μειωτικού συντελεστή, R , της οριακής αντοχής και στιβαρότητας του εδάφους. Ως μειωτικός συντελεστής ορίζεται ο λόγος της τιμής ενός μεγέθους σε ρευστοποιημένο έδαφος προς την αντίστοιχη τιμή σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος, και λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, η τιμή του συντελεστή αυτού έχει πολλάκις μελετηθεί. Σύμφωνα με τους O'Rourke and Liu (2012), οι Takada et al. (1987) κατέληξαν σε τιμές της εδαφικής στιβαρότητας ίσες με 1/1000 έως 1/3000 του αντίστοιχου μη-ρευστοποιημένου εδάφους, συνδυάζοντας πειραματικά αποτελέσματα και αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά δοκού επί ελαστικού εδάφους. Άλλοι ερευνητές, οι Yoshida and Uematsu (1978), Matsumoto et al. (1987), Yasuda et al. (1987) και Tanabe (1988), κατέληξαν μέσω πειραμάτων, σύμφωνα με τους O'Rourke and Liu (2012), σε ελαστική στιβαρότητα του ρευστοποιημένου εδάφους ίση με 1/100 έως 3/100 της αντίστοιχης τιμής του εδάφους με υδροστατικές πιέσεις πόρων, ενώ οι T. O'Rourke et al. (1994) πρότειναν την απομείωση της στιβαρότητας εφαρμόζοντας έναν μειωτικό συντελεστή ίσο με 1/100 έως 5/100.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μελέτες των ερευνητών που αναφέρονται παραπάνω, οι O'Rourke and Liu (2012) συνιστούν την απομείωση της εδαφικής στιβαρότητας θεωρώντας μειωτικό συντελεστή ίσο με 3%. Μάλιστα, το ποσοστό αυτό προτείνεται για όλα τα εδαφικά ελατήρια ανεξάρτητα από τη διεύθυνση τους, την κατεύθυνση μετατόπισης, τη διάμετρο (D) και το βάθος εγχιβωτισμού (H/D) του αγωγού, αλλά και τη μέγιστη γωνία τριβής του εδάφους (φ).

2.4 Επίδραση του αγωγού στη ρευστοποίηση της εδαφικής στρώσης

Η ανάπτυξη υπερπίεσεων στους εδαφικούς πόρους συνεπάγεται τη μείωση των ενεργών τάσεων, οπότε και της εδαφικής διατμητικής αντοχής και δυσμησίας. Σε περίπτωση ρευστοποίησης μιας εδαφικής στρώσης, ο λόγος υπερπίεσης των πόρων, $r_u = \Delta u / \sigma'_{vs}$, ισούται

με 1.0, δηλαδή το έδαφος χάνει πρακτικά την αντοχή και τη δυσμησία του ($\sigma'_v = 0$). Παρουσία, ωστόσο, ενός αδιαπέρατου υπόγειου αγωγού με στιβαρότητα σαφώς μεγαλύτερη εκείνης του εδάφους, οι τιμές του λόγου r_u στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού αναμένεται να τροποποιηθούν, ακόμη κι αν ισχύει $r_u = 1.0$ στο ελεύθερο πεδίο.

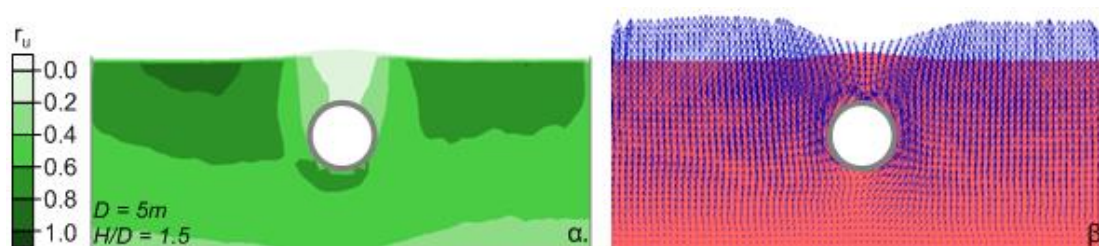
Η εκτίμηση αυτή επιβεβαιώνεται από τα δυναμικά πειράματα σε φυγοκεντριστή των Chian et al. (2014), στα οποία παρατηρήθηκε «προστασία» της ευρύτερης περιοχής του αγωγού έναντι ρευστοποίησης. Στα πειράματα αυτά προσομοιώθηκε η ανύψωση λόγω ρευστοποίησης μεγάλου αγωγού, διαμέτρου 5 m, υπό τη δράση μεγαλο-περίοδης ημιτονικής σεισμικής διέγερσης 20 κύκλων φόρτισης περιόδου (T) ίσης με 1.33 s. Οι Chian et al. (2014) εξέτασαν τρεις συνδυασμούς μέγιστης επιτάχυνσης (a_{max}) και λόγου εγκιβωτισμού (H/D). Ωστόσο, στην παρούσα παράγραφο, γίνεται αναφορά στο πείραμα στο οποίο η μέγιστη επιτάχυνση ορίστηκε ίση με 0.22 g και ο αγωγός εγκιβωτίστηκε σε βάθος $H/D = 1.5$, καθώς η περίπτωση αυτή προσομοιώθηκε αριθμητικά και από άλλους ερευνητές (Papadimitriou et al. 2019a, Marinatou et al. 2017), όπως αναφέρεται στη συνέχεια. Για την εδαφική στρώση χρησιμοποιήθηκε άμμος Hostun, μέσης πυκνότητας ($D_r = 45\%$).

Οι υπερπιέσεις του νερού των εδαφικών πόρων καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της διέγερσης στην κορυφή του αγωγού, στη βάση του και σε βάθος ίσο με το βάθος εγκιβωτισμού (H). Στην κορυφή, ο λόγος r_u έλαβε τιμή 0.70 αμέσως μετά την έναρξη του σεισμού, ενώ οι υπερπιέσεις των πόρων αποτονώθηκαν γρήγορα οπότε και μηδενίστηκε, ενώ στη βάση του αγωγού ο λόγος r_u ήταν σχεδόν σταθερός και ίσος με 0.50. Η μικρή τιμή στη βάση του αγωγού αποδίδεται, σύμφωνα με τους Chian et al. (2014), στην ανύψωση του αγωγού και τελικά στη μείωση της τάσης που επιβάλλεται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του αγωγού. Τέλος, η τιμή του λόγου r_u στη γειτονιά του αγωγού σε βάθος ίσο με H είχε καθ' όλη τη διάρκεια της διέγερσης μικρότερη τιμή συγκριτικά με την τιμή που μετρήθηκε στο ίδιο βάθος στο πλήρως ρευστοποιημένο ελεύθερο πεδίο (r_u περίπου ίσο με 1.0). Συγκεκριμένα, στη γειτονιά του αγωγού (σε βάθος H) ο λόγος r_u έλαβε τιμή εντός του εύρους 0.60 έως 0.70 κατά τους πρώτους κύκλους της διέγερσης, ενώ στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε σε τιμή περίπου ίση με 0.50.

Στο ίδιο συμπέρασμα, δηλαδή στην «προστασία» της υπερκείμενης στρώσης του αγωγού έναντι ρευστοποίησης, κατέληξαν και οι Papadimitriou et al. (2019a) κατά την αριθμητική προσομοίωση του παραπάνω πειράματος των Chian et al. (2014) με χρήση του λογισμικού Πεπερασμένων Διαφορών FLAC. Στην εργασία τους, προσομοίωσαν τη συμπεριφορά της άμμου Hostun, που χρησιμοποιήθηκε από τους Chian et al. (2014), με την άμμο Nevada, για την οποία έχει βαθμονομηθεί το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (βλέπε Κεφάλαιο 3, παράγραφο 3.2.2 για την αναλυτική περιγραφή του προσομοιώματος), λαμβάνοντας υπόψη την εργασία των Marinatou et al. (2017). Οι τιμές του λόγου r_u και τα διανύσματα ροής που προέκυψαν από την ανάλυση παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.4**. Όπως παρατηρείται, οι τιμές του λόγου r_u γύρω από τον αγωγό είναι σχεδόν ίδιες με εκείνες κατά Chian et al. (2014). Οι μικρές τιμές του r_u στη γειτονιά του αγωγού αποδίδονται, κατά τους Papadimitriou et al. (2019a), στη μεγαλύτερη στιβαρότητα του αγωγού και επομένως στην

έντονη διάτμηση του εδάφους στη γειτονιά του αγωγού που οδηγεί στη διόγκωσή του (shear-induced dilation) και τελικά στη μείωση των υπερπιέσεων των πόρων. Συγχρόνως, η αδιαπερατότητα του αγωγού συνεπάγεται τη κίνηση του νερού περιμετρικά του αγωγού από τη βάση προς την επιφάνεια της εδαφικής στρώσης με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της στράγγισης, μάλλον επειδή δεν τροφοδοτείται άμεσα με κατακόρυφη ροή νερού η περιοχή πάνω από τον αγωγό.

Οι μικρές τιμές υπερπιέσεων που παρατηρήθηκε στο παραπάνω πείραμα των Chian et al. (2014) οφείλονται πιθανότατα και στο σχετικά μικρό βάθος εγριβωτισμού του αγωγού. Η επίδραση του βάθους εγριβωτισμού του αγωγού στο φαινόμενο της ρευστοποίησης του γειτονικού εδάφους αποδεικνύεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού με εκείνα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της ανύψωσης ενός αγωγού ίδιας διαμέτρου ($D = 5\text{ m}$) αλλά μικρότερου βάθους εγριβωτισμού ($H = 1.1 D$). Η δόνηση, καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του αγωγού και του εδάφους ήταν ίδια στα δύο πειράματα των Chian et al. (2014). Από τις χρονοϊστορίες των υπερπιέσεων των πόρων στην κορυφή του αγωγού, παρατηρείται ότι στην περίπτωση του ρηχά εγριβωτισμένου αγωγού ($H = 1.1 D$) ο λόγος r_u λαμβάνει μικρότερη τιμή σε σχέση με το βαθύτερα εγριβωτισμένο αγωγό ($H = 1.5 D$). Η διαφορά αυτή οφείλεται στην εντονότερη διαστολικότητα του πιο επιφανειακού εδάφους σε συνδυασμό με τη γρηγορότερη στράγγιση χάρη στο μικρότερο μήκος ροής.



Σχήμα 2.4. Αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης του πειράματος των Chian et al. (2014) υπό μορφή: (α) ισοκαμπυλών r_u , και (β) διανυσμάτων υπόγειας ροής (από Papadimitriou et al. 2019a).

Καθώς η διάμετρος των 5 m δεν αποτελεί ρεαλιστική διάμετρο αγωγού, οι Marinatou et al. (2017) εξέτασαν αριθμητικά (με χρήση του λογισμικού FLAC) την ανάπτυξη των υπερπιέσεων στη γειτονιά ενός μικρότερου αγωγού, διαμέτρου $D = 1.2\text{ m}$ και βάθους εγριβωτισμού $H/D = 1.5$ (μετρημένο ως προς τον άξονα του αγωγού). Η σεισμική διέγερση που χρησιμοποιήθηκε είχε 15 κύκλους φόρτισης περιόδου (T) 0.30 s και μέγιστης επιτάχυνσης (a_{max}) 0.25 g. Από τις αριθμητικές αναλύσεις διαπιστώθηκε, ανάλογα με τα προηγούμενα πειράματα και αναλύσεις, ότι διατηρείται η «προστασία» του υπερκείμενου εδάφους από τη ρευστοποίηση. Οι υπερπιέσεις, δηλαδή, που αναπτύχθηκαν πάνω από τον αγωγό και στην περιφέρειά του ήταν μικρότερες από τις τιμές στα αντίστοιχα βάθη στο ελεύθερο πεδίο.

2.5 Μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους λόγω μετατόπισης αγωγού

Η έκταση της επιφάνειας αστοχίας και γενικότερα ο τρόπος με τον οποίο το έδαφος μετακινείται και παραμορφώνεται στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού κατά τη μετατόπισή του καθορίζουν τις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των ελατηρίων, δηλαδή τις δυνάμεις που ασκούνται στη διεπιφάνεια αγωγού - εδάφους. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η επίδραση του μεγέθους των υπερπιέσεων πόρων στην καμπύλη εγκάρσιου φορτίου - μετατόπισης που επιβάλλει το έδαφος στον αγωγό είναι χρήσιμο να συγκριθούν οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του πλήρως στραγγιζόμενου κορεσμένου εδάφους κατά την εγκάρσια μετατόπιση ενός αγωγού με τους μηχανισμούς παραμόρφωσης για μετατόπιση σε έδαφος το οποίο έχει αναπτύξει υπερπιέσεις πόρων μέχρι και τη ρευστοποίηση.

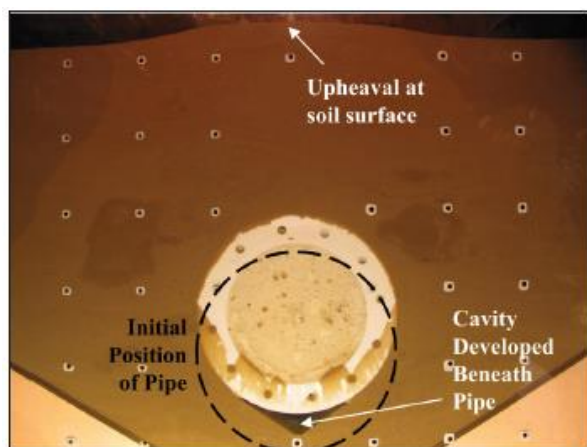
Επισημαίνεται ότι για εδάφη που έχουν ρευστοποιηθεί στο ελεύθερο πεδίο, στη βιβλιογραφία είναι διαθέσιμοι μόνο οι μηχανισμοί παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ενός εγκλιβωτισμένου αγωγού (Ono & Okamura 2019). Δεν έχουν μελετηθεί, δηλαδή, οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια κατακόρυφη μετατόπιση των αγωγών σε πεδίο υπερπιέσεων πόρων. Ωστόσο, πολλοί είναι οι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τους μηχανισμούς αστοχίας του εδάφους εξαιτίας της ανύψωσης ενός αγωγού κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης υπό συνθήκες πλήρους ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο (Chian et al. 2014, Huang et al. 2015). Έτσι, για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού θα γίνει χρήση των ανωτέρω εργασιών, καθώς η διεύθυνση μετατόπισης του αγωγού είναι κοινή.

Χάριν ευκρίνειας, οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους για τις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις μετατόπισης του αγωγού που πραγματεύεται η παρούσα εργασία (κατακόρυφη προς τα άνω και εγκάρσια οριζόντια) παρουσιάζονται ξεχωριστά στις επόμενες υπο-παραγράφους.

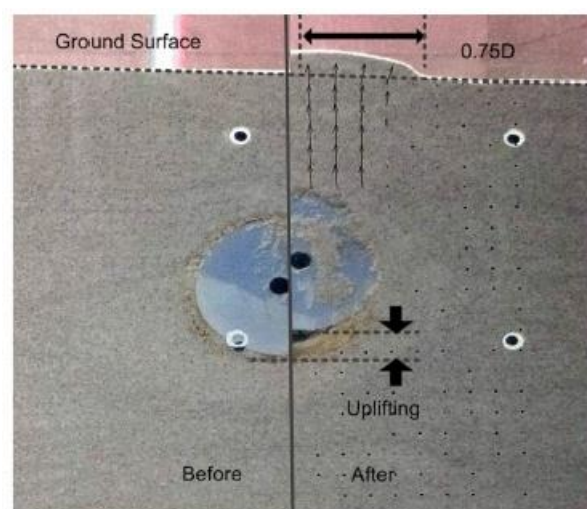
2.5.1 Εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού

Στην περίπτωση κορεσμένου πλήρως στραγγιζόμενου εδάφους, ο μηχανισμός παραμόρφωσής του εδάφους όταν ο αγωγός μετατοπίζεται κατακόρυφα προς τα άνω εξετάστηκε πειραματικά από τους Chian et al. (2015). Η ανύψωση του αγωγού μελετήθηκε εκτελώντας δύο είδη πειραμάτων, το ένα σε πραγματική κλίμακα και το άλλο σε συσκευή φυγοκεντρική. Και στις δύο δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η ίδια χαλαρή άμμος ($D_r = 30\%$). Ο μηχανισμός παραμόρφωσης που προέκυψε ήταν ίδιος και στα δύο πειράματα. Συγκεκριμένα, οι Chian et al. (2015) αναφέρουν την ύπαρξη δύο περιοχών μετατόπισης των εδαφικών κόκκων, ανεξάρτητων μεταξύ τους. Αναλυτικότερα, κατά τη μετατόπιση του αγωγού προς τα άνω, δημιουργήθηκε κενό στη βάση του αγωγού και εδαφικοί κόκκοι των γειτονικών περιοχών πλευρικά του αγωγού μετακινήθηκαν για να το πληρώσουν. Συγχρόνως, το υπερκείμενο έδαφος, διαθέτοντας την πλήρη διατμητική του αντοχή, παρασύρθηκε σε κίνηση προς τα άνω χωρίς να μετατοπιστεί πλευρικά. Επισημαίνεται ότι το έδαφος που κινήθηκε προς τη βάση του αγωγού, δεν κάλυψε πλήρως το κενό που είχε δημιουργηθεί, όπως παρατηρείται στο **Σχήμα 2.5** που ακολουθεί.

Ο ίδιος μηχανισμός παραμόρφωσης παρατηρήθηκε και από τους Huang et al. (2015) κατά την προσομοίωση της κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης του αγωγού σε συσκευή φυγοκεντρική. Μάλιστα, ο μηχανισμός ήταν ίδιος για τις περιπτώσεις των λόγων εγκιβωτισμού που εξετάστηκαν ($H/D = 1.5, 2.5$ και 4.5). Πιο συγκεκριμένα, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων τους παρατήρησαν ότι σε μικρές μετατοπίσεις του αγωγού επηρεάστηκε το έδαφος μόνο πάνω από τον αγωγό, το οποίο κινήθηκε στην κατακόρυφη διεύθυνση ως στερεό σώμα σχήματος σφήνας. Στο **Σχήμα 2.6** που ακολουθεί, παρουσιάζεται ενδεικτικά ο μηχανισμός παραμόρφωσης του ξηρού εδάφους σε μικρές μετατοπίσεις για την περίπτωση του ρηχού αγωγού ($H/D=1.5$). Σε μεγαλύτερες, ωστόσο, μετατοπίσεις, το προωθούμενο προς τα πάνω έδαφος εξαπλώθηκε πλευρικά, ενώ ακόμη εδαφικοί κόκκοι κινήθηκαν περιφερειακά με κατεύθυνση από την κορυφή προς τη βάση του αγωγού.



Σχήμα 2.5. Μηχανισμός εδαφικής παραμόρφωσης κορεσμένου σταθερού εδάφους εξαιτίας της ανύψωσης αγωγού με $H/D=1.5$ και $D=258$ mm σε πείραμα πραγματικής κλίμακας (από Chian et al. 2015).



Σχήμα 2.6. Πεδίο διανυσμάτων ολικής μετατόπισης και παραμορφωμένη επιφάνεια του ξηρού εδάφους κατά την κατακόρυφη μετατόπιση αγωγού βάθους εγκιβωτισμού $H/D=1.5$ (από Huang et al. 2015).

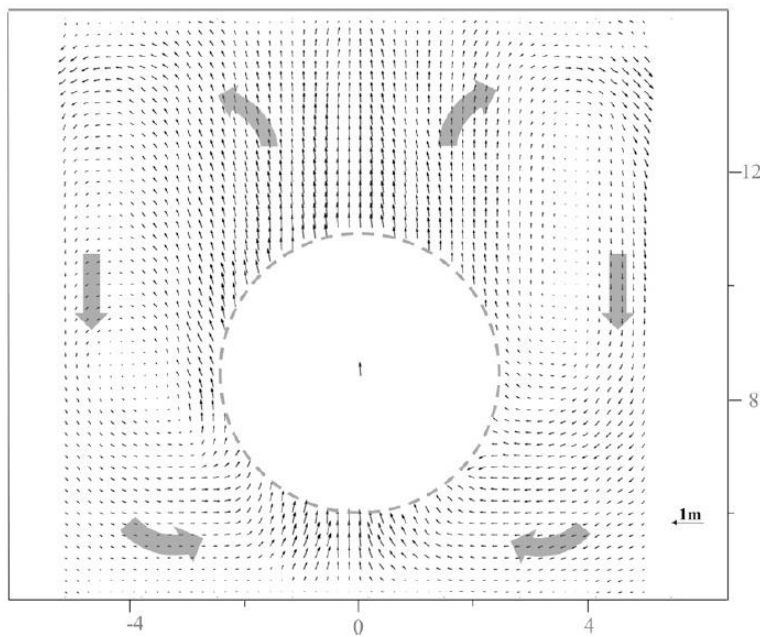
Σε αντίθεση με την περίπτωση του πλήρως στραγγιζόμενου κορεσμένου εδάφους και την σχεδόν ομοιόμορφη μετατόπιση του υπερκείμενου (του αγωγού) εδάφους προς τα άνω, η συμπεριφορά του εδάφους στο οποίο έχουν αναπτυχθεί υπερπίεσεις πόρων αναμένεται διαφορετική, καθώς το έδαφος έχει μειωμένη διατμητική αντοχή και δυστησία. Δυστυχώς, και όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης εξαιτίας της κατακόρυφης μετατόπισης ενός εγριβωτισμένου αγωγού σε έδαφος που έχει ρευστοποιηθεί στο ελεύθερο πεδίο δεν έχουν μελετηθεί στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, δεδομένου ότι η εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση ενός αγωγού είναι στην ίδια κατεύθυνση με την ανύψωση (uplift) λόγω ρευστοποίησης, ο μηχανισμός παραμόρφωσης αναμένεται να είναι παρόμοιος στις δύο καταστάσεις.

Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός παραμόρφωσης του εδάφους κατά την ανύψωση ενός αγωγού λόγω ρευστοποίησης έχει μελετηθεί από τους Chian et al. (2014, 2015). Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, στο οποίο γίνεται αναφορά στην παράγραφο 2.4, οι ερευνητές παρατήρησαν ότι, σε αντίθεση με το κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος, στο ρευστοποιημένο έδαφος κινητοποιείται σαφώς μεγαλύτερη εδαφική μάζα, δηλαδή και εκτός της περιοχής του αγωγού. Αυτή η εδαφική μάζα κινείται κυκλικά με κατεύθυνση από την κορυφή του αγωγού προς τη βάση του. Στο **Σχήμα 2.7**, όπου παρουσιάζονται οι εδαφικές μετατοπίσεις υπό μορφή διανυσμάτων συνολικής μετατόπισης κατά τη μετατόπιση αγωγού διαμέτρου $D=5\text{ m}$ και λόγου εγριβωτισμού $H/D=1.5$, γίνεται εμφανής η συνεχής «κυκλική ροή» του εδάφους από την κορυφή του αγωγού προς τη βάση του, δεξιόστροφα στα δεξιά του αγωγού και αριστερόστροφα στα αριστερά του. Μάλιστα, παρατηρείται ότι τα διανύσματα μετατόπισης του εδάφους που βρίσκεται στη βάση του αγωγού έχουν κατεύθυνση προς τα άνω, δηλαδή συμβάλλουν στην προς τα άνω μετατόπιση (ανύψωση) του αγωγού.

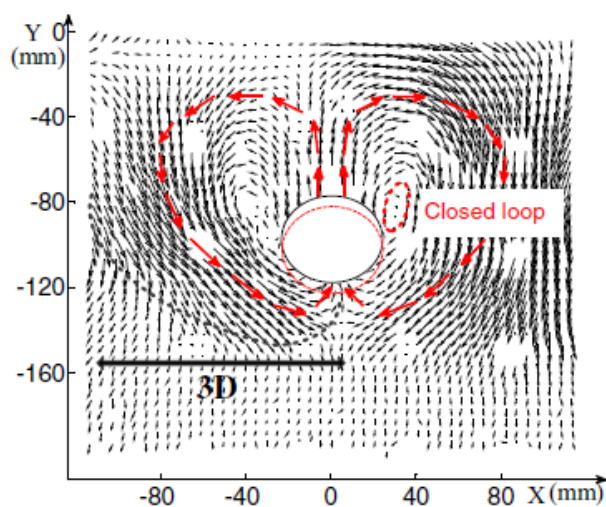
Οι Chian et al. (2015) αποδίδουν τη δημιουργία της «κυκλικής ροής» του εδάφους στη μειωμένη δυστησία του εξαιτίας της ανάπτυξης των υπερπίεσεων πόρων. Συγκεκριμένα, αναφέρουν ότι το κενό που δημιουργείται κάτω από τον αγωγό, κατά την προς τα άνω μετατόπισή του, γεμίζει άμεσα μέσω της ροής εδάφους από τη γειτονιά του αγωγού. Ωστόσο, σε αντίθεση με το κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος, το κενό γεμίζει με έδαφος που βρίσκεται εκτός της άμεσης γειτονιάς του αγωγού. Αυτό αποδίδεται στο συνδυασμό συγκριτικά μεγαλύτερης διατμητικής αντοχής του γειτονικού στον αγωγό εδάφους (λόγω μικρών υπερπίεσεων πόρων, βλέπε προηγούμενη παράγραφο) με τη συγκριτικά μικρότερη διατμητική αντοχή του εδάφους μακριά από τον αγωγό (λόγω πλήρους ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο). Επιπλέον, οι Chian et al. (2014) υποστηρίζουν ότι η δημιουργία αυτού του μηχανισμού παραμόρφωσης οφείλεται και στο ότι η διαφορά στις τιμές του λόγου n , ανάμεσα στη γειτονιά του αγωγού και το ελεύθερο πεδίο (μετρημένες στο βάθος, π.χ. ίσο με H) προκαλεί και ροή νερού πόρων από το ελεύθερο πεδίο προς τη βάση του αγωγού που συμπαρασύρει και εδαφικούς κόκκους στην κατεύθυνση αυτή.

Αντίστοιχη «κυκλική ροή» εδάφους παρατηρήθηκε και κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων

φυγοκεντριστή από τους Huang et al. (2015), οι οποίοι υποστηρίζουν ότι το έδαφος παραμορφώνεται σε “σχήμα καρδιάς” (“heart-shaped” flow). Επιπλέον, στην εργασία τους δίνουν έμφαση στο πλάτος της εδαφικής περιοχής που επηρεάζεται κατά την ανύψωση του αγωγού, το οποίο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκτείνεται και εκτός της διαμέτρου του αγωγού, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει σε πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος (βλέπε προηγούμενη υπο-παραγράφο). Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζεται ο εν λόγω μηχανισμός παραμόρφωσης του εδάφους υπό μορφή διανυσμάτων ολικής μετατόπισης κατά την ανύψωση λόγω διέγερσης βάσης ενός αγωγού εγκιβωτισμένου σε βάθος $H=2.5D$.



Σχήμα 2.7. Διανύσματα ολικής μετατόπισης του ρευστοποιημένου εδάφους κατά την ανύψωση λόγω ρευστοποίησης αγωγού με $H/D=1.5$ και $D=5$ m. (από Chian et al. 2014).



Σχήμα 2.8. Διανύσματα ολικής μετατόπισης του ρευστοποιημένου εδάφους κατά την ανύψωση λόγω ρευστοποίησης αγωγού εγκιβωτισμένου σε βάθος $H=2.5D$ (από Huang et al. 2015).

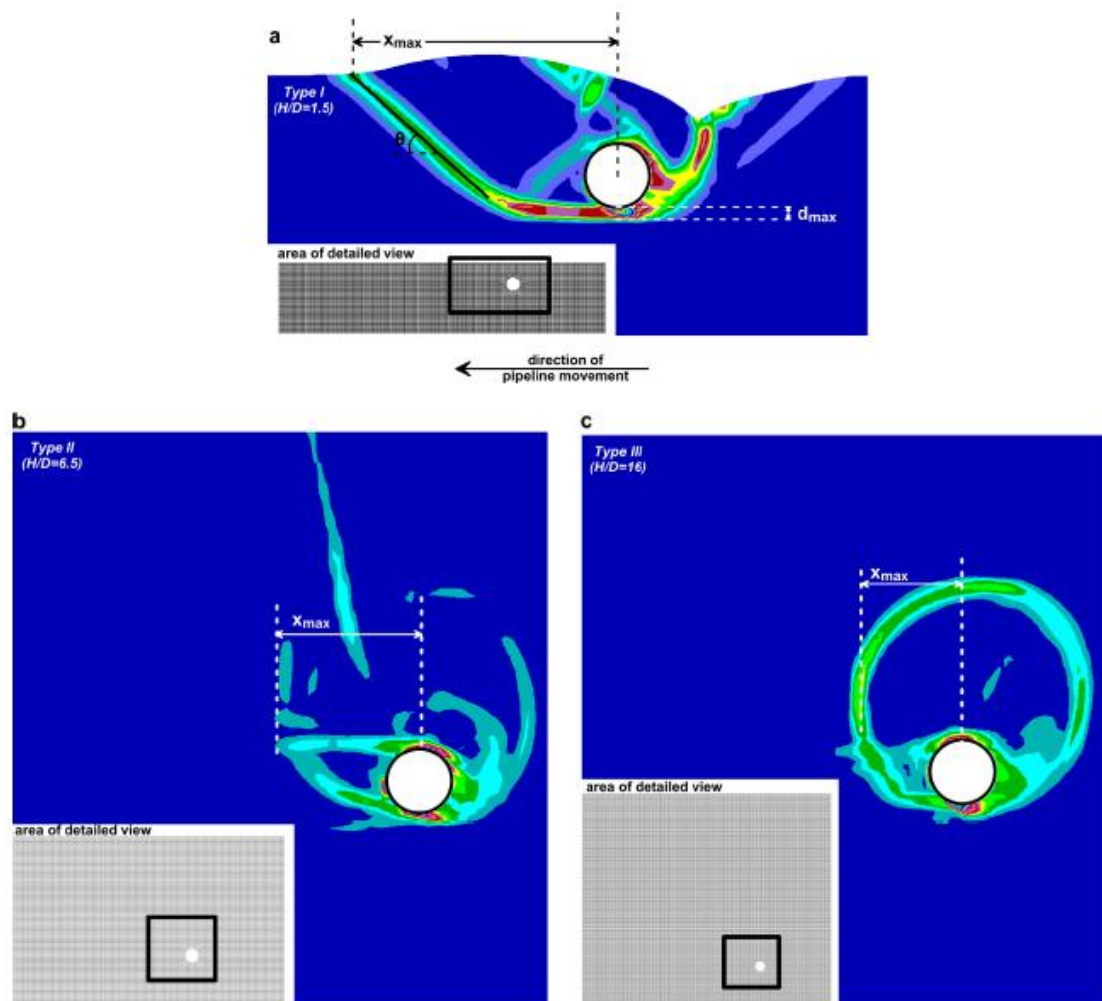
2.5.2 Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού

Οι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία μελέτες του μηχανισμού εδαφικής παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ενός εγριβωτισμένου αγωγού αφορούν, σχεδόν αποκλειστικά, σε ξηρό έδαφος. Ωστόσο, στην περίπτωση που επιτυγχάνεται πλήρης αποτόνωση των υπερπλίσεων πόρων, η παραμόρφωση ενός κορεσμένου κοκκώδους εδάφους αναμένεται αντίστοιχη με της ξηρής άμμου, οπότε οι μηχανισμοί παραμόρφωσης που παρουσιάζονται ακολούθως θεωρείται ότι αφορούν και σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος.

Οι Chaloulos et al. (2015) προσομοίωσαν αριθμητικώς τη μετατόπιση αγωγού σε ξηρή άμμο χαλαρής και μέσης πυκνότητας χρησιμοποιώντας το λογισμικό Πεπερασμένων Διαφορών FLAC. Στην εργασία τους εξετάζονται οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης για διαφορετικές τιμές του λόγου εγριβωτισμού (H/D). Στο **Σχήμα 2.9** οι Chaloulos et al. (2015) παρουσιάζουν ενδεικτικά τις μορφές αστοχίας του εδάφους όταν αγωγός εγριβωτίζεται σε βάθος H ίσο με $1.5 D$, $6.5 D$ και $16 D$, ενώ από την παρατήρησή τους γίνεται αντιληπτή η εξάρτηση της μορφής αστοχίας από την τιμή του λόγου εγριβωτισμού H/D .

Συγκεκριμένα, όταν $H/D = 1.5$ (σχετικά ρηχός αγωγός), παρατηρείται ότι το έδαφος αστοχεί υπό μορφή πρισμάτων τα οποία παραπέμπουν στα πρίσματα αστοχίας κατά Coulomb. Αναλυτικότερα, το έδαφος όπισθεν (σε σχέση με την κατεύθυνση μετατόπισης) του αγωγού αστοχεί «νεργητικά», αντίστοιχα με την περίπτωση πρισματος εδάφους όπισθεν τοίχου αντιστήριξης που μετατοπίζεται προς τα έξω. Συγχρόνως, το έδαφος που βρίσκεται στην πλευρά προς την οποία μετατοπίζεται ο αγωγός, αστοχεί «παθητικά» επηρεάζοντας πολύ μεγαλύτερο εδαφικό όγκο, όπως συμβαίνει και στο πρίσμα εδάφους μπροστά από τοίχο αντιστήριξης που κινείται προς τα μέσα. Οι Chaloulos et al. (2015) αναφέρουν ότι ο μηχανισμός αυτός ισχύει για μέγιστη τιμή του λόγου H/D ίση με 4.8. Μάλιστα, στην εργασία τους προσδιόρισαν και τη γωνία του «παθητικού» πρισματος θ (βλέπε **Σχήμα 2.9**) για πολλές τιμές του λόγου H/D , για τις οποίες ισχύει ο παραπάνω μηχανισμός αστοχίας. Η γωνία του πρισματος αυτού βρέθηκε εντός του διαστήματος 42.5 έως 62.5° . Επίσης, κατέληξαν σε σχέση υπολογισμού του πλάτους x_{max} του πρισματος αυτού (βλέπε **Σχήμα 2.9**), σύμφωνα με την οποία όσο μεγαλύτερος ο λόγος H/D , τόσο μεγαλύτερο το πλάτος x_{max} .

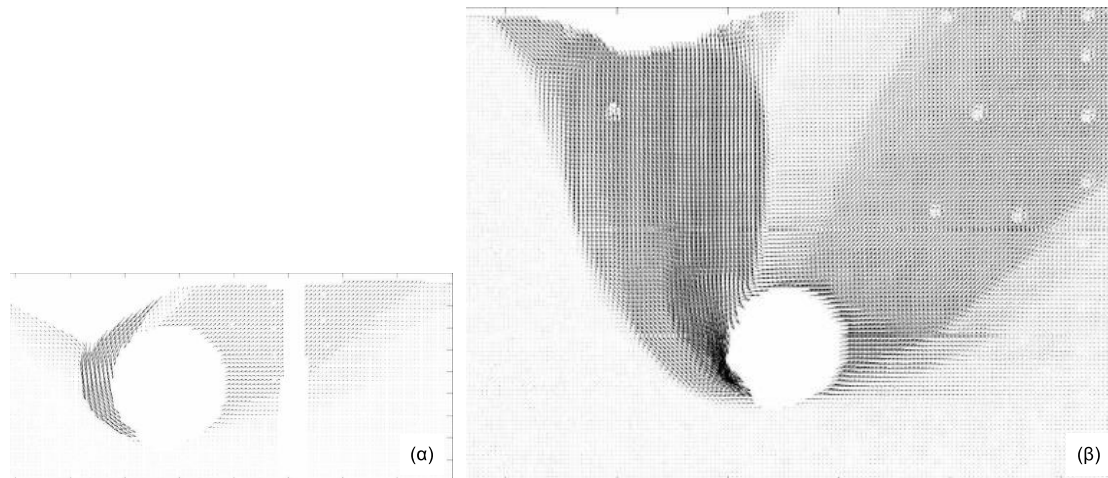
Στο **Σχήμα 2.9** παρατηρείται, επιπλέον, ότι ο μηχανισμός παραμόρφωσης του εδάφους αλλάζει σημαντικά όταν ο αγωγός εγριβωτίζεται σε μεγάλο βάθος ($H/D = 16$). Μάλιστα, η μορφή αστοχίας είναι περίπου κυκλική με το έδαφος να κινείται περιμετρικά του αγωγού και τις επιφάνειες αστοχίας να μην εκτείνονται ως την εδαφική επιφάνεια. Οι Chaloulos et al. (2015) αναφέρουν ότι αυτή η μορφή αστοχίας εμφανίζεται για τιμές του λόγου H/D μεγαλύτερες του 9.5. Τέλος, όπως παρατηρείται στο εν λόγω σχήμα, για ενδιάμεσες τιμές του λόγου εγριβωτισμού H/D , ο μηχανισμός παραμόρφωσης δεν έχει συγκεκριμένη μορφή, και προσεγγίζει είτε την «κυκλική» είτε την «πρισματική» μορφή αστοχίας (κατά Coulomb), και αυτό ανάλογα με την τιμή του βάθους H .



Σχήμα 2.9. Μηχανισμοί αστοχίας ξηρής άμμου κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού εγκιβωτισμένου σε βάθη $H=1.5D$, $6.5D$ και $16D$ (από Chaloulos et al. 2015).

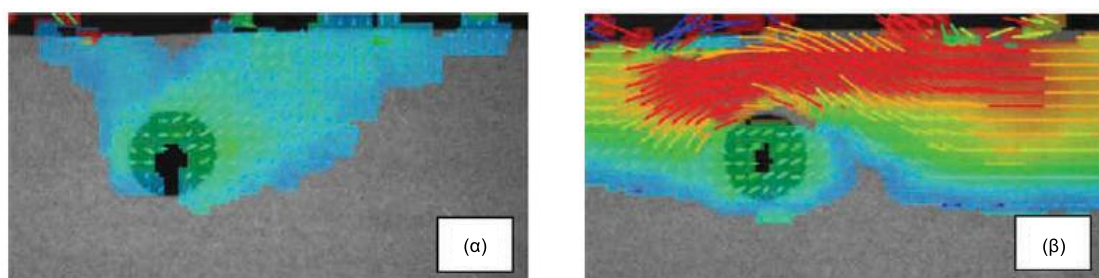
Στα ίδια αποτελέσματα με τους Chaloulos et al. (2015) κατέληξε και ο Burnett (2015), ο οποίος εξέτασε τους μηχανισμούς εδαφικής παραμόρφωσης για μικρά βάθη εγκιβωτισμού H ($= 1D, 3D$) μέσω πειραμάτων πραγματικής κλίμακας. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ξηρή άμμος, ωστόσο ο Burnett (2015) αναφέρει ότι τα αποτελέσματα έχουν άμεση εφαρμογή και σε κορεσμένη άμμο. Οι αγωγοί που μελετήθηκαν είχαν εξωτερική διάμετρο ίση με 254 mm και 600 mm. Στο **Σχήμα 2.10** παρουσιάζονται οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους υπό μορφή διανυσμάτων επαύξησης της μετατόπισης (displacement increment) σε μεγάλες τιμές εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης αγωγού διαμέτρου 254mm, ο οποίος εγκιβωτίζεται σε βάθος H ίσο με $1D$ και $3D$. Επιβεβαιώνεται, η «νεργητική» και «παθητική» αστοχία του εδάφους εκατέρωθεν του αγωγού, αλλά και η σχεδόν όμοια εδαφική συμπεριφορά για τις δύο μικρές τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D που διερεύνησε. Επιπλέον, ο Burnett (2015) παρατήρησε ότι ο μηχανισμός παραμόρφωσης του εδάφους στην περίπτωση του ρηχού αγωγού διαμέτρου 600 mm είναι αντίστοιχος εκείνου για το μικρότερο αγωγό, ο οποίος παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.10**, οπότε συμπέρανε ότι και για βαθύτερο αγωγό διαμέτρου 600 mm η εδαφική αστοχία θα είναι ξανά

«πρισματική».



Σχήμα 2.10. Διανύσματα επαυξητικής παραμόρφωσης σε μεγάλες τιμές εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης αγωγού διαμέτρου $D = 254 \text{ mm}$ εντός ξηρής άμμου για λόγους εγκιβωτισμού H/D (α) 1.0 και (β) 3.0 (από Burnett 2015).

Το πρόβλημα της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος έχει εξεταστεί στη βιβλιογραφία μόνο από τους Ono & Okamura (2019). Συγκεκριμένα, εξέτασαν την αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού εκτελώντας πειράματα σε φυγοκεντρική και θεωρώντας αγωγό με λόγο εγκιβωτισμού $H/D = 1.0$ (πολύ ρηχός). Στο **Σχήμα 2.11** συγκρίνεται ο μηχανισμός που προέκυψε κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού σε πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος (**Σχήμα 2.11β**), σε σύγκριση με εκείνον κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του ίδιου αγωγού σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος (**Σχήμα 2.11α**). Επισημαίνεται ότι στο πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος, ο αγωγός μετατοπίζεται ταυτόχρονα με τη δράση της σεισμικής διέγερσης.



Σχήμα 2.11. Διανύσματα ταχύτητας κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού με λόγο $H/D = 1.0$: (α) σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος και (β) σε ρευστοποιημένο έδαφος υπό την ταυτόχρονη δράση σεισμικής διέγερσης (από Ono & Okamura 2019).

Από το **Σχήμα 2.11α** παρατηρείται η «ενεργητική» και «παθητική» αστοχία του εδάφους κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του ρηχού αγωγού σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος, η οποία είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα των Chaloulos et al.

(2015) και Burnett (2015). Στο **Σχήμα 2.11β**, όπου το έδαφος έχει ρευστοποιηθεί πλήρως, γίνεται εμφανής η ομοιόμορφη «ροή» του εδάφους εμπροσθεν και όπισθεν του αγωγού. Τα διανύσματα ταχύτητας είναι κυρίως οριζόντια, κάτι που δικαιολογείται από τη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης. Ωστόσο, η οριζόντια διεύθυνση των διανυσμάτων αυτών υποδεικνύει ότι ακόμα και όταν μετατοπίζεται ο αγωγός, ο σχηματισμός των πρισμάτων «ενεργητικής» και «παθητικής» αστοχίας δεν είναι εφικτός εξαιτίας της ουσιαστικής απώλειας της διατμητικής αντοχής του εδάφους.

2.6 Συμπεράσματα

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση του παρόντος κεφαλαίου σχετικά με τον προσδιορισμό των καμπύλων φορτίου - μετατόπισης για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω και την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ενός αγωγού, γίνονται αντιληπτά τα παρακάτω:

α) Στις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών (ASCE 1984, ALA 2001, PRCI 2009) προσδιορίζονται επακριβώς οι δι-γραμμικές ελαστο-πλαστικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων ελατηρίων που προσομοιώνουν το κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο (ήτοι με υδροστατικές πιέσεις πόρων) κοκκώδες έδαφος. Αντιθέτως, δεν περιλαμβάνουν καμιά οδηγία σχετικά με το σχεδιασμό εγκλιβωτισμένων αγωγών όταν το κοκκώδες έδαφος αναμένεται να ρευστοποιηθεί. Σήμερα, ο σχεδιασμός υπόγειου αγωγού σε ρευστοποιήσιμο έδαφος γίνεται συνήθως ακολουθώντας την πρόταση των O'Rourke and Liu (2012) για ενιαία απομείωση των τιμών του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας των δι-γραμμικών ελατηρίων που αφορούν στο αντίστοιχο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος, εφαρμόζοντας ένα μειωτικό συντελεστή ίσο με 3%. Ο μειωτικός συντελεστής αυτός προτείνεται να εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις αγωγών ανεξάρτητα από την τιμή της διαμέτρου και του λόγου H/D , τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την διεύθυνση μετατόπισης του αγωγού. Ωστόσο, οι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία μελέτες της κατανομής του λόγου υπερπιέσεων πόρων (r_u) υποδεικνύουν ότι η κατανομή του λόγου r_u δεν είναι ενιαία στην εδαφική στρώση (Chian et al. 2014, Papadimitriou et al. 2019a, Marinatou et al. 2017) και ότι ο μειωτικός συντελεστής πιθανότατα να μην έχει την ίδια τιμή σε όλες τις περιπτώσεις αγωγών και σε όλες τις διευθύνσεις μετατόπισής τους. Τέλος, όσον αφορά στο σχεδιασμό υπόγειων αγωγών σε έδαφος μερικώς ρευστοποιημένο (ήτοι με λόγο $r_{u,ff}$ στο ελεύθερο πεδίο μικρότερο της μονάδας), καμιά οδηγία δεν υπάρχει διαθέσιμη ούτε στη βιβλιογραφία ούτε στις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού.

β) Η βιβλιογραφία είναι επίσης ελλιπής όσον αφορά στους μηχανισμούς παραμόρφωσης πλήρως και μερικώς ρευστοποιημένου εδάφους εξαιτίας της εγκάρσιας μετατόπισης υπόγειου αγωγού, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την κατανόηση των αλλαγών στις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης που αντικατοπτρίζουν την αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού. Υπάρχει μόνο η εργασία των Ono & Okamura (2019) που μελετά τον μηχανισμό παραμόρφωσης του πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού. Βέβαια, αρκετοί μελετητές έχουν μελετήσει το μηχανισμό της εδαφικής παραμόρφωσης κατά την ανύψωση (uplift) υπόγειου αγωγού κατά τη σεισμική

ρευστοποίηση του εδάφους (Chian et al. 2014, 2015 και Huang et al. 2015). Τα συμπεράσματα αυτών χρησιμεύουν για την κατανόηση των μηχανισμών παραμόρφωσης του εδάφους κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση ενός αγωγού σε πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος, αφού και τα δύο προβλήματα αφορούν στην ίδια διεύθυνση μετατόπισης του αγωγού.

γ) Υπάρχει χρεία μελέτης των μεταβολών στις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των διγραμμικών ελαστο-πλαστικών ελατηρίων λόγω υπερπίεσεων πόρων, συγκριτικά με εικείνες για έδαφος κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο (με υδροστατικές πιέσεις πόρων). Αυτή η μελέτη πρέπει να γίνει για διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών, διαφορετικά πεδία υπερπίεσεων πόρων και διαφορετικές διευθύνσεις μετατόπισης, ώστε να ελεγχθεί η ορθότητα της εφαρμογής του ενιαίου μειωτικού συντελεστή του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας κατά O'Rourke and Liu (2012), καθώς και της τιμής του 3%. Συγχρόνως, χρειάζεται να εξεταστούν τόσο οι κατανομές του λόγου υπερπίεσεων πόρων (r_u) στην ευρύτερη περιοχή ποικίλων αγωγών, όσο και οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια μετατόπισή τους σε έδαφος με υπερπίεσεις πόρων, για την καλύτερη κατανόηση της μεταβολής των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης.

Κεφάλαιο 3 | Αριθμητική μεθοδολογία

3.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση του προβλήματος της εγκάρσιας μετατόπισης εγκλιβωτισμένου αγωγού διαμέτρου D και λόγου εγκλιβωτισμού H/D κατά την κατακόρυφη προς τα άνω και οριζόντια διεύθυνση τόσο σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο αμμώδες έδαφος όσο και σε έδαφος στο οποίο έχουν αναπτυχθεί υπερπίεσεις πόρων έως και τη ρευστοποίηση. Αρχικά, στην παράγραφο 3.2 περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC στον οποίο προσομοιώθηκε τόσο η μετατόπιση του αγωγού όσο και η ρευστοποίηση της εδαφικής στρώσης, όταν αυτή απαιτούνταν. Στη συνέχεια, στην ίδια παράγραφο, δίνονται τα βασικά στοιχεία του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010), με το οποίο προσομοιώθηκε η μηχανική συμπεριφορά της άμμου. Στην παράγραφο 3.3 περιγράφεται η μέθοδος προσομοίωσης του εδάφους και του αγωγού και η διαδικασία της μετατόπισης του αγωγού σε πλήρως στραγγιζόμενο κορεσμένο έδαφος. Αντίστοιχα, στην παράγραφο 3.4 παρουσιάζεται η διαδικασία της μετατόπισης αγωγού σε έδαφος το οποίο έχει ρευστοποιηθεί, αφού πρώτα περιγραφεί η μέθοδος προσομοίωσης της σεισμικής του ρευστοποίησης. Τέλος, στην παράγραφο 3.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της εγκάρσιας μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων (ελαστο-πλαστικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης, μηχανισμοί αστοχίας του εδάφους) τόσο για κατακόρυφη προς τα άνω όσο και για οριζόντια μετατόπιση και συγκρίνονται με τις καμπύλες που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού (βλέπε παράγραφο 2.2) και τους μηχανισμούς αστοχίας που περιγράφονται στη βιβλιογραφία (βλέπε παράγραφο 2.5).

3.2 Μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης

3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC

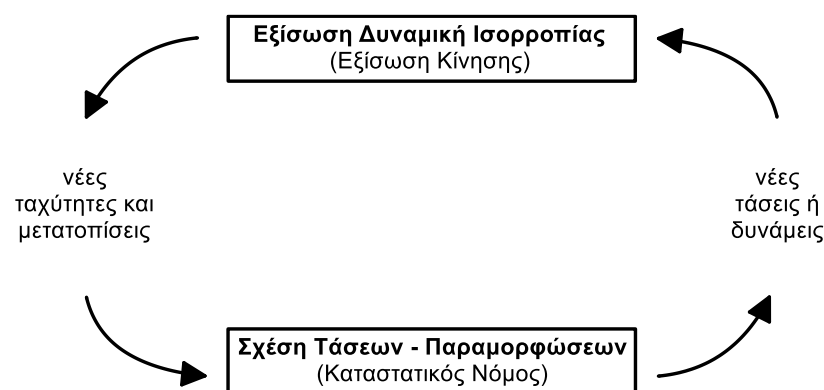
Το πρόβλημα που ερευνάται στην παρούσα εργασία προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC, v.7.0 (Itasca 2011) στις 2 διαστάσεις. Το μέσο διακριτοποιείται σε έναν κάρναβο (grid) με ζώνες (zones) τετράπλευρου σχήματος. Κάθε ζώνη αποτελείται από τέσσερις κόμβους (gridpoints) σε καθέναν από τους οποίους υπολογίζεται η τιμή της μετατόπισης, της ταχύτητας και της δύναμης. Οι αντιστοιχούσες τάσεις υπολογίζονται στο μέσο κάθε πλευράς κάθε ζώνης. Επισημαίνεται ότι σε αντίθεση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών δεν απαιτείται ο καθορισμός του τρόπου μεταβολής των μεταβλητών μεταξύ των σημείων υπολογισμού τους, δηλαδή δεν απαιτούνται συναρτήσεις σχήματος.

Οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται σε κάθε χρονικό βήμα Δt (time marching method). Η

τιμή μιας μεταβλητής τη χρονική στιγμή t εξαρτάται από τις τιμές των μεταβλητών του προβλήματος την προηγούμενη χρονική στιγμή $t - \Delta t$. Συνεπώς, για την απευθείας επίλυση των εξισώσεων, χωρίς επαναλήψεις (explicit method), επιλέγεται ένα χρονικό βήμα (timestep) τόσο μικρό ώστε η πληροφορία (π.χ. διάδοση ενός διατμητικού κύματος) να μην προλαβαίνει να διαδοθεί μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων. Δηλαδή, στη διάρκεια του χρονικού βήματος Δt οι γειτονικές ζώνες δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, οπότε δεν απαιτείται η δημιουργία καθολικού μητρώου δυσιαμφίας, σε αντίθεση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Η πολύ μικρή τιμή του χρονικού βήματος που απαιτείται όταν η διακριτοποίηση του καννάβου είναι πυκνή οδηγεί σε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων και επομένως σε καθυστέρηση της επίλυσης, συγκριτικά με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, γραμμικών προβλημάτων. Αντιθέτως, όταν το υλικό του μέσου περιγράφεται από μη-γραμμική καταστατική σχέση, η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων απαιτεί τη διεξαγωγή πολλών επαναλήψεων. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών υπερτερεί, λοιπόν, στην επίλυση μη-γραμμικών προβλημάτων.

Στο **Σχήμα 3.1** που ακολουθεί περιγράφεται η διαδικασία με την οποία οι αλλαγές στις μετατοπίσεις των κόμβων συνδέονται με αλλαγές στις επικόμβιες δυνάμεις κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος Δt . Για παράδειγμα, στην περίπτωση που σε κάποιο κόμβο επιβάλλεται μια δύναμη F τότε αυτή θα προκαλέσει την ανάπτυξη επικόμβιας επιτάχυνσης, η οποία με δεδομένη την προηγούμενη τιμή της ταχύτητας του κόμβου συνεπάγεται μια νέα ταχύτητα που καθορίζει τη μετατόπισή του. Από την τιμή της μετατόπισης υπολογίζεται η τιμή της παραμόρφωσης και τελικά η τιμή της τάσης που ασκείται στη ζώνη. Για τη συσχέτιση των τάσεων με τις παραμορφώσεις απαιτείται ο ορισμός ενός καταστατικού νόμου συμπεριφοράς, όπως το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και περιγράφεται στην επόμενη υπο-παράγραφο. Επισημαίνεται ακόμα ότι για την επίτευξη της ισορροπίας κάθε κόμβου, στην εξίσωση της δυναμικής ισορροπίας περιλαμβάνεται ένας όρος απόσβεσης. Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται σε κόμβο ο οποίος δεν ισορροπεί καλείται δύναμη ανισορροπίας (unbalanced force).



Σχήμα 3.1. Βασική ακολουθία επίλυσης στον Κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC, σε ένα χρονικό βήμα Δt .

Ένα επιπλέον σημαντικό χαρακτηριστικό του προγράμματος FLAC συγκριτικά με τα προγράμματα που εφαρμόζουν τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων αφορά στην επίλυση της δυναμικής εξίσωσης ισορροπίας σε κάθε κόμβο ακόμα και στην περίπτωση της στατικής φόρτισης του εδάφους. Ως αποτέλεσμα, δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης των ασταθειών που μπορεί να εμφανιστούν κατά την επίλυση ενός προβλήματος εξαιτίας, για παράδειγμα, μιας ξαφνικής αστοχίας του υλικού, αποφεύγοντας τις αριθμητικές αστάθειες.

Τέλος, για τη γρηγορότερη επίτευξη ισορροπίας στην περίπτωση μονοτονικών προβλημάτων, προτείνεται η εισαγωγή μηχανικής απόσβεσης (mechanical damping). Συνήθη μορφή απόσβεσης σε δυναμικά προβλήματα συνιστά η τοπική απόσβεση (local, non-viscous damping). Σε αυτή την περίπτωση η απόσβεση της κίνησης επιτυγχάνεται εισάγοντας μια επιπλέον δύναμη, της οποίας η κατεύθυνση είναι τέτοια ώστε να γίνεται πάντα απόσβεση ενέργειας. Η δύναμη αυτή, που περιγράφεται από τη Σχέση 3.1, ενεργοποιείται με την αλλαγή του προσήμου της ταχύτητας.

$$(F_d)_i = \alpha \left| \sum F_i^{(t)} \right| \operatorname{sgn}(\dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)}) \quad (3.1)$$

Η παράμετρος α που περιέχεται στη σχέση προτείνεται να λαμβάνει τιμή ίση με 0.80 όταν το πρόβλημα που προσομοιώνεται αφορά σε μονοτονική φόρτιση, σύμφωνα με το εγχειρίδιο του FLAC.

Εκτός της τοπικής απόσβεσης, το πρόγραμμα FLAC δίνει τη δυνατότητα χρήσης μιας παραλλαγής της, γνωστής ως συνδυασμένη απόσβεση (combined damping), σε προβλήματα στα οποία η ταχύτητα στους κόμβους είναι σταθερής κατεύθυνσης. Σε αυτή την περίπτωση, η δύναμη απόσβεσης περιγράφεται από τη Σχέση 3.2 που παρουσιάζεται παρακάτω.

$$F_d = \alpha |F| \left(\operatorname{sgn}(\dot{F}) - \operatorname{sgn}(\dot{u}) \right) / 2 \quad (3.2)$$

όπου η παράμετρος α λαμβάνει ξανά τιμή ίση με 0.80.

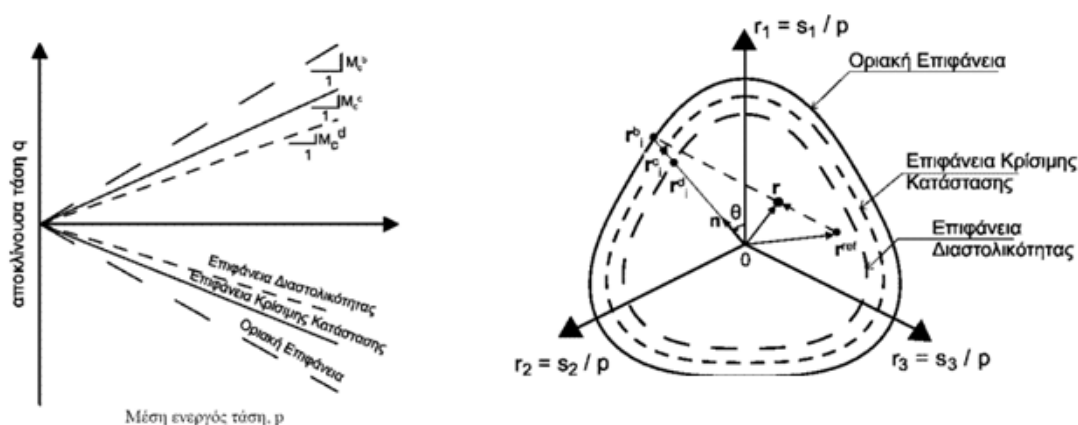
Επισημαίνεται ότι η συνδυασμένη απόσβεση πλεονεκτεί της τοπικής καθώς σε μονοτονικά προβλήματα η ταχύτητα των κόμβων αναμένεται να διατηρεί σχεδόν σταθερό πρόσημο, οπότε η εφαρμογή της Σχέσης 3.1 θα έδινε μηδενική απόσβεση. Στη Σχέση 3.2, ωστόσο, εισάγεται και η παράγωγος της δύναμης ανισορροπίας η οποία εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα ταλάντωσης (για περιοδικές κινήσεις), όπως φαίνεται από τη Σχέση 3.3. Συνεπώς, το πρόσημο της παραγώγου μεταβάλλεται με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δύναμης απόσβεσης.

$$\dot{F} = -mV\omega^2 \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

3.2.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND αναφέρεται, όπως υποδηλώνει το όνομά του, σε αμμώδη εδάφη, ή πιο σωστά στην απόκριση μη-συνεκτικών εδαφών τόσο υπό ανακυκλική φόρτιση μικρών, μεσαίων και μεγάλων ανακυκλικών παραμορφώσεων, όσο και υπό μονοτονική φόρτιση. Μάλιστα, εφαρμόζεται σε οποιοσδήποτε συνθήκες στράγγισης. Αναπτύχθηκε από τους Paradimitriou and Bouckovalas (2002), αλλά η τελική του μορφή διατυπώθηκε από τους Andrianopoulos et al. (2010).

Βασικό χαρακτηριστικό του προσομοιώματος συνιστούν οι τρεις επιφάνειες που το περιγράφουν στο χώρο των τάσεων: η επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης, η επιφάνεια Οριακής Κατάστασης και η επιφάνεια Διαστολικότητας (Σχήμα 3.2) οι οποίες παριστάνουν τους λόγους των αποκλινοσών τάσεων στην κρίσιμη κατάσταση, οριακή αντοχή και αλλαγή φάσης. Οι κλίσεις των επιφανειών αυτών εξαρτώνται από την παράμετρο κατάστασης $\psi = e - e_{cs}$ κατά Been and Jefferies (1985), όπου e ο δείκτης πόρων στην παρούσα κατάσταση και e_{cs} ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για την ίδια τιμή της μέσης ενεργού τάσης p .



Σχήμα 3.2. Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο $p - q$ και η προβολή τους στο επίπεδο αποκλινοσών τάσεων.

Όσον αφορά στην περιγραφή της οιονει «ελαστικής» συμπεριφοράς των άμμων σε μικρές προς μεσαίες ανακυκλικές διατμητικές παραμορφώσεις, το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND υιοθετεί υστερητική απόσβεση μέσω μίας σχέσης απομείωσης του μέτρου διάτμησης τύπου Ramberg - Osgood. Ένα επιπλέον κύριο χαρακτηριστικό του προσομοιώματος, που εισήχθη στην τελική μορφή του (Andrianopoulos et al. 2010), αποτελεί η απουσία αμιγώς ελαστικής περιοχής και η σημειακή –επί της ουσίας– επιφάνεια διαρροής. Με αυτόν τον τρόπο η απόκριση του υλικού είναι ελαστο-πλαστική σε κάθε υπολογιστικό βήμα ήδη από την αρχή της φόρτισης ή/και της αποφόρτισης - επαναφόρτισης. Τέλος, το προσομοίωμα περιλαμβάνει μία συνάρτηση με την οποία εκφράζεται η επίδραση της αλλαγής της δομής της άμμου κατά τη διάτμησή της στην τιμή του πλαστικού μέτρου κράτυνσης, στο ρυθμό ανάπτυξης πιέσεων στους εδαφικούς πόρους και στην ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων. Η τιμή του συντελεστή αυτού εξελίσσεται,

όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη δομή των κόκκων, καθ' όλη τη διάρκεια της ακολουθίας της φόρτισης του υλικού. Στον **Πίνακα 3.1** παρουσιάζονται συνοπτικά οι εξισώσεις που περιγράφουν το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND.

Πίνακας 3.1. Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010).

Περιγραφή	Εξίσωση	Παράμετροι
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 στο χώρο $[e, p]$	$\psi = e - e_{cs} = e - \Gamma_{cs} + \lambda \ln(p)$	Γ_{cs}, λ
Γενίκευση των επιφανειών του μοντέλου στο χώρο	$M_0^{c,b,d} = g(\theta, c) M_c^{c,b,d}$	$c = \frac{M_c^c}{M_c^c}$
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	$\cos(3\theta) = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(\mathbf{r}_i^b : \mathbf{r}_i^b : \mathbf{r}_i^b)}{(0.5(\mathbf{r}_i^b : \mathbf{r}_i^b))^{3/2}}$	
Επαύξηση ελαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \left(\frac{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p^e}{3} \right) \mathbf{I} = \frac{\dot{\mathbf{s}}}{2G_t} + \left(\frac{\dot{p}}{K_t} \right) \mathbf{I}$	
Επαύξηση πλαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p + \left(\frac{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p^p}{3} \right) \mathbf{I} = \langle \Lambda \rangle \mathbf{R}$	
Δείκτης φόρτισης σε όρους επαυξητικής ενεργού τάσης	$\Lambda = \frac{\mathbf{L} : \boldsymbol{\sigma}}{K_p}$	
Διεύθυνση φόρτισης	$\mathbf{L} = \mathbf{n} - \frac{\mathbf{n} : \mathbf{r}}{3} \mathbf{I}$	
Διεύθυνση πλαστικής επαυξητικής παραμόρφωσης	$\mathbf{R} = \mathbf{n} + \frac{D}{3} \mathbf{I}$	
Επαύξηση ενεργού τάσης	$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = 2G_t \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + K_t \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p \mathbf{I} - \langle \Lambda \rangle (2G_t \mathbf{n} + K_t D \mathbf{I})$	
Δείκτης φόρτισης σε όρους εφαρμοσμένης επαυξητικής παραμόρφωσης	$\Lambda = \frac{2G_t \mathbf{n} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - (\mathbf{n} : \mathbf{r}) K_t \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p}{K_p + 2G_t - (\mathbf{n} : \mathbf{r}) K_t D}$	

Πίνακας 3.1. (συνέχεια)

Μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση φόρτισης	$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_i^b}{\sqrt{\mathbf{r}_i^b : \mathbf{r}_i^b}}$	
Συζυγές σημείο στις επιφάνειες του προσομοιώματος	$\mathbf{r}_i^{c,b,d} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} M_\theta^{c,b,d} \right) \mathbf{n}$	
Απόσταση συζυγούς σημείου από την τρέχουσα κατάσταση	$\mathbf{d}^{b,d} = (\mathbf{r}_i^{b,d} - \mathbf{r}) : \mathbf{n}$	
Μέγιστη απόσταση	$d_{\max}^{b,d} = \sqrt{\frac{2}{3}} (M_\theta^{b,d} + M_{\theta+\pi}^{b,d})$	
Εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης	$G_t = \frac{G_{\max}}{T} = \left(\frac{B p_\alpha}{0.3 + 0.7 e^2} \sqrt{\frac{p}{p_\alpha}} \right) \left(\frac{1}{T} \right)$	B, γ_1, α_1
	$T = 1 + \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) \left(\frac{\sqrt{\frac{1}{2} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^{\text{ref}}) : (\mathbf{r} - \mathbf{r}^{\text{ref}})}}{\alpha_1 \left(\frac{G_{\max}^{\text{ref}}}{p^{\text{ref}}} \right) \gamma_1} \right)$	
Εφαπτομενικό μέτρο ισότροπης συμπίεσης	$K_t = \frac{2G_t(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	ν
Συνάρτηση διαστολικότητας	$D = A_o d^d \left[2 - \sqrt{\frac{\langle d^d \rangle}{d_{\max}^d}} \right]$	A_o
Πλαστικό μέτρο κράτυσης	$K_p = \rho h_b h_f d^b$	
Εξίσωση νόμου παρεμβολής	$h_b = h_o \frac{ d^b ^3}{\langle d_{\max}^b - d^b \rangle}$	h_o
Επίδραση της αλλαγής της δομής	$h_f = \frac{1 + \langle \mathbf{F} : \mathbf{I} \rangle^2}{1 + \langle \mathbf{F} : \mathbf{n} \rangle} = \frac{1 + \langle \mathbf{f}_p \rangle^2}{1 + \langle \mathbf{f} : \mathbf{n} \rangle}$	N_o
	$\dot{\mathbf{f}}_p = N \dot{\varepsilon}_p^p$	
	$\dot{\mathbf{f}} = -N \langle -\dot{\varepsilon}_p^p \rangle [\mathbf{F}_m \mathbf{n} + \mathbf{f}]$	
	$N = N_o \left(\frac{p_\alpha}{\sigma_{1o}} \right) \langle -\psi_o \rangle$	

Η βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου στηρίχτηκε στα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε άμμο Nevada στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος VELACS από τους Arulmoli et al. (1992). Όσον αφορά στην επαλήθευση της συμπεριφοράς του προσομοιώματος σε προβλήματα συνοριακών συνθηκών, χρησιμοποιήθηκαν πειράματα σε φυγοκεντρική του ίδιου ερευνητικού προγράμματος. Οι τιμές των αδιάστατων παραμέτρων για ανακυκλική φόρτιση παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.2**. Επισημαίνεται ότι μεταξύ των δύο ειδών φόρτισης –μονοτονικής και δυναμικής– οι μόνες παράμετροι των οποίων οι τιμές διαφοροποιούνται είναι οι παράμετροι B και a_f . Αναλυτικότερα, στην περίπτωση

ανακυκλικής φόρτισης οι παράμετροι B και a_1 λαμβάνουν τιμές ίσες με 600 και 0.6, ενώ όταν η φόρτιση είναι μονοτονική οι τιμές αυτές αλλάζουν σε 180 και 1.0 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2. Τιμές βαθμονομημένων παραμέτρων καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND για λεπτή άμμο Nevada (Andrianopoulos et al. 2010).

Παράμετροι	Φυσική σημασία	Τιμή
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 για τριαξονική θλίψη (TC)	0.72
Γ_{cs}	Δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για $p=1\text{ kPa}$	0.91
λ	Κλίση της γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο $[e-\ln p]$	0.022
B	Παράμετρος του ελαστικού μέτρου διάτμησης	600
ν	Λόγος Poisson	0.33
k_c^b	Επίδραση της παραμέτρου ψ στην κλίση της Οριακής Επιφάνειας για TC	1.45
k_c^d	Επίδραση της παραμέτρου 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	Παράμετρος της συνάρτησης διαστολικότητας	0.8
h_o	Παράμετρος του πλαστικού μέτρου κράτυνσης	15,000
N_o	Παράμετρος της επίδρασης της αλλαγής της δομής	40,000

Τέλος, για τη χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND θα πρέπει να οριστεί και ο αρχικός δείκτης πόρων του εδάφους, e . Επισημαίνεται, ακόμη, ότι στο πρόγραμμα FLAC αντί της παραμέτρου Γ_{cs} ορίζεται ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση όταν $p = 98.1\text{ kPa}$ (e_{cs}), ο οποίος ισούται με $\Gamma_{cs} - \lambda \ln(p) = 0.809$.

3.3 Αριθμητική προσομοίωση της μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένη, πλήρως στραγγιζόμενη αμμώδη στρώση

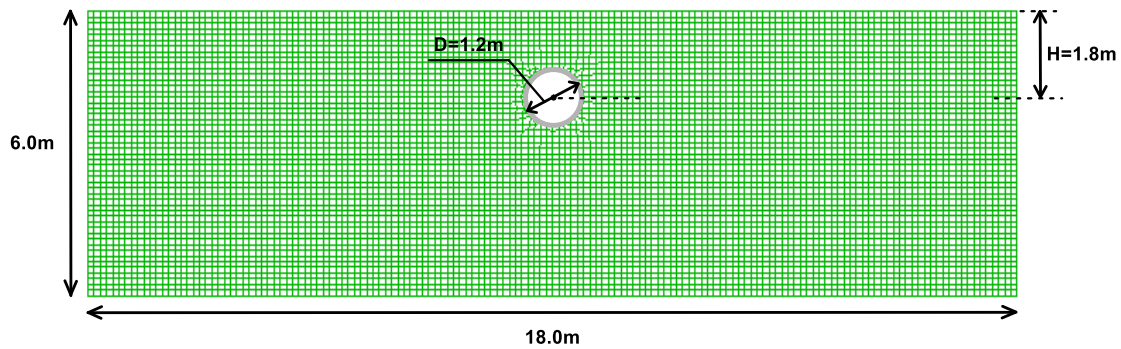
Η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος εγκάρσιας μετατόπισης εγχιβωτισμένου αγωγού σε κορεσμένη, πλήρως στραγγιζόμενη αμμώδη στρώση πραγματοποιήθηκε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιώντας τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC και το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2. Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού προσομοιώματος στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης, καθώς επίσης και η μέθοδος εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού κατακορύφως προς τα άνω και οριζοντίως.

3.3.1 Γεωστατικό πεδίο και πεδίο των τάσεων μετά την κατασκευή του αγωγού

Το εδαφικό στρώμα στο οποίο εγχιβωτίστηκε ο αγωγός διαμέτρου D σχεδιάστηκε με πάχος 6 m και πλάτος 18 m, διαστάσεις οι οποίες θεωρήθηκαν επαρκείς ώστε να μην υπάρχει επίδραση των συνόρων στην απόκριση του αγωγού, για τις τιμές των διαμέτρων που εξετάστηκαν ($D = 1.2$ m και 0.6 m). Το έδαφος θεωρήθηκε κορεσμένο και ο πλήρης κορεσμός του (κατά τη διάρκεια της όποιας φόρτισης) εξασφαλίστηκε τοποθετώντας τη στάθμη του υδροφόρου οριζοντα 1.0m πάνω από την εδαφική επιφάνεια.

Η εδαφική στρώση χωρίστηκε σε τετραγωνικές ζώνες, το πλάτος των οποίων καθορίστηκε από την τιμή της διαμέτρου του αγωγού που προσομοιώθηκε κάθε φορά. Αναλυτικότερα, αποσκοπώντας σε αναλύσεις υψηλής ακρίβειας, ο κάνναβος στην περίπτωση του αγωγού διαμέτρου 1.2m χωρίστηκε σε ζώνες 0.12m x 0.12m, οι οποίες αντιστοιχούν στο 1/10 της διαμέτρου, όπως ακριβώς έπραξαν οι Marinatou et al. (2017). Όταν, ωστόσο, προσομοιώθηκε η μετατόπιση αγωγού διαμέτρου 0.6 m, ο κάνναβος χωρίστηκε σε τετραγωνικές ζώνες πλάτους ίσου με 1/6 της διαμέτρου του αγωγού, δηλαδή 0.10 m. Το μεγαλύτερο αυτό ποσοστό της τιμής της διαμέτρου συγκριτικά με την περίπτωση που ο αγωγός έχει διάμετρο 1.2 m ($D/6$ αντί για $D/10$) επιλέχθηκε με σκοπό να αποφευχθεί η καθυστέρηση της επίλυσης του προβλήματος εξαιτίας του εξαιρετικά μικρού χρονικού βήματος (timestep).

Σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες που τέθηκαν, στα πλευρικά (κατακόρυφα) σύνορα δεσμεύτηκε η οριζόντια μετατόπιση (κατακόρυφες κυλίσεις), ενώ στη βάση του αγωγού τόσο η οριζόντια όσο και η κατακόρυφη μετατόπιση (αρθρώσεις). Στο **Σχήμα 3.3** παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας τυπικός κάνναβος των αριθμητικών αναλύσεων και συγκεκριμένα η περίπτωση που αγωγός διαμέτρου 1.2 m εγχιβωτίζεται σε βάθος $H/D = 1.5$, όπου H η κατακόρυφη απόσταση του κέντρου του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 3.3. Τυπικός κάρναβος αριθμητικής προσομοίωσης στο πρόγραμμα FLAC.

Όσον αφορά στα μηχανικά του χαρακτηριστικά, το έδαφος προσομοιώθηκε αρχικά ως ελαστικό για τον υπολογισμό των γεωστατικών τάσεων. Θεωρήθηκε ότι η ταχύτητα διάδοσης ενός διατμητικού κύματος στο κορεσμένο έδαφος ισούται με 600 m/s. Συνεπώς, δεδομένου του λόγου Poisson για ελαστικό έδαφος $\nu=0.33$, ορίστηκε μέτρο διάτμησης $G=712800\text{kPa}$ και μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης $K=1860000\text{kPa}$.

Στη συνέχεια, μετά την κατασκευή του αγωγού, για την ακριβέστερη περιγραφή της συμπεριφοράς του εδάφους (αντοχή, παραμόρφωση), το ελαστικό προσομοίωμα αντικαταστάθηκε από το σοφιστεμένο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND και οι γεωστατικές τάσεις επανυπολογίστηκαν. Καθώς το καταστατικό προσομοίωμα βαθμονομήθηκε βάσει αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων σε δοκίμια λεπτής άμμου Nevada (βλέπε υπό-παράγραφο 3.2.2), στις ζώνες του εδαφικού προσομοιώματος ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τέτοιου τύπου άμμου.

Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι το υπό μελέτη έδαφος είναι άμμος τύπου Nevada μεσαίας σχετικής πυκνότητας, $D_r = 50\%$ ($e = 0.7$), φαινόμενου ειδικού βάρους $G_s = 2.67$, με τιμές ελάχιστου και μέγιστου δείκτη πόρων 0.511 και 0.887 αντίστοιχα, κατά Arulmoli et al. (1992). Οι ιδιότητές της παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.3**. Επισημαίνεται ότι η διαπερατότητα της ορίστηκε βάσει της σχετικής της πυκνότητας, σύμφωνα με την καμπύλη μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) που προτείνει η Dimitriadi (2014), βασισμένη στα αποτελέσματα των Arulmoli et al. (1992). Υπογραμμίζεται η χαμηλή τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία αποδίδεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη άμμος είναι αρκετά λεπτόκοκη.

Πίνακας 3.3. Ιδιότητες της άμμου Nevada που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση.

Ιδιότητες	Τιμές
Δείκτης πόρων - e (-)	0.7
Πορώδες - n (-)	0.41
Πυκνότητα ξηρού εδάφους - ρ_d (Mg/m^3)	1.57
Πυκνότητα κορεσμένου εδάφους - ρ_{sat} (Mg/m^3)	1.98
Υδραυλική αγωγιμότητα - k (m/s)	$6 \cdot 10^{-5}$

Ο εγκιβωτισμένος αγωγός θεωρήθηκε ότι έχει πάχος ίσο με 1.5 % επί της εξωτερικής του διαμέτρου και ότι συμπεριφέρεται ελαστικά. Σύμφωνα με τους Chian et al. (2014), η προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός δακτυλιοειδούς αγωγού εξασφαλίζεται σχεδιάζοντάς τον ως συμπαγή και οριζόντας, κατά συνέπεια, τιμές κορεσμένης πυκνότητας (ρ_{sat}) και μέτρου διάτμησης (G) στις ζώνες εντός της περιφέρειάς του διαφορετικές των πραγματικών τιμών ενός χαλύβδινου αγωγού. Στον **Πίνακα 3.4** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των ιδιοτήτων ενός χαλύβδινου αγωγού, που θα οριζόνταν αν ο αγωγός σχεδιαζόταν με το πραγματικό του πάχος, και οι αντίστοιχες τιμές που χρειάζεται να οριστούν σε ολόκληρη τη διατομή του για την προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς, θεωρώντας ότι οι δύο αγωγοί έχουν την ίδια μάζα και ροπή αδρανείας. Παρατηρείται ότι οι τιμές αυτές δεν επηρεάζονται από την τιμή της διαμέτρου (D) του αγωγού. Η υδραυλική αγωγιμότητα (k) του αγωγού ορίστηκε ίση με $5.8 \cdot 10^{-7}$ m/s. Η τιμή αυτή, ως δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη εκείνης του εδάφους, διαπιστώθηκε, όπως αναμενόταν, επαρκής για την προσομοίωση της αδιαπερατότητας του αγωγού.

Πίνακας 3.4. Τιμές ιδιοτήτων χαλύβδινου αγωγού και οι αντίστοιχες τιμές τους (ανεξάρτητες της διαμέτρου D) για την προσομοίωση των δακτυλιοειδών αγωγών ως συμπαγών.

	Τιμές ιδιοτήτων χαλύβδινου αγωγού	Ισοδύναμες τιμές
ρ_{sat} (Mg/m ³)	7.85	0.45
E (GPa)	210	23.4
G (GPa)	81	9.0
K (GPa)	175	19.5

Σημαντικό στοιχείο στην περιγραφή της αλληλεπίδρασης του συστήματος εδάφους - αγωγού αποτελεί η προσομοίωση της διεπιφάνειάς τους. Στο λογισμικό FLAC ορίστηκαν δύο επιφάνειες με χρήση της εντολής «interface», οι οποίες στο στάδιο υπολογισμού του πεδίου των τάσεων μετά την κατασκευή του εγκιβωτισμένου αγωγού θεωρήθηκαν πρακτικά συγκολλημένες μεταξύ τους (glued). Η σχετική μετατόπιση των επιφανειών περιγράφεται από τις ελαστικές δυσκαμψίες σε διεύθυνση κάθετη (k_n) και εφαπτομενική (k_s) σε αυτές. Στο στάδιο αυτό οι τιμές των k_s , k_n ορίστηκαν επαρκώς μεγάλες (ίσες με $2 \cdot 10^{10}$) ώστε να αποφευχθεί η σχετική μετατόπιση των επιφανειών κατά τον υπολογισμό του πεδίου των τάσεων.

3.3.2 Μετατόπιση του αγωγού

Μετά από την επίλυση του γεωστατικού πεδίου (με τον αγωγό στη θέση του), το επόμενο στάδιο αφορά στην μετατόπιση του αγωγού. Στο στάδιο της μετατόπισης του αγωγού σε κορεσμένο έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων τροποποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά της

διεπιφάνειας αγωγού - εδάφους. Αναλυτικότερα, επιτράπηκε η αποκόλληση του αγωγού από το έδαφος για οποιαδήποτε τιμή εφελκυστικής δύναμης (μηδενική εφελκυστική αντοχή, $t_{bond} = 0$) και η σχετική τους ολίσθηση ακόμα και για μη-υπέρβαση της διατμητικής αντοχής ($bslip = on$). Η διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια περιγράφεται από το νόμο αστοχίας Mohr - Coulomb, θεωρώντας ότι στην περίπτωση λείου αγωγού η γωνία τριβής της διεπιφάνειας ισούται με 21.5° , καθώς και ότι η γωνία διαστολικότητας είναι μηδενική. Επιπλέον, καθώς πρόκειται για αμμώδη στρώση, η συνοχή τέθηκε ίση με μηδέν ($c_{int} = 0$). Επίσης, τροποποιήθηκαν οι τιμές των δυσκαμψιών k_s και k_n . Η τιμή τους προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση που περιγράφεται στις Οδηγίες Χρήσης του FLAC. Μάλιστα, σύμφωνα με αυτές τις οδηγίες, η τιμή των k_s , k_n προβλέπεται να είναι τόσο μεγάλη ώστε να μην επιτρέπεται η συμπίεση των ζωνών της διεπιφάνειας, αλλά ταυτόχρονα να μη μειώνεται σημαντικά το χρονικό βήμα επίλυσης (timestep), αποφεύγοντας έτσι την αύξηση του απαιτούμενου χρόνου επίλυσης του προβλήματος. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η Σχέση 3.4, όπως αυτή προτείνεται στο εγχειρίδιο του λογισμικού:

$$k_s = k_n = 10 \frac{K_{\max} + \frac{4}{3} G_{\max}}{\Delta z_{\min}} \quad (3.4)$$

$$\text{όπου } G_{\max} = \frac{B p_a}{0.3 + 0.7 e^2} \sqrt{\frac{p}{p_a}} \quad (\text{Andrianopoulos et al. 2010}) \quad \text{και} \quad K_{\max} = \frac{2 G_{\max} (1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}.$$

Επισημαίνεται ότι το μέγεθος Δz αναφέρεται στην τιμή του πάχους της κάθετης ως προς τη διεπιφάνεια πλευράς μιας ζώνης που γειτνιάζει με τη διεπιφάνεια, ενώ ο δείκτης «min» ορίζει την ελάχιστη τιμή του μεγέθους Δz μεταξύ των ζωνών που συνορεύουν με τη διεπιφάνεια. Επίσης, το μέγεθος p αναφέρεται στη μέση ορθή ενεργό τάση και συγκεκριμένα στη μέγιστη τιμή της γύρω από τον αγωγό, που προφανώς εξασφαλίζεται στη βάση του αγωγού. Έτσι προκύπτουν διαφορετικές τιμές δυσκαμψιών για διαφορετική τιμή διαμέτρου αγωγού και λόγου εγκιβωτισμού. Επιπλέον, ως e , p_a ορίζονται ο δείκτης πόρων και η ατμοσφαιρική πίεση αντίστοιχα. Όσον αφορά στην παράμετρο B , η τιμή της ορίστηκε ίση με 180, όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND για την περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης του εδάφους, καθώς στο στάδιο της μετατόπισης η φόρτιση είναι μονοτονική. Επιπλέον, για την επίτευξη της ισορροπίας ορίστηκε η συνδυασμένη μηχανική απόσβεση (combined damping) που παρέχει το πρόγραμμα FLAC, αφού σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην υπο-παράγραφο 3.2.1 αποτελεί την καταλληλότερη μορφή απόσβεσης για την περίπτωση μονοτονικών προβλημάτων φόρτισης του εδάφους.

Μια άλλη λειτουργία του προγράμματος FLAC που αξιοποιήθηκε στο παρόν πρόβλημα αφορά στη δυνατότητα του προγράμματος να ανανεώνει τις συντεταγμένες των κόμβων σε κάθε βήμα της ανάλυσης, ώστε να αποφεύγονται πολύπλοκες γεωμετρίες, οι οποίες εμποδίζουν την εκτέλεση της ανάλυσης. Η λειτουργία αυτή ενεργοποιήθηκε με την εντολή

«set large» χρησιμοποιώντας συγχρόνως μια υπο-ρουτίνα και αποσκοπεί στην πιο ομαλή διακριτοποίηση του καννάβου, οπότε και στην απρόσκοπτη εκτέλεση της ανάλυσης όταν το έδαφος αναμένεται να αναπτύξει μεγάλες παραμορφώσεις.

Τέλος, όσον αφορά στη μέθοδο μετατόπισης του αγωγού, επιβλήθηκε σταθερή ταχύτητα σε όλα τα σημεία του κυκλικού δίσκου που ορίζουν τον ισοδύναμο αγωγό. Ο αγωγός, δηλαδή, μετατοπίστηκε προς την επιθυμητή εγκάρσια διεύθυνση (είτε κατακορύφως προς τα άνω, είτε οριζοντίως) θεωρώντας τον άκαμπτο στερεό σώμα. Για λόγους αριθμητικής ευστάθειας και την επίτευξη ομαλής καμπύλης φορτίου - μετατόπισης η τιμή της ταχύτητας έλαβε τιμές εντός του εύρους $10^{-8} - 10^{-7}$ m/s. Κατά τη διάρκεια της μετατόπισης του αγωγού προς την εκάστοτε εγκάρσια διεύθυνση, καταγράφηκε η μεταβολή του φορτίου που δέχτηκε ο αγωγός στην αντίστοιχη διεύθυνση συναρτήσει της μετατόπισής του. Συγκεκριμένα, σε κάθε χρονικό βήμα, το εγκάρσιο φορτίο (q ή p , για κατακόρυφη προς τα άνω ή οριζόντια μετατόπιση αντίστοιχα) προέκυψε ως το άθροισμα της δύναμης αντίστασης που ασκήθηκε σε κάθε κόμβο της διεπιφάνειας - στην πλευρά του αγωγού. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις δύο διαφορετικές κατευθύνσεις μετατόπισης του αγωγού παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.5.

3.4 Αριθμητική προσομοίωση της μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένη, με υπερπίεσεις πόρων αμμώδη στρώση

Η παράγραφος αυτή αφορά στη μετατόπιση αγωγού εντός εδάφους ρευστοποιημένου στο ελεύθερο πεδίο ($r_{inj} = 1.0$). Συγχρόνως, εξετάστηκε και η περίπτωση όπου η μέση τιμή του λόγου υπερπίεσεων πόρων στο ελεύθερο πεδίο (r_{inj}) είναι μικρότερη της μονάδας (δεν έχει επέλθει, δηλαδή, πλήρης ρευστοποίηση). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας επίσης το πρόγραμμα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC και το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND, τα οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.

Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να σημειωθεί ότι οι μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις που συμβαίνουν σε έδαφος με ανεπτυγμένες υπερπίεσεις πόρων (\perp) εξαιτίας της δράσης κάποιας σεισμικής διέγερσης (π.χ. οριζόντια εξάπλωση) λαμβάνουν χώρα ταυτοχρόνως με την ανάπτυξη των υπερπίεσεων, κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Στο πρώτο στάδιο, μετά τον υπολογισμό των τάσεων εξαιτίας της παρουσίας του αγωγού (βλέπε υπο-παράγραφο 3.4.1) επιβλήθηκε σεισμική διέγερση στη βάση του καννάβου αποσκοπώντας στην ανάπτυξη της επιθυμητής μέσης καθ' ύψος τιμής των υπερπίεσεων των πόρων στο ελεύθερο πεδίο, r_{inj} . Διενεργήθηκε, δηλαδή, δυναμική ανάλυση η οποία περιγράφεται ακολούθως στην υπο-παράγραφο 3.4.2. Έπειτα, στο δεύτερο στάδιο, οι υπερπίεσεις των πόρων που αναπτύχθηκαν κατά τη δράση της σεισμικής διέγερσης (πρώτο στάδιο) διατηρήθηκαν σταθερές και με δεδομένο πλέον αυτό το πεδίο τάσεων και υπερπίεσεων πόρων, ο αγωγός μετατοπίστηκε προς την εκάστοτε επιθυμητή εγκάρσια διεύθυνση, όπως περιγράφεται στην υπο-παράγραφο 3.4.3 που ακολουθεί.

3.4.1 Γεωστατικό πεδίο και πεδίο των τάσεων μετά την κατασκευή του αγωγού

Το γεωστατικό πεδίο και το καθεστώς των τάσεων μετά την εγκατάσταση του εγχιβωτισμένου αγωγού προσομοιώθηκε όπως ακριβώς περιγράφεται παραπάνω στην υπό-παράγραφο 3.3.1 για την περίπτωση της μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένο, στραγγιζόμενο έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων. Χρειάζεται, ωστόσο, να επισημανθεί ότι η θεώρηση της ύπαρξης 1.0m νερού πάνω από την εδαφική επιφάνεια για την εξασφάλιση του κορεσμού του εδάφους υπό φόρτιση διατηρήθηκε τόσο στη σεισμική διέγερση, όσο και στη στατική μετατόπιση του αγωγού.

3.4.2 Ανάπτυξη υπερπιέσεων στους εδαφικούς πόρους

Για την ανάπτυξη υπερπιέσεων στους εδαφικούς πόρους, πέραν των αρχικών υδροστατικών πιέσεων, η εδαφική στρώση υποβλήθηκε σε σεισμική διέγερση. Συνεπώς, οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη ενότητα είναι δυναμικές και για την ορθή τους προσομοίωση απαιτήθηκαν κάποιες διαφοροποιήσεις στην προσομοίωση της εδαφικής στρώσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην υπο-παράγραφο 3.3.1, στην περίπτωση που το έδαφος φορτίζεται μονοτονικά (ανάληψη γεωστατικών τάσεων, τροποποίησή τους εξαιτίας της κατασκευής του αγωγού και κατά τη μετατόπιση του αγωγού) στα κατακόρυφα σύνορα του προσομοιώματος τοποθετούνται κατακόρυφες κυλίσσεις. Όταν όμως το έδαφος φορτίζεται δυναμικά εξαιτίας μιας σεισμικής διέγερσης στη βάση του προσομοιώματος, τότε αναμένεται σημαντική οριζόντια μετατόπιση των ζωνών της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο. Κατά συνέπεια, όσον αφορά στην αριθμητική προσομοίωση, αμέσως πριν την εκτέλεση της δυναμικής ανάλυσης οι κατακόρυφες κυλίσσεις αντικαταστάθηκαν από κόμβους συζευγμένους μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος προσομοίωσης του ελεύθερου πεδίου περιγράφεται ως μέθοδος των «συζευγμένων κόμβων» (tied nodes) και εξασφαλίζει κοινή οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ εκείνων των κόμβων που βρίσκονται στα κατακόρυφα σύνορα και στο ίδιο βάθος από την επιφάνεια. Αναλυτικότερα, η κοινή αυτή μετατόπιση των κόμβων εξασφαλίζεται τοποθετώντας ιδεατά καλώδια (cables) τα οποία διαθέτουν πρακτικά μηδενική τιμή πυκνότητας, εμβαδού διατομής και μέτρου ελαστικότητας ώστε να μην επηρεάζονται οι ιδιότητες και η απόκριση της εδαφικής στρώσης.

Μια ακόμα σημαντική διαφορά στα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος συγκριτικά με εκείνα που ορίστηκαν για τη μονοτονική φόρτιση αφορά στην τιμή των παραμέτρων B και a_1 του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην υπό-παράγραφο 3.2.2, σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης του εδάφους οι παράμετροι αυτές λαμβάνουν τιμές ίσες με 600 και 0.60, όπως έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος για ανακυκλικές δοκιμές και δυναμικά πειράματα φυγοκεντρική. Ωστόσο, οι ελαστικές δυσκαμψίες k_s και k_n της διεπιφάνειας αγωγού - εδάφους, οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από την παράμετρο B , υπολογίστηκαν θεωρώντας ότι $B=180$. Οι τιμές των δυσκαμψιών διατηρήθηκαν, λοιπόν, σταθερές σε όλα τα στάδια της αριθμητικής ανάλυσης. Η απόφαση αυτή στηρίχτηκε στη διερεύνηση των Λημναίου και

Χούσου (2015), από την οποία αποδεικνύεται ότι η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης για κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού σε ξηρή άμμο μέσης πυκνότητας είναι ίδια όταν οι τιμές των ελαστικών δυσκαμψιών λαμβάνουν τιμή ίση με 0.1 έως 10 φορές επί της τιμής αναφοράς, ενώ εδώ η διαφορά στις τιμές είναι πολύ μικρότερη ($600/180 = 3.33$ φορές).

Σχετικά με την απόσβεση της ταλάντωσης των στοιχείων, σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε τοπική απόσβεση (local damping), η οποία όπως παρουσιάστηκε στην υπό-παράγραφο 3.2.1, σε συνδυασμό και με το παρόν καταστατικό προσομοίωμα, έχει αποδειχθεί συστηματικά πως αποτελεί την καταλληλότερη μορφή απόσβεσης για δυναμικές αναλύσεις. Στις ζώνες που προσομοιώνουν το έδαφος ορίστηκε τιμή του συντελεστή a (βλέπε Σχέση 3.1) ίση με 0.0628 ($=0.02\pi$), ενώ στις ζώνες του αγωγού τέθηκε η τιμή 0.1571 ($=0.05\pi$). Η πολύ μικρή τιμή του συντελεστή a σε σχέση με την τιμή που ορίστηκε στην υπο-παράγραφο 3.2.1 για τη μονοτονική φόρτιση οφείλεται στις πολύ μικρές τιμές παραμόρφωσης που αναμένεται να δεχτεί το έδαφος εξαιτίας της σεισμικής διέγερσης. Επισημαίνεται ότι σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης δε χρειάστηκε να ενεργοποιηθεί η ανάλυση μεγάλων παραμορφώσεων του προγράμματος FLAC (large-strain mode).

Η σεισμική διέγερση για την ανάπτυξη των επιθυμητών υπερπίεσεων, της επιθυμητής δηλαδή τιμής του λόγου $r_{u,ff}$, επιβλήθηκε στη βάση της εδαφικής στρώσης υπό μορφή ημιτονικής διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} και περιόδου T . Για την προσομοίωση της ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$) εφαρμόστηκε σεισμική διέγερση τριών κύριων κύκλων φόρτισης με $a_{max} = 0.25\text{ g}$ και $T = 0.30\text{ s}$, ενώ για την εξασφάλιση μικρότερων τιμών υπερπίεσεων των πόρων στο ελεύθερο πεδίο χρησιμοποιήθηκαν ίδιοι κύκλοι φόρτισης αλλά διαφορετικοί συνδυασμοί a_{max} και T . Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης δύο σεισμικών διεγέρσεων με $T = 0.05\text{ s}$ και $a_{max} = 0.05\text{ g}$ και 0.12 g οι οποίες οδήγησαν σε τιμές $r_{u,ff}$ ίσες με 0.30 και 0.50, αντίστοιχα. Υπογραμμίζεται ότι στόχος των δυναμικών αναλύσεων είναι να επιτευχθεί ένα προφίλ υπερπίεσεων πόρων που θα αποτελέσει το πεδίο μέσα στο οποίο θα μετακινήθει ο αγωγός στατικά, όχι η διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών διεγέρσεων στο αναπτυσσόμενο προφίλ υπερπίεσεων πόρων. Για το λόγο αυτό, σημασία έχει η τιμή της $r_{u,ff}$ και η κατανομή των r_u γύρω από τον αγωγό, και όχι η διέγερση με την οποία επιτεύχθηκαν αυτές.

Επισημαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση η δυναμική ανάλυση διακόπηκε κατά τη διέλευση του τελευταίου σεισμικού κύματος διέγερσης από τη βάση του καννάβου, δηλαδή 1.50 s και 0.25 s ύστερα από την έναρξη της διέγερσης. Η παραδοχή αυτή αποσκοπεί στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση του φαινομένου της ταυτόχρονης εκδήλωσης μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων και ανάπτυξης υπερπίεσεων στους εδαφικούς πόρους. Μάλιστα, θεωρώντας ότι η εδαφική μετατόπιση συμβαίνει την ίδια περίπου στιγμή που ρευστοποιείται το έδαφος, επιλέχθηκε μικρός αριθμός κύκλων φόρτισης προς αποφυγή μεγάλης σεισμικής μετακίνησης του αγωγού και επακόλουθης καταπόνησης του εδάφους που περιβάλλει τον αγωγό, πριν ακόμη ξεκινήσει η στατική μετακίνησή του. Επιπλέον, υπογραμμίζεται ότι κατά την επιβολή της σεισμικής διέγερσης πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα ανάλυση υπόγειας ροής.

Επιτράπηκε, δηλαδή, η υδατική ροή και η όποια αποτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων προς την εδαφική επιφάνεια προλάβει να συμβεί. Για την αποφυγή σημαντικής αποτόνωσης των υπερπιέσεων πόρων, δεν επιλέχθηκαν διεγέρσεις μεγάλης διάρκειας και δεν επιτράπηκε να ισορροπήσει το σύστημα μετά το πέρας της διέγερσης.

Τέλος, δεδομένου ότι σε μια συμβατική μελέτη Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής ο κίνδυνος ρευστοποίησης ποσοτικοποιείται βάσει του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (FS), υπολογίστηκαν εδώ οι συντελεστές ασφαλείας που αντιστοιχούν στις τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης ορίζεται ως ο λόγος του λόγου τάσεων αντίστασης έναντι ρευστοποίησης (CRR) προς την τιμή του λόγου τάσεων σεισμικών δράσεων (CSR). Οι τιμές των CRR και CSR σχετίζονται με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (N) και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση του εδάφους (N_l), αντίστοιχα, μέσω των καμπυλών ρευστοποίησης οι οποίες περιγράφονται από τις ισοδύναμες Σχέσεις 3.5 και 3.6:

$$CRR = aK_{\sigma}N^{-b} \quad (3.5)$$

$$CSR = aK_{\sigma}N_l^{-b} \quad (3.6)$$

όπου K_{σ} διορθωτικός συντελεστής που σχετίζεται με την τιμή της ενεργού κατακόρυφης τάσης και a συντελεστής που εξαρτάται από τη φύση και τη σχετική πυκνότητα του εδάφους. Διαιρώντας τις Σχέσεις 3.5 και 3.6 μεταξύ τους, προκύπτει ότι:

$$FS_l = \left(\frac{N}{N_l} \right)^{-b} \quad (3.7)$$

όπου ο λόγος N/N_l μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο t/t_l , όπου t ο χρόνος της διέγερσης και t_l ο απαιτούμενος χρόνος για τη ρευστοποίηση.

Οι Καλογεράκη και Ζωντανού (2014) πραγματοποίησαν δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις σε εδαφική στήλη πάχους 6 m, διαφόρων τιμών σχετικής πυκνότητας (D_r), για σεισμικές διεγέρσεις περιόδου (T) 0.30 s, χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andriopoulos et al. 2010) με τη βαθμονόμηση για άμμο Nevada. Εξήγαγαν, λοιπόν, τις καμπύλες (αντοχής) ρευστοποίησης για κάθε εδαφική στρώση, μέσω των οποίων βρέθηκε ότι η παράμετρος b της Σχέσης 3.7 λαμβάνει τιμές 0.41, 0.42 και 0.57, όταν το D_r ισούται με 50%, 60% και 75%, αντίστοιχα. Έτσι, για την εδαφική στρώση με $D_r=50\%$ που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η παράμετρος b ισούται με 0.41.

Σε περίπτωση που μια εδαφική στρώση δε ρευστοποιείται πλήρως κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, τότε ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για ρευστοποίηση (N) δεν μπορεί να προσδιοριστεί μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας FS_l προσδιορίζεται εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία των

Tokimatsu and Yoshimi (1983), κατά την οποία ο λόγος N/N_l σχετίζεται με τη μέγιστη τιμή του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u . Στην παρούσα εργασία, ο λόγος N/N_l αντικαθίσταται μέσω της Σχέσης 3.7 των Seed and Booker (1976):

$$\frac{N}{N_l} = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} r_u\right) \right]^{2A} \quad (3.8)$$

όπου η παράμετρος A λαμβάνει τιμές 1.2 - 1.4 και 1.4 - 1.8 όταν η σχετική πυκνότητα (D_r) ισούται με 40% και 60 %, αντίστοιχα, κατά Bouckovalas et al. (2011), οι οποίοι προσομοίωσαν αριθμητικώς την ανακυκλική απλή διάτμηση εδαφικού στοιχείου, χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) με βαθμονόμηση για άμμο Nevada. Επομένως, στην περίπτωση της εδαφικής στρώσης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, με σχετική πυκνότητα (D_r) 50 %, η παράμετρος A λαμβάνεται ίση με 1.4.

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται παραπάνω και θέτοντας όπου r_u την τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ που αντιστοιχεί στο τέλος της ελάχιστης διέγερσης, τότε για $r_{u,ff}$ ίσο με 0.3 και 0.5, $FS_l = 2.5$ και 1.5, αντίστοιχα. Δηλαδή, το $r_{u,ff}$ και το FS_l συνδέονται αμφιμονοσήμαντα όταν $r_{u,ff} < 1.0$. Όταν, ωστόσο, το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο ρευστοποιηθεί πλήρως ($r_{u,ff} = 1.0$), τότε ο συντελεστής ασφαλείας δε σχετίζεται μονοσήμαντα με το $r_{u,ff}$. Συγκεκριμένα, ισχύει ότι $FS_l (r_{u,ff} = 1.0) \leq 1.0$, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διέγερσης που επιβάλλεται στην ελάχιστη εδαφική στρώση (περίοδος T , μέγιστη επιτάχυνση a_{max} , αριθμός κύκλων N). Στην παρούσα εργασία δεν διερευνήθηκε τι συμβαίνει για $FS_l \ll 1$, καθώς αυτό θα οδηγούσε σε διατήρηση της διέγερσης για πολλούς κύκλους φόρτισης μετά την επίτευξη του $r_{u,ff} = 1.0$, με αποτέλεσμα την ανύψωση του αγωγού και τη σχετιζόμενη παραμόρφωση του εδάφους περί αυτόν πριν τη στατική επιβολή της εγκάρσιας μετατόπισης (στο επόμενο στάδιο της αριθμητικής προσομοίωσης). Μια τέτοια αρχική συνθήκη θεωρείται ότι θα επηρέαζε τα αποτελέσματα σε όρους καμπυλών φορτίου - μετατόπισης, χωρίς να προσδίδει στην ορθότητα της προσομοίωσης, και συνεπώς δεν προτιμήθηκε. Έτσι, στον **Πίνακα 3.5** που ακολουθεί συνοψίζονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_l για κάθε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ που εξετάζεται στην παρούσα εργασία (0.3, 0.5 και 1.0), ενώ για $r_{u,ff} \leq 0.15$ προκύπτουν τιμές $FS_l \geq 5.0$, δηλαδή καταστάσεις που πρακτικώς θεωρούνται μη-ρευστοποιήσιμες σε μελέτες Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής.

Πίνακας 3.5. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (FS_l) για τις τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ που μελετώνται στην παρούσα εργασία (0.3, 0.5 και 1.0).

$r_{u,ff}$	FS_l
0.3	2.5
0.5	1.5
1.0	≤ 1.0

3.4.3 Μετατόπιση του αγωγού

Μετά την ολοκλήρωση της δυναμικής ανάλυσης, με δεδομένο και αμετάβλητο το καθεστώς υπερπίεσεων πόρων που αναπτύχθηκε, ακολουθεί η εγιάρσια μετατόπιση του αγωγού και η επακόλουθη μονοτονική φόρτιση του περιβάλλοντος εδάφους. Στο στάδιο αυτό ορίστηκαν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά (ελαστικές δυσκαμψίες διεπιφάνειας, απόσβεση) με την περίπτωση της μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος, όπως παρουσιάζονται στην υπό-παράγραφο 3.3.2. Επιπρόσθετα, στην παρούσα ανάλυση απαιτήθηκε η αντικατάσταση των συνδεδεμένων ακραίων κόμβων με κατακόρυφες κυλίσεις ξανά, αλλά και η νέα αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων B και a_i του προσομοιώματος σύμφωνα με την υπό-παράγραφο 3.3.2 στις τιμές τους για μονοτονική φόρτιση, ξανά.

3.5 Διακρίβωση αριθμητικής μεθοδολογίας

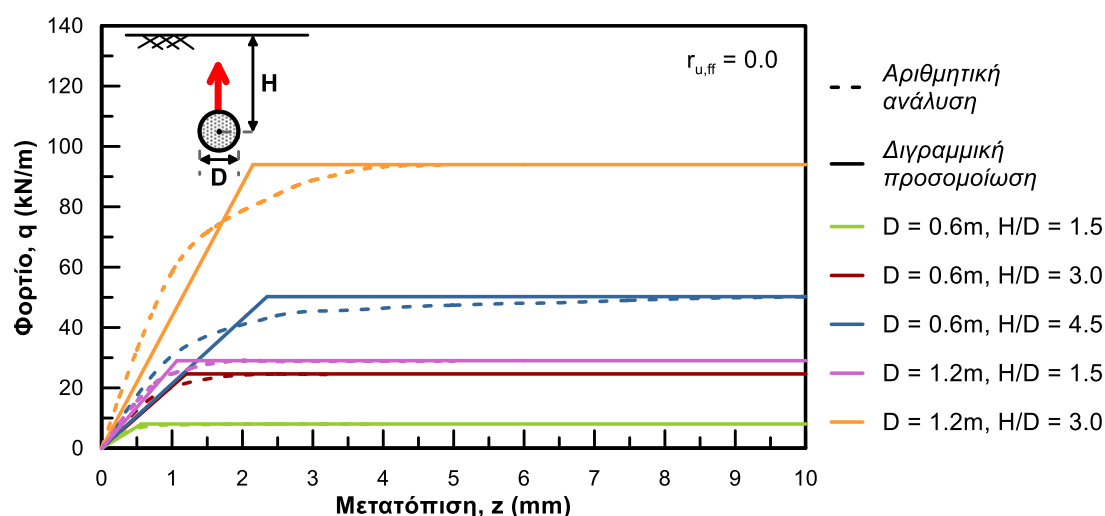
Στην παράγραφο αυτή αρχικώς παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης του αγωγού και οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους περί τον αγωγό που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση, και στη συνέχεια συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες και τους αντίστοιχους μηχανισμούς που προτείνονται από τις οδηγίες σχεδιασμού και τη βιβλιογραφία, αντίστοιχα. Η παρουσίαση γίνεται πρώτα για την εγιάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση (παράγραφος 3.5.1) και μετά για την εγιάρσια οριζόντια μετατόπιση (παράγραφος 3.5.2) αγωγού διαμέτρου D και λόγου εγιάρσιμου H/D σε κορεσμένη, πλήρως στραγγιζόμενη αμώδη στρώση (ήτοι με υδροστατικές πιέσεις πόρων). Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι η επιβεβαίωση της ορθής αριθμητικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού με βάση τη βιβλιογραφία.

3.5.1 Εγιάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση

Η εξαγωγή των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης που αφορούν στην εγιάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση ενός αγωγού πραγματοποιήθηκε για αγωγούς διαμέτρου $D=1.2\text{m}$ και $D=0.6\text{m}$. Ο μεγάλος αγωγός ($D=1.2\text{m}$) τοποθετήθηκε σε βάθος H/D ίσο με 1.5 και 3.0, ενώ ο μικρός ($D=0.6\text{m}$) σε βάθος H/D ίσο με 1.5, 3.0 και 4.5. Στο **Σχήμα 3.4** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης που προέκυψαν από την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων, καθώς και οι ισοδύναμες (δι-γραμμικές) ελαστοπλαστικές καμπύλες που τις προσομοιώνουν αδρά. Υπενθυμίζεται ότι οι δι-γραμμικές καμπύλες χαρακτηρίζονται από το σημείο $(q_{ult}, z_{ult,b})$, όπου $z_{ult,b}$ η μετατόπιση για την οποία επιτυγχάνεται και διατηρείται σταθερό το μέγιστο φορτίο q_{ult} .

Παρατηρώντας το **Σχήμα 3.4**, προκύπτει ότι το οριακό φορτίο, q_{ult} , των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης αυξάνει αυξανόμενου του βάθους εγιάρσιμου του αγωγού, αν η διάμετρος παραμένει η ίδια. Η απόκριση αυτή οφείλεται στην αύξηση του όγκου του υπερκείμενου εδάφους, την αύξηση του μήκους της επιφάνειας αστοχίας αλλά και της διατμητικής δύναμης αντίστασης που αυτό προβάλλει, δεδομένου και ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους αυξάνει με το βάθος. Επίσης, για τον ίδιο λόγο εγιάρσιμου (H/D) η αύξηση της

διαμέτρου (D) του αγωγού συνεπάγεται την αύξηση του οριακού φορτίου, για τους ίδιους λόγους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, καθώς αυξάνει και το βάθος H όσο αυξάνει η διάμετρος D . Οι παραπάνω μεταβολές στις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για αλλαγές στις τιμές της διαμέτρου και του λόγου εγκιβωτισμού επαληθεύονται από τις σχέσεις που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού, καθώς βάσει αυτών το οριακό φορτίο είναι πολλαπλάσιο του βάθους εγκιβωτισμού H , της διαμέτρου D και του συντελεστή κατακόρυφης προς τα άνω φέρουσας ικανότητας, N_{qp} . Επισημαίνεται ότι η τιμή του συντελεστή N_{qp} εξαρτάται μόνο από το λόγο εγκιβωτισμού και τη μέγιστη γωνία τριβής του εδάφους και όχι από την τιμή της διαμέτρου D , όπως γίνεται φανερό στο διάγραμμα υπολογισμού που παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.2.1 (βλέπε **Σχήμα 2.1**).



Σχήμα 3.4. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων από τις αναλύσεις και τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού.

Επιπλέον, οι αριθμητικές αναλύσεις έδωσαν, για όλες τις περιπτώσεις τιμών διαμέτρου D και λόγου εγκιβωτισμού H/D , τιμές οριακών φορτίων παραπλήσιες εκείνων που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.6**. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον **Πίνακα 3.6** οι τιμές του οριακού φορτίου που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις σχεδόν ταυτίζονται με εκείνες που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού των ASCE (1984) και ALA (2001), ενώ εξασφαλίζουν συντηρητικότερο σχεδιασμό συγκριτικά με εκείνον που προκύπτει βάσει των τιμών q_{ult} που προτείνουν οι PRCI (2009). Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του συντελεστή N_{qp} θεωρήθηκε ότι η μέγιστη γωνία τριβής του εδάφους, φ , είναι ίση με 36° , σύμφωνα με τους Prevost and Popescu (1996), οι οποίοι στηρίχτηκαν σε πειραματικά αποτελέσματα αστραγγιστων τριαξονικών δοκιμών σε άμμο Nevada.

Πέρα από τα οριακά φορτία των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης πρέπει να συγκριθούν και οι τιμές των μετατοπίσεων του αγωγού για τις οποίες η τιμή της δύναμης που δέχεται ο αγωγός λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Η σύγκριση αυτή αφορά στις (δι-γραμμικές) ελαστοπλαστικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης και επομένως στην οριακή μετατόπιση $z_{ult,b}$,

καθώς ο σχεδιασμός των αγωγών στηρίζεται σε τέτοιας μορφής καμπύλες. Η σύγκριση των τιμών $\zeta_{ult,b}$ που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση σε σχέση με εκείνες που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.7**. Υπενθυμίζεται ότι μεταξύ των οδηγιών σχεδιασμού μόνο οι κανονισμοί ASCE (1984) και PRCI (2009) προτείνουν κάποια σαφή μέθοδο δι-γραμμικοποίησης, δηλαδή εκτιμούν την τιμή της οριακής μετατόπισης $\zeta_{ult,b}$.

Πίνακας 3.6. Σύγκριση των τιμών των οριακών φορτίων q_{ult} που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετακίνηση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff}=0.0$).

$D(m)$	H/D	$q_{ult}(kN/m)$			Αριθμητική ανάλυση
		ASCE (1984) (N_{qv} από Trautmann et al., 1985a)	ALA (2001) (N_{qv} από Σχέση 2.5)	PRCI (2009) (N_{qv} από Σχέση 2.3)	
1.2	1.5	31.1	25.5	19.8	29
	3.0	103.8	101.9	79.1	94
0.6	1.5	7.8	6.4	5.0	8.05
	3.0	26.0	25.5	19.8	24.6
	4.5	56.1	57.3	44.5	50.2

Πίνακας 3.7. Σύγκριση των τιμών $\zeta_{ult,b}$ των ελαστο-πλαστικών καμπυλών που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από τη δι-γραμμικοποίηση των καμπυλών $q - z$ της αριθμητικής ανάλυσης για εγκάρσια κατακόρυφη μετατόπιση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff}=0.0$).

$D(m)$	H/D	$\zeta_{ult,b}(mm)$		
		ASCE (1984)	PRCI (2009)	Αριθμητική ανάλυση
1.2	1.5	11.25	4.05 - 11.25	1.07
	3.0	22.50	8.10 - 22.50	2.15
0.6	1.5	5.63	2.03 - 5.63	0.57
	3.0	11.25	4.05 - 11.25	1.20
	4.5	16.88	6.08 - 16.88	2.35

Στον **Πίνακα 3.7** παρατηρείται ότι τόσο οι αριθμητικές αναλύσεις όσο και οι οδηγίες σχεδιασμού προβλέπουν ποιοτικά αύξηση της οριακής μετατόπισης $\zeta_{ult,b}$ όταν αυξάνεται το βάθος εγχιβωτισμού αγωγού διαμέτρου D . Επίσης, όπως και στην περίπτωση του οριακού φορτίου q_{ult} , όσο μεγαλύτερη η διάμετρος D του αγωγού για δεδομένη τιμή λόγου εγχιβωτισμού H/D τόσο μεγαλύτερη η τιμή της οριακής μετατόπισης. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στους ίδιους μηχανισμούς με εκείνους που καθορίζουν την τιμή του οριακού φορτίου και οι οποίοι περιγράφονται παραπάνω.

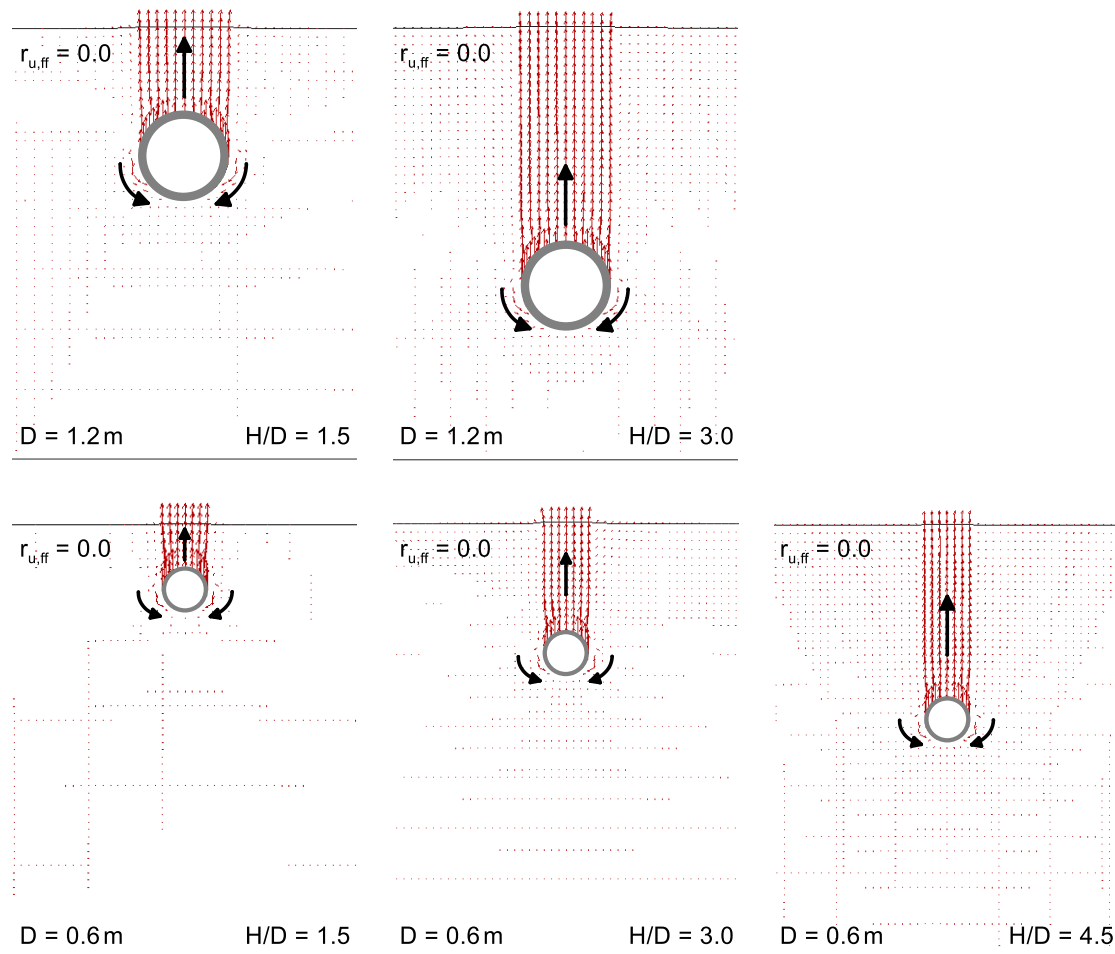
Ωστόσο, οι τιμές $\zeta_{ult,b}$ που προβλέπει η αριθμητική ανάλυση απέχουν σημαντικά από εκείνες των οδηγιών σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, η αριθμητική ανάλυση οδήγησε σε οριακές μετατοπίσεις μικρότερες των προβλεπόμενων από τις οδηγίες των ASCE (1984) και PRCI

(2009), άρα σε καμπύλες μεγαλύτερης ελαστικής δυσκαμψίας. Η αυξημένη αυτή στιβαρότητα οφείλεται στη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND και στην έντονη διαστολικότητα της άμμου Nevada, συγκριτικά με άλλες άμμους της βιβλιογραφίας, όπως πιθανώς και τις άμμους με βάση τις οποίες προτάθηκαν οι οδηγίες σχεδιασμού αγωγών. Φυσικά, θα μπορούσε εδώ να γίνει ανα-βαθμονόμηση του προσομοιώματος για να δίνει εκτιμήσεις στιβαρότητας συμβατές με τις οδηγίες σχεδιασμού. Αλλά δεν κρίθηκε αναγκαίο για τους παρακάτω λόγους:

α) Στην πράξη, η εγκάρσια κατακόρυφη μετατόπιση προς τα άνω που αναμένεται να δεχτεί ένας αγωγός εξαιτίας μιας μόνιμης εδαφικής μετατόπισης είναι σαφώς μεγαλύτερη ακόμα και της μέγιστης ελαστικής μετατόπισης που προτείνεται από ASCE (1984). Συνεπώς, το έδαφος θα φορτίζει, ούτως ή άλλως, τον αγωγό με το μέγιστο φορτίο, το οποίο προβλέπεται ικανοποιητικά από τις αναλύσεις και δεν έχει ανάγκη ανα-βαθμονόμησης.

β) Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της μεταβολής των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης ενός μετατοπιζόμενου αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος σε σχέση με τις αντίστοιχες καμπύλες για την περίπτωση κορεσμένου, πλήρως στραγγιζόμενου εδάφους. Συνεπώς, το ενδιαφέρον εστιάζεται στη σχετική μεταβολή της στιβαρότητας, και όχι στο απόλυτο μέγεθος αυτής, και η εν λόγω σχετική μεταβολή αναμένεται ίδια ανεξαρτήτως βαθμονόμησης. Η συγκεκριμένη παραδοχή έχει ελεγχθεί ότι ισχύει, αλλά η διακρίβωσή της παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

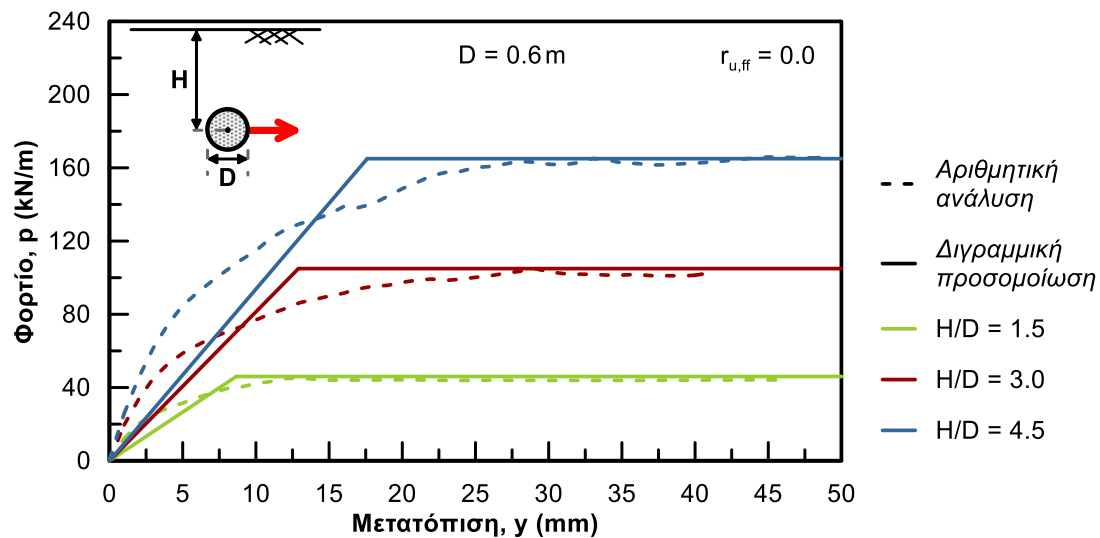
Περαιτέρω, για την επιβεβαίωση της ορθής προσομοίωσης της εδαφικής συμπεριφοράς, είναι απαραίτητο η αριθμητική ανάλυση να οδηγεί σε μηχανισμούς παραμόρφωσης του εδάφους περί τον αγωγό παρόμοιους με εκείνους που προτείνονται στη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2. Παρακάτω, στο **Σχήμα 3.5** παρουσιάζονται οι μηχανισμοί αστοχίας του εδάφους για εγκάρσια κατακόρυφη μετατόπιση προς τα άνω αγωγών διαμέτρου $D=1.2\text{m}$ και $D=0.6\text{m}$ για διάφορα βάρη εγκιβωτισμού H/D , οι οποίοι προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση σε κορεσμένο έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων (πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες). Μελετώντας τα επιμέρους σχήματα, γίνεται αντιληπτό πως ο μηχανισμός παραμόρφωσης αποτελείται από δύο κατακόρυφες διατμητικές επιφάνειες και μια δευτερεύουσα «ροή» εδάφους πλευρικά του αγωγού, ανεξαρτήτως της τιμής της διαμέτρου D και του λόγου εγκιβωτισμού H/D . Μάλιστα, η αύξηση του βάθους εγκιβωτισμού ενός αγωγού οδηγεί στην αύξηση του μήκους των επιφανειών, όπως αναμενόταν, γεγονός στο οποίο οφείλεται, εν μέρει, και η αντίστοιχη αύξηση του οριακού φορτίου. Οι δύο ανεξάρτητες μορφές παραμόρφωσης που εξήχθησαν από την αριθμητική ανάλυση επιβεβαιώνονται από τη βιβλιογραφία και συγκεκριμένα από τα πειράματα των Chian et al. (2015) και Huang et al. (2015), κατά τα οποία προέκυψαν μηχανισμοί αστοχίας που παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 (βλέπε παράγραφο 2.5).



Σχήμα 3.5. Μηχανισμοί παραμόρφωσης κορεσμένου κοκκώδους εδάφους σε συνθήκες πλήρους στράγγισης ($r_{u,ff} = 0.0$) υπό μορφή διανυσμάτων μετατόπισης όταν αγωγός διαμέτρου D και λόγου εγκιβωτισμού H/D μετατοπίζεται εγκάρσια κατακόρυφα προς τα άνω.

3.5.2 Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση

Στο **Σχήμα 3.6** που ακολουθεί, περιλαμβάνονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των ελατηρίων που προσομοιώνουν την εδαφική συμπεριφορά κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού σε κορεσμένη άμμο, μόνο για την περίπτωση του μικρού αγωγού (εξωτερική διάμετρος D ίση με 0.6 m), ενώ ελέγχθηκαν τα βάρη εγκιβωτισμού $H = 1.5D$, $3D$ και $4.5D$. Μάλιστα, οι καμπύλες αυτές έχουν δι-γραμμικοποιηθεί, για την ποσοτικοποίηση του οριακού φορτίου και της στιβαρότητας. Υπενθυμίζεται ότι το χαρακτηριστικό σημείο των δι-γραμμικών καμπυλών συμβολίζεται ως $(p_{ult}, y_{ult,b})$ όπου $y_{ult,b}$ η μετατόπιση για την οποία μηδενίζεται η στιβαρότητα του εδάφους και το φορτίο παίρνει και διατηρεί το μέγιστο φορτίο p_{ult} .



Σχήμα 3.6. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($p - y$) των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων από τις αναλύσεις τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff}=0.0$).

Παρατηρώντας το **Σχήμα 3.6**, συμπεραίνεται ότι αντίστοιχα με την περίπτωση της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης, η αύξηση του βάθους εμβιβωτισμού συνεπάγεται την αύξηση του οριακού φορτίου p_{ult} , συμπεριφορά η οποία επίσης επαληθεύεται από τις οδηγίες σχεδιασμού, όπως παρατηρείται στον **Πίνακα 3.8**. Η αύξηση του οριακού φορτίου με το λόγο εμβιβωτισμού H/D αποδίδεται στο ότι ο αγωγός περιβάλλεται από έδαφος μεγαλύτερης αντοχής, ο όγκος του υπερκείμενου εδάφους είναι μεγαλύτερος, ενώ αυξάνει επίσης το μήκος των επιφανειών αστοχίας. Μάλιστα, η αριθμητική ανάλυση προσέγγισε αρκετά ικανοποιητικά την τιμή του οριακού φορτίου p_{ult} που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού. Αναλυτικότερα, και σε αυτή τη διεύθυνση εγκάρσια μετατόπισης του αγωγού το μέγιστο φορτίο που υπολογίστηκε συγκλίνει στις τιμές που προτείνουν οι κανονισμοί ASCE (1984) και ALA (2001), ενώ συνεπάγεται αυστηρότερο σχεδιασμό συγκριτικά με εκείνον κατά PRCI (2009).

Πίνακας 3.8. Σύγκριση των τιμών p_{ult} που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση για εγκάρσια οριζόντια μετακίνηση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff}=0.0$).

$D(m)$	H/D	$p_{ult}(kN/m)$				Αριθμητική ανάλυση
		ASCE (1984) (N_{qh} από Trautmann et al. (1985b))	ALA (2001) (N_{qh} από Hansen (1961))	(N_{qh} από τη Σχέση 2.10)	PRCI (2009) (N_{qh} από τη Σχέση 2.4)	
0.6	1.5	29.6	51.9	49.5	27.9	46
	3.0	73.7	124.6	122.0	70.2	105
	4.5	129.2	218.0	211.3	126.7	165

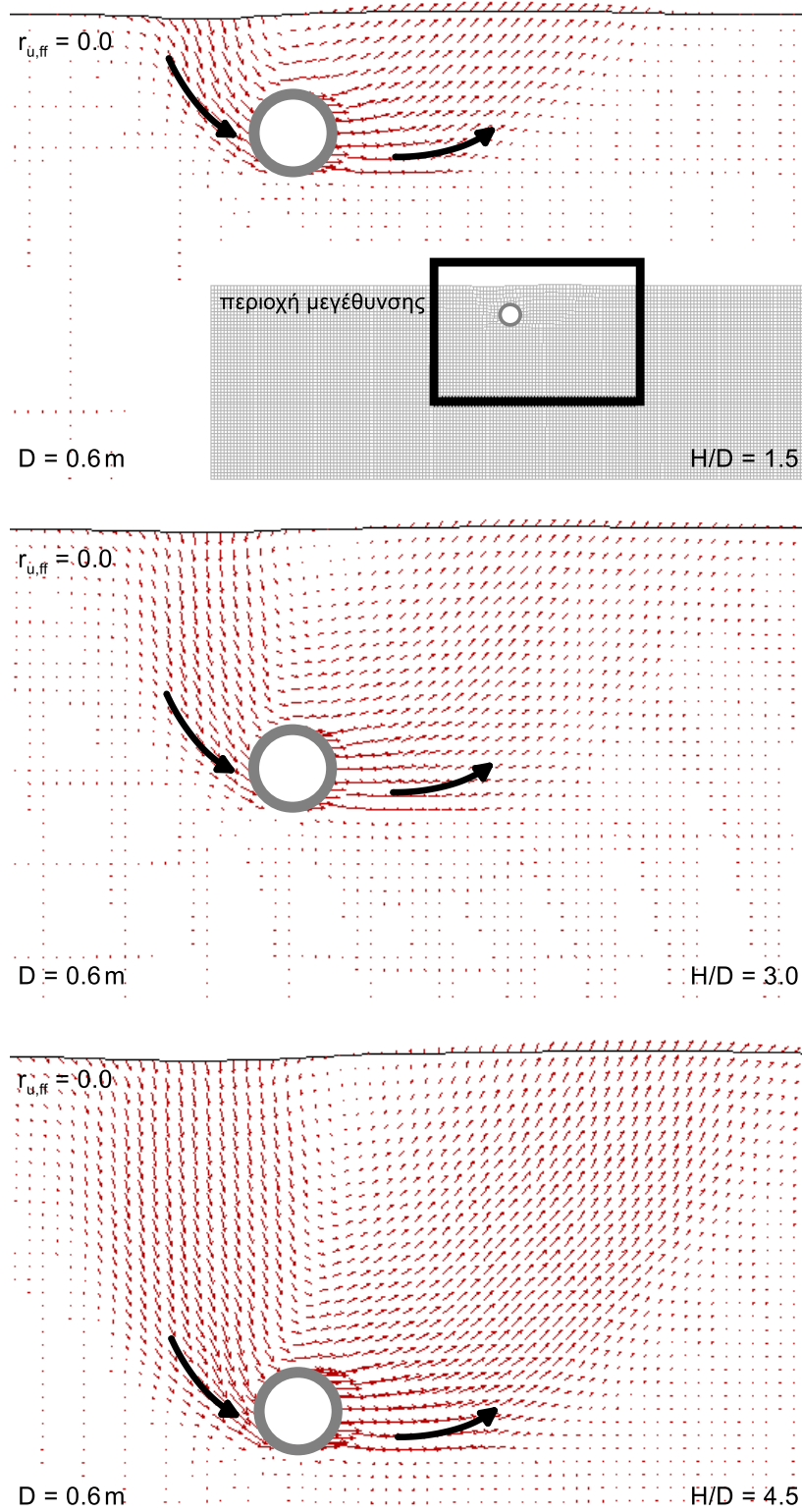
Στον **Πίνακα 3.9** παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης ελαστικής μετατόπισης $y_{ult,b}$ τόσο από τη διεξαγωγή αριθμητικών αναλύσεων όσο και από την εφαρμογή των σχέσεων που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού. Υπογραμμίζεται ότι και σε αυτή την διεύθυνση μετατόπισης του αγωγού, μόνο οι οδηγίες σχεδιασμού των ASCE (1984) και PRCI (2009) προτείνουν μέθοδο δι-γραμμικοποίησης των υπερβολικών καμπυλών $p - y$. Από την παρατήρηση των τιμών του **Πίνακα 3.9**, γίνεται φανερό ότι και πάλι η βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND οδηγεί σε συμπεριφορά του εδάφους στιβαρότερη από εκείνη που προβλέπεται από τις οδηγίες σχεδιασμού, όπως και στην περίπτωση της κατακόρυφης μετατόπισης προς τα άνω.

Πίνακας 3.9. Σύγκριση των τιμών $y_{ult,b}$ των ελαστο-πλαστικών καμπυλών που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού με εκείνες που προέκυψαν από τη δι-γραμμικοποίηση των καμπυλών $p - y$ της αριθμητικής ανάλυσης για εγκάρσια οριζόντια μετακίνηση αγωγού σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος ($r_{u,ff}=0.0$).

$D(m)$	H/D	$y_{ult,b}(mm)$		
		ASCE (1984)	PRCI (2009)	Αριθμητική ανάλυση
0.6	1.5	24	22	8.7
	3.0	42	39	12.9
	4.5	60	55	17.6

Το δεύτερο κριτήριο που πρέπει να ικανοποιείται έτσι ώστε το αριθμητικό προσομοίωμα να θεωρείται ότι περιγράφει με ακρίβεια την εδαφική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης ενός αγωγού, αφορά στη μορφή της εδαφικής παραμόρφωσης. Στο **Σχήμα 3.7** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι σχετικοί μηχανισμοί αστοχίας του κορεσμένου, πλήρως στραγγιζόμενου κοκκώδους εδάφους για αγωγό διαμέτρου $D=0.6$ m και διάφορα βάρη εγριβωτισμού ($H/D=1.5, 3.0, 4.5$). Και για τα τρία βάρη εγριβωτισμού παρατηρείται ότι το έδαφος που κινητοποιείται δεξιά του αγωγού, το έδαφος δηλαδή που ωθεί ο αγωγός κατά τη μετατόπισή του προς τα δεξιά, έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο από εκείνο στα αριστερά του. Η διαφορά ανάμεσα στους δύο εδαφικούς όγκους παραπέμπει στα ενεργητικά και παθητικά πρίσματα αστοχίας κατά Coulomb. Παρόμοιος μηχανισμός αστοχίας διαπιστώθηκε και από τους Chaloulos et al. (2015) κατά την αριθμητική προσομοίωση της οριζόντιας μετατόπισης αγωγού εγριβωτισμένου σε ξηρή άμμο μικρής και μεσαίας σχετικής πυκνότητας και μικρό βάθος εγριβωτισμού (έως $H/D=4.8$). Επιπλέον, στο **Σχήμα 3.7** παρατηρείται ότι το πλάτος του παθητικού πρίσματος αυξάνει με την αύξηση του λόγου H/D , όπως ακριβώς αναφέρουν και οι Chaloulos et al. (2015) (βλέπε παράγραφο 2.5). Η ορθότητα των μηχανισμών παραμόρφωσης που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.7** επιβεβαιώνονται και από τα πειράματα εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης αγωγών, εγριβωτισμένων σε βάθος $H=1D$ και $3D$, του Burnett (2015). Στα πειράματα αυτά παρατηρήθηκε η δημιουργία πρισμάτων αστοχίας αντίστοιχων εκείνων κατά την ενεργητική και παθητική αστοχία του εδάφους ανεξάρτητα από το βάθος

εγκιβωτισμού των αγωγών (βλέπε παράγραφο 2.5 για αναλυτική περιγραφή των αποτελεσμάτων των πειραμάτων).



Σχήμα 3.7. Μηχανισμοί παραμόρφωσης κορεσμένου κοκκώδους εδάφους σε συνθήκες πλήρους στράγγισης ($r_{u,ff} = 0.0$) υπό μορφή διανυσμάτων μετατόπισης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 0.6\text{ m}$ και λόγου εγκιβωτισμού H/D μετατοπίζεται προς τα δεξιά κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση.

3.6 Συμπεράσματα

Από τη σύγκριση των ελαστο-πλαστικών καμπυλών φορτίου - μετατόπισης που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις με εκείνες που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού για τις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις μετατόπισης του αγωγού που εξετάστηκαν (κατακόρυφη προς τα άνω και οριζόντια) διαπιστώθηκε η πολύ καλή προσέγγιση της τιμής του οριακού φορτίου για κάθε τιμή διαμέτρου D και λόγου εγκιβωτισμού H/D όταν το έδαφος είναι κορεσμένο και πλήρως στραγγιζόμενο. Αντιθέτως, προκύπτει υποτίμηση των τιμών της οριακής μετατόπισης πέραν της οποίας το έδαφος αποκτά το οριακό φορτίο, γεγονός που υποδηλώνει υπερεκτίμηση της ελαστικής στιβαρότητας συγκριτικά με τις οδηγίες σχεδιασμού αγωγών της βιβλιογραφίας. Αυτό οφείλεται στη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND στην άμμο Nevada, αλλά δεν κρίνεται σημαντικό καθώς:

α) Στην πράξη, οι μετατοπίσεις σχεδιασμού των αγωγών στις δύο εν λόγω διευθύνσεις αναμένονται σαφώς μεγαλύτερες των οριακών μετατοπίσεων που απαιτούνται ώστε το έδαφος να προσεγγίσει το οριακό φορτίο. Συνεπώς, το έδαφος φορτίζει, ούτως ή άλλως, τον αγωγό με το οριακό φορτίο, το οποίο προβλέπεται ικανοποιητικά από τις αναλύσεις και δεν δημιουργεί ανάγκη ανα-βαθμονόμησης του προσομοιώματος.

β) Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της μεταβολής των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης ενός μετατοπιζόμενου αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος (στα Κεφάλαια 4 και 5) συγκριτικά με τις αντίστοιχες καμπύλες για την περίπτωση κορεσμένου, πλήρως στραγγιζόμενου εδάφους που εξετάστηκε εδώ. Συνεπώς, το ενδιαφέρον εστιάζεται στη σχετική μεταβολή της στιβαρότητας, και όχι στο απόλυτο μέγεθος αυτής, και η εν λόγω σχετική μεταβολή αναμένεται ίδια ανεξαρτήτως βαθμονόμησης (βλέπε Κεφάλαιο 4 για απόδειξη αυτής).

Επιπλέον, στις προηγούμενες παραγράφους διαπιστώθηκε σημαντική ομοιότητα μεταξύ των μηχανισμών αστοχίας που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση και εκείνων που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία και για τις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις μετατόπισης του αγωγού. Η ομοιότητα αυτή είναι αναμενόμενη δεδομένης της πολύ καλής προσέγγισης της τιμής των οριακών φορτίων τα οποία εξαρτώνται άμεσα από τη μορφή της παραμόρφωσης του εδάφους περί τον αγωγό.

Σύμφωνα, λοιπόν, με όλα τα παραπάνω, το αριθμητικό προσομοίωμα προβλέπει επιτυχώς τη συμπεριφορά του εδάφους για όλες τις περιπτώσεις εγκάρσιας μετατόπισης αγωγού που εξετάζονται. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία στα Κεφάλαια 4 και 5 που ακολουθούν, για την εγκάρσια μετατόπιση αγωγού κατακόρυφα προς τα άνω και οριζόντια αντίστοιχα, σε έδαφος που έχει αναπτύξει υπερεπίεσεις πόρων μέχρι και τη ρευστοποίηση.

Κεφάλαιο 4 | Εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος

4.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση ενός εγκιβωτισμένου αγωγού σε κορεσμένο κοκκώδες έδαφος, με υδροστατικές πιέσεις πόρων αλλά και υπερπιέσεις πόρων λόγω σεισμού, εξετάζεται για αγωγό διαμέτρου $D = 1.2$ m με λόγους εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$ και 3.0 , καθώς και για μικρότερο αγωγό με διάμετρο 0.6 m και λόγους εγκιβωτισμού 1.5 , 3.0 και 4.5 .

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης (καμπύλες φορτίου - μετατόπισης, μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης) της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης των αγωγών αυτών μέσα σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος (ήτοι με υδροστατικές πιέσεις πόρων) παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφο 3.5.1). Σε συνέχεια των αναλύσεων αυτών, στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η επίδραση της ανάπτυξης υπερπιέσεων των πόρων (Δu) λόγω σεισμού στην αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού, δηλαδή στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων που προσομοιώνουν το έδαφος και στο μηχανισμό εδαφικής παραμόρφωσης. Ειδικότερα, μελετάται τόσο η περίπτωση της πλήρους ρευστοποίησης του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο, όσο και εκείνη της μερικής ρευστοποίησής του. Υπενθυμίζεται ότι οι καταστάσεις της μερικής και πλήρους ρευστοποίησης ποσοτικοποιούνται, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, βάσει της μέσης καθ' ύψος τιμής του λόγου υπερπιέσεων πόρων στο ελεύθερο πεδίο $r_{u,ff}$, καθώς και του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο FS_I (βλέπε Κεφάλαιο 3, υπο-παράγραφο 3.4.2). Ως ελεύθερο πεδίο ορίζεται η περιοχή η οποία βρίσκεται επαρκώς μακριά από τον αγωγό ώστε η κατανομή των υπερπιέσεων πόρων σε αυτή να μην επηρεάζεται από την παρουσία του αγωγού. Για το μεγάλο αγωγό ($D = 1.2$ m) ελέγχονται δύο περιπτώσεις μερικής ρευστοποίησης ($r_{u,ff} < 1.0$ και $FS_I > 1.0$) κατά τις οποίες ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.3 και 0.5 , ενώ για το μικρό αγωγό ($D = 0.6$ m) εξετάζεται μόνο η περίπτωση για την οποία $r_{u,ff} = 0.5$, χάριν συντομίας. Τέλος, όλοι οι αγωγοί μετατοπίζονται εγκάρσια κατακόρυφα προς τα άνω σε έδαφος το οποίο έχει ρευστοποιηθεί στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$).

Η ανάπτυξη των υπερπιέσεων πόρων και η εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση των αγωγών σε σεισμικώς ρευστοποιημένο έδαφος προσομοιώνονται, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 (βλέπε παράγραφος 3.4), σε δύο διαφορετικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, επιβάλλεται σεισμική διέγερση στη βάση του προσομοιώματος για την εξασφάλιση της επιθυμητής τιμής του λόγου $r_{u,ff}$ (και του FS_I), ενώ στο δεύτερο στάδιο, το πεδίο των

υπερπιέσεων διατηρείται σταθερό και ο αγωγός μετατοπίζεται εγκάρσια κατακόρυφα προς τα άνω ως άκαμπτο στερεό σώμα. Στόχος είναι να ποσοτικοποιηθεί η αντίσταση (φορτίο) που επιβάλλει το έδαφος υπό το συγκεκριμένο πεδίο υπερπιέσεων στην εγκάρσια μετατόπιση του αγωγού στη συγκεκριμένη κατεύθυνση.

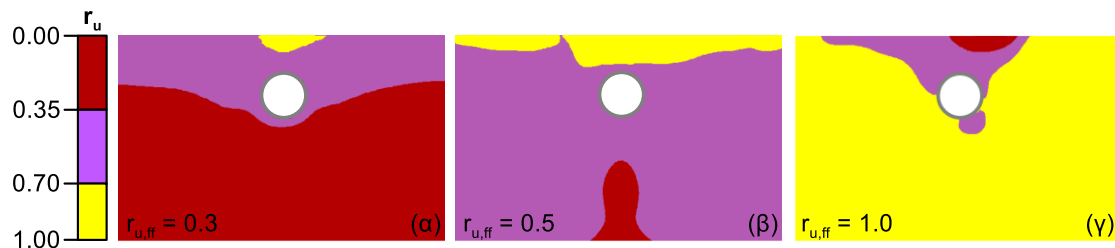
Οι κατανομές του λόγου r_n στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού για κάθε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ που εξετάζεται παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2 του παρόντος κεφαλαίου. Στη συνέχεια, στην παράγραφο 4.3 παρουσιάζονται οι ελαστο-πλαστικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών που μελετώνται και τις τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ που εξετάζονται, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες που αφορούν σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο (με υδροστατικές πιέσεις πόρων) έδαφος. Τέλος, στην παράγραφο 4.5 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού που εγκιβωτίζεται σε εδαφική στρώση με υπερπιέσεις πόρων, δηλαδή με λόγο $r_{u,ff} > 0.0$, και συγκρίνονται με τους αντίστοιχους σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$).

4.2 Κατανομή των υπερπιέσεων πόρων στην εδαφική στρώση

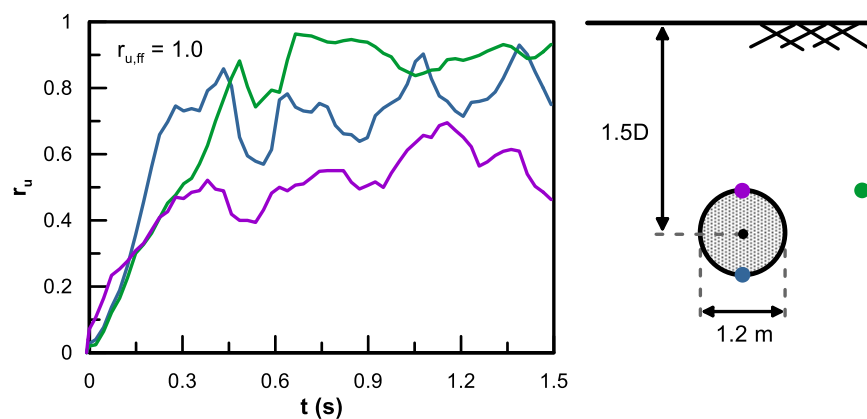
Στο πρώτο στάδιο της αριθμητικής προσομοίωσης του προβλήματος της εγκάρσιας μετατόπισης ενός αγωγού σε έδαφος με υπερπιέσεις πόρων επιβάλλεται κατάλληλη σεισμική διέγερση στη βάση του προσομοιώματος για την επίτευξη της ελάχιστης επιθυμητής τιμής του λόγου $r_{u,ff}$ (0.3, 0.5 ή 1.0), δηλαδή του πεδίου των ενεργών τάσεων στο οποίο επιθυμείται να εξεταστεί η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους. Τα χαρακτηριστικά των διεγέρσεων (a_{max} , T) που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφος 3.4.2). Υπενθυμίζεται ότι οι λόγοι $r_{u,ff}$ σχετίζονται με τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (FS), οι οποίες υπολογίζονται στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφο 3.4.2).

Στο **Σχήμα 4.1** περιλαμβάνονται, για κάθε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$, οι κατανομές του λόγου r_n στην ευρύτερη περιοχή αγωγού διαμέτρου 1.2 m και λόγου εγκιβωτισμού 1.5. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.1γ** δίνονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_n στην περίπτωση της πλήρους ρευστοποίησης του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο, ενώ στα **Σχήματα 4.1α** και **4.1β** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο είναι μερικώς ρευστοποιημένο και το $r_{u,ff}$ ισούται με 0.3 και 0.5, αντίστοιχα. Όλες οι κατανομές αφορούν στη χρονική στιγμή που το τελευταίο σεισμικό κύμα διέρχεται από τη βάση του καννάβου, καθώς έτσι προσεγγίζεται καλύτερα το πρόβλημα της εκδήλωσης μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων ταυτόχρονα με τη σεισμική ρευστοποίηση του εδάφους (βλέπε υπο-παράγραφο 3.4.2 για λεπτομερή περιγραφή της μεθόδου προσέγγισης του προβλήματος και των παραδοχών που έγιναν). Ενδεικτικά, για την περίπτωση της σεισμικής διέγερσης που ρευστοποιεί το ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$) παρουσιάζονται, στο **Σχήμα 4.2**, οι τιμές του λόγου r_n κατά τη διάρκεια και στο τέλος της διέγερσης στα εδαφικά στοιχεία που βρίσκονται στη βάση του αγωγού, στην κορυφή του, αλλά και στο ελεύθερο πεδίο (στο ύψος της κορυφής του αγωγού, ενδεικτικά). Επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη σεισμική διέγερση

αποτελείται από 3 κύριους κύκλους φόρτισης περιόδου (T) 0.30 s, αλλά και από άλλους δύο κύκλους φόρτισης ίδιας διάρκειας, έναν στην αρχή και έναν μετά τον τρίτο κύριο κύκλο δόνησης, για λόγους αριθμητικής ευστάθειας. Δηλαδή, το τελευταίο σεισμικό κύμα διέρχεται από τη βάση του καννάβου όταν $t = 1.5$ s, οπότε και λαμβάνεται το προφίλ του λόγου r_u που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.1γ**.



Σχήμα 4.1. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 1.2$ m εγκιβωτίζεται σε βάθος $H = 1.5 D$ και ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.3, (β) 0.5 και (γ) 1.0.



Σχήμα 4.2. Χρονοϊστορίες του λόγου r_u σε διάφορα σημεία γύρω από τον αγωγό και στο ελεύθερο πεδίο (μακριά από τον αγωγό), κατά τη διάρκεια και μετά το τέλος της σεισμικής διέγερσης που προκαλεί την ανάπτυξη $r_{u,ff} = 1.0$.

Η μελέτη των ισοκαμπυλών του **Σχήματος 4.1** παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η κατανομή των υπερπίεσεων (δεδομένου ότι διατηρούνται σταθερές στη συνέχεια) καθορίζει την αντοχή του εδάφους, και επακόλουθα την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης του ελατηρίου που προσομοιώνει την εδαφική συμπεριφορά κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού. Ξεκινώντας από την κατανομή του λόγου r_u όταν $r_{u,ff} = 1.0$ (**Σχήμα 4.1γ**) για την οποία υπάρχει διαθέσιμη βιβλιογραφία (βλέπε Κεφάλαιο 2, παράγραφο 2.4), παρατηρείται ότι πάνω από τον αγωγό οι τιμές του r_u είναι μικρότερες της μονάδας. Δηλαδή, ο αγωγός αποτρέπει την πλήρη ρευστοποίηση του εδάφους που βρίσκεται πάνω από αυτόν, οπότε το υπερκείμενο έδαφος διατηρεί σημαντικό ποσοστό της αρχικής διατμητικής του αντοχής και δυσστησίας.

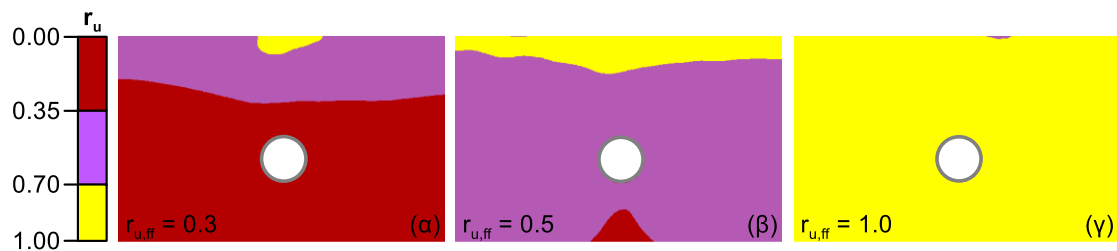
Η προστασία έναντι ρευστοποίησης του εδάφους που υπέρκειται ενός εγκιβωτισμένου αγωγού επιβεβαιώνεται από πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις στη βιβλιογραφία (Chian

et al. 2014, Marinatou et al. 2017, Papadimitriou et al. 2019a), τα αποτελέσματα των οποίων περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 (βλέπε παράγραφο 2.4). Αναλυτικότερα, οι Chian et al. (2014) και οι Papadimitriou et al. (2019a) απέδειξαν ότι η θετική αυτή συνεισφορά του αγωγού στην αντοχή του εδάφους ισχύει σε ρηχό αγωγό ($H/D = 1.5$) διαμέτρου 5 m, ενώ οι Marinatou et al. (2017) επιβεβαίωσαν ότι αντίστοιχη απομείωση των υπερπίεσεων συμβαίνει ακόμα και για αγωγό μικρής διαμέτρου, συγκεκριμένα ίσης με 1.2 m, σε μικρό πάλι βάθος εγκιβωτισμού, $H/D = 1.5$. Οι μειωμένες τιμές του λόγου r_u αποδίδονται σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές τόσο στη διευκόλυνση της στράγγισης λόγω του αδιαπέρατου αγωγού (δεδομένου του μικρού βάθους H) που εμποδίζει την προς τα άνω ροή του νερού, όσο και στη διαστολικότητα του εδάφους στη γειτονιά του αγωγού λόγω έντονης διάτμησης (shear-induced dilation) κατά την ανύψωσή του. Παρά τη σύγκλιση της αριθμητικής ανάλυσης με τη βιβλιογραφία ως προς τις μικρότερες τιμές του λόγου r_u πάνω από τον αγωγό σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο, είναι γεγονός ότι η κατανομή του λόγου r_u που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.1** είναι λιγότερο συμμετρική από εκείνη που προτείνουν οι Papadimitriou et al. (2019a) (βλέπε Σχήμα 2.4). Η ασυμμετρία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η δυναμική ανάλυση σταμάτησε τη στιγμή της διέλευσης του τελευταίου σεισμικού κύματος από τη βάση του προσομοιώματος, δηλαδή δεν επιτράπηκε η μετέπειτα στράγγιση και επακόλουθη εξομάλυνση του πεδίου των υπερπίεσεων πόρων (βλέπε Κεφάλαιο 3, υπο-παράγραφο 3.4.2).

Οι Chian et al. (2014) στην εργασία τους εξετάζουν και την περίπτωση ενός ακόμα πιο ρηχού αγωγού ($H/D = 1.1$). Κατά τη ρευστοποίηση της εδαφικής στρώσης στο ελεύθερο πεδίο, η οποία επιτεύχθηκε με την ίδια ακριβώς σεισμική διέγερση που χρησιμοποιήθηκε και για το βαθύτερο αγωγό με $H/D = 1.5$, οι τιμές του λόγου r_u πάνω από τον αγωγό με $H/D = 1.0$ ήταν μικρότερες των τιμών που αναπτύχθηκαν όταν ο αγωγός τοποθετήθηκε σε βάθος $H = 1.5D$. Επομένως, η προστασία του αγωγού στο υπερκείμενο έδαφος αυξήθηκε με τη μείωση του βάθους H . Η κατάσταση αυτή αποδίδεται πιθανότατα στην ευχερέστερη στράγγιση χάρη στο μικρό μήκος ροής άνωθεν του αγωγού, αλλά και στο μικρό υπερκείμενο βάρος που οδηγεί σε μεγαλύτερη ανύψωση και επακόλουθα σε εντονότερη διάτμηση (και διαστολικότητα) του εδάφους.

Διερεύνηση της επίδρασης της τιμής του λόγου εγκιβωτισμού H/D στις αναπτυσσόμενες υπερπίεσεις στη γειτονιά του αγωγού και τελικά στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης πραγματοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση όπου ο αγωγός διαμέτρου 1.2 m εγκιβωτίζεται ακόμα βαθύτερα, σε βάθος H ίσο με $3D$. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον, αφού η κατασκευή αγωγών με λόγο εγκιβωτισμού H/D μεγαλύτερο του 1.5 αποτελεί συνήθη πρακτική. Οι κατανομές του λόγου r_u στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού με λόγο $H/D = 3.0$, τόσο σε πλήρη όσο και σε μερική ρευστοποίηση του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.3**. Όπως και στο **Σχήμα 4.1**, τα επιμέρους σχήματα (**Σχήματα 4.3α, 4.3β και 4.3γ**) αφορούν κατά σειρά σε λόγο $r_{u,ff}$ ίσο με 0.3, 0.5 και 1.0, ενώ επισημαίνεται ότι για την ανάπτυξη των τιμών αυτών χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες ακριβώς σεισμικές διεγέρσεις με την περίπτωση του

πιο ρηχού αγωγού (βλέπε Κεφάλαιο 3, υπο-παράγραφο 3.4.2).



Σχήμα 4.3. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D=1.2\text{ m}$ εγκιβωτίζεται σε βάθος $H=3D$ και ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.3, (β) 0.5 και (γ) 1.0.

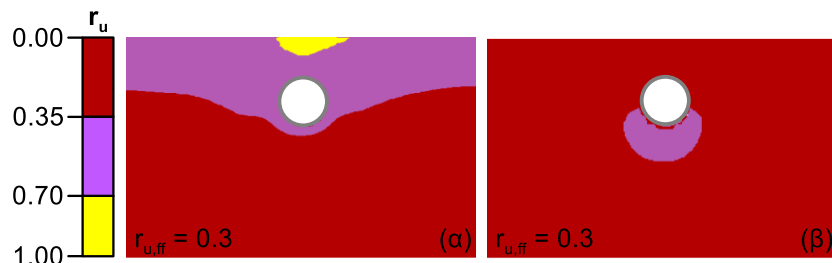
Στο **Σχήμα 4.3γ** που αφορά στην πλήρη ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο, παρατηρείται ότι το έδαφος έχει ρευστοποιηθεί παντού, παρά την παρουσία του αγωγού. Δηλαδή, η παρουσία του αγωγού σε μεγάλο βάθος δεν επηρεάζει την ανάπτυξη των υπερπιέσεων στη γειτονιά του αγωγού και το έδαφος σε κάθε σημείο της εδαφικής στρώσης χάνει πρακτικά την αντοχή του. Βέβαια, εξαιτίας του μεγάλου βάρους του υπερκείμενου εδάφους η ανύψωση του αγωγού κατά τη διάρκεια της ίδιας δόνησης είναι μικρότερη. Συνεπώς, η ελάττωση των υπερπιέσεων άνωθεν του αγωγού αναμένεται μικρή συγκριτικά με εκείνη για τον πιο ρηχό αγωγό ($H/D=1.5$). Συγχρόνως, το μήκος ροής του στραγγιζόμενου νερού αυξάνεται (αν προσεγγιστεί ως η απόσταση της κορυφής του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους) οπότε η αποτόνωση των υπερπιέσεων καθυστερεί. Επισημαίνεται ότι σε περίπτωση τοποθέτησης του αγωγού σε ακόμα μεγαλύτερο βάθος, αναμένεται, επίσης, πλήρης ρευστοποίηση της εδαφικής στρώσης, δεδομένων των όσων αναφέρονται παραπάνω.

Συνοψίζοντας, ο αγωγός επιδρά στην ανάπτυξη των υπερπιέσεων στο υπερκείμενο έδαφος, στην περίπτωση που το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο έχει ρευστοποιηθεί πλήρως ($r_{u,ff}=1.0$), μόνο όταν τοποθετείται σε μικρό βάθος ($H/D=1.5$). Ωστόσο, στην περίπτωση της μερικής ρευστοποίησης του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff}=0.3$ και 0.5), οι κατανομές των υπερπιέσεων πόρων στην εδαφική στρώση σχεδόν δεν επηρεάζονται από την παρουσία του αγωγού, για κάθε τιμή του λόγου H/D που εξετάζεται, όπως γίνεται αντιληπτό από τα **Σχήματα 4.1α, 4.1β, 4.3α και 4.3β**. Στα ίδια σχήματα παρατηρείται ότι στο μερικώς ρευστοποιημένο ελεύθερο πεδίο οι τιμές του λόγου r_u μεταβάλλονται καθ' ύψος. Συγκεκριμένα, ο λόγος r_u στο ελεύθερο πεδίο φθίνει με το βάθος, σε αντίθεση με την περίπτωση της πλήρους ρευστοποίησης όπου το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο παρουσιάζει $r_u=1.0$ σε όλο το πάχος της στρώσης. Μάλιστα, η επιβολή της σεισμικής διέγερσης που οδηγεί σε $r_{u,ff}=0.5$ συνεπάγεται τη ρευστοποίηση του εδάφους που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια.

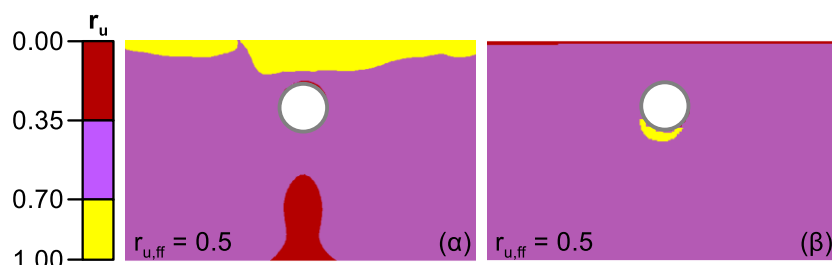
Η Μαρινάτου (2016), κατά την εξέταση της επίδρασης της περιόδου (T) της διέγερσης στην απόκριση του αγωγού υπό την ίδια μέγιστη σεισμική επιτάχυνση και τους ίδιους κύκλους φόρτισης, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι σε δονήσεις μικρής περιόδου (T), οι υπερπιέσεις

των πόρων δεν προλαβαίνουν να αποτονωθούν εξαιτίας της συνεχούς εναλλαγής της φόρτισης του εδάφους. Η παραπάνω διαπίστωση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αν η μερική ρευστοποίηση ($r_{u,ff} = 0.3$ ή 0.5) επιτευχθεί επιβάλλοντας σεισμική διέγερση με περίοδο μεγαλύτερη εκείνης που έχει ήδη εξεταστεί ($T = 0.05$ s), τότε η κατανομή του λόγου r_u στο ελεύθερο πεδίο θα είναι ομαλότερη των αντίστοιχων κατανομών που παρουσιάζονται στα **Σχήματα 4.1** και **4.3** και συγκεκριμένα στα υπο-σχήματα (α) και (β).

Στο πλαίσιο, λοιπόν, της παρούσας εργασίας, εξετάστηκαν δύο επιπλέον διεγέρσεις περιόδου 0.30 s και μέγιστης επιτάχυνσης (α) 0.007 g και (β) 0.02 g, οι οποίες οδηγούν σε λόγο $r_{u,ff} = 0.3$ και 0.5, αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζονται οι κατανομές του λόγου r_u για $r_{u,ff} = 0.3$, για την αρχική και τη νέα σεισμική διέγερση, στην ευρύτερη περιοχή του ρηχού αγωγού ($H/D = 1.5$) διαμέτρου 1.2 m, ενώ στο **Σχήμα 4.5** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κατανομές όταν $r_{u,ff} = 0.5$. Επισημαίνεται ότι ανεξάρτητα από την τιμή της περιόδου (T) οι κατανομές του λόγου r_u αφορούν στο τέλος της εκάστοτε σεισμικής διέγερσης. Στα **Σχήματα 4.4** και **4.5** παρατηρείται ότι για τις νέες διεγέρσεις η κατανομή του λόγου r_u στο ελεύθερο πεδίο είναι ομοιόμορφη, όπως και αναμενόταν, δεδομένης της μεγάλης αύξησης της περιόδου της διέγερσης. Ωστόσο, για το ίδιο $r_{u,ff}$, η μέση τιμή του r_u στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού δε διαφέρει σημαντικά για τις δύο διαφορετικές διεγέρσεις, οπότε η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους αναμένεται να είναι παρόμοια στις περιπτώσεις αυτές, κάτι που αποδεικνύεται στη συνέχεια στην παράγραφο 4.3.

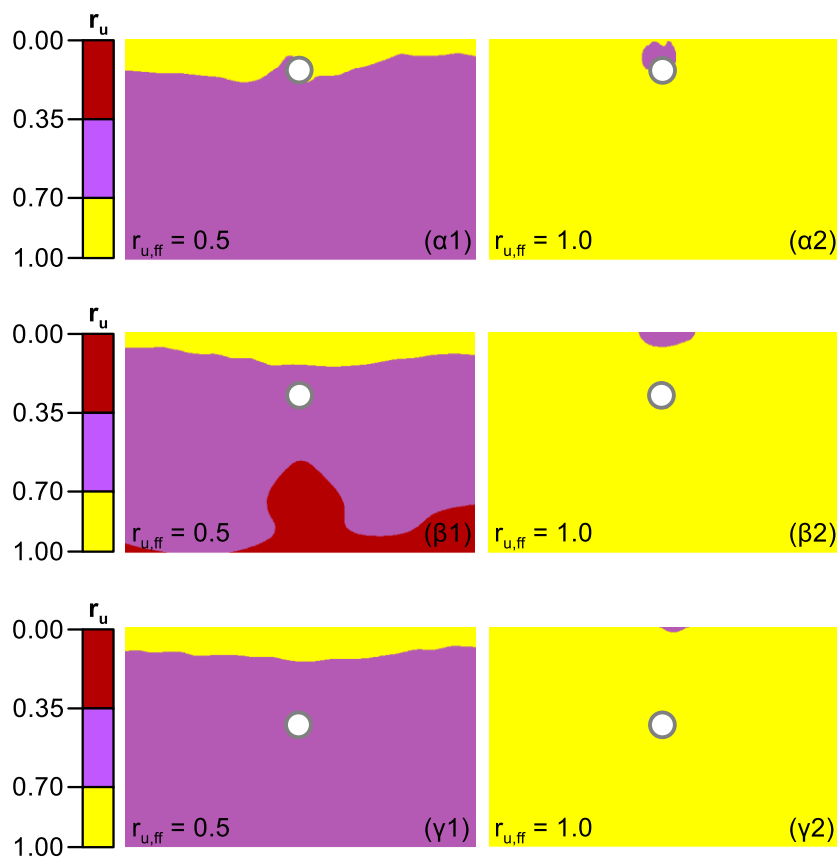


Σχήμα 4.4. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 1.2$ m εγκιβωτίζεται σε βάθος $H = 1.5 D$ και $r_{u,ff} = 0.3$, υπό τη δράση της σεισμικής διέγερσης (α) $a_{max} = 0.05$ g, $T = 0.05$ s και (β) $a_{max} = 0.007$ g, $T = 0.30$ s.



Σχήμα 4.5. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν αγωγός διαμέτρου $D = 1.2$ m εγκιβωτίζεται σε βάθος $H = 1.5 D$ και $r_{u,ff} = 0.5$, υπό τη δράση της σεισμικής διέγερσης (α) $a_{max} = 0.12$ g, $T = 0.05$ s και (β) $a_{max} = 0.02$ g, $T = 0.30$ s.

Πέρα από τη διερεύνηση της επίδρασης του λόγου εγκιβωτισμού στην κατανομή του λόγου r_u στην περίπτωση εγκιβωτισμένου αγωγού διαμέτρου ίσης με 1.2 m, εξετάζεται η επίδραση στο καθεστώς των υπερπιέσεων των πόρων ενός μικρότερου αγωγού διαμέτρου 0.6 m. Μάλιστα, στην περίπτωση του αγωγού αυτού, το πρόβλημα της ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων και της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης του αγωγού εξετάζεται και για ακόμα μεγαλύτερο λόγο εγκιβωτισμού, $H/D = 4.5$ (που είναι αρκετά σπάνιος για αγωγούς μεγαλύτερης διαμέτρου, π.χ. $D = 1.2$ m). Στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται οι κατανομές του λόγου r_u όταν αγωγός διαμέτρου 0.6 m εγκιβωτίζεται σε βάθος H ίσο με $1.5D$, $3D$ και $4.5D$. Επισημαίνεται ότι εξετάζονται μόνο οι περιπτώσεις όπου $r_{u,ff} = 0.5$ και $r_{u,ff} = 1.0$. Παραλείπεται, δηλαδή, η περίπτωση κατά την οποία ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.3, χάριν συντομίας.



Σχήμα 4.6. Ισοκαμπύλες του λόγου r_u στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.5 και 1.0, ενώ ο αγωγός έχει διάμετρο $D=0.6$ m και εγκιβωτίζεται σε βάθος H ίσο με (α) $1.5D$, (β) $3.0D$ και (γ) $4.5D$.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.6**, στην περίπτωση που το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο έχει ρευστοποιηθεί πλήρως, η επίδραση του αγωγού στην ανάπτυξη των υπερπιέσεων στο υπερκείμενο έδαφος φθίνει με την αύξηση του λόγου εγκιβωτισμού H/D , όπως ακριβώς και για το μεγαλύτερο αγωγό (**Σχήμα 4.1γ** και **Σχήμα 4.3γ**). Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, η προαναφερθείσα παρατήρηση ότι αν ο αγωγός διαμέτρου 1.2 m τοποθετηθεί σε βάθος

μεγαλύτερο από $3D$, η εδαφική στρώση θα είναι παντού πλήρως ρευστοποιημένη. Ωστόσο, σε αντίθεση με τον αγωγό διαμέτρου 1.2m και H/D ίσο με 1.5, ο ρηχός μικρός αγωγός ($D = 0.6\text{ m}$, $H/D = 1.5$) επηρεάζει πολύ λιγότερο την κατανομή του λόγου r_u . Αυτό συμβαίνει διότι η μικρότερη διάμετρος παρεμποδίζει σε πολύ μικρότερο βαθμό τη στράγγιση του νερού, ενώ ακόμα ο μικρός αγωγός αναμένεται να ασκεί μικρότερη διάτμηση στο γειτονικό έδαφος και να επηρεάζει μικρότερη εδαφική περιοχή. Κατά συνέπεια, η επίδραση της διαστολικότητας του εδάφους στη γειτονιά ενός αγωγού, λόγω έντονης διάτμησης (shear-induced dilation) κατά την ανύψωσή του, φθίνει με τη μείωση της διαμέτρου του. Τέλος, όσον αφορά στις ισοκαμπύλες r_u όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.5 (Σχήμα 4.6, υπο-σχήματα πρώτης στήλης), παρατηρείται ότι όπως και στην περίπτωση του μεγαλύτερου αγωγού ($D = 1.2\text{ m}$), το προφίλ των υπερπιέσεων πόρων δεν επηρεάζεται πρακτικά από την παρουσία του αγωγού.

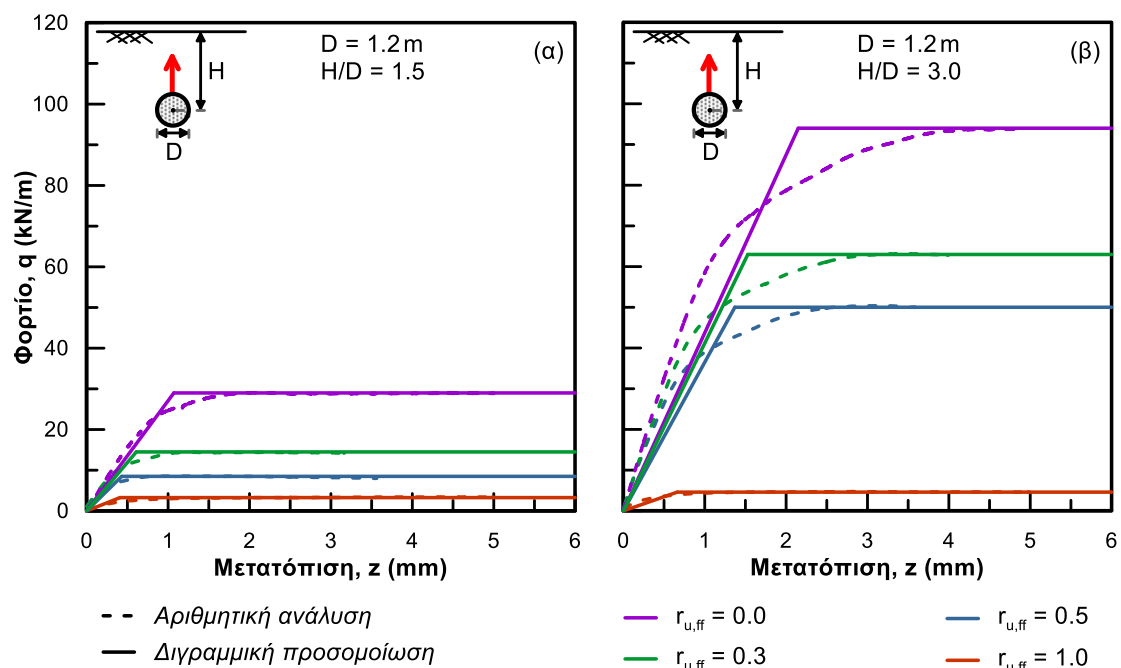
4.3 Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης (σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, υπο-παράγραφο 3.4.3) των διαφορετικών αγωγών για τους οποίους μελετώνται, στην προηγούμενη παράγραφο, οι κατανομές του λόγου r_u . Οι κατανομές, δηλαδή, r_u που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1, 4.3 και 4.6 αποτελούν μόνιμα πεδία υπερπιέσεων πόρων εντός των οποίων μετατοπίζονται οι αγωγοί για την εξαγωγή των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης. Οι εν λόγω καμπύλες φορτίου - μετατόπισης $q - \xi$ για έδαφος με υπερπιέσεις πόρων συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες για έδαφος πλήρως στραγγιζόμενο (βλέπε Κεφάλαιο 3) οδηγώντας σε εκτίμηση μειωτικών συντελεστών των δευτέρων.

Έτσι, στα Σχήματα 4.7α και 4.7β που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - \xi$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων που προσομοιώνουν την εδαφική συμπεριφορά εδάφους με $r_{u,ff} = 0.3, 0.5$ και 1.0, όταν ο υπόγειος αγωγός έχει διάμετρο 1.2 m και λόγο εγριβωτισμού 1.5 και 3, αντίστοιχα. Στα σχήματα αυτά, περιλαμβάνονται, επιπλέον, οι καμπύλες $q - \xi$ που αντιστοιχούν σε κορεσμένο, με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$), οι οποίες μελετώνται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφο 3.5.1). Όλες οι καμπύλες $q - \xi$ παρουσιάζονται τόσο σε υπερβολική μορφή, όπως δηλαδή προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις, όσο και σε δι-γραμμική, καθώς η περιγραφή της εδαφικής συμπεριφοράς μέσω ισοδύναμων ελαστοπλαστικών καμπυλών φορτίου - μετατόπισης αποτελεί συνήθη πρακτική για το σχεδιασμό των εγριβωτισμένων αγωγών.

Στο Σχήμα 4.7α, το οποίο αφορά σε αγωγό διαμέτρου $D = 1.2\text{ m}$ με λόγο εγριβωτισμού $H/D = 1.5$, παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής του $r_{u,ff}$, και επομένως η μείωση του FS , συνεπάγεται τη μείωση της τιμής του οριακού φορτίου (q_{ult}), της οριακής μετατόπισης ($\xi_{ult,b}$) και της ελαστικής στιβαρότητας (K). Υπενθυμίζεται ότι η οριακή μετατόπιση $\xi_{ult,b}$, όπου ο δείκτης b αναφέρεται στις δι-γραμμικές καμπύλες (bilinear curves), ισούται με την τιμή της

μετατόπισης του αγωγού για την οποία το έδαφος εισέρχεται στην πλαστική περιοχή, θεωρώντας ότι το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστο-πλαστικά (πιο επακριβώς ελαστικά απολύτως πλαστικά). Αυτή η μείωση των παραπάνω μεγεθών δικαιολογείται από τα προφίλ των r_u που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.1**, στα οποία παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερος ο λόγος $r_{u,ff}$ τόσο μεγαλύτερη η μέση τιμή του r_u στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού και επομένως εντονότερη η μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αντίστοιχη μείωση του οριακού φορτίου και της οριακής μετατόπισης με την αύξηση του λόγου $r_{u,ff}$ παρατηρείται και για το βαθύ αγωγό (**Σχήμα 4.7β**), καθώς σύμφωνα με το **Σχήμα 4.3**, οι τιμές του λόγου r_u στη γειτονιά του αγωγού αυξάνονται με την αύξηση του $r_{u,ff}$ και για αυτό το βάθος εγκιβωτισμού ($H/D=3$).



Σχήμα 4.7. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων από τις αναλύσεις και τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 1.2$ m όταν (α) $H/D = 1.5$ και (β) $H/D = 3$, για διάφορες τιμές του $r_{u,ff}$ (0.0, 0.3, 0.5 και 1.0).

Όσον αφορά στην επίδραση του βάθους εγκιβωτισμού, όταν το έδαφος είναι πλήρως στραγγιζόμενο, οι διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού προβλέπουν ότι η τοποθέτηση ενός αγωγού διαμέτρου D σε μεγαλύτερο βάθος συνεπάγεται την αύξηση της οριακής αντοχής, της οριακής μετατόπισης αλλά και της ελαστικής στιβαρότητας της καμπύλης $q - z$ (βλέπε Κεφάλαιο 2, υπο-παράγραφο 2.2.1). Η αύξηση αυτή στις τιμές των παραμέτρων των ελαστο-πλαστικών καμπυλών επαληθεύεται μέσω αριθμητικών αναλύσεων στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφο 3.5.1).

Η ίδια αύξηση του φορτίου με την αύξηση του λόγου H/D (για την ίδια τιμή της διαμέτρου) παρατηρείται και σε έδαφος μερικώς ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο (με

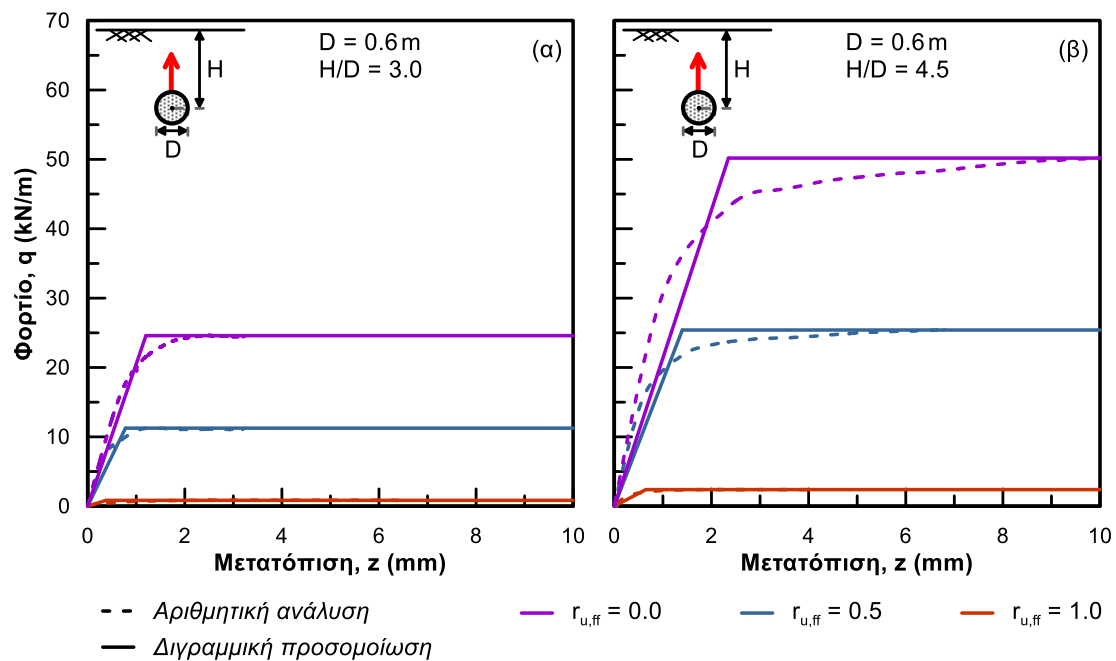
λόγο r_{eff} 0.3 και 0.5). Στα **Σχήματα 4.1** και **4.3** παρατηρήθηκε ότι τα προφίλ του λόγου r_u όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο είναι μερικώς ρευστοποιημένο, είναι πρακτικώς ανεξάρτητα του βάθους εγριβωτισμού H/D του αγωγού. Δηλαδή, η καθ' ύψος κατανομή του λόγου r_u , επομένως και της διατμητικής αντοχής του εδάφους, είναι ίδια σε όλο το πλάτος της εδαφικής στρώσης για κάθε βάθος εγριβωτισμού. Κατά συνέπεια, όταν ο αγωγός εγριβωτίζεται σε μεγαλύτερο βάθος πέραν του υπερκείμενου βάρους αυξάνει και η τιμή της διατμητικής δύναμης που αντιστέκεται αφού, όπως αποδεικνύεται από το **Σχήμα 4.14** και το **Σχήμα 4.15** της επόμενης παραγράφου, αυξάνεται το μήκος της επιφάνειας αστοχίας.

Όταν, ωστόσο, το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο έχει ρευστοποιηθεί πλήρως, οι τιμές του οριακού φορτίου για τα δύο βάθη εγριβωτισμού σχεδόν ταυτίζονται. Στα **Σχήματα 4.1γ** και **4.3γ**, στα οποία παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου r_u στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο έχει ρευστοποιηθεί πλήρως ($r_{eff} = 1.0$), παρατηρείται ότι το υπερκείμενο έδαφος «προστατεύεται» έναντι ρευστοποίησης μόνο όταν ο αγωγός εγριβωτίζεται σε μικρό βάθος ($H/D = 1.5$). Δηλαδή, σε περίπτωση τοποθέτησης του αγωγού σε μεγαλύτερο βάθος ($H/D = 3$), η διατμητική αντοχή του γειτονικού εδάφους πρακτικά μηδενίζεται. Το μεγάλο, όμως, υπερκείμενο βάρος οδηγεί τελικά σε τιμή του οριακού φορτίου παρόμοια με εκείνη που αντιστοιχεί στο ρηχό αγωγό. Επισημαίνεται ότι η παραπάνω σύγκριση της διατμητικής αντοχής και του υπερκείμενου βάρους για τις δύο τιμές του λόγου H/D είναι εφικτή διότι και για τα δύο βάθη εγριβωτισμού το έδαφος παραμορφώνεται με τον ίδιο τρόπο κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση των αγωγών, όπως παρατηρείται παρακάτω στα **Σχήματα 4.14γ** και **4.15γ**.

Εκτός των αγωγών διαμέτρου 1.2 m, μελετήθηκαν και αγωγοί με μικρότερη διάμετρο $D = 0.6$ m, για τη διερεύνηση της επίδρασης της διαμέτρου στις τιμές των μειωτικών συντελεστών. Οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων σε έδαφος με $r_{eff} = 0.5$ και 1.0, οι οποίες αφορούν σε αγωγούς διαμέτρου 0.6 m με λόγο εγριβωτισμού 3.0 και 4.5 παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.8**. Στα διαγράμματα αυτά περιλαμβάνονται, επίσης, οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος ($r_{eff} = 0.0$) και οι οποίες αποτελούν τις «καμπύλες αναφοράς». Αντίστοιχα με το **Σχήμα 4.7**, οι καμπύλες $q - \xi$ του **Σχήματος 4.8** περιλαμβάνονται τόσο σε υπερβολική μορφή (όπως προκύπτουν επακριβώς από τις αριθμητικές αναλύσεις), όσο και σε ισοδύναμη δι-γραμμική μορφή (όπως χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό αγωγών). Επισημαίνεται ότι στο **Σχήμα 4.8** παραλείπονται οι καμπύλες $q - \xi$ που αφορούν σε λόγο εγριβωτισμού, $H/D = 1.5$, καθώς το βάθος αυτό αντιστοιχεί σε πολύ μικρό πάχος υπερκείμενης στρώσης (μόλις 60 cm), το οποίο αποφεύγεται στην πράξη χάριν προστασίας των αγωγών. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ακόμη πιο μεγάλο αν αναμένεται ρευστοποίηση του εδάφους, καθώς τότε η αναμενόμενη ανύψωση μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε επίπλευση του αγωγού.

Παρατηρώντας το **Σχήμα 4.8** προκύπτει ότι και για τα δύο βάθη εγριβωτισμού, η αύξηση του λόγου r_{eff} συνεπάγεται τη μείωση του οριακού φορτίου, της οριακής μετατόπισης αλλά και της ελαστικής στιβαρότητας, όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του

αγωγού διαμέτρου 1.2 m. Επιπλέον, για κάθε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$, η αύξηση του βάθους εγκιβωτισμού συνεπάγεται την αύξηση του οριακού φορτίου, της οριακής μετατόπισης και ελαστικής στιβαρότητας. Η αυξητική αυτή τάση του οριακού φορτίου με την αύξηση του λόγου H/D οφείλεται στο γεγονός ότι τα προφίλ του λόγου r_u παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις για διαφορετικές τιμές του λόγου H/D . Πιο συγκεκριμένα, ο ρηχός αγωγός προσφέρει αρκετά μικρή προστασία στο υπερκείμενο έδαφος όταν ο λόγος $r_{u,ff} = 1.0$ και μάλιστα σε μικρή περιοχή. Ωστόσο, όταν ο αγωγός τοποθετείται σε μεγαλύτερο βάθος, η αύξηση του μήκους των επιφανειών διάτμησης και του υπερκείμενου βάρους, υπερνικούν την όποια προστασία προσφέρει ο ρηχός αγωγός, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το οριακό φορτίο. Υπογραμμίζεται ότι και σε αυτή την περίπτωση αγωγών η σύγκριση των τιμών του οριακού φορτίου για συγκεκριμένη τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ και διαφορετικά H/D είναι εφικτή, δεδομένου ότι οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης είναι ίδιοι για την ίδια τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ (βλέπε **Σχήματα 4.16** και **4.17** παρακάτω).



Σχήμα 4.8. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων από τις αναλύσεις και τη δι- γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m όταν (α) $H/D = 3.0$ και (β) $H/D = 4.5$, για διάφορες τιμές του $r_{u,ff}$ (0.0, 0.5 και 1.0).

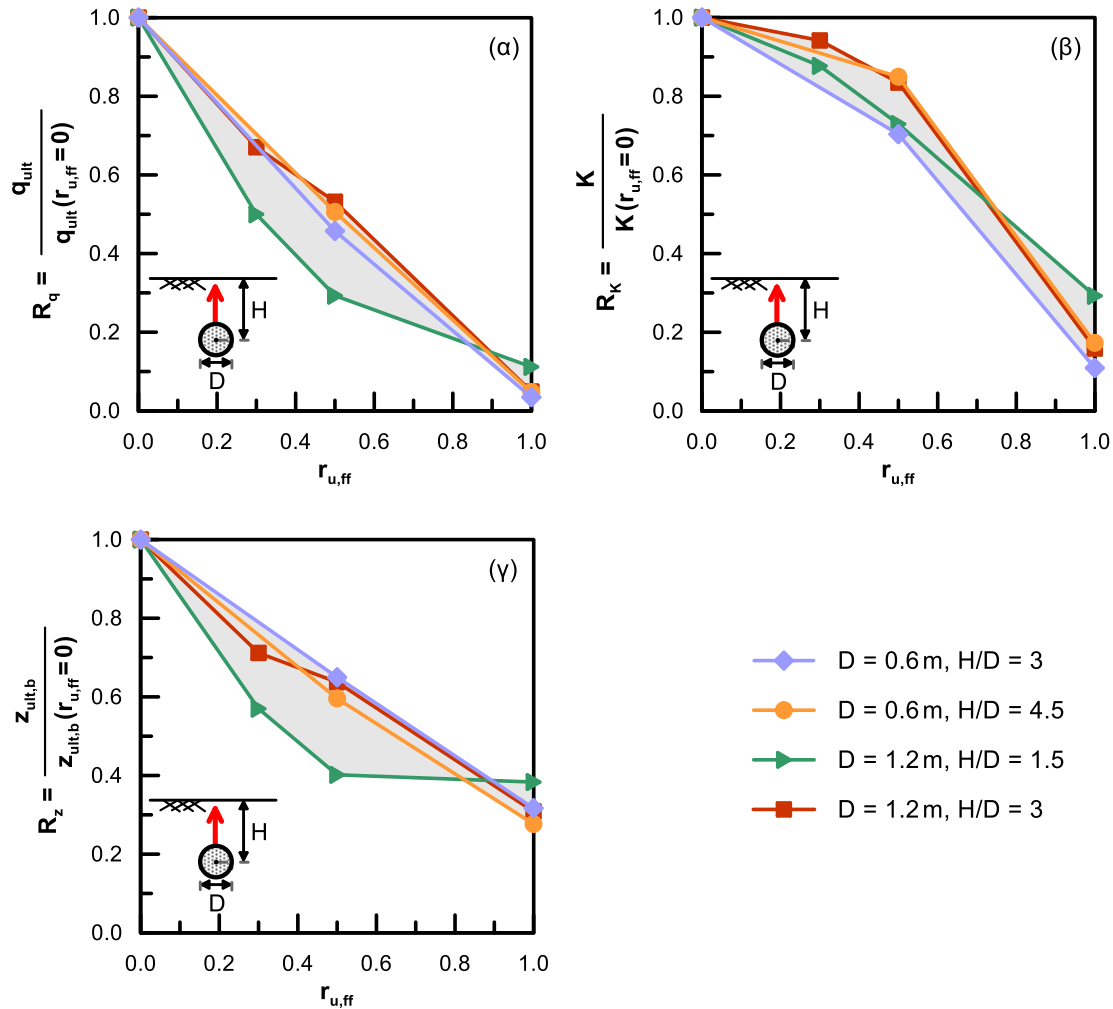
Για κάθε αγωγό που εξετάζεται παραπάνω, οι τιμές των παραμέτρων των καμπυλών $q - z$ (οριακό φορτίο, οριακή μετατόπιση, ελαστική στιβαρότητα) για μερικώς και πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} > 0.0$), διαιρούνται με τις αντίστοιχες τιμές σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$), οπότε υπολογίζονται οι μειωτικοί συντελεστές. Στο **Σχήμα 4.9** που ακολουθεί, συγκεντρώνονται, για κάθε παράμετρο των δι- γραμμικών ελαστο-πλαστικών καμπυλών, οι μειωτικοί συντελεστές (R_q , R_K και R_z) που αφορούν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών και στις τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ (ή

ισοδύναμα στο συντελεστή ασφαλείας FS) που εξετάζονται. Και εδώ παραλείπονται τα μεγέθη για το μικρό αγωγό ($D = 0.6$ m) με λόγο H/D ίσο με 1.5, αφού η εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπισή του δεν εξετάστηκε για τους λόγους που αναφέρονται παραπάνω. Από την παρατήρηση και των τριών υπο-σχημάτων που περιλαμβάνονται στο **Σχήμα 4.9** γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση του λόγου $r_{u,ff}$ συνεπάγεται τη μείωση και των τριών μεγεθών των ελαστο-πλαστικών καμπυλών $q - \xi$, δηλαδή του οριακού φορτίου, της οριακής μετατόπισης και της ελαστικής στιβαρότητας, όπως έχει ήδη διαπιστωθεί από την παρατήρηση των καμπυλών (**Σχήμα 4.7** και **Σχήμα 4.8**).

Αναλυτικότερα, όσον αφορά στο οριακό φορτίο (**Σχήμα 4.9α**), παρατηρείται ότι οι μειωτικοί συντελεστές, οι οποίοι προκύπτουν για $r_{u,ff}$ ίσο με 0.5 και 1.0, πρακτικά ταυτίζονται για όλους τους συνδυασμούς διαμέτρου D και λόγου H/D που εξετάζονται, με εξαίρεση την περίπτωση του ρηχού αγωγού ($H/D = 1.5$) διαμέτρου 1.2 m. Συγκεκριμένα, όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.5 και 1.0 ο μειωτικός συντελεστής του οριακού φορτίου ισούται με 46-53% και 3.5-5%, αντίστοιχα, για όλους τους αγωγούς που εξετάστηκαν εκτός από το ρηχό αγωγό ($H/D = 1.5$) διαμέτρου 1.2 m. Ωστόσο, στην περίπτωση του αγωγού με $D = 1.2$ m και $H/D = 1.5$, ο μειωτικός συντελεστής λαμβάνει τιμή ίση με 29% και 11% όταν $r_{u,ff} = 0.5$ και 1.0, αντίστοιχα. Η συγκριτικά μικρότερη μείωση του οριακού φορτίου όταν $r_{u,ff} = 1.0$ για αυτόν τον αγωγό οφείλεται προφανώς στις μειωμένες τιμές του λόγου r_u που αναπτύσσονται στο υπερκείμενο έδαφος (βλέπε **Σχήμα 4.1γ**). Αντίθετα, όταν στο έδαφος έχει αναπτυχθεί τιμή $r_{u,ff}$ ίση με 0.5, παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση του οριακού φορτίου, η οποία πιθανότατα οφείλεται στο στρωματωμένο προφίλ του λόγου r_u και στο μικρό βάθος εγκιβωτισμού H του αγωγού, με αποτέλεσμα ο αγωγός να βρίσκεται εντός της περιοχής με τις υψηλότερες υπερπίεσεις πόρων (βλέπε **Σχήμα 4.1β**). Επομένως, όταν το ελεύθερο πεδίο ρευστοποιείται πλήρως, η πρόταση των O'Rourke and Liu (2012) για μειωτικό συντελεστή του οριακού φορτίου ίσο με 3% αποτελεί ρεαλιστική τιμή κάτω ορίου για όλες τις περιπτώσεις αγωγών, εκτός από το μεγάλο, ρηχό αγωγό ($D = 1.2$ m, $H/D = 1.5$) για τον οποίο το οριακό φορτίο παρουσιάζει σαφώς μικρότερη απομείωση. Πρακτικώς αυτό σημαίνει ότι η πρόταση των O'Rourke and Liu (2012) για το οριακό φορτίο δεν είναι συντηρητική, αλλά η διαφορά δεν είναι μεγάλη.

Σχετικά με την περίπτωση όπου $r_{u,ff} = 0.3$, η οποία εξετάζεται μόνο για τον αγωγό διαμέτρου 1.2 m, παρατηρείται ότι για κάθε παράμετρο της καμπύλης φορτίου - μετατόπισης (οριακό φορτίο, ελαστική δυσκαμψία, οριακή μετατόπιση) ο μειωτικός συντελεστής που προκύπτει πρακτικά ανήκει στην ευθεία που ορίζουν οι αντίστοιχοι μειωτικοί συντελεστές για $r_{u,ff} = 0.0$ και 0.5. Καθώς λοιπόν οι τιμές των ποσοστών απομείωσης είναι πρακτικά ίδιες για το μικρό αγωγό ($D = 0.6$ m, $H/D = 3.0$ και 4.5) και το μεγαλύτερο βαθύ αγωγό ($D = 1.2$ m, $H/D = 3$) όταν $r_{u,ff} = 0.5$ και 1.0, συμπεραίνεται ότι η ταύτιση αυτή επεκτείνεται και στην περίπτωση όπου $r_{u,ff} = 0.3$, για την οποία ο μειωτικός συντελεστής προκύπτει ίσος με 70%. Για τον αγωγό με $D = 1.2$ m και $H/D = 1.5$ ο συντελεστής αυτός ισούται με 50%. Παρατηρείται ότι στο ρηχό αγωγό αντιστοιχεί μικρότερη τιμή του μειωτικού συντελεστή του φορτίου σε σχέση με το βαθύ, 50%, κάτι που οφείλεται στις αυξημένες τιμές του λόγου r_u στα

μικρότερα βάρη σε συνδυασμό με το μικρό βάθος εγριβωτισμού του αγωγού, αντίστοιχα με την περίπτωση κατά την οποία ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.5 και η οποία περιγράφεται παραπάνω.



Σχήμα 4.9. Συντελεστές απομείωσης συναρτήσει του $r_{u,ff}$ (α) του οριακού φορτίου, (β) της ελαστικής στιβαρότητας και (γ) της οριακής μετατόπισης των ελαστο-πλαστικών (δι-γραμμικών) καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων.

Ταύτιση στους μειωτικούς συντελεστές για κάθε τιμή του $r_{u,ff}$ (θεωρώντας ξανά σχεδόν αναλογική συσχέτιση του συντελεστή απομείωσης και του $r_{u,ff}$) παρατηρείται και για την οριακή μετατόπιση ($z_{ult,b}$) για όλους τους αγωγούς που εξετάστηκαν εκτός του αγωγού με $D = 1.2\text{ m}$ και $H/D = 1.5$. Η διαφοροποίηση των τιμών για αυτόν τον αγωγό πιθανότατα οφείλεται, και σε αυτήν την περίπτωση, στις κατανομές του λόγου r_n , όπως περιγράφεται αναλυτικά παραπάνω. Οι μειωτικοί συντελεστές που αφορούν σε αυτόν, όταν ο λόγος $r_{u,ff} = 0.3, 0.5$ και 1.0 , είναι ίσοι με 60%, 40% και 38%, αντίστοιχα. Για τους υπόλοιπους αγωγούς οι συντελεστές αυτοί λαμβάνουν τιμές 70%, 60-65% και 28-32%, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση της ελαστικής στιβαρότητας (Σχήμα 4.9β), οι μειωτικοί συντελεστές κυμαίνονται σε μεγαλύτερο εύρος για τα διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των

αγωγών, για κάθε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$. Όπως και για τα υπόλοιπα μεγέθη της καμπύλης $q - \xi$ όταν το ελεύθερο πεδίο είναι πλήρως ρευστοποιημένο ($r_{u,ff} = 1.0$), ο αγωγός διαμέτρου 1.2m και λόγου εγκιβωτισμού 1.5 παρουσιάζει τη μικρότερη ποσοστιαία μείωση, δηλαδή ο μειωτικός συντελεστής λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή, ίση με 30%. Ωστόσο, οι τιμές του μειωτικού συντελεστή της στιβαρότητας για τον αγωγό αυτό, όταν το $r_{u,ff}$ ισούται με 0.3 και 0.5, είναι 90% και 70%, αντίστοιχα. Οι μειωτικοί συντελεστές της ελαστικής στιβαρότητας για τους υπόλοιπους αγωγούς όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.3, 0.5 και 1.0 λαμβάνουν τιμές 82-94%, 70-85% και 11-17%, αντίστοιχα (θεωρήθηκε γραμμική μείωση του μειωτικού συντελεστή με την αύξηση του $r_{u,ff}$ για τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ μεταξύ 0.0 και 0.5).

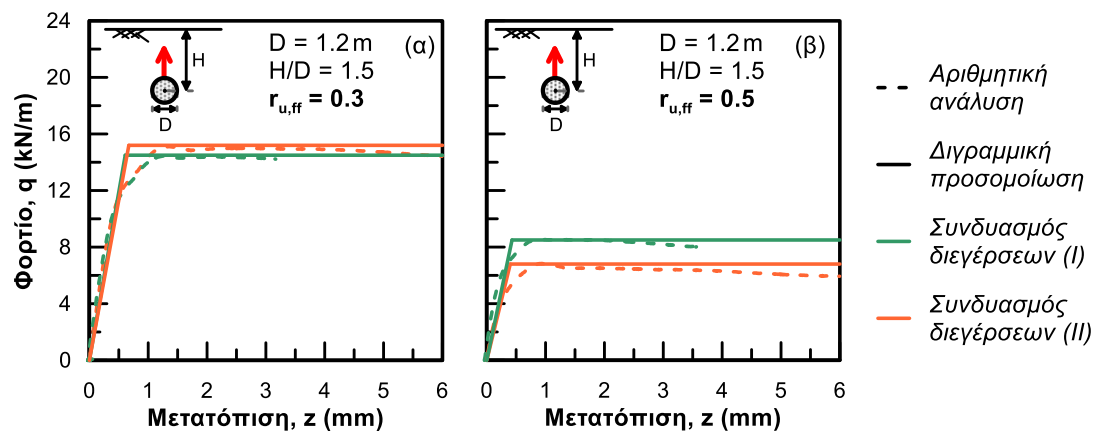
Συγκρίνοντας τις τιμές του μειωτικού συντελεστή της ελαστικής στιβαρότητας, για κάθε αγωγό και τιμή του λόγου $r_{u,ff}$, με τις αντίστοιχες τιμές των μειωτικών συντελεστών του οριακού φορτίου, συμπεραίνεται ότι οι τιμές των συντελεστών αυτών απέχουν σημαντικά μεταξύ τους, όπως άλλωστε προκύπτει από το γεγονός ότι η οριακή μετατόπιση δε διατηρείται σταθερή (**Σχήμα 4.9**). Κατά συνέπεια, η απομείωση των μεγεθών του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας θα πρέπει να γίνεται εφαρμόζοντας όχι έναν ενιαίο μειωτικό συντελεστή, όπως προτείνουν οι O'Rourke and Liu (2012), αλλά διαφορετικούς, έναν για το οριακό φορτίο και έναν για την οριακή μετατόπιση (ή την ελαστική στιβαρότητα).

4.4 Ευαισθησία καμπυλών φορτίου - μετατόπισης

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για υπόγειο αγωγό σε έδαφος με υπερπίεσεις πόρων και προέκυψαν μειωτικοί συντελεστές για το οριακό φορτίο και την οριακή μετατόπιση (ή την ελαστική στιβαρότητα) ως συνάρτηση του $r_{u,ff}$, δηλαδή τη μέση τιμή του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u στο ελεύθερο πεδίο (μακριά από τον αγωγό). Από τα διαγράμματα αυτά συμπεραίνεται ότι τα χαρακτηριστικά του αγωγού (διάμετρος D και λόγος εγκιβωτισμού H/D) αποτελούν λιγότερο σημαντικές παραμέτρους του προβλήματος συγκριτικά με την τιμή του λόγου $r_{u,ff}$.

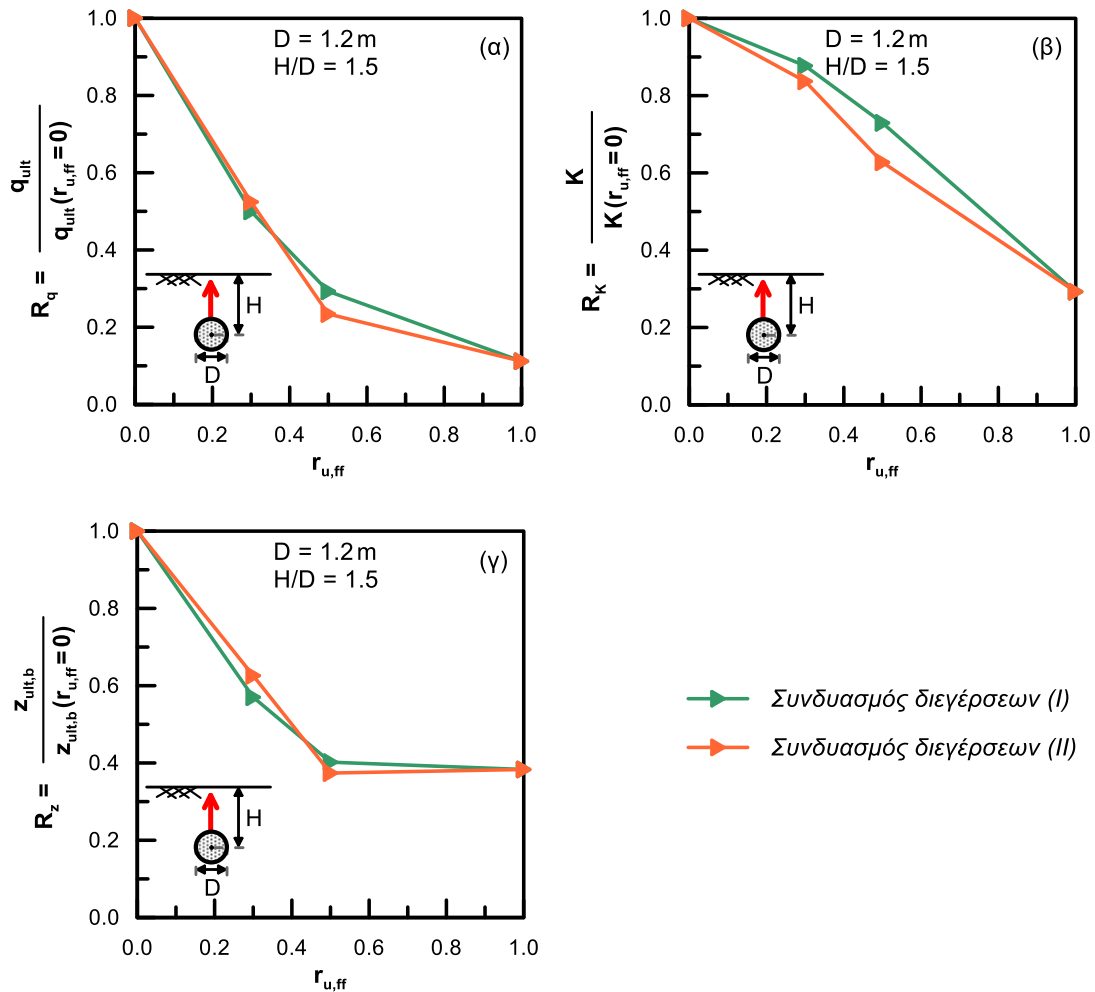
Εδώ, διερευνάται η ευαισθησία των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης για έδαφος με υπερπίεσεις πόρων (και των μειωτικών συντελεστών των καμπυλών που προκύπτουν), αρχικώς ως προς τη σεισμική διέγερση που προκαλεί τις υπερπίεσεις πόρων και την ελάχιστη τιμή $r_{u,ff}$. Συγκεκριμένα, στην παράγραφο 4.2 και ειδικά στα **Σχήματα 4.4** και **4.5** παρουσιάζονται για κάθε (ενδιάμεση) τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ ($= 0.3$ και 0.5) δύο διαφορετικές κατανομές του λόγου r_u στην εδαφική στρώση, οι οποίες οφείλονται στη δράση διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων (βλέπε παράγραφο 4.2 για αναλυτική περιγραφή των διεγέρσεων). Υπενθυμίζεται ότι αυτά τα προφίλ του λόγου r_u αφορούν σε αγωγό διαμέτρου 1.2m και λόγο εγκιβωτισμού 1.5, ενδεικτικά. Οι νέες αυτές διεγέρσεις που εξετάζονται για την κατάσταση της μερικής ρευστοποίησης ($r_{u,ff}=0.3$ και 0.5) σε συνδυασμό με τη μοναδική σεισμική διέγερση που εξετάζεται στο πλαίσιο της εργασίας για $r_{u,ff} = 1.0$ ορίζονται ως «*Συνδυασμός διεγέρσεων (II)*», ενώ οι διεγέρσεις που εξετάστηκαν αρχικώς για τη μερική ρευστοποίηση μαζί με εκείνη για $r_{u,ff} = 1.0$ ορίζονται ως «*Συνδυασμός διεγέρσεων (I)*». Πιο

συγκεκριμένα, ο «Συνδυασμός διεγέρσεων (II)» περιλαμβάνει διεγέρσεις 3 κύριων κύκλων φόρτισης με $T=0.30$ s και $a_{max}=0.007$ g και 0.02 g, για $r_{u,ff}=0.3$ και 0.5, αντίστοιχα, ενώ ο «Συνδυασμός διεγέρσεων (I)» περιλαμβάνει διεγέρσεις 3 κύριων κύκλων φόρτισης με $T=0.05$ s και $a_{max}=0.05$ g και 0.12 g, για $r_{u,ff}=0.3$ και 0.5, αντίστοιχα. Τα νέα προφίλ του λόγου r_u των Σχημάτων 4.4 και 4.5 χρησιμοποιούνται και αυτά ως αρχικές συνθήκες για την εγκάρσια κατακόρυφη μετατόπιση των αγωγών. Έτσι, προκύπτουν οι καμπύλες $q - z$, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10. Επίσης, υπολογίζονται οι μειωτικοί συντελεστές των μεγεθών τους, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.11, μαζί με τους μειωτικούς συντελεστές για το «Συνδυασμό διεγέρσεων (I)», οι οποίοι έχουν ήδη παρουσιαστεί στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.10. Ελαστο-πλαστικές (δι-γραμμικές) καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($q - z$) των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού με $D=1.2$ m και $H/D=1.5$, για (α) $r_{u,ff}=0.3$ και (β) $r_{u,ff}=0.5$ και τους συνδυασμούς διεγέρσεων (I) και (II).

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.11 γίνεται αντιληπτό ότι οι μειωτικοί συντελεστές δε διαφέρουν σημαντικά για τους δύο συνδυασμούς δράσεων, αν η τιμή του $r_{u,ff}$ είναι ίδια. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι το $r_{u,ff}$ (ή ισοδύναμα ο συντελεστής ασφαλείας FS) αντικατοπτρίζει τη μέση τιμή του r_u στην εδαφική περιοχή που βρίσκεται κοντά στον αγωγό, μια τιμή που αντιστοιχεί στη μέση διατμητική αντοχή και δυστημψία του εδάφους, πρακτικώς ανεξαρτήτως από τη διέγερση που χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί το προφίλ r_u . Συνεπώς, τα αποτελέσματα του Σχήματος 4.9 θεωρούνται ορθά, ανεξαρτήτως διέγερσης που δημιουργεί την ελάχιστη τιμή του $r_{u,ff}$.



Σχήμα 4.11. Επίδραση των προφίλ του λόγου r_u στους συντελεστές απομείωσης συναρτήσει του $r_{u,ff}$ (α) του οριακού φορτίου, (β) της ελαστικής στιβαρότητας και (γ) της οριακής μετατόπισης των ελαστο-πλαστικών (δι-γραμμικών) καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων, ενδεικτικά για τον αγωγό με $D=1.2\text{ m}$ και $H/D=1.5$.

Στη συνέχεια, διερευνάται η ευαισθησία των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης αγωγού (και των μειωτικών συντελεστών αυτών) για έδαφος με υπερπίεσεις πόρων στη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND που χρησιμοποιείται. Αφορμή για αυτή τη διερεύνηση είναι η παρατήρηση του Κεφαλαίου 3 ότι οι καμπύλες $q - z$ που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση για έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων προβλέπουν μεν ικανοποιητικά το οριακό φορτίο, αλλά υποεκτιμούν την οριακή μετατόπιση σε σχέση με τις τιμές που προτείνουν οι διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού. Δηλαδή η αριθμητική προσομοίωση προβλέπει στιβαρότερη εδαφική συμπεριφορά σε σχέση με τις οδηγίες σχεδιασμού, αλλά ορθό μέγιστο φορτίο. Η αυξημένη αυτή στιβαρότητα αποδίδεται στη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010), η οποία βασίζεται σε πειραματικές δοκιμές σε λεπτή άμμο Nevada (βλέπε Κεφάλαιο 3, υπο-παράγραφος 3.2.2). Η άμμος αυτή χαρακτηρίζεται από έντονη διαστολικότητα, δηλαδή δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως αντιπροσωπευτική μιας τυπικής άμμου και για την οποία

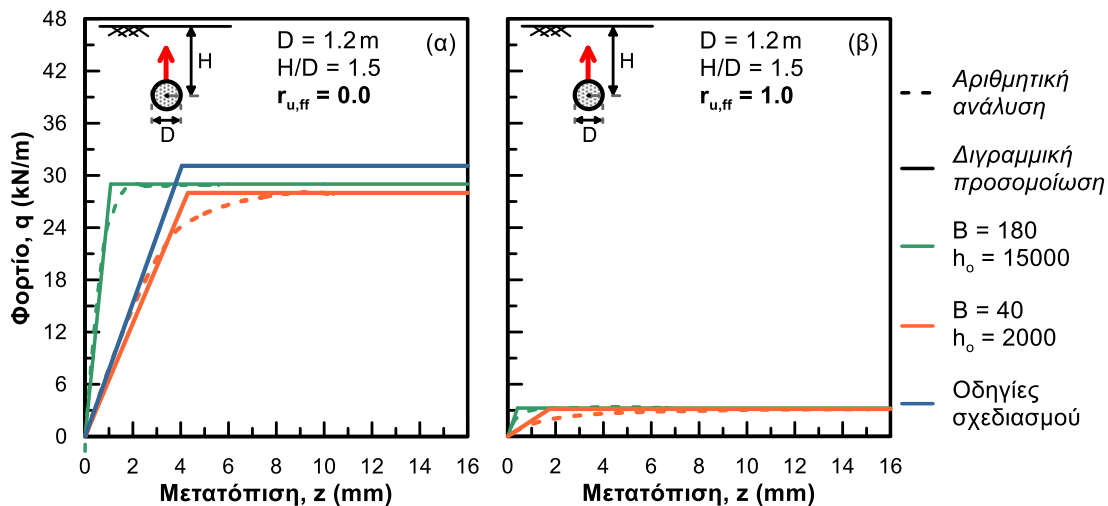
αντιστοιχούν (θεωρητικά) οι οδηγίες σχεδιασμού. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιείται εδώ καθώς: α) πολλές δημοσιεύσεις διεθνώς στηρίζονται στην απόκριση αυτής της άμμου, β) το NTUA-SAND βαθμονομημένο στην άμμο Nevada έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές επιτυχώς για τη μελέτη προβλημάτων συνοριακών τιμών σε καθεστώς ρευστοποίησης, όπως και το παρόν πρόβλημα, και γ) η εν λόγω αυξημένη στιβαρότητα οδηγεί σε μειωμένο υπολογιστικό κόστος, καθώς το οριακό φορτίο επιτυγχάνεται για μικρότερη επιβαλλόμενη μετατόπιση.

Σε κάθε περίπτωση, η όποια απόκλιση δεν θεωρείται σημαντική για πολλούς λόγους. Αρχικώς επειδή το ίδιο το οριακό φορτίο προβλέπεται ικανοποιητικά. Αφετέρου γιατί οι οριακές μετακινήσεις κάποιων mm που χρειάζονται για να επιτευχθεί το οριακό φορτίο προκύπτουν πολύ εύκολα σε προβλήματα ρευστοποίησης, ειδικά οριζόντιας εξάπλωσης. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικώς το περιβάλλον ρευστοποιημένο έδαφος φορτίζει τον αγωγό με το οριακό φορτίο (που προβλέπεται σωστά), και όχι ένα ποσοστό του λόγω μικρότερης της οριακής μετακίνησης. Παρόλα αυτά, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση της ευαισθησίας των καμπυλών $q - \xi$ αλλά κυρίως των μειωτικών συντελεστών λόγω αυτής της απόκλισης, και αυτό είναι το αντικείμενο της υπόλοιπης παραγράφου. Υπογραμμίζεται ότι καθώς στις αριθμητικές αναλύσεις τόσο σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος (Κεφάλαιο 3) όσο και σε έδαφος με υπερπίεσεις πόρων (παρόν Κεφάλαιο) χρησιμοποιείται το ίδιο καταστατικό προσομοίωμα με την ίδια ακριβώς βαθμονόμηση, αναμένεται η ίδια ποσοστιαία υπερεκτίμηση της στιβαρότητας, και συνεπώς ο υπολογισμός των μειωτικών συντελεστών των μεγεθών των καμπυλών $q - \xi$ αναμένεται να παραμένει ορθός.

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η υπόθεση αυτή, γίνεται ανα-βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND για τις παραμέτρους B και h_0 (που ποσοτικοποιούν το ελαστικό μέτρο διάτμησης και το πλαστικό μέτρο κράτυνσης, αντίστοιχα) έτσι ώστε να προσεγγίζονται ακριβέστερα οι οριακές μετατοπίσεις των δι-γραμμικών καμπυλών που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$). Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται ενδεικτικά μόνο για την περίπτωση του ρηχού αγωγού ($H/D=1.5$) διαμέτρου $D = 1.2\text{m}$. Επιπλέον, για τον ίδιο αγωγό και τις νέες τιμές B και h_0 , εξάγεται η καμπύλη $q - \xi$ των ελατηρίων σε έδαφος πλήρως ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$). Έτσι, υπολογίζονται οι νέοι μειωτικοί συντελεστές των μεγεθών των καμπυλών και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές για τη βαθμονόμηση του προσομοιώματος NTUA-SAND κατά Andrianopoulos et al. (2010), που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Πιο συγκεκριμένα, ύστερα από δοκιμές, διαπιστώνεται ότι οι καμπύλες $q - \xi$ που προβλέπον οι διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού προσεγγίζονται ικανοποιητικώς θέτοντας $B = 40$ και $h_0 = 2000$. Επισημαίνεται ότι η αλλαγή στις τιμές B και h_0 αφορά αποκλειστικά στο στάδιο της εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού (δεύτερο στάδιο της αριθμητικής προσομοίωσης), ενώ υπενθυμίζεται ότι οι αρχικές τιμές τους ήταν $B = 180$ και $h_0 = 15000$, αντίστοιχα (βλέπε υπο-παράγραφο 3.2.2), δηλαδή προσεγγίζονται 4.5 - 7.5 φορές μικρότερες τιμές. Κατά τα άλλα, το προφίλ του λόγου r_u που αντιστοιχεί σε λόγο $r_{u,ff} = 1.0$ είναι εκείνο που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.1γ**, αφού, όπως αναφέρεται παραπάνω, οι

νέες τιμές των παραμέτρων αφορούν μόνο στη στατική εγκάρσια μετατόπιση του αγωγού και όχι στη σεισμική φόρτιση του πεδίου (πρώτο στάδιο της αριθμητικής προσομοίωσης).

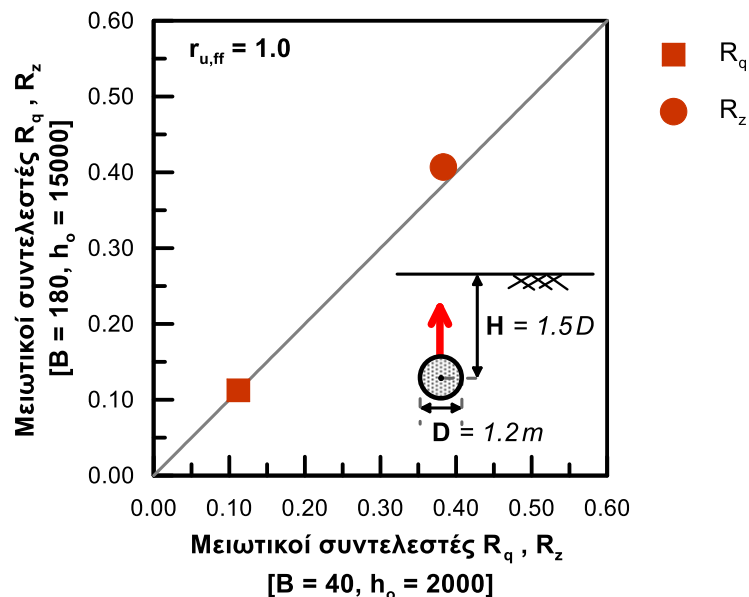
Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται οι ελαστο-πλαστικές καμπύλες $q - z$, όπως προέκυψαν για τα δύο ζεύγη τιμών B και h_o , όταν $r_{u,ff} = 0.0$ και 1.0 , για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του ρηχού αγωγού ($H/D = 1.5$) διαμέτρου (D) 1.2 m, όταν $r_{u,ff} = 0.0$ και 1.0 . Για την περίπτωση όπου $r_{u,ff} = 0.0$, στο **Σχήμα 4.12α** περιλαμβάνεται επιπλέον η καμπύλη $q - z$ κατά ASCE (1984), δι-γραμμικοποιημένη. Αν και στις οδηγίες της ASCE (1984) η δι-γραμμικοποίηση γίνεται βάσει της σχέσης $z_{ult,b} = 0.50z_{ult}$, στο πλαίσιο της διερεύνησης των τιμών B , h_o θεωρήθηκε υπέρ της ασφαλείας ότι $z_{ult,b} = 0.15z_{ult}$, δηλαδή ακολουθήθηκε η μέθοδος δι-γραμμικοποίησης κατά PRCI (2009), βλ. υπο-παράγραφο 2.2.1. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι η ALA (2001) δεν προτείνει καμιά σχέση των μεγεθών αυτών, αφήνοντας στο μηχανικό την εκτίμηση της συσχέτισής τους. Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.13** παρουσιάζονται οι μειωτικοί συντελεστές R_y , R_x όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για τα δύο διαφορετικά ζεύγη τιμών των παραμέτρων B , h_o του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND, σε έδαφος με $r_{u,ff} = 1.0$.



Σχήμα 4.12. Ελαστο-πλαστικές (δι-γραμμικές) καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων, για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 1.2$ m, λόγω εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$ όταν (α) $r_{u,ff} = 0.0$ και (β) $r_{u,ff} = 1.0$, για δύο διαφορετικά ζεύγη τιμών (B , h_o), δηλαδή δύο διαφορετικές βαθμονομήσεις του NTUA-SAND.

Παρατηρώντας το **Σχήμα 4.12**, προκύπτει ότι η τιμή του οριακού φορτίου είναι πρακτικά ίδια για τους δύο συνδυασμούς των παραμέτρων (B , h_o) τόσο στο κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$), όσο και στο πλήρως ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$). Μάλιστα, όταν $r_{u,ff} = 0.0$, η τιμή του οριακού φορτίου και για τις δύο βαθμονομήσεις είναι πρακτικώς ίση με την τιμή των οδηγιών σχεδιασμού (βλέπε επίσης υπο-παράγραφο 3.5.1, στην οποία παρουσιάζεται αναλυτικά η διακριβωση της αριθμητικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται). Έτσι, στο **Σχήμα 4.13** παρατηρείται ότι ο μειωτικός συντελεστής του οριακού φορτίου είναι ίδιος για τις δύο βαθμονομήσεις του

προσομοιώματος NTUA-SAND Σχετικά με την τιμή της οριακής μετατόπισης, στο **Σχήμα 4.12** παρατηρείται ότι οι νέες τιμές των παραμέτρων B , h_o οδηγούν σε πιο χαλαρή εδαφική συμπεριφορά (σε σχέση με τις αρχικές τιμές) –μεγαλύτερη τιμή οριακής μετατόπισης– τόσο σε πλήρως στραγγιζόμενο όσο και σε ρευστοποιημένο έδαφος. Μάλιστα, σύμφωνα με το **Σχήμα 4.13** ο μειωτικός συντελεστής R_z είναι πρακτικά ίδιος για τα δύο ζεύγη τιμών των παραμέτρων B και h_o , επομένως η σχετική αύξηση της τιμής της οριακής μετατόπισης για τα νέα B , h_o είναι πρακτικά ίση για τις δύο καταστάσεις σχεδιασμού ($r_{u,ff} = 0.0$ και $r_{u,ff} = 1.0$). Αντίστοιχα ανεξάρτητος από τη βαθμονόμηση του NTUA-SAND ως προς τις τιμές B , h_o είναι προφανώς και ο μειωτικός συντελεστής R_k . Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι μειωτικοί συντελεστές του παρόντος και του επόμενου κεφαλαίου, οι οποίοι εξάγονται για τις αρχικές τιμές (B , h_o), είναι ορθώς υπολογισμένοι και ανεξάρτητοι της βαθμονόμησης του NTUA-SAND ως προς τις τιμές των B και h_o .

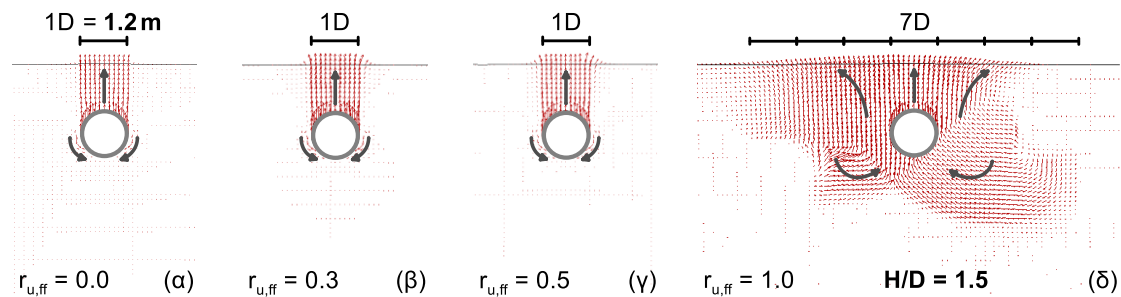


Σχήμα 4.13. Μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου και της οριακής μετατόπισης (R_q και R_z) για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 1.2$ m, λόγου εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$ όταν $r_{u,ff} = 1.0$, για δύο διαφορετικά ζεύγη τιμών (B , h_o), δηλαδή δύο διαφορετικές βαθμονομήσεις του NTUA-SAND.

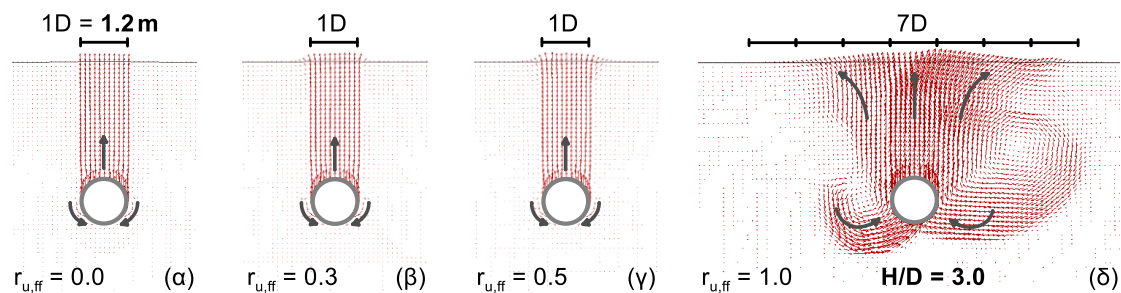
4.5 Μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης

Η επίδραση της ανάπτυξης των υπερπίεσεων των πόρων στην αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού γίνεται καλύτερα αντιληπτή μελετώντας τους μηχανισμούς εδαφικής παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού ξεκινώντας από διαφορετικές τιμές του λόγου $r_{u,ff}$. Διαφορετικοί μηχανισμοί ισοδυναμούν με διαφορετικά μήκη των επιφανειών αστοχίας (ολίσθησης), διαφορετικά βάρη κινητοποιούμενου εδάφους, αλλά και διαφορετικές κατευθύνσεις της εδαφικής «ροής», όλα χαρακτηριστικά που καθορίζουν, κατ' ελάχιστον, την τιμή του οριακού φορτίου των ισοδύναμων εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων.

Στα **Σχήματα 4.14** και **4.15** παρουσιάζονται οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.0, 0.3, 0.5 και 1.0, κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγού διαμέτρου 1.2m εγκιβωτισμένου σε βάθος H ίσο με $1.5D$ και $3D$ αντίστοιχα. Στην περίπτωση που το έδαφος είναι κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων ($r_{u,ff} = 0.0$), το έδαφος αστοχεί σε κατακόρυφες επιφάνειες και το υπερκείμενο έδαφος κινείται σαν στερεό σώμα κατακόρυφα προς τα άνω, ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D (βλ. **Σχήματα 4.14α**, **4.15α**). Δευτερευόντως, το έδαφος που βρίσκεται δεξιά και αριστερά του αγωγού, στην άμεση γειτονιά του, «ρέει» προς το κενό που δημιουργείται λόγω της ανύψωσης του αγωγού, χωρίς όμως να γεμίζει το κενό δεδομένης της επαρκούς διατμητικής αντοχής του. Όσον αφορά στην κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του υπερκείμενου εδάφους, επισημαίνεται ότι επηρεάζεται μόνο το έδαφος που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον αγωγό, δηλαδή το πλάτος επιρροής του αγωγού διαμέτρου 1.2m για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπισή του είναι $1D$. Ο ίδιος σχεδόν μηχανισμός παραμόρφωσης, ταυτόχρονα με μια μικρή πλευρική μετατόπιση του επιφανειακού εδάφους εξαιτίας των μεγαλύτερων υπερπιέσεων πόρων, παρατηρείται και στην περίπτωση του μερικώς ρευστοποιημένου εδάφους στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 0.3, 0.5$) όπου και πάλι το πλάτος επίδρασης της μετατόπισης του αγωγού ισούται πρακτικά με την τιμή της διαμέτρου του αγωγού. Και σε αυτή την περίπτωση, ο μηχανισμός με τον οποίο παραμορφώνεται το έδαφος είναι ανεξάρτητος της τιμής του λόγου H/D (βλέπε **Σχήμα 4.14β,γ** και **Σχήμα 4.15β,γ**).



Σχήμα 4.14. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 1.2$ m και λόγου $H/D = 1.5$, όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.3, (γ) 0.5 και (δ) 1.0.



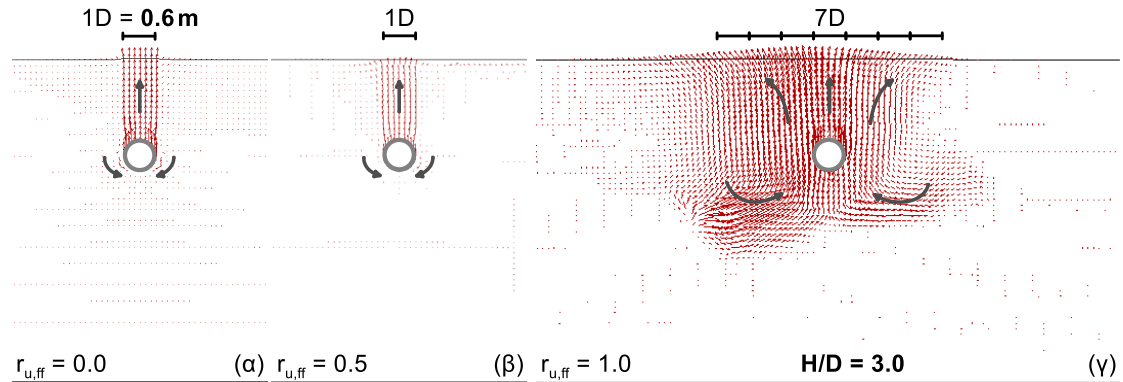
Σχήμα 4.15. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 1.2$ m και λόγου $H/D = 3$, όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.3, (γ) 0.5 και (δ) 1.0.

Ο μηχανισμός αστοχίας του εδάφους αλλάζει εξ' ολοκλήρου όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο είναι πλήρως ρευστοποιημένο ($r_{uff} = 1.0$). Μάλιστα, ο μηχανισμός είναι ίδιος για τα δύο βάθη εγκιβωτισμού (βλέπε **Σχήμα 4.14δ** και **Σχήμα 4.15δ**), δηλαδή μοιάζει να μην επηρεάζεται, για την περίπτωση του ρηχού αγωγού ($H/D = 1.5$), από τις μικρότερες υπερπίεσεις στο υπερκείμενο (του αγωγού) έδαφος (βλέπε **Σχήμα 4.1**). Βασικό χαρακτηριστικό του μηχανισμού αστοχίας όταν $r_{uff} = 1.0$ αποτελούν η κυκλική, συνεχής «ροή» του εδάφους και η κινητοποίηση εδάφους και εκτός της στενής γειτονιάς του αγωγού. Αναλυτικότερα, κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού, παρατηρείται η κινητοποίηση του εδάφους ακόμα και σε απόσταση ίση με $3D$ από την παρειά του αγωγού, δηλαδή το συνολικό πλάτος επιρροής ισούται με $7D$, θεωρώντας ότι η απόκριση του εδάφους είναι συμμετρική –επτά φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο πλάτος σε κορεσμένο έδαφος με r_{uff} ίσο με 0.0, 0.3 και 0.5. Υπενθυμίζεται ότι στο πλαίσιο της εργασίας η δυναμική ανάλυση διακόπηκε τη στιγμή που σταμάτησε η σεισμική διέγερση στη βάση του προσομοιώματος, με αποτέλεσμα η κατανομή των υπερπίεσεων πόρων να μην έχει εξομαλυνθεί και τελικά οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης που παρατηρούνται στα **Σχήματα 4.14δ** και **4.15δ** να μην είναι απολύτως συμμετρικοί.

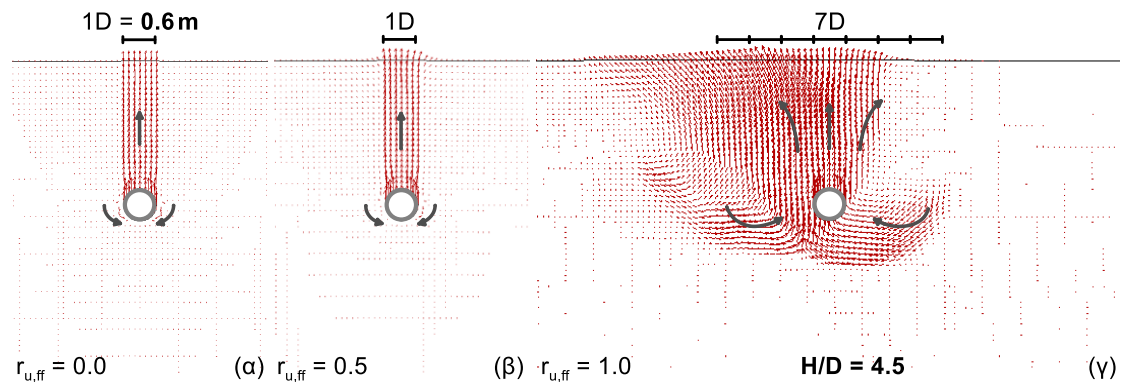
Η κυκλική εδαφική «ροή» που παρατηρείται στα προηγούμενα σχήματα παραπέμπει στο μηχανισμό που παρατήρησαν τόσο οι Chian et al. (2014), όσο και οι Huang et al. (2015) από την εγκάρσια κατακόρυφη ανύψωση αγωγών κατά τη διάρκεια σεισμικής δόνησης σε έδαφος που έχει ρευστοποιηθεί. Οι μηχανισμοί αυτοί περιγράφονται αναλυτικά στην υπο-παράγραφο 2.5.1 (Κεφάλαιο 2) και παρουσιάζονται στα **Σχήματα 2.5** και **2.6**. Ωστόσο, στους μηχανισμούς που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση της στατικής εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης του αγωγού, παρατηρείται εντονότερη κατακόρυφη μετατόπιση του υπερκείμενου εδάφους. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι ο αγωγός μετατοπίζεται μόνο κατακόρυφα (ενώ κατά τη διάρκεια σεισμού αναμένεται και η οριζόντια μετατόπισή του) και μάλιστα κατά πολύ μεγαλύτερες τιμές, σε σχέση με τις δυναμικές αναλύσεις. Τέλος, ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό της εδαφικής παραμόρφωσης όταν το ελεύθερο πεδίο έχει πλήρως ρευστοποιηθεί ($r_{uff} = 1.0$) είναι η κατακόρυφη προς τα άνω «ροή» του εδάφους που βρίσκεται κάτω από τον αγωγό, η οποία απομειώνει, συμπληρωματικά με τη μείωση της διατμητικής αντοχής εξαιτίας της ανάπτυξης των υπερπίεσεων των πόρων, την τιμή του οριακού φορτίου (q_{ult}).

Στα **Σχήματα 4.16** και **4.17** παρουσιάζονται οι μηχανισμοί παραμόρφωσης που προέκυψαν κατά την εγκάρσια κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (μικρότερης) διαμέτρου 0.6 m για τις τιμές του λόγου r_{uff} που εξετάστηκαν ($r_{uff} = 0.5$ και 1.0), όταν ο αγωγός εγκιβωτίζεται σε βάθος H ίσο με $3D$ και $4.5D$, αντίστοιχα. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι ίδιοι ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου H/D . Επιπλέον, συγκρίνοντας τα σχήματα αυτά με εκείνα που αφορούν στον αγωγό διαμέτρου 1.2 m (**Σχήμα 4.14** και **Σχήμα 4.15**), συμπεραίνεται ότι για την ίδια τιμή του λόγου r_{uff} οι μηχανισμοί παραμόρφωσης είναι, επίσης, ανεξάρτητοι της τιμής της διαμέτρου D . Κατά συνέπεια, στην περίπτωση του μικρού αγωγού, όταν το έδαφος είναι πλήρως στραγγιζόμενο ή μερικώς ρευστοποιημένο κατά τη μετατόπιση του αγωγού

επηρεάζεται κυρίως η εδαφική περιοχή ακριβώς πάνω από τον αγωγό, ενώ όταν $r_{u,ff} = 1.0$ το πλάτος επιρροής είναι και πάλι (βλέπε **Σχήμα 4.14δ** και **Σχήμα 4.15δ**) κατά προσέγγιση επτά φορές μεγαλύτερο, δηλαδή ίσο με $7D$.



Σχήμα 4.16. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 0.6$ m και λόγου $H/D = 3.0$, όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.5 και (γ) 1.0.



Σχήμα 4.17. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον προς τα άνω εγκάρσια κατακόρυφα μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 0.6$ m και λόγου $H/D = 4.5$, όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.0, (β) 0.5 και (γ) 1.0.

4.6 Συμπεράσματα

Για την επίδραση της ρευστοποίησης στην καμπύλη φορτίου q – μετατόπισης z ενός αγωγού που μετατοπίζεται εγκάρσια κατακόρυφα προς τα άνω προκύπτει ότι:

α) Οι τιμές του οριακού φορτίου (q_{ult}), της οριακής μετατόπισης ($z_{ult,b}$) και της ελαστικής στιβαρότητας (K) για το σχεδιασμό ενός υπόγειου αγωγού (διάμετρος D , λόγος εγκιβωτισμού H/D) σε έδαφος με υπερπίεσεις πόρων και λόγο $r_{u,ff}$ προκύπτουν εφαρμόζοντας διαφορετικούς μειωτικούς συντελεστές στις αντίστοιχες τιμές που αφορούν σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη χρήση ενός ενιαίου μειωτικού συντελεστή για οριακό φορτίο και ελαστική στιβαρότητα που προτείνεται στη βιβλιογραφία (O'Rourke and Liu, 2012) όταν $r_{u,ff} = 1.0$,

β) Οι τιμές των μειωτικών συντελεστών εξαρτώνται δευτερευόντως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού (διάμετρος D , λόγος εγκιβωτισμού H/D) και κυρίως από το πεδίο υπερπίεσεων πόρων της εδαφικής στρώσης (μέσος λόγος $r_{u,ff}$). Για τον ίδιο αγωγό, οι μειωτικοί συντελεστές φθίνουν με την αύξηση του λόγου $r_{u,ff}$ (δηλαδή με τη μείωση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης, FS), οπότε οι ελάχιστες τιμές τους προκύπτουν για πλήρη ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff}=1.0$),

γ) Όταν ο λόγος $r_{u,ff} = 1.0$, τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων υποδεικνύουν ότι οι μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου (q_{ult}) λαμβάνουν τιμές στο εύρος 3.5 - 11 %, οπότε η χρήση του συντελεστή 3 % που προτείνεται στη βιβλιογραφία από τους O'Rourke and Liu (2012) είναι μη-συντηρητική για το σχεδιασμό ενός υπόγειου αγωγού σε πλήρως ρευστοποιήσιμο έδαφος,

δ) Οι τιμές των μειωτικών συντελεστών είναι πρακτικά ανεξάρτητες της διέγερσης που οδήγησε στην ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων. Το σημαντικό είναι η τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ που αντικατοπτρίζει τη μέση τιμή των υπερπίεσεων των πόρων στην περιοχή ενδιαφέροντος, ανεξάρτητα από τη διέγερση που τις δημιούργησε,

ε) Οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση αγωγών είναι ποιοτικά ίδιοι ανεξάρτητα από τη διάμετρο D και το λόγο εγκιβωτισμού H/D , αλλά εξαρτώνται από την τιμή του $r_{u,ff}$. Συγκεκριμένα, για λόγο $r_{u,ff}$ ίσο με 0.0 έως 0.5, οι μηχανισμοί παραμόρφωσης είναι πρακτικά όμοιοι μεταξύ τους, δηλαδή κατακόρυφοι προς τα άνω με πλάτος επιρροής $1D$. Αντίθετα, για $r_{u,ff} = 1.0$, ο μηχανισμός παραμόρφωσης αλλάζει σημαντικά (κυκλική «ροή» εδάφους), ενώ η μετατόπιση του αγωγού επηρεάζει εδαφική περιοχή συνολικού εύρους $7D$,

στ) Η υπερεκτίμηση της τυπικής δυστημσίας άμμων εξαιτίας της έντονης διαστολικότητας της άμμου Nevada, βάσει της οποίας βαθμονομήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND, επηρεάζει τις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης, αλλά όχι τις τιμές των μειωτικών συντελεστών αυτών λόγω ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων.

Κεφάλαιο 5 | Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος

5.1 Γενικά

Η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού εγριβωτισμένου σε κορεσμένη κοκκώδη εδαφική στρώση με υδροστατικές πιέσεις πόρων ή σεισμικώς ανεπτυγμένες υπερπιέσεις πόρων (Δu) μέχρι και τη ρευστοποίηση μελετάται εδώ για αγωγό διαμέτρου (D) 0.6 m με λόγο εγριβωτισμού (H/D) 1.5, 3 και 4.5. Δεν μελετήθηκε η αντίστοιχη μετατόπιση αγωγού μεγαλύτερης διαμέτρου, καθώς θα χρειαζόταν πολύ μεγάλο εύρος κάρναβος πεπερασμένων διαφορών με εξαιρετικά μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Στην περίπτωση που οι παραπάνω αγωγοί εγριβωτίζονται σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο κοκκώδες έδαφος με υδροστατικές πιέσεις (και λόγο υπερπίεσεων πόρων $r_u = 0.0$), οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ($p - y$) των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων που προσομοιώνουν το έδαφος και οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης εξαιτίας της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης των αγωγών παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφο 3.5.2, στην οποία γίνεται η διακρίβωση της αριθμητικής μεθοδολογίας βάσει των διεθνών οδηγιών σχεδιασμού). Σε συνέχεια των παραπάνω αναλύσεων, στο παρόν κεφάλαιο, ελέγχονται οι αλλαγές στις καμπύλες $p - y$ και στους μηχανισμούς εδαφικής παραμόρφωσης, όταν αναπτυχθούν υπερπιέσεις πόρων (Δu) υπό τη δράση κάποιας σεισμικής διέγερσης. Συγκεκριμένα, μελετώνται οι περιπτώσεις όπου το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο έχει ρευστοποιηθεί μερικώς ($r_{u,ff} = 0.5$) και πλήρως ($r_{u,ff} = 1.0$), οπότε ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (FS) λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες και μικρότερες (ή ίσες) της μονάδας, αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι ως $r_{u,ff}$ ορίζεται η μέση καθ' ύψος τιμή του λόγου υπερπίεσεων πόρων στο ελεύθερο πεδίο, σε εκείνη δηλαδή την περιοχή που βρίσκεται επαρκώς μακριά από τον αγωγό ώστε η κατανομή των υπερπίεσεων πόρων σε αυτή να μην επηρεάζεται από τον υπόγειο αγωγό.

Η προσομοίωση της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης αγωγού εγριβωτισμένου σε σεισμικώς (μερικώς και πλήρως) ρευστοποιημένο έδαφος πραγματοποιείται σε δύο διαφορετικά στάδια (βλέπε Κεφάλαιο 3, παράγραφο 3.4). Στο πρώτο στάδιο, επιβάλλονται κατάλληλες σεισμικές διεγέρσεις στη βάση της εδαφικής στρώσης για την ανάπτυξη της επιθυμητής τιμής $r_{u,ff}$. Οι σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται αλλά και οι τιμές FS που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή $r_{u,ff}$ παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφο 3.4.2), ενώ οι κατανομές του λόγου r_u στην ευρύτερη περιοχή των αγωγών, για τις τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ που εξετάζονται, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 (βλέπε υπο-παράγραφο 4.2, **Σχήμα 4.6**). Στο δεύτερο στάδιο, ο αγωγός μετατοπίζεται εγκάρσια οριζόντια ως άκαμπτο στερεό, διατηρώντας σταθερό το πεδίο υπερπίεσεων πόρων που αναπτύχθηκε στο πρώτο στάδιο. Κατά τη μετατόπιση του αγωγού (y), μετράται η οριζόντια συνισταμένη δύναμη που

το γειτονικό έδαφος ασκεί στη διεπιφάνειά του (p). Έτσι, προκύπτει η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης ($p - y$), δηλαδή με την ίδια ακριβώς λογική που εκτιμώνται οι καμπύλες $q - z$ για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού στο Κεφάλαιο 4.

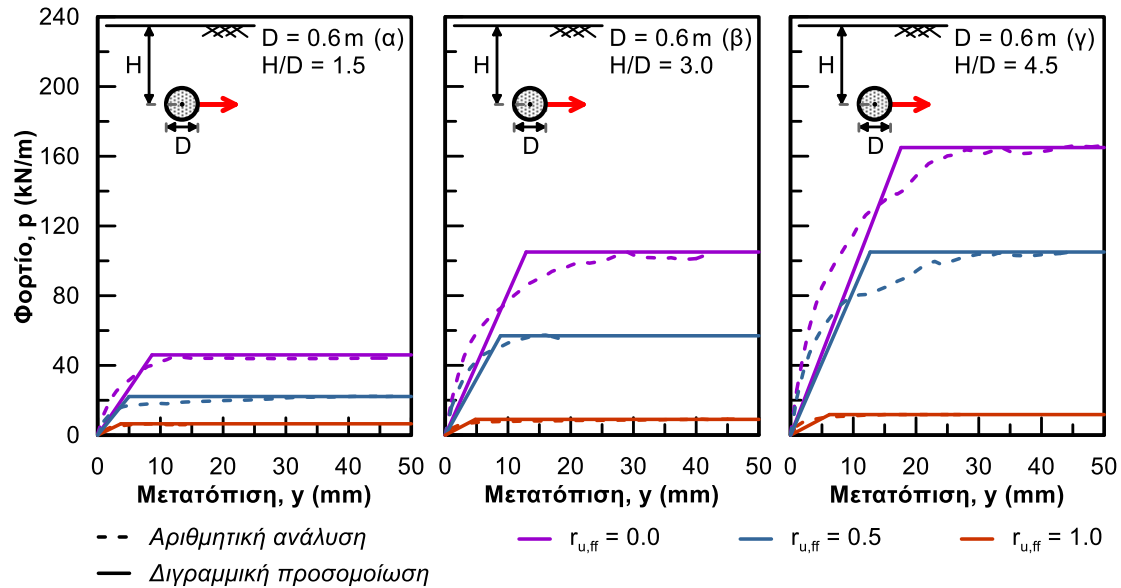
Στην παράγραφο 5.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι καμπύλες $p - y$ των υπόγειων αγωγών για τις διαφορετικές περιπτώσεις τιμών του λόγου $r_{n,ff}$ (0.5 και 1.0) και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες που αφορούν σε κορεσμένο έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων ($r_{n,ff} = 0.0$) για την εύρεση μειωτικών συντελεστών. Στη συνέχεια, στην παράγραφο 5.3, παρουσιάζονται οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του εδάφους κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση των αγωγών εντός εδάφους με ανεπτυγμένες υπερπίεσεις πόρων και λόγο $r_{n,ff} = 0.5$ και 1.0, και συγκρίνονται και πάλι με τους αντίστοιχους μηχανισμούς σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος. Στην παράγραφο 5.4 διερευνάται η ευαισθησία των καμπυλών $p - y$ σε παραδοχές των αριθμητικών αναλύσεων και το κεφάλαιο τελειώνει με την παράγραφο 5.5 όπου συνοψίζονται τα συμπεράσματα αυτού.

5.2 Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης των αγωγών σε έδαφος με ανεπτυγμένες υπερπίεσεις πόρων και λόγο $r_{n,ff} = 0.5$ και 1.0. Επισημαίνεται ότι τα προφίλ του λόγου r_u τα οποία χρησιμοποιούνται ως μόνιμα πεδία υπερπίεσεων πόρων είναι αυτά που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.6** του προηγούμενου κεφαλαίου, καθώς το πρώτο στάδιο της αριθμητικής προσομοίωσης (δυναμική ανάλυση) είναι κοινό για τις δύο κατευθύνσεις εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού (βλέπε Κεφάλαιο 3, παράγραφο 3.4, για την αριθμητική μεθοδολογία). Οι καμπύλες $p - y$ που προκύπτουν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες για κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος (με υδροστατικές πιέσεις πόρων), δηλαδή υπολογίζονται οι μειωτικοί συντελεστές (R_p , R_y , R_k) του οριακού φορτίου (p_{ult}), της οριακής μετατόπισης ($y_{ult,b}$) και της ελαστικής στιβαρότητας ($K = p_{ult} / y_{ult,b}$), οι οποίοι προκύπτουν ως ο λόγος της τιμής του μεγέθους σε έδαφος με $r_{n,ff} = 0.5$ ή 1.0 προς την αντίστοιχη τιμή όταν οι πιέσεις πόρων είναι υδροστατικές ($r_{n,ff} = 0.0$). Υπενθυμίζεται ότι η οριακή μετατόπιση ($y_{ult,b}$) ορίζεται ως η μετατόπιση του αγωγού πέραν της οποίας ο αγωγός δέχεται τη μέγιστη εδαφική αντίσταση κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπισή του. Η μετατόπιση αυτή αναφέρεται, δηλαδή, στις δι-γραμμικές καμπύλες $p - y$ (bilinear curves), για αυτό και χρησιμοποιείται ο δείκτης b . Με άλλα λόγια, ακολουθείται η ίδια γενική μεθοδολογία εκτίμησης των μειωτικών συντελεστών που ακολουθήθηκε και για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση.

Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για τις περιπτώσεις που ο αγωγός διαμέτρου 0.6m εγκιβωτίζεται σε βάθος H ίσο με 1.5D, 3D και 4.5D και ο λόγος $r_{n,ff}$ ισούται με 0.5 και 1.0. Στα ίδια διαγράμματα συμπεριλαμβάνονται και οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος ($r_{n,ff} = 0$), και παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε παράγραφο 3.5.2). Στο **Σχήμα 5.1** περιλαμβάνονται τόσο οι υπερβολικές καμπύλες $p - y$ (όπως ακριβώς προκύπτουν από την αριθμητική

προσομοίωση του προβλήματος) όσο και οι ισοδύναμες ελαστο-πλαστικές (δι-γραμμικές) καμπύλες στις οποίες στηρίζεται ο σχεδιασμός των εγκιβωτισμένων αγωγών στην πράξη. Επισημαίνεται ότι στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται χάριν πληρότητας και οι καμπύλες $p - y$ που αφορούν στο ρηχό αγωγό ($H/D = 1.5$), παρά το γεγονός ότι το μικρό πάχος της υπερκείμενης στρώσης (μόλις 0.60m) δεν θα χρησιμοποιούνταν στην πράξη καθώς δεν προσφέρει επαρκή προστασία στον υπόγειο αγωγό, ειδικά αν το έδαφος κινδυνεύει από ρευστοποίηση.



Σχήμα 5.1. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων από τις αναλύσεις και τη δι-γραμμική προσομοίωσή τους, για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D=0.6\text{ m}$ όταν (α) $H/D=1.5$, (β) $H/D=3.0$ και (γ) $H/D=4.5$, για διάφορες τιμές του $r_{u,ff}$ (0.0, 0.5 και 1.0).

Συγκρίνοντας τα **Σχήματα 5.1α, 5.1β και 5.1γ** μεταξύ τους, παρατηρείται ότι για δεδομένη τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ η αύξηση του λόγου εγκιβωτισμού (H/D), οπότε και του βάθους εγκιβωτισμού (H) αφού αναφερόμαστε σε αγωγούς ίδιας διαμέτρου (D), συνεπάγεται την αύξηση του οριακού φορτίου (p_{ult}), της οριακής μετατόπισης ($y_{ult,b}$) αλλά και της ελαστικής στιβαρότητας (K). Όταν το έδαφος είναι κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων ($r_{u,ff} = 0.0$), αυτή η επίδραση της τιμής του λόγου H/D στα χαρακτηριστικά μεγέθη των καμπυλών αποδίδεται στο μεγαλύτερο μήκος των επιφανειών αστοχίας και στη διέλευση τους από μεγαλύτερα βάθη, όπου η εδαφική αντοχή είναι μεγαλύτερη (**Σχήμα 3.7 και Σχήμα 5.3**). Μάλιστα, η αυξητική αυτή τάση των μεγεθών (p_{ult} , $y_{ult,b}$, K) επιβεβαιώνεται από τις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού (βλέπε υπο-παράγραφο 2.2.2). Όταν, ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί υπερπίεσεις πόρων στην εδαφική στρώση, η κατανομή της επίδρασης του λόγου H/D στις καμπύλες $p - y$ βασίζεται στη μελέτη των προφίλ του λόγου r_u για την εκάστοτε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ που εξετάζεται και τα οποία παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.6**.

Στην περίπτωση της μερικής ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 0.5$), η παρουσία του

εγκιβωτισμένου αγωγού πρακτικά δεν επηρεάζει την κατανομή του λόγου r_n , οπότε και η κατανομή της διατμητικής αντοχής του εδάφους με το βάθος είναι ίδια ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου εγκιβωτισμού (βλέπε **Σχήμα 4.6**). Υπενθυμίζεται ότι σε αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με το **Σχήμα 4.6**, οι τιμές r_n μεταβάλλονται μόνο κατακορύφως και συγκεκριμένα φθίνουν με το βάθος. Συγχρόνως, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.3**, η αύξηση του βάθους εγκιβωτισμού (H) συνεπάγεται επιφάνειες αστοχίας οι οποίες και έχουν μεγαλύτερη έκταση (ο αγωγός «σπρώχνει» μεγαλύτερο όγκο εδάφους) και διέρχονται από μεγαλύτερα βάθη. Έτσι, η διατμητική αντίσταση που προβάλλει το έδαφος αυξάνει με το βάθος εγκιβωτισμού (H).

Όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο είναι πλήρως ρευστοποιημένο ($r_{n,ff} = 1.0$), στο **Σχήμα 4.6** παρατηρείται ότι το γειτονικό στον αγωγό έδαφος είναι εξίσου ρευστοποιημένο –με σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή– σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από εκείνη του ρηχού αγωγού ($H/D = 1.5$), κατά την οποία ο αγωγός προστατεύει το άμεσα γειτονικό του έδαφος από ρευστοποίηση. Βέβαια, η περιοχή στην οποία επιδρά θετικά ο αγωγός είναι περιορισμένη, δεδομένης της μικρής διαμέτρου του (D) (βλέπε παράγραφο 4.2, για αναλυτική περιγραφή των μηχανισμών στους οποίους αποδίδεται η προστασία του υπερκείμενου εδάφους). Σύμφωνα με το **Σχήμα 5.3**, το έδαφος αστοχεί, για κάθε τιμή $r_{n,ff}$ και κάθε βάθος εγκιβωτισμού, κατά μήκος επιφανειών, οι οποίες δε διέρχονται από την κορυφή του αγωγού. Κατά συνέπεια, η προστασία του ρηχού αγωγού ($H/D = 1.5$) έναντι ρευστοποίησης στο υπερκείμενο έδαφος δεν αναμένεται να επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση που προσφέρει το έδαφος στην εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση. Δηλαδή, η αύξηση των χαρακτηριστικών μεγεθών των ελαστο-πλαστικών καμπυλών αυξανόμενου του λόγου εγκιβωτισμού (H/D) όταν $r_{n,ff} = 1.0$, αποδίδεται κυρίως στη μεγαλύτερη έκταση των επιφανειών αστοχίας και επομένως στο μεγαλύτερο εδαφικό όγκο που χρειάζεται να «σπρώξει» ο αγωγός για να μετατοπιστεί εγκάρσια οριζόντια. Καθώς, όμως, η αντοχή του εδάφους είναι σχεδόν μηδενική σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης για $r_{n,ff} = 1.0$, τα μεγέθη των ελαστο-πλαστικών καμπυλών δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους για διαφορετικές τιμές του λόγου H/D .

Όσον αφορά στην επίδραση της τιμής του λόγου $r_{n,ff}$ στις τιμές του οριακού φορτίου (p_{ult}), της οριακής μετατόπισης ($y_{ult,b}$) και της ελαστικής στιβαρότητας (K), για συγκεκριμένο αγωγό (διαμέτρου D , λόγου εγκιβωτισμού H/D), στα **Σχήματα 5.1α**, **β** και **Σχήμα 4.8γ** παρατηρείται ότι η αύξηση του $r_{n,ff}$ συνεπάγεται την πτώση των τιμών των παραπάνω μεγεθών. Όπως έχει ήδη γίνει αντιληπτό από τη μελέτη των ισοκαμπυλών του λόγου r_n στην ευρύτερη περιοχή των αγωγών διαμέτρου 0.6 m, οι οποίες παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2 του προηγούμενου κεφαλαίου (βλέπε **Σχήμα 4.6**), η αύξηση του λόγου $r_{n,ff}$ αντιστοιχεί σε αύξηση της μέσης τιμής του λόγου r_n στην περιοχή γύρω από τον αγωγό. Όσο μεγαλύτερη, λοιπόν, η τιμή του λόγου $r_{n,ff}$ τόσο μικρότερη η διατμητική αντοχή του γειτονικού εδάφους. Όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο είναι μερικώς ρευστοποιημένο ($r_{n,ff} = 0.5$), η έκταση των επιφανειών αστοχίας είναι πρακτικά ίδια με την περίπτωση του πλήρως στραγγιζόμενου εδάφους (βλέπε **Σχήμα 5.3**). Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών

των ελαστο-πλαστικών καμπυλών $p - \gamma$ φθίνουν εξαιτίας της μείωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Όταν, όμως, το έδαφος είναι πλήρως ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$), η εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση των αγωγών κινητοποιεί μεγαλύτερη εδαφική περιοχή σε σχέση με το μερικώς ρευστοποιημένο έδαφος (βλέπε **Σχήμα 5.3**). Ωστόσο, η πρακτικά μηδενική εδαφική αντοχή συνεπάγεται την περαιτέρω πτώση των τιμών των χαρακτηριστικών μεγεθών των ελαστο-πλαστικών καμπυλών $p - \gamma$ σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές όταν $r_{u,ff} = 0.5$, ακόμη κι αν κινητοποιείται μεγαλύτερη εδαφική μάζα.

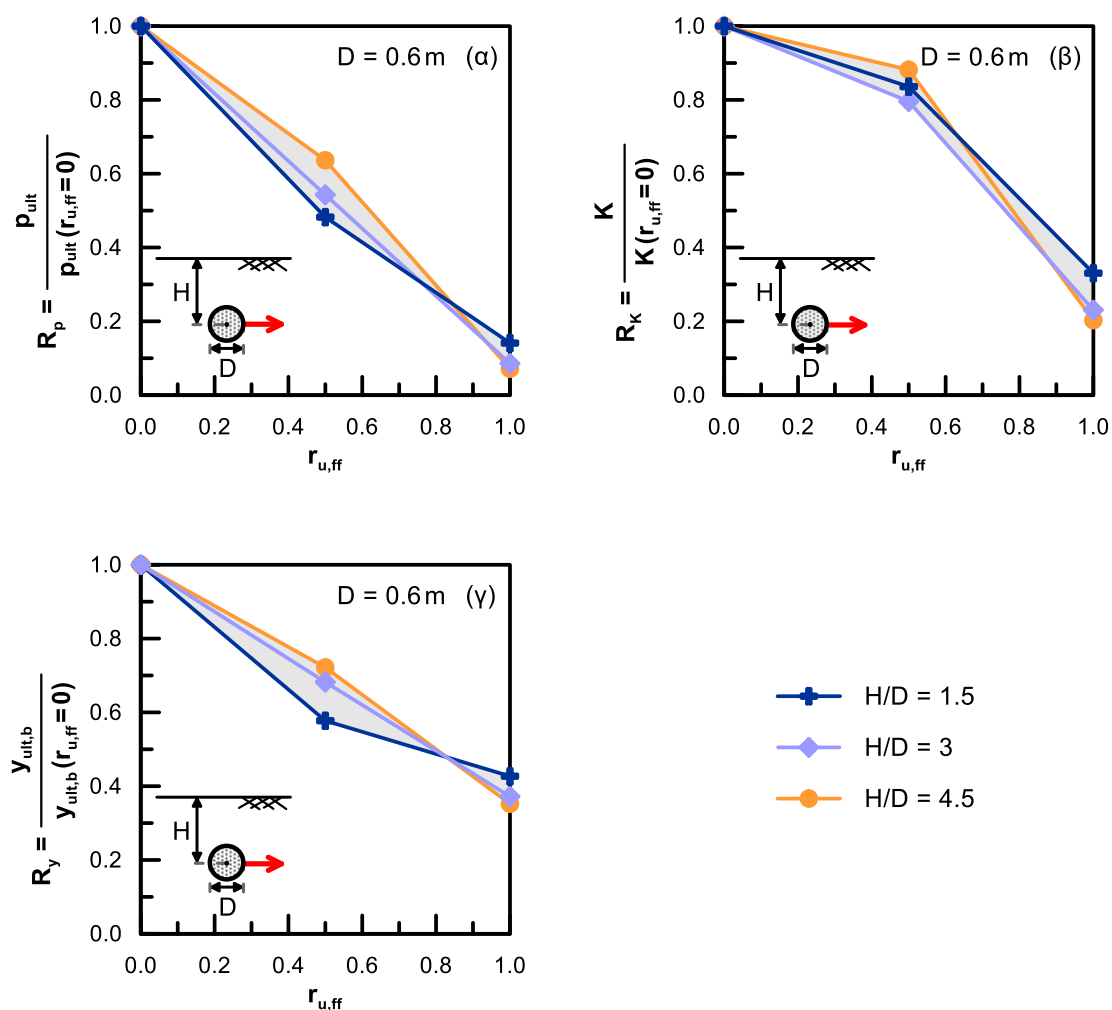
Η παραπάνω ποιοτική μελέτη της επίδρασης των τιμών των λόγων $r_{u,ff}$ και H/D στη μορφή των ελαστο-πλαστικών καμπυλών $p - \gamma$ χρειάζεται να συνοδευτεί από τις τιμές των μειωτικών συντελεστών (R_p, R_γ, R_K) των μεγεθών του οριακού φορτίου (p_{ult}), της οριακής μετατόπισης ($y_{ult,b}$) και της ελαστικής στιβαρότητας (K), για κάθε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$. Υπενθυμίζεται ότι οι μειωτικοί συντελεστές ορίζονται ως ο λόγος των τιμών των χαρακτηριστικών μεγεθών των καμπυλών, για συγκεκριμένο αγωγό, όταν στο έδαφος έχει αναπτυχθεί τιμή $r_{u,ff}$ προς τις αντίστοιχες τιμές τους όταν οι πιέσεις πόρων είναι υδροστατικές ($r_{u,ff} = 0$). Έτσι, στο **Σχήμα 5.2** περιλαμβάνονται τα διαγράμματα μεταβολής των μειωτικών συντελεστών με την αύξηση της τιμής του λόγου $r_{u,ff}$, για κάθε μέγεθος ($p_{ult}, y_{ult,b}, K$) χωριστά. Συγκεκριμένα, το **Σχήμα 5.2α** αφορά στο οριακό φορτίο, ενώ τα **Σχήματα 5.2β** και **5.2γ** στην ελαστική στιβαρότητα και την οριακή μετατόπιση, αντίστοιχα.

Ξεινώνοντας από το οριακό φορτίο (**Σχήμα 5.2α**), ο μειωτικός συντελεστής του οριακού φορτίου λαμβάνει τιμές εντός του εύρους 48-64% όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 0.5, ενώ όταν $r_{u,ff} = 1.0$ το αντίστοιχο εύρος τιμών του είναι 7 - 14 %. Επομένως, ο σχεδιασμός των εγκιβωτισμένων αγωγών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος βάσει του μειωτικού συντελεστή του φορτίου κατά O'Rourke and Liu (2012), ο οποίος ισούται με 3 %, είναι σημαντικά μη-συντηρητικός. Η μείωση της τιμής του μειωτικού συντελεστή με την αύξηση του λόγου $r_{u,ff}$ οφείλεται στην αύξηση των υπερπιέσεων πόρων στην ευρύτερη περιοχή του αγωγού. Ωστόσο, χρειάζεται να επισημανθεί ότι όταν $r_{u,ff} = 1.0$, ο ρηχός αγωγός εμφανίζει συγκριτικά μικρότερη ποσοστιαία μείωση του οριακού φορτίου. Η μικρή αυτή διαφορά αποδίδεται σε συνεισφορά της «προστασίας» που προσφέρει ο αγωγός στο άμεσα γειτονικό του υπερκείμενο έδαφος (**Σχήμα 4.6**), η οποία όμως παραμένει μικρή γιατί οι επιφάνειες ολίσθησης δεν διέρχονται από την περιοχή πάνω από τον αγωγό (βλ. **Σχήμα 5.3**).

Στο **Σχήμα 5.2γ** οι αντίστοιχοι συντελεστές για την οριακή μετατόπιση στο μερικώς ρευστοποιημένο έδαφος ($r_{u,ff} = 0.5$) ανήκουν στο εύρος 58 - 72% για κάθε τιμή του λόγου H/D , ενώ στο πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος η οριακή μετατόπιση ισούται με 35 - 43% της αρχικής τιμής για έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων. Η μείωση αυτή των οριακών μετατοπίσεων συνεπάγεται την ελάττωση της ελαστικής στιβαρότητας κατά μικρότερο ποσοστό σε σχέση με το οριακό φορτίο, με αποτέλεσμα ο προσδιορισμός των καμπυλών $p - \gamma$ των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού, όταν το έδαφος αναμένεται να ρευστοποιηθεί, να απαιτεί τη χρήση διαφορετικών μειωτικών συντελεστών για τα διάφορα μεγέθη και όχι τη χρήση ενός ενιαίου μειωτικού συντελεστή, ο οποίος και προτείνεται στη βιβλιογραφία (βλέπε Κεφάλαιο 2, παράγραφο

2.3).

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.2β**, ο μειωτικός συντελεστής της ελαστικής στιβαρότητας για το σχεδιασμό υπόγειων αγωγών σε έδαφος με λόγο $r_{u,ff}$ ίσο με 0.5 λαμβάνει τιμές στο εύρος 80 - 88 % (ο αντίστοιχος συντελεστής για το οριακό φορτίο είναι 48 - 64 %), ενώ όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο αναμένεται να ρευστοποιηθεί πλήρως ο συντελεστής αυτός ισούται με 20-33% (ο αντίστοιχος συντελεστής για το οριακό φορτίο είναι 7 - 14%).

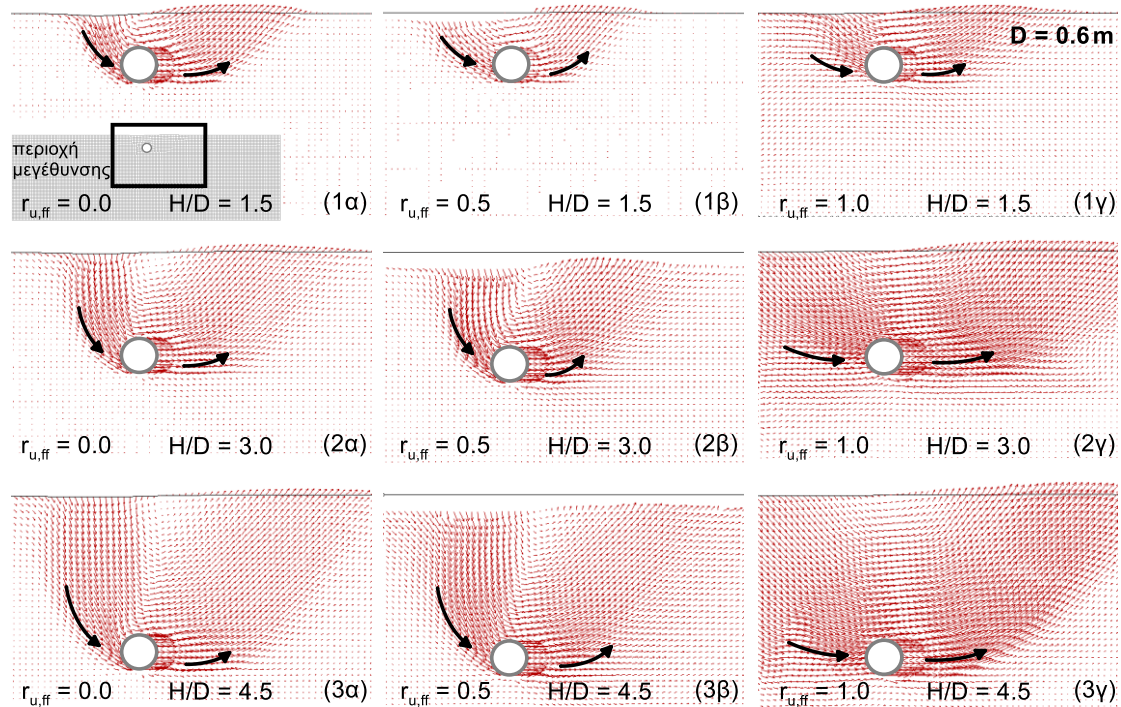


Σχήμα 5.2. Μειωτικοί συντελεστές συναρτήσεως του $r_{u,ff}$ (α) του οριακού φορτίου, (β) της ελαστικής στιβαρότητας και (γ) της οριακής μετατόπισης των ελαστο-πλαστικών (διγραμμικών) καμπυλών φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m.

5.3 Μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης

Οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης επηρεάζονται σημαντικά από την ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων στην εδαφική στρώση, καθώς ο τρόπος με τον οποίο ένα έδαφος αστοχεί (π.χ. η κλίση των επιφανειών διατμητικής αστοχίας) είναι συνάρτηση της διατμητικής του αντοχής και δυσμησίας, μεγέθη τα οποία καθορίζονται από τις ενεργές τάσεις. Στο **Σχήμα 5.3** που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διανύσματα μετατόπισης στη γειτονιά ενός αγωγού διαμέτρου 0.6 m κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπισή του, όταν

εγκιβωτίζεται σε βάθος H ίσο με $1.5D$, $3D$ και $4.5D$. Τα υπο-σχήματα κάθε στήλης (α , β ή γ) αναφέρονται στην ίδια τιμή του λόγου $r_{u,ff}$, ενώ τα υπο-σχήματα της ίδιας σειράς (1,2 ή 3) αφορούν στον ίδιο λόγο εγκιβωτισμού H/D .

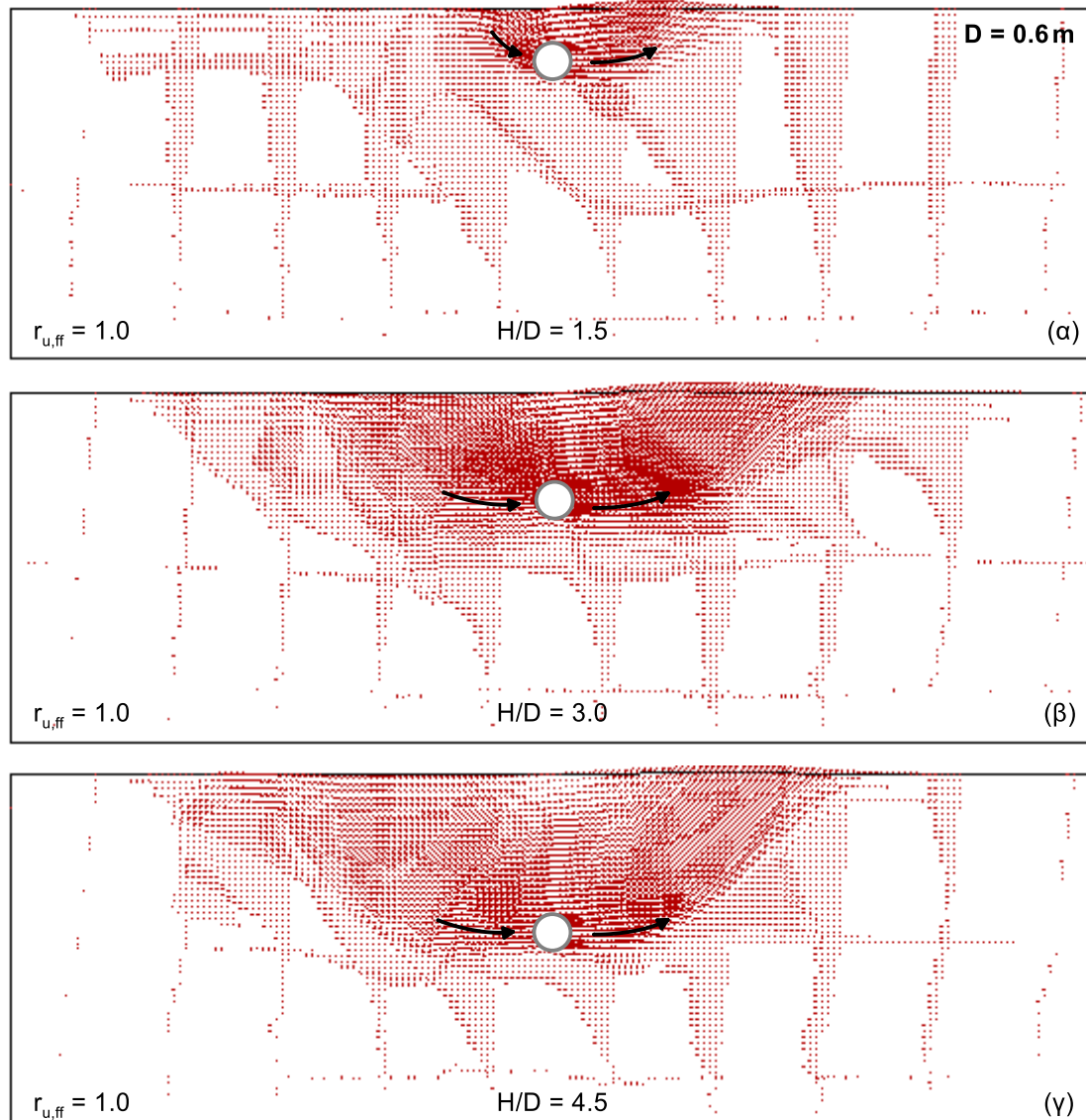


Σχήμα 5.3. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους γύρω από τον εγκάρσια οριζόντια μετατοπιζόμενο αγωγό διαμέτρου $D = 0.6\text{ m}$ σε διαφορετικά βάθη εγκιβωτισμού ($H/D = 1.5$, 3.0 και 4.5), όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με (α) 0.0 , (β) 0.5 και (γ) 1.0

Οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του κορεσμένου με υδροστατικές πιέσεις πόρων εδάφους ($r_{u,ff} = 0.0$) κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ενός αγωγού, μελετώνται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 (βλέπε υπο-παράγραφο 3.5.2). Βασικό χαρακτηριστικό των μηχανισμών αυτών είναι η αστοχία του εδάφους υπό τη μορφή πρισμάτων. Μάλιστα, τα πρίσματα αυτά παραπέμπουν στην «ενεργητική» και «παθητική» αστοχία της θεωρίας Coulomb, αφού το έδαφος που βρίσκεται όπισθεν του αγωγού (σε σχέση με την κατεύθυνση μετατόπισής του) αστοχεί υπό γωνία μικρότερη από εκείνη της επιφάνειας αστοχίας του πρισματος έμπροσθεν του αγωγού. Συγχρόνως, αυτή η μορφή αστοχίας συνεπάγεται την καθίζηση της εδαφικής επιφάνειας όπισθεν του αγωγού αλλά και την ανύψωσή της έμπροσθεν αυτού. Οι επιφάνειες αστοχίας φτάνουν, δηλαδή, μέχρι την εδαφική επιφάνεια, όπως ακριβώς αναφέρεται από τους Chaloulos et al. (2015) και Burnett (2015). Επιπλέον, παρατηρείται η αύξηση του εδαφικού όγκου των πρισμάτων με την αύξηση του βάθους εγκιβωτισμού, η οποία επιβεβαιώνεται από τους παραπάνω ερευνητές (βλέπε παράγραφο 2.5).

Η μορφή αυτή της αστοχίας διατηρείται σχεδόν αυτούσια ακόμα και όταν το έδαφος έχει μερικώς ρευστοποιηθεί ($r_{u,ff} = 0.5$), οπότε διατηρεί σημαντικό ποσοστό της διατμητικής αντοχής του. Συγκεκριμένα, το έδαφος αστοχεί πάλι υπό μορφή πρισμάτων και οι γωνίες

των επιφανειών αστοχίας είναι πρακτικά ίδιες με εκείνες της περίπτωσης που οι υπερπίεσεις πόρων είναι μηδενικές ($r_{u,ff} = 0.0$). Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να επισημανθεί ότι αντίστοιχη ομοιότητα στους μηχανισμούς παραμόρφωσης κορεσμένων εδαφών με λόγο $r_{u,ff}$ ίσο με 0.0 και 0.5 (αλλά και 0.3) παρατηρείται και στην περίπτωση της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης των αγωγών (βλέπε Κεφάλαιο 4, παράγραφο 4.5).



Σχήμα 5.4. Διανύσματα μετατόπισης εδάφους σε ολόκληρη την εδαφική στρώση κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού διαμέτρου $D = 0.6$ m σε διαφορετικά βάθη εγκιβωτισμού: (α) $H/D = 1.5$, (β) $H/D = 3.0$ και (γ) $H/D = 4.5$, όταν $r_{u,ff} = 1.0$

Σε αντίθεση με την περίπτωση της μερικής ρευστοποίησης στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 0.5$), κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ενός αγωγού σε έδαφος πλήρως ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$) ο μηχανισμός εδαφικής παραμόρφωσης αλλάζει σημαντικά σε σχέση με αυτόν που αντιστοιχεί σε $r_{u,ff} = 0.0$. Αναλυτικότερα, στα υπο-σχήματα της τρίτης στήλης του **Σχήματος 5.3** παρατηρείται ότι σε κάθε βάθος εγκιβωτισμού

κινητοποιείται πολύ μεγαλύτερος εδαφικός όγκος συγκριτικά με τον αντίστοιχο όγκο που κινητοποιείται όταν ο λόγος $r_{u,ff} = 0$ ή 0.5. Η επίδραση αυτή της μετατόπισης του αγωγού σε μεγαλύτερη μάζα εδάφους οφείλεται στο ότι το έδαφος έχει πρακτικά χάσει τη διατμητική του αντοχή και δυστημψία. Για αυτό το λόγο, άλλωστε, το έδαφος γύρω από τον αγωγό κινείται κυρίως οριζόντια, κατά τη φορά μετατόπισης του αγωγού, παρασύροντας συγχρόνως το υπερείκμενο έδαφος. Αντίστοιχη απώλεια της εδαφικής αντοχής και δυστημψίας παρατηρείται και στο πείραμα των Ono & Okamura (2019) (Σχήμα 2.11β), όπου το έδαφος στις δύο πλευρές του αγωγού μετατοπίζεται κυρίως οριζόντια. Τέλος, η μεγάλη κινητοποίηση της εδαφικής μάζας σε έδαφος πλήρως ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$) γίνεται καλύτερα αντιληπτή στο παραπάνω Σχήμα 5.4, στο οποίο παρουσιάζονται τα διανύσματα μετατόπισης σε ολόκληρη την εδαφική στρώση (συνολικού πλάτους 18m και πάχους 6m), εξαιτίας της εγγάρσιας οριζόντιας μετατόπισης του αγωγού.

5.4 Ευαισθησία καμπυλών φορτίου - μετατόπισης

Ανωτέρω παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης και οι προκύπτοντες μειωτικοί συντελεστές για την εγγάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού εντός μερικώς ή πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους (με $r_{u,ff} = 0.5$ ή 1.0). Εδώ διερευνάται η ευαισθησία αυτών των καμπυλών ως προς χαρακτηριστικά της αριθμητικής προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, για την εγγάρσια οριζόντια μετατόπιση ενός αγωγού σε έδαφος με $r_{u,ff} = 0.5$ ή 1.0, όπως και για το κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος ($r_{u,ff} = 0.0$), γίνεται χρήση του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND κατά Andrianopoulos et al. (2010), καθώς και της βαθμονόμησης που οι ίδιοι ερευνητές προτείνουν και η οποία στηρίζεται σε πειραματικές δοκιμές σε άμμο Nevada (βλέπε Κεφάλαιο 3, υπο-παράγραφο 3.2.2). Στην παράγραφο 3.5.2 αποδεικνύεται ότι το προσομοίωμα NTUA-SAND προβλέπει στιβαρότερη συμπεριφορά από εκείνη που προτείνουν οι οδηγίες σχεδιασμού κατά την εγγάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ικανοποιητική προσέγγιση του οριακού φορτίου (p_{ult}), αλλά υποεκτίμηση των τιμών της οριακής μετατόπισης ($y_{ult,b}$), όπως ακριβώς και στην περίπτωση της εγγάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης αγωγού σε κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος (βλέπε παράγραφο 3.5.1).

Ωστόσο, στο Κεφάλαιο 4 αποδεικνύεται ότι η ελαστική στιβαρότητα των εγγάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων (K) υπερεκτιμάται κατά το ίδιο ποσοστό είτε ο αγωγός εγριβιτίζεται σε έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων είτε σε πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος, όταν η προσομοίωση της μετατόπισης του αγωγού γίνεται με το ίδιο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND και την ίδια βαθμονόμηση (βλέπε παράγραφο 4.4). Έτσι, κατά τον υπολογισμό των μειωτικών συντελεστών της στιβαρότητας και της οριακής μετατόπισης, οι αποκλίσεις ως προς τις πραγματικές τιμές των μεγεθών αυτών εξαλείφονται. Γενικεύοντας, θεωρείται ότι το ίδιο ακριβώς ποσοστό απόκλισης των τιμών της ελαστικής στιβαρότητας (και της οριακής μετατόπισης) προκύπτει για κάθε τιμή $r_{u,ff}$, κάθε αγωγό αλλά και κάθε κατεύθυνση εγγάρσιας μετατόπισης του αγωγού. Κατ' επέκταση, οι μειωτικοί

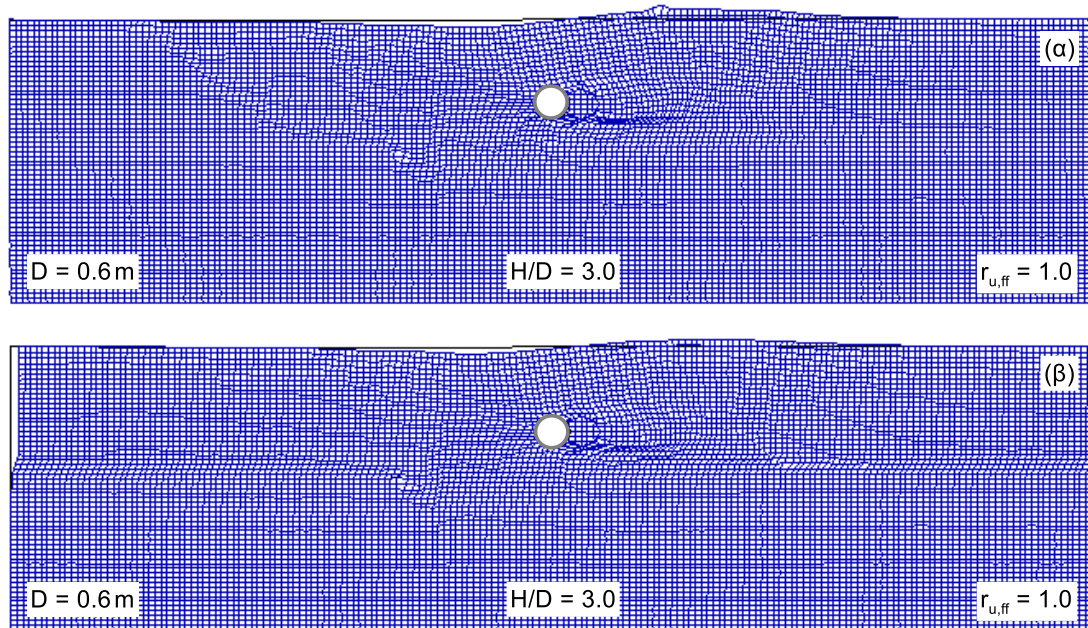
συντελεστές που αφορούν στην εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση των αγωγών αναμένονται να μην είναι επηρεασμένοι από το χρησιμοποιούμενο προσομοίωμα και τη βαθμονόμησή του.

Επιπλέον, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, για την αριθμητική προσομοίωση της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης ενός αγωγού σε κορεσμένο έδαφος με ή χωρίς υπερπιέσεις πόρων, στα πλευρικά (κατακόρυφα) σύνορα του προσομοιώματος ορίζονται κατακόρυφες κυλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, δεσμεύεται η οριζόντια μετακίνηση των κόμβων στις πλευρές του προσομοιώματος, αλλά επιτρέπεται η κατακόρυφη μετακίνησή τους, θεωρώντας ότι το πλάτος του προσομοιώματος (ίσο με 18m) είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μην επηρεάζεται η εδαφική απόκριση ανεξάρτητα από την τιμή της διαμέτρου του αγωγού ($D = 0.6 \text{ m}$ ή 1.2 m).

Στο Κεφάλαιο 3, επιβεβαιώνεται ότι το αριθμητικό προσομοίωμα για την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση των αγωγών προσεγγίζει ικανοποιητικώς τις καμπύλες $p - y$ που προβλέπουν οι οδηγίες σχεδιασμού (ASCE 1984, ALA 2001, PRCI 2009, βλέπε Κεφάλαιο 2) όταν το έδαφος είναι κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων. Επισημαίνεται ότι η καλή αυτή συμφωνία του προσομοιώματος με τη βιβλιογραφία αφορά σε όλα τα βάθη εγριβωτισμού του μικρού αγωγού, διαμέτρου 0.6 m . Συμπεραίνεται λοιπόν ότι στην περίπτωση που το έδαφος είναι κορεσμένο πλήρως στραγγιζόμενο, το πλάτος του προσομοιώματος επαρκεί.

Στο **Σχήμα 5.3** παρατηρείται ότι το έδαφος παραμορφώνεται με τον ίδιο τρόπο είτε είναι πλήρως στραγγιζόμενο ($r_{n,ff} = 0.0$), είτε μερικώς ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο ($r_{n,ff} = 0.5$). Αντίστοιχα, λοιπόν, με το πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος, το πλάτος του προσομοιώματος επαρκεί για την αριθμητική προσομοίωση της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης των αγωγών που εξετάζονται ακόμα και στην περίπτωση που το $r_{n,ff} = 0.5$. Όταν, όμως, το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο ρευστοποιηθεί πλήρως ($r_{n,ff} = 1.0$), κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση των αγωγών παρασύρεται πολύ μεγαλύτερη εδαφική μάζα (βλέπε **Σχήμα 5.3**). Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο το βάθος εγριβωτισμού (H), τόσο μεγαλύτερος ο όγκος του εδάφους που κινητοποιείται. Αν και σύμφωνα με το **Σχήμα 5.4** τα διανύσματα μετατόπισης μηδενίζονται πριν από τα κατακόρυφα σύνορα του προσομοιώματος, θεωρήθηκε αναγκαίο να ελεγχθεί η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού όταν στα κατακόρυφα σύνορα επιτρέπεται η οριζόντια μετακίνηση των κόμβων, αλλά δεσμεύεται η κατακόρυφη μετακίνησή τους (οριζόντιες κυλίσεις).

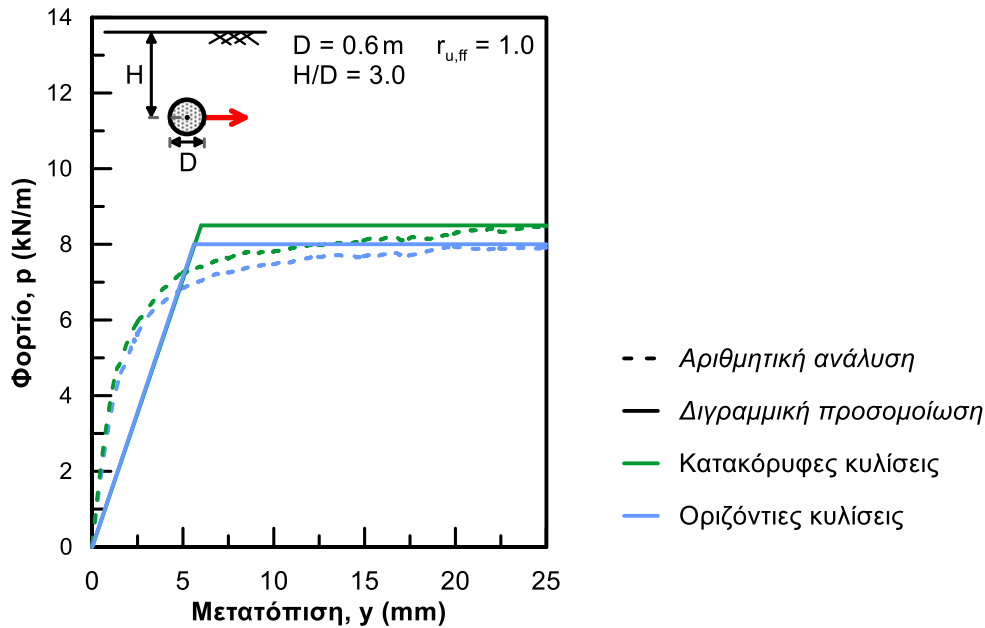
Η επίδραση των κατακόρυφων συνόρων του προσομοιώματος, όταν ο αγωγός μετατοπίζεται εγκάρσια οριζόντια σε έδαφος με λόγο $r_{n,ff} = 1.0$, εξετάζεται για την περίπτωση του αγωγού με διάμετρο 0.6 m και λόγο εγριβωτισμού $H/D = 3.0$. Στα **Σχήματα 5.5α** και **5.5β** παρουσιάζονται οι παραμορφωμένοι κάρναβοι του προσομοιώματος εξαιτίας της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης του αγωγού, όταν στα κατακόρυφα σύνορα τοποθετούνται κατακόρυφες και οριζόντιες κυλίσεις, αντίστοιχα. Υπογραμμίζεται ότι η παραμόρφωση των ζωνών του **Σχήματος 5.5** είναι μεγεθυμένη κατά 20 φορές και στα δύο υπο-σχήματα.



Σχήμα 5.5. Παραμορφωμένος κάνναβος (μεγεθυμένος κατά 20 φορές) κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού με $D = 0.6$ m και $H/D = 3.0$, όταν $r_{u,ff} = 1.0$ και οι συνοριακές συνθήκες στα κατακόρυφα σύνορα είναι (α) κατακόρυφες κυλίσεις, (β) οριζόντιες κυλίσεις.

Συγκρίνοντας τα δύο υπο-σχήματα, παρατηρείται ότι ενώ η παραμόρφωση στην περιοχή του αγωγού δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στους δύο καννάβους, στο προσομοίωμα με τις οριζόντιες κυλίσεις (βλέπε **Σχήμα 5.5β**) υπάρχει σημαντική οριζόντια μετατόπιση των ανώτερων εδαφικών στρώσεων, εντός των οποίων εγριβωτίζεται ο αγωγός. Ωστόσο, πέραν της παραπάνω σύγκρισης των δύο καννάβων, χρειάζεται να μελετηθούν οι καμπύλες $p - y$ για τα δύο αριθμητικά προσομοιώματα, στις οποίες άλλωστε ποσοτικοποιούνται οι όποιες διαφορές μεταξύ αυτών των δύο προσομοιωμάτων.

Στο **Σχήμα 5.6** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι καμπύλες $p - y$ των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, όταν ο αγωγός διαμέτρου (D) 0.6 m και λόγου εγριβωτισμού (H/D) 3.0 μετατοπίζεται (εγκάρσια οριζόντια) εντός πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους, στα κατακόρυφα σύνορα του οποίου ορίζονται κατακόρυφες ή οριζόντιες κυλίσεις. Οι καμπύλες παρουσιάζονται σε υπερβολική μορφή, όπως δηλαδή προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση, και σε ισοδύναμη δι-γραμμική. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το οριακό φορτίο (p_{ult}) λαμβάνει πρακτικά την ίδια τιμή για τις δύο περιπτώσεις. Παραπλήσιες τιμές λαμβάνουν, επίσης, τόσο η οριακή μετατόπιση ($y_{ult,b}$) όσο και η ελαστική στιβαρότητα (K). Κατά συνέπεια, το θεωρηθέν πλάτος του αριθμητικού προσομοιώματος κρίνεται ότι δεν επηρεάζει την απόκριση του εδάφους κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση των αγωγών που εξετάζονται, ακόμα και όταν το έδαφος είναι πλήρως ρευστοποιημένο στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$).



Σχήμα 5.6. Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων από τις αναλύσεις για εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση του αγωγού διαμέτρου $D = 0.6 \text{ m}$ και λόγου $H/D = 3.0$, όταν οι συνοριακές συνθήκες στα πλευρικά σύνορα είναι κατακόρυφες ή οριζόντιες κυλίσεις.

5.5 Συμπεράσματα

Για την επίδραση της ρευστοποίησης στην καμπύλη $p - y$ ενός αγωγού που μετατοπίζεται εγκάρσια οριζόντια προκύπτει ότι:

α) Οι τιμές του οριακού φορτίου (p_{ult}), της οριακής μετατόπισης ($y_{ult,b}$) και της ελαστικής στιβαρότητας (K) σε έδαφος με υπερπίεσεις πόρων και μέσο λόγο υπερπίεσεων στο ελεύθερο πεδίο $r_{u,ff}$ προκύπτουν εφαρμόζοντας διαφορετικούς μειωτικούς συντελεστές, στις αντίστοιχες τιμές που αφορούν σε κορεσμένο με υδροστατικές πιέσεις πόρων έδαφος, σε αντίθεση με την πρόταση των O'Rourke and Liu (2012) για χρήση ενός ενιαίου μειωτικού συντελεστή στο οριακό φορτίο (p_{ult}) και την ελαστική στιβαρότητα (K). Πρόκειται ποιοτικά για το ίδιο συμπέρασμα που προέκυψε και για εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού.

β) Οι τιμές των μειωτικών συντελεστών εξαρτώνται κυρίως από το πεδίο υπερπίεσεων πόρων της εδαφικής στρώσης (λόγος $r_{u,ff}$) και δευτερευόντως από το λόγο εγκιβωτισμού (H/D) του αγωγού. Αν και εξετάστηκε μόνο μια διάμετρος αγωγού ($D = 0.6 \text{ m}$), αναμένεται δευτερεύουσας σημασίας εξάρτηση από την τιμή της διαμέτρου (D), αντίστοιχα με την περίπτωση της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης ενός αγωγού (Κεφάλαιο 4). Σε κάθε περίπτωση, για τον ίδιο αγωγό οι μειωτικοί συντελεστές φθίνουν με την αύξηση του λόγου $r_{u,ff}$ (δηλαδή με τη μείωση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης, FS), οπότε οι ελάχιστες τιμές τους προκύπτουν για πλήρη ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,ff} = 1.0$),

γ) Όταν ο λόγος $r_{u,ff}$ ισούται με 1.0, οι αριθμητικές αναλύσεις υποδεικνύουν ότι οι μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου (p_{ult}) λαμβάνουν τιμές στο εύρος 7-14%, οπότε η χρήση του συντελεστή 3 % που προτείνεται στη βιβλιογραφία είναι μη-συντηρητική για το σχεδιασμό αγωγών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.

δ) Οι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγών είναι ποιοτικά ίδιοι ανεξάρτητα από το λόγο εγριβωτισμού H/D (και πιθανότατα ούτε τη διάμετρο D), αλλά εξαρτώνται από την τιμή του $r_{u,ff}$. Συγκεκριμένα, για λόγο $r_{u,ff}$ ίσο με 0.0 έως 0.5, οι μηχανισμοί παραμόρφωσης είναι πρακτικά όμοιοι μεταξύ τους, δηλαδή το έδαφος έμπροσθεν και όπισθεν του αγωγού αστοχεί υπό μορφή πρισμάτων, θυμίζοντας την «ενεργητική» και «παθητική» αστοχία κατά Coulomb. Οι κλίσεις των δύο πρισμάτων πρακτικά δεν επηρεάζονται από τις υπερπίεσεις πόρων, όταν ο λόγος $r_{u,ff} = 0.0$ και 0.5, ενώ όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο ρευστοποιηθεί πλήρως ($r_{u,ff} = 1.0$), οι δύο αυτές κλίσεις μειώνονται σημαντικά και η μετατόπιση του αγωγού κινητοποιεί πολύ μεγαλύτερο εδαφικό όγκο σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου ο λόγος $r_{u,ff} = 0.0$ και 0.5.

ε) Οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση αγωγού δεν δείχνουν ευαισθησία στις λεπτομέρειες της αριθμητικής προσομοίωσης (π.χ. συνοριακές συνθήκες), δεδομένου του μεγάλου εύρους του καννάβου της ανάλυσης (18m, ή αλλιώς $30D$). Ωστόσο, σε περίπτωση προσομοίωσης της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης ενός αγωγού μεγαλύτερης διαμέτρου, προτείνεται ο επανέλεγχος της επίδρασης των συνόρων στην εδαφική απόκριση, αν δεν αυξηθεί το εύρος του σε $30D$.

Κεφάλαιο 6 | Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση της ανάπτυξης υπερπίεσων πόρων στις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των ισοδύναμων εδαφικών ελατηρίων, τα οποία χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των υπόγειων αγωγών. Η έρευνα επικεντρώθηκε στις περιπτώσεις της εγκάρσιας κατακόρυφης προς τα άνω και εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης διαφορετικών αγωγών. Εξετάστηκαν αγωγοί μικρής και μεγάλης διαμέτρου ($D = 0.6 \text{ m}, 1.2 \text{ m}$) και διαφορετικών τιμών λόγου εγκιβωτισμού ($H/D = 1.5, 3.0, 4.5$), ώστε να μελετηθεί η επίδραση των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών στο προφίλ του λόγου υπερπίεσων πόρων (r_u) που αναπτύσσεται υπό τη δράση διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων, και κατ' επέκταση στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης. Οι διεγέρσεις που εφαρμόστηκαν επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο λόγος $r_{u,ff}$ - μέση καθ' ύψος τιμή του λόγου r_u στο ελεύθερο πεδίο - να ισούται με 0.3, 0.5 και 1.0. Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης για τις παραπάνω τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ ισούται προσεγγιστικά με 2.5, 1.5 και ≤ 1.0 , αντίστοιχα. Για κάθε τιμή του λόγου $r_{u,ff}$ (και FS) και για κάθε αγωγό εξάχθηκε η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης, για την οποία προσδιορίστηκε στη συνέχεια η ισοδύναμη δι-γραμμική καμπύλη, καθώς στο σχεδιασμό αγωγών χρησιμοποιούνται ελαστο-πλαστικά ελατήρια με δι-γραμμική σχέση φορτίου - μετατόπισης.

Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκαν τα μεγέθη του οριακού φορτίου, της οριακής μετατόπισης και της ελαστικής στιβαρότητας των ισοδύναμων ελαστο-πλαστικών ελατηρίων σε έδαφος με λόγο $r_{u,ff}$. Τέλος, οι τιμές των μεγεθών αυτών διαιρέθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές τους σε κορεσμένο, πλήρως στραγγιζόμενο έδαφος με υδροστατικές πιέσεις πόρων, δηλαδή υπολογίστηκαν οι μειωτικοί συντελεστές κάθε μεγέθους για κάθε αγωγό και κάθε τιμή $r_{u,ff}$. Έτσι, ελέγχθηκε η ορθότητα εφαρμογής του ενιαίου μειωτικού συντελεστή οριακού φορτίου - στιβαρότητας, 3 %, ο οποίος προτείνεται να εφαρμόζεται για κάθε αγωγό και κάθε κατεύθυνση μετατόπισής του, όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο είναι πλήρως ρευστοποιημένο (O'Rourke and Liu 2012). Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνολικά από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν περιγράφονται στην παράγραφο 6.2, ενώ ακολούθως, στην παράγραφο 6.3, προτείνονται σχετικά θέματα προς μελλοντική διερεύνηση.

6.2 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, σχετικά με την κατανομή του λόγου r_u στην ευρύτερη περιοχή των αγωγών, τους μηχανισμούς παραμόρφωσης του εδάφους εξαιτίας της εγκάρσιας μετατόπισης ενός αγωγού και τις τιμές των μειωτικών συντελεστών:

α) Για κάθε αγωγό και κάθε κατεύθυνση εγκάρσιας μετατόπισής του, το οριακό φορτίο και η ελαστική στιβαρότητα φθίνουν με την αύξηση του $r_{u,ff}$ και λαμβάνουν την ελάχιστη τιμή τους όταν το έδαφος στο

ελεύθερο πεδίο ρευστοποιηθεί πλήρως ($r_{u,ff} = 1.0$). Στα προφίλ του λόγου r_u που αναπτύσσονται υπό τη δράση διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων, παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου $r_{u,ff}$ συνοδεύεται από αύξηση της μέσης τιμής του λόγου r_u στην ευρύτερη περιοχή κάθε αγωγού. Κατά συνέπεια, η αύξηση του $r_{u,ff}$ συνεπάγεται την πτώση της «μέσης» διατμητικής αντοχής και δυστημσίας του γειτονικού εδάφους, εξ' ου και η μείωση του οριακού φορτίου και της στιβαρότητας των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης. Ωστόσο, οι μειωτικοί συντελεστές των μεγεθών αυτών, για κάθε τιμή $r_{u,ff}$, εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπόγειου αγωγού, αλλά και την κατεύθυνση εγκάρσιας μετατόπισής του, σε αντίθεση με την πρόταση των O'Rourke and Liu (2012) για χρήση του ίδιου μειωτικού συντελεστή σε όλους τους αγωγούς και όλες τις κατευθύνσεις μετατόπισής τους (όταν $r_{u,ff} = 1.0$).

β) Η ποσοστιαία μείωση της οριακής μετατόπισης και της ελαστικής στιβαρότητας της ελαστοπλαστικής καμπύλης ενός εγκάρσιου ελατηρίου (οριζόντιου ή κατακόρυφου για την προς τα άνω μετατόπιση), για συγκεκριμένη τιμή του λόγου $r_{u,ff}$, εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εγκιβωτισμένου αγωγού (κυρίως το βάθος εγκιβωτισμού H/D , και λιγότερο τη διάμετρο D). Υπογραμμίζεται ότι η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών είναι λιγότερο σημαντική από την επίδραση της τιμής του λόγου $r_{u,ff}$. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι όταν το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο (μακριά από τον αγωγό) είναι πλήρως ρευστοποιημένο ($r_{u,ff} = 1.0$), η περιοχή πάνω από ένα ρηχό αγωγό ($H/D = 1.5$) αναπτύσσει μικρότερες υπερπίεσεις πόρων, οπότε διατηρεί σημαντικό ποσοστό της διατμητικής αντοχής και δυστημσίας. Βέβαια, η προστασία στο υπερκείμενο έδαφος περιορίζεται με τη μείωση της διαμέτρου D του αγωγού. Αντιθέτως, όταν ένας αγωγός είναι εγκιβωτισμένος σε μεγαλύτερο βάθος, η περιοχή πάνω από αυτόν ρευστοποιείται πλήρως, αντίστοιχα με το ελεύθερο πεδίο και ανεξάρτητα από την τιμή της διαμέτρου D . Δηλαδή, όταν $r_{u,ff} = 1.0$, οι μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου των ρηχών αγωγών είναι μεγαλύτεροι από εκείνους των βαθειά εγκιβωτισμένων αγωγών, για την ίδια κατεύθυνση εγκάρσιας μετατόπισης και την ίδια διάμετρο D .

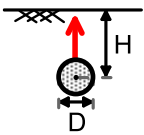
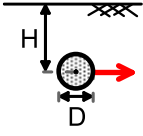
γ) Κάθε μέγεθος της ελαστο-πλαστικής καμπύλης του εγκάρσιου κατακόρυφου ελατηρίου –για την προς τα άνω μετατόπιση του αγωγού – παρουσιάζει διαφορετική ποσοστιαία μείωση, υπό την αύξηση του λόγου $r_{u,ff}$ της εδαφικής στρώσης, σε σχέση με το αντίστοιχο μέγεθος της καμπύλης του εγκάρσιου οριζόντιου ελατηρίου που συνδέεται στον ίδιο αγωγό. Ειδικότερα, για τον ίδιο αγωγό, οι μειωτικοί συντελεστές των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους μειωτικούς συντελεστές των κατακόρυφων ελατηρίων, σε έδαφος με λόγο $r_{u,ff}$. Το γεγονός αυτό αποδίδεται πιθανότατα στους διαφορετικούς μηχανισμούς εδαφικής παραμόρφωσης για τις δύο κατευθύνσεις μετατόπισης καθώς και στην κινητοποίηση διαφορετικών εδαφικών περιοχών, οι οποίες χαρακτηρίζονται εν γένει από διαφορετική κατανομή του λόγου r_u .

δ) Για ένα συγκεκριμένο αγωγό, οι μειωτικοί συντελεστές του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας της ελαστο-πλαστικής καμπύλης ενός εγκάρσιου ελατηρίου (οριζόντιου ή κατακόρυφου, για την προς τα άνω μετατόπιση) είναι διαφορετικοί μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι η οριακή μετατόπιση μειώνεται με την αύξηση της τιμής του λόγου $r_{u,ff}$ σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική για το σχεδιασμό των υπόγειων αγωγών κατά την οποία η τιμή της οριακής

μετατόπισης θεωρείται σταθερή.

ε) Ο προσδιορισμός των ελαστο-πλαστικών (δι-γραμμικών) καμπυλών των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων και του εγκάρσιου κατακόρυφου ελατηρίου για την προς τα άνω μετατόπιση ενός αγωγού σε έδαφος με σεισμικώς ανεπτυγμένες υπερπίεσεις πόρων (με λόγο $r_{u,ff} = 0.3, 0.5$ ή 1.0 και συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $FS_l > \eta$ ή < 1.0) προτείνεται να γίνεται μέσω του **Πίνακα 6.1**. Οι τιμές των μειωτικών συντελεστών για ενδιάμεσες τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ μπορούν να υπολογιστούν με γραμμική παρεμβολή. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζεται το εύρος τιμών των μειωτικών συντελεστών που προσδιορίστηκαν για τους διαφορετικούς αγωγούς, σε κάθε τιμή $r_{u,ff}$ και κάθε κατεύθυνση μετατόπισης. Επισημαίνεται ότι, σύμφωνα με όσα αναφέρονται παραπάνω, το άνω όριο των τιμών των μειωτικών συντελεστών για κάθε εγκάρσιο ελατήριο, όταν $r_{u,ff} = 1.0$, αφορά στο ρηχό αγωγό (π.χ. $H/D = 1.5$) που εξετάζεται στην εκάστοτε κατεύθυνση. Αντίστοιχα, όταν $r_{u,ff} = 0.3$ και 0.5 , στο ρηχό αγωγό αντιστοιχεί το κάτω όριο των τιμών.

Πίνακας 6.1. Μειωτικοί συντελεστές της καμπύλης φορτίου - μετατόπισης των ισοδύναμων εγκάρσιων κατακόρυφων (για την προς τα άνω μετατόπιση) και εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων σε έδαφος με λόγο $r_{u,ff}$ και συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_l .

Κατεύθυνση μετατόπισης αγωγού	Μέση καθ' ύψος τιμή του λόγου υπερπίεσεων πόρων στο ελεύθερο πεδίο ($r_{u,n}$)	Συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (FS_l)	Μειωτικοί συντελεστές (%)	
			Οριακό φορτίο	Ελαστική στιβαρότητα
	0.3	2.5	50 - 67	88 - 94
	0.5	1.5	29 - 53	70 - 85
	1.0	≤ 1.0	3.5 - 11	11 - 29
	0.5	1.5	48 - 64	71 - 88
	1.0	≤ 1.0	7 - 14	18 - 30

στ) Η πρόταση των O'Rourke and Liu (2012), για μείωση του οριακού φορτίου και της ελαστικής στιβαρότητας με εφαρμογή μειωτικού συντελεστή 3% σε κάθε ελατήριο όταν $r_{u,ff} = 1.0$, κρίνεται μη-συντηρητική (κυρίως για τα οριζόντια ελατήρια). Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τη σύγκριση του συντελεστή 3% με τις τιμές 3.5-11% και 7-14% των μειωτικών συντελεστών του οριακού φορτίου των εγκάρσιων κατακόρυφων για την προς τα άνω μετατόπιση και των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, αντίστοιχα, σύμφωνα με τον **Πίνακα 6.1** ($r_{u,ff} = 1.0$). Οι διαφορές είναι ακόμη μεγαλύτερες αν συγκρίνει κανείς το συντελεστή 3% με τις τιμές 11-29% και 18-30% των μειωτικών συντελεστών της ελαστικής στιβαρότητας των εγκάρσιων κατακόρυφων για την προς τα άνω μετατόπιση και των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, αντίστοιχα.

ζ) Η εδαφική παραμόρφωση εξαιτίας της εγκάρσιας μετατόπισης ενός αγωγού (οριζόντια ή κατακόρυφη προς τα άνω) έχει πρακτικά την ίδια μορφή είτε το έδαφος είναι πλήρως στραγγιζόμενο με υδροστατικές πιέσεις πόρων ($r_{u,ff} = 0.0$) είτε μερικώς ρευστοποιημένο ($r_{u,ff} = 0.3, 0.5$). Όταν, ωστόσο, το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο ρευστοποιηθεί πλήρως ($r_{u,ff} = 1.0$), η σχεδόν ολική απώλεια της εδαφικής αντοχής μεταβάλλει σημαντικά το μηχανισμό εδαφικής παραμόρφωσης γύρω από κάθε εγκάρσια μετατοπιζόμενο αγωγό. Αναλυτικότερα, το έδαφος «ρέει» ακολουθώντας κυκλική πορεία γύρω από έναν κατακόρυφα προς τα άνω μετατοπιζόμενο αγωγό και εμφανίζει σχεδόν οριζόντια κίνηση στη γειτονία ενός οριζόντια μετατοπιζόμενου αγωγού. Επιπλέον, για $r_{u,ff} = 1.0$ κινητοποιείται πολύ μεγαλύτερος εδαφικός όγκος, συγκριτικά με ό,τι παρατηρείται για μικρότερες τιμές $r_{u,ff}$. Επισημαίνεται ότι, για κάθε συγκεκριμένη τιμή $r_{u,ff}$, το έδαφος το έδαφος παραμορφώνεται ποιοτικά με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ανεξάρτητα από την τιμή της διαμέτρου (D) και του λόγου (H/D).

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται θέματα για μελλοντική έρευνα, τα οποία αποβλέπουν στην κατανόηση των πολύπλοκων φαινομένων της αλληλεπίδρασης αγωγού - εδάφους και τελικά στον ασφαλή αντισεισμικό σχεδιασμό των υπόγειων αγωγών σε έδαφος με σεισμικώς ανεπτυγμένες υπερπιέσεις πόρων (λόγος $r_{u,ff}$):

α) Στην παρούσα εργασία, αποφασίστηκε να γίνει τεχνητά «αριθμητικός διαχωρισμός» του φαινομένου της σεισμικής ρευστοποίησης και της μετατόπισης του αγωγού, δεδομένης της αβεβαιότητας που υπάρχει γύρω από τη χρονική στιγμή εκδήλωσης της μόνιμης εδαφικής μετατόπισης σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες υπερπιέσεων πόρων, καθώς η μετατόπιση μπορεί να συμβεί τόσο κατά τη διάρκεια ή και μετά την πλήρη ρευστοποίηση του εδάφους. Συγκεκριμένα, για κάθε σεισμική διέγερση και λόγο $r_{u,ff}$ έγινε η παραδοχή ότι η μετατόπιση του υπόγειου αγωγού λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή που το τελευταίο σεισμικό κύμα διέρχεται από τη βάση του καννάβου, οπότε το προφίλ των υπερπιέσεων πόρων που ισχύει εκείνη τη στιγμή ορίζει το πεδίο των πιέσεων πόρων μέσα στο οποίο μετατοπίζεται ο αγωγός (δεδομένου ότι εξασφαλίζεται πως οι σεισμικές υπερπιέσεις πόρων διατηρούνται σταθερές στη φάση της μετατόπισης του αγωγού). Επομένως, θα πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσο ο τεχνητός «αριθμητικός διαχωρισμός» των φαινομένων της σεισμικής ρευστοποίησης του εδάφους και της εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού δίνει πλήρως ορθά αποτελέσματα. Μία ορθότερη προσέγγιση του προβλήματος θα περιλάμβανε πιθανώς τη στατική μετατόπιση των αγωγών υπό την ταυτόχρονη επίδραση κάποιας σεισμικής διέγερσης, όπως ακριβώς έπραξαν οι Ono and Okamura (2019) για την περίπτωση της εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης, οι οποίοι όμως προσομοίωσαν το πρόβλημα πειραματικώς και όχι αριθμητικώς.

β) Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία εξετάζονται μόνο οι τιμές $r_{u,ff} = 0.3$ και 0.5 για την περίπτωση της μερικής ρευστοποίησης, θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθούν ακόμα μεγαλύτερες τιμές του λόγου $r_{u,ff}$ (μεταξύ 0.5 και 1.0) προκειμένου να γίνει πλήρως αντιληπτή η μεταβολή της αλληλεπίδρασης αγωγού - εδάφους εξαιτίας της ανάπτυξης υπερπιέσεων

πόρων. Υπενθυμίζεται ότι ο μηχανισμός εδαφικής παραμόρφωσης είτε για την εγκάρσια κατακόρυφη προς τα άνω είτε για την εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση σε έδαφος με $r_{u,ff} = 0.3$ και 0.5 είναι ποιοτικά όμοιος με τον αντίστοιχο μηχανισμό όταν $r_{u,ff} = 0.0$. Θα μπορούσε, λοιπόν, να προσδιοριστεί εκείνη η τιμή - όριο του $r_{u,ff}$ για την οποία ο μηχανισμός εδαφικής παραμόρφωσης αλλάζει σημαντικά σε σχέση με τον αντίστοιχο μηχανισμό όταν $r_{u,ff} = 0.0$, δηλαδή το έδαφος στη γειτονιά του αγωγού χάνει πρακτικά τη διατμητική αντοχή και δυστημψία του και παραμορφώνεται όπως και το πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος ($r_{u,ff} = 1.0$).

γ) Χρειάζεται να προσδιοριστούν οι μειωτικοί συντελεστές για το οριζόντιο αξονικό ελατήριο και το εγκάρσιο κατακόρυφο ελατήριο για την προς τα κάτω μετατόπιση του αγωγού, σε έδαφος με σεισμικώς ανεπτυγμένες υπερπίεσεις πόρων (λόγος $r_{u,ff} > 0.0$), τα οποία δε μελετώνται στην παρούσα εργασία, και να συγκριθούν και αυτά με την πρόταση σχεδιασμού των O'Rourke and Liu (2012). Επισημαίνεται εδώ ότι αναμένονται αντίστοιχα αποτελέσματα και για τα άλλα δύο ελατήρια, δηλαδή ότι η πρόταση των O'Rourke and Liu (2012) είναι μη-συντηρητική.

δ) Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι το έδαφος είναι ομοιογενές και ισότροπο. Ωστόσο, για μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανισοτροπία του εδάφους, η οποία αναμένεται να επηρεάσει περαιτέρω τις τιμές των μειωτικών συντελεστών των καμπυλών των ελατηρίων που τοποθετούνται στην εγκάρσια οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Πρακτικά αναμένεται να εισάγει μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του οριζόντιων και των κατακόρυφων ελατηρίων, λόγω και της διαφορετικότητας σε αντοχή και δυστημψία της οριζόντιας και κατακόρυφης φόρτισης ενός ανισοτροπικού εδάφους.

Κεφάλαιο 7 | Βιβλιογραφικές αναφορές

American Lifelines Alliance (ALA) (2001). “Guidelines for the design of buried steel pipe”. FEMA.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (1984). “Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems”. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, ASCE, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).

Andrianopoulos K. I., Papadimitriou A. G. & Bouckovalas G. D. (2010). “Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures”. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 895–911.

Arulmoli K., Muraleetharan K. K., Hossain M. M. & Fruth L. S. (1992). “VELACS: verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; Laboratory Testing Program - Soil Data Report”. *The Earth Technology Corporation*.

Been K. & Jefferies M. G. (1985). “A state parameter for sands”. *Geotechnique*, Vol. 35(2), pp. 99-112, αναφέρεται στους Andrianopoulos et al. (2010).

Bouckovalas G. D., Papadimitriou A. G., Niarchos D. G. & Tsiapas Y. Z. (2011). “Sand fabric evolution effects on drain design for liquefaction mitigation”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, pp. 1426-1439

Burnett A. J. (2015). “Investigation of full scale horizontal pipe-soil interaction and large strain behaviour of sand”. Master Thesis, Department of Civil Engineering, Queen’s University, Ontario, Canada

Chaloulos Y. K., Bouckovalas G. D., Zervos S. D. & Zampas A. L. (2015). “Lateral soil-pipeline interaction in sand backfill: effect of trench dimensions”. *Computers and Geotechnics*, Vol. 69, pp. 442-451

Chian S. C., Tokimatsu K. & Madabhushi S. P. G. (2014). “Soil liquefaction-induced uplift of underground structures: physical and numerical modeling”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 140(10), pp. 1-18

Chian S. C., Wang J., Haigh S. K. & Madabhushi S. P. G. (2015). “Soil deformation during monotonic and seismic pipe uplift in liquefiable soil”. *Journal of Pipeline Engineering*, Vol. 14 (1), pp. 33-41

Hansen J. B. (1961). “The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces”. Bulletin 12, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).

Huang B., Liu J., Ling D. & Zhou Y. (2015). “Application of particle image velocimetry (PIV) in the study of uplift mechanisms of pipe buried in medium dense sand”. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 5, pp. 599-614.

- Marinatos S. M., Zontanou V. A., Bouckovalas G. D. & Chaloulos Y. K. (2017). “Liquefaction-induced uplift of pipelines: numerical modeling and parametric analyses”. *Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Based Design (PBD-III 2017, Vancouver, Canada)*.
- Matsumoto H., Sasaki Y. & Kondo M. (1987). “Coefficient of subgrade reaction on pile in liquefied ground”. *Proceedings of the 2nd National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 827-828, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).
- Ono K. & Okamura M. (2019). “Centrifuge modeling on lateral force-displacement behavior of buried pipes in liquefied sand”. *Proceedings of 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (7ICEGE 2019, Rome, Italy)*.
- O’Rourke M. J. & Liu X. (2012). “Seismic design of buried and offshore pipelines”. MCEER Monograph No. 4, Univ. of Buffalo, Buffalo, NY.
- O’Rourke T. D., Meyersohn W. D., Shiba Y. & Chaudhuri D. (1994). “Evaluation of pile response to liquefaction-induced lateral spread”. *Proceedings of the 5th U.S. - Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction*, pp. 457-479, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).
- Papadimitriou A. G. & Bouckovalas G. D. (2002). “Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, pp. 191-204.
- Papadimitriou A., Limnaiou T. & Kypouri M. (2019a). “Mitigation of liquefaction-induced pipeline uplift using passive stabilization”. *Proceedings of 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (7ICEGE 2019, Rome, Italy)*.
- Papadimitriou A. G., Bouckovalas G. D., Douglas N. J., Valsamis A. I. (2019b). “Analysis of buried steel pipelines at watercourse crossings under liquefaction-induced lateral spreading”. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 126.
- Pipeline Research Council International (PRCI) (2009). “Guidelines for constructing natural gas and liquid hydrocarbon pipelines through areas prone to landslide and subsidence hazards”. Design, Materials and Construction Committee, PRCI
- Prevost J. H. & Popescu R. (1996). “Constitutive relations for soil materials”. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*
- Seed H. B. & Booker J. R. (1976). “Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drain systems”. *Report No. EERC 76-10, College of Engineering, University of California, Berkeley, California*
- Takada S., Tanabe K., Yamajyo K. & Katagiri S. (1987). “Liquefaction analysis for buried pipelines”. *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).

- Tanabe K. (1988). “Fundamental study on seismic assessment and design of buried pipelines subjected to ground failure during earthquake”. Doctoral Dissertation, Kobe University, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).
- Tokimatsu K. & Yoshimi Y. (1983). “Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content”. *Soils and Foundations*, Vol. 23(4), pp. 57-74
- Trautmann C. H., O’Rourke T. D. & Kulhawy F. D. (1985a). “Uplift force - displacement response of buried pipe”. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111(9), pp. 1061-1076.
- Trautmann C. H., O’Rourke T. D. (1985b). “Lateral force - displacement response of buried pipe”. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111(9), pp. 1077-1092.
- Yasuda S., Saito K. & Suzuki N. (1987), “Soil spring constant on pipe in liquefied ground”. *Proceeding of the 19th JSCE Conference on Earthquake Engineering*, pp. 189-192, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).
- Yoshida T. & Uematsu M. (1978). “Dynamic behavior of a pile in liquefaction sand”. *Proceedings of the 5th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp. 657-663, αναφέρεται στους O’Rourke M. J. & Liu X. (2012).
- Δημητριάδη Β. (2014). “Αντισεισμικός σχεδιασμός με κριτήρια επιτελεστικότητας και μέθοδοι ενίσχυσης θεμελιώσεων σε ρευστοποιήσιμα εδάφη”. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Ζωντανού Β. & Καλογεράκη Χ. (2014). “Επανεξέταση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης σε σεισμό”. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Λημναίου Τ. & Χούσου Α. (2015). “Ανάλυση αγωγού σε διασταύρωση με «κανονικό» ρήγμα: Επίδραση διαστάσεων τάφρου θεμελίωσης”. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μαρινάτου Σ. (2016). “Φαινόμενα άνωσης υπόγειων αγωγών σε ρευστοποιημένο έδαφος: αριθμητική διερεύνηση”. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα