

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



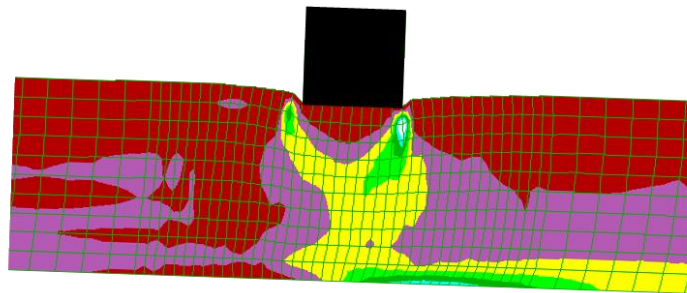
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
GEOTECHNICAL DEPARTMENT

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόκριση άκαμπτων κατασκευών υπό πλευρική εξάπλωση λόγω ήπιας κλίσης ρευστοποιημένου εδάφους

Αλ Σοχήτα Αλισάρ

Επιβλέπων: Παπαδημητρίου Γ. Αχιλλέας, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ



DIPLOMA THESIS

Response of rigid structures under lateral spreading due to gently sloping liquefied soil

Al Sochita Alisar

Supervisor: Papadimitrou G. Achilleas, Associate Professor NTUA

Αθήνα, Οκτώβριος 2024 / Athens, October 2024

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Περιγραφή του προβλήματος.....	1
1.2	Στόχος της εργασίας.....	3
1.3	Διάρθρωση της εργασίας.....	3
2	Βιβλιογραφική Διερεύνηση	5
2.1	Γενικά.....	5
2.2	Εκτίμηση της μετατόπισης εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης	5
2.2.1	Εμπειρικές μέθοδοι.....	5
2.2.2	Μέθοδοι με βάση αριθμητικές αναλύσεις	8
2.3	Επιφανειακά θεμελιωμένες κατασκευές σε ρευστοποιήσιμο έδαφος	10
2.3.1	Σημαντικές παράμετροι προβλήματος για οριζόντιο έδαφος	10
2.3.2	Σημαντικές παράμετροι του προβλήματος για ήπια κεκλιμένο έδαφος.....	13
3	Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων	15
3.1	Γενικά.....	15
3.2	Καταστατική προσομοίωση εδάφους.....	15
3.2.1	Άμμος.....	15
3.2.2	Αργίλος	16
3.3	Διακριτοποίηση εδάφους	16
3.4	Προσομοίωση κατασκευών.....	17
3.5	Σεισμική διέγερση και απόσβεση	18
3.6	Συνοριακές συνθήκες.....	19
3.7	Έλεγχος αξιοπιστίας αριθμητικής μεθοδολογίας.....	19
4	Απόκριση κατασκευής υπό πλευρική εξάπλωση	23
4.1	Γενικά.....	23
4.2	Τυπική απόκριση κατασκευής.....	24
4.3	Επίδραση κλίσης εδάφους.....	29
4.4	Επίδραση φορτίου κατασκευής	32
4.5	Επίδραση εύρους κατασκευής.....	36
4.6	Επίδραση ύψους κατασκευής.....	39
4.7	Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης.....	42
5	Σύνοψη αποτελεσμάτων για την απόκριση κατασκευών υπό πλευρική εξάπλωση .	46
5.1	Γενικά.....	46
5.2	Καθίζηση κατασκευής	49
5.3	Οριζόντια μετατόπιση κατασκευής.....	55
5.4	Στροφή κατασκευής.....	61

5.5	Προσεγγιστικές σχέσεις εκτίμησης λόγων απόκρισης	66
6	Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	77
6.1	Βασικά συμπεράσματα	77
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	79
	Βιβλιογραφία.....	81
	Παράρτημα Α: Λεπτομερή αποτελέσματα αναλύσεων	85

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παπαδημητρίου Αχιλλέα για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις ουσιαστικές συμβουλές που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Η εμπιστοσύνη και ο χρόνος που μου διέθεσε υπήρξαν καθοριστικοί για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Περίληψη

Ρευστοποίηση εμφανίζεται όταν η πίεση πόρων σε κορεσμένα χαλαρά κοκκώδη εδάφη αυξάνεται κατά τη διάρκεια σεισμικής δόνησης, με αποτέλεσμα τον σχεδόν μηδενισμό της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αν το φαινόμενο εμφανιστεί σε ήπια επικλινή εδάφη προκαλείται πλευρική εξάπλωση αυτών, που είναι ιδιαίτερα δυσμενής για τις εκεί θεμελιωμένες κατασκευές. Παρόλο που υπάρχουν αρκετές μελέτες για την πλευρική εξάπλωση σε ελεύθερο πεδίο (χωρίς κατασκευή), η απόκριση κατασκευών σε ήπια κεκλιμένα εδάφη υπό αυτές τις συνθήκες δεν έχει μελετηθεί συστηματικά. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς επιφανειακά θεμελιωμένων, άκαμπτων κατασκευών που βρίσκονται σε ήπια επικλινή εδάφη ευάλωτα στη ρευστοποίηση, με έμφαση στις καθιζήσεις, τις οριζόντιες μετακινήσεις και τις στροφές αυτών στο τέλος της δόνησης.

Η παρούσα εργασία αποτελεί παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης επιφανειακά θεμελιωμένων κατασκευών σε ήπια κεκλιμένα ρευστοποιήσιμα εδάφη μέσω δυναμικών αναλύσεων, οι οποίες υλοποιήθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο λογισμικό FLAC2D (Itasca 2005). Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 54 δισδιάστατες αναλύσεις, όπου η συμπεριφορά της ρευστοποιήσιμης στρώσης προσομοιώθηκε με το NTUA-SAND, θεωρώντας ότι χαρακτηρίζεται από σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$. Στο έδαφος επιβάλλεται οριζόντια αρμονική διέγερση βάσης με αριθμό σημαντικών κύκλων $N = 10$, περίοδο $T = 0.35$ s και μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$, η οποία ρευστοποιεί τη στρώση σε 1-2 κύκλους. Οι άκαμπτες κατασκευές προσομοιώθηκαν απλουστευτικά είτε ως φορτισμένα αβαρή θεμέλια, ή ως αφόρτιστα σώματα με κατάλληλο ειδικό βάρος που αποδίδει την επιθυμητή τιμή φορτίου.

Στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης, εξετάστηκαν παράμετροι όπως η γωνία κλίσης του εδάφους ($i = 0.3^\circ, 2.0^\circ, 3.4^\circ$), το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης ($H_L = 5, 10$ m), το εύρος της κατασκευής ($B = 5, 20$ m), το φορτίο της κατασκευής ($q = 50, 100, 200$ kPa) και το ύψος της κατασκευής ($L = 1, 5, 10$ m). Η μελέτη επικεντρώθηκε σε δύο κανονικοποιημένους λόγους απόκρισης: τον λόγο καθιζήσεων z/z_0 (όπου z η μέση καθίζηση της κατασκευής εδραζόμενης σε έδαφος ήπιας κλίσης και z_0 η ομοιόμορφη καθίζηση της ίδιας κατασκευής υπό την ίδια διέγερση αν το ίδιο έδαφος ήταν οριζόντιο) και τον λόγο οριζόντιων μετατοπίσεων x/x_{ff} (όπου x η οριζόντια μετακίνηση της κατασκευής προς τα κατάντη και x_{ff} η αντίστοιχη οριζόντια μετακίνηση της στρώσης σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, μακριά από την κατασκευή, υπό την ίδια διέγερση). Η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων αποσκοπεί στην εξάλειψη της επίδρασης της διέγερσης βάσης, καθώς και στην χρήση εμπειρικών σχέσεων από τη βιβλιογραφία για τους παρονομαστές των λόγων (τα μεγέθη z_0 και x_{ff}). Έτσι επιτυγχάνεται η γενίκευση των αποτελεσμάτων για οποιοδήποτε κατασκευές και ρευστοποιήσιμες στρώσεις, πάντα υπό τους περιορισμούς της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, διερευνήθηκε η στροφή θ της κατασκευής προς τα κατάντη της κεκλιμένης στρώσης, η οποία όμως δεν ήταν δυνατόν να κανονικοποιηθεί δεδομένου ότι οι κατασκευές δεν εμφανίζουν στροφή αν το έδαφος είναι οριζόντιο, ενώ δεν νοείται στροφή του ελεύθερου πεδίου.

Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι μια στενή κατασκευή θεμελιωμένη σε ήπια κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση εμφανίζει αυξημένη καθίζηση σε σύγκριση με το αν το έδαφος ήταν οριζόντιο ($z/z_0 > 1$) και μειωμένη οριζόντια μετακίνηση σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο ($x/x_{ff} < 1$), αναπτύσσοντας ταυτόχρονα στροφή προς τα κατάντη. Οι παρατηρήσεις αυτές σχετίζονται με τη δημιουργία ενός ασύμμετρου μηχανισμού αστοχίας στο επικλινές έδαφος θεμελίωσης, λόγω της συνένωσης του με τον μηχανισμό αστοχίας της πλευρικής εξάπλωσης που αναπτύσσεται στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Η ασυμμετρία αυτή δεν παρατηρείται αν το έδαφος είναι οριζόντιο, αφού δεν υπάρχει πλευρική εξάπλωση. Η αύξηση της γωνίας κλίσης i του εδάφους οδηγεί σε αύξηση της καθίζησης z , της οριζόντιας μετακίνησης x και της στροφής θ , ενώ η αύξηση του φορτίου q της κατασκευής

αυξάνει την καθίζηση z και τη στροφή θ , αλλά όχι την οριζόντια μετακίνηση x . Επιπλέον, η αύξηση του εύρους της κατασκευής B μειώνει και τα τρία μεγέθη απόκρισης (z , x και θ), ενώ η αύξηση του ύψους L της κατασκευής επηρεάζει κυρίως τη στροφή θ μειωτικά. Τέλος, η αύξηση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L αυξάνει και τα τρία μεγέθη απόκρισης (z , x και θ) της κατασκευής.

Σύμφωνα με το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει ότι ο λόγος καθιζήσεων z/z_0 αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου της κατασκευής q και της γωνίας κλίσης του εδάφους i , ενώ το ύψος της κατασκευής L δεν παρουσιάζει συστηματική επίδραση (αν το φορτίο q και το πλάτος B μένουν σταθερά). Αντίθετα, η αύξηση του πλάτους της κατασκευής B (για το ίδιο ύψος L και φορτίο q) και του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L οδηγεί σε μείωση του λόγου καθιζήσεων z/z_0 , με τον λόγο να κυμαίνεται από 0.76 έως 1.43, και στο 54% των περιπτώσεων να υπερβαίνει το 1.0. Αντίστοιχα, ο λόγος οριζόντιων μετακινήσεων x/x_{ff} αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας κλίσης του εδάφους i για τιμές $i \leq 2^\circ$, ενώ για μεγαλύτερες τιμές δεν παρατηρείται συστηματική επίδραση. Η αύξηση του ύψους της κατασκευής L και, σε μικρότερο βαθμό, η αύξηση του λόγου πλάτους κατασκευής προς πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης B/H_L μειώνουν τον λόγο x/x_{ff} . Συνολικά, στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, ο λόγος αυτός κυμαίνεται από 0.23 έως 1.41, με το 87% των περιπτώσεων να έχουν τιμές κάτω από 1,0. Η εργασία προτείνει ενδεικτικές σχέσεις εκτίμησης των ανωτέρω κανονικοποιημένων λόγων απόκρισης μετά από μη-γραμμική παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που οδηγούν σε πολύ-παραμετρικές σχέσεις με με σχετικό σφάλμα $\pm 7.6\%$ και $\pm 29.2\%$ για τους λόγους z/z_0 και x/x_{ff} , αντίστοιχα. Αναφορικά με τη γωνία στροφής θ προς τα κατόντη, προκύπτει ότι η αύξηση του φορτίου q και του πάχους H_L αυξάνουν τη στροφή, ενώ το πλάτος B και το ύψος L έχουν μειωτική επίδραση. Πιο γενικά, η αύξηση του λόγου B/H_L έχει μειωτική επίδραση στη γωνία στροφής, η οποία φτάνει σε μηδενική τιμή για $B/H_L \geq 1.0$. Το εύρος της γωνίας στροφής κυμαίνεται από 0° έως 3° στις αναλύσεις, με το 82% των περιπτώσεων να παρουσιάζουν στροφή μικρότερη από τη γωνία κλίσης του εδάφους i . Ωστόσο, η εξάρτηση των αποτελεσμάτων της στροφής από τη διέγερση βάσης καθιστά δύσκολη τη γενίκευση των ευρημάτων.

Abstract

Liquefaction occurs when pore pressure increases in saturated loose granular soils during seismic shaking, resulting in the nearly complete loss of the soil's shear strength. If the phenomenon occurs in gently sloping soil it causes lateral spreading, which is particularly detrimental to thereby founded structures. Although there are several studies on lateral spreading in free field conditions (i.e., without the presence of a structure), the response of structures on gently sloping soil under these conditions has not been systematically studied. The aim of this thesis is to investigate the behavior of rigid structures founded at the surface of gently sloping liquefiable soils, focusing on their settlements, horizontal displacements and rotations at the end of the shaking.

Specifically, this thesis comprises a parametric investigation of the response of such structures via dynamic analyses, executed via the finite difference method with the FLAC2D software (Itasca 2005). A total of 54 two-dimensional analyses were performed, where the behavior of the liquefiable layer was simulated using the NTUA-SAND model, assuming a relative density of $Dr = 45\%$. The soil is subjected to a horizontal harmonic base excitation with a number of significant cycles $N = 10$, a period $T = 0.35$ s, and a maximum acceleration $\alpha_{max} = 0.2g$, which liquefies the layer during the first 1-2 cycles. The rigid structures were simplistically simulated either as loaded weightless foundations or as load-free bodies with an appropriate unit weight value that provides the desired load at the ground surface.

In the context of this investigation, the examined parameters include the soil slope angle ($i = 0.3^\circ, 2.0^\circ, 3.4^\circ$), the thickness of the liquefiable layer ($H_L = 5, 10$ m), the width of the structure ($B = 5, 20$ m), as well as its load ($q = 50, 100, 200$ kPa) and its height ($L = 1, 5, 10$ m). The study focused on two normalized response ratios: the settlement ratio z/z_0 (where z is the average settlement of the structure founded on gently sloping soil and z_0 is the uniform settlement of the same structure under the same excitation if the soil was horizontal) and the horizontal displacement ratio x/x_{ff} (where x is the horizontal downstream displacement of the structure and x_{ff} is the corresponding horizontal displacements of the layer under free-field conditions under the same excitation). The normalization of the results aims to eliminate the effect of the base excitation and enables the use of empirical relationships from the literature for estimating the denominators of the ratios (quantities z_0 and x_{ff}). This procedure allows the generalization of the results for any structures and liquefiable layers, always within the limitations of this study. In addition, the downstream rotation θ of the structure downstream was similarly investigated. However, this parameter could not be normalized since structures do not exhibit rotation if the ground is horizontal, while there is no such thing as rotation of the ground surface .

The analyses indicate that a narrow structure founded on a gentle sloping liquefiable soil layer exhibits increased settlement in comparison to what would be observed if the ground was horizontal ($z/z_0 > 1$). In addition, it exhibits reduced horizontal displacement compared to the free field ($x/x_{ff} < 1$), while developing a downstream rotation θ . These observations are related to the formation of an asymmetric failure mechanism in the sloping foundation soil, due to its connection to the failure mechanism of lateral spreading that develops at the bottom of the soil layer. This asymmetry is not observed if the ground is horizontal, since there is no lateral spreading. The results show that increasing the slope angle i of the ground leads to an increase in settlement z , horizontal displacement x and rotation θ , while increasing the load q of the structure increases the settlement z and rotation θ , but not the horizontal displacement x . Additionally, increasing the width B of the structure reduces all three response parameters (settlement z , horizontal displacement x , and rotation θ), while increasing the height L of the

structure primarily affects the rotation θ in an inverse manner. Lastly, increasing the thickness of the liquefiable layer H_L increases all three response quantities (settlement z , horizontal displacement x , and rotation θ) of the structure.

Furthermore, the performed analyses show that the settlement ratio z/z_0 increases with increasing structure load q and slope angle i , while the height of the structure L does not show a systematic effect (provided that the load q and the width B remain constant). On the contrary, increasing the width of the structure B (for the same height L and load q) and the thickness of the liquefiable layer H_L leads to a decrease in the settlement ratio z/z_0 . Overall, in the performed analyses, this ratio ranges from 0.76 to 1.43 and in 54% of cases it exceeds 1.0. Correspondingly, the horizontal displacement ratio x/x_{ff} increases with increasing slope angle i for values $i \leq 2^\circ$, while for larger angle i values no systematic effect is observed. Increasing the height of the structure L and, to a lesser degree, increasing the ratio of structure width to liquefiable layer thickness B/H_L decreases the x/x_{ff} ratio. As a whole, in the performed analyses, this ratio ranges from 0.23 to 1.41, with 87% of cases having values below 1.0. The study also proposes indicative relations for estimating the aforementioned normalized response ratios after non-linear regression of the results of the numerical analyses leading to multi-variable relations with a relative error of $\pm 7.6\%$ and $\pm 29.2\%$ for the ratios z/z_0 and x/x_{ff} , respectively. Regarding the downward rotation θ , it can be deduced that increasing the load q and the thickness H_L increases the rotation, while the width B and the height L have a decreasing effect. In general, increasing the B/H_L ratio has a decreasing effect on rotation θ , which reaches a zero value for $B/H_L \geq 1.0$. The rotation angle θ varies from 0° to 3° in the performed analyses, with 82% of the cases showing a rotation less than the slope angle i of the ground. However, and unlike the ratios z/z_0 and x/x_{ff} , the dependence of the rotation results on the base excitation makes it difficult to generalize these specific findings.

1 Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Οι εδαφικοί σχηματισμοί που αποτελούνται από κορεσμένα, χαλαρά και κοκκώδη υλικά, όπως άμμοι, αμμοχάλικα και μη πλαστικές ιλύες, είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι σε φαινόμενα σεισμικής ρευστοποίησης. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης λαμβάνει χώρα όταν οι πιέσεις πόρων στο έδαφος αυξάνονται σημαντικά κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, φτάνοντας να εξισωθούν με τις ολικές κατακόρυφες τάσεις. Αυτή η συνθήκη οδηγεί σε σημαντική μείωση (σχεδόν μηδενισμό) της στιβαρότητας και της διατμητικής αντοχής του εδάφους, με αποτέλεσμα το έδαφος να συμπεριφέρεται αδρά ως παχύρρευστο υγρό.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που σχετίζονται με τη ρευστοποίηση σε επικλινή εδάφη ή σε περιοχές πλησίον αναβαθμού (ελεύθερο μέτωπο), όπως στις όχθες ποταμών, λιμνών ή θαλασσών, είναι το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης. Η πλευρική εξάπλωση λαμβάνει χώρα όταν το έδαφος μετακινείται (κυρίως) οριζόντια υπό την επίδραση συνδυασμένων στατικών και αδρανειακών δυνάμεων, συμπαρασύροντας επιφανειακά θεμελιωμένες κατασκευές ή επιβαρύνοντας (έως αστοχίας) τις βαθιές θεμελιώσεις αυτών.

Η επικινδυνότητα της ρευστοποίησης έχει αποδειχθεί σε πολλές περιοχές του κόσμου, όπου έχουν σημειωθεί σημαντικές σεισμικές δονήσεις. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τον σεισμό στην Αλάσκα το 1964 όπου η ρευστοποίηση προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές, καθώς και τους σεισμούς San Fernando το 1971 και Loma Prieta το 1989 στην Καλιφόρνια. Στην Ιαπωνία, ο σεισμός του Kobe το 1995 ήταν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μεγάλων καταστροφών από ρευστοποίηση, όπως και οι σεισμοί του Chi-Chi στην Ταϊβάν το 1999. Αντίστοιχα φαινόμενα καταγράφηκαν και στον σεισμό της Sichuan το 2008 στην Κίνα, καθώς και στη Νέα Ζηλανδία τα 2010-2011, όπου η ρευστοποίηση επηρέασε σημαντικά τις υποδομές της πόλης του Christchurch. Αυτά τα παραδείγματα αναδεικνύουν τη σημασία της μελέτης αυτού του παγκόσμιου φαινομένου, καθώς οι περιοχές με υψηλή σεισμικότητα και κοκκώδη, χαλαρά κορεσμένα εδάφη είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε ρευστοποίηση.

Ενδεικτικά, ορισμένες από τις καταστροφικές επιπτώσεις που προκλήθηκαν στα κτίρια λόγω ρευστοποίησης του εδάφους από τον σεισμό που έπληξε την πόλη Wufeng στην Ταϊβάν, στις 21 Σεπτεμβρίου 1999 με μέγεθος $M_w = 7.6$ παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 1.1** φαίνεται η καθίζηση που υπέστησαν τα συνδεδεμένα θεμέλια κτιρίου, καθώς και το ανασήκωμα και η επακόλουθη θραύση των πλακών των δαπέδων. Επίσης, στο **Σχήμα 1.2** απεικονίζεται ένα κτίριο το οποίο παρουσίασε σημαντική στροφή και η βάση του ανασηκώθηκε από το έδαφος λόγω ανατροπής.

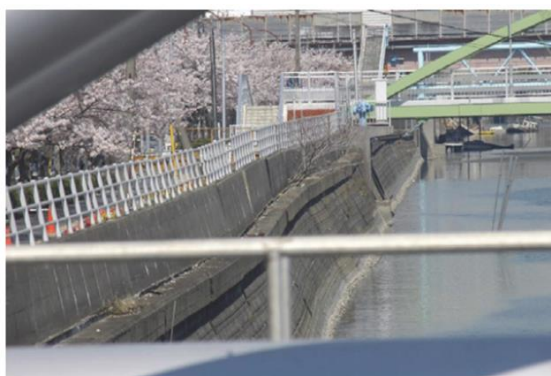


Σχήμα 1.1: Μετά από καθίζηση της θεμελίωσης, προέκυψε ανασήκωμα του εδάφους κατά 1 m (Chu et al., 2004)



Σχήμα 1.2: Κτίριο που έχει ανατραπεί λόγω μεγάλης στροφής (Chu et al., 2004)

Ένα πιο πρόσφατο γεγονός με καταστροφικές συνέπειες στις κατασκευές λόγω ρευστοποίησης του εδάφους αποτελεί ο σεισμός μεγέθους $M_w = 9$ που σημειώθηκε στην περιοχή Tohoku της βορειοανατολικής Ιαπωνίας και στην περιοχή Kanto γύρω από το Tokyo το 2011. Η πόλη που υπέστη τις περισσότερες ζημιές ήταν η πόλη Urayasu, της οποίας η περιοχή ρευστοποιήθηκε σε ποσοστό 85% με αποτέλεσμα την εκτεταμένη καταστροφή ξύλινων σπιτιών, δρόμων, υπόγειων αγωγών, δεξαμενών πετρελαίου, λιμενικών έργων και ενός φράγματος αποβλήτων. Στο **Σχήμα 1.3** απεικονίζεται ένας τοίχος της περιοχής που υπέστη οριζόντια μετακίνηση και καθίζηση, ενώ στο **Σχήμα 1.4** φαίνονται σπίτια που καθίζαναν και έστριψαν εξαιτίας της ρευστοποίησης του εδάφους, όλα στην πόλη Urayasu.



Σχήμα 1.3: Τοίχος που έχει υποστεί μετακίνηση και καθίζηση (Yasuda et al., 2013)



Σχήμα 1.4: Σπίτια που έχουν υποστεί καθίζηση και στρόφη (Yasuda et al., 2013)

Τα παραπάνω παραδείγματα αναφέρθηκαν ενδεικτικά ως μερικά από τα πολλά περιστατικά όπου η ρευστοποίηση του εδάφους αποδείχθηκε καταστροφική για τις κατασκευές, ανεξάρτητα από τον ορθό σχεδιασμό της ανωδομής τους. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της λεπτομερούς διερεύνησης του μηχανισμού της απόκρισης των κατασκευών όταν αυτές βρίσκονται σε ρευστοποιήσιμα εδάφη ή/και εδάφη που μπορεί να υποστούν πλευρική εξάπλωση, καθώς και των παραγόντων που επηρεάζουν την συμπεριφορά τους.

1.2 Στόχος της εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς επιφανειακά θεμελιωμένων κατασκευών που βρίσκονται σε ρευστοποιήσιμα εδάφη με ήπια κλίση, με έμφαση στις καθιζήσεις, τις οριζόντιες μετακινήσεις και τις στροφές που προκύπτουν μετά από ισχυρή διέγερση. Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας προέκυψε από τη μελέτη της βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα, ενώ υπάρχουν πολλές μελέτες που εξετάζουν την πλευρική εξάπλωση σε ελεύθερο πεδίο και άλλες που αφορούν στην απόκριση κατασκευών σε οριζόντιο ρευστοποιημένο έδαφος, δεν συμβαίνει το ίδιο και για τον συνδυασμό των δύο. Δηλαδή δεν υπάρχουν πολλές συστηματικές μελέτες που να εστιάζουν στην απόκριση κατασκευών σε κεκλιμένο έδαφος υπό συνθήκες πλευρικής εξάπλωσης. Συνεπώς υπάρχει ένα σημαντικό κενό στην κατανόηση της τυπικής απόκρισης των κατασκευών υπό πλευρική εξάπλωση και των κύριων παραμέτρων που την καθορίζουν, ένα κενό που η παρούσα εργασία στοχεύει να καλύψει μερικώς. Η προσπάθεια αυτή θα γίνει αριθμητικά, μέσω παραμετρικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης ρευστοποιήσιμου εδάφους υπό ήπια κλίση με και χωρίς επιφανειακά θεμελιωμένη κατασκευή.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου. Συνοπτικά:

Στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται βιβλιογραφική διερεύνηση με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών καταπόνησης επιφανειακά θεμελιωμένων κατασκευών κατά τη διάρκεια πλευρικής εξάπλωσης λόγω σεισμικής ρευστοποίησης. Γίνεται αναφορά στις μεθόδους εκτίμησης της πλευρικής εξάπλωσης σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, καθώς και στους παράγοντες που επηρεάζουν την καταπόνηση των κατασκευών σε ρευστοποιήσιμα εδάφη.

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των δισδιάστατων αναλύσεων προσομοίωσης του εδάφους και των κατασκευών. Περιγράφεται το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC2D (Itasca 2005), το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND για ρευστοποιήσιμο έδαφος, οι βασικές παραδοχές σχετικά με τον κάρναβο, τα χαρακτηριστικά των κατασκευών, την σεισμική διέγερση και τις συνοριακές συνθήκες. Επίσης, γίνεται έλεγχος της αξιοπιστίας της αριθμητικής μεθοδολογίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απόκρισης τυπικής κατασκευής εδραζόμενης σε ήπια κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη στρώση υπό σεισμική διέγερση όπως προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις. Γίνεται παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης του εδάφους, του φορτίου, εύρους και ύψους της κατασκευής και του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης και δίνεται έμφαση στην καθίζηση, οριζόντια μετακίνηση και στροφή της κατασκευής.

Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία του συνόλου των αναλύσεων και αξιολογείται η επίδραση κάθε παραμέτρου στην καθίζηση, οριζόντια μετατόπιση και στροφή των κατασκευών κατά τη διάρκεια πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης. Ως απόκριση αναφοράς για την καθίζηση θεωρείται η καθίζηση της ίδιας κατασκευής στο ίδιο έδαφος υπό την ίδια διέγερση, αν το έδαφος ήταν οριζόντιο. Αντίστοιχα, ως απόκριση αναφοράς για την οριζόντια μετακίνηση θεωρείται η οριζόντια μετακίνηση του εδάφους χωρίς ή μακριά από την κατασκευή (ελεύθερο πεδίο). Δεν υπάρχει απόκριση αναφοράς για την στροφή.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα με στόχο την περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς των κατασκευών υπό πλευρική εξάπλωση.

2 Βιβλιογραφική Διερεύνηση

2.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών καταπόνησης επιφανειακά θεμελιωμένων κατασκευών κατά τη διάρκεια πλευρικής εξάπλωσης λόγω σεισμικής ρευστοποίησης. Αρχικά, στην παράγραφο 2.2, γίνεται αναφορά στις μεθόδους εκτίμησης της πλευρικής εξάπλωσης σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου με κύριο στόχο τον εντοπισμό των βασικών παραμέτρων του προβλήματος. Στη συνέχεια, στην παράγραφο 2.3, η έμφαση δίνεται στην καταπόνηση των κατασκευών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, είτε αυτό είναι οριζόντιο είτε αυτό είναι ήπια κεκλιμένο, και από τι εξαρτάται αυτή. Έτσι, προκύπτουν συνολικά οι σημαντικές παράμετροι του υπό μελέτη προβλήματος, ως οδηγοί για την παραμετρική αριθμητική διερεύνηση που πραγματοποιείται εδώ.

2.2 Εκτίμηση της μετατόπισης εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης

Μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί διάφορες προσεγγίσεις για την εκτίμηση του μεγέθους της πλευρικής μετατόπισης της επιφάνειας του εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Μπορούν να ταξινομηθούν σε εκείνες που στηρίζονται: α) σε εμπειρικές μεθόδους, ήτοι με βάση στατιστική επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων (π.χ. με μη-πολύ-γραμμική παλινδρόμηση ή με χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης) και β) σε αποτελέσματα από παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις (π.χ. με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών). Παρακάτω γίνεται ξεχωριστή αναφορά στις δύο ομάδες μεθόδων με στόχο τον εντοπισμό των κύριων παραμέτρων του προβλήματος της πλευρικής εξάπλωσης.

2.2.1 Εμπειρικές μέθοδοι

Η χρήση εμπειρικών μεθόδων αποτελεί αποτελεσματικό τρόπο για τον υπολογισμό της πλευρικής εξάπλωσης εδάφους σε ρευστοποιήσιμα εδάφη. Παραδείγματα εμπειρικών σχέσεων που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό αναφέρονται παρακάτω.

Πρώτα αναφέρεται η σχέση των Bartlett και Youd (1992, 1995), που αφορά στον υπολογισμό της πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους D_H και αναπτύχθηκε με την χρήση πολυ-γραμμικής παλινδρόμησης από μια μεγάλη βάση δεδομένων από σεισμικά γεγονότα. Παράμετροι της σχέσης αποτελούν το μέγεθος του σεισμού M , η πλησιέστερη οριζόντια απόσταση από την σεισμική πηγή R (km), το συνολικό πάχος T_{15} (m) των κορεσμένων ρευστοποιήσιμων εδαφικών στρωμάτων με διορθωμένο αριθμό κρούσεων $(N_1)_{60} < 15$, το (μέσο) ποσοστό λεπτόκοκκων F_{15} (%) που περιέχεται στο συνολικό πάχος T_{15} των ρευστοποιήσιμων στρώσεων, το μέσο μέγεθος του κόκκου $D_{50_{15}}$ (mm) των εδαφικών στρώσεων που περιέχονται στο πάχος T_{15} , η κλίση του εδάφους S (%) αν πρόκειται για έδαφος μακριά από αναβαθμό και ο λόγος W (%) του ύψους H του αναβαθμού προς την απόσταση L από τον πόδα του αναβαθμού μέχρι το σημείο ενδιαφέροντος. Η μορφή της σχέσης είναι:

$$\log D_H = b_0 + b_{off} + b_1 M + b_2 \log R + b_3 R + b_4 \log W + b_5 \log S + b_6 \log T_{15} + b_7 \log(100 - F)_{15} + b_8 D_{50_{15}} \quad (2.1)$$

Οι συντελεστές της σχέσης (2.1) δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Parameters	Constants		M	$\log R$	R	$\log W$	$\log S$	$\log T_{15}$	$\log (100-F_{15})$	$D50_{15}$	Regression coefficient
Coefficients	b_o	b_{off}	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	R_c^2
Values	-15.787	-0.579	1.178	-0.927	-0.013	0.637	0.429	0.348	4.527	-0.922	82.6

Πίνακας 2.1: Συντελεστές πολύ-γραμμικής παλινδρόμησης της σχέσης 2.1 που προσδιορίζονται από τους Bartlett και Youd (1992, 1995)

Μετά την ευρεία χρήση της στη γεωτεχνική μηχανική βελτιώθηκε με ορισμένες διορθώσεις και συμπληρώσεις νέων ιστορικών περιστατικών από τους Youd et al. (2002). Ένα παράδειγμα διόρθωσης είναι ότι εξαιτίας της πρόβλεψης τεράστιων μετακινήσεων όταν η οριζόντια απόσταση R πλησιάζει στο μηδέν, η μορφή του όρου της σχετικής συνάρτησης από $\log(R)$ μετατράπηκε σε $\log(R^*)$ όπου $R^*=R+R_o$ και $R_o=10^{(0.89M-5.64)}$, όπου M το μέγεθος του σεισμού όπως προαναφέρθηκε. Τελικώς, προέκυψαν δύο (2) σχέσεις, μια για περιοχή πλησίον αναβαθμού (σχέση 2.2) και μια για συνθήκες ήπια επικλινούς εδάφους (σχέση 2.3), αντίστοιχα:

$$\log D_H = -16.713 + 1.532M - 1.406 \log R^* - 0.012R + 0.592 \log W + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F)_{15} - 0.795 \log(D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) \quad (2.2)$$

$$\log D_H = -16.213 + 1.532M - 1.406 \log R^* - 0.012R + 0.338 \log S + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F)_{15} - 0.795 \log(D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) \quad (2.3)$$

Σχετικά με την εφαρμογή και εγκυρότητα των εξισώσεων είναι σημαντικό να αναφερθεί πως πριν τη χρήση τους είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί η τυπική διαδικασία για τον χαρακτηρισμό του εδάφους ως ρευστοποιήσιμο ή μη, καθώς δεν αναπτύσσεται πλευρική εξάπλωση σε ένα μη ρευστοποιήσιμο έδαφος. Ακόμη, οι σχέσεις προέρχονται από γεγονότα σεισμών με $M = 6$ έως 8 , και η χρήση τους για άλλο μέγεθος M καθιστά τα αποτελέσματα ανακριβή. Επισημαίνεται ότι σε περίπτωση που ο λόγος W είναι μεγαλύτερος από 20% ($L < 5H$) η σχέση (2.2) μπορεί να υποεκτιμήσει τις μετακινήσεις, ενώ για κλίση εδάφους S μεγαλύτερη από 6% όμοια η σχέση (2.3) προβλέπει μικρότερες μετακινήσεις από τις πραγματικές. Εναλλακτικά, συνιστάται η χρήση της μεγαλύτερης τιμής από τις δύο σχέσεις, αν υπάρχει αναβαθμός και έδαφος με ήπια κλίση.

Αντίστοιχα, οι Hamada et al. (1987) βασισμένοι σε παρατηρήσεις των σεισμών Niigata 1964 και Nihonkai-Chubu 1983 έχουν προτείνει για τον υπολογισμό της μετακίνησης D_H (m) την παρακάτω σχέση χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος H_L (m) και την κλίση της επιφάνειας του εδάφους S (%), αποκλειστικά για συνθήκες ήπιας κλίσης.

$$D_H = 0.75 H_L^{0.5} S^{1/3} \quad (2.4)$$

Αργότερα, οι Hamada et al. (1999) αναφέρθηκαν και σε άλλες σημαντικές παραμέτρους για την ακριβέστερη προσέγγιση του υπολογισμού της πλευρικής εξάπλωσης για συνθήκες ήπιας κλίσης, δηλαδή την χρονική διάρκεια T_i (s) ενός μέρους i της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης της διέγερσης, τη μέση οριζόντια επιτάχυνση της διέγερσης a_i (g) της χρονικής διάρκειας i και τον μέσο διορθωμένο αριθμό κρούσεων SPT N καταλήγοντας σε μια νέα σχέση:

$$D_H = \frac{0.125 H_L^{0.5} \theta}{N^{0.88}} \sum a_i^{0.48} T_i \quad (2.5)$$

Πιο πρόσφατα, οι Jafarian και Nasri (2016) πραγματοποίησαν μια παραμετρική μελέτη και σύγκριση των σημαντικότερων διαθέσιμων εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού της πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους από το 1986 έως και το 2013. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε σημαντική απόκλιση των σχέσεων του Youd et al. (2002), Kanibir (2003) και Javadi et al. (2006), ως προς την υπολογιζόμενη μετατόπιση D_H και το συνολικό πάχος των

ρευστοποιήσιμων εδαφικών στρωμάτων T_{15} , δεδομένων των αβεβαιοτήτων και των διαφορών στις βάσεις δεδομένων. Τελικώς, λαμβάνοντας υπόψη τις όποιες αβεβαιότητες, προτείνονται δύο εμπειρικές σχέσεις, μια για πλησίον αναβαθμού (2.6) και μια για ήπια κεκλιμένο έδαφος (2.7):

$$\log D_H = -17.95 + (1.605M_W) - (1.8673 \log R^*) - (\log(R + 20))^{(-3.3836)} + (0.5471 \log W) + (0.4431 \log T_{15}) + (4.1873 \log(100 - F_{15})) - 0.7666 \log(D_{5015} + 0.1) \quad (2.6)$$

$$\log D_H = -19.63 + (2.0137M) - (2.6124 \log R^*) - (\log(R + 20))^{(-2.7004)} + (0.3147 \log S) + (0.6985 \log T_{15}) + (4.1954 \log(100 - F_{15})) - 0.6772 \log(D_{5015} + 0.1) \quad (2.7)$$

Οι παραπάνω προτεινόμενες σχέσεις φαίνεται να επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια συγκρίνοντας τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE στις διαθέσιμες σχέσεις της βιβλιογραφίας (Πίνακας 2.2). Συγκεκριμένα, ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 μετρά το ποσοστό της διακύμανσης και είναι μια σχετική μέτρηση και υποδηλώνει πόσο καλή συσχέτιση επιτεύχθηκε από τις σχέσεις συγκριτικά με τις βάσεις δεδομένων. Αντίθετα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE είναι ένα μέτρο της απόκλισης μεταξύ των τιμών που προβλέπουν οι σχέσεις και των πραγματικών μετρούμενων τιμών και μετρά το μέγεθος των σφαλμάτων πρόβλεψης σε μονάδες της εξαρτημένης μεταβλητής και είναι μια απόλυτη μέτρηση.

Empirical model	R^2	RMSE (m)
Hamada et al. (1986)	13.2 %	—
Bardet et al. (1999)	69 %	1.4
Youd et al. (2002)	71.2 %	1.4
Kanibir (2003)	74.51 %	—
Al Bawwab (2005)	80.1 %	—
Javadi et al. (2006)-GP	81.6 %	1.3
Baziar et al. (2013)-GP	88.6 %	0.8
Current study	90 %	0.92

Πίνακας 2.2: Σύγκριση ακρίβειας των σχέσεων των Jafarian και Nasri (2016) για πλευρική εξάπλωση με διαθέσιμες σχέσεις από τη βιβλιογραφία (Jafarian και Nasri 2016)

Πέραν των ανωτέρω, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί από πολλούς ερευνητές (π.χ., Wang and Rahman (1999), Baziar and Ghorbani (2005), Chen et al. (2023), Rathje and Durante (2020) εμπειρικές σχέσεις για την πρόβλεψη της πλευρικής εξάπλωσης, που βασίζονται σε μεθόδους μηχανικής μάθησης.

Ειδικότερα, οι Wang και Rahman (1999) χρησιμοποίησαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ANN για την προσομοίωση της μετατόπισης που προκαλείται από το σεισμό με ίδια βάση δεδομένων με αυτή των Bartlet και Youd (1992) που είχαν χρησιμοποιήσει την πολύ-γραμμική παλινδρόμηση MLR. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι ένας υπολογιστικός μηχανισμός ικανός να επεξεργαστεί ένα σύνολο δεδομένων και να τα αντιστοιχίσει με ένα άλλο σύνολο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ANN συγκρίθηκαν με αυτά του MLR ξεχωριστά για συνθήκες πλησίον αναβαθμού και για συνθήκες ήπια κεκλιμένου εδάφους. Παρατηρήθηκε ότι οι

εκτιμώμενες από το μοντέλο ANN μετατοπίσεις είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές της μετρημένης μετατόπισης απ' ό,τι οι καθιζήσεις που προέβλεψε το μοντέλο MLR.

Γενικά, το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελεί ένα αρκετά αξιόπιστο εργαλείο για την επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων πλευρικής εξάπλωσης. Το ίδιο ισχύει και για την αυξημένη ακρίβεια που προσφέρουν οι πιο πρόσφατες εμπειρικές σχέσεις (2.6) και (2.7). Παρόλα αυτά, μέχρι στιγμής, οι σχέσεις (2.2) και (2.3) των Youd et al. (2002) εξακολουθούν να είναι οι πλέον χρησιμοποιήσιμες στην πράξη.

2.2.2 Μέθοδοι με βάση αριθμητικές αναλύσεις

Μια άλλη προσέγγιση για τον υπολογισμό της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης είναι η παραμετρική χρήση βαθμονομημένων αριθμητικών αναλύσεων. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η εργασία των Ghasemi-Fare and Pak (2016) οι οποίοι πραγματοποίησαν 2D δυναμικές αναλύσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (λογισμικό PISA) για την προσομοίωση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ήπιας κεκλιμένης στρώσης. Συγκεκριμένα, μετά τη βαθμονόμηση της αριθμητικής μεθόδου μέσω συγκρίσεων με σχετικό πείραμα φυγοκεντρική (VELACS Model No.2), έγινε παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου.

Η κλίση της επιφάνειας του εδάφους προέκυψε ως η πιο σημαντική παράμετρος η οποία εξετάστηκε με εύρος από 0.87% έως 8.7%. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της κλίσης συνεπάγεται την αύξηση της μέγιστης πλευρικής μετατόπισης που εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους. Ακόμη, η κανονικοποιημένη πλευρική μετατόπιση δηλαδή η μετατόπιση στο όποιο βάθος διαιρεμένη με τη μέγιστη πλευρική μετατόπιση για την ίδια γωνία κλίσης σε σχέση με το βάθος είναι ανεξάρτητη της κλίσης. Με άλλα λόγια, οι τιμές του αριθμητή και του παρονομαστή του πηλίκου $(LD)/z/(LD)_{max}$ μεταβάλλονται και οι δύο περίπου το ίδιο όταν μεταβάλλεται η γωνία κλίσης.

Οι ίδιοι ερευνητές δείχνουν ότι με την αύξηση του πάχους του ρευστοποιήσιμου εδάφους η μέγιστη πλευρική εξάπλωση αυξάνεται, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας του εδάφους. Σχετικά με τις παραμέτρους της δυναμικής φόρτισης παρατηρείται πως η αύξηση της επιτάχυνσης της διέγερσης συνεπάγεται την αύξηση της πλευρικής μετατόπισης, ενώ το ίδιο συμβαίνει και όταν αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης. Αντίθετα, η αύξηση της συχνότητας της σεισμικής διέγερσης (ή ισοδύναμα η μείωση της διάρκειας της), έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της μέγιστης πλευρικής εξάπλωσης.

Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα λοιπόν προτείνονται οι παρακάτω σχέσεις υπολογισμού της μέγιστης πλευρικής μετατόπισης D_H , χρησιμοποιώντας ως παράμετρο επιλογής της σχέσης το μέτρο της κλίσης της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους S (%), το πάχος του ρευστοποιήσιμου εδάφους H_L (m), την μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης, την συχνότητα του σεισμού f (Hz), την σχετική πυκνότητα D_r (%) του ρευστοποιήσιμου στρώματος, και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης N .

$$D_H = 3S^{0.9}H_L^{0.7}(0.65a_{max})^{0.55}f^{(-0.15*f-0.72)}D_r^{-0.3}N^{1.2}$$

για ήπιες κλίσεις $S < 1.5\%$ (2.8)

$$D_H = 1.5S^{0.9}H_L^{0.7}(0.65a_{max})^{0.55}f^{(-0.15*f-0.72)}D_r^{-0.3}N^{1.2}$$

για έντονες κλίσεις $S > 1.5\%$ (2.9)

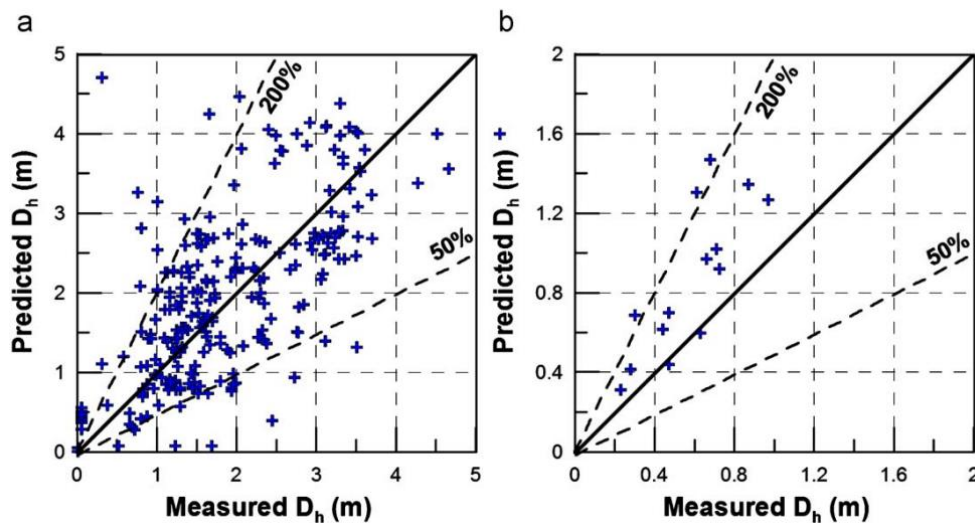
Η αξιολόγηση των προτεινόμενων σχέσεων έγινε με την σύγκριση των αποτελεσμάτων της με αυτά από πειραματικές παρατηρήσεις των Taboada (1995), Abdoun (1998) και Sharp (1999) αλλά και με διαθέσιμες εμπειρικές σχέσεις όπου και στις δύο περιπτώσεις επιτυγχάνεται ικανοποιητική σύγκλιση. Έγινε ακόμη, σύγκριση των αποτελεσμάτων των προτεινόμενων σχέσεων με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων από το πεδίο και την εμπειρική εξίσωση των Hamada et al. (1987) καταδεικνύοντας την εγκυρότητα τους και την ακριβέστερη πρόβλεψη της πλευρικής εξάπλωσης.

Αντίστοιχη σχέση (για συνθήκες ήπιας κλίσης) είναι και αυτή που πρότειναν οι Valsamis et al. (2010) με βάση 2Δ δυναμικές αναλύσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (λογισμικό FLAC) για την προσομοίωση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ήπια κεκλιμένης στρώσης. Η σχέση αυτή έχει ως παραμέτρους τη διάρκεια της διέγερσης t_d (sec), την περίοδο της διέγερσης T (sec), τον αριθμό των σημαντικών κύκλων φόρτισης μετά την αρχική ρευστοποίηση $N_{cycl}-N_L$, τον διορθωμένο αριθμό κρούσεων $(N_{1,60})_{CS}$, το πάχος μέχρι το βαθύτερο σημείο της ρευστοποίησης στρώσης H_{tot} (m), την γωνία κλίσης της επιφάνειας του εδάφους $i(^{\circ})$ και το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών FC :

$$D_H = 2.1 \left(\frac{a_{mean}}{g} \right)^{0.5} [T(N_{cycl} - N_L)]^{0.8} [(N_{1,60})_{CS}]^{-1} [H_{tot}] [\tan i]^{0.5} (1 - FC)^3 \quad (2.10)$$

$$\text{με } a_{mean} = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} |a(t)| dt \quad (2.11)$$

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης σχέσης έγινε με την σύγκριση των εκτιμώμενων οριζόντιων μετατοπίσεων με αυτών από μια βάση δεδομένων από ιστορικά περιστατικά η οποία συγκεντρώθηκε από τους Youd et al. (2002) και πειράματα φυγοκέντρισης των Taboada & Dobry (1998), Sharp, Dobry & Abdoun (2003) και Abdoun (1998). Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι το 90% των εκτιμώμενων μετατοπίσεων της σχέσης είναι μεταξύ 50% και 200% των μετατοπίσεων από τα περιστατικά της βάσης δεδομένων και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 51%. Σχετικά με την σύγκριση με τις μετακινήσεις των πειραμάτων φυγοκέντρισης προέκυψε ότι η σχέση 2.11 υπερεκτιμά τις οριζόντιες μετακινήσεις κατά 30%, που ενδέχεται να οφείλεται σε τεχνητούς περιορισμούς μετατόπισης που εφαρμόζονται στις δοκιμές φυγοκέντρισης. Στο **Σχήμα 2.1**, παρουσιάζεται στο αριστερό διάγραμμα (a) η αξιολόγηση της ακρίβειας της σχέσης συγκριτικά με τα ιστορικά περιστατικά και στο δεξιό διάγραμμα (b) συγκριτικά με τα πειράματα φυγοκέντρισης.



Σχήμα 2.1: Σύγκριση των μέγιστων μετατοπίσεων της επιφάνειας του εδάφους D_H που προβλέπονται με βάση την προτεινόμενη σχέση, σε σχέση με: (a) μετρήσεις πεδίου (συγκεντρώθηκαν από τους Youd et al. 2002 και (b) αποτελέσματα δοκιμών με φυγόκεντρο. (Valsamis et al., 2010)

Γενικά, οι σχέσεις που έχουν προκύψει από βαθμονομημένες αριθμητικές αναλύσεις έχουν βρει λιγότερη χρήση στη βιβλιογραφία, συγκριτικά με εκείνες από εμπειρικές μεθόδους οι οποίες θεωρούνται πιο αξιόπιστες, ειδικά από μηχανικούς της πράξης.

2.3 Επιφανειακά θεμελιωμένες κατασκευές σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

2.3.1 Σημαντικές παράμετροι προβλήματος για οριζόντιο έδαφος

Οι πολύ-παραμετρικές σχέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, δηλαδή αμελώντας την ύπαρξη κατασκευών επί αυτού. Ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει ποια είναι η επίδραση της ρευστοποίησης σε επιφανειακά θεμελιωμένες κατασκευές, όταν το έδαφος είναι ρευστοποιήσιμο, και αν υπάρχει αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Στην εργασία αυτή, η έμφαση δίνεται σε ήπια κεκλιμένο ρευστοποιήσιμο έδαφος, αλλά για την καλύτερη κατανόηση των μετακινήσεων και στροφών που δέχονται επιφανειακά θεμελιωμένες κατασκευές σε κεκλιμένο έδαφος είναι ωφέλιμο να μελετηθεί πρώτα η απόκριση τους σε οριζόντιο έδαφος.

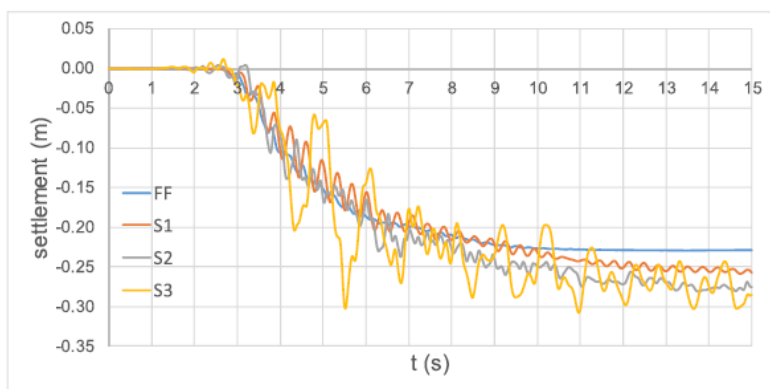
Συνήθεις παρατηρήσεις από ιστορικά περιστατικά δείχνουν μεγαλύτερες καθιζήσεις για υψηλές και βαριές κατασκευές απ' ό,τι για κοντές και ελαφριές, ενώ έντονη στροφή εμφανίζεται μόνο σε όσες έχουν στενό πλάτος θεμελίωσης (Yoshimi and Tokimatsu 1977, Liu 1995, Shahien 1998). Σε κάθε περίπτωση, οι σεισμικές καθιζήσεις θεμελίων σε κοκκώδη εδάφη σχετίζονται με το πλάτος, την τάση έδρασης της θεμελίωσης και το πάχος του ρευστοποιημένου εδαφικού στρώματος. Οι Ishii και Tokimatsu (1988) πρότειναν ότι αν το πλάτος της θεμελίωσης είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος, η καθίζηση της κατασκευής είναι σχεδόν ίση με εκείνη στο ελεύθερο πεδίο. Αντίθετα, εάν ο λόγος του πλάτους της θεμελίωσης προς το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος είναι μικρότερος από 3, τότε οι κατασκευές καθιζάνουν περισσότερο απ' ό,τι στο ελεύθερο πεδίο. Πέρα από ιστορικά περιστατικά, έχουν γίνει και στοχευμένα πειράματα φυγοκεντρική για τη μελέτη της του μηχανισμού αστοχίας και της απόκρισης μιας κατασκευής σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Τέτοια πειράματα επεξήγησαν ότι οι εν λόγω καθιζήσεις οφείλονται τόσο σε ογκομετρικές όσο και σε διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους υπό την κατασκευή.

Σύμφωνα με την Dashti (2010) οι παραμορφώσεις λόγω σεισμού κατηγοριοποιούνται σε ογκομετρικές και παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις διατμητικές τάσεις λόγω σεισμού. Οι ογκομετρικές παραμορφώσεις οφείλονται στην υπόγεια ροή του νερού και στην καθίζηση λόγω στερεοποίησης μετά από ρευστοποίηση. Οι διατμητικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από την διάτμηση αποτελούνται από αυτές που οφείλονται στην μερική αστοχία λόγω της απώλειας της φέρουσας ικανότητας του εδάφους και αυτές που προκαλούνται από την αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής κατά την διάρκεια του σεισμού. Τα πειράματά της ξεκαθάρισαν ότι κατά την διάρκεια του σεισμού δεν συμβαίνει ρευστοποίηση κάτω από την θεμελίωση της κατασκευής, δεδομένου ότι οι αναπτυσσόμενες υπερπίεσεις πόρων δεν φτάνουν τις κατακόρυφες ολικές τάσεις που έχουν προσαυξηθεί λόγω της τάσης έδρασης των κατασκευών, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στο ελεύθερο πεδίο όπου οι κατακόρυφες τάσεις είναι οι γεωστατικές. Πάντως, από τα πειράματά της προέκυψε ότι οι σεισμικές καθιζήσεις επηρεάζονται αλλά δεν είναι ανάλογες του πάχους της ρευστοποιήσιμη στρώσης.

Οι διαθέσιμες προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των καθιζήσεων είναι η εκτίμηση τους με μεθόδους που αναφέρονται σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Η προσεγγιστική αυτή λύση ενέχει τον κίνδυνο υποεκτίμησης των πραγματικών καθιζήσεων κτιρίων εξαιτίας της απλουστευμένης

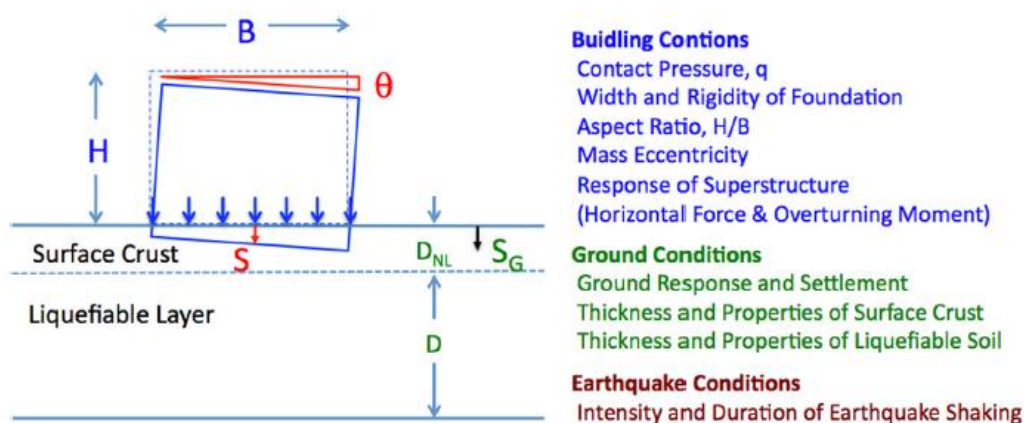
εκτίμησης της αποκλειστικά ογκομετρικής συμπεστότητας του εδάφους. Λόγω αδυναμίας δηλαδή των μεθόδων που αναφέρονται σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου να συμπεριλάβουν τις διατμητικές παραμορφώσεις λόγω αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής που είναι και ο κύριος μηχανισμός που αναπτύσσεται.

Ως παράδειγμα για τη μελέτη αυτής της αλληλεπίδρασης, ο Forcellini (2020) σύγκρινε αριθμητικά την απόκριση τριών κατασκευών με άκαμπτα θεμέλια με 2, 4 και 6 ορόφους ύψους 6.8 m, 13.6 m, και 20.4 m και αναλογία ύψους προς πλάτος $L/B = 0.92, 1.84$ και 2.76 αντίστοιχα, σε παχιά εδαφική στρώση. Τα αποτελέσματά του δείχνουν ότι όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που δέχεται το έδαφος στην θεμελίωση από την κατασκευή τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα ρευστοποίησης σε εκείνη την περιοχή. Ως παράδειγμα της απόκρισης, στο **Σχήμα 2.2** δίνονται οι χρονοϊστορίες των καθιζήσεων του κέντρου βάρους των θεμελίων των τριών κατασκευών και αυτές σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, απ' όπου προκύπτει ότι οι καθιζήσεις των κατασκευών είναι μεγαλύτερες από εκείνες του ελεύθερου πεδίου, κι ότι η πλέον υψίκορμη κατασκευή έχει μεγαλύτερη αυξομείωση στο ρυθμό συσσώρευσης των καθιζήσεων με το χρόνο. Επιπλέον προκύπτει ότι οι όποιες παραμένουσες στροφές των θεμελίων εξαρτώνται περισσότερο από τον λόγο ύψους προς το πλάτος L/B της κατασκευής, παρά στο φαινόμενο της ρευστοποίησης.



Σχήμα 2.2: Χρονοϊστορίες καθιζήσης του κέντρου βάρους θεμελίων σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο (Forcellini, 2020b)

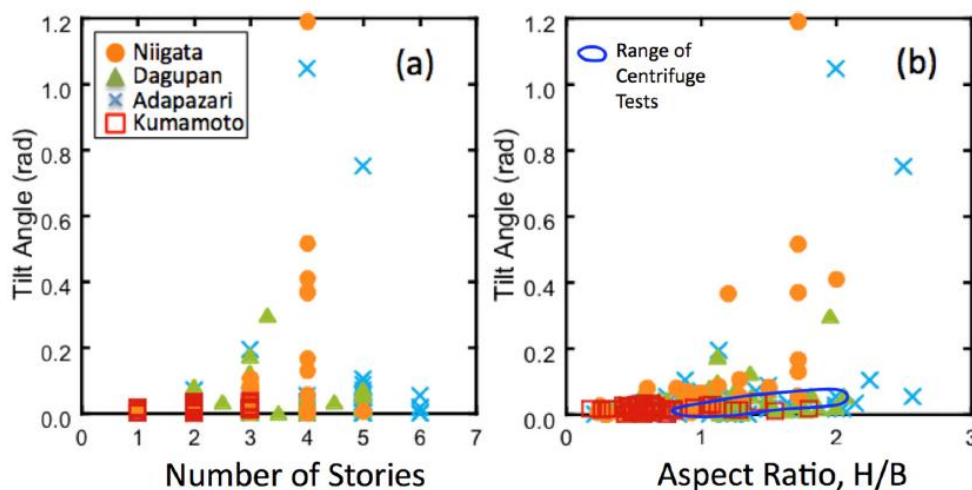
Πιο γενικά, σύμφωνα με τις διαθέσιμες μελέτες (Tokimatsu et al., 2019c) οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για την καθίζηση και τη στροφή μιας κατασκευής λόγω ρευστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε τρεις (3) κατηγορίες που αφορούν στα χαρακτηριστικά της κατασκευής, του εδάφους και του σεισμού (βλ. **Σχήμα 2.3**).



Σχήμα 2.3: Βασικοί παράγοντες που ελέγχουν την προκαλούμενη από ρευστοποίηση καθίζηση και στροφή ενός μεμονωμένου κτιρίου (Tokimatsu et al., 2019c)

Συγκεκριμένα αποδείχθηκε από τους Yoshimi και Tokimatsu (1977), ότι η κανονικοποιημένη με το ρευστοποιήσιμο πάχος καθίζηση S/D , μειώνεται όσο αυξάνεται ο λόγος του πλάτους του κτιρίου προς το ρευστοποιήσιμο πάχος B/D . Αργότερα, προτάθηκε από τους Ishihara et al. (1985) ότι μια μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση πάχους μεγαλύτερου των 2-3 m μειώνει τις ζημιές στα κτίρια. Ακόμη, υποστηρίχθηκε από τους Tokimatsu et al. (1994), ότι το φορτίο και οι διατμητικές τάσεις που δέχεται το έδαφος από την θεμελίωση και η εγγύτητα σε κοντινά κτίρια επηρεάζουν την καθίζηση και τη στροφή της κατασκευής. Μάλιστα, με βάση τον σεισμό Tohoku 2011 αργότερα προστέθηκε ως παρατήρηση ότι οι στροφές μιας ξύλινης κατασκευής τείνουν να αυξάνονται με την αύξηση των εδαφικών καθιζήσεων γύρω από το κτίριο στο ελεύθερο πεδίο λόγω ρευστοποίησης. Αυτές με τη σειρά τους επηρεάζονται από την σχετική πυκνότητα και το πάχος του ρευστοποιήσιμου εδαφικού στρώματος καθώς και την ένταση και διάρκεια της σεισμικής δόνησης. Αναφορικά με τον λόγο καθίζησης προς το πλάτος S/B παρατηρήθηκε από τους Sancio et al. (2004) ότι έχει καλή συσχέτιση με τον λόγο ύψους προς το πλάτος H/B των κτιρίων από 4 έως 6 ορόφους στο σεισμό το Kocaeli 1999.

Στη συνέχεια, οι Tokimatsu et al. (2019) κατέληξαν ότι η μέση σχετική καθίζηση, δηλαδή η διαφορική καθίζηση της κατασκευής και του ελεύθερου πεδίου στην περιοχή της κατασκευής, (από 4 σεισμούς) και στα τέσσερα γεγονότα αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των ορόφων και τον λόγο του ύψους προς το πλάτος της κατασκευής. Το ίδιο φαίνεται να συμβαίνει και στην γωνία κλίσης των κτιρίων η οποία αυξάνεται με την αύξηση των ορόφων (βλ. **Σχήμα 2.4**). Ειδικότερα, εμφανίστηκαν μεγάλες κλίσεις που οδηγούν σε ανατροπή για κτίρια με ύψος μεγαλύτερο των τριών ορόφων.



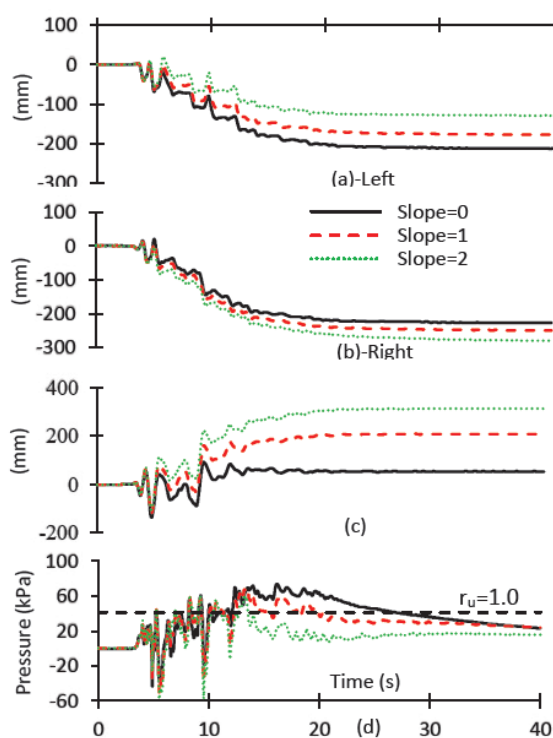
Σχήμα 2.4: Σχέση της γωνίας στροφής με τον αριθμό ορόφων και τον λόγο ύψους προς πλάτος των κτιρίων σε 4 σεισμικά γεγονότα (Tokimatsu et al., 2019b)

Συνολικά, από τη μελέτη ιστορικών περιστατικών αλλά και δοκιμών φυγοκέντρισης (π.χ. Dashti et al. (2010) προκύπτει ότι η αύξηση της τάσης έδρασης μιας κατασκευής οδηγεί σε αύξηση της απόλυτης καθώς και της διαφορικής καθίζησης, αλλά και της γωνίας στροφής. Από την άλλη, προκύπτει ότι η μείωση του πάχους του μη-ρευστοποιήσιμου επιφανειακού εδάφους οδηγεί σε μεγαλύτερες καθιζήσεις. Συμπεραίνεται ακόμη ότι η γωνία στροφής του κτιρίου τείνει να αυξάνεται με την αύξηση της εκκεντρότητας της φόρτισης του κτιρίου.

2.3.2 Σημαντικές παράμετροι του προβλήματος για ήπια κεκλιμένο έδαφος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες μελέτες για την αξιολόγηση της καθίζησης των αβαθών θεμελίων που βρίσκονται σε οριζόντια ρευστοποιήσιμα εδάφη. Πολλές φορές όμως, υπάρχει μια ήπια κλίση στο ρευστοποιήσιμο έδαφος που μπορεί να επηρεάσει την απόκριση των αβαθών θεμελίων. Για τον λόγο αυτό οι Pourabbasi and Asgari (2021) πραγματοποίησαν μια 3Δ παραμετρική αριθμητική διερεύνηση του προβλήματος, συμπεριλαμβάνοντας και την κλίση του εδάφους στις παραμέτρους, εκτός από το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος και της σχετικής πυκνότητας του, της στάθμης του υδροφόρα ορίζοντα εντός του εδάφους, της τάσης έδρασης της κατασκευής, καθώς και του λόγου του μήκους ως προς το πλάτος της.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αναφορικά με την επίδραση της κλίσης του εδάφους (βλ. ενδεικτικά **Σχήμα 2.5**) δείχνουν ότι με την αύξηση της κλίσης η καθίζηση στην κατάντη πλευρά της θεμελίωσης αυξάνεται σημαντικά, σε αντίθεση με την ανάντη πλευρά του θεμελίου που μειώνεται. Ακόμη, η αύξηση της κλίσης επιφέρει αύξηση της πλευρικής εξάπλωσης, παρά το γεγονός ότι οι υπερπίεσεις πόρων δείχνουν μειωμένες, με δεδομένη την αύξηση του αιτίου της εδαφικής παραμόρφωσης (στατική διατμητική τάση).



Σχήμα 2.5: (a,b) Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετατόπισης στο ανάντη και στο κατάντη άκρο της θεμελίωσης, (c) Χρονοϊστορία της πλευρικής μετατόπισης της θεμελίωσης σε βάθος 1 m, (d) Υπερπίεση πόρων στο μέσο του ρευστοποιήσιμου στρώματος κάτω από τη θεμελίωση για διάφορες κλίσεις του εδάφους (Pourabbasi & Asgari, 2021)

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της μελέτης συμπεραίνεται ότι η αύξηση της κλίσης του εδάφους εντείνει τις στατικές διατμητικές τάσεις προς την κατεύθυνση της κλίσης και αυξάνει τις οριζόντιες μετατοπίσεις της θεμελίωσης. Ακόμη, η αύξηση της κλίσης δημιουργεί

διαφορικές καθιζήσεις αυξάνοντας έτσι και την στροφή της θεμελίωσης. Επίσης, όπως συμβαίνει και σε οριζόντιο έδαφος όταν η σχετική πυκνότητα του ρευστοποιήσιμου στρώματος μειώνεται, η καθίζηση αυξάνεται. Τέλος, τα θεμέλια με μεγαλύτερο λόγο μήκους προς πλάτος παρουσιάζουν μικρότερη καθίζηση λόγω μικρότερων διατμητικών τάσεων και μειωμένης δυνατότητας αποστράγγισης εκτός της βάσης του θεμελίου.

3 Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων

3.1 Γενικά

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην μεθοδολογία των αριθμητικών αναλύσεων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς κατασκευών σε ήπια κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca 2005) για 2D αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης γεωκατασκευών. Στη συνέχεια, στην παράγραφο 3.2, παρατίθενται πληροφορίες για την διακριτοποίηση του ήπια κεκλιμένου εδάφους. Στην παράγραφο 3.4 παρουσιάζεται η προσομοίωση των κατασκευών που εδράζονται στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ στην παράγραφο 3.5 γίνεται η σύνοψη των στοιχείων σχετικά με την υιοθετηθείσα σεισμική διέγερση και την απόσβεση των γεω-υλικών. Τέλος, στην παράγραφο 3.6 περιγράφονται οι συνοριακές συνθήκες των (στατικών και δυναμικών) 2D αναλύσεων και το κεφάλαιο κλείνει (στην παράγραφο 3.7) με μια (ενδεικτική) διερεύνηση της ακρίβειας της υιοθετηθείσας αριθμητικής μεθοδολογίας.

3.2 Καταστατική προσομοίωση εδάφους

3.2.1 Άμμος

Η άμμος προσομοιώθηκε με το σοφιστευμένο προσομοίωμα NTUA-SAND το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά από τους Papadimitriou & Bouckovalas (2002) και στην συνέχεια διαμορφώθηκε από τους Andrianopoulos et al. (2010) και Karamitros (2010). Το ελαστοπλαστικό αυτό προσομοίωμα βασίζεται στην θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης και στοχεύει στην προσομοίωση της απόκρισης μη συνεκτικών εδαφών υπό ανακυκλική διάτμηση σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις και σε συνθήκες σεισμικής ρευστοποίησης.

Η κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη κορεσμένη άμμος θεωρήθηκε με σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$, δείκτη πόρων $e \approx 0.72$, ξηρή πυκνότητα $\rho_s = 1.554 \text{ Mgr/m}^3$ και συντελεστή διαπερατότητας $k = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Αναφορικά με τις τιμές των 13 παραμέτρων του προσομοιώματος NTUA-Sand, προέκυψαν με βάση την βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε από τους Andrianopoulos et al. (2010) για την άμμο Nevada της βιβλιογραφίας, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.1**.

M_c^c	Κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονική θλίψη (TC)	1.25
c	Λόγος της κλίσης της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονικό εφελκισμό (TE) προς την αντίστοιχη κλίση για τριαξονική θλίψη (TC)	0.72
$e_{cs,a}$	Δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για μέση ενεργό τάση $p' = p_a$	0.809
λ	Κλίση της γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο $[e - \ln p]$	0.022
B (μονοτονική / ανακυκλική)	Σταθερά του ελαστικού μέτρου διάτμησης	180 / 600
ν	Λόγος Poisson	0.33
k_c^b	Επίδραση του ψ στην κλίση της Οριακής Επιφάνειας για TC	1.45
k_c^d	Επίδραση του ψ στην κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	0.30
γ_i	Χαρακτηριστική διατμητική παραμόρφωση	0.00025
α_1 (μονοτονική / ανακυκλική)	Ρυθμός απομείωσης του ελαστικού μέτρου διάτμησης	1 / 0.6
A_o	Σταθερά του συντελεστή διαστολικότητας	0.80
h_o	Σταθερά του πλαστικού μέτρου κράτνυσης	15000
N_o	Σταθερά της επίδρασης της αλλαγής της δομής	40000

Πίνακας 3.1: Η φυσική σημασία και οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος NTUA-Sand για την άμμο Nevada (Andrianopoulos et al. 2010)

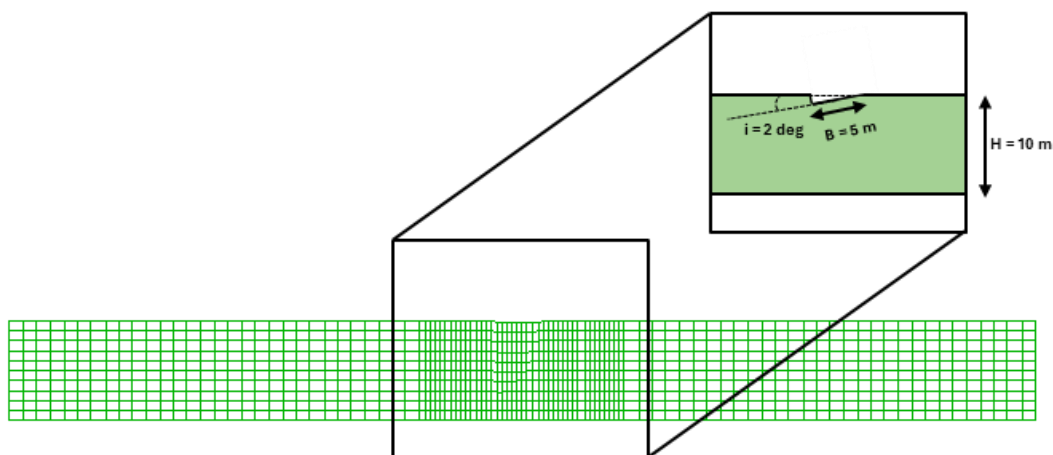
3.2.2 Άργιλος

Στις αναλύσεις που υπήρχε άργιλος στη βάση του καννάβου, η οποία μειώνει το πάχος της επιφανειακής ρευστοποιήσιμης στρώσης, η άργιλος θεωρήθηκε ως ελαστική με ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων $C_s = 300$ m/s. Ακόμη, είχε ίδια τιμή δείκτη πόρων και ξηρής πυκνότητας με την άμμο και πολύ μικρή διαπερατότητα (4 τάξεις μεγέθους μικρότερη της άμμου). Συνεπώς, η ταλάντωση αυτής δεν δημιουργεί μόνιμες οριζόντιες μετατοπίσεις ή καθιζήσεις, οι οποίες οφείλονται αποκλειστικά στην επιφανειακή ρευστοποιήσιμη στρώση. Όμως έτσι διατηρείται το πάχος του συνολικού καννάβου ίδιο, οπότε οι αναλύσεις για διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης και την ίδια διέγερση είναι συγκρίσιμες.

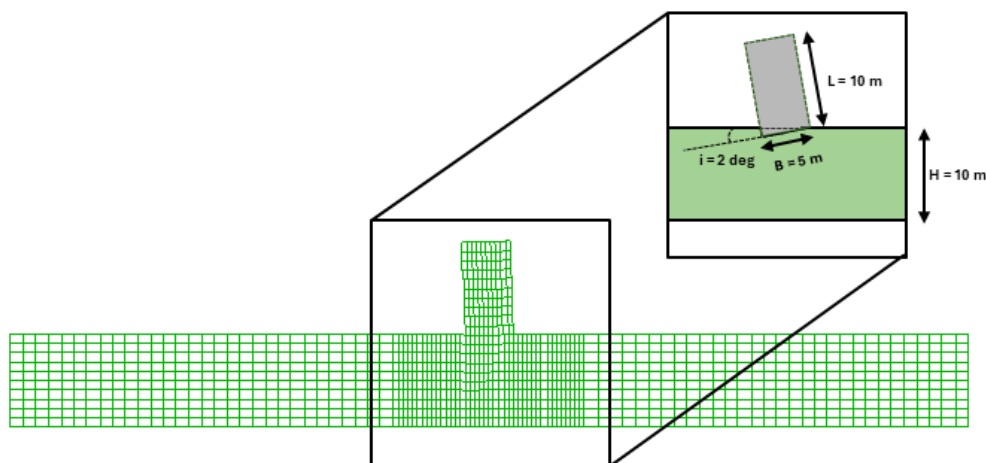
3.3 Διακριτοποίηση εδάφους

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για πλάτη κατασκευών $B = 5$ m και $B = 20$ m. Για τις αναλύσεις με πλάτος κατασκευής $B = 5$ m και $B = 20$ m επιλέχθηκε συμμετρικός κάρναβος διαστάσεων 100×10 m και 190×10 m αντίστοιχα. Η επιλογή των διαστάσεων πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε το πλάτος των κάρναβων να είναι επαρκώς μεγάλο και οι συνοριακές συνθήκες να μην επηρεάζουν την συμπεριφορά των κατασκευών. Για την ακριβέστερη προσομοίωση της απόκρισης των κατασκευών έγινε τοπική πύκνωση του κάρναβου, δηλαδή για τις αναλύσεις με $B = 5$ m, επιλέχθηκαν 40 στοιχεία κάρναβου πλάτους 0.5 m στην περιοχή της κατασκευής και 60 στοιχεία πλάτους 1.33 m στον υπόλοιπο κάρναβο. Με την ίδια λογική, για τις αναλύσεις με $B = 20$ m, 60 στοιχεία πλάτους 0.5 m και 120 στοιχεία πλάτους 1.33 m μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος. Σε όλες τις περιπτώσεις τοποθετήθηκαν 10 στοιχεία καθ' ύψος στον κάρναβο πάχους 10 m.

Έγιναν αναλύσεις αναφοράς με το έδαφος να είναι οριζόντιο, και αναλύσεις όπου το έδαφος είχε ομοιόμορφη κλίση ίση με 0.3, 2 και 3.4 μοίρες. Για να μείνει σταθερό το πάχος του εδάφους, η ίδια κλίση θεωρήθηκε και στο άνω και στο κάτω άκρο του κάρναβου. Στις αναλύσεις με ομοιόμορφη (μη-μηδενική) κλίση χρησιμοποιήθηκε ο κάρναβος του οριζοντίου εδάφους, και η κλίση προσομοιώθηκε με την αντιωρολογιακή στροφή του διανύσματος της βαρύτητας κατά γωνία ίση με την απαιτούμενη κλίση. Στη συνέχεια, για να είναι η επιφάνεια έδρασης της κατασκευής κάθετη στο (στριμμένο) διάνυσμα της βαρύτητας, δημιουργήθηκε στον κάρναβο μια ζώνη εκσκαφής ώστε η κατασκευή να είναι αρχικώς οριζόντια σε όλες τις περιπτώσεις κλίσης. Ένα παράδειγμα της εκσκαφής στον κάρναβο δίνεται στο **Σχήμα 3.2**. Από εκεί και πάνω προσομοιώθηκε η κατασκευή, είτε ως φορτισμένο θεμέλιο ή ως ομοιόμορφης μάζας ορθογωνική κατασκευή. Συνεπώς, σε αρχικές συνθήκες, και πριν τη στροφή του διανύσματος της βαρύτητας, μια υψηλή κατασκευή μοιάζει όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.2**, ως παράδειγμα. Στις αναλύσεις αναφοράς για θεμέλια ή κατασκευές σε οριζόντιο έδαφος δεν υπήρχε ανάγκη εκσκαφής.



Σχήμα 3.1: Κάνναβος προσομοίωσης εδάφους με κλίση $i = 2 \text{ deg}$, ύψος καννάβου $H = 10 \text{ m}$ και λεπτομέρειες εκσκαφής πριν την τοποθέτηση της κατασκευής ή του θεμελίου πλάτους $B = 5 \text{ m}$.



Σχήμα 3.2: Κάνναβος προσομοίωσης εδάφους με κλίση $i = 2 \text{ deg}$, ύψος καννάβου $H = 10 \text{ m}$ με εκσκαφή και υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5 \text{ m}$.

3.4 Προσομοίωση κατασκευών

Όπως προαναφέρθηκε, ως κατασκευές θεωρήθηκαν είτε φορτισμένα (αβαρή) θεμέλια ή ομοιόμορφης μάζας ορθογωνικές κατασκευές. Σε κάθε περίπτωση, εδράζονται στην επιφάνεια του εδάφους και προσομοιώθηκαν με «εδαφικές» ζώνες πεπερασμένων διαφορών που αντιστοιχούν ως άκαμπτα, λωριδωτά ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, πλάτους B , πακτωμένα στο έδαφος (απολύτως τραχιά). Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για θεμέλια πλάτους $B = 5 \text{ m}$ και $B = 20 \text{ m}$ και ύψος $L = 1 \text{ m}$ και κατασκευές με πλάτος $B = 5 \text{ m}$ και $B = 20 \text{ m}$ και ύψος $L = 5 \text{ m}$ και $L = 10 \text{ m}$. Για κάθε είδος κατασκευής και θεμελίου πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για διαφορετικά φορτία $q = 50 \text{ kPa}$, $q = 100 \text{ kPa}$ και $q = 200 \text{ kPa}$. Η διαφορά ήταν ότι στο θεμέλιο ($L = 1 \text{ m}$), το φορτίο της κατασκευής επιβλήθηκε με ομοιόμορφο φορτίο q καθώς ήταν αβαρές, ενώ στις κατασκευές ($L = 5 \text{ m}$ και 10 m) το φορτίο της κατασκευής επιβλήθηκε μέσω του ίδιου

βάρους των «εδαφικών» ζωνών που είχε εκτιμηθεί κατάλληλα ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή του φορτίου q στη στάθμη έδρασης.

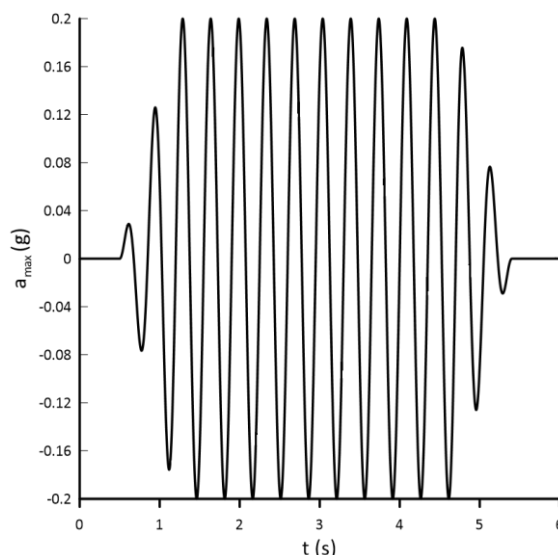
Σε όλες τις περιπτώσεις, τα θεμέλια και οι κατασκευές θεωρήθηκαν αδιαπέρατα μέσα, με μεγάλες τιμές των μέτρων διάτμησης G και ισότροπης συμπίεσης K ώστε να συμπεριφερθούν ως άκαμπτα στερεά. Ειδικότερα, επιλέχθηκε συντελεστής διαπερατότητας 4 τάξεις μεγέθους μικρότερη της άμμου, και μέτρα $G = 5 \text{ GPa}$ και $K = 10 \text{ GPa}$ για πλάτος $B = 5 \text{ m}$ και $G = 10 \text{ GPa}$ και $K = 20 \text{ GPa}$ για πλάτος $B = 20 \text{ m}$, τόσο για τα θεμέλια όσο και για τις κατασκευές.

Συνεπώς, υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των αναλύσεων με θεμέλια και κατασκευές: στις αναλύσεις με κατασκευές δημιουργούνται αδρανειακές δυνάμεις στη μάζα τους (όχι συγκεντρωμένες), αλλά στα θεμέλια όχι. Η υπερ-απλουστευτική προσομοίωση των θεμελίων ως αβαρή φορτισμένα άκαμπτα μέσα έγινε χάριν σύγκρισης με τη συνήθη βιβλιογραφία που αφορά σε τέτοια θεμέλια σε οριζόντιο έδαφος (π.χ., Karamitros et al. 2014), και είχε ως στόχο να μελετηθεί το τι αλλάζει στην απόκριση τέτοιων θεμελίων αν το έδαφος έχει ήπια κλίση. Από την άλλη, η προσομοίωση των κατασκευών ως άκαμπτα στερεά με κατανεμημένη μάζα είχε ως στόχο να γίνει λίγο πιο ρεαλιστική η προσομοίωση τους, σε ένα πρόβλημα όπου οι αδρανειακές δυνάμεις πρέπει να παίζουν παραπάνω ρόλο απ' ό,τι όταν το έδαφος είναι οριζόντιο. Για παράδειγμα, οι Bazaios et al. (2023) έδειξαν ότι η προσομοίωση μιας κατασκευής ως μονοβάθμιος ταλαντωτής δεν οδηγεί σε σημαντική διαφορά στις καθιζήσεις της σε ρευστοποιήσιμο έδαφος όταν αυτό είναι οριζόντιο. Από την άλλη, είναι σαφές ότι η προσομοίωση των κατασκευών δεν είναι ακριβής, καθώς δεν προσομοιώνονται ως (έστω μονοβάθμιοι) ταλαντωτές, αλλά ως συνεχή μέσα μεγάλης στιβαρότητας σε συνέχεια του λιγότερο στιβαρού εδάφους. Οπότε θεωρείται ότι η προσομοίωσή τους είναι περισσότερο ακριβής απ' ό,τι ως αβαρή θεμέλια, αλλά λιγότερο ακριβής απ' ό,τι αν ήταν ταλαντωτές. Οι αναλύσεις αυτών θεωρούνται ότι αποτυπώνουν προσεγγιστικά την απόκριση άκαμπτων κατασκευών (με μηδενική ιδιοπερίοδο ταλάντωσης) αντίστοιχου βάρους.

3.5 Σεισμική διέγερση και απόσβεση

Σχετικά με την σεισμική διέγερση, επιβλήθηκε στην βάση του καννάβου σε όλες τις αναλύσεις οριζόντια αρμονική διέγερση με αριθμό (σημαντικών) κύκλων $N = 10$, περίοδο $T = 0.35 \text{ s}$, και σταθερή μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$. Για να διασφαλιστεί η σταδιακή αύξηση και μείωση της επιτάχυνσης, προστέθηκαν 2 επιπλέον κύκλοι προσαρμογής μικρότερου και μεταβαλλόμενου πλάτους στην αρχή και στο τέλος της διέγερσης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.3**. Η χρονοϊστορία αυτή είναι αρκετά έντονη και το πλήθος των ομοιόμορφων κύκλων της επιτρέπει να αποτυπωθεί η γραμμική (με το χρόνο ή με τους κύκλους) συσσώρευση καθιζήσεων, οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών των κατασκευών. Δεν έγιναν αναλύσεις για άλλη διέγερση, καθώς ο στόχος της εργασίας ήταν να αποτυπωθεί η σχετική απόκριση διαφορετικών κατασκευών σε διαφορετικά εδαφικά προφίλ, αλλά με την ίδια διέγερση σε όλες τις περιπτώσεις. Γίνεται λοιπόν η παραδοχή ότι η απόκριση σε διαφορετικούς συνδυασμούς κατασκευής-εδάφους επηρεάζεται ισόποσα από τη διέγερση, οπότε η σημασία της διέγερσης είναι δευτερεύουσα.

Επιλέχθηκε επίσης «τοπική» απόσβεση (η οποία δεν είναι συνάρτηση της συχνότητας) με τιμή 2% επιπλέον όποιας απόσβεσης προβλέπει το προσομοίωμα NTUA-Sand στην άμμο. Στην άργιλο βάση (όταν υπάρχει), η χρήση ελαστικού προσομοιώματος σημαίνει ότι η μόνη απόσβεση είναι ίση με 2%.



Σχήμα 3.3: Χρονοϊστορία επιβαλλόμενης διέγερσης στη βάση του καννάβου

3.6 Συνοριακές συνθήκες

Με την έναρξη κάθε ανάλυσης, πραγματοποιήθηκε στατική επίλυση του τάσεων λόγω ίδιου βάρους του εδάφους (χωρίς κατασκευές) με το διάνυσμα της βαρύτητας στραμμένο κατά γωνία i . Αυτή η ανάλυση έγινε θεωρώντας κατακόρυφες κυλίσεις, δηλαδή επιτρέποντας καθιζήσεις αλλά όχι οριζόντια μετατόπιση στα απομακρυσμένα σύνορα του καννάβου. Η ανάλυση αυτή έγινε με ελαστικό προσομοίωμα, το οποίο στη συνέχεια άλλαξε στο NTUA-Sand στην περίπτωση της άμμου. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το θεμέλιο και φορτίστηκε σε στάδια ή υλοποιήθηκε η κατασκευή σε στάδια καθ' ύψος, όλα με διαδοχικές στατικές επιλύσεις ανά στάδιο.

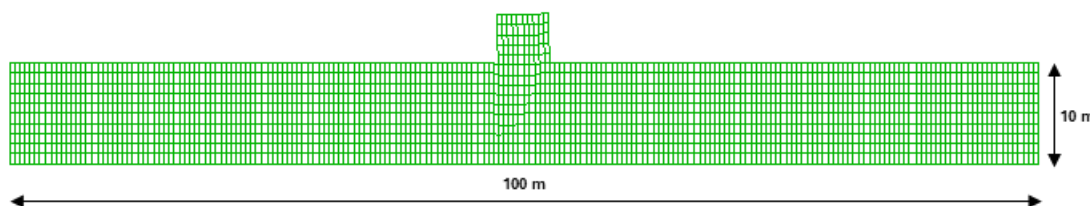
Η δυναμική επίλυση, πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των «συζευγμένων κόμβων» (tied nodes), στην οποία οι πλευρικοί κόμβοι της ίδιας στάθμης (ίδιου βάθους από την επιφάνεια) συνδέονται με καλώδια μεταξύ τους ώστε να εξασφαλίζεται η ίδια μετακίνηση τους (οριζόντια και κατακόρυφη) κατά τη διάρκεια της διέγερσης. Αυτού του είδους οι συνοριακές συνθήκες έχουν αποδειχθεί ακριβείς στην προσομοίωση ελεύθερου πεδίου σε αναλύσεις για οριζόντιο έδαφος (π.χ., Andrianoopoulos et al. 2010), και μάλιστα για αναλύσεις ρευστοποίησης μάλλον πιο ακριβείς από τη χρήση free-field συνόρων (όπως έχουν ενσωματωθεί στο FLAC). Πιο σημαντικά, στο παρόν πρόβλημα που ενέχει μόνιμη οριζόντια μετακίνηση του εδάφους λόγω πλευρική εξάπλωσης, η χρήση free-field συνόρων θα ήταν εντελώς λανθασμένη, καθώς θα υπέβαλλε στα σύνορα να έχουν μηδενική οριζόντια μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης, κάτι που δεν ισχύει στη χρήση των «συζευγμένων κόμβων».

3.7 Έλεγχος αξιοπιστίας αριθμητικής μεθοδολογίας

Για να επαληθευτεί η αξιοπιστία της αριθμητικής μεθοδολογίας που αναφέρθηκε τόσο ως προς την τοπική πύκνωση του καννάβου, όσο και ως προς την επάρκεια του εύρους του πλάτους του καννάβου ώστε οι συνοριακές συνθήκες να μην επηρεάζουν την συμπεριφορά των κατασκευών, πραγματοποιήθηκαν δύο επιπλέον αναλύσεις για μια ενδεικτική περίπτωση που αφορά σε χαμηλή κατασκευή ($L = 5$ m) πλάτους $B = 5$ m, φορτίου $q = 100$ kPa σε ομοιόμορφη άμμο πάχους 10 m με γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$. Συγκεκριμένα, πέραν της ανάλυσης αναφοράς που περιγράφηκε άνωθεν, εκτελέστηκε μια επιπλέον ανάλυση με ομοιόμορφη

ισοδιάσταση καννάβου 0.5 m, δηλαδή πύκνωση του καννάβου σε όλο το εύρος του και όχι μόνο στην περιοχή της κατασκευής και μια ανάλυση με διπλάσιο πλάτος καννάβου από αυτό του τυπικού (της ανάλυσης αναφοράς).

Σχετικά με την ανάλυση του ομοιόμορφα πυκνωμένου καννάβου εφαρμόστηκε η ίδια αριθμητική μεθοδολογία που αναφέρθηκε προηγουμένως, με τη μόνη διαφορά να είναι περισσότερα τα στοιχεία του καννάβου (200×10) αλλά με ίδιες διαστάσεις όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.4** (σε σύγκριση με εκείνον στο **Σχήμα 3.2**, για κατασκευή $L = 10$ m εκεί).

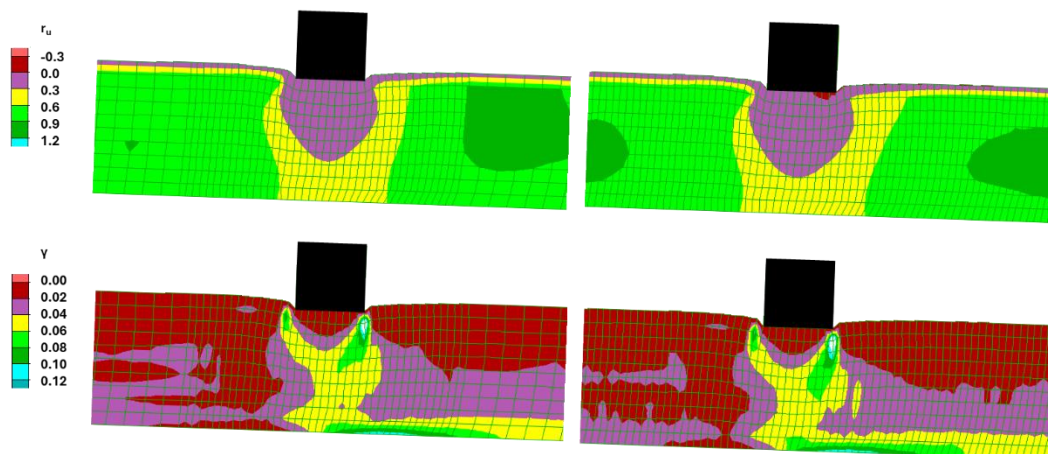


Σχήμα 3.4: Ομοιόμορφος κάνναβος ισοδιάστασης 0.5 m, ύψους $H = 10$ m για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, χαμηλή κατασκευή ύψους $L = 5$ m και πλάτους $B = 5$ m.

Όπως αναμενόταν, η ανάλυση όπου χρησιμοποιήθηκε ο ομοιόμορφος κάνναβος ισοδιάστασης 0.5 m παρουσίασε ουσιαστικά ταυτόσημα αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση με χρήση του τυπικού καννάβου. Αυτό αφορά τόσο στις τιμές της οριζόντιας μετακίνησης και καθίζησης της κατασκευής στο τέλος της διέγερσης (**Πίνακας 3.2**), όσο και στις ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ υπό την χαμηλή κατασκευή την ίδια χρονική στιγμή (**Σχήμα 3.5**). Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή πύκνωσης γύρω από το κάθε θεμέλιο ή την κάθε κατασκευή επαρκεί για την ορθή προσομοίωση της απόκρισης του, και δεν χρειάζεται αυτή να επεκτείνεται σε όλο το πλάτος του καννάβου με αποτέλεσμα την αύξηση του υπολογιστικού κόστους.

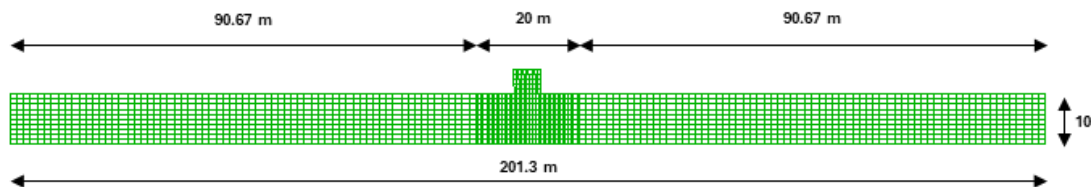
	Οριζόντια μετακίνηση x	Καθίζηση z
Ομοιόμορφος κάνναβος	0.40	-0.34
Τυπικός κάνναβος	0.39	-0.34

Πίνακας 3.2: Τιμές οριζόντιας μετακίνησης και καθίζησης χαμηλής κατασκευής ($L = 5$ m) πλάτους $B = 5$ m, φορτίου $q = 100$ kPa σε ομοιόμορφη άμμο πάχους 10 m με γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στο τέλος της διέγερσης με χρήση του ομοιόμορφου και του τυπικού καννάβου.



Σχήμα 3.5: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή ($L = 5$ m) πλάτους $B = 5$ m, φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H = 10$ m και κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$, για χρήση: (αριστερά) τυπικού καννάβου (π.χ. Σχήμα 3.2) και (δεξιά) ομοιόμορφου καννάβου (Σχήμα 3.4).

Αναφορικά με την ανάλυση για κάνναβο διπλάσιου πλάτους, αποτελούνταν από 40 στοιχεία πλάτους 0.5 m στην περιοχή της κατασκευής και 136 στοιχεία πλάτους 1.33 m μακριά από αυτή, δηλαδή διαστάσεις περίπου 201×10 m, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6**.

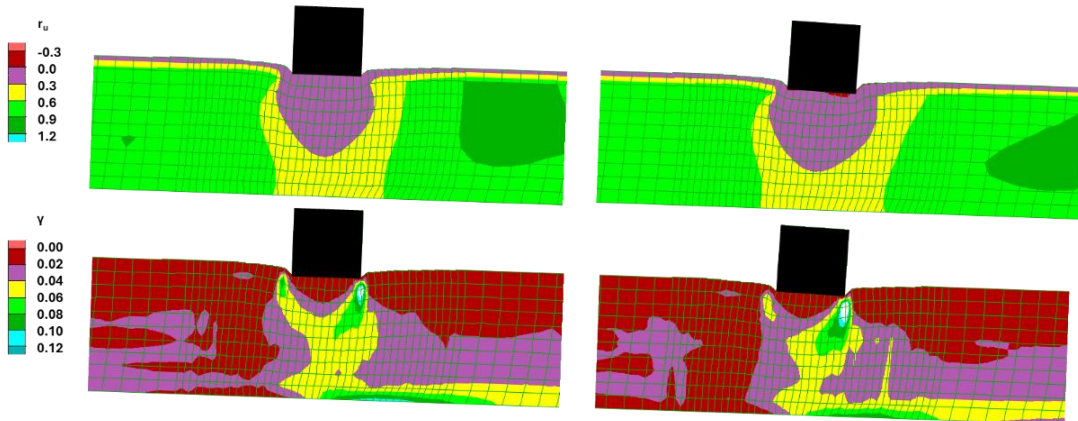


Σχήμα 3.6: Κάνναβος διαστάσεων 201×10 m, ύψους $H = 10$ m για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, χαμηλή κατασκευή ύψους $L = 5$ m και πλάτους $B = 5$ m.

Όπως αναμενόταν, η ανάλυση όπου χρησιμοποιήθηκε ο ευρύτερος κάνναβος διαστάσεων 201×10 m παρουσίασε ουσιαστικά ταυτόσημα αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση με χρήση του τυπικού καννάβου στην περιοχή ενδιαφέροντος, τουλάχιστον. Αυτό αφορά τόσο στις τιμές της οριζόντιας μετακίνησης και καθίζησης της κατασκευής στο τέλος της διέγερσης (**Πίνακας 3.3**), όσο και στις ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ υπό την χαμηλή κατασκευή (**Σχήμα 3.7**). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το εύρος του τυπικού καννάβου (πλάτος 10 φορές περίπου το πάχος του εδάφους) επαρκεί για την ορθή προσομοίωση της απόκρισης κατασκευής επ' αυτού, και δεν χρειάζεται αυτό να επεκτείνεται περαιτέρω με αποτέλεσμα την αύξηση του υπολογιστικού κόστους.

	Οριζόντια μετακίνηση x	Καθίζηση z
Διπλάσιος κάρναβος	0.40	-0.33
Τυπικός κάρναβος	0.39	-0.34

Πίνακας 3.3: Τιμές οριζόντιας μετακίνησης και καθίζησης χαμηλής κατασκευής ($L = 5$ m) πλάτους $B = 5$ m, φορτίου $q = 100$ kPa σε ομοιόμορφη άμμο πάχους 10 m με γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στο τέλος της διέγερσης με χρήση του τυπικού κάρναβου και ενός διπλάσιου εύρους.



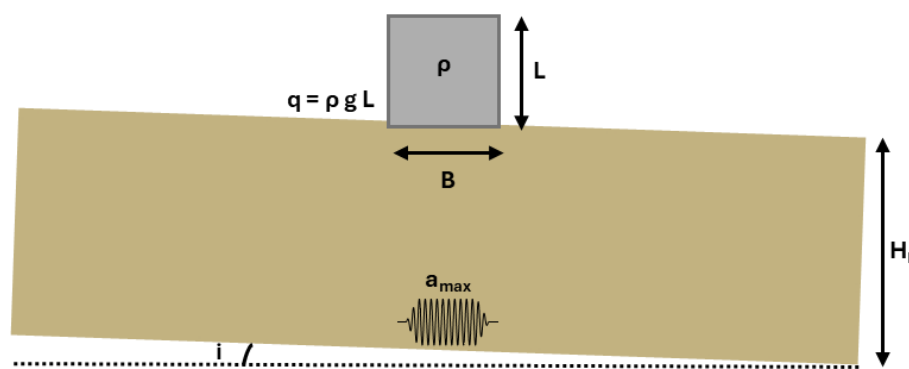
Σχήμα 3.7: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H = 10$ m και κλίσης $i = 2^\circ$ αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$, για τον τυπικό κάρναβο (αριστερά) και τον διπλάσιό του (δεξιά)

4 Απόκριση κατασκευής υπό πλευρική εξάπλωση

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την μελέτη της απόκρισης μιας κατασκευής εδραζόμενης σε ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση ήπιας κλίσης υπό σεισμική διέγερση. Οι αναλύσεις είχαν παραμετρική φύση με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στην εν λόγω απόκριση. Η απόκριση μελετάται σε όρους οριζόντιας μετατόπισης, καθίζησης και στροφής της κατασκευής, καθώς και με διαγράμματα των ισοκαμπυλών της συσσωρευμένης διαμητρικής παραμόρφωσης γ και του λόγου υπερπίεσεων $r_u = \Delta u / \sigma'_{v0}$ στο έδαφος θεμελίωσης στο τέλος της διέγερσης (όπου Δu η υπερπίεση πόρων και σ'_{v0} η αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση σε κάθε σημείο). Επισημαίνεται ότι η απόκριση μελετάται συγκριτικά με την απόκριση αναφοράς, ήτοι η καθίζηση σε σύγκριση με την καθίζηση της ίδιας κατασκευής αν το έδαφος ήταν οριζόντιο και η οριζόντια μετατόπιση σε σύγκριση με την οριζόντια μετατόπιση του εδάφους μακριά από την κατασκευή (ή αν δεν υπήρχε η κατασκευή: ανάλυση ελεύθερου πεδίου). Σχετικά με τη στροφή της κατασκευής δεν υπάρχει απόκριση αναφοράς, καθώς η κατασκευή αυτή δεν στρέφεται αν το έδαφος είναι οριζόντιο, όπως δεν στρέφεται και η επιφάνεια του κεκλιμένου εδάφους (απλά ολισθαίνει).

Στο **Σχήμα 4.1** απεικονίζεται η τυπική διάταξη του προβλήματος και ορίζονται οι σημαντικές του παράμετροι, ήτοι από τα εδαφικά χαρακτηριστικά, η κλίση του εδάφους i και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L και από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής το φορτίο q , το εύρος B και το ύψος L . Στον συγκεντρωτικό **Πίνακα 4.1** παρατίθενται όλες οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου και αναφέρεται η παράγραφος στην οποία παρουσιάζονται. Η παρουσίαση γίνεται με βάση τις τιμές των σημαντικών παραμέτρων που υιοθετούνται σε κάθε ανάλυση. Επιπλέον, στον **Πίνακα 4.2** παρουσιάζονται οι αναλύσεις αναφοράς που χρειάστηκε να εκτελεστούν χάριν σύγκρισης της απόκρισης σε όρους καθίζησης και οριζόντιας μετατόπισης. Υπογραμμίζεται ότι οι αναλύσεις αυτές δεν είναι οι μόνες που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Οι υπόλοιπες (που είναι και η πλειονότητα) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Κεφάλαιο 5. Επισημαίνεται τέλος ότι η παραμετρική διερεύνηση δεν επεκτάθηκε στα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης, τα οποία διατηρήθηκαν σταθερά σε όλη την εργασία χάριν απλότητας.



Σχήμα 4.1: Σκαρίφημα κατασκευής πλάτους B , ύψους L , ισοδύναμου φορτίου q σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους H_L και γωνίας κλίσης i υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N =$

Παράγραφος	H_L (m)	B (m)	i (°)	q (kPa)	Είδος
4.2	10	5	2	100	Χαμηλή κατασκευή
4.3	10	5	0.3	100	Χαμηλή κατασκευή
	10	5	3.4	100	Χαμηλή κατασκευή
4.4	10	5	2	50	Χαμηλή κατασκευή
	10	5	2	200	Χαμηλή κατασκευή
4.5	10	20	2	100	Χαμηλή κατασκευή
4.6	10	5	2	100	Φορτισμένο θεμέλιο
	10	5	2	100	Υψηλή κατασκευή
4.7	5	5	2	100	Χαμηλή κατασκευή

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά αναλύσεων για την πλευρική εξάπλωση μιας τυπικής κατασκευής (και τις παραλλαγές αυτών) και η παράγραφος του Κεφαλαίου στην οποία παρουσιάζονται.

H_L (m)	B (m)	i (°)	q (kPa)	Είδος
10	5	0	100	Χαμηλή κατασκευή
10	-	2	-	Κεκλιμένο έδαφος

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά αναλύσεων αναφοράς για την πλευρική εξάπλωση μιας τυπικής κατασκευής, στο πλαίσιο των αναγκών της παραγράφου 4.2.

Πιο συγκεκριμένα, στην παράγραφο 4.2 παρουσιάζεται λεπτομερώς η τυπική απόκριση μιας τυπικής κατασκευής (ήτοι μιας χαμηλής κατασκευής ύψους $L = 5$ m και πλάτους $B = 5$ m, ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa) σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ και η σύγκρισή της με τις αποκρίσεις αναφοράς. Στη συνέχεια, στην παράγραφο 4.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων της χαμηλής κατασκευής για διαφορετικές κλίσεις εδάφους δηλαδή $i = 0.3^\circ$ και $i = 3.4^\circ$ και στην παράγραφο 4.4 τα αποτελέσματα της χαμηλής κατασκευής για διαφορετικά φορτία $q = 50$ kPa και $q = 200$ kPa. Στην παράγραφο 4.5 για να εξεταστεί η επίδραση του εύρους της κατασκευής παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χαμηλής κατασκευής με πλάτος $B = 20$ m και στην επόμενη παράγραφο 4.6, η απόκριση για υψηλή κατασκευή (με ύψος $L = 10$ m) και για φορτισμένο θεμέλιο ύψους $L = 1$ m (συνήθης παραδοχή όταν δεν προσομοιώνεται η κατασκευή). Τέλος, στην παράγραφο 4.7, εξετάζεται η επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης με την ανάλυση της χαμηλής κατασκευής επί ρευστοποιήσιμης στρώσης με πάχος $H_L = 5$ m αντί του πάχους $H_L = 10$ m που χρησιμοποιήθηκε στο υπόλοιπο Κεφάλαιο. Σημειώνεται και πάλι πως υπάρχουν πολλές αναλύσεις των οποίων τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο χάριν συντομίας, αλλά εμπεριέχονται αναλυτικά στο **Παράρτημα Α** και συνοπτικά στο Κεφάλαιο 5.

Σχετικά με τα πρόσημα των αποτελεσμάτων, η αρνητική τιμή της καθίζησης z υποδηλώνει την μείωση της μέσης στάθμης του θεμελίου σε σύγκριση με αρχική στάθμη, η θετική τιμή της οριζόντιας μετακίνησης x υποδηλώνει την μετακίνηση προς τα δεξιά/κατάντη και η αρνητική τιμή της στροφής θ υποδηλώνει την ωρολογιακή, προς τα κατάντη στροφή της κατασκευής.

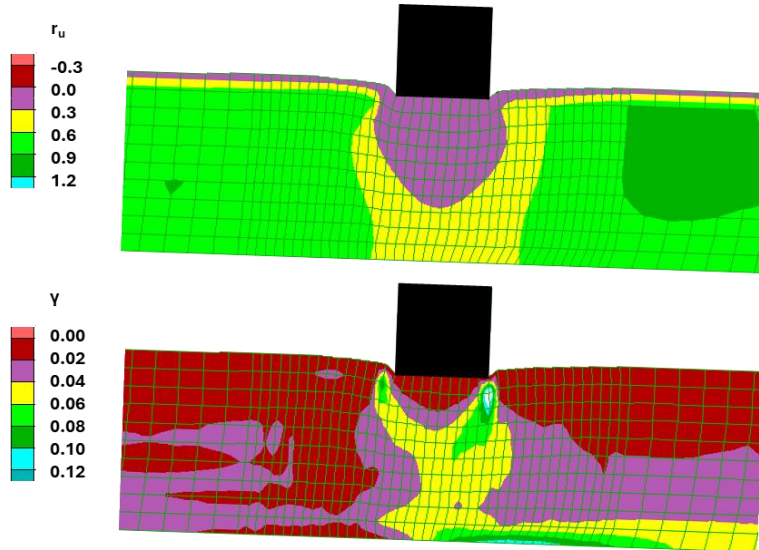
4.2 Τυπική απόκριση κατασκευής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, εδώ διερευνάται η τυπική απόκριση μιας κατασκευής υπό πλευρική εξάπλωση, η οποία θεωρείται ότι είναι μια χαμηλή κατασκευή ύψους $L = 5$ m και πλάτους $B = 5$ m, ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$.

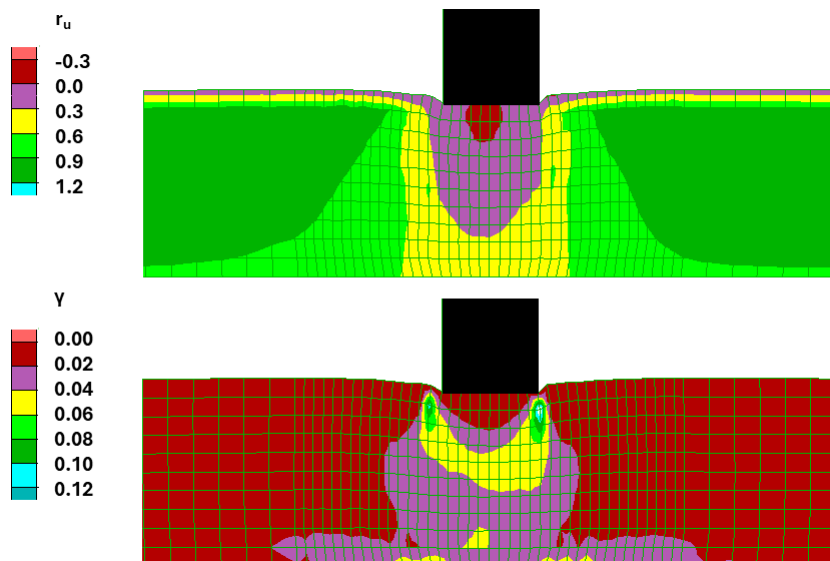
Για την κατανόηση του μηχανισμού της απόκρισης είναι σημαντικό να εξεταστεί η κατανομή των τιμών του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u ώστε να καθοριστεί σε ποια περιοχή συμβαίνει η ρευστοποίηση και η κατανομή των τιμών της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους γ ώστε να καθοριστεί που δημιουργούνται ζώνες ολίσθησης. Παρατηρώντας τις ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u στο **Σχήμα 4.2** προκύπτει ότι οι τιμές του είναι μικρότερες της μονάδας κάτω από την κατασκευή δηλαδή, δεν συμβαίνει ρευστοποίηση σε εκείνη την περιοχή, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει μακριά από την κατασκευή. Αυτό οφείλεται κυρίως στην τοπική αύξηση των αρχικών ενεργών τάσεων σ'_{vo} λόγω του φορτίου της ανωδομής, κάτι το οποίο απαντάται και κάτω από την ίδια κατασκευή σε οριζόντιο έδαφος (βλ. **Σχήμα 4.3**), ενώ δεν συμβαίνει σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (χωρίς κατασκευή) όπου το έδαφος ρευστοποιείται παντού, είτε έχει κλίση (βλ. **Σχήμα 4.4**) είτε είναι οριζόντιο. Αναφορικά με την συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση του εδάφους γ που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.2** για την περίπτωση εδαφική στρώσης με κλίση, εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές στην περιοχή κατάντη της κατασκευής, καθώς η περιοχή με τις μεγάλες τιμές γ λόγω του μηχανισμού αστοχίας του θεμελίου συνδέεται με την αντίστοιχη περιοχή στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης (κυρίως στα κατάντη της κατασκευής), που σχετίζεται με την οριζόντια μετατόπιση του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου (βλ. **Σχήμα 4.4**). Η μη-συμμετρία του μηχανισμού αστοχίας της κατασκευής υπονοεί και στροφή της κατασκευής προς τα κατάντη. Αντιθέτως, όταν το έδαφος είναι οριζόντιο (βλ. **Σχήμα 4.3**), ο μηχανισμός αστοχίας είναι συμμετρικός (μηδενική στροφή) και δεν προκύπτει περιοχή μεγάλων τιμών γ στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης, καθώς δεν υπάρχει οριζόντια μετακίνηση του εδάφους όταν αυτό είναι οριζόντιο.

Για την εξαγωγή λεπτομερέστερων συμπερασμάτων, είναι χρήσιμο να ληφθούν υπόψη και οι χρονοϊστορίες της καθίζησης, οριζόντιας μετακίνησης και στροφής της κατασκευής οι οποίες παρουσιάζονται στα **Σχήματα 4.5, 4.6** και **4.7** και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες σε οριζόντιο έδαφος για την καθίζηση και του κεκλιμένου εδάφους για την οριζόντια μετακίνηση. Από τα διαγράμματα χρονοϊστοριών, προκύπτει ότι η καθίζηση, η οριζόντια μετακίνηση και η στροφή της κατασκευής αυξάνουν γραμμικά με το χρόνο, καθώς η διέγερση είναι αρμονική (δηλαδή έχει ίδια ένταση ανά κύκλο). Από εκεί και πέρα, στο τέλος της διέγερσης, η καθίζηση αυξάνει ελαφρώς όταν η κατασκευή είναι σε κεκλιμένη εδαφική στρώση ($z = -0.34$ m) σε σύγκριση με το αν ήταν η ίδια στρώση ήταν οριζόντια ($z_0 = -0.32$ m). Αντίθετα, η οριζόντια μετακίνηση ($x = 0.39$ m) είναι λίγο μικρότερη από αυτή που έχει το έδαφος χωρίς κατασκευή ($x_{\#} = 0.43$ m). Τέλος, όπως ήταν αναμενόμενο, αναπτύσσεται στροφή προς τα κατάντη με τιμή $\theta = -1.31^\circ$, δηλαδή αρκετά κοντά στη γωνία κλίσης του εδάφους (2°), ενώ η αντίστοιχη τιμή στροφής είναι μηδενική ή ασήμαντη (ήτοι αριθμητικής φύσης) αν η ίδια κατασκευή εδράζεται σε οριζόντιο έδαφος.

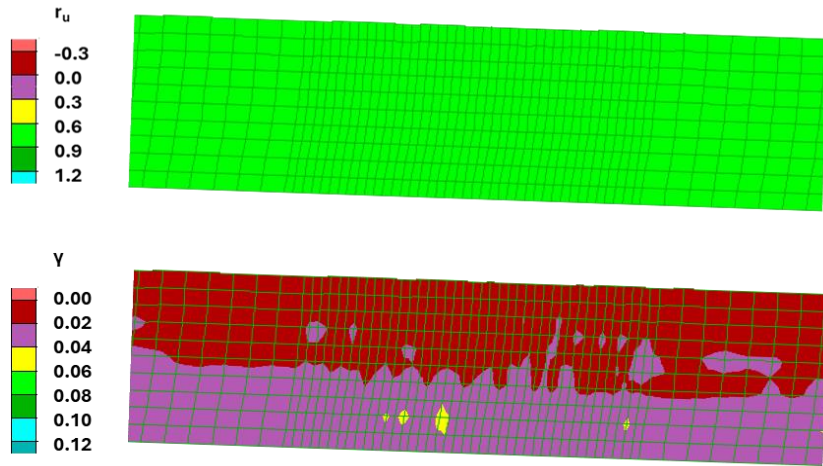
Όλες οι ανωτέρω επιδράσεις δεν μπορούν να εξηγηθούν από την κατανομή των υπερπίεσεων πόρων κάτω από την κατασκευή, καθώς αυτή δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη διαφορά λόγω κλίσης του εδάφους. Αυτό που είναι διαφορετικό λόγω κλίσης εδάφους είναι η ανάπτυξη μηχανισμού αστοχίας του ελεύθερου πεδίου στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης, ο οποίος ενώνεται με τον μηχανισμό αστοχίας της κατασκευής στην κατάντη άκρη της. Αυτή η συνένωση μηχανισμών αστοχίας δημιουργεί ασυμμετρία στον μηχανισμό αστοχίας, και συνεπώς στροφή (προς τα κατάντη, $\theta < 0$), η οποία δημιουργεί και μικρή αύξηση της καθίζησης της κατασκευής (που μετράται στο μέσο της βάσης) σε σχέση με το αν η στρώση ήταν οριζόντια (άρα $z/z_0 > 1$). Ταυτόχρονα, η τοπική αύξηση των κατακορύφων τάσεων λόγω της κατασκευής στην περιοχή υπό αυτήν οδηγεί σε τοπική αύξηση της αντοχής και στιβαρότητας σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο που έχει ρευστοποιηθεί πλήρως, με αποτέλεσμα τη μείωση της οριζόντιας μετακίνησης της κατασκευής σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο (δηλαδή $x/x_{\#} < 1$).



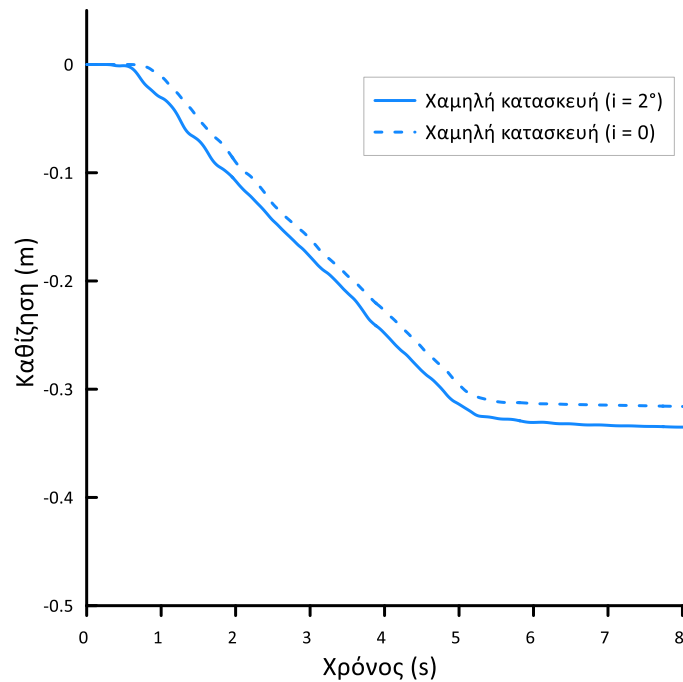
Σχήμα 4.2: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$



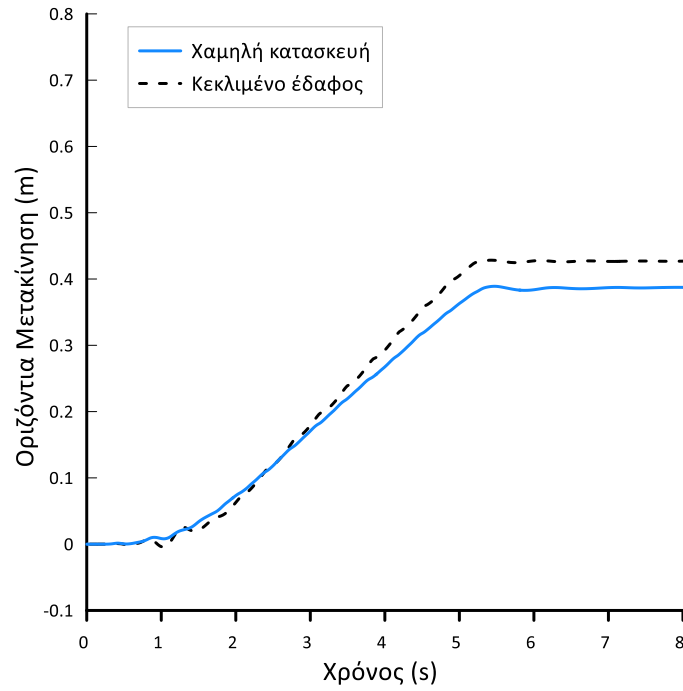
Σχήμα 4.3: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ (ανάλυση αναφοράς)



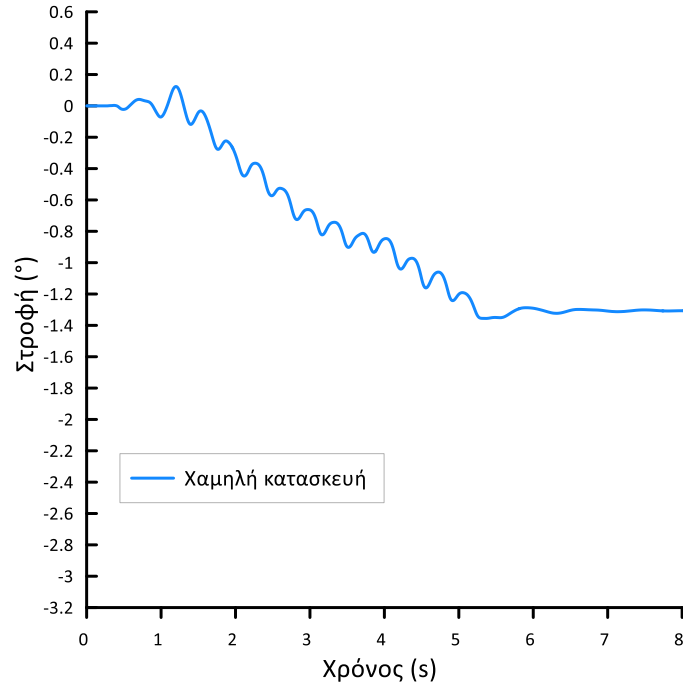
Σχήμα 4.4: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m υπό γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ (συνθήκες ελεύθερου πεδίου – ανάλυση αναφοράς)



Σχήμα 4.5: Χρονοϊστορία καθίζησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνη της ίδιας κατασκευής στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



Σχήμα 4.6: Χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.7: Χρονοϊστορία στροφής χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.

4.3 Επίδραση κλίσης εδάφους

Σε ό,τι αφορά στην απόκριση της κατασκευής, μια από τις παραμέτρους που εξετάστηκε ήταν η κλίση του εδάφους. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για διαφορετικές τιμές γωνίας κλίσης εδάφους 0.3° , 2° (βλ. παράγραφο 4.2) και 3.4° , δηλαδή τιμές κλίσης 0.5% , 3.5% και 6% , αντίστοιχα, κρατώντας ίδιες τις τιμές των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του προβλήματος για να φανεί η επίδραση αποκλειστικά της γωνίας κλίσης i του εδάφους.

Στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ για γωνία κλίσης εδάφους 0.3° για την ίδια χαμηλή κατασκευή. Παρατηρείται ότι οι ισοκαμπύλες r_u και γ για γωνία 0.3° είναι πιο κοντινές σε εκείνες για οριζόντιο έδαφος (**Σχήμα 4.3**), παρά με εκείνες για γωνία 2° (**Σχήμα 4.2**). Αντίθετα, από το **Σχήμα 4.9** φαίνεται ότι για γωνία κλίσης εδάφους 3.4° ο μηχανισμός αστοχίας της κατασκευής εμποδώνεται προς τα κατάντη (στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης), ακόμη περισσότερο κι απ' ό,τι για γωνία 2° (**Σχήμα 4.2**). Δεν υπάρχουν πολύ σημαντικές διαφορές σε όρους r_u .

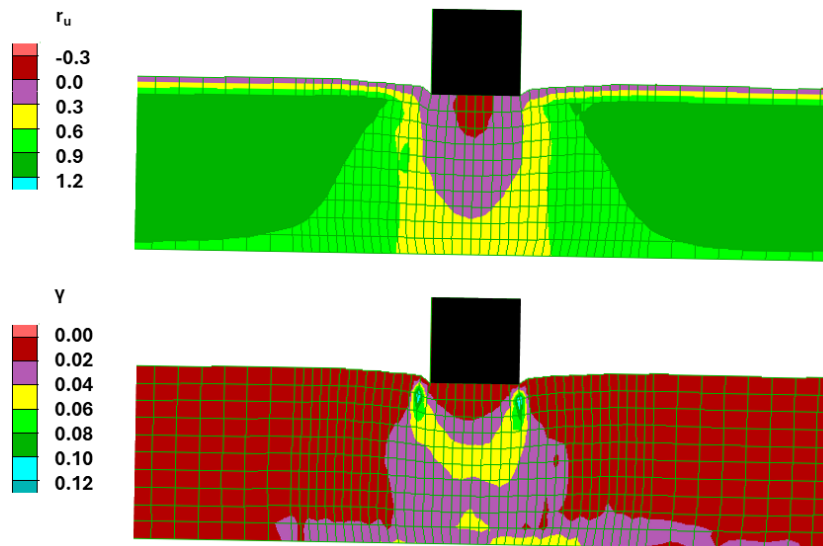
Στο **Σχήμα 4.10** στο οποίο παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης της κατασκευής για διαφορετικές τιμές γωνίας κλίσης εδάφους, παρατηρείται πως η χαμηλή κατασκευή για μικρή γωνία κλίσης εδάφους (0.3°) παρουσίασε καθίζηση z πρακτικώς ίδια με εκείνη που θα είχε αν είχε θεμελιωθεί σε οριζόντιο έδαφος. Αντίθετως, για μεγάλη γωνία κλίσης εδάφους (3.4°), η καθίζηση z είναι σαφώς αυξημένη σε σχέση με εκείνη που εμφανίζει η ίδια κατασκευή σε οριζόντιο έδαφος (z_0). Με βάση αυτή την εικόνα, προκύπτει ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης i αυξάνει την τιμή της καθίζησης z της κατασκευής.

Αναφορικά με την οριζόντια μετακίνηση, από τις χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης της χαμηλής κατασκευής και του ελευθέρου πεδίου για τις τρεις γωνίες κλίσης εδάφους $i = 0.3^\circ$, 2.0° και 3.4° που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.11**, φαίνεται πως η αύξηση της γωνίας κλίσης του εδάφους i είχε ως αποτέλεσμα την (σχεδόν αναλογική) αύξηση της οριζόντιας μετακίνησης x , όπως ακριβώς αυξάνει και η οριζόντια μετακίνηση του ελευθέρου πεδίου x_{ff} . Ακόμη διαπιστώνεται ότι για όλες τις γωνίες κλίσης i , οι κατασκευές εμφάνισαν μικρότερη οριζόντια μετακίνηση x σε σχέση με αυτή σε ελεύθερο πεδίο x_{ff} (χωρίς κατασκευή) ίδιας κλίσης.

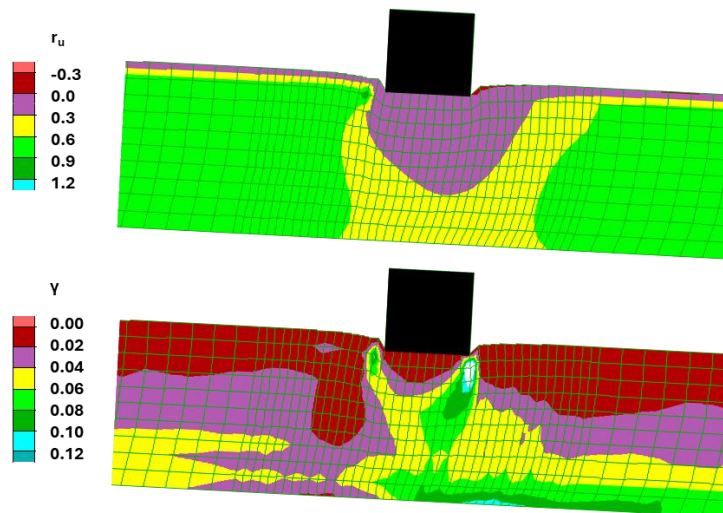
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.12** εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες στροφής της χαμηλής κατασκευής για τις διαφορετικές γωνίες κλίσης i και σταθερά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά. Με βάση αυτές, φαίνεται πως η αύξηση της γωνίας κλίσης του εδάφους i επιδρά αυξητικά στην τιμή της στροφής θ της κατασκευής. Πρακτικώς, για $i=0.3^\circ$, η γωνία θ είναι σχεδόν μηδενική (όσο θα ήταν δηλαδή για οριζόντιο έδαφος), ενώ με την αύξηση της γωνίας κλίσης i εδάφους παρατηρήθηκε αύξηση της γωνίας στροφής θ προς την κατάντη πλευρά. Αν εξαιρέσει κανείς τη γωνία θ για $i=0.3^\circ$, οι τιμές της θ που προκύπτουν για μεγαλύτερες τιμές γωνίας κλίσης i εδάφους είναι αρκετά σημαντικές.

Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων, διαπιστώνεται πως η επίδραση της γωνίας κλίσης i του εδάφους έχει μικρή αυξητική επίδραση στην καθίζηση z της χαμηλής κατασκευής. Αντιθέτως, η επίδραση της γωνίας κλίσης i του εδάφους στην οριζόντια μετακίνηση x της κατασκευής είναι επίσης αυξητική, αλλά σημαντικά εντονότερη, ενώ αντίστοιχα αυξητική επίδραση προκύπτει και για την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του ελευθέρου πεδίου. Ομοίως, και για την προς τα κατάντη στροφή θ της κατασκευής προκύπτει αύξηση λόγω αύξησης της γωνίας κλίσης i του εδάφους. Για τιμή $i = 0.3^\circ$, η απόκριση της χαμηλής κατασκευής μοιάζει πολύ με την απόκριση της αν το έδαφος ήταν οριζόντιο, δηλαδή $z \approx z_0$, $x \approx 0$ (ενώ $x_{ff} > 0$) και $\theta \approx 0$. Συνεπώς, η γωνία κλίσης i του εδάφους προκύπτει ως σημαντική παράμετρος της απόκρισης. Οφείλεται στο ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης i δημιουργεί εντονότερο μηχανισμό ολίσθησης στη βάση

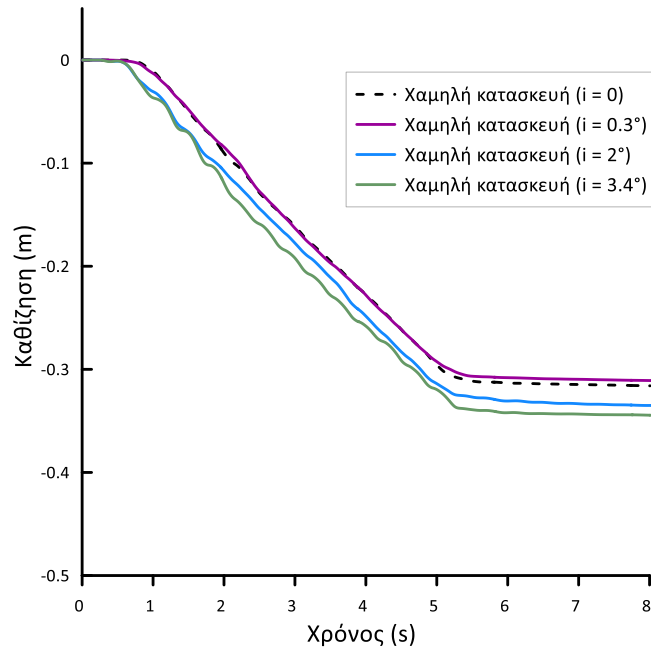
της ρευστοποιήσιμης στρώσης, η συνένωση του οποίου με εκείνον της κατασκευής λειτουργεί δυσμενώς σε όλα τα μεγέθη απόκρισης αυτής (δηλ. αύξηση z , x και θ , κατ' απόλυτη τιμή).



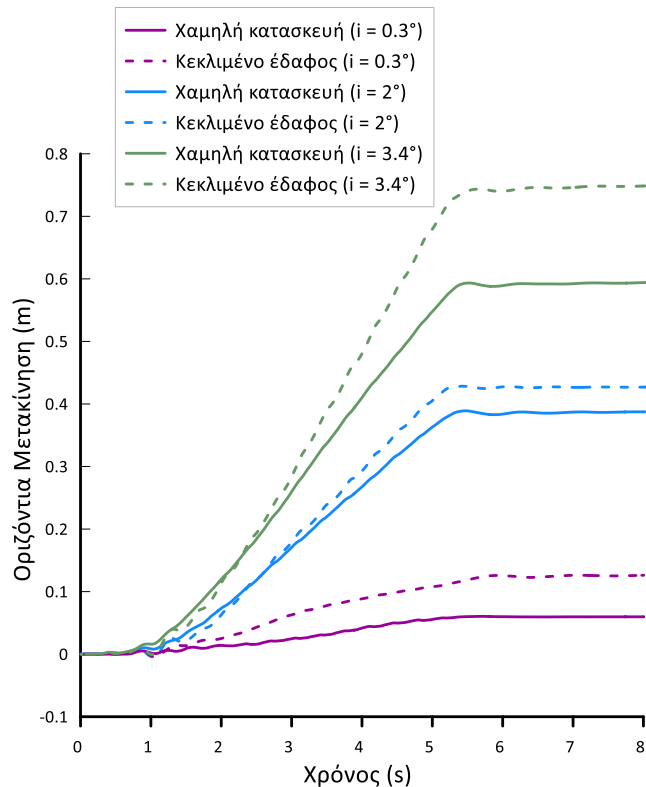
Σχήμα 4.8: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



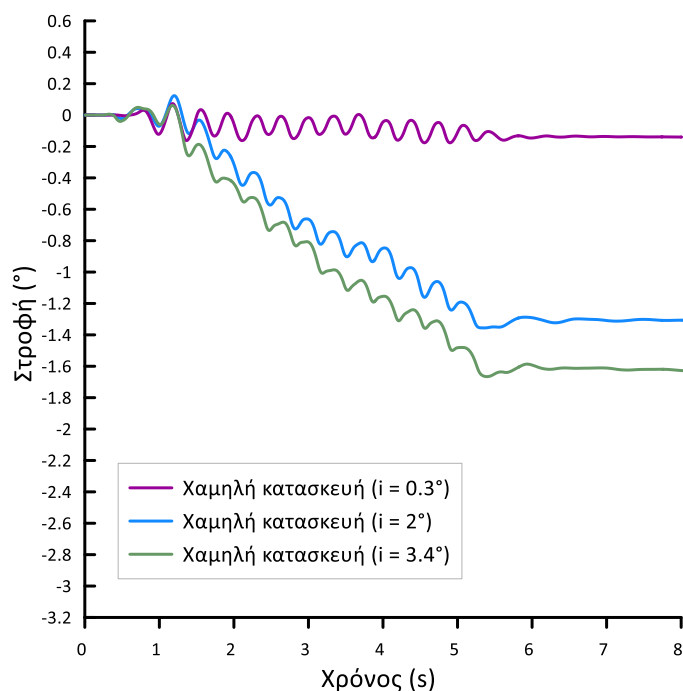
Σχήμα 4.9: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 3.4^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



Σχήμα 4.10: Χρονοϊστορίες καθίζησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2.0^\circ, 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνη της ίδιας κατασκευής στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



Σχήμα 4.11: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2.0^\circ, 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.12: Χρονοϊστορίες στροφής χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2.0^\circ, 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.

4.4 Επίδραση φορτίου κατασκευής

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση του φορτίου q της κατασκευής μέσω της εκτέλεσης δύο επιπλέον αναλύσεων για τη χαμηλή κατασκευή της παραγράφου 4.2, αλλά με διαφορετικά φορτία $q = 50$ kPa και $q = 200$ kPa. Δηλαδή οι δύο επιπλέον αναλύσεις αφορούσαν φορτία q που ήταν ίσα με το 50% και το 200% του φορτίου $q = 100$ kPa της χαμηλής κατασκευής της παραγράφου 4.2, με όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προβλήματος να παραμένουν ίδια.

Στα **Σχήματα 4.13** και **4.14** στα οποία απεικονίζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ για φορτία κατασκευής $q = 50$ kPa και $q = 200$ kPa, είναι εμφανές πως με την αύξηση του φορτίου q αυξάνεται και η περιοχή κάτω από την κατασκευή η οποία δεν ρευστοποιείται, ενώ σε απόσταση αριστερά και δεξιά από την κατασκευή το έδαφος ρευστοποιείται ομοίως (σαν το ελεύθερο πεδίο). Δηλαδή για φορτίο $q = 200$ kPa, δημιουργείται μια μη-ρευστοποιημένη εδαφική στήλη κάτω από την κατασκευή σε βάθος όσο το πάχος της εδαφικής στρώσης, ενώ όσο το φορτίο q μειώνεται, το βάθος της στήλης αυτής περιορίζεται (βλ. **Σχήμα 4.13** και **Σχήμα 4.2** για $q = 50$ και 100 kPa, αντίστοιχα). Παρόλα αυτά, όσο μεγαλώνει το φορτίο q , τόσο πιο πολύ εμπεδωμένος γίνεται ο μηχανισμός αστοχίας κάτω από την κατασκευή και προς τα κατόντη (στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης), λόγω αύξησης των διατμητικών τάσεων. Εκτιμάται ότι αυτή η εμπέδωση του μηχανισμού αστοχίας με την αύξηση του q θα ήταν πολύ εντονότερη αν δεν δημιουργούνταν αυτή η «στιβαρή» στήλη εδάφους κάτω από την κατασκευή.

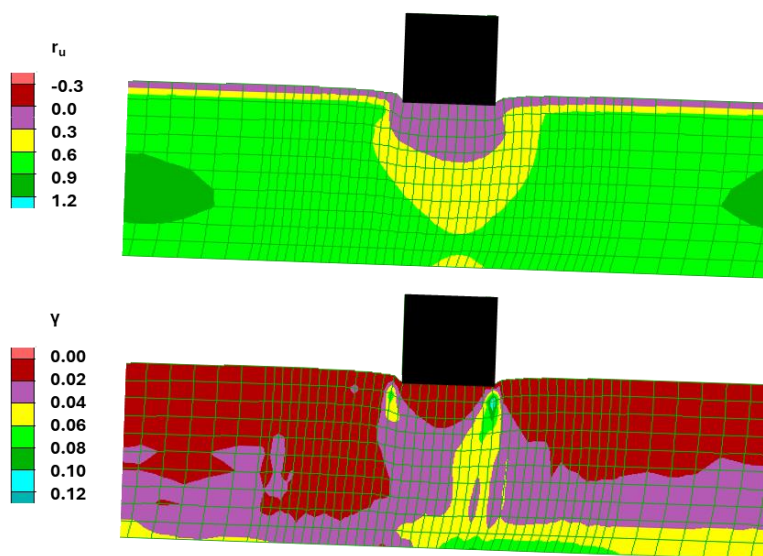
Από τις χρονοϊστορίες καθίζησης της χαμηλής κατασκευής για φορτία $q = 50, 100$ και 200 kPa που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.15**, φαίνεται πως με την αύξηση του φορτίου q της κατασκευής αυξάνεται σημαντικά και η τιμή της καθίζησης z . Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης, ότι η αύξηση του φορτίου q οδηγεί και σε αύξηση της καθίζησης z_0 που θα εμφάνιζε η ίδια χαμηλή κατασκευή αν θεμελιωνόταν σε οριζόντιο έδαφος. Σημαντικό είναι επίσης, ότι η διαφορά μεταξύ των καθιζήσεων z και z_0 ανά φορτίο κατασκευής δείχνει να αυξάνει για την

κατασκευή αυτή, με τις τιμές αυτές να είναι πρακτικώς ταυτόσημες για την ελαφριά κατασκευή με $q = 50\text{kPa}$.

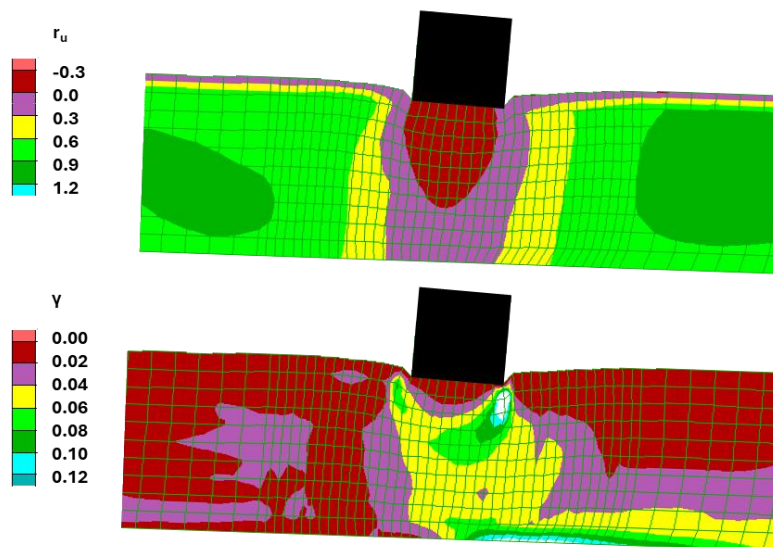
Ακολουθώς, από το **Σχήμα 4.16** των χρονοϊστοριών οριζόντιας μετακίνησης των κατασκευών x προκύπτει αμελητέα επίδραση του φορτίου q στην τιμή αυτής. Και σε όλες τις περιπτώσεις, αυτό το εύρος τιμών x για τις χαμηλές κατασκευές με $q = 50 - 200\text{ kPa}$ παίρνει τιμές λίγο πιο μικρές από την τιμή της οριζόντιας μετακίνησης x_{ff} του ελεύθερου πεδίου για αυτή την κλίση εδάφους.

Αντιθέτως, για τις χρονοϊστορίες στροφής θ της χαμηλής κατασκευής με τα διαφορετικά φορτία q που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.17** προκύπτει πως η αύξηση του φορτίου q οδηγεί σε σημαντική αύξηση της στροφής θ της κατασκευής. Επισημαίνεται πάντως, ότι ακόμη και για την πιο ελαφριά κατασκευή ($q = 50\text{kPa}$), η τιμή της στροφής θ δεν είναι αμελητέα, ως αποτέλεσμα της γωνίας κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ που είναι κοινή για τις χαμηλές κατασκευές στο Σχήμα αυτό.

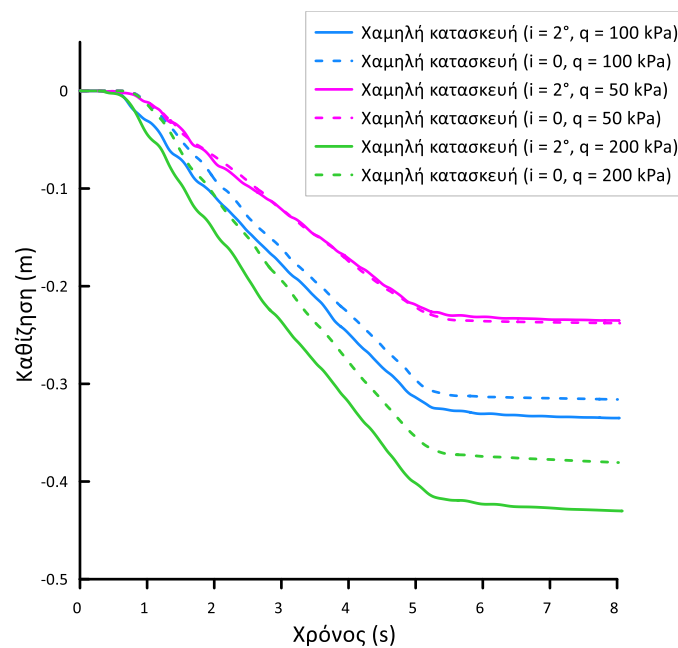
Συμπεραίνεται ότι η αύξηση του φορτίου q της κατασκευής οδηγεί σε σημαντική αύξηση της καθίζησης z της (χαμηλής) κατασκευής, που συνοδεύεται από σημαντική αύξηση της στροφής θ . Αντιθέτως, το φορτίο q δείχνει να έχει ελάχιστη επιρροή στην μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης x . Συνεπώς, το φορτίο κατασκευής q προκύπτει ως σημαντική παράμετρος της απόκρισης, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά στην καθίζηση και τη στροφή της. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση του q οδηγεί σε αύξηση των διατμητικών τάσεων και συνεπώς την εμπέδωση του μη-συμμετρικού μηχανισμού αστοχίας, ο οποίος συνεπάγεται αύξηση της καθίζησης z και της στροφής θ . Αντιθέτως, στιβαρή στήλη εδάφους κάτω από την κατασκευή λόγω αύξησης των κατακόρυφων τάσεων που μειώνει την οριζόντια μετακίνηση x δημιουργείται ακόμη και για τη μικρή τιμή του φορτίου q , οπότε η περαιτέρω αύξησή του q δεν δημιουργεί ουσιωδώς επιπλέον όφελος στη μείωση της μετακίνησης x .



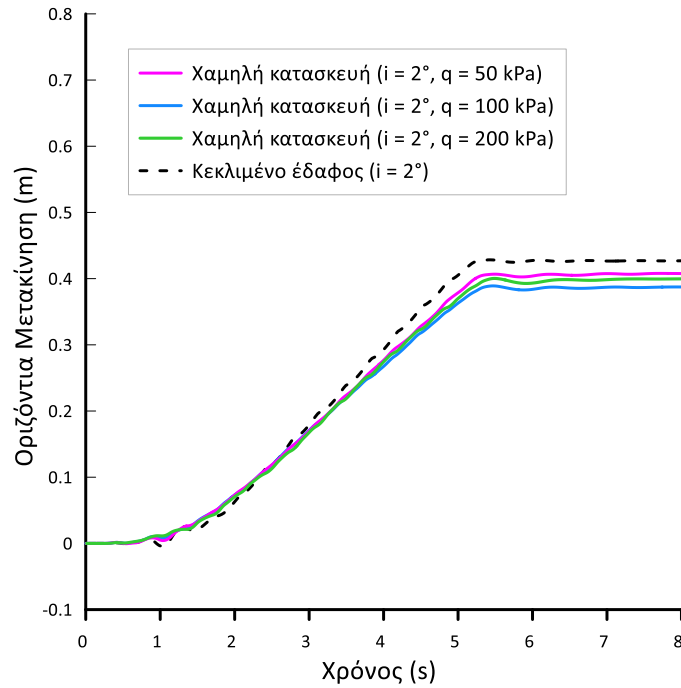
Σχήμα 4.13: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5\text{ m}$ και ισοδύναμου φορτίου $q = 50\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10\text{ m}$ και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35\text{ s}$ και $N = 10$.



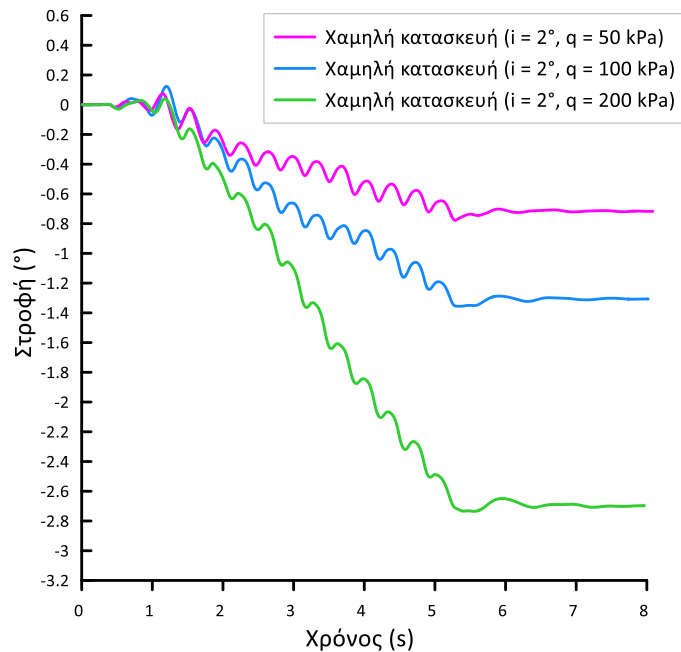
Σχήμα 4.14: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



Σχήμα 4.15: Χρονοϊστορίες καθίζησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ και τιμές φορτίων $q = 50, 100$ και 200 kPa υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων της ίδιας κατασκευής με το ίδιο φορτίο στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



Σχήμα 4.16: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ και τιμές φορτίων $q = 50, 100$ και 200 kPa υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.17: Χρονοϊστορίες στροφής χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ και τιμές φορτίων $q = 50, 100$ και 200 kPa υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.

4.5 Επίδραση εύρους κατασκευής

Η εξέταση της επιρροής του εύρους της κατασκευής πραγματοποιήθηκε μέσω μιας επιπλέον ανάλυσης, στην οποία το πλάτος της (χαμηλής) κατασκευής ήταν $B = 20$ m, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του εδάφους και της κατασκευής διατηρήθηκαν ίδια με αυτά της τυπικής περίπτωσης.

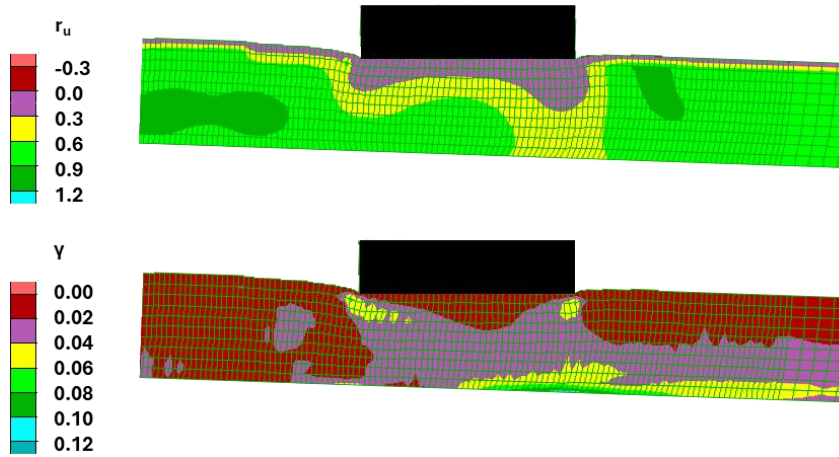
Από το **Σχήμα 4.18** της κατανομής των ισοκαμπυλών λόγου υπερπιέσεων r_u παρατηρείται ότι με την αύξηση του εύρους της κατασκευής αυξάνει το εύρος της στιβαρής, μη-ρευστοποιήσιμης στήλης κάτω από την κατασκευή συγκριτικά με εκείνη για τη στενή κατασκευή ίδιου q . Ακόμη, οι ισοκαμπύλες διατμητικών παραμορφώσεων γ στο ίδιο σχήμα δείχνουν πως οι τιμές της γ είναι χαμηλότερες συγκριτικά με αυτές της στενής κατασκευής, γεγονός που υπονοεί μικρότερη καθίζηση, ενώ ο αδρός μηχανισμός αστοχίας που δημιουργείται δείχνει πρακτικώς συμμετρικός (γεγονός που υπονοεί μηδενική στροφή).

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.19** των χρονοϊστοριών καθίζησης της κατασκευής για διαφορετικά πλάτη $B = 5$ και 20 m, η αύξηση του πλάτους της κατασκευής οδηγεί σε σαφώς μειωμένη τιμή καθίζησης ($z = -0.18$ m) της κατασκευής πλάτους $B = 20$ m συγκριτικά με αυτή πλάτους $B = 5$ m, όπως και αναμενόταν. Αυτό που αλλάζει όμως στην ευρεία κατασκευή είναι ότι αν το έδαφος ήταν οριζόντιο, τότε η καθίζηση της z_0 θα ήταν μεγαλύτερη.

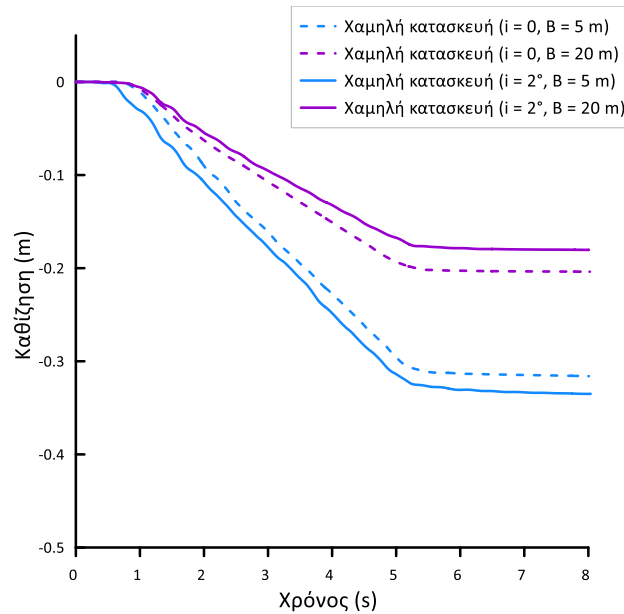
Στη συνέχεια στο **Σχήμα 4.20** στο οποίο παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης επίσης για τα δύο διαφορετικά εύρη κατασκευής, φαίνεται πως η αύξηση του πλάτους επιφέρει μείωση της οριζόντιας μετακίνησης ($x = 0.30$ m) συγκριτικά με εκείνη της στενής κατασκευής. Οπότε, η τιμή της οριζόντιας μετακίνησης για πλάτος $B = 20$ m γίνεται ακόμη πιο μικρή από εκείνη του εδάφους συνθήκες ελεύθερου πεδίου, απ' ό,τι προκύπτει για τη στενή κατασκευή.

Σχετικά με τις χρονοϊστορίες στροφής της κατασκευής για τα διαφορετικά πλάτη B , οι οποίες απεικονίζονται στο **Σχήμα 4.21** διαπιστώνεται ότι η αύξηση του πλάτους έχει σημαντική και σαφή επίδραση στη στροφή της κατασκευής. Εμφανίζεται δηλαδή, τιμή στροφής θ πολύ κοντά στο μηδέν (αριθμητικής φύσης), υποδηλώνοντας ότι η ευρεία κατασκευή πρακτικά δεν έχει υποστεί στροφή παρά την καθίζηση και την οριζόντια μετακίνηση της.

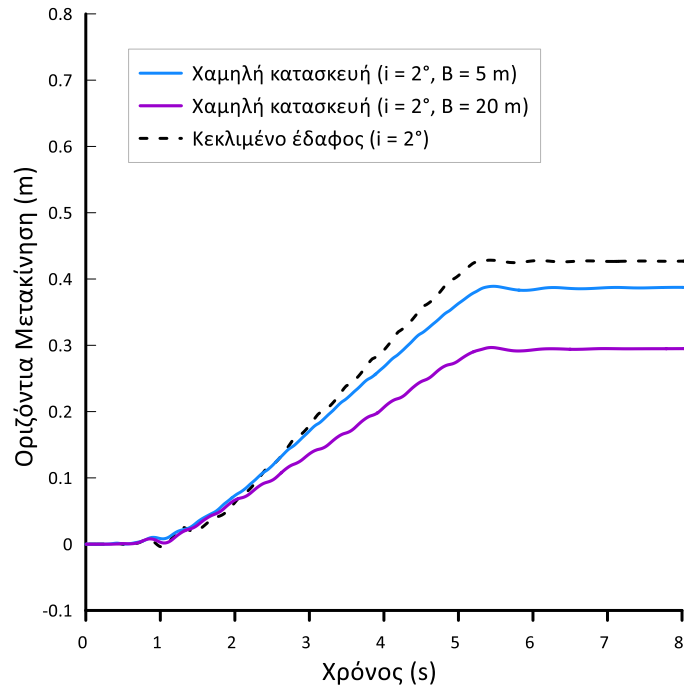
Λαμβάνοντας υπόψιν τις δύο αναλύσεις με τα διαφορετικά εύρη κατασκευής προκύπτει ότι η αύξηση του πλάτους B της κατασκευής σε μεγάλες τιμές οδηγεί σε μείωση των τιμών της καθίζησης z , της οριζόντιας μετακίνησης x και της στροφής θ . Δηλαδή η αύξηση του εύρους B της κατασκευής λειτουργεί συνολικά ευμενώς για εκείνη. Μάλιστα όταν το εύρος B γίνει πολύ μεγάλο (π.χ., εδώ $B/H_L = 2.0$) τότε η φόρτιση αρχίζει να ομοιάζει με 1Δ συμπίεση, αντί για τριαξονική θλίψη που προκύπτει σε στενές κατασκευές (π.χ., εδώ $B/H_L = 0.5$). Οπότε, η μειωμένη διάτμηση της ευρείας κατασκευής σημαίνει μικρότερη σεισμική καθίζηση (που οφείλεται στις διατμητικές τάσεις και όχι στις κατακόρυφες), ενώ η αυξημένη συμπίεση της ευρείας κατασκευής σημαίνει περισσότερο έδαφος ως στιβαρή στήλη που υπονοεί μειωμένη οριζόντια μετακίνηση. Επιπλέον, η μειωμένη διάτμηση σημαίνει μη-εμπέδωση του μηχανισμού αστοχίας της κατασκευής σε βάθος, οπότε δεν υπάρχει διασύνδεση με την κατάντη ζώνη αστοχίας στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Η μη-διασύνδεση διατηρεί τον (αδρό) μηχανισμό αστοχίας συμμετρικό, γεγονός που επεξηγεί την απουσία στροφής της ευρείας κατασκευής.



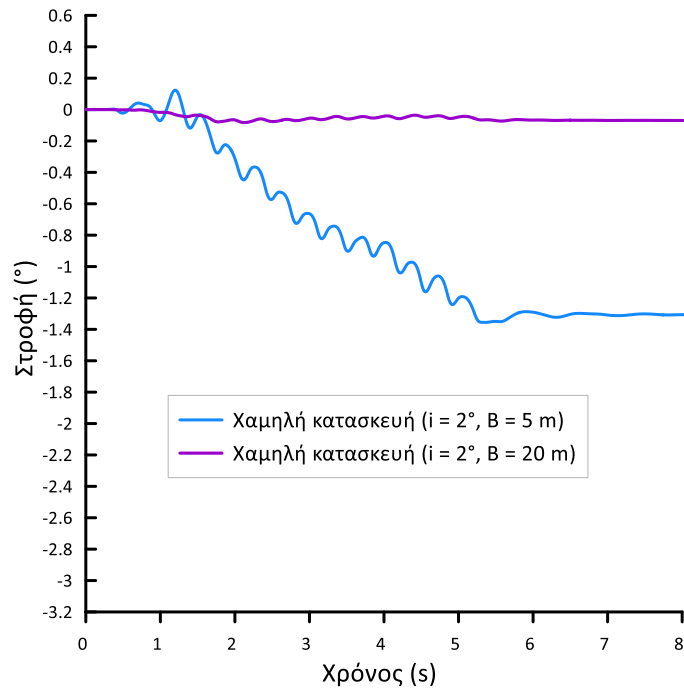
Σχήμα 4.18: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



Σχήμα 4.19: Χρονοϊστορίες καθίζησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5, 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων της ίδιας κατασκευής στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



Σχήμα 4.20: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5, 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.21: Χρονοϊστορίες στροφής χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5, 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.

4.6 Επίδραση ύψους κατασκευής

Στην παρούσα παράγραφο διερευνάται η επίδραση του ύψους της κατασκευής στην απόκριση της σε κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με ύψος κατασκευής $L = 10$ m και αναλύσεις για φορτισμένο θεμέλιο ύψους $L = 1$ m. Η σύγκριση της τυπικής χαμηλής κατασκευής με τις παραπάνω αναλύσεις στοχεύει στην κατανόηση της επιρροής των αδρανειακών δυνάμεων στην απόκριση της κατασκευής. Σημειώνεται ότι συνήθως οι υψηλότερες κατασκευές έχουν μεγαλύτερο βάρος ωστόσο εδώ, διατηρήθηκε σταθερό το φορτίο της κατασκευής για να εξεταστεί αποκλειστικά η επίδραση του ύψους. Έχει ήδη υπογραμμιστεί η απλότητα της εν λόγω αριθμητικής προσέγγισης, καθώς η χαμηλή και η υψηλή κατασκευή έχουν την ίδια αδρανειακή δύναμη να εφαρμόζεται με διαφορετικό μοχλοβραχίονα, ενώ το φορτισμένο θεμέλιο δεν δέχεται αδρανειακή δύναμη καθώς θεωρήθηκε αβαρές. Συνεπώς, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ως απλή επίδραση του ύψους L είναι απλά ενδεικτική για χάριν της παρουσίασης, και δεν μπορεί να θεωρηθεί μια πλήρως ορθή παρουσίαση της επίδρασης του ύψους μιας κατασκευής στην απόκρισή της.

Σε κάθε περίπτωση, βάσει των **Σχημάτων 4.22** και **4.23**, παρατηρείται ότι οι ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων π_i του φορτισμένου θεμελίου και της υψηλής κατασκευής είναι παρόμοιες με αυτές για την τυπική χαμηλή κατασκευή. Ωστόσο, προκύπτουν κάποιες διαφορές στις ισοκαμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης γ ειδικά στο φορτισμένο θεμέλιο, στο οποίο ο μηχανισμός αστοχίας δείχνει έντονα μη συμμετρικός, παρουσιάζοντας εμφανώς μεγαλύτερη στροφή προς τα κατάντη σε σχέση με τις κατασκευές.

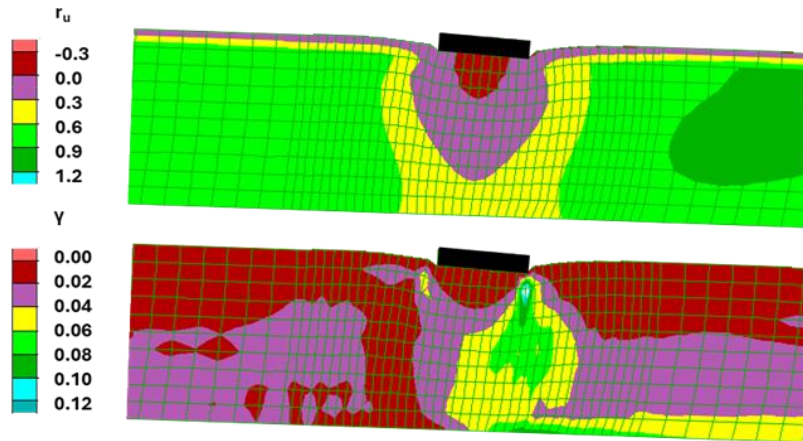
Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.24** στο οποίο παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του φορτισμένου θεμελίου, της χαμηλής και υψηλής κατασκευής ύψους $L = 1, 5$ και 10 m αντίστοιχα, φαίνεται πως η αύξηση του ύψους L δεν έχει μεγάλη επίδραση στην τιμή της καθίζησης z , αν και μάλλον το φορτισμένο θεμέλιο δείχνει να έχει τη μικρότερη τιμή. Από την άλλη, αυτό που είναι συστηματικό είναι ότι η καθίζηση z_0 δείχνει πάντα μικρότερη από εκείνη όταν το έδαφος είναι υπό κλίση (z) σε όλες τις περιπτώσεις.

Οι χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης του φορτισμένου θεμελίου, της χαμηλής και της υψηλής κατασκευής που απεικονίζονται στο **Σχήμα 4.25**, δείχνουν πως οι κατασκευές ανεξαρτήτως ύψους ($L = 5$ ή 10 m) έχουν την ίδια οριζόντια μετακίνηση (η οποία είναι μικρότερη του ελεύθερου πεδίου), η οποία όπως είναι μικρότερη από εκείνη του φορτισμένου θεμελίου (η οποία είναι μεγαλύτερη του ελεύθερου πεδίου).

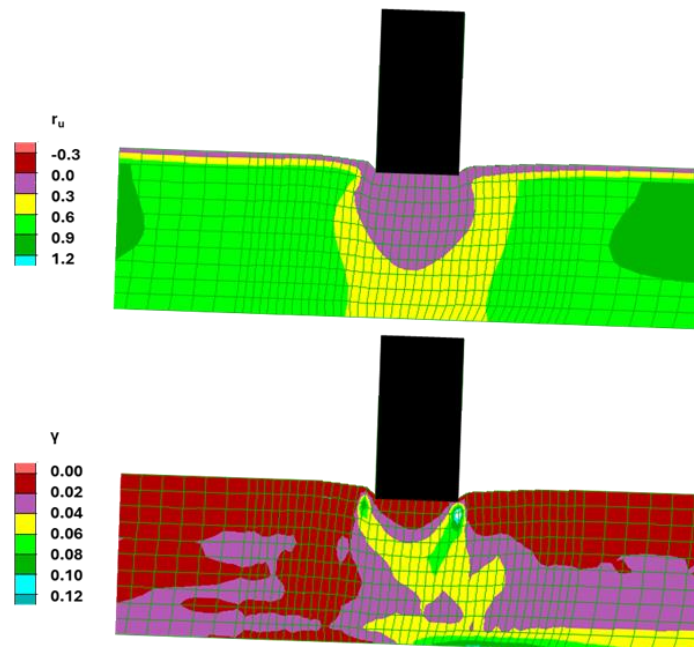
Όσον αφορά την στροφή για τα διαφορετικά ύψη κατασκευής, με βάση το **Σχήμα 4.26** των χρονοϊστοριών στροφής για το φορτισμένο θεμέλιο, την χαμηλή και την υψηλή κατασκευή, φαίνεται πως η αύξηση του ύψους έχει μειωτική επίδραση στην τιμή της στροφής, όπως είχε διαφανεί και από την κατανομή των ισοκαμπυλών παραμόρφωσης γ .

Με βάση όλα τα ανωτέρω, η καθίζηση του φορτισμένου θεμελίου ήταν μικρότερη από εκείνες των δύο κατασκευών. Αντιθέτως, η οριζόντια μετακίνηση και κυρίως η στροφή του φορτισμένου θεμελίου είναι μεγαλύτερες από εκείνες των δύο κατασκευών. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα επεξηγούνται αν παρατηρήσει κανείς τις χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στο κέντρο της κορυφής και της βάσης των δύο κατασκευών και του φορτισμένου θεμελίου. Για το τελευταίο προφανώς οι χρονοϊστορίες είναι απολύτως σε συμφωνία φάσης (δεν θα μπορούσαν να μην είναι σε απόσταση μόλις 1 m), ενώ στις κατασκευές η ύπαρξη αδρανειακών δυνάμεων οδηγεί την κορυφή να ταλαντώνεται σε αντίθεση φάσης με τη βάση. Συνεπώς, οι οριζόντιες αδρανειακές δυνάμεις «φρενάρουν» τις κατασκευές κατά τη μετακίνησή τους προς τα κατάντη, ενώ λειτουργούν και εξισοροπητικά μειώνοντας τη στροφή τους. Ως αποτέλεσμα της μείωσης της οριζόντιας ταλάντωσης των κατασκευών, μειώνεται και η διάθεση για λικνισμό, οπότε και οι περισσότερο οριζόντιες κατασκευές καθιζάνουν λίγο περισσότερο. Η

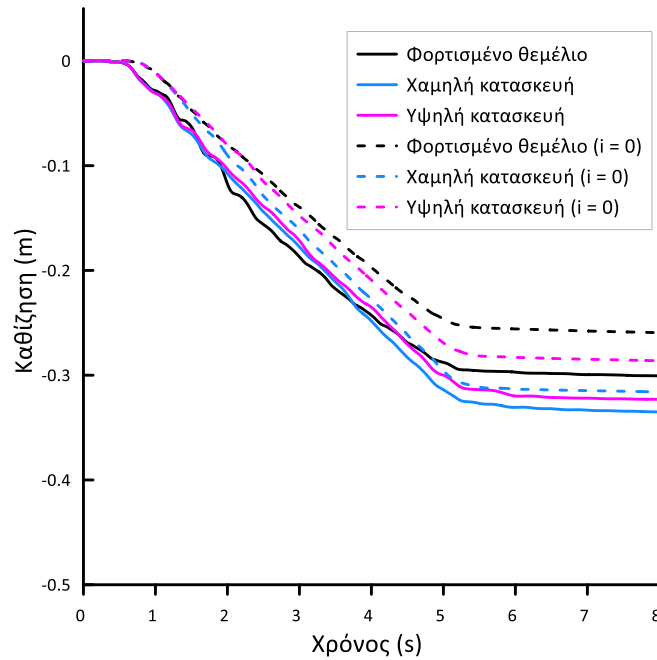
σύγκριση των χρονοϊστοριών οριζοντίων επιταχύνσεων στην κορυφή και τη βάση για τις δύο κατασκευές και το θεμέλιο παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.27**.



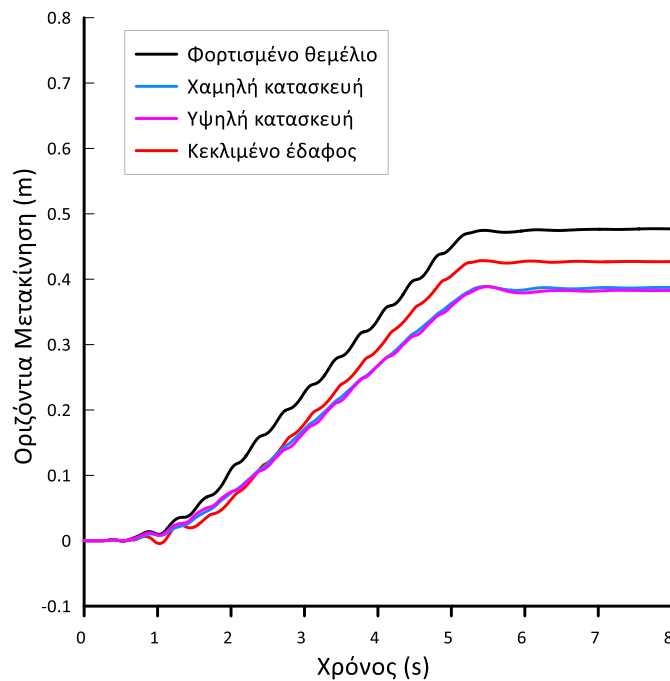
Σχήμα 4.22: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



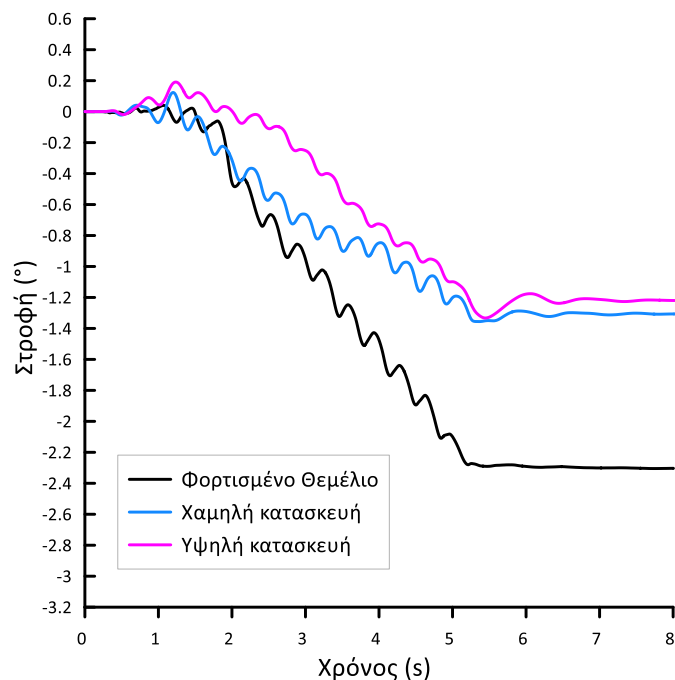
Σχήμα 4.23: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



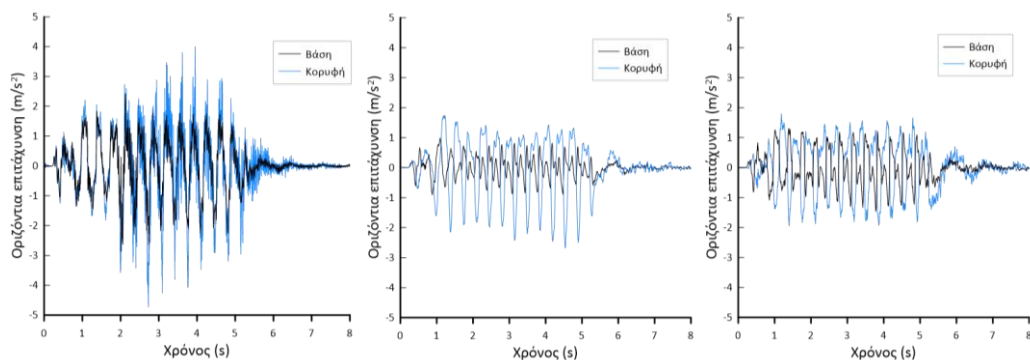
Σχήμα 4.24: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου, χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



Σχήμα 4.25: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου, χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.26: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου, χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



Σχήμα 4.27: Χρονοϊστορίες οριζοντίων επιταχύνσεων στη μέση της κορυφής και της βάσης του φορτισμένου θεμελίου, της χαμηλής και της υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.

4.7 Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης στην απόκριση της (χαμηλής) κατασκευής πλάτους $B = 5$ m, με την πραγματοποίηση μιας επιπλέον ανάλυσης για πάχος επιφανειακής ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ m πάνω από ομοιογενή (μη-ρευστοποιήσιμη) άργιλο πάχους 5 m. Γίνεται φανερό ότι έτσι το συνολικό

προφίλ εδάφους έχει και πάλι πάχος 10 m όπως και στις αναλύσεις των προηγούμενων παραγράφων, οπότε είναι άμεσα συγκρίσιμο.

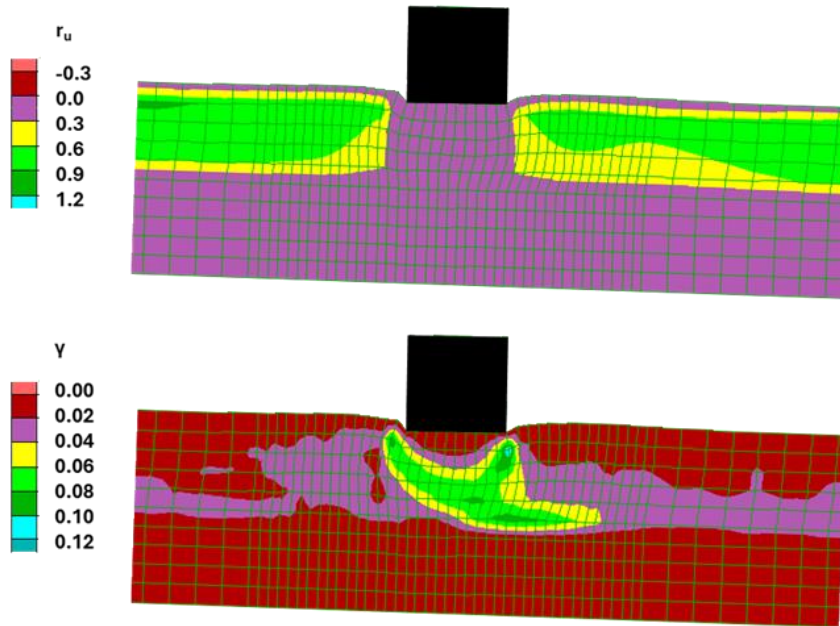
Όπως αποτυπώνεται στο **Σχήμα 4.28**, με βάση τις τιμές του λόγου r_u δημιουργείται και πάλι μια στιβαρή εδαφική στήλη κάτω από την κατασκευή, η οποία εδώ ενώνεται με τη μη-ρευστοποιήσιμη στρώση της αργίλου που βρίσκεται σε μικρά βάθη από 5 έως 10 m. Φυσικά, ανάντη και κατάντη της στιβαρής στήλης το αμμώδες έδαφος ρευστοποιείται. Οι τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης γ του εδάφους δίνουν έναν σχετικά συμμετρικό μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος ενώνεται πλήρως με την ζώνη ολίσθησης στην αβαθή βάση του ρευστοποιημένου εδάφους στα κατάντη της κατασκευής (μέγιστο βάθος τα 5 m).

Στο **Σχήμα 4.29** στο οποίο παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης της χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m για τα δύο διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ και 10 m, φαίνεται πως η αύξηση του πάχους H_L οδηγεί σε αύξηση της τιμής της καθίζησης της κατασκευής. Κάτι τέτοιο είναι φυσικό, καθώς η αύξηση του πάχους H_L ουσιαστικά σημαίνει αύξηση του πάχους της «συμπιεστής» στρώσης υπό την κατασκευή. Από εκεί και πέρα, όπως παρατηρήθηκε και στην τυπική απόκριση για $H_L = 10$ m, η καθίζηση z της κατασκευής υπό πλευρική εξάπλωση προκύπτει μεγαλύτερη από εκείνη που θα είχε η ίδια κατασκευή αν η στρώση ίδιου πάχους H_L ήταν οριζόντια (z_0), για τους ίδιους λόγους που αναφέρονται και στην παράγραφο 4.2.

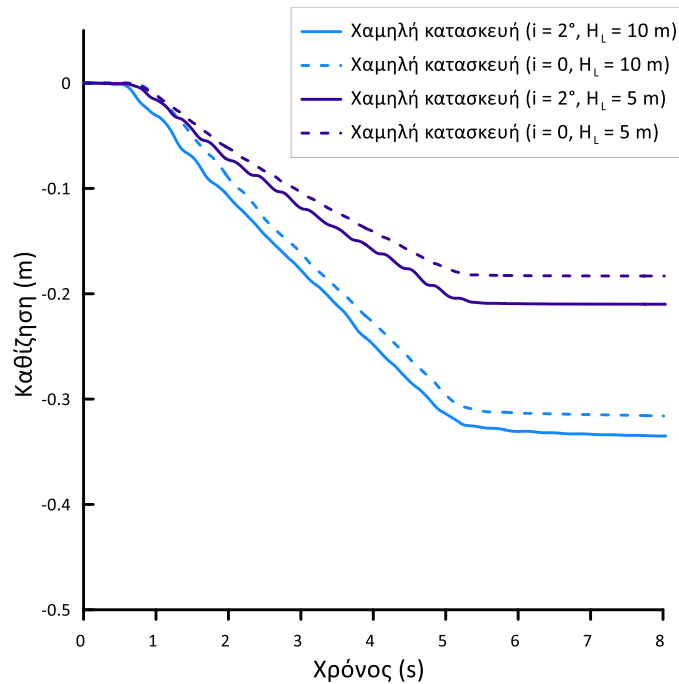
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.30** απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας μετακίνησης της χαμηλής κατασκευής για τα πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ και 10 m. Σύμφωνα με αυτό, φαίνεται πως η αύξηση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L οδηγεί σε αύξηση της οριζόντιας μετακίνησης x , η οποία οφείλεται στην αύξηση της οριζόντιας μετακίνησης x_{ff} της στρώσης και υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Αυτό συμβαίνει γιατί μεγαλύτερου πάχους στρώσεις έχουν τη δυνατότητα μεγαλύτερης μετακίνησης της επιφάνειας τους ακόμη κι αν η διατμητική παραμόρφωση παραμένει ίδια, και αυτό αποτυπώνεται και στις σχέσεις εκτίμησης πλευρικής εξάπλωσης της βιβλιογραφίας (π.χ., μέσω της παραμέτρου T_{15} στη σχέση των Youd et al. 2002). Από εκεί και πέρα, όπως παρατηρήθηκε και στην τυπική απόκριση για $H_L = 10$ m, η οριζόντια μετακίνηση x της κατασκευής υπό πλευρική εξάπλωση προκύπτει μικρότερη από εκείνη της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, για τους ίδιους λόγους που αναφέρονται και στην παράγραφο 4.2.

Τέλος, με βάση το **Σχήμα 4.31** των χρονοϊστοριών στροφής της χαμηλής κατασκευής για τα δύο πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ και 10 m, η κατασκευή για μικρότερο πάχος στρώσης παρουσιάζει μικρότερη τιμή στροφής από αυτή για $H_L = 10$ m. Αυτή η μείωση αποδίδεται στο μικρότερο περιθώριο για δημιουργία βαθύ μηχανισμού αστοχίας της κατασκευής, καθώς αυτός περιορίζεται από τη μη-ρευστοποιήσιμη άργιλο σε βάθος 5 m και κάτω.

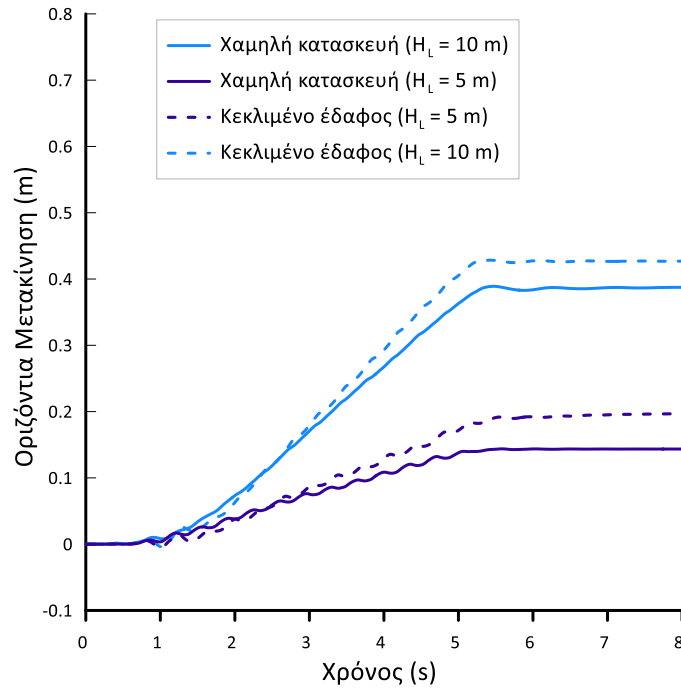
Συνολικά προκύπτει ότι η αύξηση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L αποδεικνύεται δυσμενής για την κατασκευή, καθώς αυξάνονται όλα τα μεγέθη απόκρισης (z , x , θ). Επιπλέον προκύπτει ότι η αύξηση του πάχους H_L δεν αλλάζει ποιοτικά τους λόγους απόκρισης z/z_0 και x/x_{ff} .



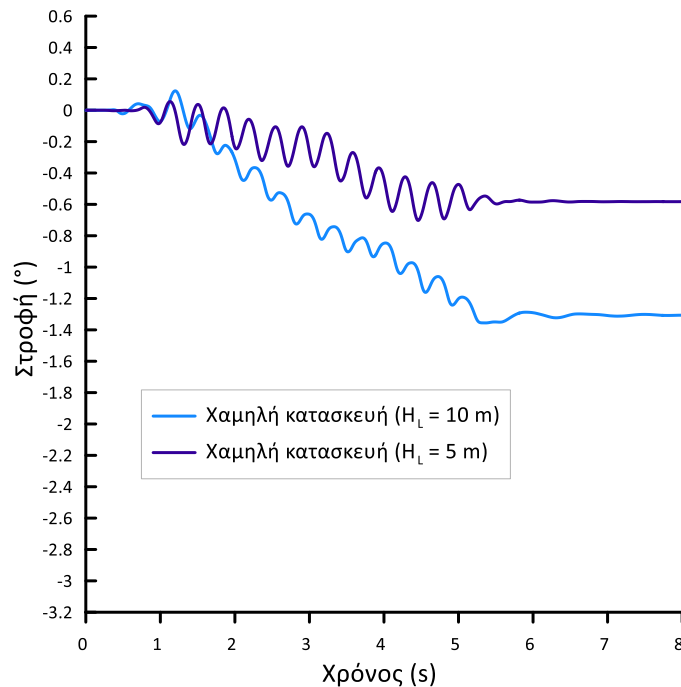
Σχήμα 4.28: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



Σχήμα 4.29: Χρονοϊστορίες καθίζησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ ή 10 m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνες της ίδιας κατασκευής στις ίδιες στρώσεις αν ήταν οριζόντιες.



Σχήμα 4.30: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ ή 10 m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτές των ίδιων στρώσεων υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.31: Χρονοϊστορίες στροφής χαμηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ ή 10 m και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.

5 Σύνοψη αποτελεσμάτων για την απόκριση κατασκευών υπό πλευρική εξάπλωση

5.1 Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αναλυτικά αποτελέσματα για την τυπική απόκριση μιας κατασκευής σε ήπια κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση και σχολιάστηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην καθίζηση z , την οριζόντια μετακίνηση x και τη στροφή της θ , καθώς και στον λόγο υπερπιέσεων r_u και τη συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση γ του εδάφους θεμελίωσης στο τέλος της διέγερσης κάθε περίπτωσης. Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στη σύνοψη των αποτελεσμάτων για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, δηλαδή ακόμη και για περιπτώσεις που δεν εμφανίζονται στο Κεφάλαιο 4. Ειδικότερα, γίνεται προσπάθεια να συνοψιστεί η επιρροή κάθε παραμέτρου του προβλήματος στην απόκριση μιας κατασκευής και να αναδειχτεί ποιοτικά η σημαντικότητα της σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Με άλλα λόγια, το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στην παρουσίαση μιας πλήρους επισκόπησης των παραμετρικών αναλύσεων και των αποτελεσμάτων τους, με στόχο την ανάδειξη των κρίσιμων παραμέτρων που διέπουν την απόκριση μιας κατασκευής κατά τη ρευστοποίηση σε κεκλιμένο έδαφος. Ταυτόχρονα, η διαδικασία αυτή θα αποκαλύψει και ποιες παράμετροι δεν είναι τόσο σημαντικές για το υπό μελέτη πρόβλημα. Το σύνολο των αναλύσεων που παρουσιάζονται εδώ συνοψίζεται στον **Πίνακα 5.1**, και αποτελεί το σύνολο των αναλύσεων που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της εργασίας.

a_{max} (g)	T_e (s)	N	H_L (m)	B (m)	i (°)	q (kPa)	Είδος
0.2	0.35	10	10	5	0	50	Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
							Υψηλή κατασκευή
						100	Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
							Υψηλή κατασκευή
						200	Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
							Υψηλή κατασκευή
					0.3	50	Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
							Υψηλή κατασκευή
						100	Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
							Υψηλή κατασκευή
200	Φορτισμένο θεμέλιο						
	Χαμηλή κατασκευή						
	Υψηλή κατασκευή						
2	50	Φορτισμένο θεμέλιο					
		Χαμηλή κατασκευή					
		Υψηλή κατασκευή					
	100	Φορτισμένο θεμέλιο					
		Χαμηλή κατασκευή					
		Υψηλή κατασκευή					

Κεφάλαιο 5: Σύνοψη αποτελεσμάτων για την απόκριση κατασκευών υπό πλευρική εξάπλωση

				20	3.4	200	Υψηλή κατασκευή
							Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
						Υψηλή κατασκευή	
						Φορτισμένο θεμέλιο	
						Χαμηλή κατασκευή	
					Υψηλή κατασκευή		
					50	Φορτισμένο θεμέλιο	
						Χαμηλή κατασκευή	
						Υψηλή κατασκευή	
					100	Φορτισμένο θεμέλιο	
						Χαμηλή κατασκευή	
				Υψηλή κατασκευή			
				200	Φορτισμένο θεμέλιο		
					Χαμηλή κατασκευή		
					Υψηλή κατασκευή		
				5	0	50	Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
							Υψηλή κατασκευή
						100	Φορτισμένο θεμέλιο
							Χαμηλή κατασκευή
							Υψηλή κατασκευή
					200	Φορτισμένο θεμέλιο	
						Χαμηλή κατασκευή	
Υψηλή κατασκευή							
2	50	Φορτισμένο θεμέλιο					
		Χαμηλή κατασκευή					
		Υψηλή κατασκευή					
	100	Φορτισμένο θεμέλιο					
		Χαμηλή κατασκευή					
		Υψηλή κατασκευή					
200	Φορτισμένο θεμέλιο						
	Χαμηλή κατασκευή						
	Υψηλή κατασκευή						
5	0	50	Φορτισμένο θεμέλιο				
			Χαμηλή κατασκευή				
			Υψηλή κατασκευή				
		100	Φορτισμένο θεμέλιο				
			Χαμηλή κατασκευή				
			Υψηλή κατασκευή				
	200	Φορτισμένο θεμέλιο					
		Χαμηλή κατασκευή					
		Υψηλή κατασκευή					
	2	50	Φορτισμένο θεμέλιο				
			Χαμηλή κατασκευή				
			Υψηλή κατασκευή				
100		Φορτισμένο θεμέλιο					
		Χαμηλή κατασκευή					
		Υψηλή κατασκευή					

			20	0	200	Φορτισμένο θεμέλιο
						Χαμηλή κατασκευή
						Υψηλή κατασκευή
					50	Φορτισμένο θεμέλιο
						Χαμηλή κατασκευή
						Υψηλή κατασκευή
				100	Φορτισμένο θεμέλιο	
					Χαμηλή κατασκευή	
					Υψηλή κατασκευή	
				2	200	Φορτισμένο θεμέλιο
						Χαμηλή κατασκευή
						Υψηλή κατασκευή
			50		Φορτισμένο θεμέλιο	
					Χαμηλή κατασκευή	
					Υψηλή κατασκευή	
			100	Φορτισμένο θεμέλιο		
				Χαμηλή κατασκευή		
				Υψηλή κατασκευή		
			200	Φορτισμένο θεμέλιο		
				Χαμηλή κατασκευή		
Υψηλή κατασκευή						
10	-	0.3	-	Κεκλιμένο έδαφος		
	-	2	-	Κεκλιμένο έδαφος		
	-	3.4	-	Κεκλιμένο έδαφος		
5	-	2	-	Κεκλιμένο έδαφος		

Πίνακας 5.1: Το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο, ενδιαφέρει η απόκριση της κατασκευής στο τέλος της διέγερσης. Για τις ανάγκες αυτού του κεφαλαίου ενδιαφέρουν:

- ο λόγος της (μέσης) καθίζησης z της κατασκευής σε κεκλιμένη στρώση, προς την αντίστοιχη (μέση) καθίζηση σε οριζόντια στρώση z_0 , ήτοι ο λόγος z/z_0 .
- ο λόγος της οριζόντιας μετακίνησης x της κατασκευής σε κεκλιμένη στρώση, προς την αντίστοιχη οριζόντια μετακίνηση της στρώσης σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου x_{ff} , ήτοι ο λόγος x/x_{ff} .
- η στροφή θ της κατασκευής (ως άκαμπτο στερεό σώμα) σε κεκλιμένη στρώση.

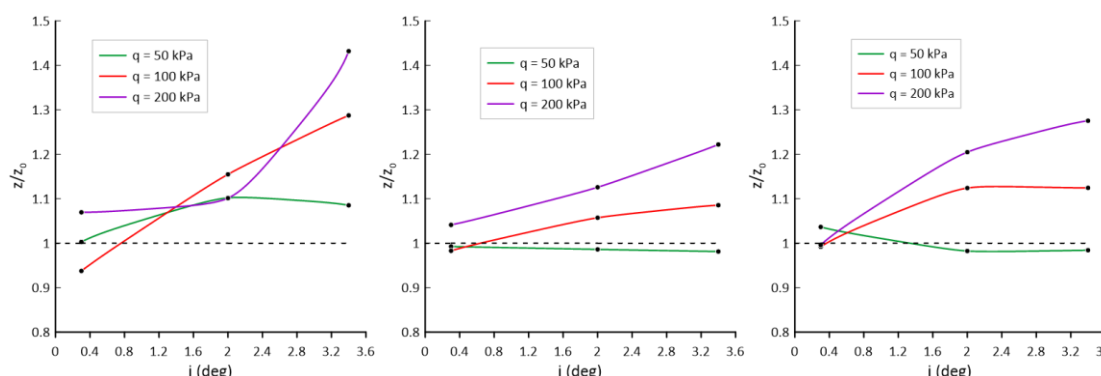
Η χρήση των λόγων z/z_0 και x/x_{ff} εστιάζει στο σχετικό μέγεθος των παραγόντων αυτών, καθώς θεωρείται ότι επηρεάζονται εξίσου ο αριθμητής και ο παρονομαστής αυτών από τα χαρακτηριστικά της αρμονικής διέγερσης (π.χ., για μισούς κύκλους φόρτισης, οι γραμμικά συσσωρευόμενες τιμές του αριθμητή και παρονομαστή θα φτάνουν στο 50% των τιμών, οπότε ο λόγος παραμένει σταθερός). Επιπλέον, η τιμή της z_0 είναι ένα φυσικό μέγεθος που έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία (βλέπε βιβλιογραφία για καθιζήσεις θεμελίων σε οριζόντιο έδαφος, π.χ., Karamitros et al. 2014), όπως αντίστοιχα και η τιμή της x_{ff} (βλέπε βιβλιογραφία για πλευρική εξάπλωση εδαφών σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, π.χ., Youd et al. 2002). Αντιθέτως, για την τιμή της στροφής θ δεν υπάρχει τιμή αναφοράς, ενώ η τιμή της εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της αρμονικής διέγερσης (π.χ., για μισούς κύκλους φόρτισης, οι

γραμμικά συσφραυόμενη τιμή της θ θα φτάνουν στο 50% της τιμής για όλους τους κύκλους). Οπότε αναγκαστικά τα αποτελέσματα σε όρους θ παρουσιάζονται ως έχουν, και απλά σχολιάζεται κατά πόσο η τιμή της υπερβαίνει την κλίση του εδάφους σε κάθε περίπτωση. Υπενθυμίζεται ότι αρνητικές τιμές θ αντιστοιχούν σε στροφή προς τα κατάντη της ήπια κεκλιμένης στρώσης (όπως και στο Κεφάλαιο 4). Κατά τα άλλα, οι λόγοι z/z_0 και x/x_{ff} είναι πάντα θετικοί υπονοώντας καθιζήσεις και οριζόντιες μετακινήσεις των κατασκευών τόσο σε κεκλιμένο όσο και σε οριζόντιο έδαφος.

5.2 Καθίζηση κατασκευής

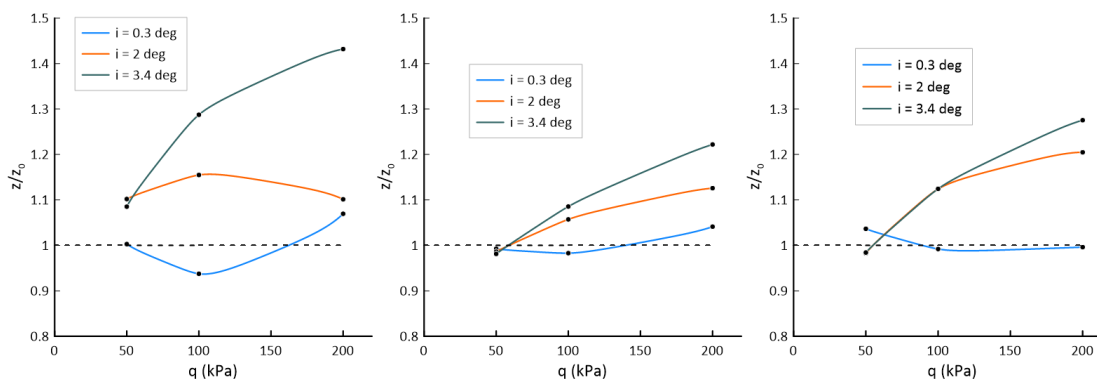
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί η επίδραση της κλίσης της εδαφικής στρώσης i , του φορτίου q της κατασκευής, του ύψους L της κατασκευής, του εύρους B της κατασκευής και του πάχους της ρευστοποιήσιμη στρώσης H_L στον λόγο καθιζήσεων z/z_0 , λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των αναλύσεων.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 5.1**, στο οποίο παρουσιάζεται η επίδραση της κλίσης i στον λόγο της καθιζήσης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m με τιμές φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, η απόκριση ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο σε όρους z/z_0 . Συγκεκριμένα, συνήθως υπερβαίνει ή είναι ίση με την αντίστοιχη τιμή της καθιζήσης της κατασκευής αν ήταν σε οριζόντιο έδαφος και αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης, εκτός αν είναι σχετικώς ελαφριά ($q = 50$ kPa) όπου η γωνία κλίσης i δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο.



Σχήμα 5.1: Επίδραση της γωνίας κλίσης i στον λόγο της καθιζήσης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και τιμών φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa.

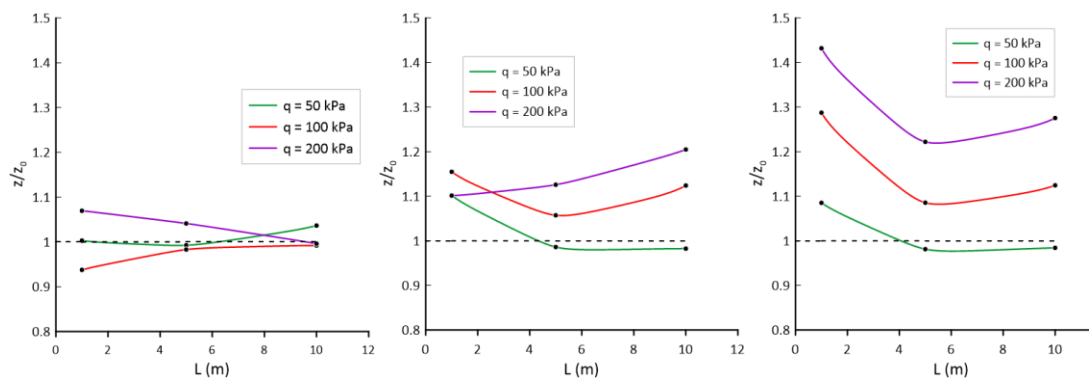
Στη συνέχεια, το **Σχήμα 5.2** παρουσιάζει την επίδραση του φορτίου q στον λόγο της καθιζήσης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m, για τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° . Όπως και πριν, ο λόγος z/z_0 συνήθως υπερβαίνει ή είναι ίσος με το 1.0, και αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου q , εκτός αν η γωνία κλίσης είναι πολύ μικρή ($i = 0.3^\circ$) όπου το φορτίο q δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο.



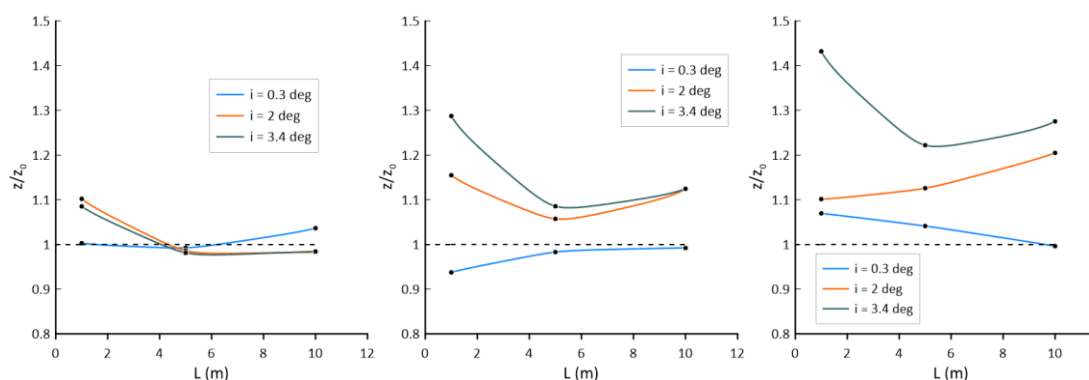
Σχήμα 5.2: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της καθίζησης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m, για τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° .

Στα **Σχήματα 5.3** και **5.4** παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε όρους z/z_0 για διαφορετικά ύψη κατασκευής L . Η διαφορά τους είναι ότι στο **Σχήμα 5.3** τα τρία υπο-σχήματα αφορούν τρεις διαφορετικές γωνίες κλίσης i , ενώ στο **Σχήμα 5.4** αφορούν τρεις διαφορετικές τιμές φορτίου q . Επισημαίνεται προκαταβολικά ότι η σύγκριση της επιρροής του ύψους L για τις αναλύσεις του θεμελίου και των κατασκευών δεν είναι απόλυτα ορθή. Συγκεκριμένα, στις αναλύσεις των κατασκευών ($L = 5$ και 10 m) υπάρχει αδρανειακή και κινηματική αλληλεπίδραση με το έδαφος, σε αντίθεση με τις αναλύσεις του θεμελίου ($L = 1$ m) στις οποίες υπάρχει μόνο κινηματική (το θεμέλιο θεωρείται αβαρές). Οι αναλύσεις του θεμελίου προστέθηκαν στα διαγράμματα για την πληρέστερη εποπτεία της επιρροής του ύψους, δίνεται ωστόσο μεγαλύτερη έμφαση στις αναλύσεις των κατασκευών οι οποίες είναι και απόλυτα συγκρίσιμες. Ακόμη, οι κατασκευές έχουν προσομοιωθεί ως μια κατανεμημένη μάζα με μηδενική ιδιοπερίοδο και όχι ως μονοβάθμιοι ταλαντωτές. Αυτό, σε συνδυασμό με το σταθερό φορτίο παρά την αύξηση του ύψους αποτελούν μια προσπάθεια για μια αρχική προσέγγιση της επίδρασης του ύψους της κατασκευής και ότι τα αποτελέσματα δεν είναι πλήρως ρεαλιστικά, αλλά μόνο ενδεικτικά.

Συνολικά προκύπτει ότι ο λόγος z/z_0 συνήθως υπερβαίνει ή είναι ίσος με το 1.0 ανεξαρτήτως ύψους κατασκευής L . Η επίδραση του ύψους L δεν προκύπτει μονότονη, και δείχνει να επηρεάζεται και από το φορτίο q και από τη γωνία κλίσης i . Συνεπώς δεν διαφαίνεται συστηματική επίδραση του ύψους L , αντίθετα με την αυξητική επίδραση της γωνίας κλίσης i και του φορτίου q στην τιμή του λόγου καθίζησης. Επιπλέον προκύπτει ότι για ελαφριές κατασκευές ($q = 50$ kPa) ή/και για μικρές γωνίες κλίσης ($i = 0.3^\circ$) η τιμή του λόγου z/z_0 είναι πρακτικώς ίση με 1.0, και μόνο για μεγαλύτερες τιμές φορτίου $q = 100$ και 200 kPa ή/και γωνίας κλίσης $i = 2^\circ$ και 3.4° η τιμή του λόγου z/z_0 είναι μεγαλύτερη από 1.0.



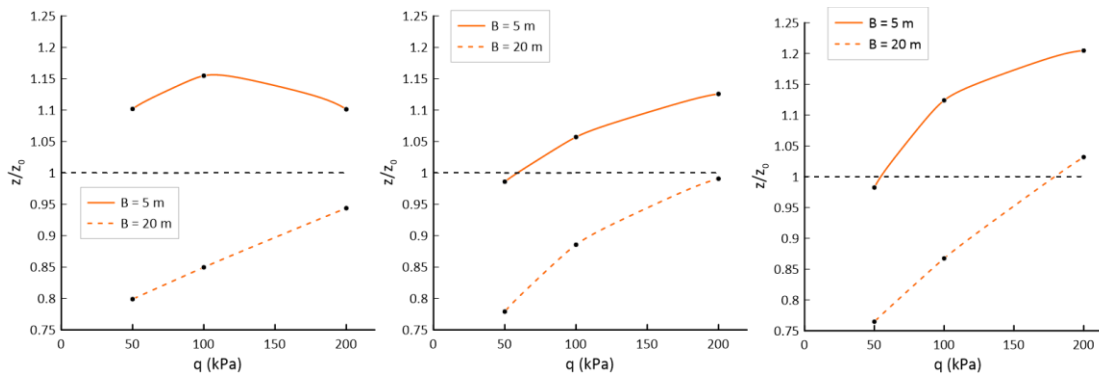
Σχήμα 5.3: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m στον λόγο της καθίζησης z σε έδαφος με γωνία κλίσης $i=0.3^\circ$, 2° και 3.4° προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για τιμές φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa.



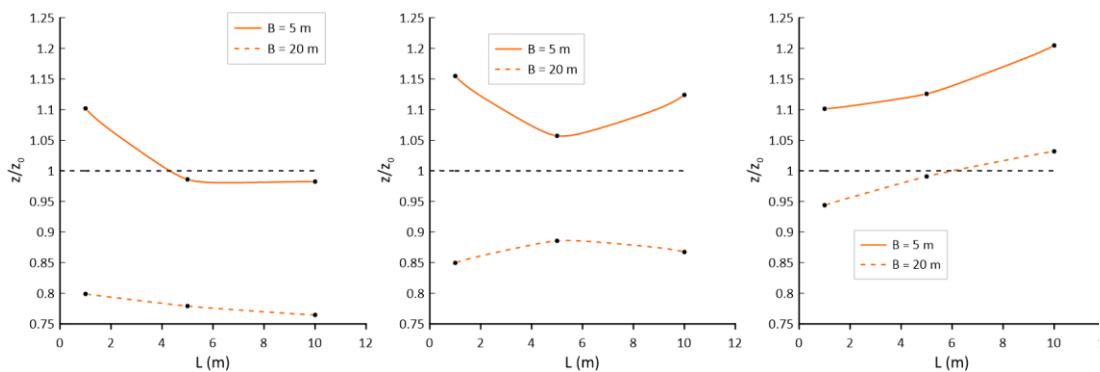
Σχήμα 5.4: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m στον λόγο της καθίζησης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για φορτία κατασκευής $q = 50, 100$ και 200 kPa και για τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° .

Όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα αφορούν στενές κατασκευές με $B = 5$ m και μεγάλο πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 10$ m, ή αλλιώς περιπτώσεις όπου ο λόγος $B/H_L = 0.5$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει να μελετηθεί, έστω ενδεικτικά λόγω έλλειψης χρόνου, ποια είναι η απόκριση της κατασκευής σε όρους λόγου z/z_0 όταν η κατασκευή είναι ευρεία ($B = 20$ m), ή όταν το πάχος της επιφανειακής ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι μικρό ($H_L = 5$ m). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο λόγος B/H_L μπορεί να πάρει τιμές $20/10 = 2.0$ ή $5/5 = 1.0$, αντίστοιχα.

Στα **Σχήματα 5.5** και **5.6** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q και του ύψους L αντίστοιχα, στον λόγο της καθίζησης για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την αντίστοιχη καθίζηση σε οριζόντιο έδαφος για διαφορετικά πλάτη κατασκευής $B = 5$ m και $B = 20$ m, πάντα για μεγάλο πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 10$ m. Είναι σαφές πως με την αύξηση του εύρους της κατασκευής B από 5 m σε 20 m, η καθίζηση και ο λόγος z/z_0 μειώνονται σημαντικά και συστηματικά. Πρακτικά, για $B = 20$ m, ο λόγος z/z_0 γίνεται μικρότερος ή ίσος με 1.0, ενώ παίρνει τιμές περίπου 1.0 μόνο για τις βαριές κατασκευές ($q = 200$ kPa). Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις παίρνει τιμές μικρότερες από 1.0, τουλάχιστον για τις αναλύσεις για γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ που παρουσιάζονται εδώ. Επιπλέον προκύπτει ότι διατηρείται η αυξητική επίδραση του φορτίου q και η μη-συστηματική επίδραση του ύψους L που καταγράφηκε για τις στενές κατασκευές με $B = 5$ m ανωτέρω.

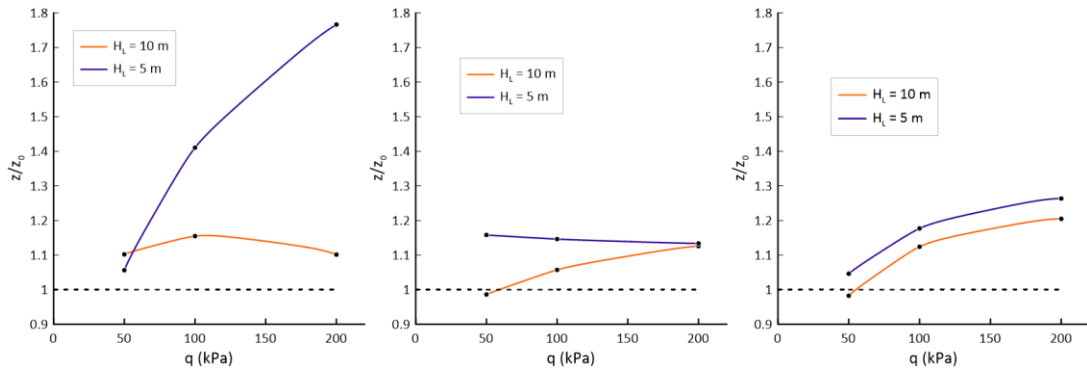


Σχήμα 5.5: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της καθίζησης z για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ και 20 m.

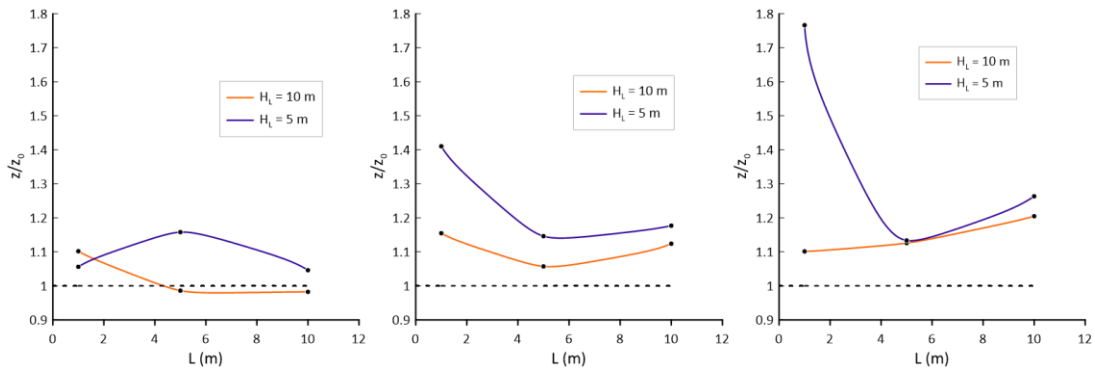


Σχήμα 5.6: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής στον λόγο της καθίζησης z για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για φορτίο κατασκευής $q = 50$ kPa, 100 kPa και 200 kPa και τιμές πλάτους $B = 5$ και 20 m.

Στη συνέχεια, στα **Σχήματα 5.7** και **5.8** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q και του ύψους L αντίστοιχα, στον λόγο της καθίζησης για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την αντίστοιχη καθίζηση σε οριζόντιο έδαφος για διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ m και 10 m, αλλά για στενή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m. Είναι σαφές πως με τη μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L από 10 m σε 5 m, η καθίζηση μειώνεται μεν, αλλά ο λόγος z/z_0 αυξάνει (σχεδόν πάντα), τουλάχιστον για τις αναλύσεις για γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ που παρουσιάζονται εδώ. Πρακτικά, για $H_L = 5$ m ο λόγος z/z_0 γίνεται πάντα μεγαλύτερος από 1.0 , ακόμη και για ελαφριές κατασκευές ($q = 50$ kPa). Επιπλέον προκύπτει ότι δείχνει να διατηρείται η αυξητική επίδραση του φορτίου q και η μη-συστηματική επίδραση του ύψους L που καταγράφηκε για τις κατασκευές σε μεγάλο πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 10$ m ανωτέρω, αν και διαφαίνεται μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων για μικρό πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης.



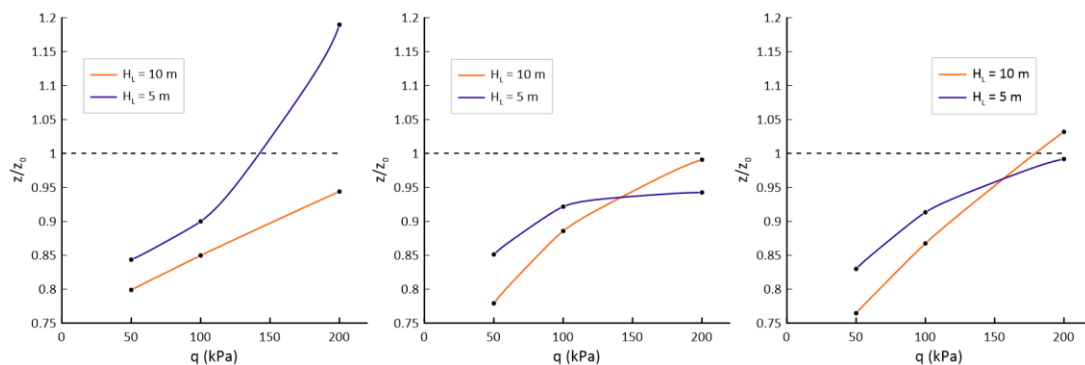
Σχήμα 5.7: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της καθίζησης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.



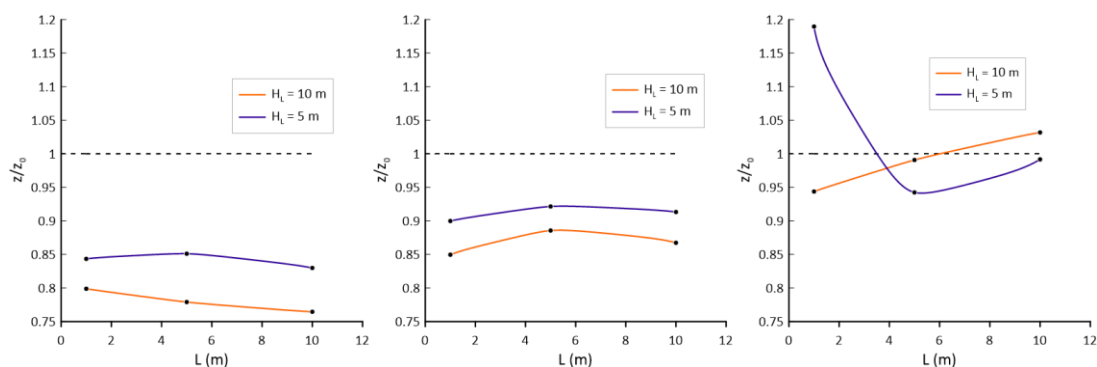
Σχήμα 5.8: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στον λόγο της καθίζησης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για φορτίο κατασκευής $q = 50$ kPa, 100 kPa και 200 kPa, και για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.

Όμοια με τα ανωτέρω δύο σχήματα, στα **Σχήματα 5.9** και **5.10** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q και του ύψους L αντίστοιχα, στον λόγο της καθίζησης για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την αντίστοιχη καθίζηση σε οριζόντιο έδαφος για διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ m και 10 m, όχι για τη στενή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m όπως ανωτέρω, αλλά για την ευρεία κατασκευή με $B = 20$ m. Όπως και στην περίπτωση της πιο στενής κατασκευής, η καθίζηση μειώνεται με την μείωση του πάχους H_L και ο λόγος z/z_0 αυξάνεται, απλά η αύξηση του λόγου z/z_0 δεν είναι τόσο συστηματική εδώ. Επιπλέον διαφορά είναι ότι καθώς για $B = 20$ m οι τιμές του λόγου z/z_0 είναι μικρότερες απ' ό,τι για $B = 5$ m, η προσαύξηση λόγω μείωσης του πάχους H_L οδηγεί σε τιμές λόγου z/z_0 τόσο μεγαλύτερες όσο και μικρότερες από 1.0. Αυτό που δεν φαίνεται να αλλάζει είναι η αυξητική επίδραση του φορτίου q στον λόγο z/z_0 και η μη-συστηματική (αν και με μεγαλύτερη διασπορά) επίδραση του ύψους L .

Συνολικά, με βάση τα **Σχήματα 5.5** έως **5.10** προκύπτει ότι η αύξηση του λόγου B/H_L σαφέστατα μειώνει την καθίζηση της κατασκευής, αλλά η επίδραση στον λόγο z/z_0 δεν είναι τόσο συστηματική. Για τις αναλύσεις που έγιναν εδώ, έχουμε τιμές $B/H_L = 0.5$ και 1.0 για τις στενές κατασκευές, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για ευρείες κατασκευές είναι $B/H_L = 2.0$ και 4.0. Προκύπτει ότι οι τιμές του λόγου καθιζήσεων z/z_0 είναι μεγαλύτερες όταν $B/H_L = 0.5$ και 1.0, συγκριτικά με όταν $B/H_L = 2.0$ και 4.0, αλλά η επίδραση της παραμέτρου B/H_L μάλλον χρειάζεται επιπλέον έρευνα.



Σχήμα 5.9: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της καθίζησης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.



Σχήμα 5.10: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στον λόγο της καθίζησης z προς την αντίστοιχη καθίζηση z_0 σε οριζόντιο έδαφος, για φορτίο κατασκευής $q = 50$ kPa, 100 kPa και 200 kPa, και για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.

Με βάση όλα τα ανωτέρω, προκύπτουν τα κάτωθι γενικά συμπεράσματα σε ό,τι αφορά στην απόκριση της κατασκευής σε όρους λόγου καθιζήσεων z/z_0 :

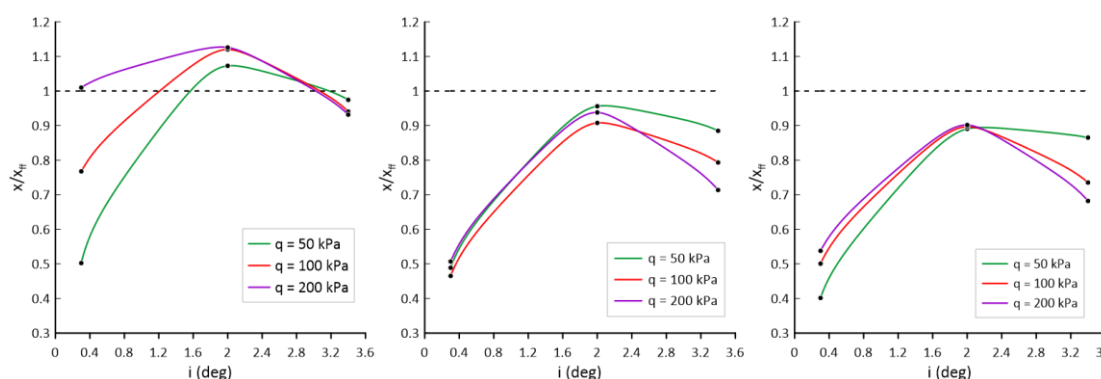
1. Η αύξηση του φορτίου κατασκευής q και της γωνίας κλίσης i επιδρούν αυξητικά στην τιμή του λόγου z/z_0 . Αντιθέτως, το ύψος της κατασκευής L δεν έχει συστηματική επίδραση στην τιμή του λόγου z/z_0 , αν το συνολικό φορτίο q και το πλάτος της κατασκευής B παραμένουν σταθερά.
2. Η αύξηση του πλάτους κατασκευής B (από 5 σε 20 m) διατηρώντας το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L , το φορτίο κατασκευής q , την γωνία κλίσης i και το ύψος κατασκευής L σταθερά, επιδρά μειωτικά στον λόγο z/z_0 (όπως και στην τιμή της καθίζησης της κατασκευής z).
3. Η αύξηση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L (από 5 σε 10 m) διατηρώντας το πλάτος B , το φορτίο κατασκευής q , την γωνία κλίσης i και το ύψος κατασκευής L σταθερά, επιδρά μειωτικά στον λόγο z/z_0 (αλλά αυξητικά στην τιμή της καθίζησης της κατασκευής z).
4. Η αύξηση του λόγου πλάτους κατασκευής προς πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης B/H_L επιδρά μειωτικά στην τιμή της καθίζησης της κατασκευής z , αλλά δεν έχει μονοτονική επίδραση στην τιμή του λόγου z/z_0 , τουλάχιστον για τις περιορισμένες περιπτώσεις που αναλύθηκαν εδώ.

5. Ο λόγος z/z_0 παίρνει τιμές τόσο πάνω όσο και κάτω από το 1.0 (συνολικό εύρος 0.76-1.43), ενώ για τις 54 περιπτώσεις που συνοψίζονται εδώ, στο 54% εξ αυτών ο λόγος βρέθηκε να είναι μεγαλύτερος από 1.0, ενώ για το υπόλοιπο 46% μικρότερος από 1.0.

5.3 Οριζόντια μετατόπιση κατασκευής

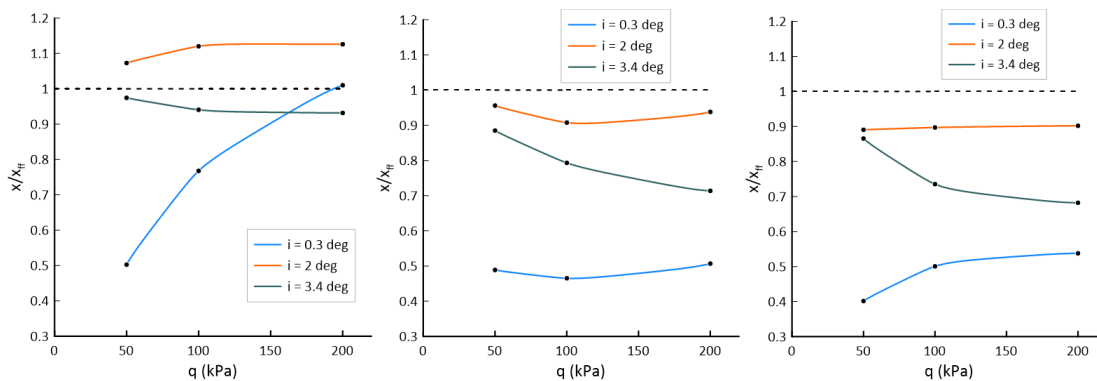
Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί η επίδραση της κλίσης της εδαφικής στρώσης i , του φορτίου q της κατασκευής, του ύψους L της κατασκευής του εύρους B της κατασκευής και του πάχους της ρευστοποιήσιμη στρώσης H_L στην μεταβολή της οριζόντιας μετατόπισης της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των αναλύσεων. Θα παρουσιαστούν διαγράμματα παρόμοια με εκείνα στον σχολιασμό της καθίζησης (παράγραφος 5.2) με στόχο να εξεταστεί η επιρροή κάθε παραμέτρου στην οριζόντια μετατόπιση της κατασκευής x και στον λόγο x/x_{ff} .

Στο **Σχήμα 5.11** παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω των διαγραμμάτων του λόγου της οριζόντιας μετακίνησης x προς την αντίστοιχη οριζόντια μετακίνηση σε ελεύθερο πεδίο x_{ff} , με την γωνία κλίσης εδάφους i για το φορτισμένο θεμέλιο, την χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m με τιμές φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa. Συνολικά από τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατηρείται ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης i του εδάφους οδηγεί σε σημαντική αύξηση της οριζόντιας μετακίνησης x της κατασκευής, η οποία όμως είναι τις περισσότερες φορές μικρότερη από εκείνη του εδάφους (x_{ff}). Από εκεί και πέρα, σε όρους λόγου x/x_{ff} προκύπτει σαφής αύξηση για αύξηση της κλίσης από 0.3° έως 2° και μικρή μείωση ή σταθεροποίηση για κλίσεις από 2° έως 3.4° . Ο λόγος x/x_{ff} δεν υπερβαίνει το 1.0 για την χαμηλή και υψηλή κατασκευή, ενώ οριακά υπερβαίνει το 1.0 για κάποιες περιπτώσεις φορτισμένου θεμελίου.



Σχήμα 5.11: Επίδραση της γωνίας κλίσης i στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και τιμών φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa.

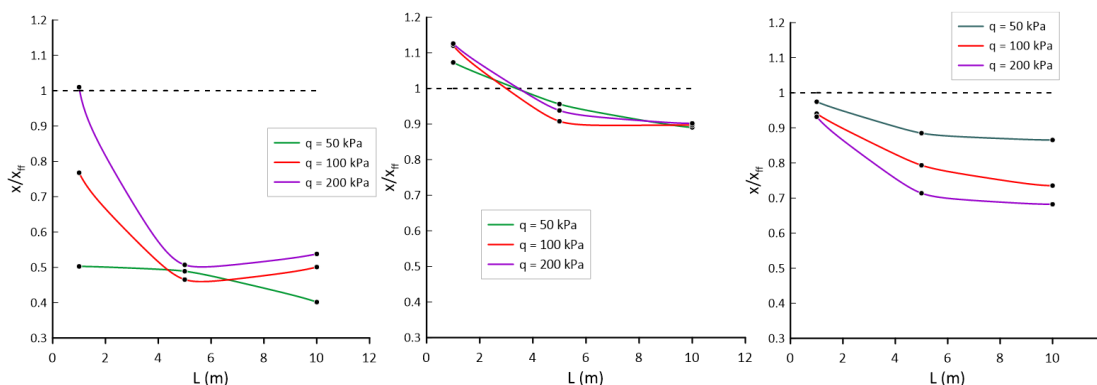
Η επίδραση του φορτίου q στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου για το φορτισμένο θεμέλιο, την χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m, για τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° , απεικονίζεται στα διαγράμματα του **Σχήματος 5.12**. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του φορτίου q αυξάνεται τόσο ο λόγος x/x_{ff} , όσο και η τιμή της οριζόντιας μετακίνησης της κατασκευής x , τουλάχιστον για τις μικρές γωνίες κλίσης i , και η επίδραση αυτή εκμηδενίζεται (ή και οριακά αντιστρέφεται) για μεγάλες γωνίες κλίσης i .



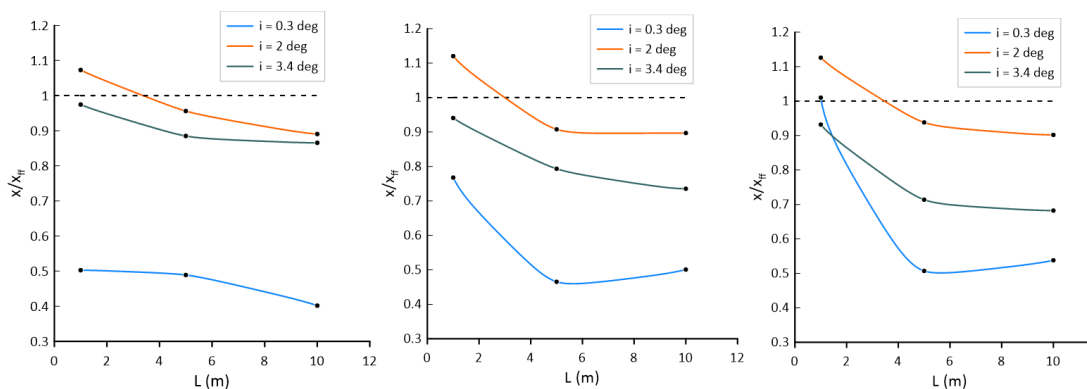
Σχήμα 5.12: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m, για τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° .

Συνεχίζοντας, στα **Σχήματα 5.13** και **5.14** φαίνεται η επίδραση του ύψους της κατασκευής στον λόγο x/x_{ff} . Τα υπο-σχήματα του **Σχήματος 5.13** αφορούν τρεις γωνίες κλίσεις εδάφους $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° ενώ αυτά του **Σχήματος 5.14** αφορούν τρεις τιμές φορτίου κατασκευής $q = 50, 100$ και 200 kPa. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι, σε κάθε περίπτωση, η αύξηση του ύψους L της κατασκευής επιφέρει μειωμένη οριζόντια μετακίνηση. Το ίδιο συμβαίνει και για τον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης προς την αντίστοιχη του ελεύθερου πεδίου x/x_{ff} , ο οποίος μειώνεται με την αύξηση του ύψους L , λόγω διαφοράς φάσης στην οριζόντια ταλάντωση της κορυφής της κατασκευής σε σχέση με τη βάση.

Συνολικά, ο λόγος της οριζόντιας μετακίνησης της κατασκευής σε έδαφος με κλίση προς την οριζόντια μετακίνηση του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου x/x_{ff} είναι μικρότερος του 1.0. Εξαιρεση αποτελεί η ανάλυση του φορτισμένου θεμελίου για γωνία κλίσης εδάφους 2° στην οποία η οριζόντια μετακίνηση πλησιάζει ή υπερβαίνει (ελαφρώς) την αντίστοιχη σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 5.13: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x σε έδαφος με γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για τιμές φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa.

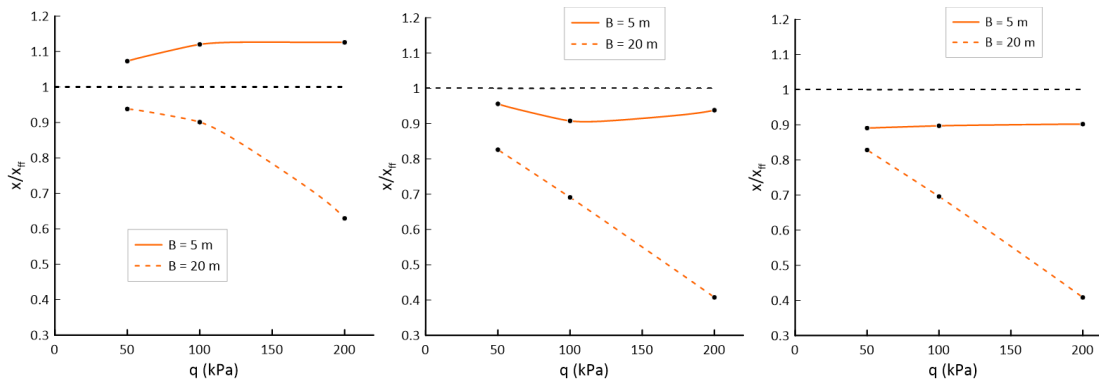


Σχήμα 5.14: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για φορτία κατασκευής $q = 50$ kPa, 100 kPa και 200 kPa και τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ$, 2° και 3.4° .

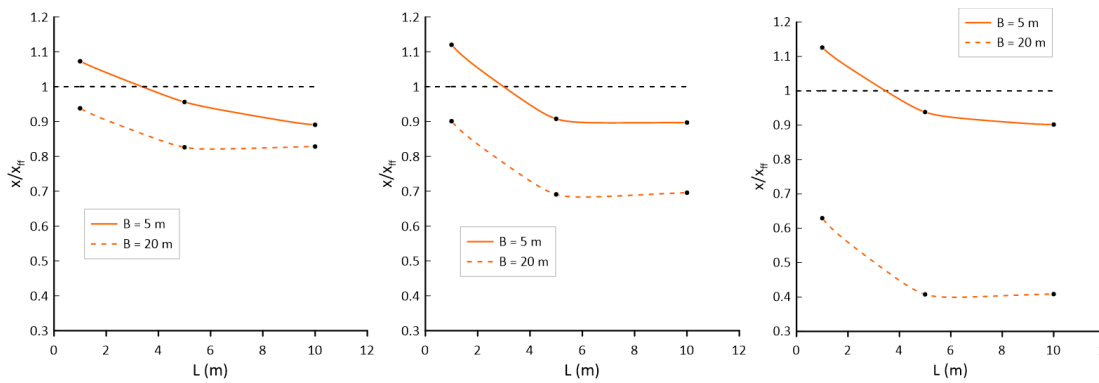
Η επιρροή του φορτίου q στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή απεικονίζεται στα διαγράμματα του **Σχήματος 5.15** για διαφορετικά εύρη κατασκευής $B = 5$ m και $B = 20$ m. Είναι σαφές ότι η ευρεία κατασκευή εμφανίζει σαφώς μικρότερες τιμές οριζόντιας μετακίνησης x για κάθε φορτίο, δείχνοντας ότι η αύξηση του πλάτους B της κατασκευής επιφέρει σαφή μείωση της οριζόντιας μετακίνησης. Αυτό έχει την ίδια επίδραση στο λόγο x/x_{ff} , καθώς ο παρονομαστής του λόγου δεν επηρεάζεται από το πλάτος B .

Ταυτόχρονα, ο λόγος x/x_{ff} για πλάτος $B = 20$ m μειώνεται με την αύξηση του φορτίου q , σε αντίθεση με την περίπτωση πλάτους $B = 5$ m κατά την οποία ο λόγος αυξανόταν ελαφρώς (τουλάχιστον για $q = 50$ και 100 kPa). Συνεπώς, η παράμετρος του πλάτους B αλλάζει δευτερογενώς και την επίδραση άλλων παραμέτρων. Ακόμη, δεν έχει μεταβάλλει την επίδραση του φορτίου στον λόγο x/x_{ff} και παρατηρείται ότι για κάθε είδος κατασκευής, ο λόγος βρίσκεται κάτω από την μονάδα, υποδηλώνοντας μικρότερη οριζόντια μετακίνηση της κατασκευής συγκριτικά με τις συνθήκες ελεύθερου πεδίου.

Η επίδραση του πλάτους της κατασκευής B μπορεί να μελετηθεί και από τα διαγράμματα του **Σχήματος 5.16** στο οποίο παρουσιάζεται η επίδραση του ύψους L στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή για τα δύο πλάτη κατασκευής $B = 5$ m και $B = 20$ m. Ειδικότερα, η κατασκευή πλάτους $B = 20$ m παρουσιάζει παρόμοια απόκριση με αυτή για $B = 5$ m, καθώς η αύξηση του ύψους L μειώνει την οριζόντια μετακίνηση και στις δύο περιπτώσεις. Συνδυαστικά η αύξηση του εύρους B και του ύψους L της κατασκευής έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της οριζόντιας μετακίνησης της κατασκευής. Ο λόγος x/x_{ff} για εύρος κατασκευής $B = 20$ m είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερος του 1.0.



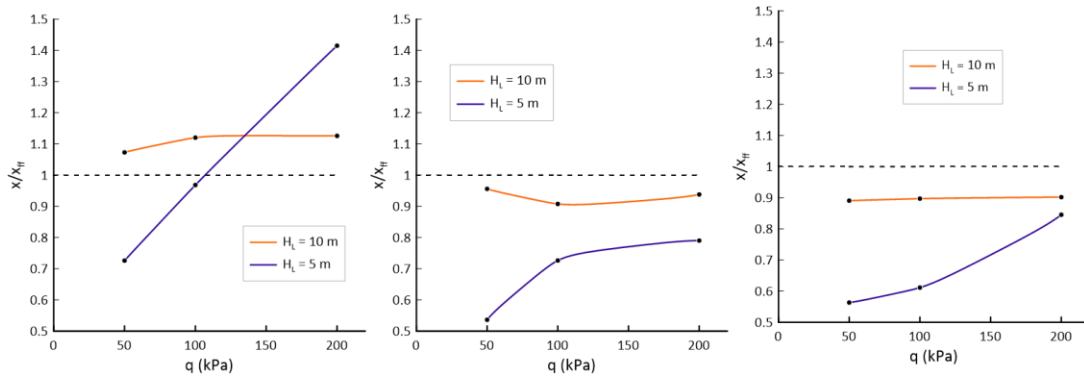
Σχήμα 5.15: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ και 20 m.



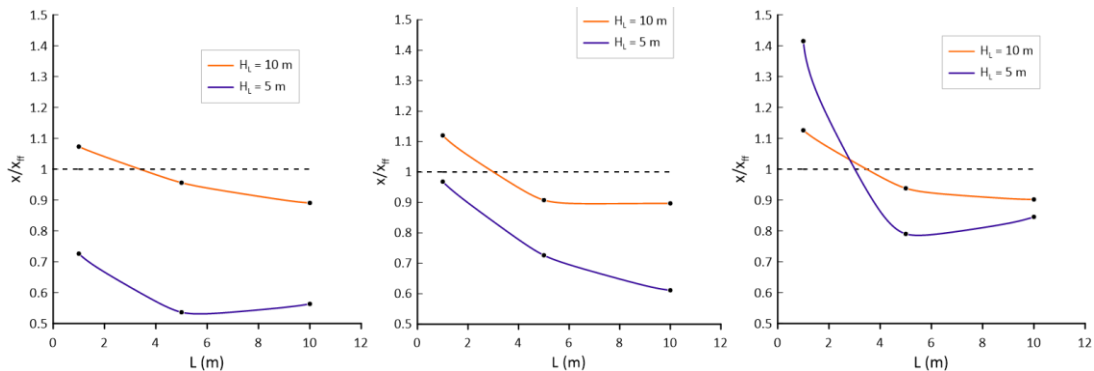
Σχήμα 5.16: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για φορτίο κατασκευής $q = 50$ kPa, 100 kPa και 200 kPa και τιμές πλάτους $B = 5$ και 20 m.

Στη συνέχεια, ενώ όλα τα παραπάνω αποτελέσματα αναφέρονται σε πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 10$ m, στο **Σχήμα 5.17** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m για $H_L = 5$ m και $H_L = 10$ m. Στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων, το μικρό πάχος H_L οδηγεί σε σημαντική μείωση της οριζόντιας μετακίνησης x της κατασκευής (όπως και του ελεύθερου πεδίου x_{ff}). Σε όρους λόγου x/x_{ff} , στις περισσότερες περιπτώσεις μειώνεται λόγω μείωσης του πάχους H_L , αλλά όχι τόσο συστηματικά όσο η μείωση λόγω αύξησης του πλάτους B .

Παρατηρείται επίσης, πως για μικρότερο πάχος ρευστοποιήσιμου εδαφικού στρώματος $H_L = 5$ m, ο λόγος x/x_{ff} αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου q , πιο συστηματικά απ' ό,τι για πάχος $H_L = 10$ m, τουλάχιστον για τη στενή κατασκευή ($B = 5$ m). Ακολούθως, στο **Σχήμα 5.18**, παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την επίδραση του ύψους L για τα δύο διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης και για πλάτος κατασκευής $B = 5$ m. Η αύξηση του ύψους L της κατασκευής συνεπάγεται και πάλι μείωση της οριζόντιας μετακίνησης x , και αντίστοιχα του λόγου x/x_{ff} .



Σχήμα 5.17: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.

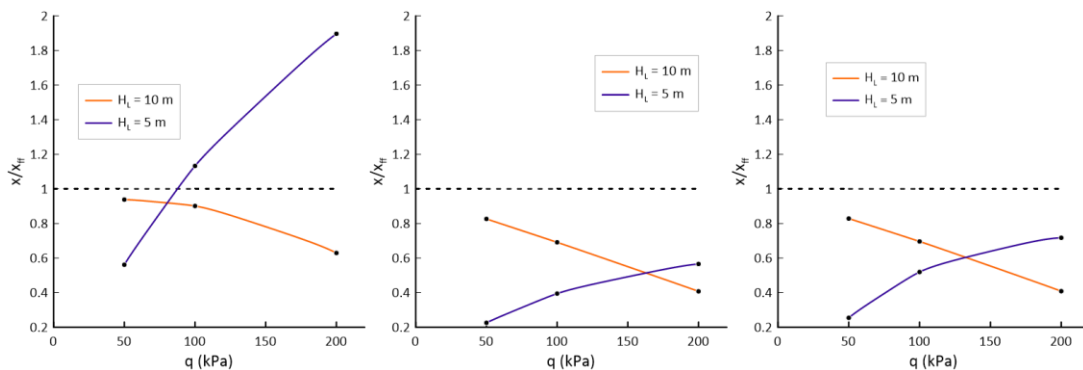


Σχήμα 5.18: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για φορτίο κατασκευής $q = 50$ kPa, 100 kPa και 200 kPa, και για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.

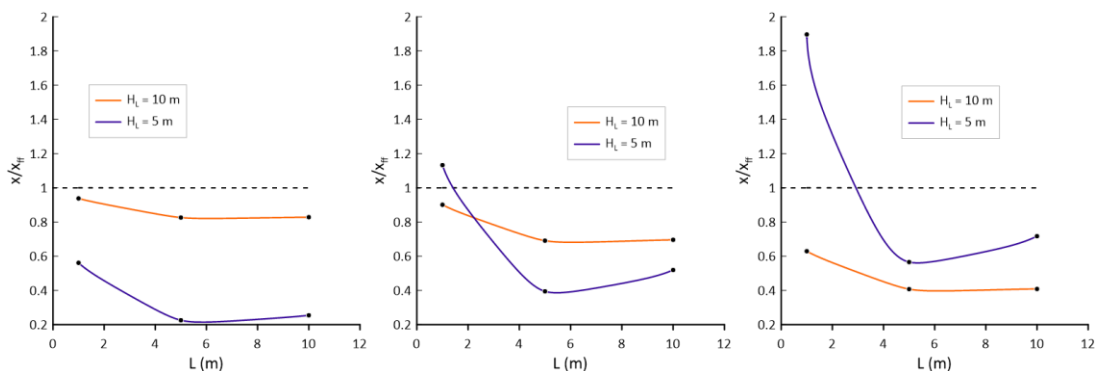
Στο **Σχήμα 5.19** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q στον λόγο x/x_{ff} για τα δύο πάχη της ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ m και $H_L = 10$ m, αλλά αυτή τη φορά για εύρος κατασκευής $B = 20$ m. Παρατηρείται ότι για το μικρό πάχος $H_L = 5$ m διατηρείται η αύξητική επίδραση του φορτίου q που είχε παρατηρηθεί και για $B = 5$ m στο **Σχήμα 5.17**. Από την άλλη, για το μεγάλο πλάτος $B = 20$ m προκύπτει ότι αντιστρέφεται η μειωτική επίδραση του φορτίου q που παρατηρείται για το μεγάλο πάχος $H_L = 10$ m.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.20** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης του ύψους L των κατασκευών πλάτους $B = 20$ m, για πάχη στρώσης $H_L = 10$ m και $H_L = 5$ m. Προκύπτει ότι και για το μικρό πάχος διατηρείται η περίπου μειωτική επίδραση του ύψους L που παρατηρείται και για $H_L = 10$ m, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και για $B = 5$ m στο **Σχήμα 5.18**.

Επιπλέον, από τα **Σχήματα 5.15** έως **5.20** προκύπτει ότι η αύξηση του λόγου B/H_L (αν συνδυαστούν οι επιδράσεις του πλάτους B και του πάχους H_L) μειώνει την τιμή της οριζόντιας μετακίνησης x και του λόγου x/x_{ff} , αν και όχι συστηματικά.



Σχήμα 5.19: Επίδραση του φορτίου q στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.



Σχήμα 5.20: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης x προς την οριζόντια μετακίνηση x_{ff} του αντίστοιχου ελεύθερου πεδίου, για φορτίο κατασκευής $q = 50$ kPa, 100 kPa και 200 kPa, και για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.

Με βάση όλα τα ανωτέρω, προκύπτουν τα κάτωθι γενικά συμπεράσματα σε ό,τι αφορά την απόκριση της κατασκευής ως προς τον λόγο της οριζόντιας μετακίνησης της κατασκευής x προς την οριζόντια μετακίνηση σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου x_{ff} , x/x_{ff} :

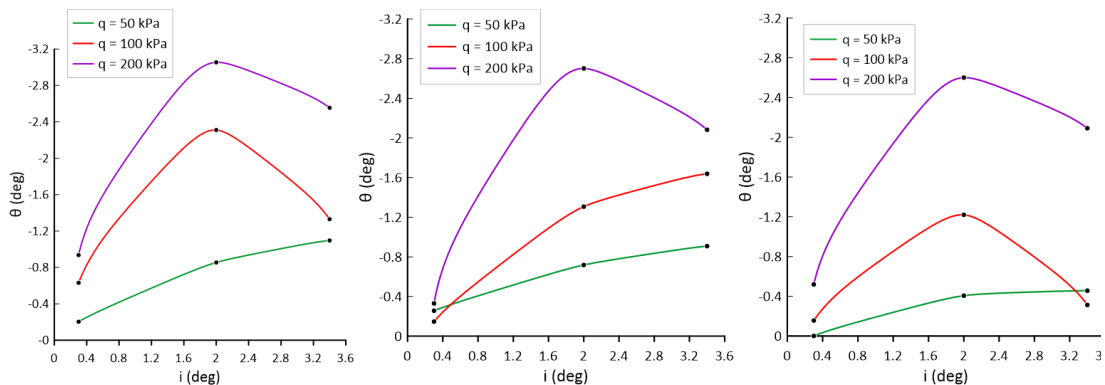
1. Η αύξηση της γωνίας κλίσης i επιδρά αυξητικά στην τιμή του λόγου x/x_{ff} για $i \leq 2^\circ$, ενώ για μεγαλύτερες τιμές i η επίδραση δεν είναι συστηματική.
2. Η αύξηση του ύψους της κατασκευής L , κυρίως, και δευτερευόντως η αύξηση του λόγου πλάτους κατασκευής προς πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης B/H_L έχουν συστηματική μειωτική επίδραση στην τιμή του λόγου x/x_{ff} , όταν διατηρούνται σταθερές οι τιμές του φορτίου κατασκευής q και η γωνία κλίσης i του εδάφους.
3. Η επίδραση του φορτίου κατασκευής q δεν έχει συστηματική επίδραση στην τιμή του λόγου x/x_{ff} .
4. Ο λόγος x/x_{ff} είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων (που εξετάστηκαν) μικρότερος του 1.0 (συνολικό εύρος 0.23-1.41). Συγκεκριμένα, από τις συνολικά 54 περιπτώσεις στο 87% των αναλύσεων ο λόγος απαντάται μικρότερος του 1.0, ενώ μόλις στο 13% ο λόγος είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 1.0.

5.4 Στροφή κατασκευής

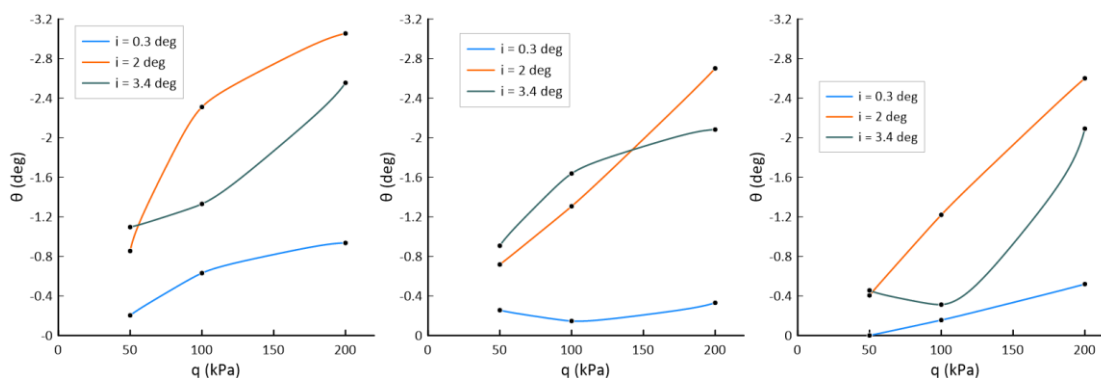
Σε αυτό το κεφάλαιο θα διερευνηθεί η επίδραση της κλίσης της εδαφικής στρώσης i , του φορτίου της κατασκευής q , του ύψους της κατασκευής L , του εύρους της κατασκευής B και του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L στην παραμένουσα στροφή θ της κατασκευής. Η στατιστική επεξεργασία περιλαμβάνει το σύνολο των αποτελεσμάτων και θα παρουσιαστεί μέσω διαγραμμάτων, παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν για τον σχολιασμό της καθίζησης και της οριζόντιας μετακίνησης στις παραγράφους 5.2 και 5.3, αντίστοιχα. Η επίδραση των παραμέτρων θα είναι συναρτήσει του λόγου της στροφής της κατασκευής θ .

Στο **Σχήμα 5.21** παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας κλίσης του εδάφους i στην μεταβολή της στροφής θ για το φορτισμένο θεμέλιο, την χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και για τιμές φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa. Διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της κλίσης του εδάφους από 0.3° έως 2° , η στροφή της κατασκευής αυξάνεται σημαντικά. Αντίθετα, με την περαιτέρω αύξηση της γωνίας κλίσης εδάφους από 2° έως 3.4° , η στροφή σταθεροποιείται ή μειώνεται ελαφρώς. Επιπλέον προκύπτει σαφής αυξητική επίδραση του φορτίου q της κατασκευής.

Η στροφή της κατασκευής στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερη από την γωνία κλίσης του εδάφους με εξαίρεση την περίπτωση βαριάς κατασκευής ή φορτισμένου θεμελίου με φορτίο $q = 200$ kPa, όπου η τιμή της στροφής ξεπερνά την γωνία κλίσης του εδάφους. Φυσικά αυτό το συμπέρασμα εξαρτάται και από τη διέγερση, οπότε δεν θα δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στη συνέχεια.



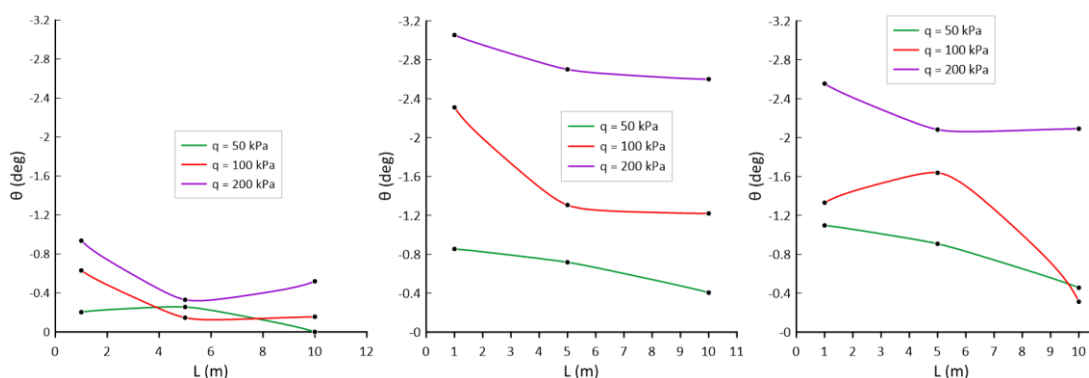
Σχήμα 5.21: Επίδραση της γωνίας κλίσης i στην στροφή θ , για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και τιμών φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa.



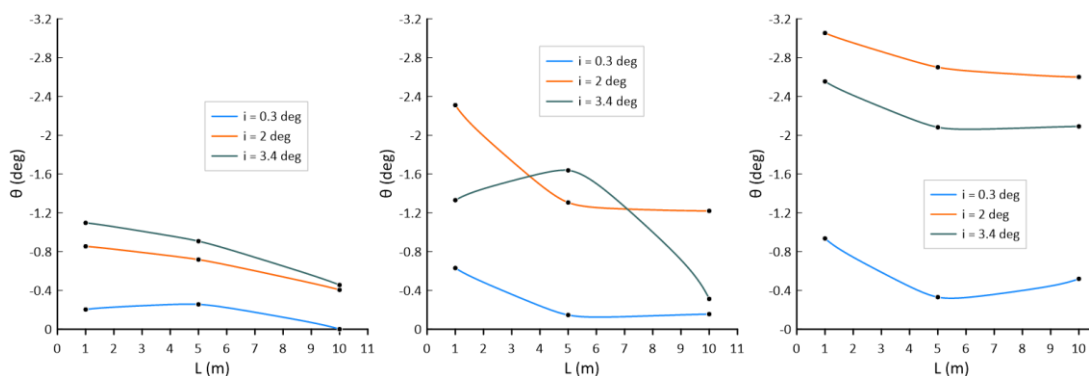
Σχήμα 5.22: Επίδραση του φορτίου q στην στροφή θ , για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m, για τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° .

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.22** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q στη μεταβολή της στροφής θ για το φορτισμένο θεμέλιο, την χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και για τρεις γωνίες κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° . Είναι σαφές ότι η παράμετρος του φορτίου q δρα αυξητικά και σχεδόν γραμμικά στην αύξηση της στροφής θ του θεμελίου και των κατασκευών. Για παράδειγμα, για την περίπτωση της γωνίας κλίσης εδάφους 2° η τιμή της στροφής κατασκευής φαίνεται να διπλασιάζεται με τον διπλασιασμό του φορτίου της.

Στα **Σχήματα 5.23** και **5.24** απεικονίζονται τα διαγράμματα της επίδρασης του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m, στην στροφή της, λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις διαφορετικές γωνίες κλίσης του εδάφους $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° και τα τρία διαφορετικά φορτία κατασκευής $q = 50, 100$ και 200 kPa αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ύψους L της κατασκευής, η στροφή θ μειώνεται γενικώς. Συνδυαστικά με την παράμετρο του φορτίου q , η στροφή της κατασκευής μειώνεται όσο μεγαλώνει το ύψος L και μικραίνει το φορτίο της q , τουλάχιστον για τη στενή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m.

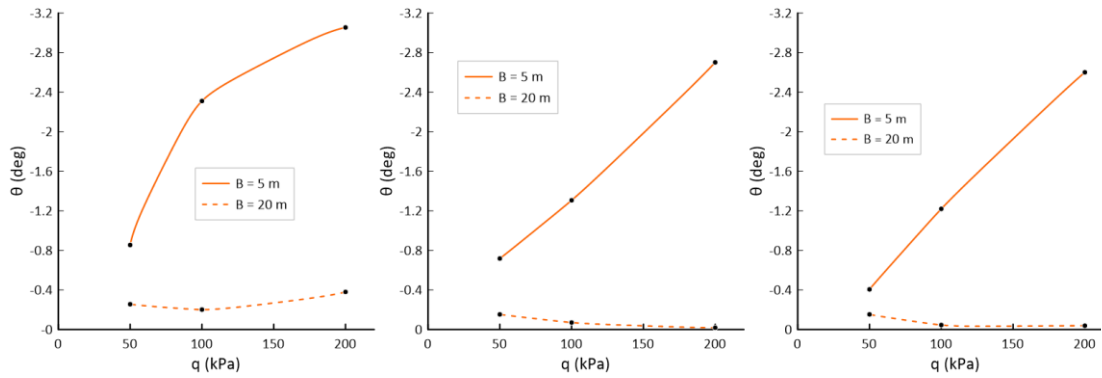


Σχήμα 5.23: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m στην στροφή θ σε έδαφος με γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° , για τιμές φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa.

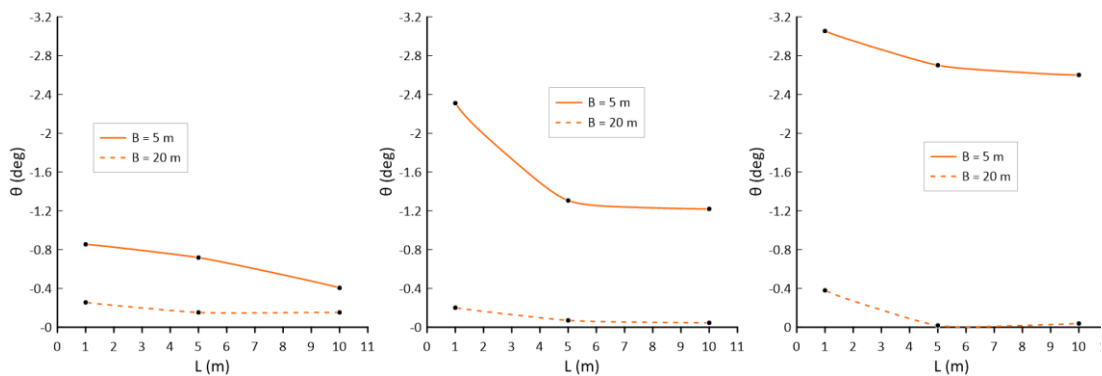


Σχήμα 5.24: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m στην στροφή θ , για φορτίο κατασκευής $q = 50, 100$ και 200 kPa και για τρεις τιμές γωνίας κλίσης $i = 0.3^\circ, 2^\circ$ και 3.4° .

Στα **Σχήματα 5.25** και **5.26** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q και του ύψους L αντίστοιχα, στην στροφή θ της κατασκευής για γωνία κλίσης εδάφους 2° για διαφορετικά πλάτη κατασκευής $B = 5$ m και $B = 20$ m. Παρατηρείται ότι η κατασκευή πλάτους $B = 20$ m συμπεριφέρεται διαφορετικά με την αύξηση του φορτίου σε σχέση με αυτή πλάτους $B = 5$ m. Συγκεκριμένα, για την ευρεία κατασκευή, συγκριτικά μηδενίζεται η στροφή. Διαφαίνεται επίσης ότι η επίδραση του φορτίου q γίνεται μειωτική για $B = 20$ m (αντίθετα με ό,τι προκύπτει για $B = 5$ m), ενώ διατηρείται η μειωτική επίδραση του ύψους L . Σε κάθε περίπτωση όμως, η σημαντικότερη επίδραση είναι η ραγδαία μείωση της στροφής λόγω αύξησης του πλάτους B .



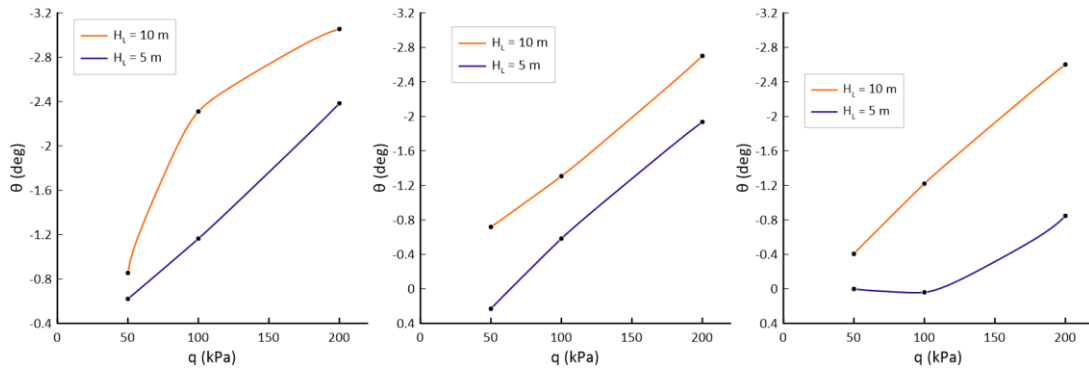
Σχήμα 5.25: Επίδραση του φορτίου q στην στρόφι θ για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ και 20 m.



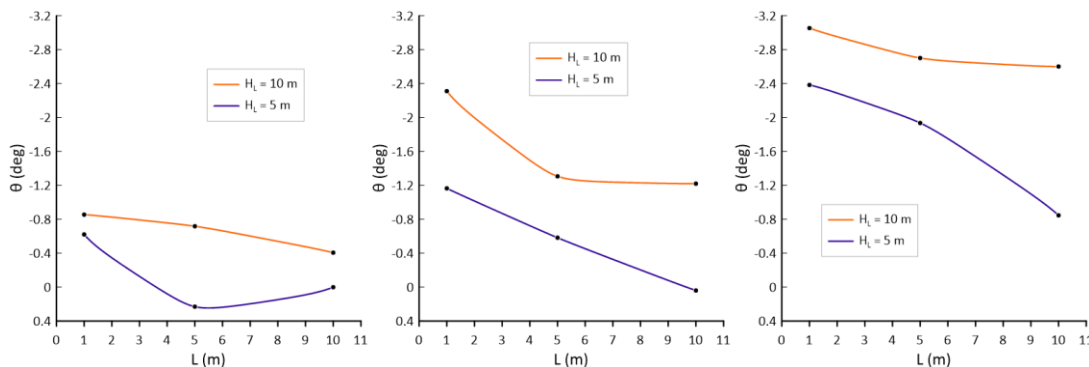
Σχήμα 5.26: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής στην στρόφι θ για γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ και για φορτίο κατασκευής $q = 50, 100$ και 200 kPa και τιμές πλάτους $B = 5$ και 20 m.

Συνεχίζοντας από τα παραπάνω αποτελέσματα που αφορούσαν όλα πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 10$ m, στα **Σχήματα 5.27** και **5.28** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q και του ύψους L αντίστοιχα, στην στρόφι της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m, για γωνία κλίσης εδάφους 2° για δύο διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ m και $H_L = 10$ m. Παρατηρείται και για τα δυο πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L σημαντική αύξηση της στρόφης θ της κατασκευής με την αύξηση του φορτίου q . Ωστόσο, οι τιμές της στρόφης θ είναι μικρότερες για το μικρότερο πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης, δηλαδή η μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L συνεπάγεται την μείωση της τιμής της στρόφης θ της κατασκευής.

Αντίστοιχα, η επιρροή του ύψους L φαίνεται να είναι όμοια μειωτική και για το μικρότερο πάχος H_L της ρευστοποιήσιμης στρώσης, ενώ και πάλι οι τιμές της στρόφης θ είναι μικρότερες για τη μικρότερη τιμή του πάχους H_L .



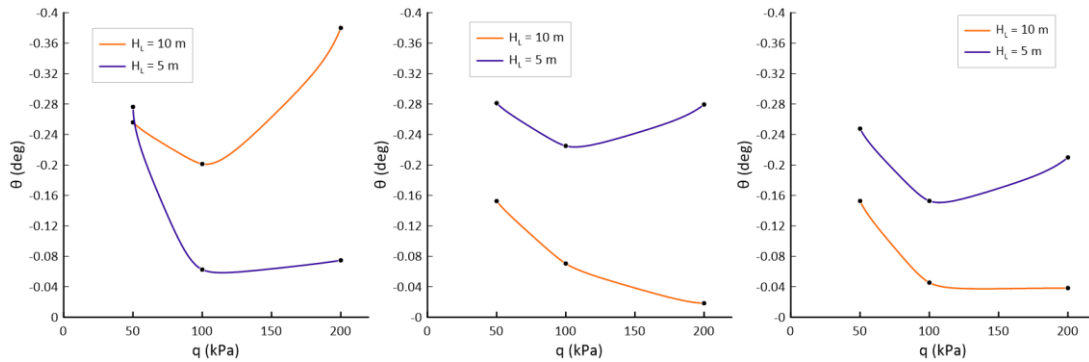
Σχήμα 5.27: Επίδραση του φορτίου q στην στροφή θ , για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.



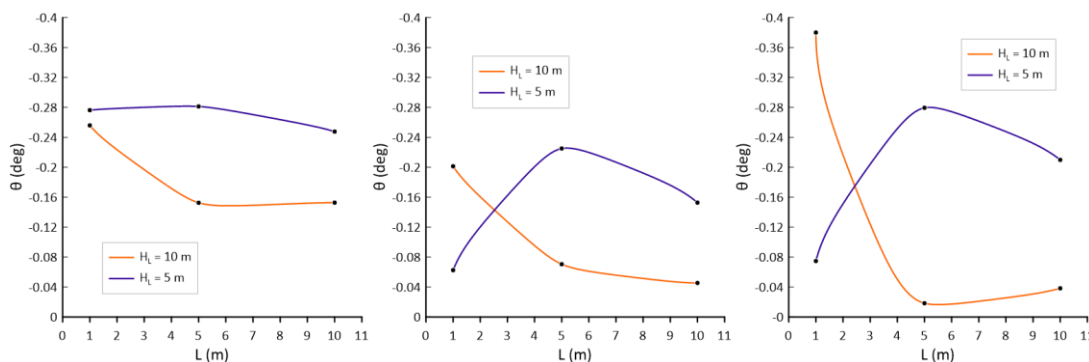
Σχήμα 5.28: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στην στροφή θ , για φορτίο κατασκευής $q = 50, 100$ και 200 kPa, και για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.

Στα **Σχήματα 5.29** και **5.30** παρουσιάζεται η επίδραση του φορτίου q και του ύψους L αντίστοιχα, στην στροφή της κατασκευής, αυτή τη φορά για εύρος $B = 20$ m, για γωνία κλίσης εδάφους 2° και για διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ m και $H_L = 10$ m. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν σε κάποιες περιπτώσεις διαφορετικές επιδράσεις, αλλά θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι οι όποιες αυξομειώσεις είναι ευαίσθητες σε αλλαγές των παραμέτρων του προβλήματος, καθώς οι τιμές της θ είναι γενικώς πολύ μικρές. Συνεπώς, μάλλον δεν υπάρχει λόγος να μελετηθούν με ακρίβεια οι επιδράσεις αυτές, καθώς οι τιμές της στροφής θ είναι, ούτως ή άλλως, μικρές λόγω του μεγάλου εύρους της κατασκευής.

Συνολικά, μπορεί να εκτιμηθεί από τα **Σχήματα 5.25** έως **5.30** προκύπτει ότι η αύξηση του λόγου B/H_L πρακτικώς μειώνει την τιμή της στροφής θ , κυρίως λόγω της επίδρασης του εύρους της κατασκευής B παρά του πάχους H_L . Σε κάθε περίπτωση, με βάση όλες τις αναλύσεις προκύπτουν πρακτικώς μηδενικές τιμές στροφής θ για τιμές του B/H_L μεγαλύτερες ή ίσες του 1.0, αν και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για το θέμα αυτό.



Σχήμα 5.29: Επίδραση του φορτίου q στην στρόφιξη θ , για το φορτισμένο θεμέλιο, τη χαμηλή και την υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$, για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.



Σχήμα 5.30: Επίδραση του ύψους L της κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και γωνία κλίσης εδάφους $i = 2^\circ$ στην στρόφιξη θ , για φορτίο κατασκευής $q = 50, 100$ και 200 kPa, και για πάχη στρώσης $H_L = 5$ και 10 m.

Με βάση όλα τα ανωτέρω, προκύπτουν τα κάτωθι γενικά συμπεράσματα σε ό,τι αφορά στην απόκριση της κατασκευής σε όρους στρόφιξης θ :

1. Η αύξηση του φορτίου q προκύπτει αυξητική στην τιμή της στρόφιξης θ , ενώ το εύρος B (κυρίως) και το ύψος L (δευτερευόντως) επιδρούν μειωτικά. Στις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν, πρακτικώς για $B = 20$ m οι τιμές της στρόφιξης θ είναι σχεδόν μηδενικές.
2. Η μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L επιφέρει μείωση της στρόφιξης της κατασκευής θ , όταν όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.
3. Η αύξηση του λόγου B/H_L έχει μειωτική επίδραση στη στρόφιξη θ , μέχρι μηδενισμού αυτής (π.χ., για $B/H_L \geq 1.0$ εδώ).
4. Στις περιπτώσεις που παρουσιάζονται εδώ το συνολικό εύρος της στρόφιξης θ κυμαίνεται από 0.00 έως 3.05° . Συνολικά από τις 54 αναλύσεις στο 82% εξ αυτών η τιμή της στρόφιξης είναι μικρότερη από την γωνία κλίσης του εδάφους και στο 17% των περιπτώσεων την υπερβαίνει, αλλά αυτά τα ποσοστά εξαρτώνται και από τη διέγερση.

5.5 Προσεγγιστικές σχέσεις εκτίμησης λόγων απόκρισης

Στις παραγράφους 5.2 και 5.3 αναδείχθηκαν οι σημαντικότερες παράμετροι του προβλήματος βάσει της διερεύνησης της επίδρασής τους στην απόκριση των κατασκευών σε όρους των λόγων απόκρισης της κατασκευής z/z_0 και x/x_{ff} . Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται η ποσοτικοποίηση της επιρροής αυτών των παραμέτρων μέσω της κατάρτισης πολύ-παραμετρικών σχέσεων εκτίμησης αυτών. Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν από μη γραμμική παλινδρόμηση των δεδομένων του συνόλου των προαναφερθεισών 54 αναλύσεων. Οι σχέσεις αυτές αναπτύχθηκαν με γνώμονα τις παραδοχές και τους περιορισμούς της παρούσας εργασίας, και αποτελούν μια προσπάθεια ακριβέστερης περιγραφής της επιρροής των κρίσιμων παραμέτρων στην απόκριση των άκαμπτων κατασκευών στο τέλος της σεισμικής ρευστοποίησης σε ήπια κεκλιμένο έδαφος.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμηση με την χρήση του φυσικού λογαρίθμου των παραμέτρων και των λόγων απόκρισης μετατρέποντας έτσι εμμέσως σε μη-γραμμική την παλινδρόμηση των πραγματικών παραμέτρων του προβλήματος. Η επιλογή αυτής της προσέγγισης βασίστηκε στις ιδιότητες του λογαρίθμου [$\ln(a \cdot b) = \ln(a) + \ln(b)$ και $\ln(a)^n = n \ln(a)$], οι οποίες επιτρέπουν μετά την παλινδρόμηση την απλοποίηση των σχέσεων και την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των επιμέρους παραμέτρων. Στόχος είναι, ξεκινώντας με την γραμμική παλινδρόμηση των όρων $\Omega_1, \Omega_2 \dots \Omega_i$ όπου Ω_i ο λογάριθμος της ανεξάρτητης εκάστοτε μεταβλητής X_i , η κατάληξη σε μια πολύ-παραμετρική σχέση της μορφής $Y = a_0 X_1^{n_1} X_2^{n_2} \dots X_i^{n_i}$ στην οποία η θετική τιμή του εκθέτη n_i υποδηλώνει την αυξητική επίδραση της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής X_i στην τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής Y , ενώ η αρνητική τιμή του εκθέτη υποδηλώνει μειωτική επίδραση.

Η ποσοτικοποίηση του στατιστικού σφάλματος κάθε σχέσης γίνεται μέσω της τιμής του συντελεστή προσδιορισμού R^2 κάθε προσέγγισης, καθώς και μέσω του λεγόμενου σχετικού σφάλματος Re που ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς μεταξύ της προβλεπόμενης και της μετρούμενης τιμής, προς την μετρούμενη τιμή κάθε εξαρτημένης μεταβλητής. Δηλαδή $Re > 0$ υπονοεί υπερ-εκτίμηση, και το αντίθετο υπο-εκτίμηση, ενώ τέλεια πρόβλεψη αποδίδεται με $Re = 0$, ενώ η ακρίβεια ποσοτικοποιείται μέσω της τυπικής απόκλισης σ του Re από τη μέση τιμή $Re = 0$ κάθε προσέγγισης. Έμφαση δίνεται στον έλεγχο μεροληψίας (bias) της προβλεπόμενης εξαρτημένης μεταβλητής ως συνάρτηση των ανεξάρτητων μεταβλητών αλλά και στο σύνολο των τιμών της βάσης δεδομένων. Για κάθε έναν από τους λόγους απόκρισης δίνονται δύο προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα, η 1^η προσέγγιση είναι η «ορθή» στατιστική προσέγγιση που έχει στόχο τη μεγιστοποίηση του R^2 , την ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης του σχετικού σφάλματος σ και την ελαχιστοποίηση της μεροληψίας του σχετικού σφάλματος Re ως προς τις ανεξάρτητες μεταβλητές κάθε σχέσης. Η 2^η προσέγγιση προκύπτει από «διόρθωση» της 1^{ης} προσέγγισης ως προς τη μεροληψία του σχετικού σφάλματος Re ως προς το σύνολο των μετρήσεων στη βάση δεδομένων. Η «διόρθωση» αυτή εξαφανίζει την εν λόγω μεροληψία, αλλά ταυτόχρονα προκαλεί μικρή αύξηση της τυπικής απόκλισης του σχετικού σφάλματος, αλλά και της μεροληψίας του Re συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών. Με βάση τα ανωτέρω, θεωρείται προτιμότερη η 2^η προσέγγιση από την οπτική του Μηχανικού, αλλά η τελική επιλογή επαφίεται στον χρήστη.

Σχέση για τον λόγο καθιζήσεων z/z_0

Με βάση τις συνολικά 54 αναλύσεις της εργασίας, ο λόγος καθιζήσεων προκύπτει $z/z_0 = 1.04 \pm 0.15$. Από εκεί και πέρα, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2, το φορτίο κατασκευής q , η γωνία κλίσης του εδάφους i , το εύρος της κατασκευής B και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L αποτελούν τις κρίσιμες παραμέτρους που διέπουν την απόκριση μιας κατασκευής

κατά τη ρευστοποίηση σε κεκλιμένο έδαφος σε όρους z/z_0 . Συγκεκριμένα, το φορτίο κατασκευής q και η γωνία κλίσης του εδάφους i επιδρούν αυξητικά στον λόγο z/z_0 , ενώ το εύρος της κατασκευής B και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L επιδρούν μειωτικά. Ως 1^η προσέγγιση, η στατιστική επεξεργασία της βάσης δεδομένων των αριθμητικών αποτελεσμάτων κατέληξε στην παρακάτω σχέση όπου το πρόσημο των εκθετών επιβεβαιώνει τις ανωτέρω επιδράσεις των παραμέτρων στην τιμή του λόγου z/z_0 :

$$\frac{z}{z_0} = 1.724 \left(\frac{q}{p_a} \right)^{0.114} i^{0.054} B^{-0.173} H_L^{-0.087} \quad (5.1)$$

όπου q το φορτίο της κατασκευής σε kPa, p_a η ατμοσφαιρική πίεση ≈ 100 kPa, i η γωνία κλίσης του εδάφους σε $^\circ$, B το εύρος της κατασκευής σε m και H_L το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης σε m.

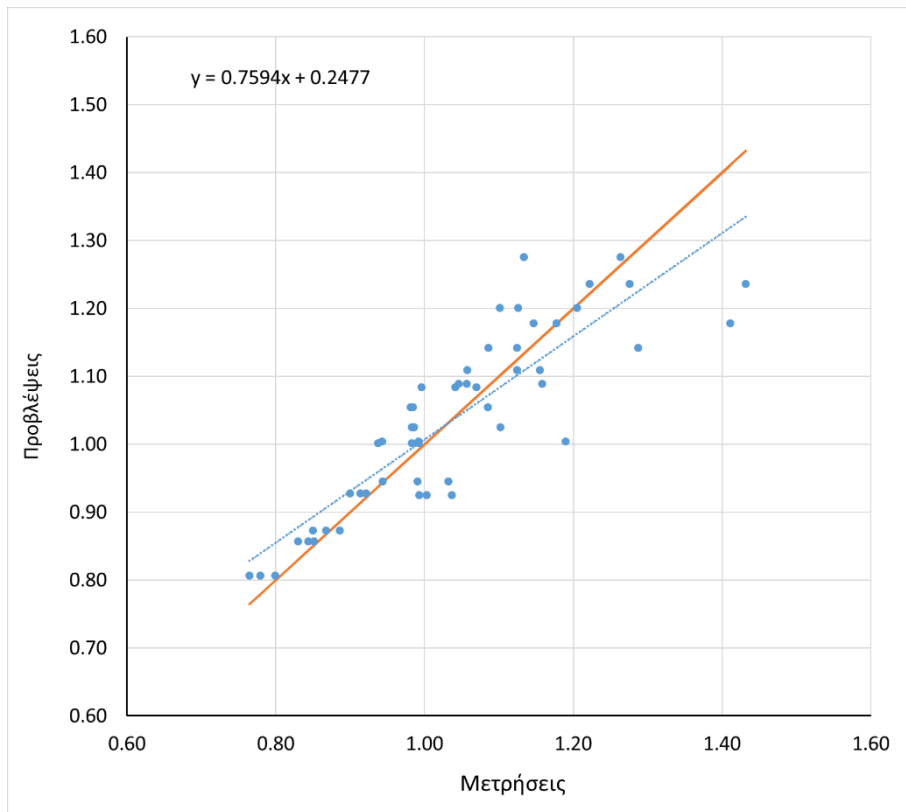
Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 προέκυψε 0.79, γεγονός που υποδηλώνει καλή προσαρμογή της σχέσης (5.1) στις μετρήσεις, ενώ το μέσο σχετικό σφάλμα Re ήταν μηδενικό και η τυπική απόκλιση σχετικού σφάλματος $\sigma = 6.3\%$. Στο **Σχήμα 5.31** απεικονίζονται οι προβλεπόμενες τιμές του λόγου z/z_0 σε σύγκριση με τις μετρηθείσες τιμές. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται η γραμμή που αντιστοιχεί στην ταύτιση των προβλεπόμενων με τις μετρήσεις, καθώς και η γραμμή τάσης που αποτυπώνει τη μεροληψία της σχέσης (5.1) ως προς τις μετρήσεις.

Η διόρθωση της εν λόγω μεροληψίας οδηγεί στη 2^η προσέγγιση, η οποία έχει την παρακάτω μορφή:

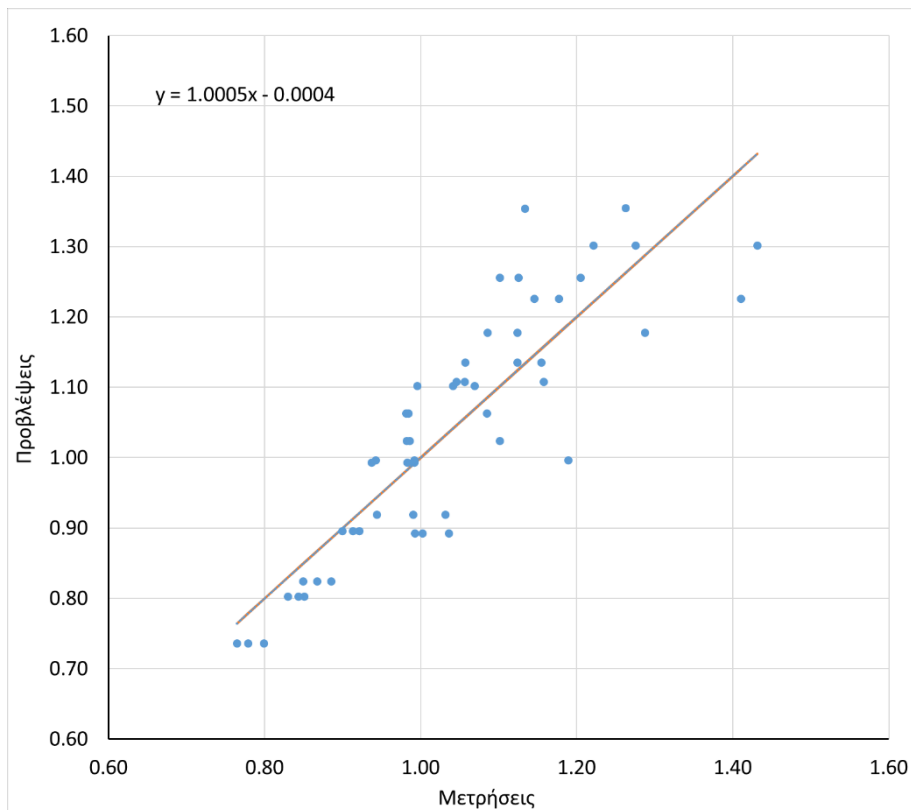
$$\frac{z}{z_0} = 2.271 \left(\frac{q}{p_a} \right)^{0.114} i^{0.054} B^{-0.173} H_L^{-0.087} - 0.327 \quad (5.2)$$

Είναι σαφές ότι η 2^η προσέγγιση διατηρεί ίδιους τους εκθέτες των παραμέτρων της 1^{ης} προσέγγισης, και εισάγει αλλαγή στον πολλαπλασιαστή της σχέσης ενώ εμφανίζει και σταθερό όρο. Η νέα αυτή σχέση που προκύπτει έχει συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.80$, μέσο σχετικό σφάλμα $Re = 0$ και τυπική απόκλιση σχετικού σφάλματος $\sigma = 7.6\%$. Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.32** απεικονίζονται οι προβλέψεις της σχέσης (5.2) συναρτήσεων των μετρήσεων, απ' όπου προκύπτει η εξάλειψη της μεροληψίας που υπήρχε στο **Σχήμα 5.31** για την 1^η προσέγγιση.

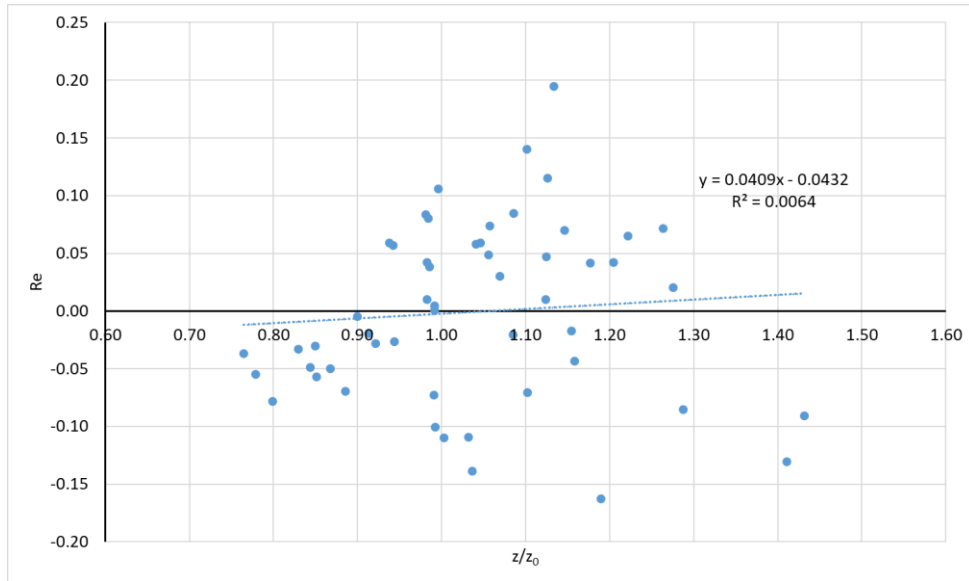
Χάριν πληρέστερης απεικόνισης της ακρίβειας, στα **Σχήματα 5.33, 5.34, 5.35, 5.36 και 5.37** παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα Re συναρτήσεων των τιμών z/z_0 και κάθε μίας από τις τέσσερις παραμέτρους της σχέσης (5.2). Παρατηρείται πως τα σημεία είναι τυχαία κατανομημένα γύρω από τη γραμμή του $Re = 0$, υποδεικνύοντας ότι η σχέση (5.2) περιγράφει ικανοποιητικά τον λόγο καθιζήσεων z/z_0 . Οι παράμετροι με τη σχετικά μεγαλύτερη μεροληψία φαίνεται να είναι το αδιάστατο φορτίο q/p_a και το εύρος της κατασκευής B .



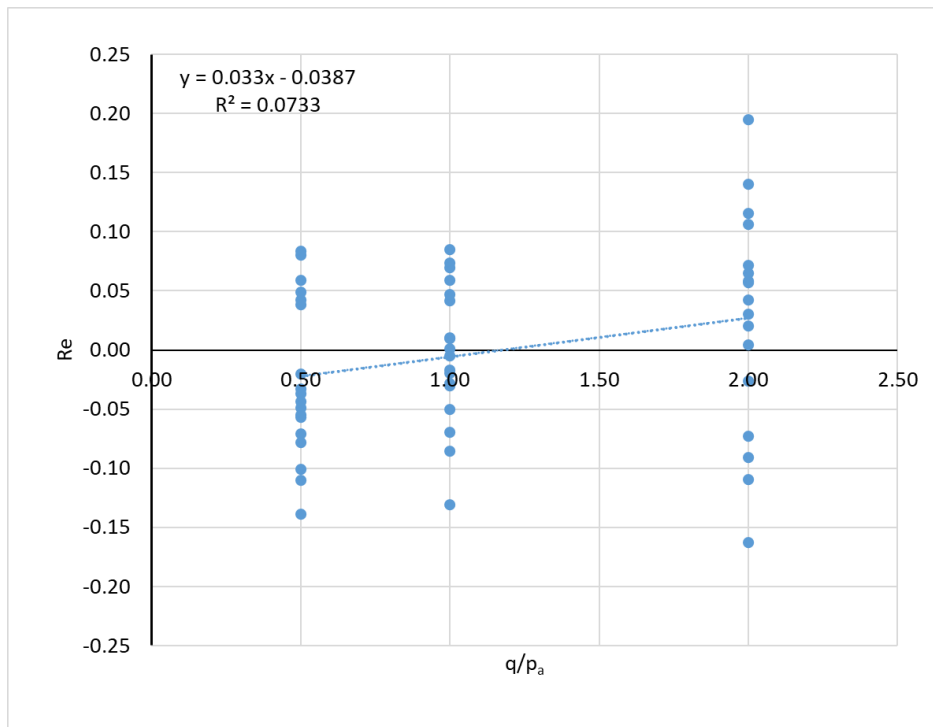
Σχήμα 5.31: Σύγκριση προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών λόγου καθίζησης z/z_0 βάσει της σχέσης (5.1).



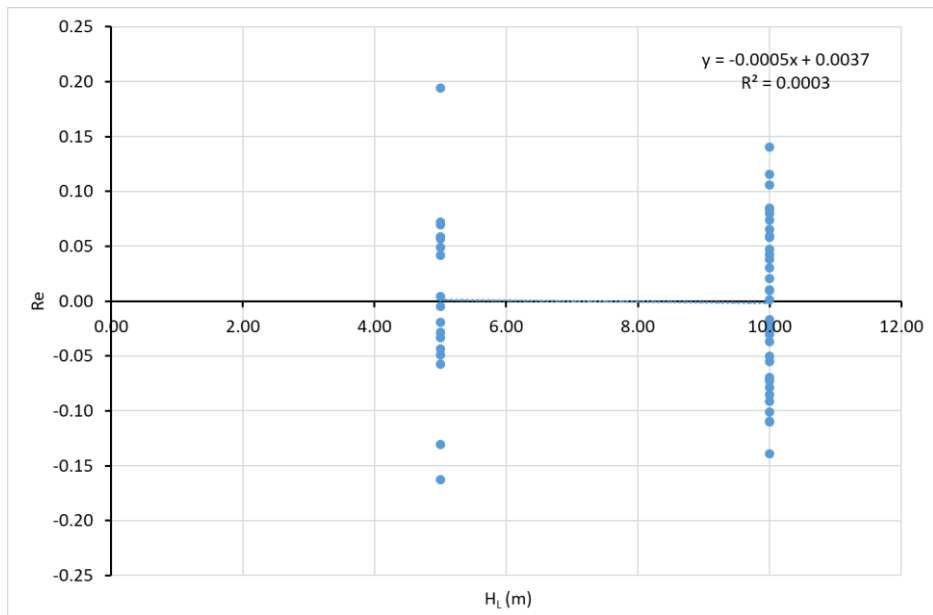
Σχήμα 5.32: Σύγκριση προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών λόγου καθίζησης z/z_0 βάσει της σχέσης (5.2).



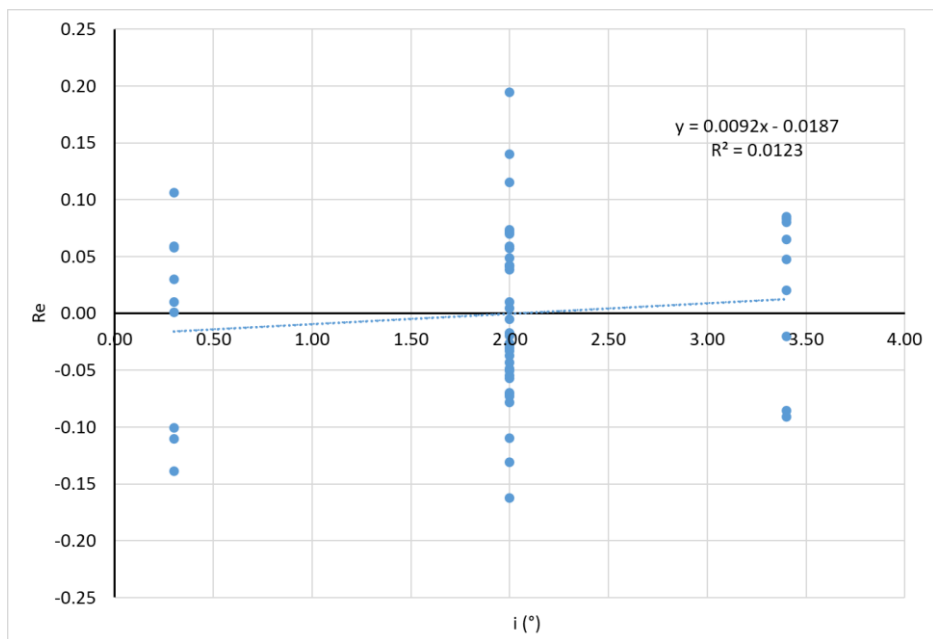
Σχήμα 5.33: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.2) συναρτήσει των μετρήσεων z/z_0 .



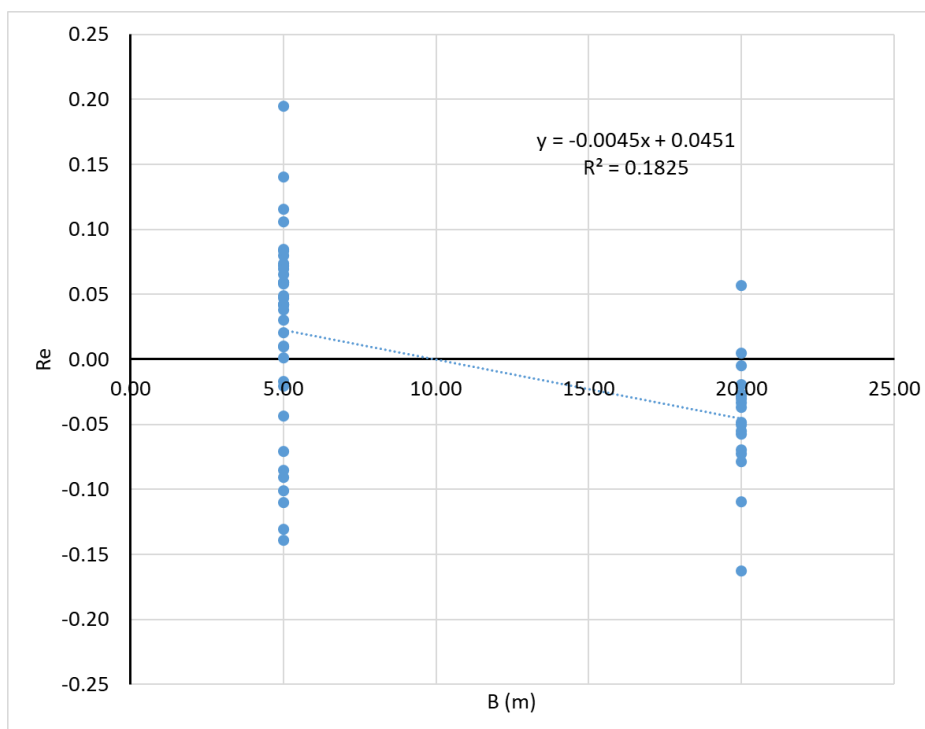
Σχήμα 5.34: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.2) για την εκτίμηση του z/z_0 συναρτήσει του αδιάστατου φορτίου της κατασκευής q/p_a .



Σχήμα 5.35: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.2) για την εκτίμηση του z/z_0 συναρτήσει του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L .



Σχήμα 5.36: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.2) για την εκτίμηση του z/z_0 συναρτήσει της γωνίας κλίσης του εδάφους i .



Σχήμα 5.37: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.2) για την εκτίμηση του z/z_0 συναρτήσει του εύρους της κατασκευής B.

Σχέση για τον λόγο οριζοντίων μετατοπίσεων x/x_{ff}

Με βάση τις συνολικά 54 αναλύσεις της εργασίας, ο λόγος οριζοντίων μετατοπίσεων προκύπτει $x/x_{ff} = 0.74 \pm 0.24$. Από εκεί και πέρα, όπως αναφέρθηκε στην παραγράφου 5.3, οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση μιας κατασκευής κατά τη ρευστοποίηση σε κεκλιμένο έδαφος σε όρους x/x_{ff} περιλαμβάνουν τη γωνία κλίσης του εδάφους i , το ύψος της κατασκευής L , το εύρος της κατασκευής B και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L . Ειδικότερα, η γωνία κλίσης i (για $i \leq 2^\circ$) και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L ασκούν αυξητική επίδραση στον λόγο x/x_{ff} , ενώ το ύψος L και το εύρος B της κατασκευής συμβάλλουν στη μείωσή του. Για $i > 2^\circ$, η επίδραση της κλίσης στην τιμή του λόγου x/x_{ff} εξαλείφεται.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την σχέση εκτίμησης του λόγου x/x_{ff} είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε προηγουμένως για τον λόγο z/z_0 . Έτσι, ως 1^η προσέγγιση, η στατιστική επεξεργασία της βάσης δεδομένων των αριθμητικών αποτελεσμάτων κατέληξε στην παρακάτω σχέση όπου το πρόσημο των εκθετών επιβεβαιώνει τις ανωτέρω επιδράσεις των παραμέτρων στην τιμή του λόγου x/x_{ff} . Επιπλέον αναφέρεται ότι η σχέση (5.3) ισχύει για $i \leq 2^\circ$, ενώ σε περίπτωση που η γωνία κλίσης $i > 2^\circ$, τότε η σχέση χρησιμοποιείται με τιμή $i = 2^\circ$. Συγκεκριμένα:

$$\frac{x}{x_{ff}} = 0.65 i^{0.266} B^{-0.25} H_L^{0.32} L^{-0.16} \quad , \quad \text{με } i = 2^\circ \text{ αν ισχύει } i > 2^\circ \quad (5.3)$$

όπου i η γωνία κλίσης του εδάφους σε $^\circ$, B το εύρος της κατασκευής σε m, H_L το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης σε m και L το ύψος της κατασκευής σε m. Υπογραμμίζεται εδώ ότι τα πρόσημα των εκθετών της σχέσης (5.3) επιβεβαιώνουν τη συμβολή των παραμέτρων στην αυξομείωση του λόγου x/x_{ff} .

Η παλινδρόμηση της σχέσης αυτής, απέδωσε συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.55$, μηδενικό μέσο σχετικό σφάλμα Re και τυπική απόκλιση σχετικού σφάλματος $\sigma = 26.8\%$, γεγονός που

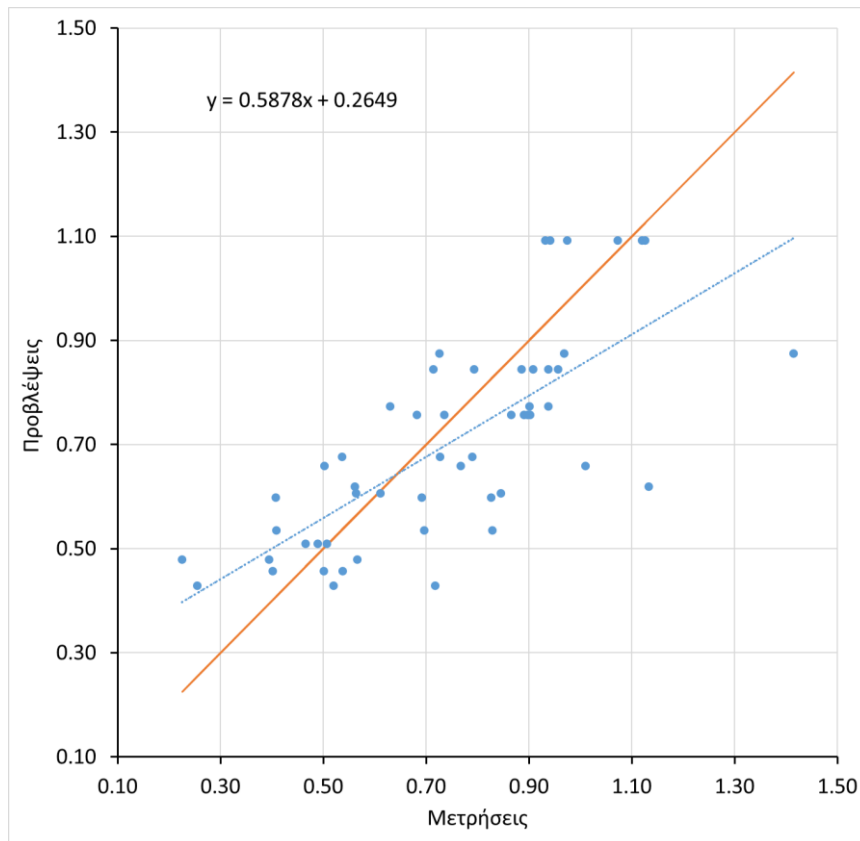
υποδηλώνει μέτρια προσαρμογή της σχέσης (5.3) στις μετρήσεις, σε αντίθεση με την καλύτερη προσαρμογή της σχέσης για τον λόγο καθιζήσεων z/z_0 . Αυτή η μειωμένη ακρίβεια αποδίδεται εν μέρει έστω στην ασαφή επίδραση της κλίσης εδάφους στις μεγάλες τιμές της i . Στο **Σχήμα 5.38** απεικονίζονται οι προβλεπόμενες τιμές του λόγου x/x_{ff} σε σύγκριση με τις μετρημένες τιμές. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται η γραμμή που αντιστοιχεί στην ταύτιση των προβλεπόμενων με τις μετρήσεις, καθώς και η γραμμή τάσης που αποτυπώνει τη μεροληψία της σχέσης (5.3) ως προς τις μετρήσεις

Η διόρθωση της εν λόγω μεροληψίας οδηγεί στη 2^η προσέγγιση, η οποία έχει την παρακάτω μορφή:

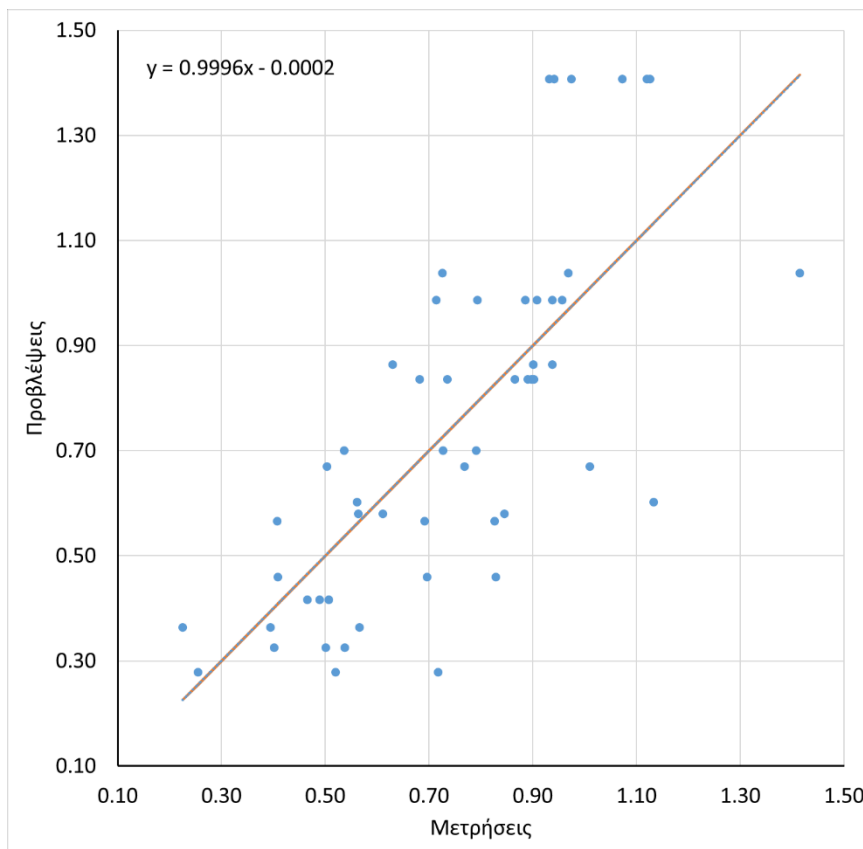
$$\frac{x}{x_{ff}} = 1.105 i^{0.266} B^{-0.25} H_L^{0.32} L^{-0.16} - 0.451 \quad , \quad \text{με } i = 2^\circ \text{ αν ισχύει } i > 2^\circ \quad (5.4)$$

Είναι σαφές ότι η 2^η προσέγγιση διατηρεί ίδιους τους εκθέτες των παραμέτρων της 1^{ης} προσέγγισης, και εισάγει αλλαγή στον πολλαπλασιαστή της σχέσης ενώ εμφανίζει και σταθερό όρο. Η νέα αυτή σχέση που προκύπτει έχει χαμηλότερο συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.56$, μέσο σχετικό σφάλμα $Re = 0$ και τυπική απόκλιση σχετικού σφάλματος $\sigma = 29.2\%$.

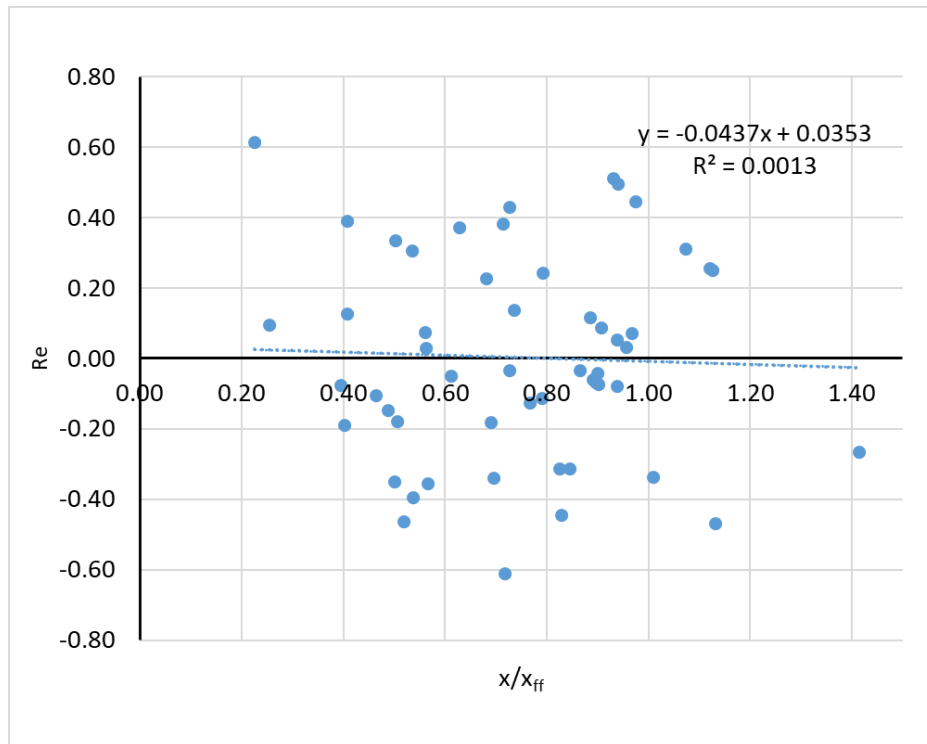
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.39** απεικονίζονται οι προβλέψεις της σχέσης (5.4) συναρτήσει των μετρήσεων, απ' όπου προκύπτει η εξάλειψη της μεροληψίας που υπήρχε στο **Σχήμα 5.38**, όπως αναμενόταν. Στα **Σχήματα 5.40, 5.41, 5.42, 5.43** και **5.44** παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.4) ως συνάρτηση κάθε παραμέτρου της σχέσης. Παρατηρείται πως ενώ τα σημεία στο **Σχήμα 5.40** είναι τυχαία κατανομημένα γύρω από τη γραμμή του $Re = 0$, τα διαγράμματα του σχετικού σφάλματος συναρτήσει των επιμέρους παραμέτρων παρουσιάζουν αυξημένη μεροληψία. Οι παράμετροι με την μεγαλύτερη μεροληψία φαίνεται να είναι η γωνία κλίση του εδάφους i και το ύψος της κατασκευής L . Συνολικά, η εκτίμηση του λόγου οριζοντίων μετατοπίσεων x/x_{ff} είτε με τη σχέση (5.3) ή με τη σχέση (5.4) δεν θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη, κυρίως λόγω της ασαφούς επίδρασης της κλίσης εδάφους i .



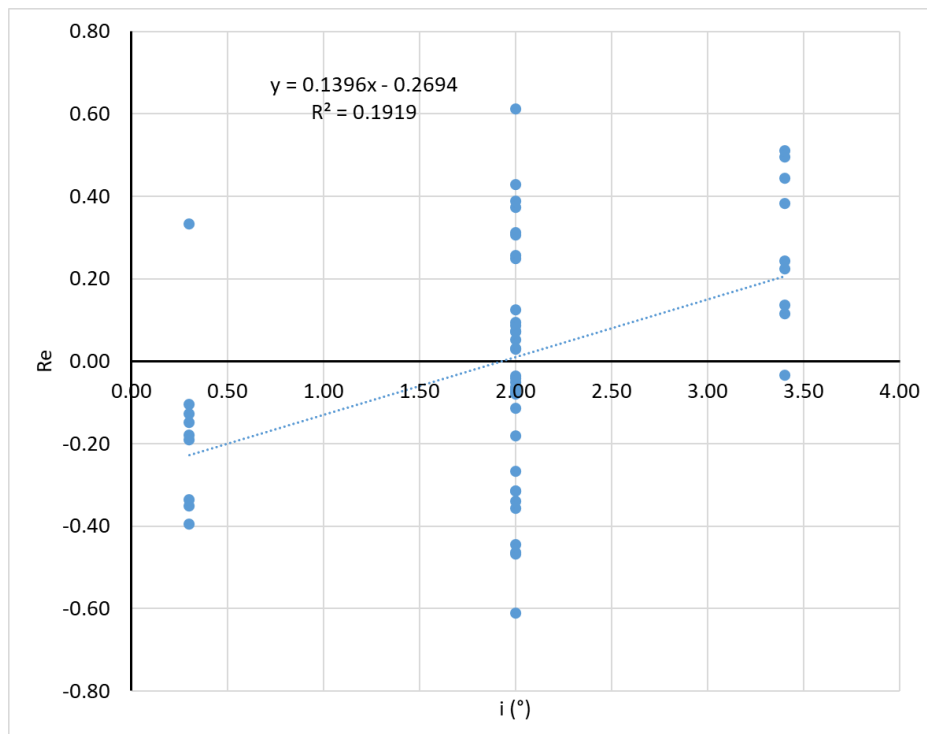
Σχήμα 5.38: Σύγκριση προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών λόγου καθίζησης x/x_{ff} βάσει της σχέσης (5.3).



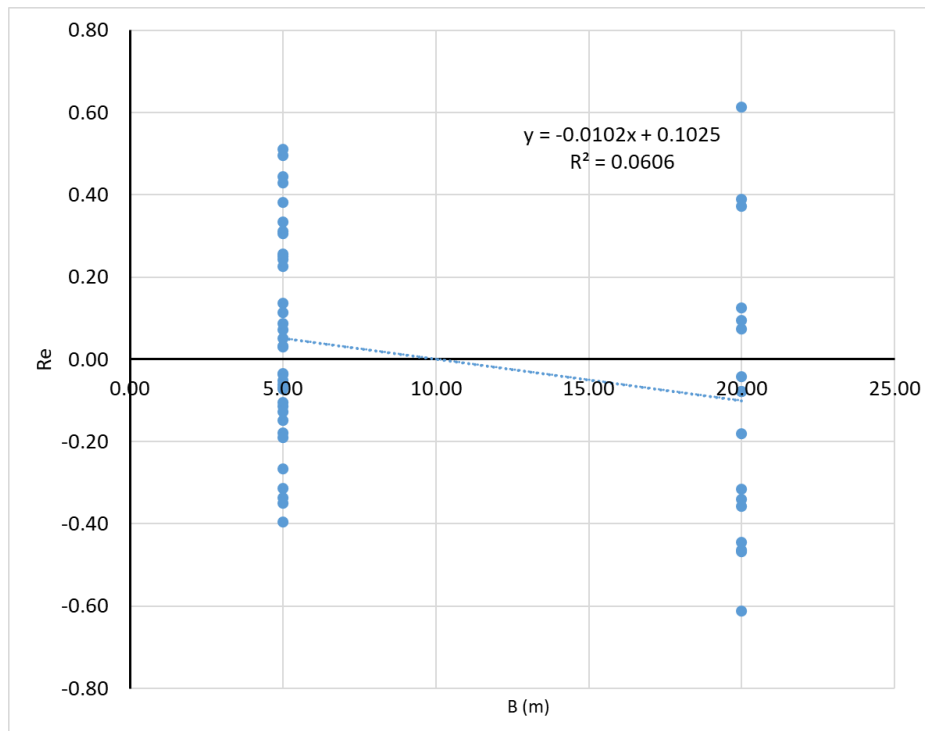
Σχήμα 5.39: Σύγκριση προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών λόγου καθίζησης x/x_{ff} βάσει της σχέσης (5.4).



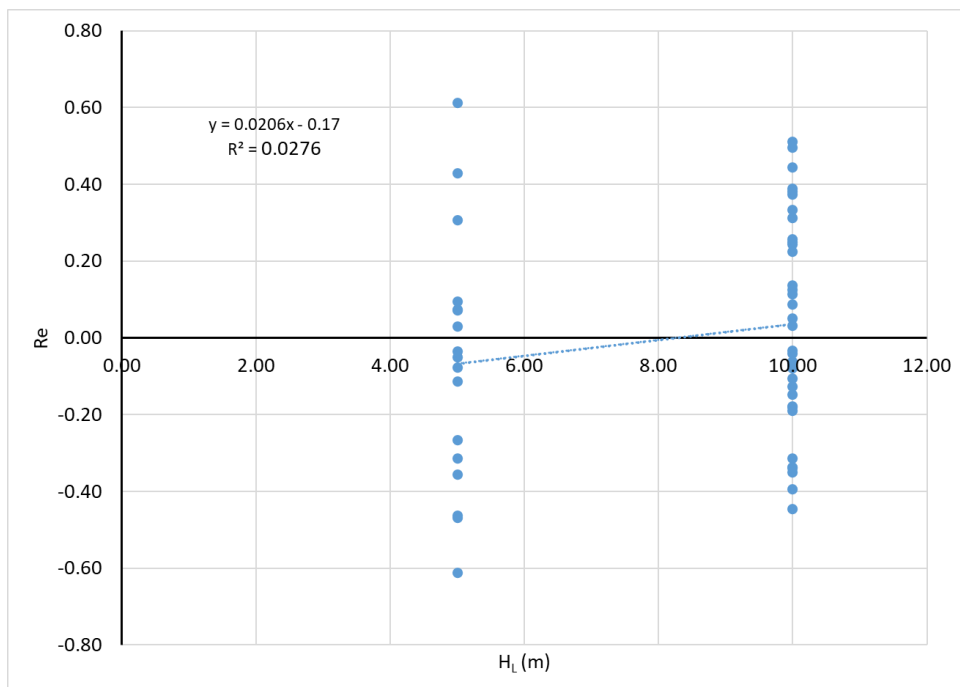
Σχήμα 5.40: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.4) συναρτήσει των μετρήσεων x/x_{ff} .



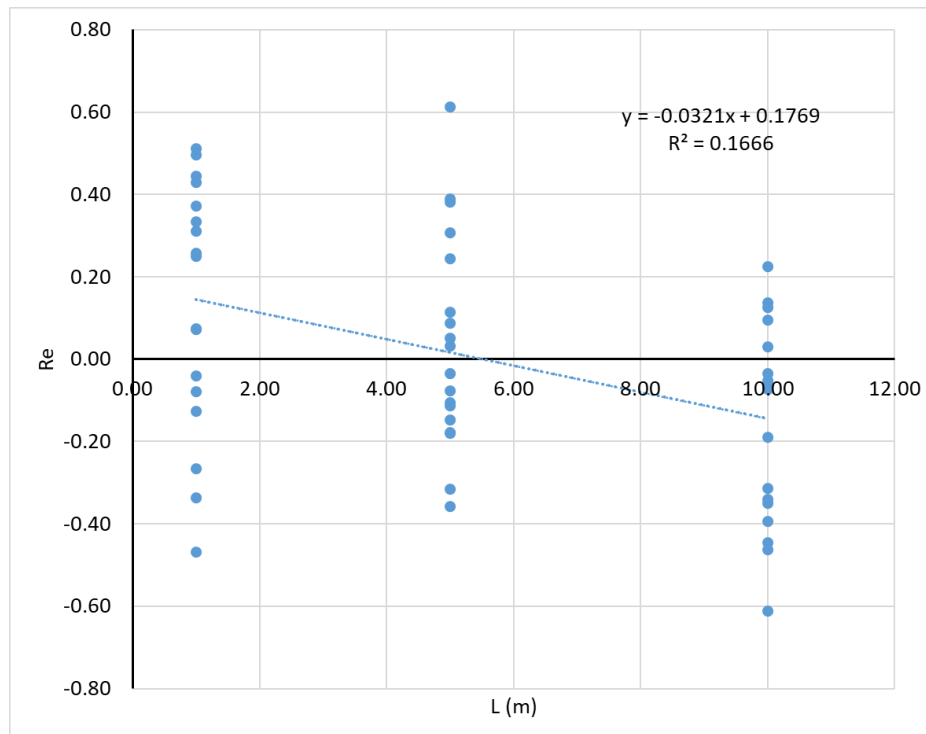
Σχήμα 5.41: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.4) για την εκτίμηση του x/x_{ff} συναρτήσει της γωνίας κλίσης του εδάφους i .



Σχήμα 5.42: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.4) για την εκτίμηση του x/x_{ff} συναρτήσει του εύρους της κατασκευής B .



Σχήμα 5.43: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.4) για την εκτίμηση του x/x_{ff} συναρτήσει του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L .



Σχήμα 5.44: Σχετικό σφάλμα Re της σχέσης (5.4) για την εκτίμηση του x/x_{ff} συναρτήσει του ύψους της κατασκευής L.

6 Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Βασικά συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην μελέτη της απόκρισης μιας (άκαμπτης) κατασκευής εδραζόμενης σε ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση ήπιας κλίσης υπό σεισμική διέγερση, καθώς και στην ανάδειξη των κρίσιμων παραμέτρων που διέπουν την απόκριση της υπό πλευρική εξάπλωση. Μετά από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα για τον εντοπισμό των βασικών παραμέτρων του προβλήματος, ακολούθησε μια παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών μέσω του λογισμικού FLAC2D (Itasca 2005). Η μελέτη έγινε για μια (έντονη) αρμονική διέγερση βάσης (που ρευστοποιεί την άμμο με σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$ σε 1-2 κύκλους) και το ενδιαφέρον εστιάστηκε στις εξής κανονικοποιημένες παραμέτρους απόκρισης της κατασκευής:

- Τον λόγο καθιζήσεων z/z_0 , όπου z η μέση καθίζηση της κατασκευής εδραζόμενης σε έδαφος ήπιας κλίσης και z_0 η ομοιόμορφη καθίζηση της ίδιας κατασκευής υπό την ίδια διέγερση αν το ίδιο έδαφος ήταν οριζόντιο.
- Τον λόγο οριζόντιων μετατοπίσεων x/x_{ff} , όπου x η οριζόντια μετακίνηση της κατασκευής προς τα κατάντη και x_{ff} η αντίστοιχη οριζόντια μετακίνηση της στρώσης σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (μακριά από την κατασκευή) υπό την ίδια διέγερση.

Με άλλα λόγια, το ενδιαφέρον εστιάζεται στη σχετική απόκριση της κατασκευής σε όρους z και x , σε σχέση με τις παραμέτρους z_0 και x_{ff} , αντίστοιχα, για τις οποίες υπάρχουν ήδη εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης στη βιβλιογραφία (π.χ., Karamitros et al. 2014 για την καθίζηση z_0 και Youd et al. 2002 για την μετατόπιση x_{ff}). Η βασική υπόθεση εργασίας είναι ότι κανονικοποίηση απαλείφει την επίδραση της διέγερσης βάσης, καθώς εκτιμάται ότι επηρεάζει συγκριτικά εξίσου τον αριθμητή και τον παρονομαστή των δύο λόγων. Επιπλέον, η χρήση των λόγων υπονοεί τη χρήση των προαναφερθέντων μεθόδων εκτίμησης των παρονομαστών με στόχο τη γενίκευση της εφαρμοσιμότητας των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Πέραν των ανωτέρω, ποιοτική παρά ποσοτική έμφαση δίνεται και στη στροφή θ της κατασκευής προς τα κατάντη της κεκλιμένης στρώσης, χωρίς κάποια κανονικοποίηση δεδομένου ότι $\theta \approx 0^\circ$ αν το ίδιο έδαφος ήταν οριζόντιο.

Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν 54 δισδιάστατες μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις που αφορούσαν την απόκριση της κατασκευής υπό πλευρική εξάπλωση, με διαφοροποίηση των:

- α) βασικών γεωτεχνικών παραμέτρων, δηλαδή της γωνίας κλίσης εδάφους $i = 0.3^\circ, 2.0^\circ$ και 3.4° και του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ ή 10 m, καθώς και των
- β) κύριων χαρακτηριστικών της (άκαμπτης) κατασκευής, δηλαδή του εύρους $B = 5$ ή 20 m, του φορτίου $q = 50, 100$ και 200 kPa και του ύψους $L = 1$ έως 10 m. Επισημαίνεται εδώ ότι η προσομοίωση της άκαμπτης κατασκευής στην εργασία είναι προσεγγιστική. Δηλαδή κατασκευή με $L = 1$ m είναι ένα αβαρές θεμέλιο που φέρει το βάρος της κατασκευής ως φορτίο q , ενώ οι κατασκευές με $L = 5$ και 10 m είναι άκαμπτοι ομοιογενείς «κύβου» με συνολικό βάρος αυτό που αντιστοιχεί στην εκάστοτε επιθυμητή τιμή φορτίου q στην επιφάνεια έδρασης. Συνεπώς, οι κατασκευές με ύψος $L = 5$ και 10 m έχουν αδρανειακή επιφάνεια, αντίθετα με εκείνη με ύψος $L = 1$ m.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν για την απόκριση μιας τυπικής (άκαμπτης) κατασκευής είναι τα ακόλουθα:

1. Μια (στενή) κατασκευή που εδράζεται σε κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση παρουσιάζει, στο τέλος της σεισμικής διέγερσης, αυξημένη μέση καθίζηση z σε σύγκριση με την ίδια κατασκευή σε οριζόντιο έδαφος z_0 , καθώς και μικρότερη οριζόντια μετακίνηση x από την αντίστοιχη του ελεύθερου πεδίου x_{ff} . Επιπλέον αναπτύσσει στροφή θ προς τα κατάντη, φαινόμενο που δεν παρατηρείται αν το ίδιο έδαφος ήταν οριζόντιο. Πιο γενικά, αν το έδαφος ήταν οριζόντιο, το πρίσμα του μηχανισμού αστοχίας της κατασκευής θα ήταν συμμετρικό, ενώ σε έδαφος υπό κλίση το πρίσμα αυτό συνενώνεται στην κατάντη πλευρά με την επιφάνεια αστοχίας στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Έτσι, ο μηχανισμός αστοχίας της κατασκευής γίνεται μη-συμμετρικός, με αποτέλεσμα τη στροφή θ προς τα κατάντη και την αυξημένη μέση καθίζηση σε σχέση με ό,τι θα είχε αν το έδαφος ήταν οριζόντιο (δηλ. $z/z_0 > 1$). Ταυτόχρονα, η τοπική αύξηση της στιβαρότητας και της αντοχής του εδάφους λόγω του φορτίου της κατασκευής ακριβώς κάτω από αυτή σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο μειώνει την οριζόντια μετακίνηση της συγκριτικά με τη μετακίνηση του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο (δηλ. $x/x_{ff} < 1$).
2. Προκύπτει ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης i του πλευρικά εξαπλούμενου εδάφους οδηγεί στην αύξηση της καθίζησης z , της οριζόντιας μετακίνησης x και της στροφής θ της (στενής) κατασκευής. Για μικρή γωνία κλίσης ($i = 0.3^\circ$), η απόκριση της κατασκευής είναι παρόμοια με αυτή για οριζόντιο έδαφος ($z \approx z_0$, $x \approx 0$, $\theta \approx 0$). Η αύξηση όλων των μεγεθών απόκρισης της κατασκευής οφείλονται στο ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης i δημιουργεί εντονότερη επιφάνεια ολίσθησης στη βάση της ρευστοποιήσιμης στρώσης (που οδηγεί σε αύξηση της x_{ff}), με αποτέλεσμα να αυξάνει τη μη-συμμετρία του πρίσματος του μηχανισμού αστοχίας της κατασκευής.
3. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η αύξηση του φορτίου q της κατασκευής οδηγεί σε σημαντική αύξηση της καθίζησης z και της στροφής θ της (στενής) κατασκευής, σε αντίθεση με την οριζόντια μετακίνηση x η οποία επηρεάζεται ελάχιστα. Τα παραπάνω οφείλονται στο ότι η αύξηση του φορτίου q οδηγεί στην αύξηση των διατμητικών τάσεων και την εμπέδωση του πρίσματος του μη-συμμετρικού μηχανισμού αστοχίας, αυξάνοντας έτσι την καθίζηση z και την στροφή θ . Αντίθετα, η δημιουργία μιας στιβαρής στήλης εδάφους κάτω από την κατασκευή παρατηρείται ακόμα και για την μικρότερη τιμή φορτίου που εξετάστηκε ($q = 50$ kPa). Οπότε η αύξηση του φορτίου q δεν επηρεάζει την οριζόντια μετακίνηση της κατασκευής x , τουλάχιστον για τα εύρη φορτίου $q = 50 - 200$ kPa που εξετάστηκαν εδώ.
4. Οι αναλύσεις για δύο διαφορετικά εύρη κατασκευής $B = 5$ και 20 m έδειξαν ότι η αύξηση του εύρους της κατασκευής οδηγεί σε σημαντική μείωση της καθίζησης z , της οριζόντιας μετακίνησης x και σε μηδενική στροφή θ της κατασκευής. Αυτό οφείλεται στο ότι σε ευρεία κατασκευή προκύπτουν μικρότερες τιμές διατμητικής παραμόρφωσης γ και πιο συμμετρικό πρίσμα μηχανισμού αστοχίας υπό την κατασκευή, παρά την κλίση του εδάφους. Πρακτικά, όταν το πλάτος της κατασκευής B είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L , η φόρτιση τείνει να προσομοιάσει 1Δ συμπίεση, αντί της τριαξονικής θλίψης (με έντονες διατμητικές παραμορφώσεις γ) που παρατηρείται σε περιπτώσεις με μικρότερο λόγο B/H_L .
5. Η προσεγγιστική διερεύνηση της επίδρασης του ύψους L της κατασκευής έδειξε ότι η αύξηση του ύψους (χωρίς να αλλάξει το συνολικό βάρος) δεν επηρεάζει σημαντικά την καθίζηση z και την οριζόντια μετακίνηση x , ενώ παρατηρείται μείωση της στροφής θ . Συγκεκριμένα, το φορτισμένο αβαρές θεμέλιο ($L = 1$ m) αναπτύσσει μεγαλύτερη οριζόντια μετακίνηση x και στροφή θ , αλλά μικρότερη καθίζηση z σε σύγκριση με τις υψηλότερες κατασκευές ($L = 5$ και 10 m) ίδιου βάρους. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο ότι οι αδρανειακές δυνάμεις των υψηλότερων κατασκευών δρουν σε αντίθεση φάσης με τη

μετακίνηση της βάσης, περιορίζοντας έτσι την οριζόντια μετακίνηση και την προς τα κατάντη στροφή τους. Αυτή η μείωση της τάσης για λικνισμό δημιουργεί την ελαφρώς μεγαλύτερη καθίζηση που παρατηρήθηκε.

6. Οι αναλύσεις για την δύο διαφορετικά πάχη της (επιφανειακής) ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L = 5$ και 10 m έδειξαν ότι η αύξηση του πάχους επιδρά αυξητικά στην καθίζηση z , την οριζόντια μετακίνηση x και την στροφή θ της κατασκευής. Η αύξηση της z οφείλεται στην αύξηση του πάχους της «συμπιεστής» στρώσης, ενώ εκείνη της x στην αύξηση του πάχους της πλευρικά εξαπλούμενης στρώσης (που αυξάνει και την τιμή της x_{ff}). Ταυτόχρονα, η μεγαλύτερη στροφή θ για μεγαλύτερο πάχος H_L συνδέεται με τη δυνατότητα ανάπτυξης βαθύτερου πρίσματος μηχανισμού αστοχίας, το οποίο λόγω ασυμμετρίας προς τα κατάντη οδηγεί και σε μεγαλύτερη στροφή της κατασκευής.

Από εκεί και πέρα, με βάση τα αποτελέσματα από όλες τις αναλύσεις για τις σημαντικές παραμέτρους απόκρισης της κατασκευής, προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- **Λόγος καθιζήσεων z/z_0 :** Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής q και της γωνίας κλίσης εδάφους i οδηγούν σε αύξηση του λόγου z/z_0 , ενώ το ύψος της κατασκευής L δεν παρουσιάζει συστηματική επίδραση. Αντίθετα, η αύξηση του πλάτους της κατασκευής B και του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L μειώνει τον λόγο z/z_0 . Στις αναλύσεις που έγιναν στο πλαίσιο της εργασίας, ο λόγος z/z_0 κυμαίνεται μεταξύ 0.76 και 1.43, με το 54% των περιπτώσεων να υπερβαίνει το 1.0 και το 46% να βρίσκεται κάτω από αυτό το όριο.
- **Λόγος οριζόντιων μετακινήσεων x/x_{ff} :** Η αύξηση της γωνίας κλίσης εδάφους i αυξάνει τον λόγο x/x_{ff} για τιμές $i < 2^\circ$, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας i η επίδραση δεν είναι συστηματική. Η αύξηση του ύψους της κατασκευής L και, σε μικρότερο βαθμό, η αύξηση του λόγου πλάτους κατασκευής προς πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης B/H_L έχουν σταθερά μειωτική επίδραση στον λόγο x/x_{ff} . Αντίθετα, το φορτίο κατασκευής q δεν φαίνεται να έχει συστηματική επίδραση. Στις αναλύσεις που έγιναν στο πλαίσιο της εργασίας, το εύρος του λόγου x/x_{ff} είναι μεγάλο (0.23-1.41), αλλά σε ποσοστό 87% των περιπτώσεων προκύπτουν τιμές λόγου $x/x_{ff} < 1.0$.
- **Γωνία στροφής θ (προς τα κατάντη):** Η αύξηση του φορτίου q και του πάχους H_L οδηγούν σε αύξηση της στροφής, ενώ το πλάτος B και το ύψος L επιδρούν μειωτικά. Η αύξηση του λόγου B/H_L έχει μειωτική επίδραση στη στροφή, φτάνοντας ακόμη και στον μηδενισμό της για τιμές $B/H_L \geq 1.0$ (καθώς $\theta \approx 0$ για πλάτος $B = 20$ m σε πρακτικά όλες τις περιπτώσεις). Στις αναλύσεις που έγιναν στο πλαίσιο της εργασίας, το συνολικό εύρος της στροφής κυμαίνεται από 0° έως 3° , και στο 82% των περιπτώσεων η στροφή είναι μικρότερη από την γωνία κλίσης i του εδάφους. Προφανώς, τα προαναφερθέντα εύρος και ποσοστό εξαρτώνται από τη διέγερση βάσης, οπότε δεν μπορούν να γενικευθούν.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία διερεύνησε την απόκριση των κατασκευών οι οποίες εδράζονται σε ήπια κεκλιμένη ρευστοποιήσιμη στρώση υπό σεισμική διέγερση και στόχευσε στην ανάδειξη των σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν το εν λόγω φαινόμενο. Για την περαιτέρω εμβάθυνση και ακριβέστερη προσέγγιση του φαινομένου παρακάτω διατυπώνονται οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

1. Πάρα το ικανοποιητικό πλήθος αναλύσεων που παρουσιάζονται εδώ, υπάρχει ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης ορισμένων παραμέτρων για τις οποίες ο αριθμός των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν δεν θεωρείται επαρκής, όπως το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L (= 5 και 10 m) και το εύρος B (= 5 και 20 m) της κατασκευής. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους (φορτίο κατασκευής q , γωνία κλίσης εδάφους i και ύψος κατασκευής L) η μελέτη της απόκρισης για τρεις διακριτές τιμές θεωρείται ικανοποιητική.
2. Στην παρούσα εργασία οι κατασκευές προσομοιώνονται απλουστευτικά ως άκαμπτα στερεά με κατανομημένη μάζα, μεγάλης στιβαρότητας και με μηδενική ιδιοπερίοδο ταλάντωσης, ή ως αβαρή φορτισμένα θεμέλια. Θα ήταν πιο ρεαλιστική η προσομοίωση των κατασκευών ως μονοβάθμιους ταλαντωτές πάνω σε θεμέλια, και η επανάληψη των σχετικών αναλύσεων.
3. Εδώ, οι κατασκευές εδράζονται απευθείας πάνω σε ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου (διαφορετικού πάχους). Θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η διερεύνηση της απόκρισης των κατασκευών αν αυτές εδράζονταν σε μια επιφανειακή αργιλική κρούστα (π.χ. πάχους 2 m) με υποκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση. Τέτοιες αναλύσεις θα επέτρεπαν την εξέταση του κατά πόσο η επιφανειακή αργιλική στρώση μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά μειώνοντας τις καθιζήσεις, οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές των κατασκευών.
4. Στην εργασία αυτή, όλες οι αναλύσεις είχαν ως διέγερση βάσης μια οριζόντια αρμονική διέγερση με αριθμό σημαντικών κύκλων $N = 10$, περίοδο $T = 0.35$ s, και σταθερή μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.2$ g. Προτείνεται η εκτέλεση επιπρόσθετων αναλύσεων με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο, ένταση και ίσως αριθμό κύκλων, και, πιο σημαντικά, η χρήση καταγραφών από πραγματικά σεισμικά γεγονότα ως διεγέρσεις, ώστε να μελετηθεί η απόκριση των κατασκευών υπό ρεαλιστικότερες συνθήκες διέγερσης.
5. Στην παρούσα εργασία η ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση προσομοιώθηκε ως μια λεπτή άμμος (ονόματι Nevada από τη βιβλιογραφία) με σχετική πυκνότητα $D_r = 45$ % και συντελεστή διαπερατότητας $k = 6.5 \times 10^{-5}$ m/s. Προτείνεται η διερεύνηση της επίδρασης της σχετικής πυκνότητας (και του σχετιζόμενου) συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους στην απόκριση των κατασκευών υπό πλευρική εξάπλωση.

Βιβλιογραφία

Abdoun, T. H. (1998). “Modeling of seismically induced lateral spreading of multilayered soil and its effect on pile foundations”, PhD Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.

Andrianopoulos, K. I., Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2010). “Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostuctures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 895–911. ISSN 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.04.001.

Bartlett, S. F., and Youd, T. L. (1992). “Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spread”, Tech. Rep. No. NCEER-92-0021, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 114.

Bartlett, S. F., and Youd, T. L. (1995). “Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread”, *J. Geotech. Eng.*, 121(4), 316–329. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:4(316)

Bazaios, K. N., Papadimitriou, A. G., Bouckovalas, G. D., and Tsiapas, Y. Z. (2023). “Effect of structural inertia on liquefaction-induced settlements of shallow foundations”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107546. ISSN 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107546.

Baziar, M. H., and Ghorbani, A. (2005). “Evaluation of lateral spreading using artificial neural networks”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25, 1–9. DOI: 10.1016/j.soildyn.2004.09.001

Bray, J. D., and Dashti, S. (2010). “Liquefaction-Induced Movements of Buildings with Shallow Foundations”, In: *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 4. DOI: scholarsmine.mst.edu/icrageesd/05icrageesd/session12/4.

Chen, Z., Chen, Y., Zhang, Y., Liu, X., Xiao, P., and Samui, P. (2023). “Assessment of liquefaction-induced lateral spread using soft computing approaches”, *Gondwana Research*, 123, 265–279. ISSN 1342-937X. DOI: 10.1016/j.gr.2022.08.006.

Chu, B., Hsu, S., and Chang, Y. (2004). “Ground behavior and liquefaction analyses in central Taiwan-Wufeng”, *Engineering Geology*, 71(1–2), 119–139. DOI: 10.1016/s0013-7952(03)00129-7.

Forcellini, D. (2020). “Soil-structure interaction analyses of shallow-founded structures on a potential-liquefiable soil deposit”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106108. ISSN 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106108.

Ghasemi-Fare, O., and Pak, A. (2016). “Numerical investigation of the effects of geometric and seismic parameters on liquefaction-induced lateral spreading”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 233–247. ISSN 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.08.014.

Hamada, M. (1999). “Similitude law for liquefied-ground flow”, In: Proceedings of the 7th US–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, 191–205.

Hamada, M., Towhata, I., Yasuda, S., and Isoyama, R. (1987). “Study on permanent ground displacement induced by seismic liquefaction”, *Computers and Geotechnics*, 4(4), 197–220. ISSN 0266-352X. DOI: 10.1016/0266-352X(87)90001-2.

Ishihara, K. (1985). “Stability of natural deposits during earthquakes”, In: Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), Vol. 1, 321–376.

Ishii, Y., and Tokimatsu, K. (1988). “Simplified procedures for the evaluation of settlements of structures during earthquakes”, In: Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. 3, 95–100.

Jafarian, Y., and Nasri, E. (2016). “Evaluation of Uncertainties in the Available Empirical Models and Probabilistic Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spreading”, *Amirkabir Journal of Science & Research Civil and Environmental Engineering*, 48(3), 275–290. DOI: 10.22060/ceej.2016.674.

Javadi, A., Rezaia, M., and Mousavi Nezhad, M. (2006). “Evaluation of liquefaction induced lateral displacements using genetic programming”, *Computers and Geotechnics*, 33, 222–233. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.05.001

Kanibir, A. (2003). “Investigation of the Lateral Spreading at Sapanca and Suggestion of Empirical Relationships for Predicting Lateral Spreading”, Turkey: Department of Geological Engineering, Hacettepe University.

Karamitros, D. K. (2010). “Development of a Numerical Algorithm for the Dynamic Elastoplastic Analysis of Geotechnical Structures in Two and Three Dimensions”, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, National Technical University of Athens (NTUA), Athens.

Liu, H. (1995). “An empirical formula for evaluation of buildings settlements due to Earthquake liquefaction”, In: Proceedings of the 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 1, 289–293.

Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2002). “Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(3), 191–204. ISSN 0267-7261. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00009-X.

Pourabbasi, S., and Asgari, A. (2021). “Investigation of the Effective Parameters on Settlement and Lateral Spreading of Shallow Foundations on Sloping Liquefiable Soil Layers”, *Amirkabir Journal of Science & Research Civil and Environmental Engineering*. DOI: 10.22060/ceej.2021.19292.7159.

Rathje, E. M., and Durante, M. G. (2020, September). “On the use of machine learning techniques to predict lateral spreading displacement in New Zealand”, In: Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE), Sendai, Japan, September 13–18.

Sancio, R., Bray, J. D., Durgunoglu, T., and Onalp, A. (2004). “Performance of buildings over liquefiable ground in Adapazari, Turkey”, In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 935.

Shahien, M. M. (1998). “Settlement of Structures on Granular Soils Subjected to Static and Earthquake Loads”, PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Sharp, K. M., Dobry, R., and Abdoun, T. (2003). “Liquefaction centrifuge modelling of sands of different permeability”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1083–1091.

Sharp, M. K. (1999). “Development of centrifuge based prediction charts for liquefaction and lateral spreading from cone penetration testing”, PhD Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute.

Taboada, V. (1995). “Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading using a laminar box”, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute.

Taboada, V. M., and Dobry, R. (1998). “Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading in sand”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(12), 1195–1206.

Tokimatsu, K., Hino, K., Suzuki, H., Ohno, K., Tamura, S., and Suzuki, Y. (2019). “Liquefaction-induced settlement and tilting of buildings with shallow foundations based on field and laboratory observation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 268–279. ISSN 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.04.054.

Tokimatsu, K., Kojima, J., Kuwayama, S., Abe, A., and Midorikawa, S. (1994). “Liquefaction-induced damage to buildings in the 1990 Luzon Earthquake”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2), 290–307. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:2(290)

Valsamis, A. I., Bouckovalas, G. D., and Papadimitriou, A. G. (2010). “Parametric investigation of lateral spreading of gently sloping liquefied ground”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(6), 490–508. ISSN 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.01.005.

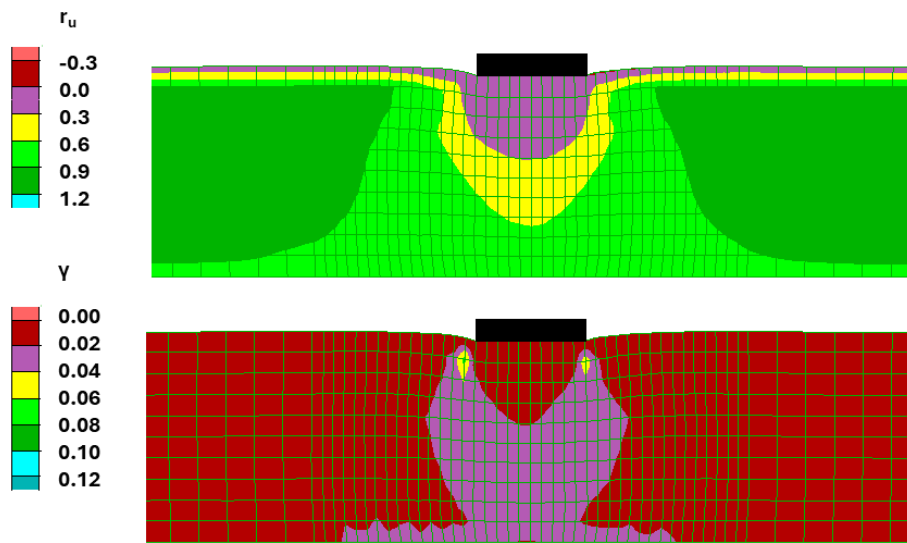
Wang, J., and Rahman, M. (1999). “A neural network model for liquefaction-induced horizontal ground displacement”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(8), 555–568. DOI: 10.1016/s0267-7261(99)00027-5.

Yasuda, S., Towhata, I., Ishii, I., Sato, S., & Uchimura, T. (2013). “Liquefaction-induced damage to structures during the 2011 Great East Japan Earthquake”, *Journal of JSCE*, 1(1), 181–193. DOI: 10.2208/journalofjsce.1.1_181

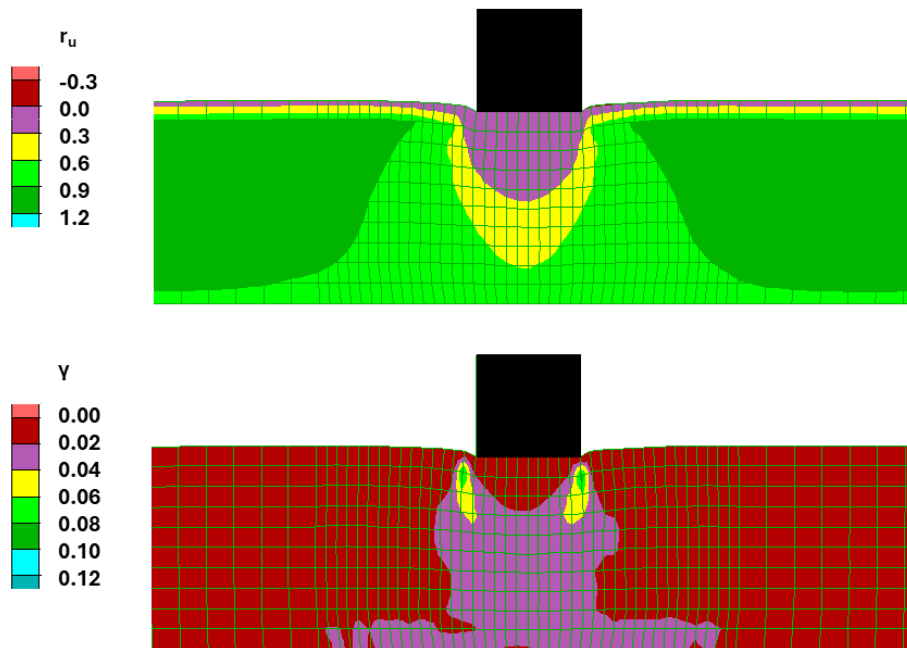
Yoshimi, Y., and Tokimatsu, K. (1977). “Settlement of Buildings on Saturated Sand During Earthquakes”, *Soils and Foundations*, 17(1), 23–38. ISSN 0038-0806. DOI: 10.3208/sandf1972.17.23.

Youd, T., Hansen, C., and Bartlett, S. (2002). “Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, 1007. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:12(1007)

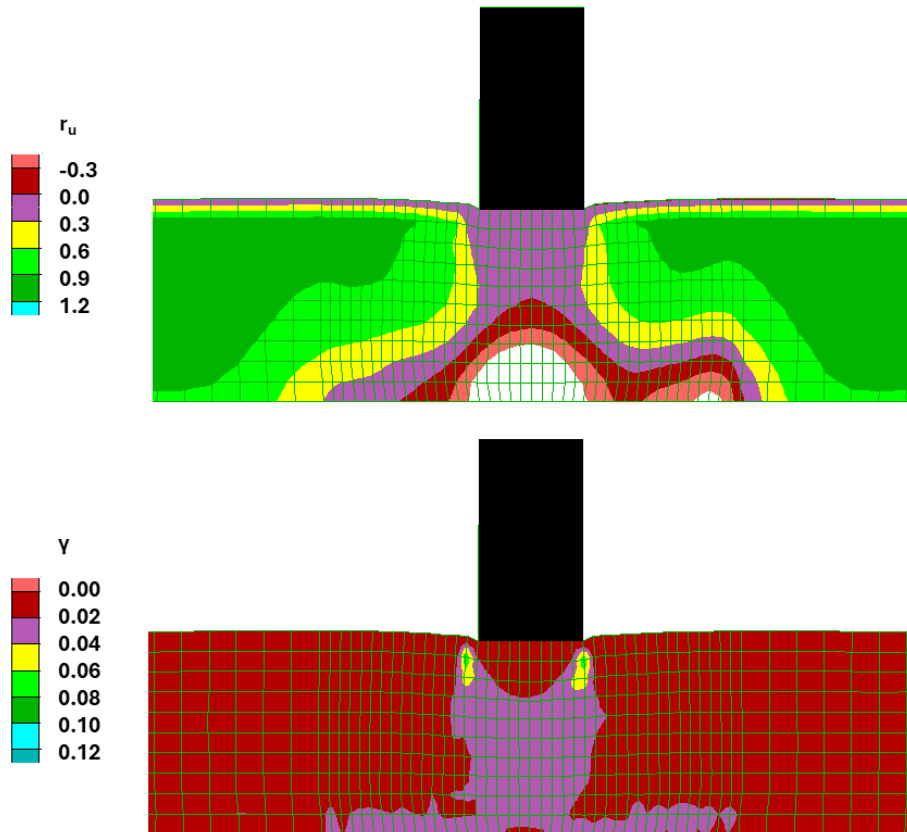
Παράρτημα Α: Λεπτομερή αποτελέσματα αναλύσεων



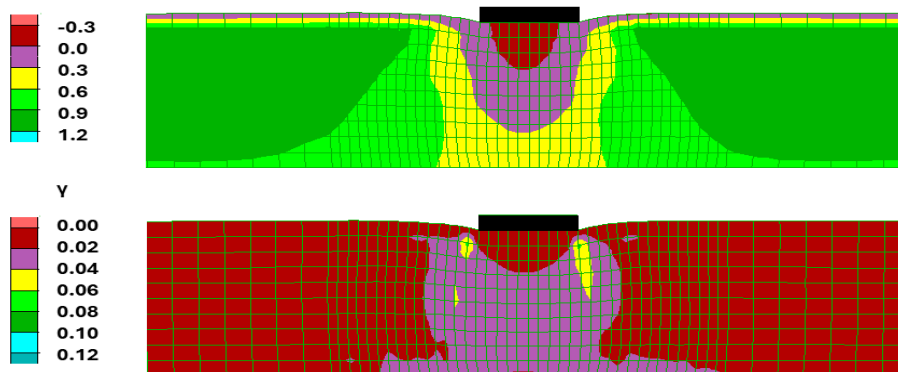
Σχήμα Α. 1: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



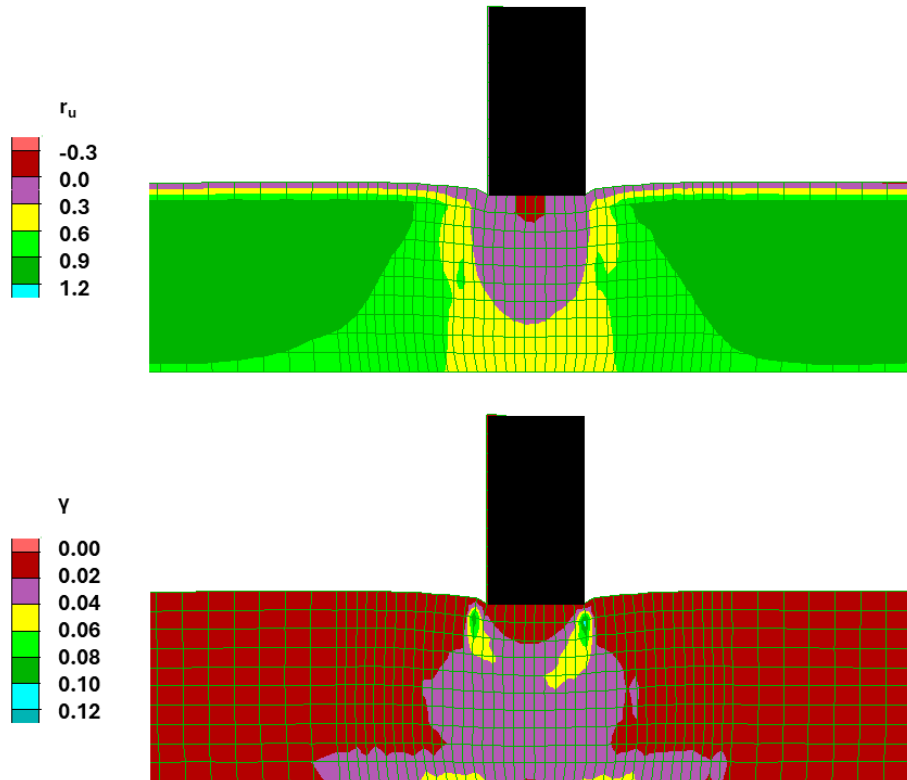
Σχήμα Α. 2: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



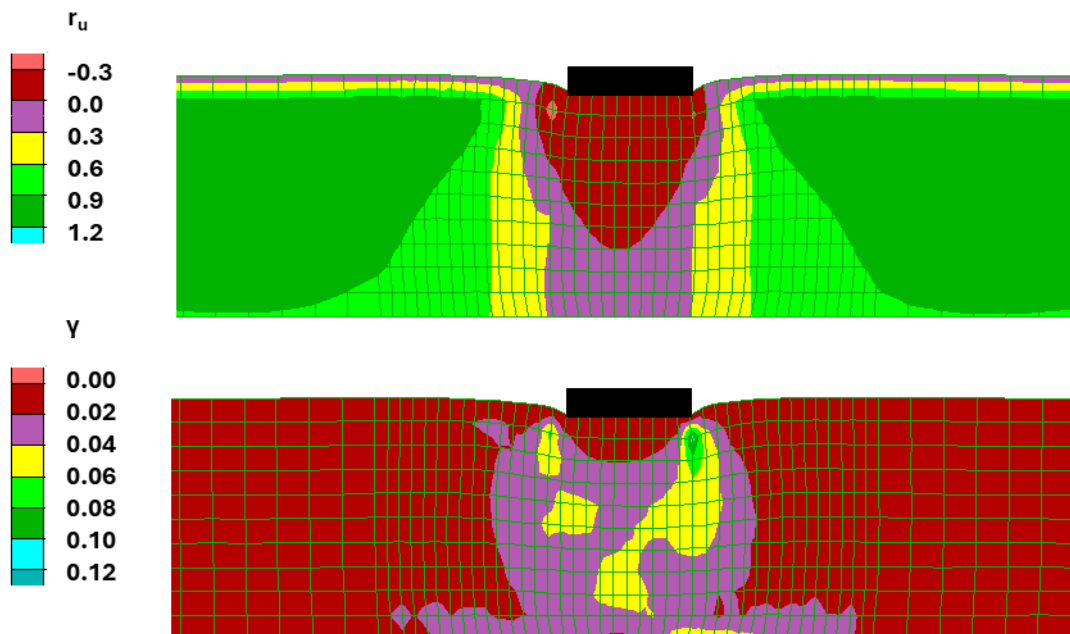
Σχήμα Α. 3: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



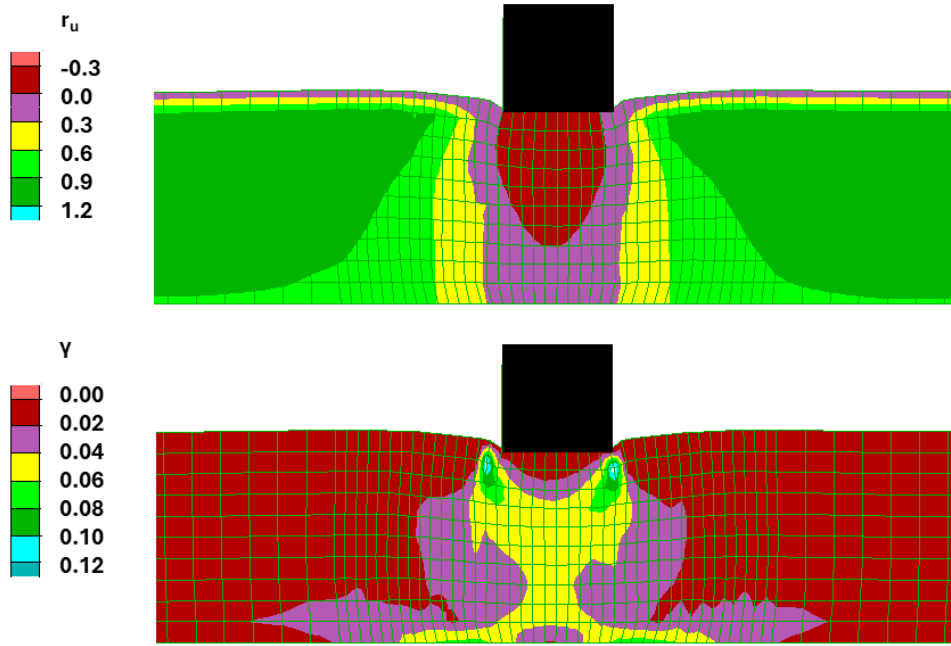
Σχήμα Α. 4: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



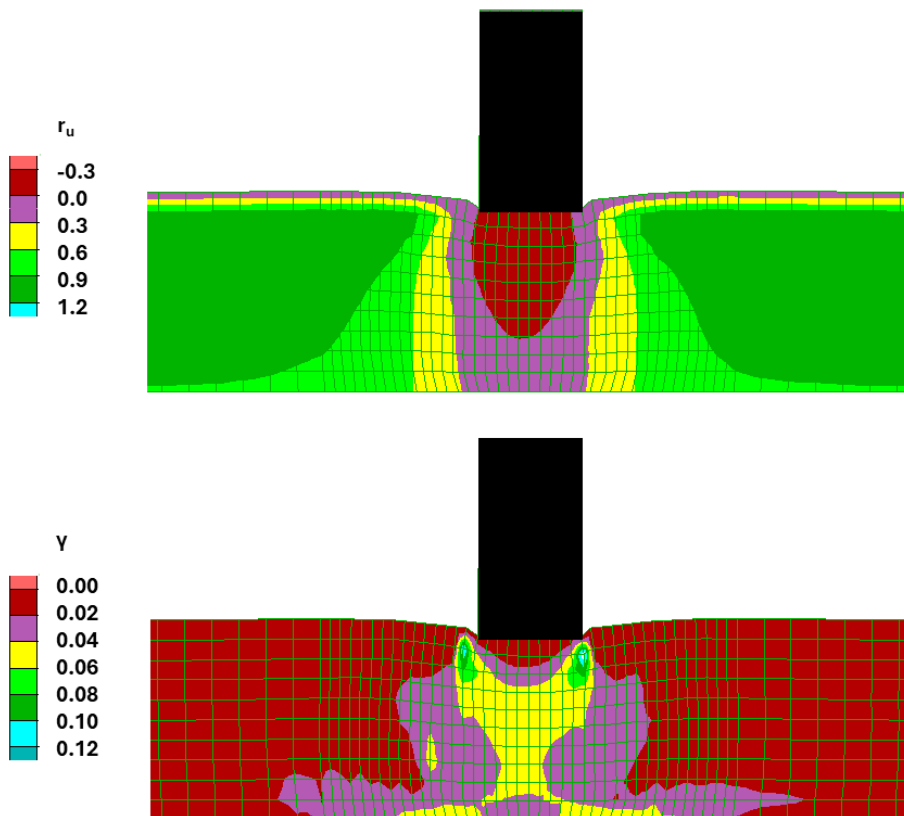
Σχήμα Α. 5: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



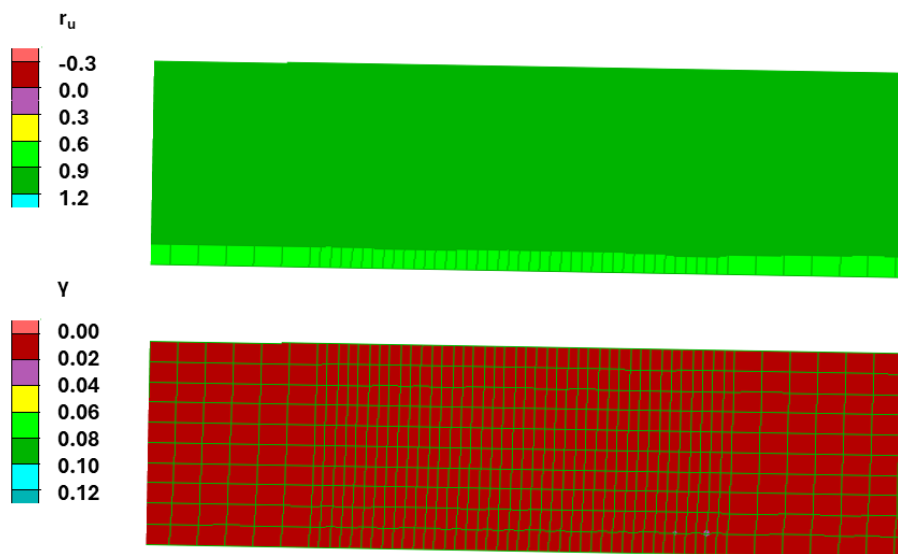
Σχήμα Α. 6: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



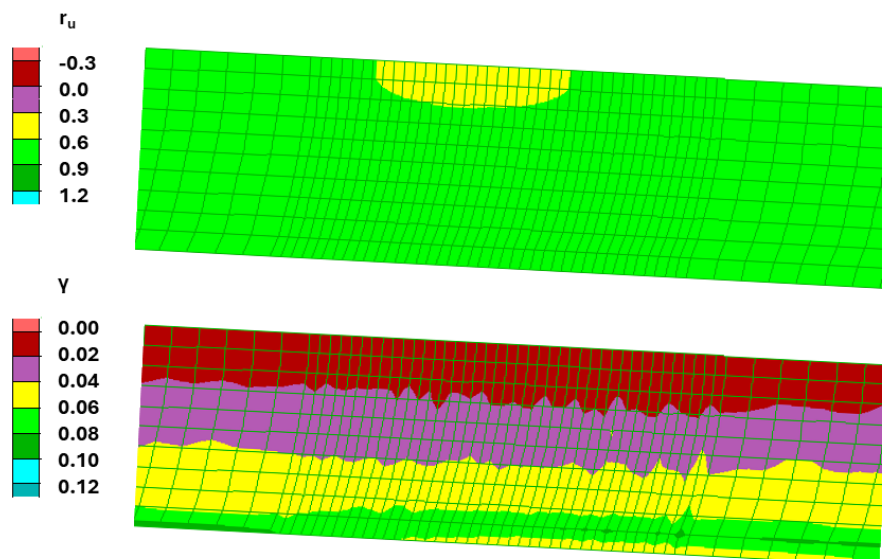
Σχήμα Α. 7: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



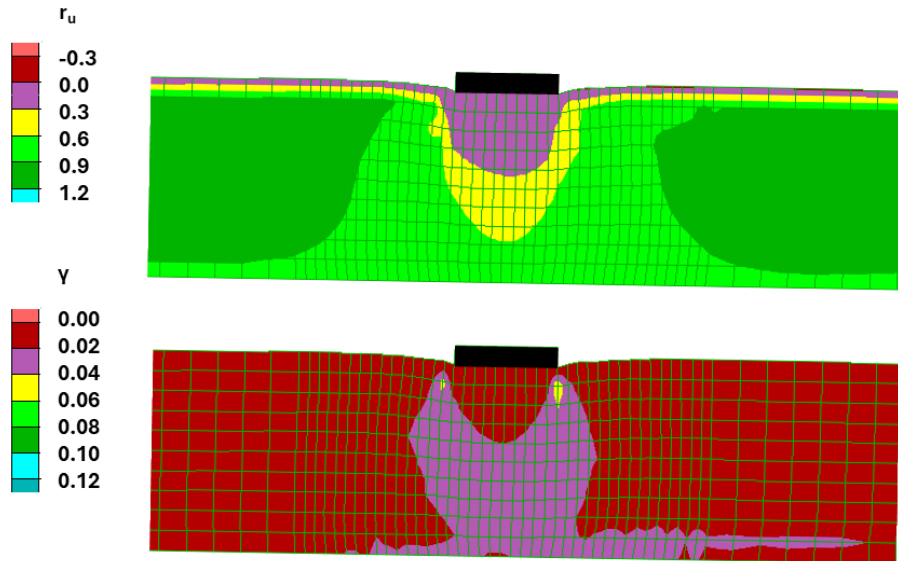
Σχήμα Α. 8: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



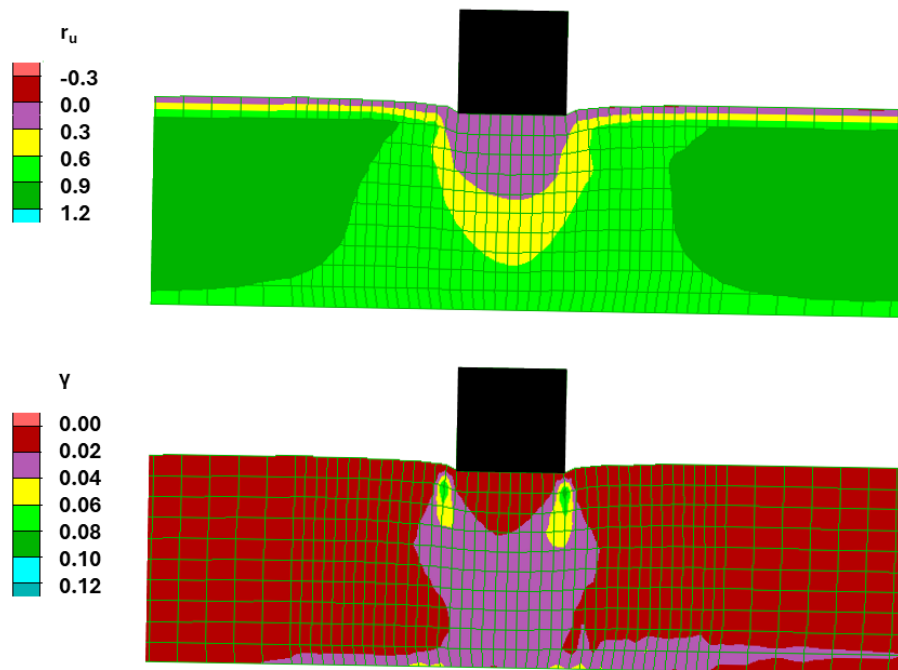
Σχήμα Α. 9: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m υπό γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



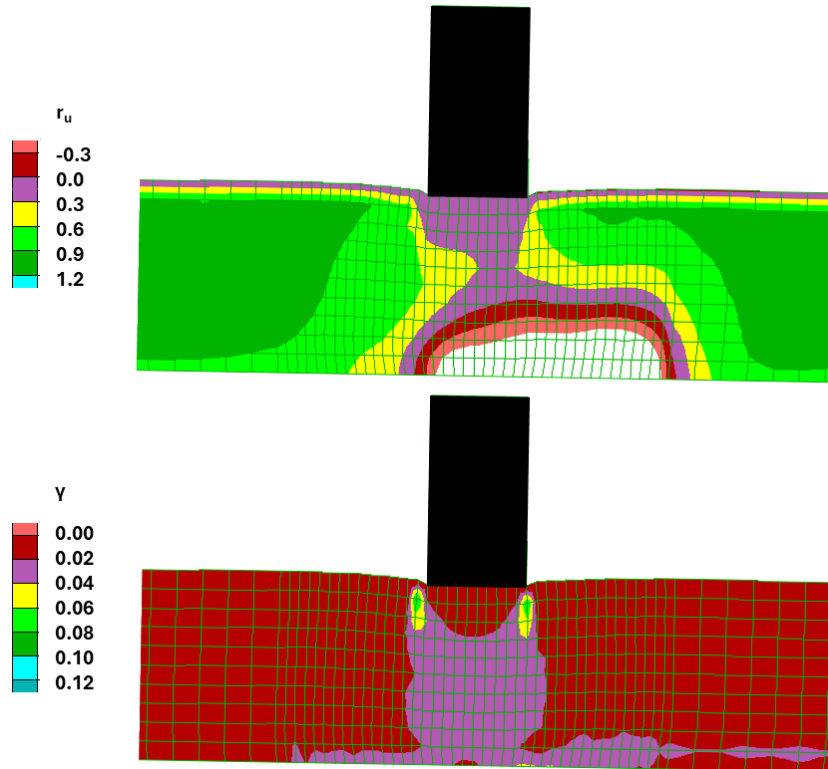
Σχήμα Α. 10: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m υπό γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



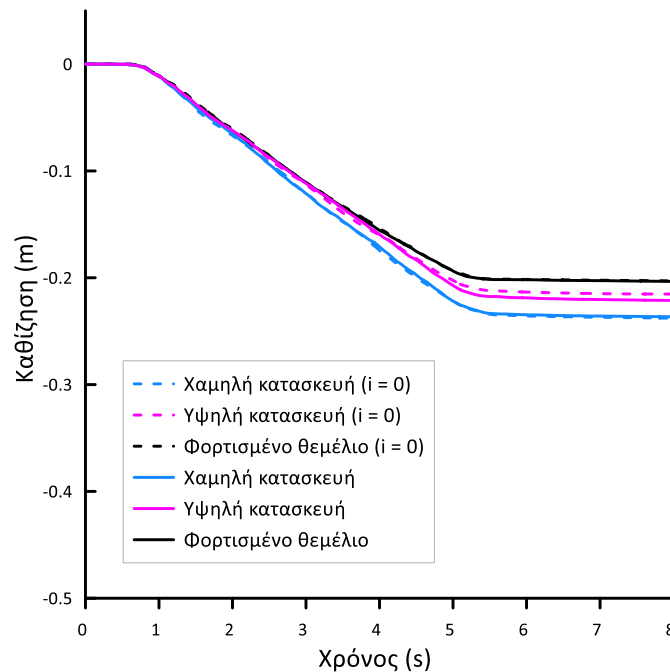
Σχήμα Α. 11: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



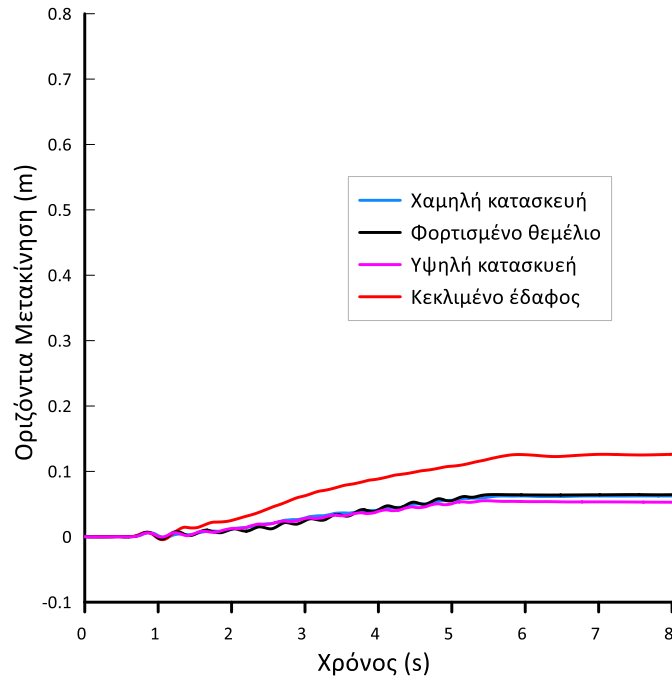
Σχήμα Α. 12: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



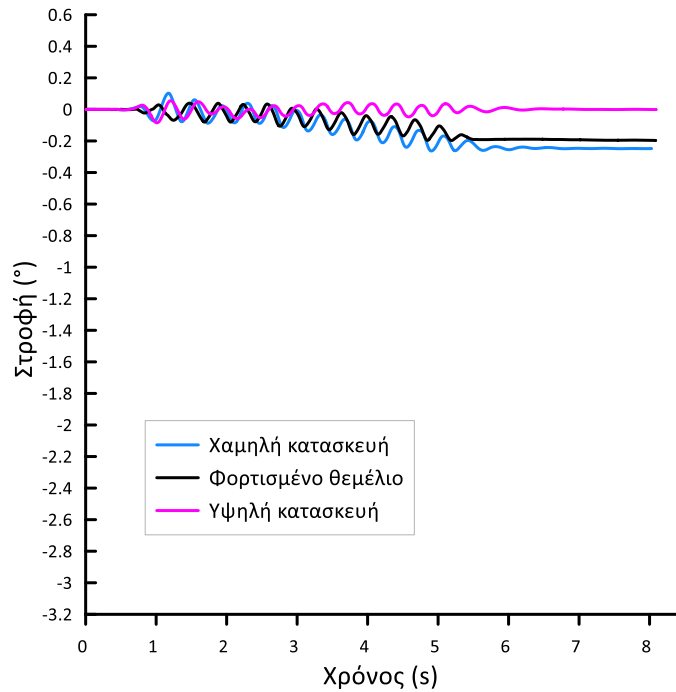
Σχήμα Α. 13: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



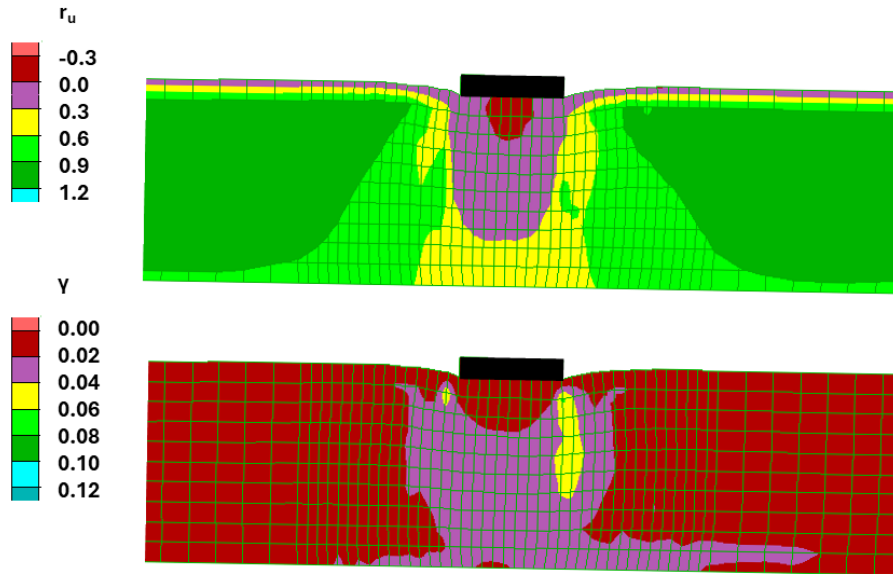
Σχήμα Α. 14: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



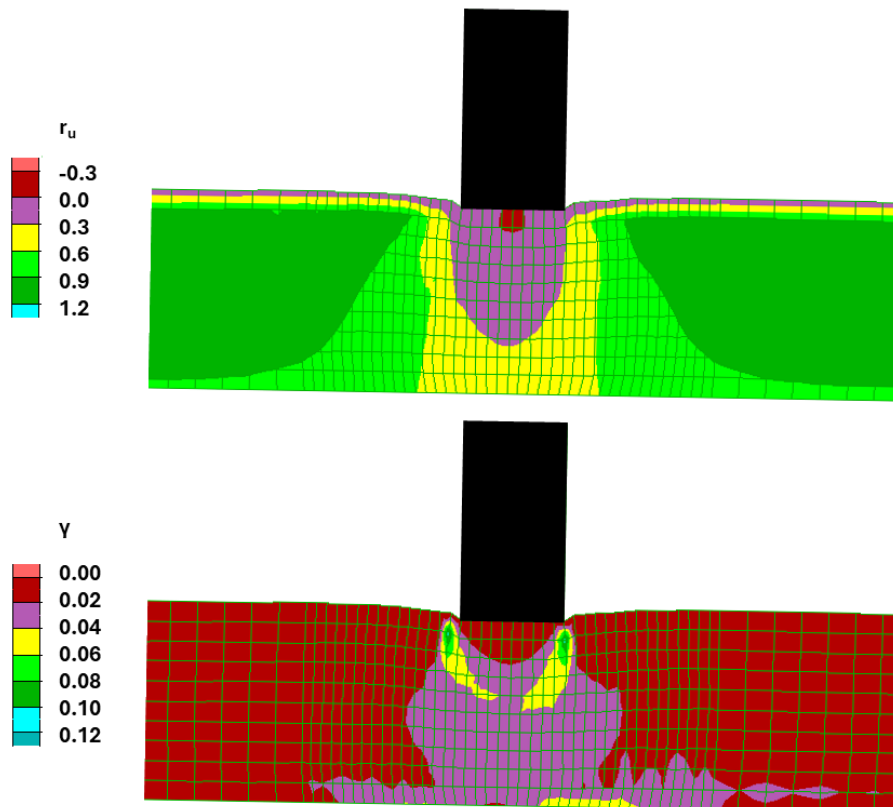
Σχήμα Α. 15: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



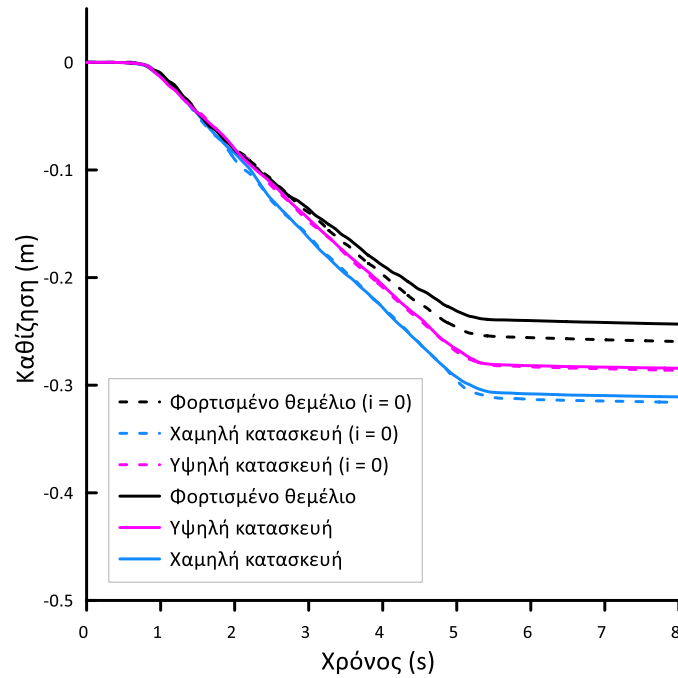
Σχήμα Α. 16: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



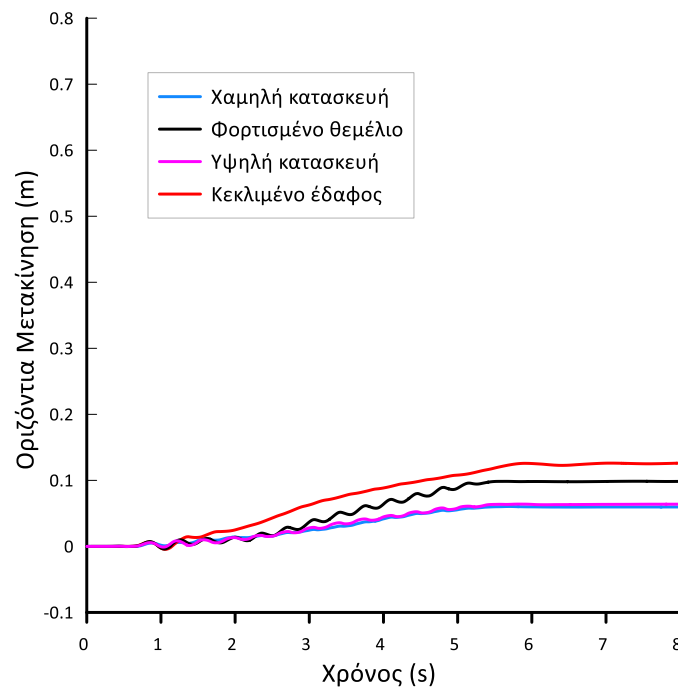
Σχήμα Α. 17: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



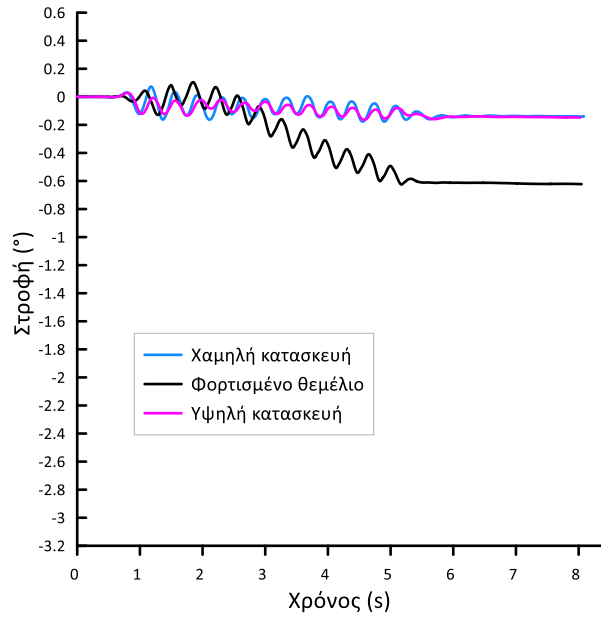
Σχήμα Α. 18: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



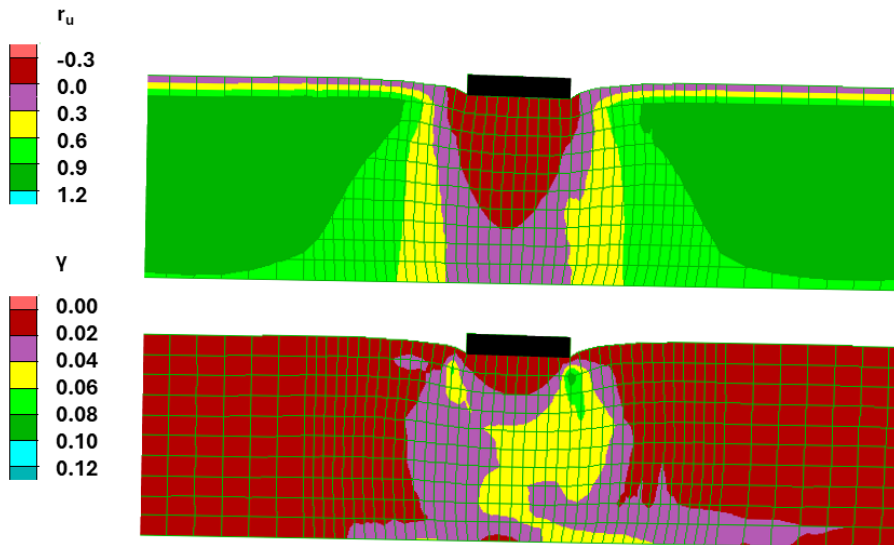
Σχήμα Α. 19: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



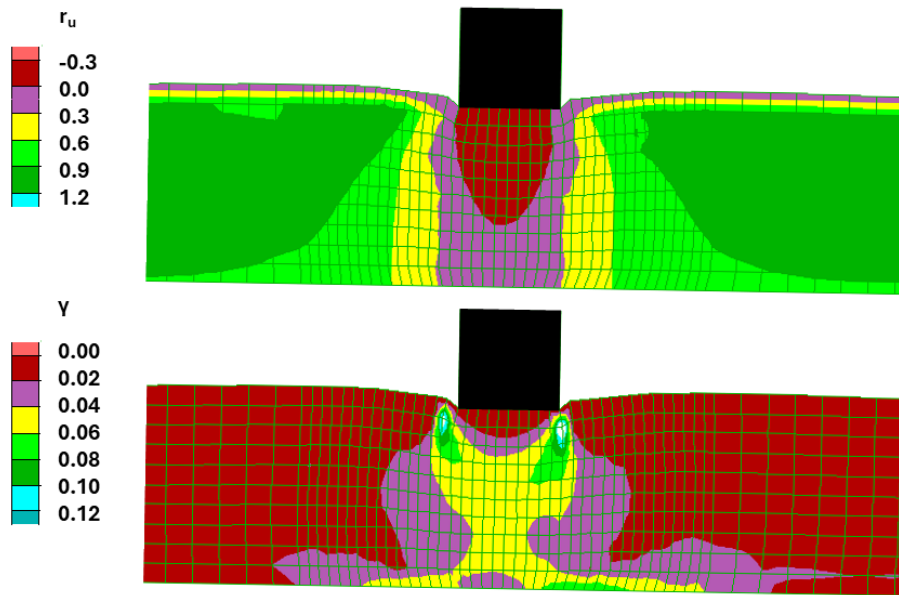
Σχήμα Α. 20: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



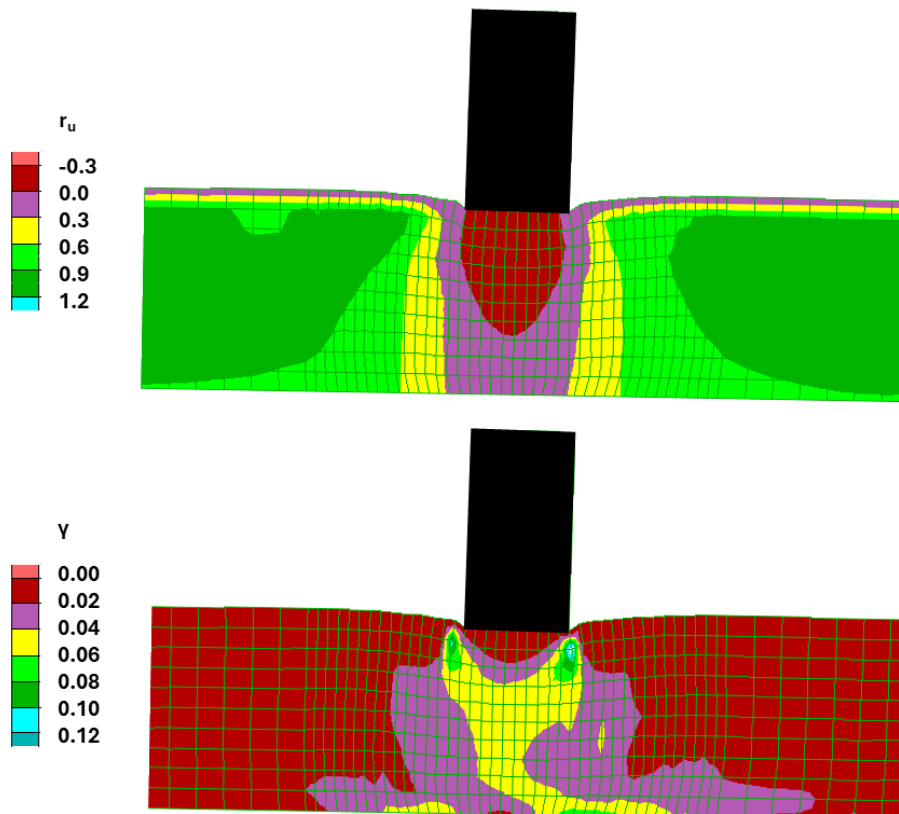
Σχήμα Α. 21: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



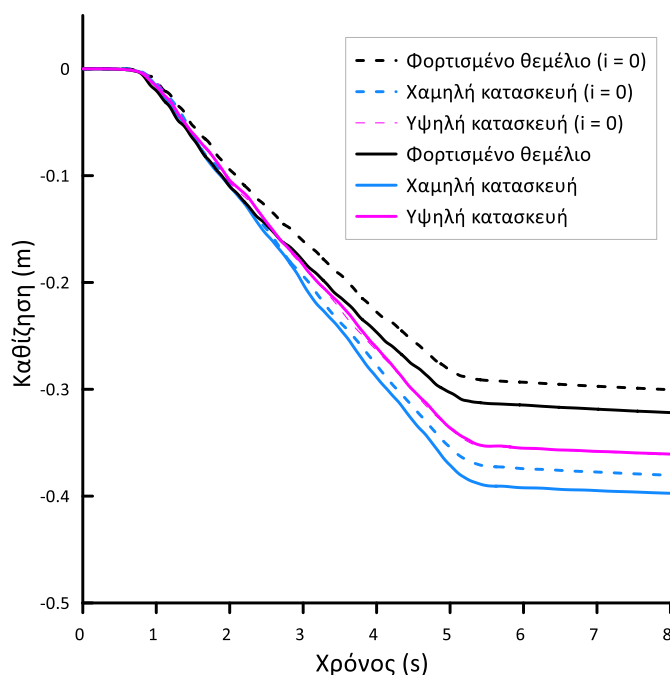
Σχήμα Α. 22: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



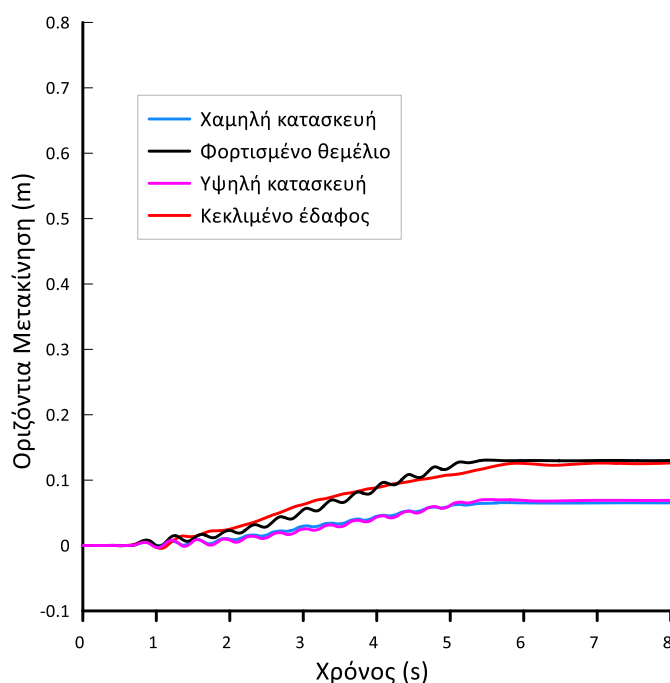
Σχήμα Α. 23: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



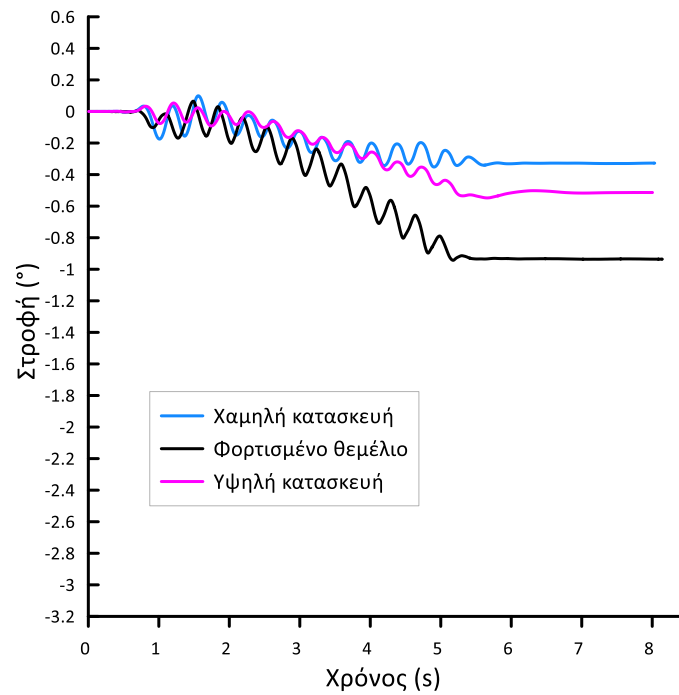
Σχήμα Α. 24: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



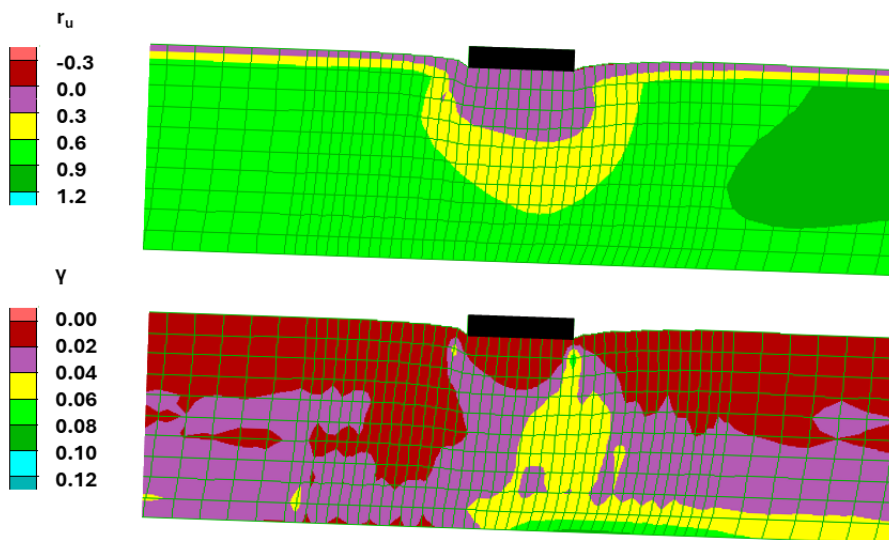
Σχήμα Α. 25: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



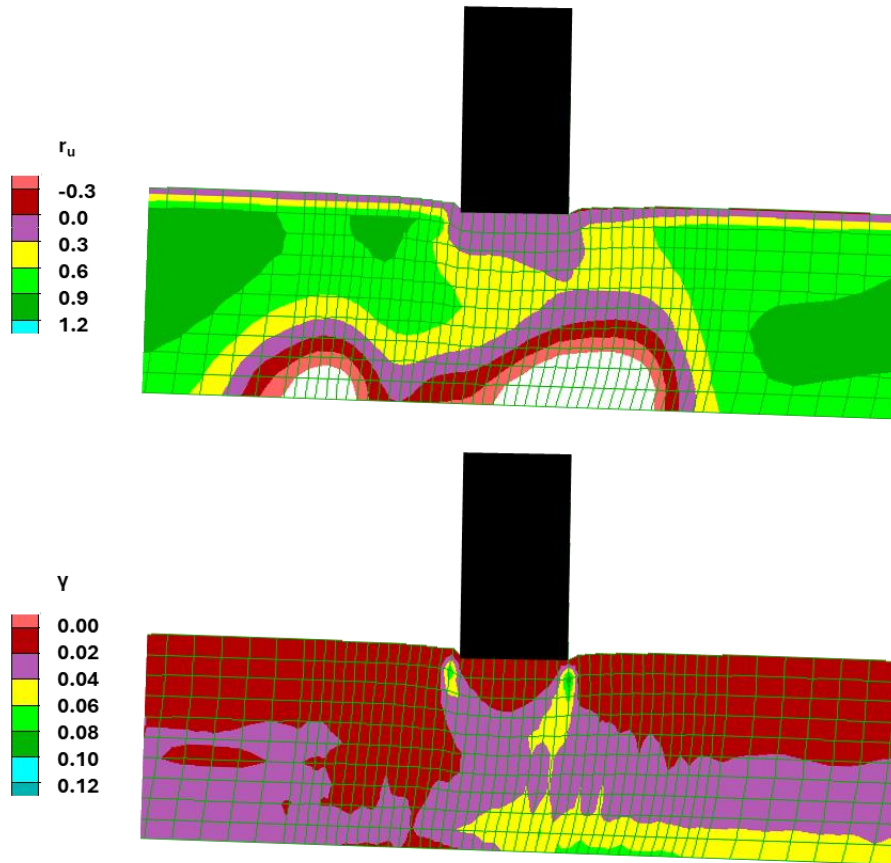
Σχήμα Α. 26: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



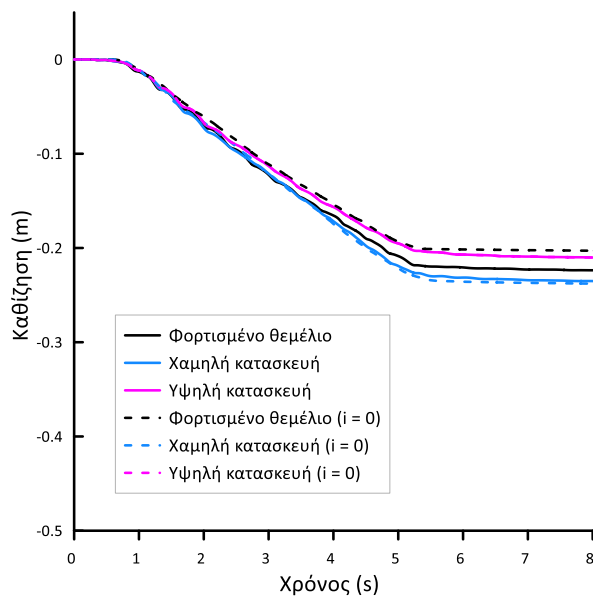
Σχήμα Α. 27: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 0.3^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



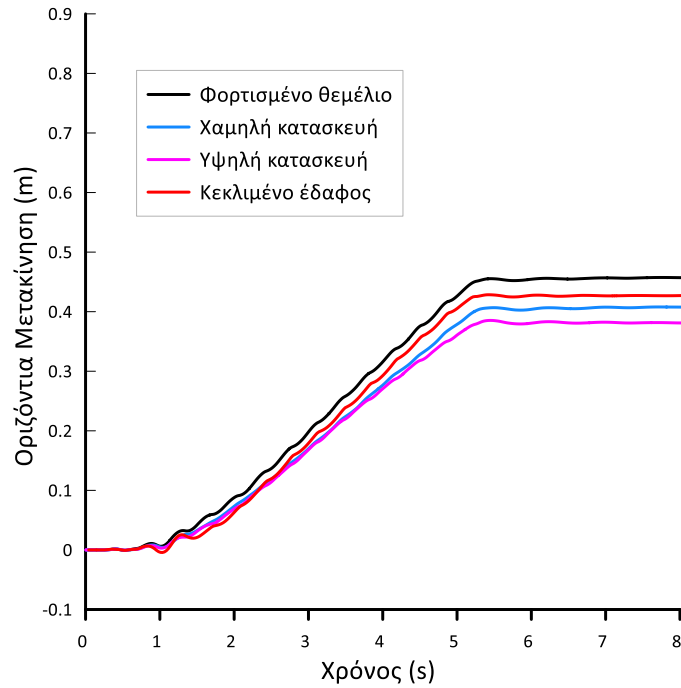
Σχήμα Α. 28: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



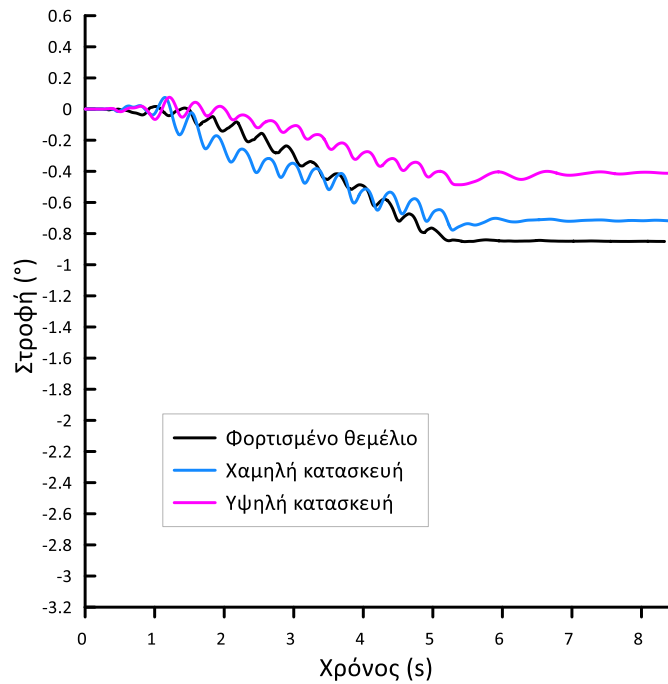
Σχήμα Α. 29: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



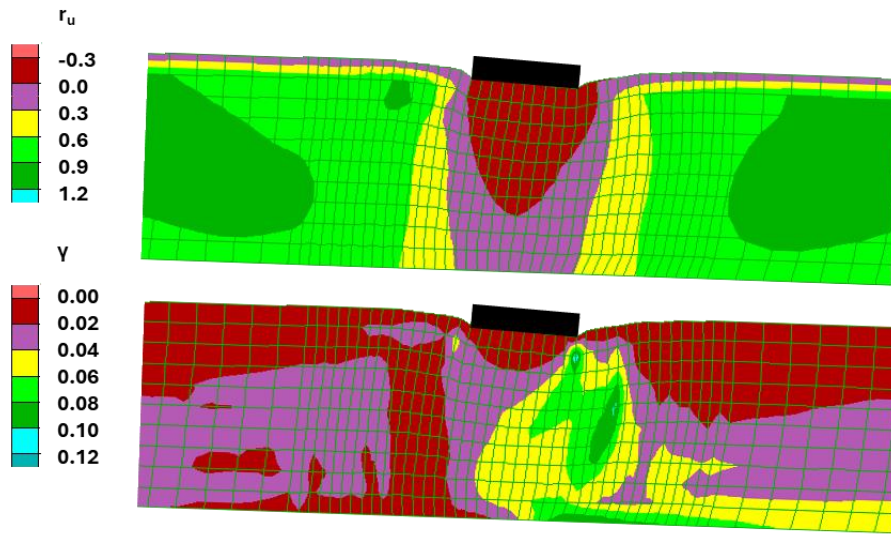
Σχήμα Α. 30: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



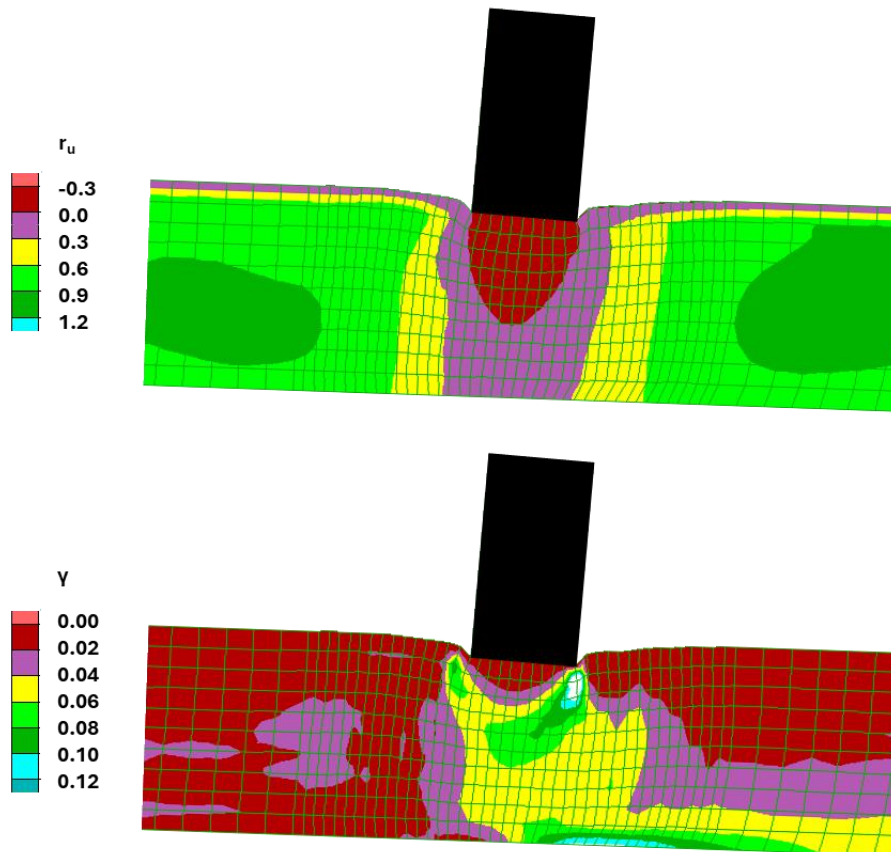
Σχήμα Α. 31: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



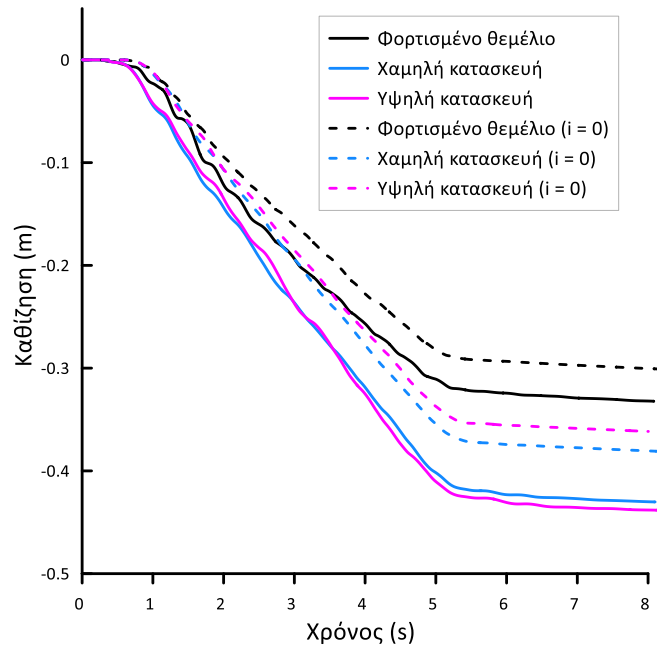
Σχήμα Α. 32: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



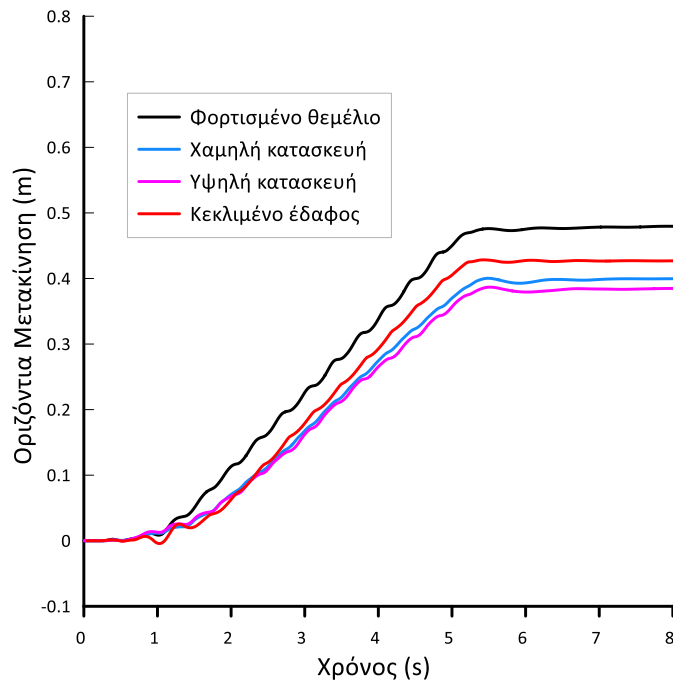
Σχήμα Α. 33: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



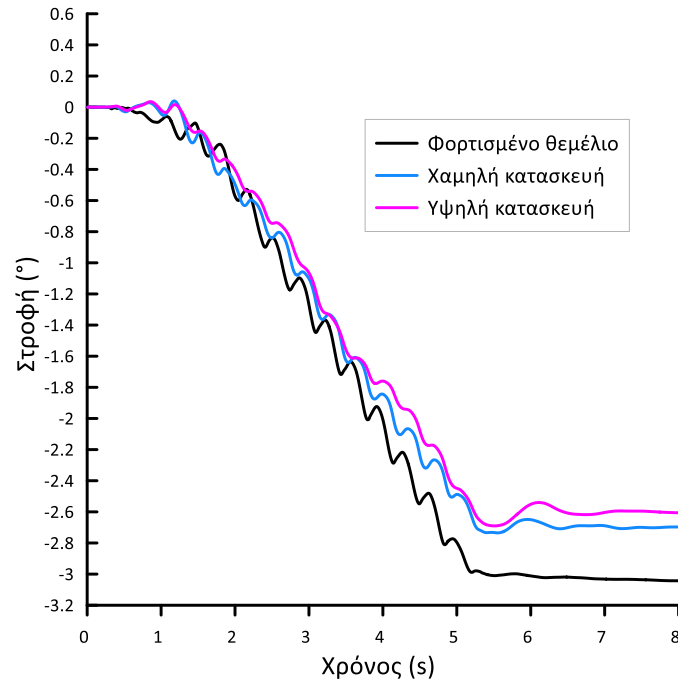
Σχήμα Α. 34: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



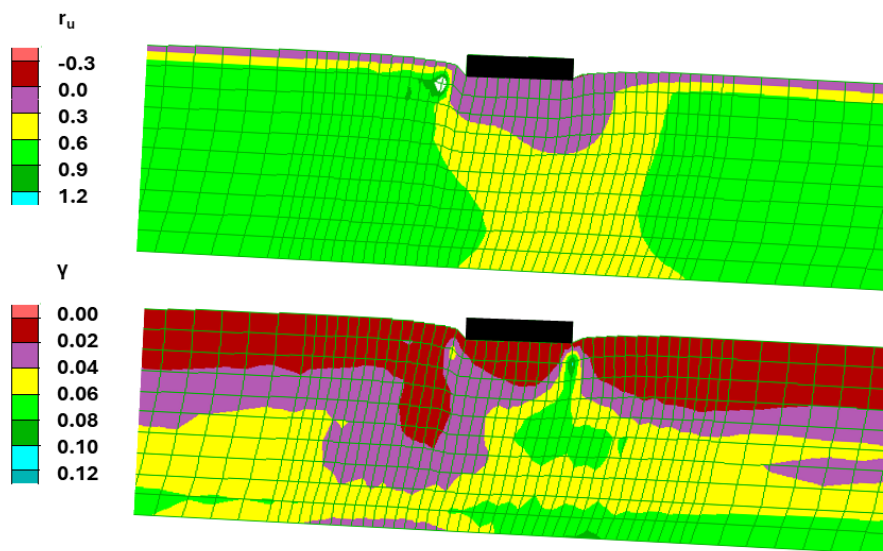
Σχήμα Α. 35: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



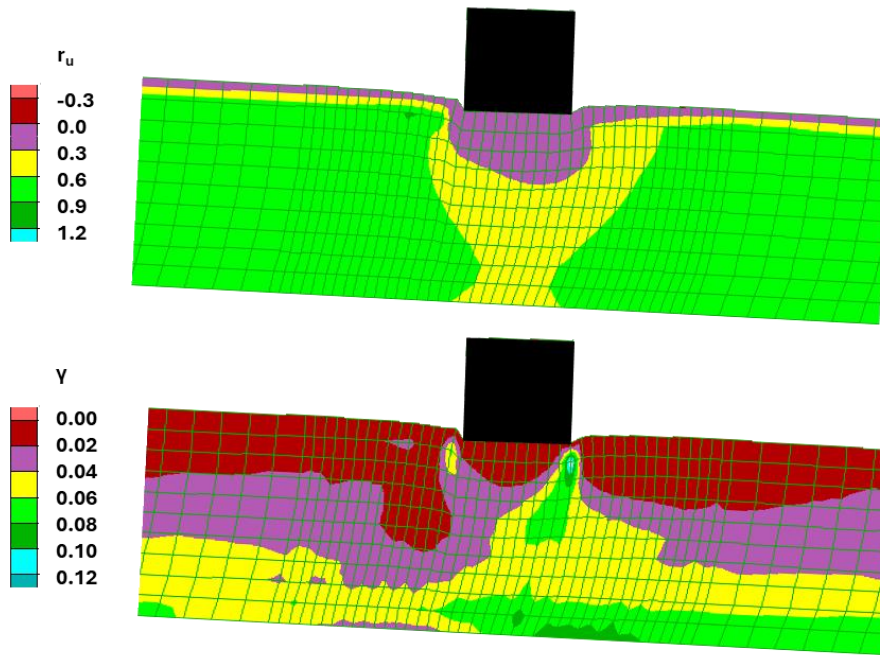
Σχήμα Α. 36: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



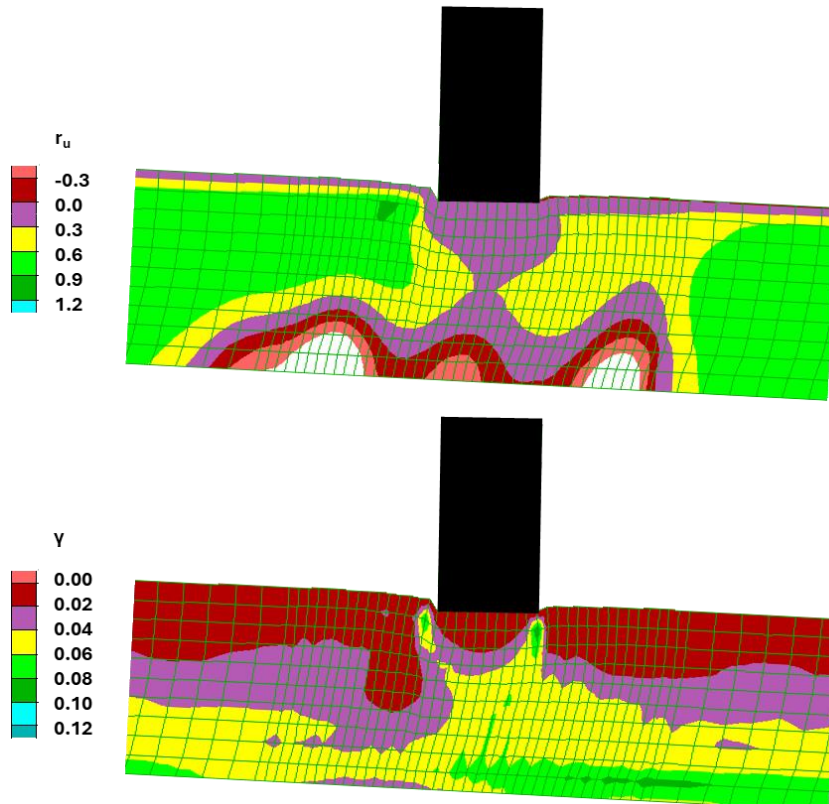
Σχήμα Α. 37: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



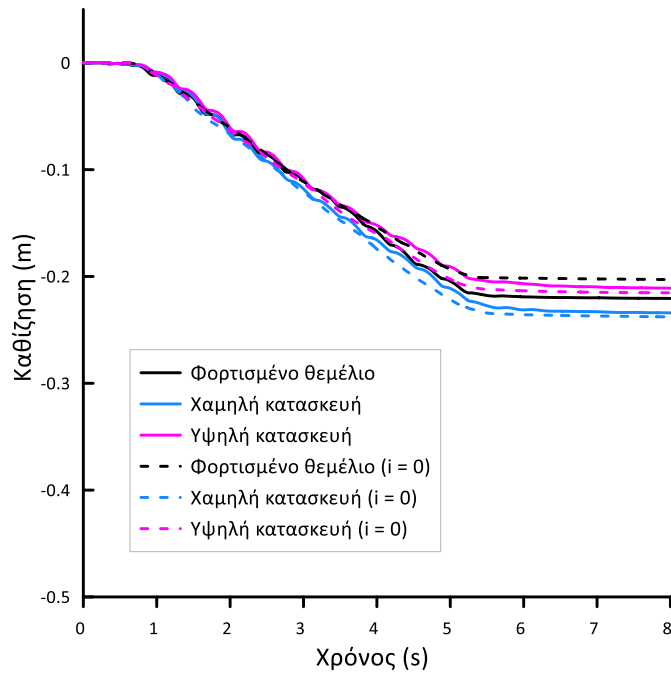
Σχήμα Α. 38: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



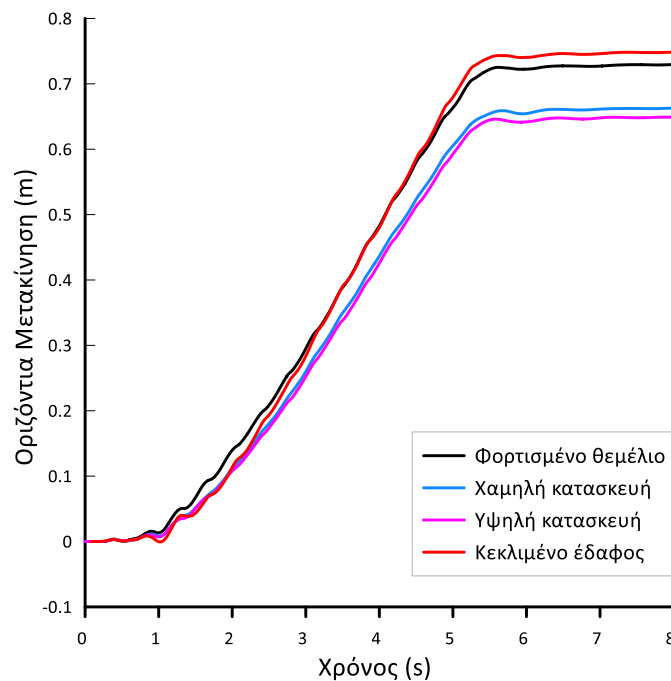
Σχήμα Α. 39: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



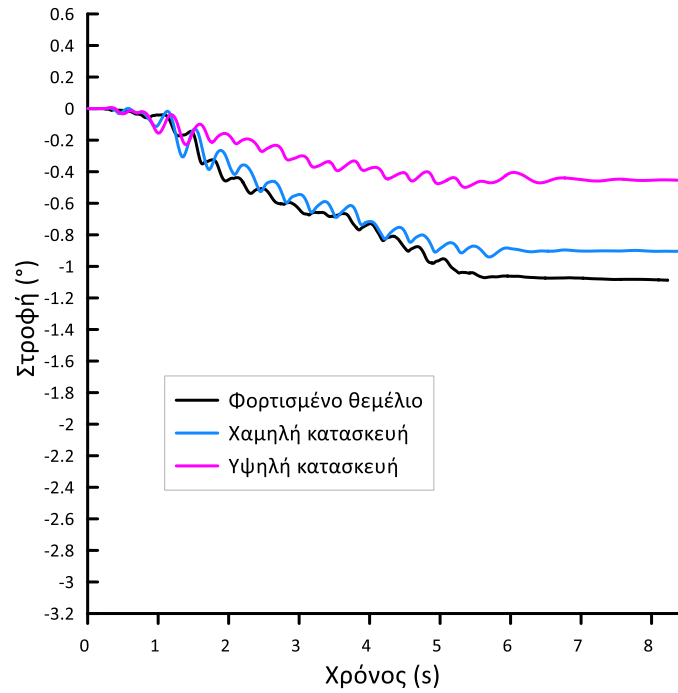
Σχήμα Α. 40: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



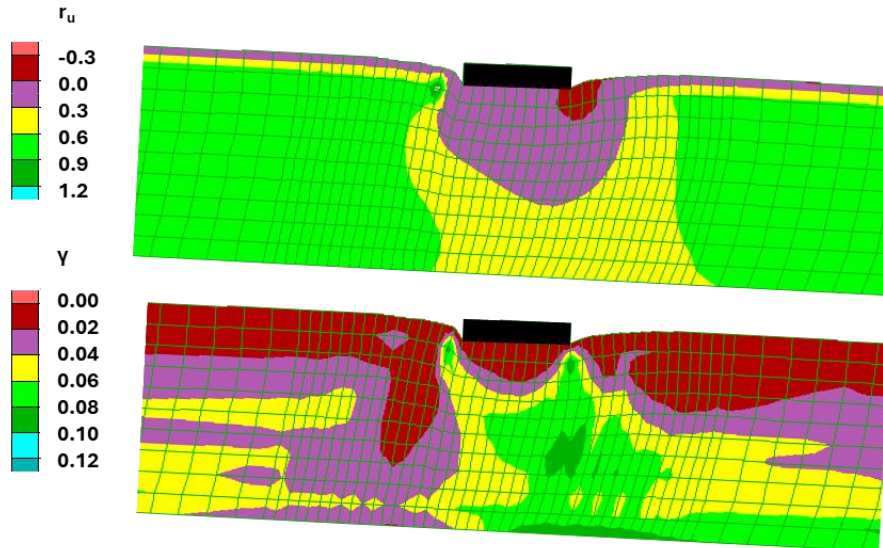
Σχήμα Α. 41: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



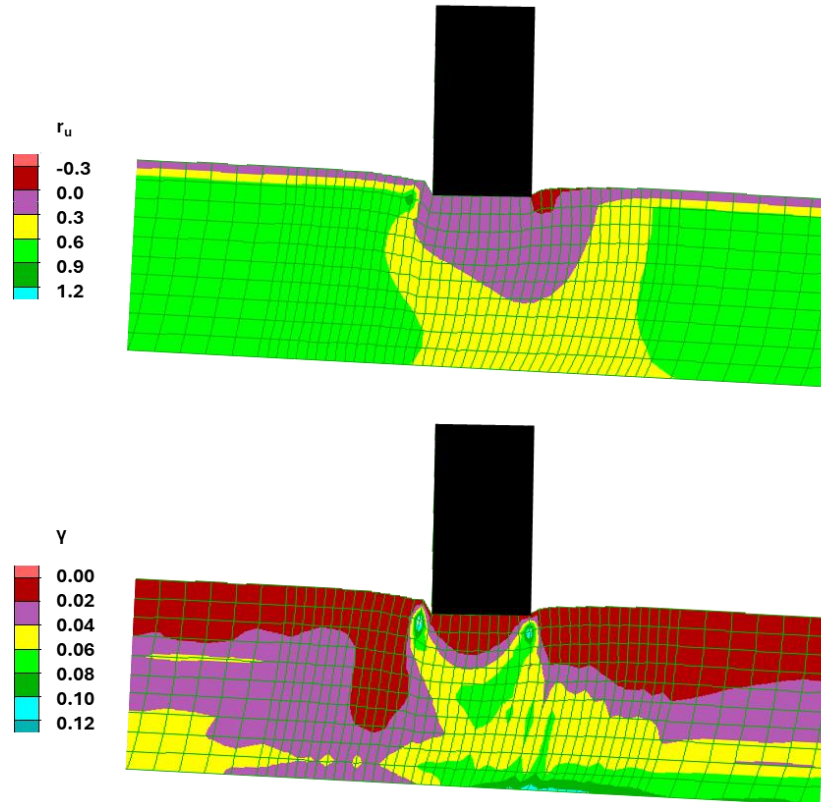
Σχήμα Α. 42: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



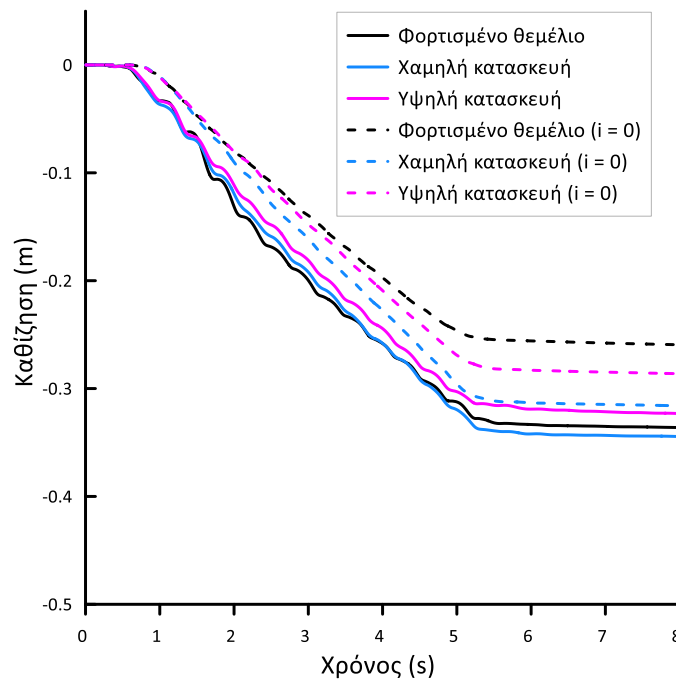
Σχήμα Α. 43: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



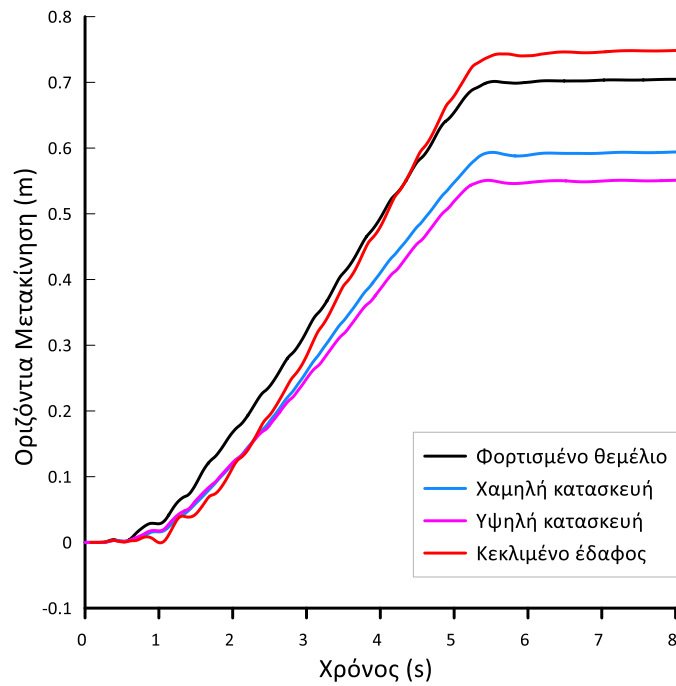
Σχήμα Α. 44: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



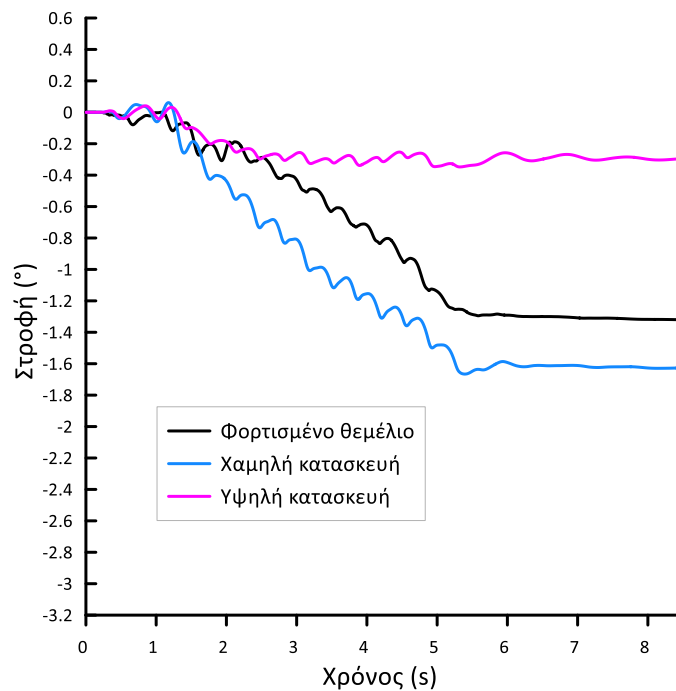
Σχήμα Α. 45: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



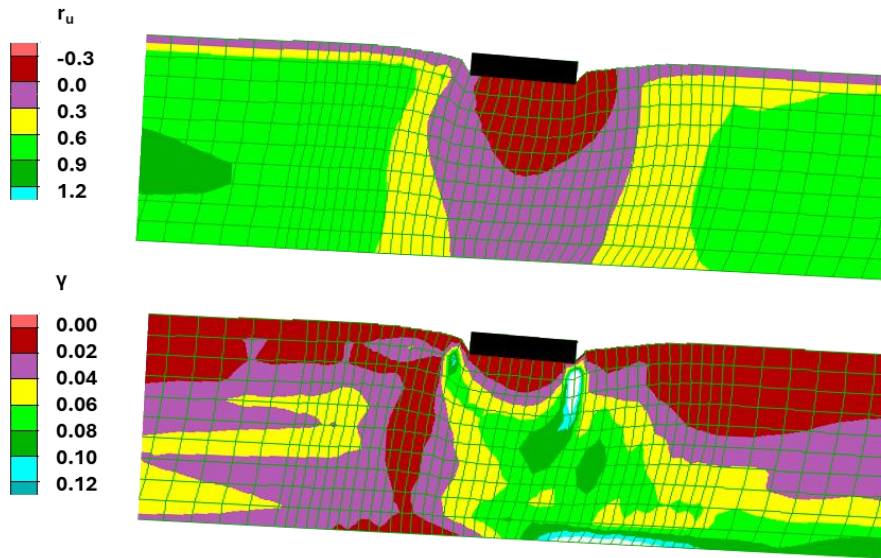
Σχήμα Α. 46: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



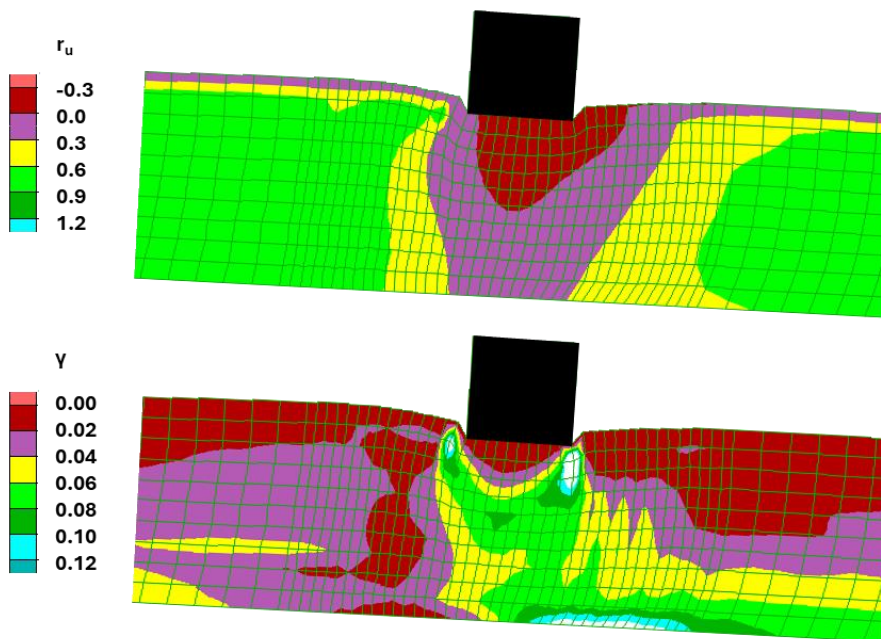
Σχήμα Α. 47: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



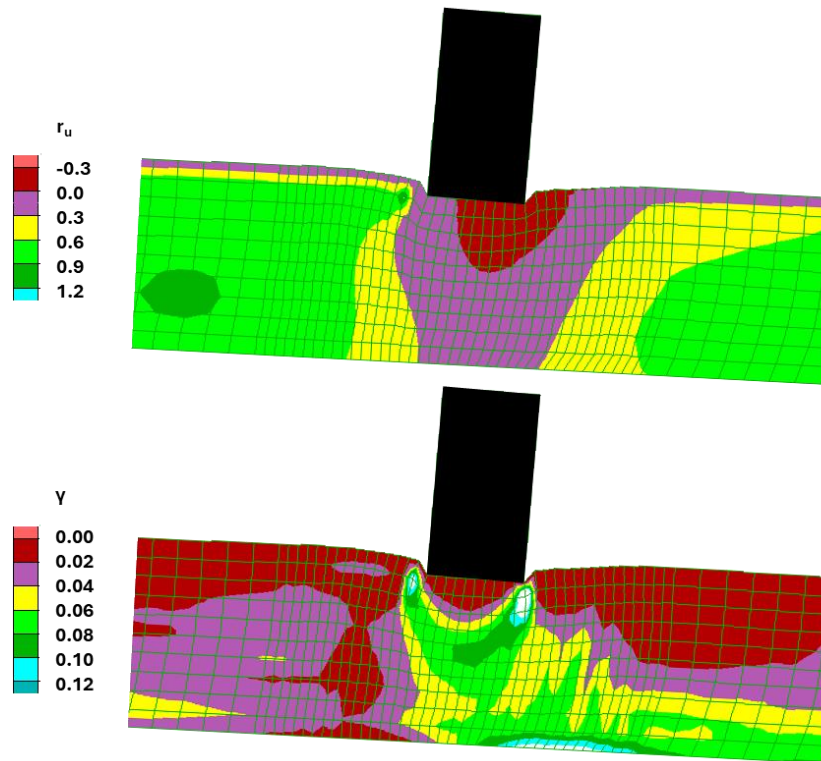
Σχήμα Α. 48: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



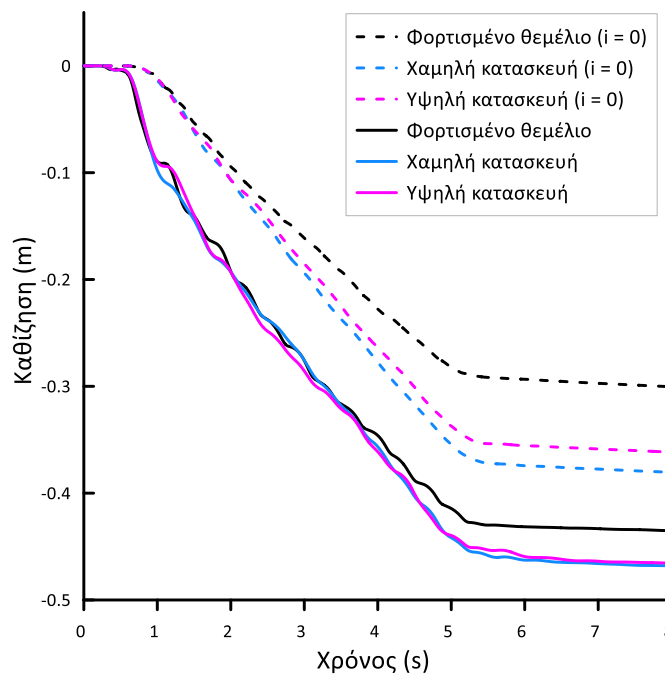
Σχήμα Α. 49: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



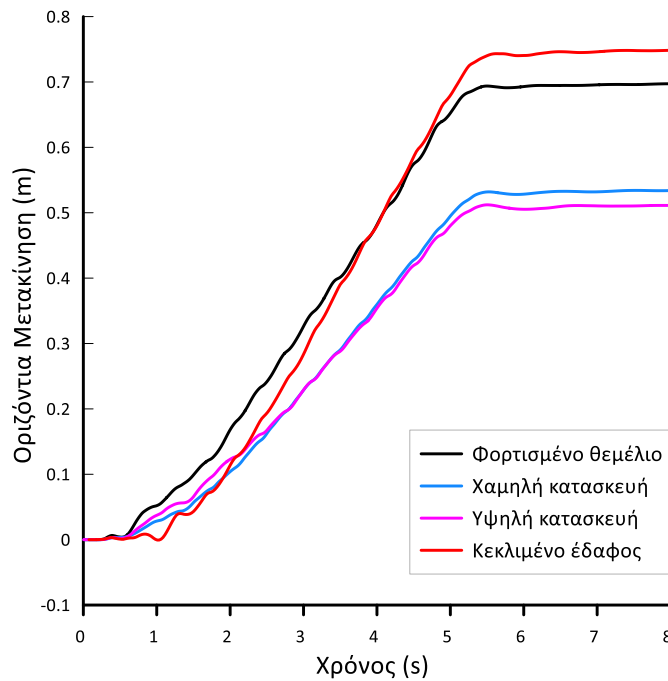
Σχήμα Α. 50: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



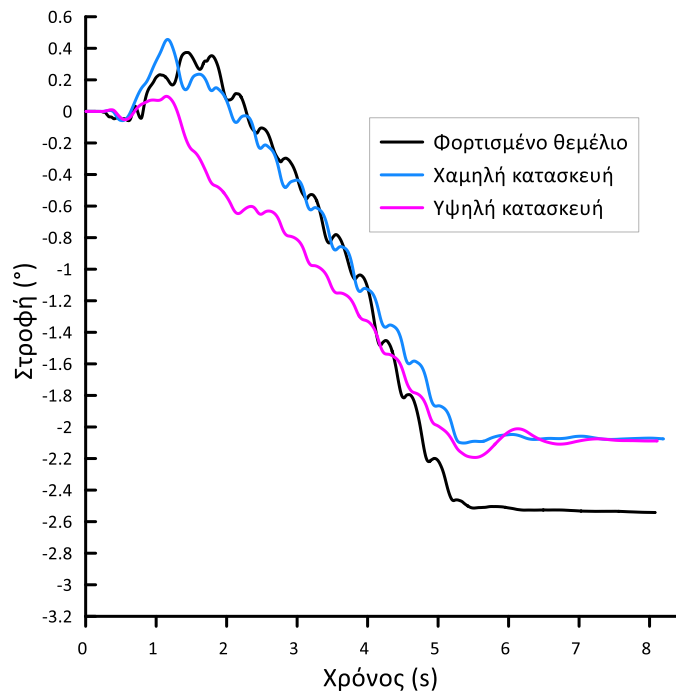
Σχήμα Α. 51: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



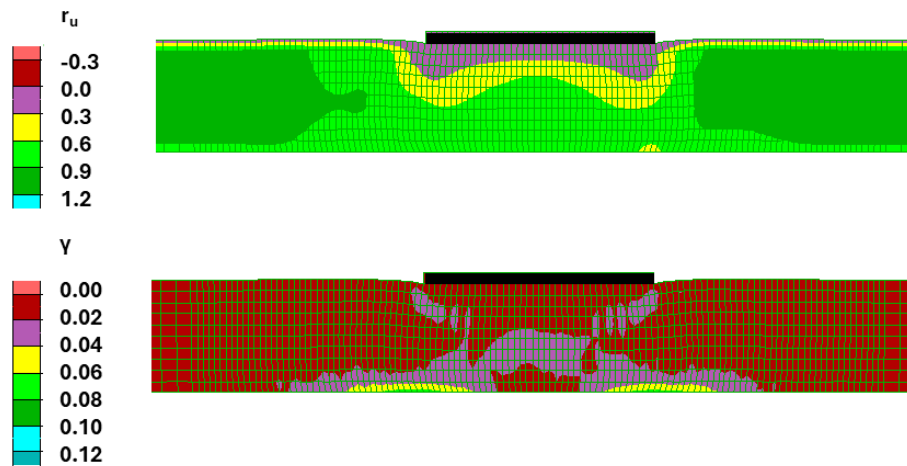
Σχήμα Α. 52: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



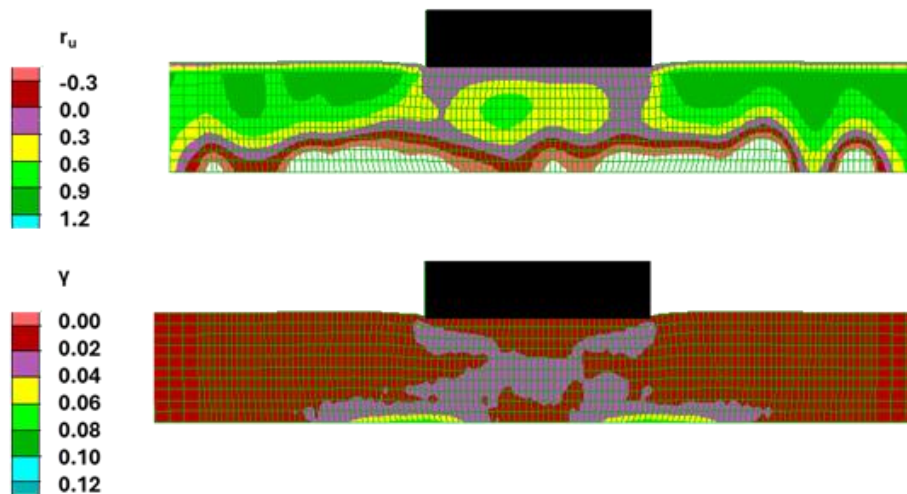
Σχήμα Α. 53: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



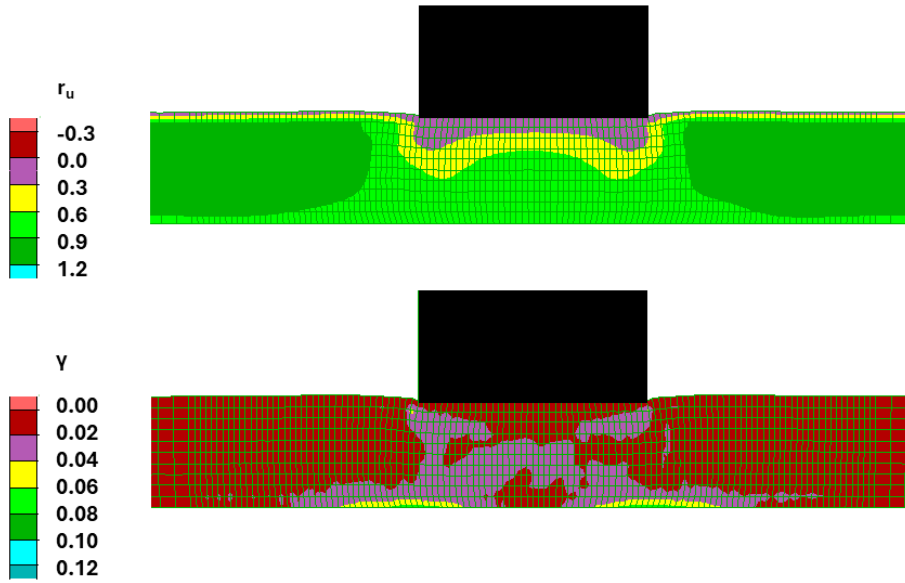
Σχήμα Α. 54: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 3.4^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



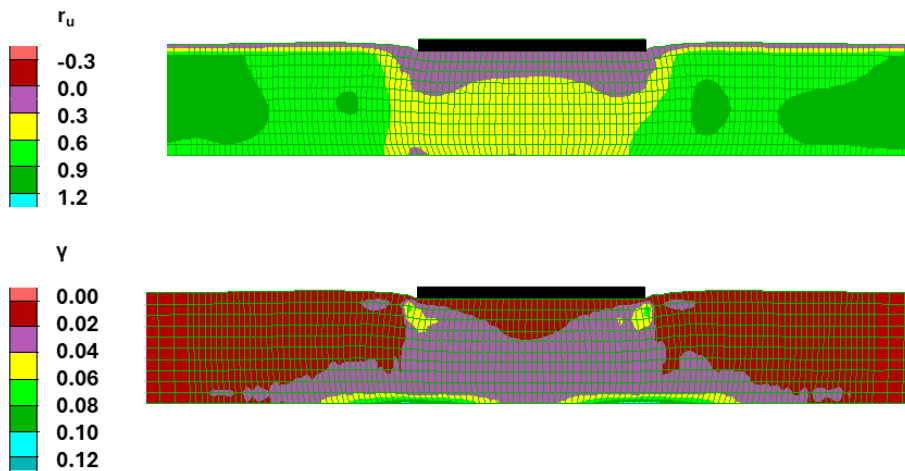
Σχήμα Α. 55: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



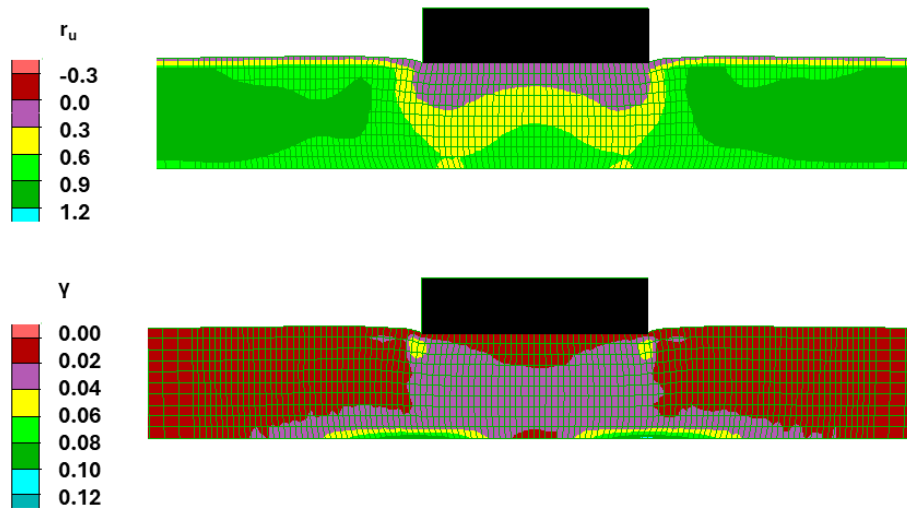
Σχήμα Α. 56: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



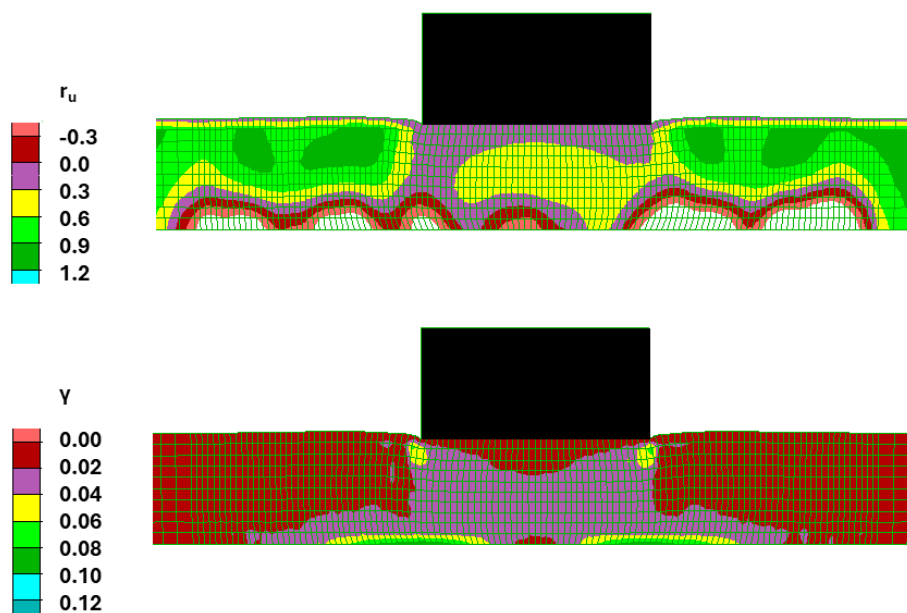
Σχήμα Α. 57: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



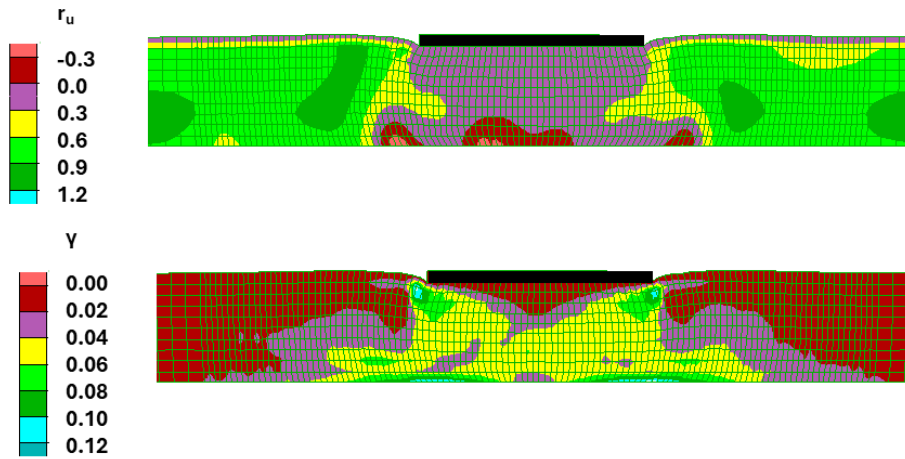
Σχήμα Α. 58: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



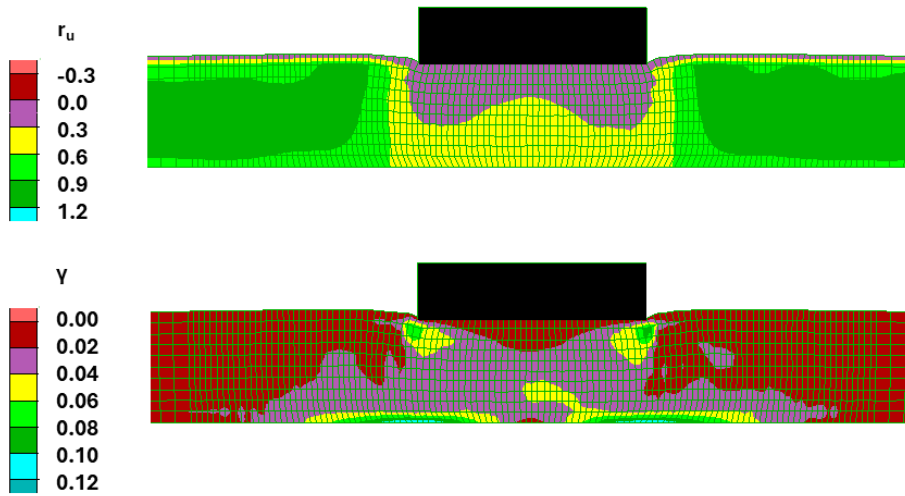
Σχήμα Α. 59: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



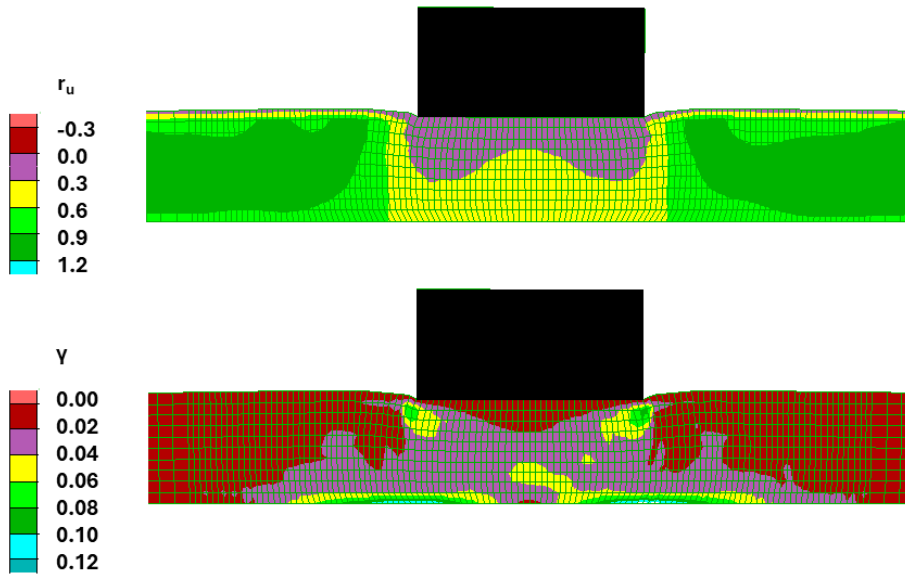
Σχήμα Α. 60: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



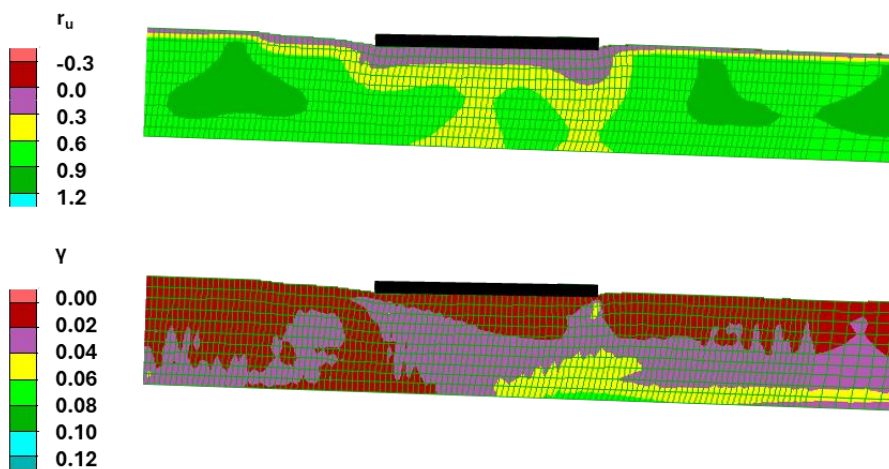
Σχήμα Α. 61: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



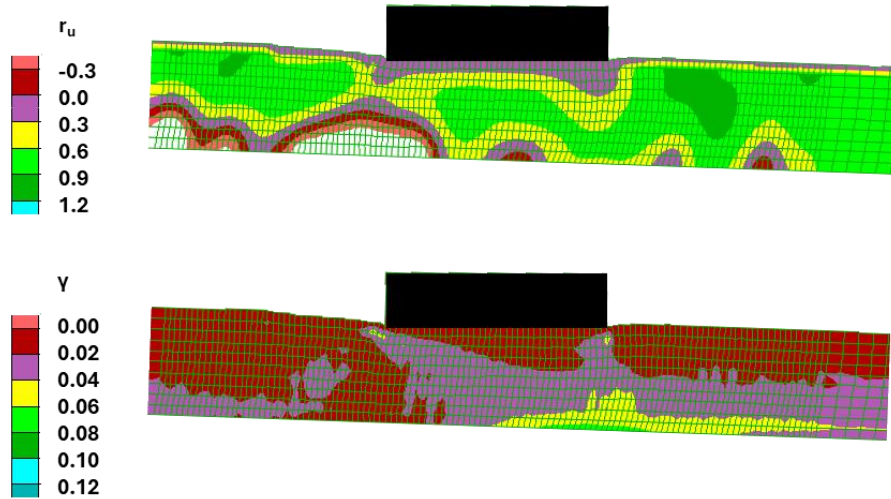
Σχήμα Α. 62: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



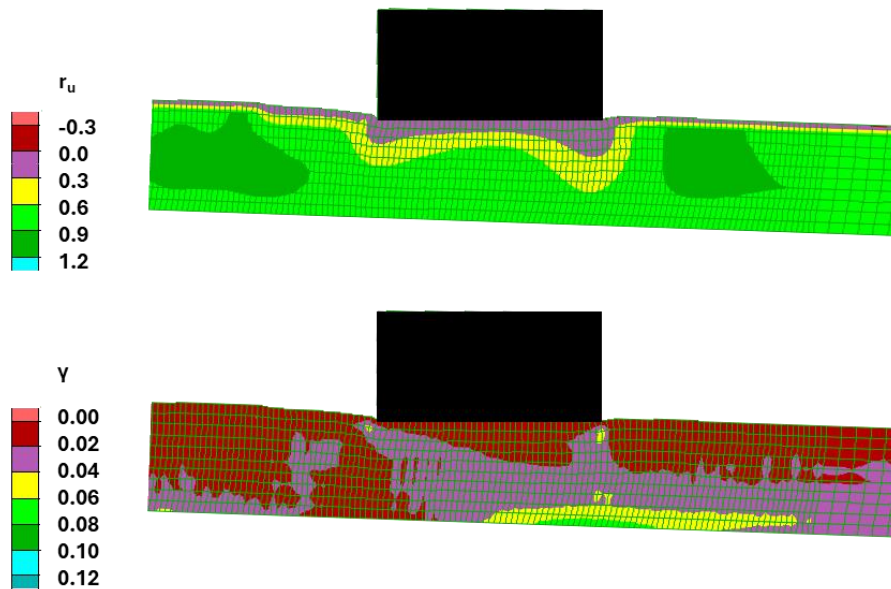
Σχήμα Α. 63: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



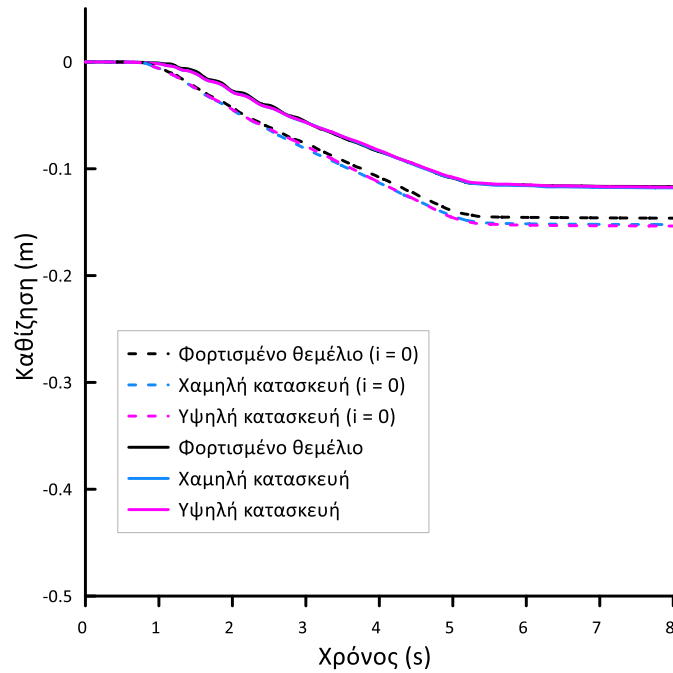
Σχήμα Α. 64: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



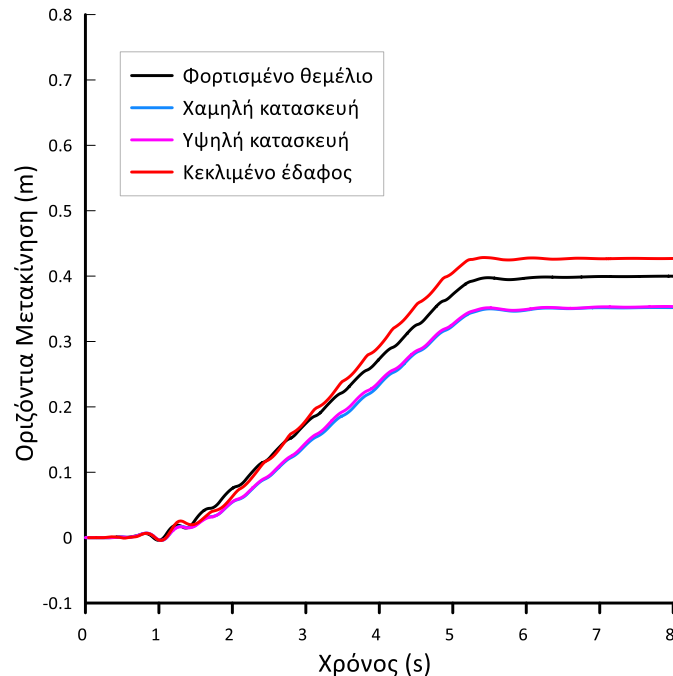
Σχήμα Α. 65: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



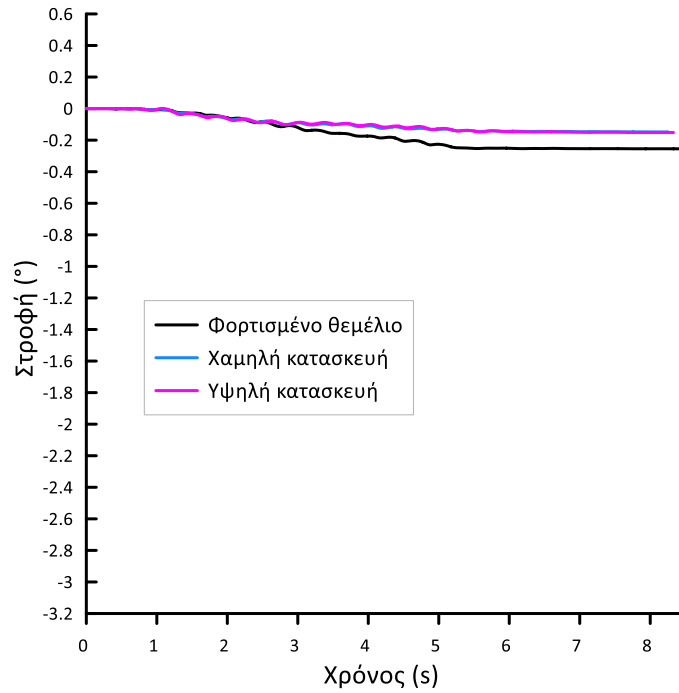
Σχήμα Α. 66: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



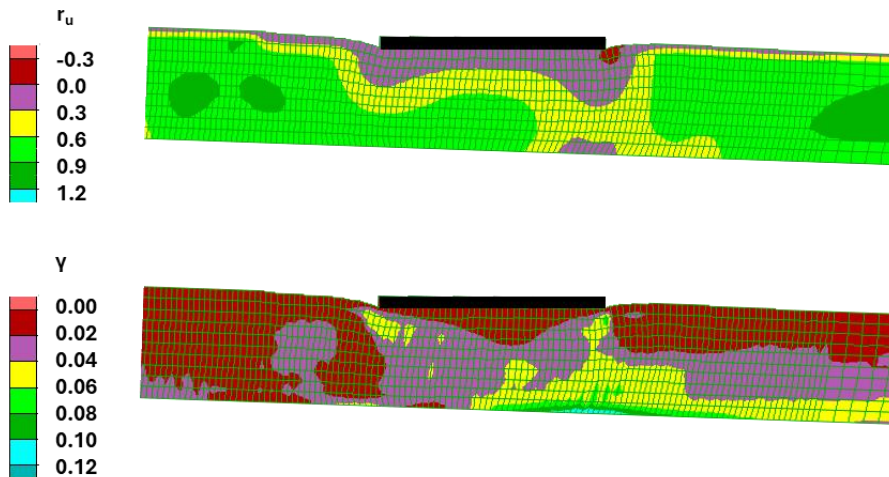
Σχήμα Α. 67: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



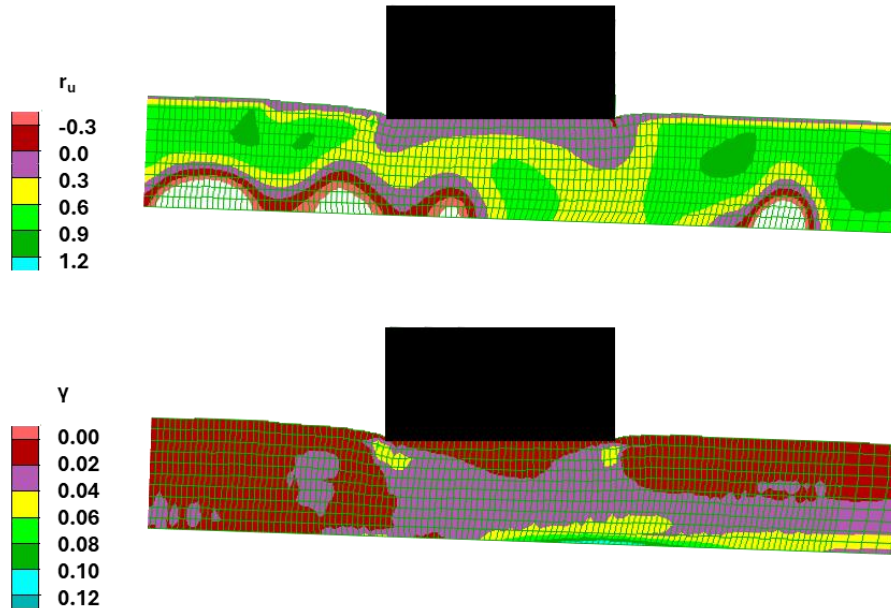
Σχήμα Α. 68: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



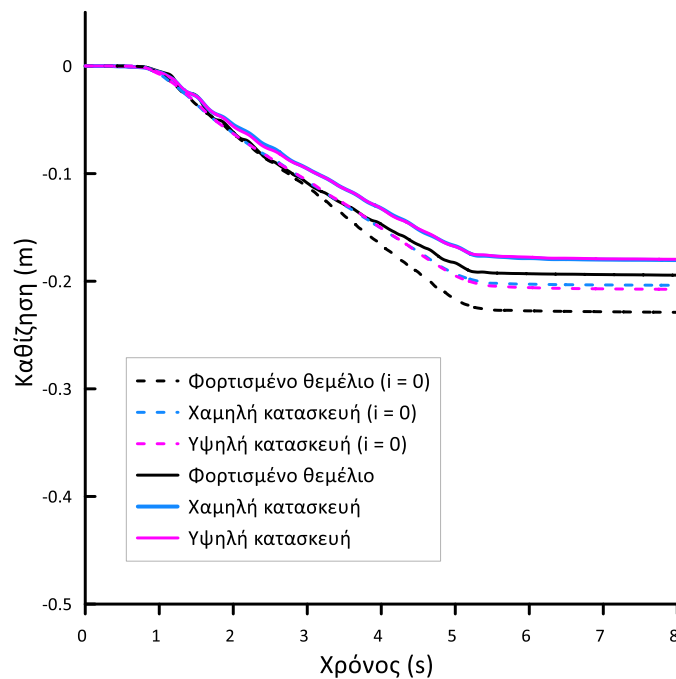
Σχήμα Α. 69: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



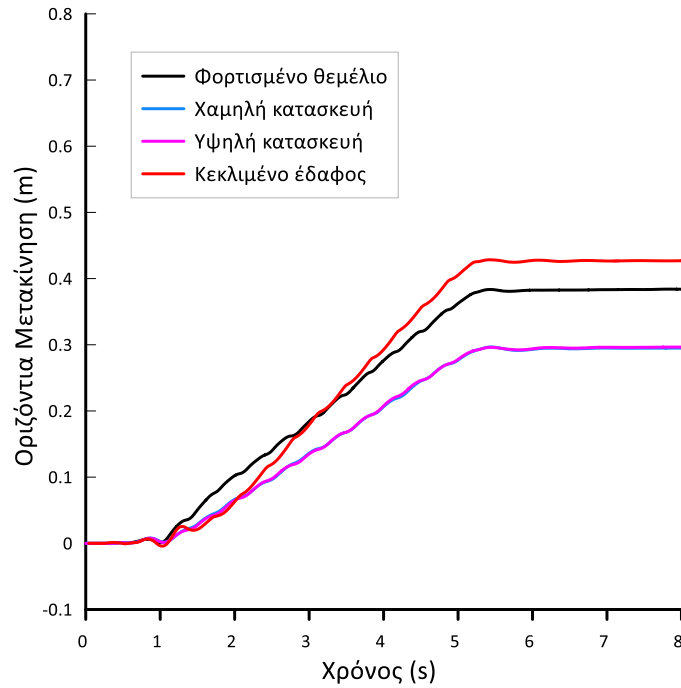
Σχήμα Α. 70: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



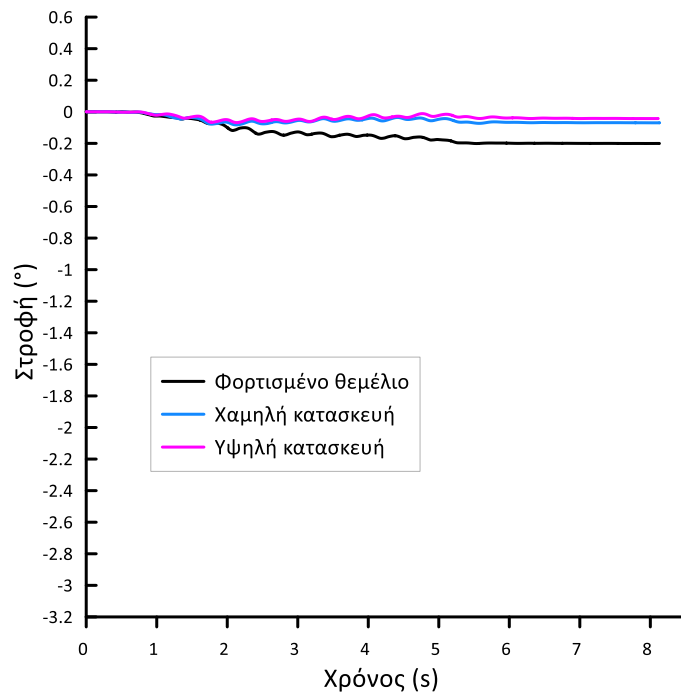
Σχήμα Α. 71: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



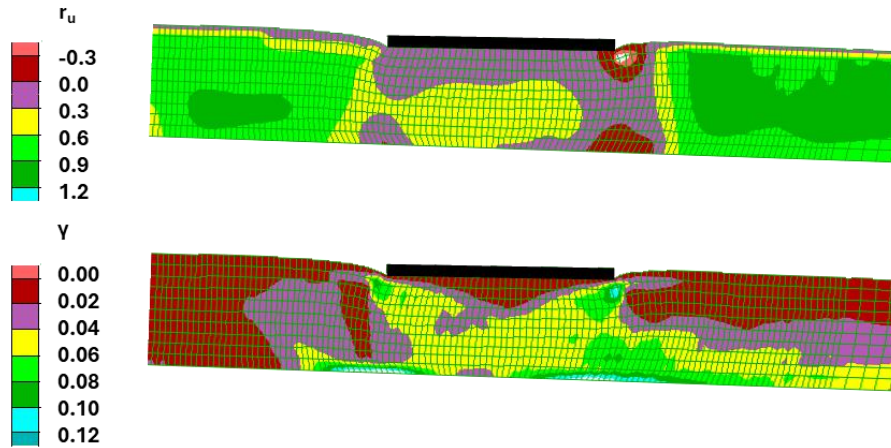
Σχήμα Α. 72: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



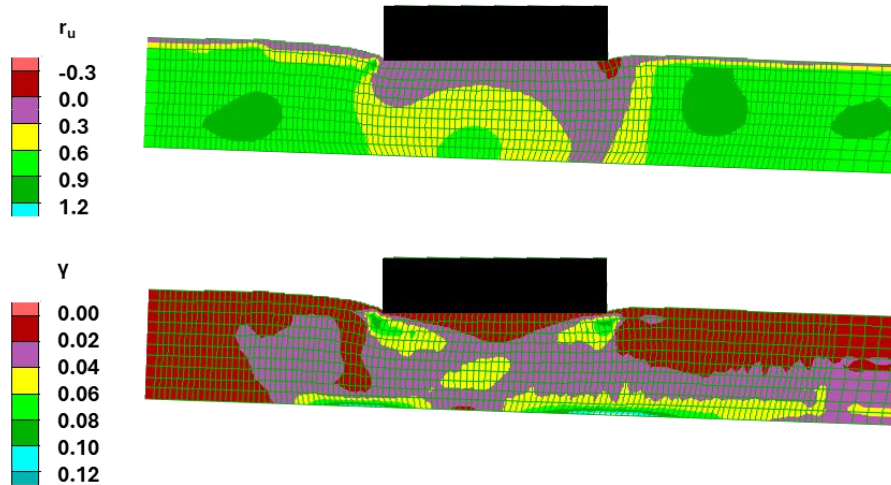
Σχήμα Α. 73: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



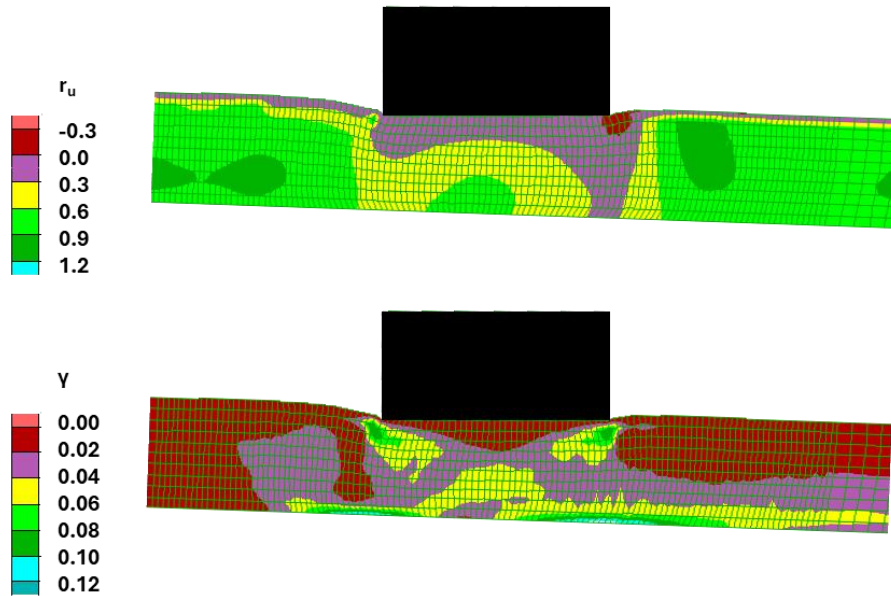
Σχήμα Α. 74: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



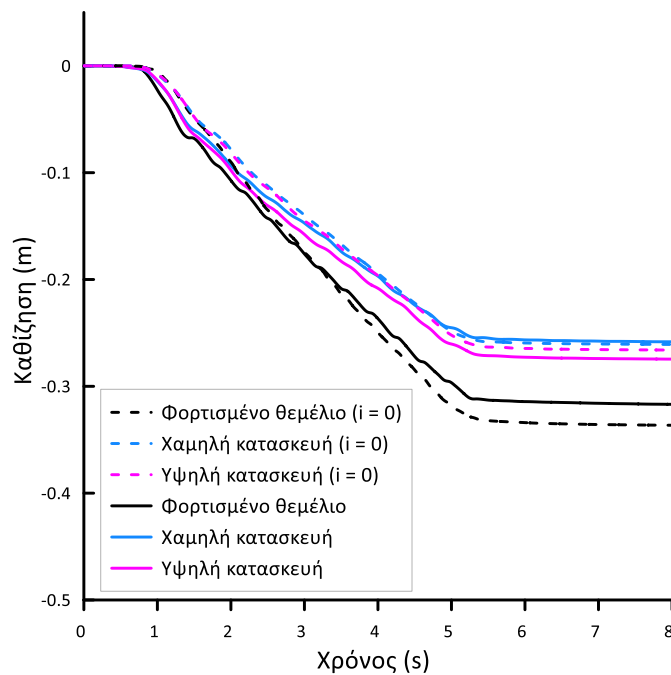
Σχήμα Α. 75: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



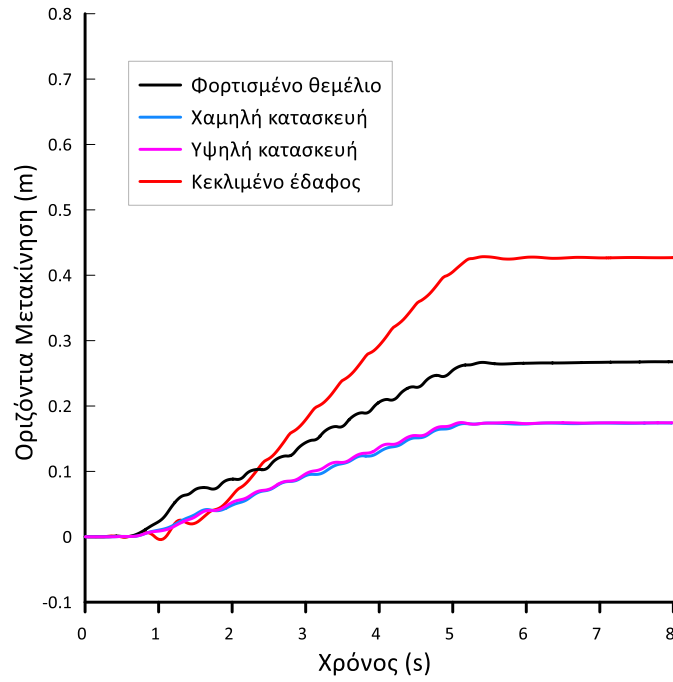
Σχήμα Α. 76: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



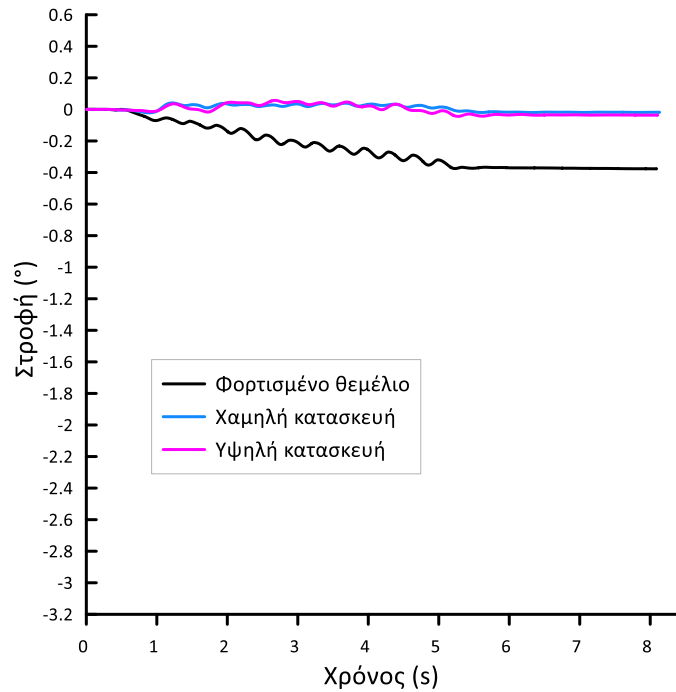
Σχήμα Α. 77: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



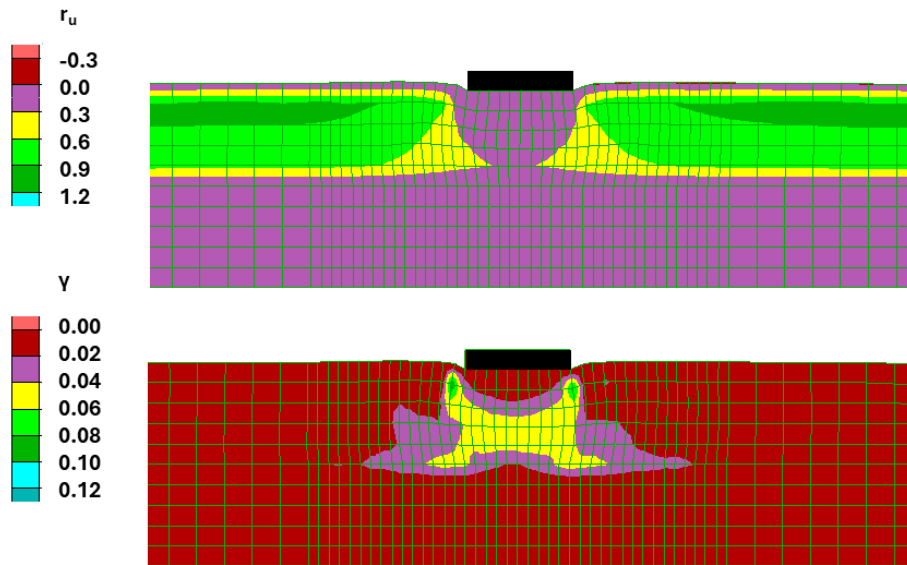
Σχήμα Α. 78: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



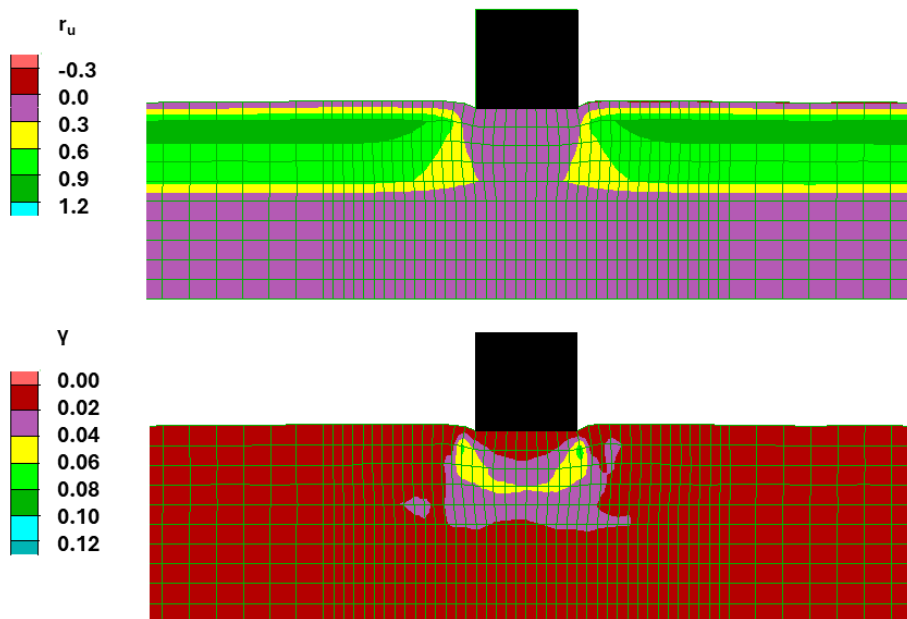
Σχήμα Α. 79: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



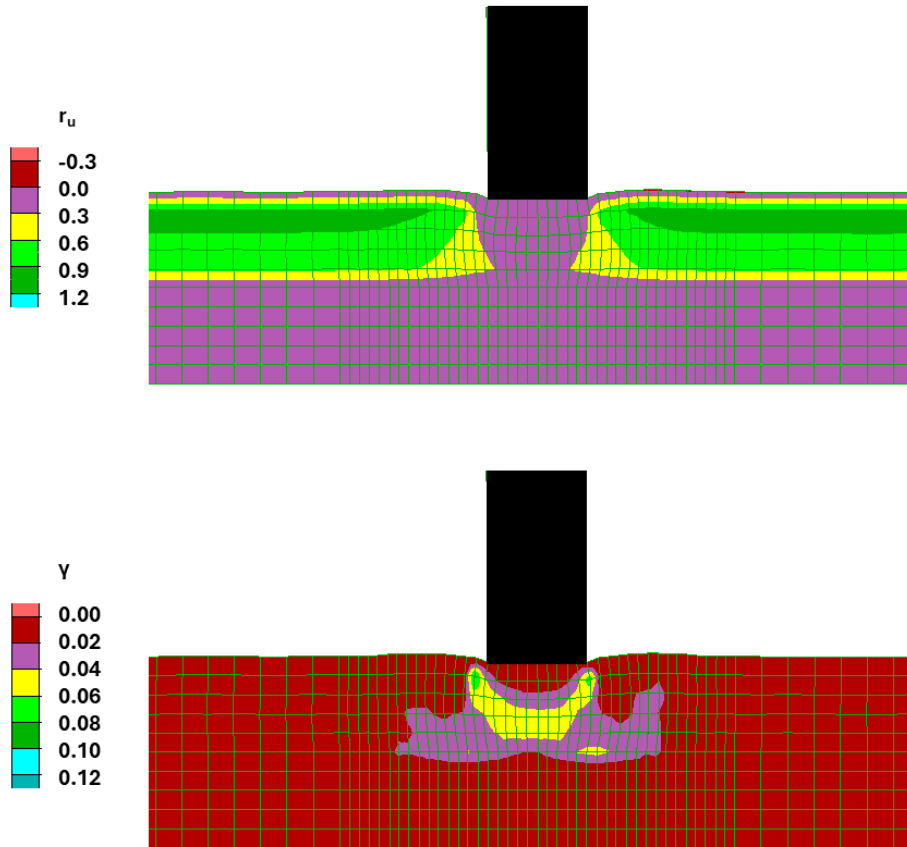
Σχήμα Α. 80: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 10$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



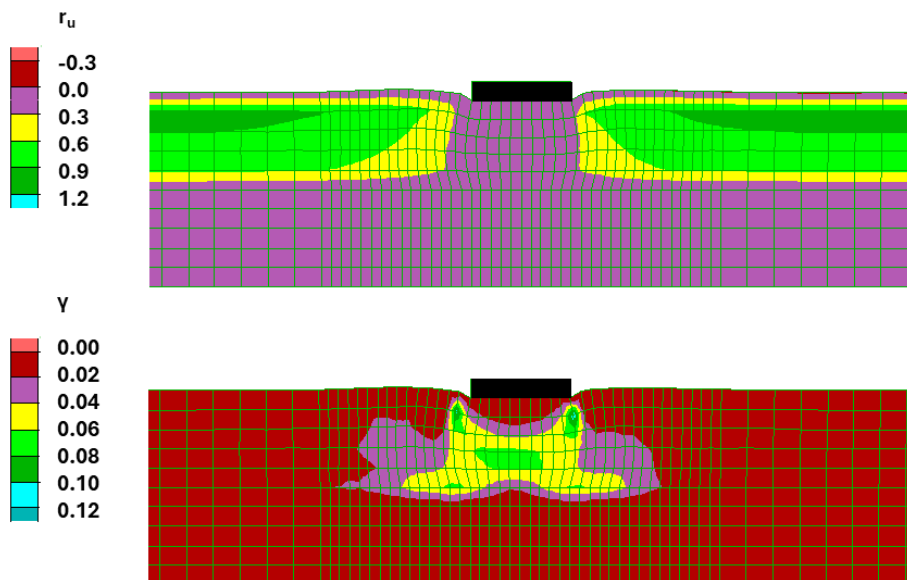
Σχήμα Α. 81: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



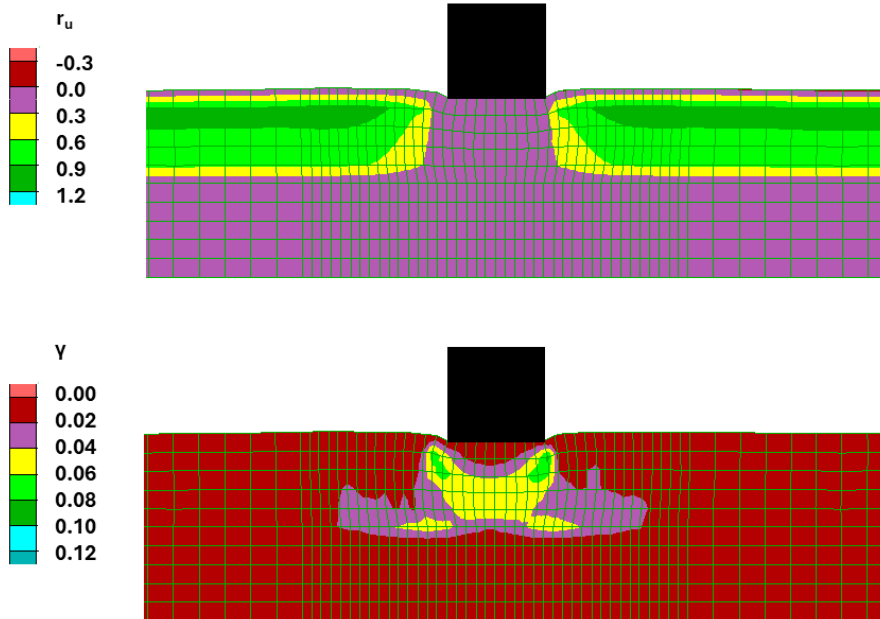
Σχήμα Α. 82: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμο φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



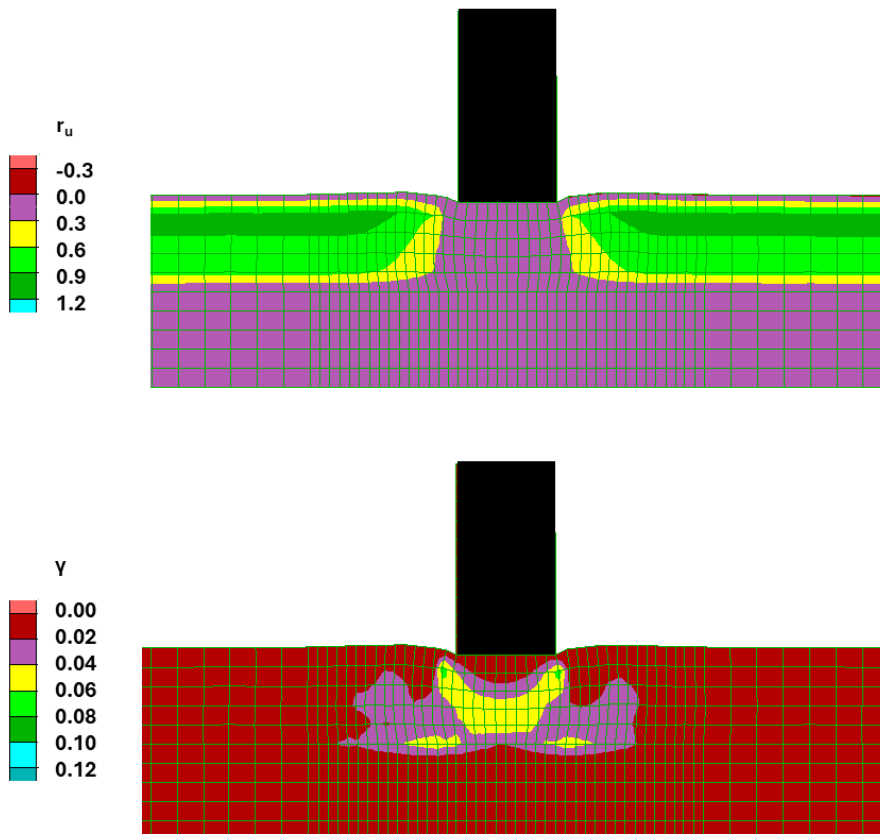
Σχήμα Α. 83: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



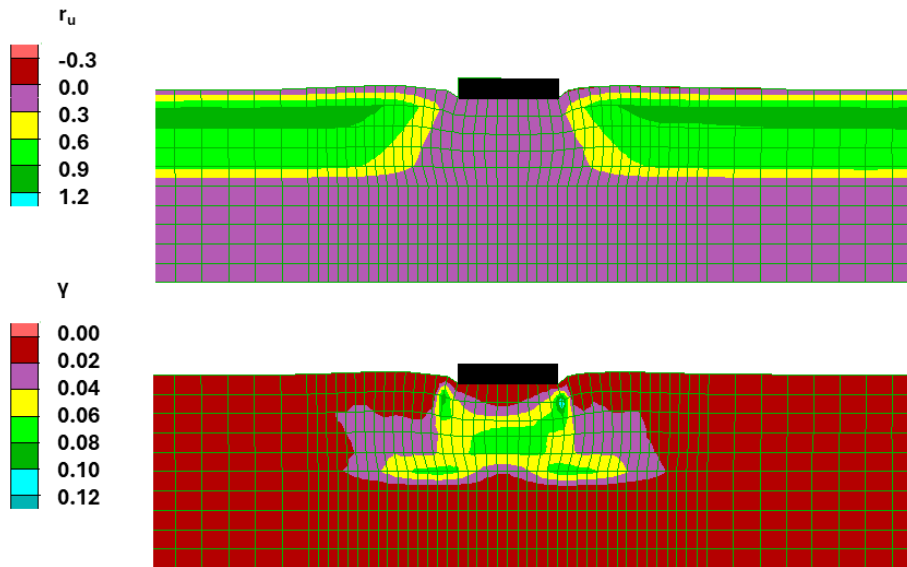
Σχήμα Α. 84: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



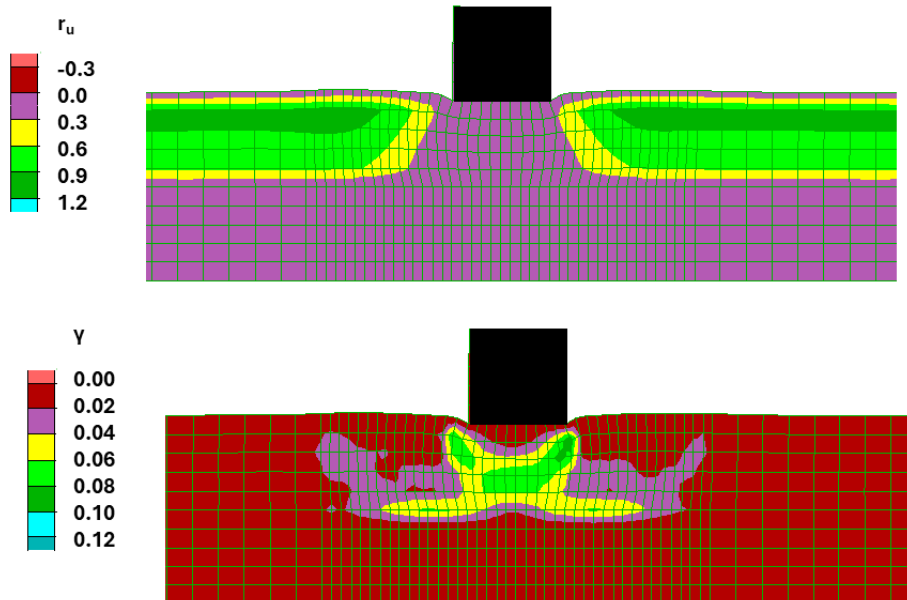
Σχήμα Α. 85: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



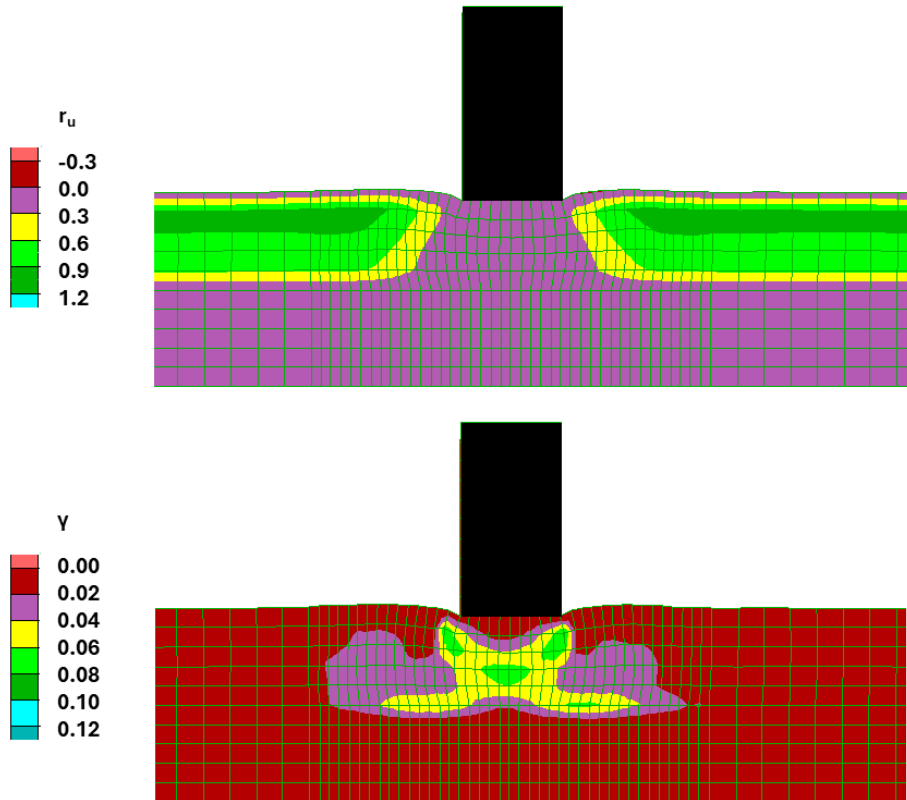
Σχήμα Α. 86: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



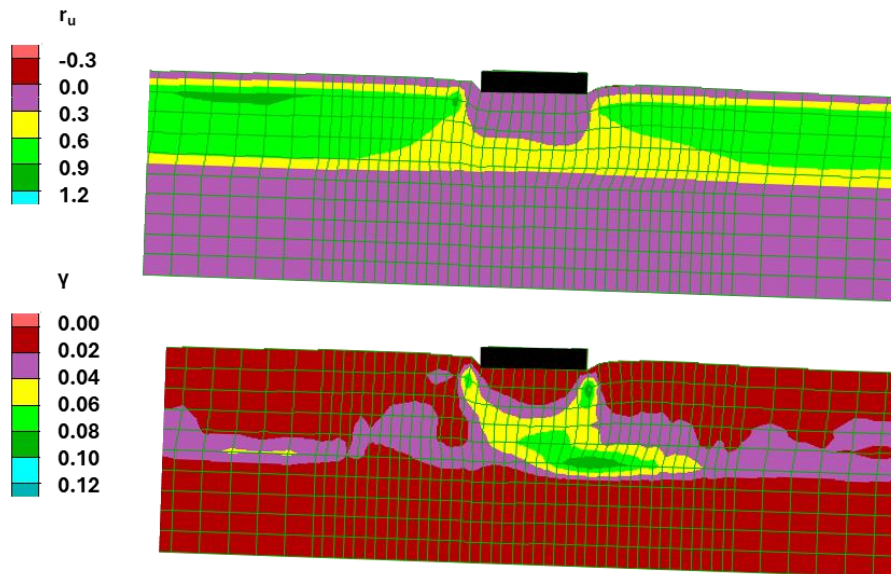
Σχήμα Α. 87: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



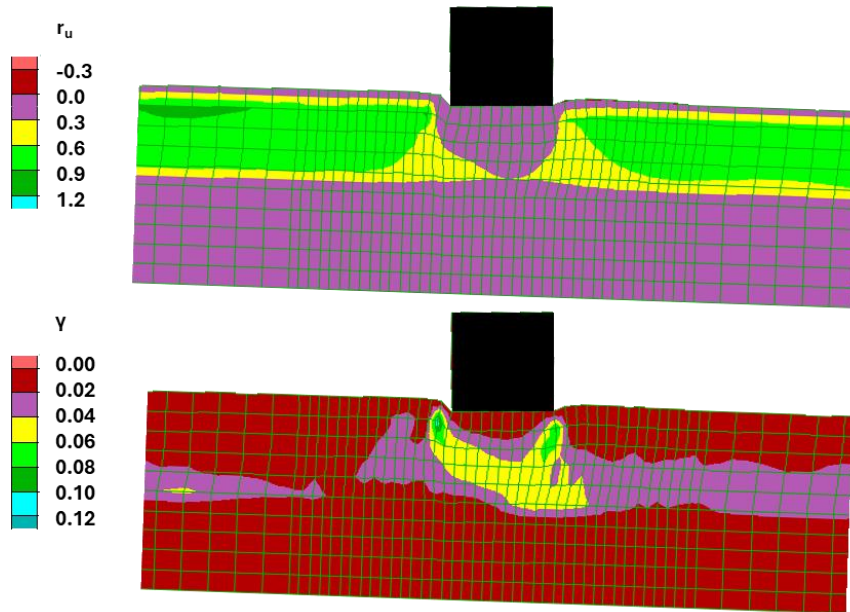
Σχήμα Α. 88: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



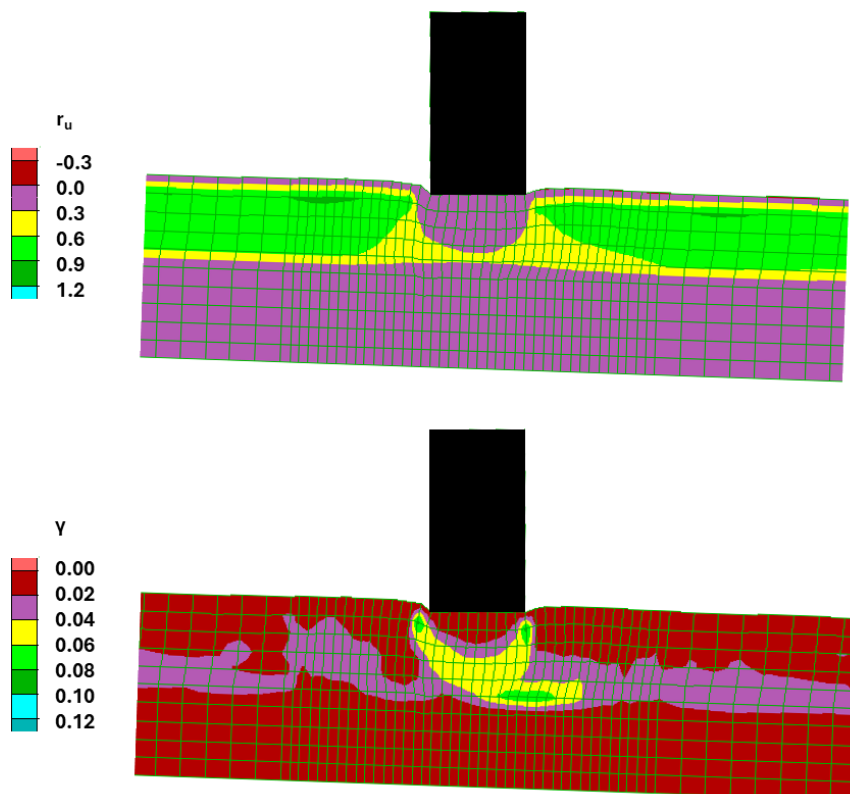
Σχήμα Α. 89: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



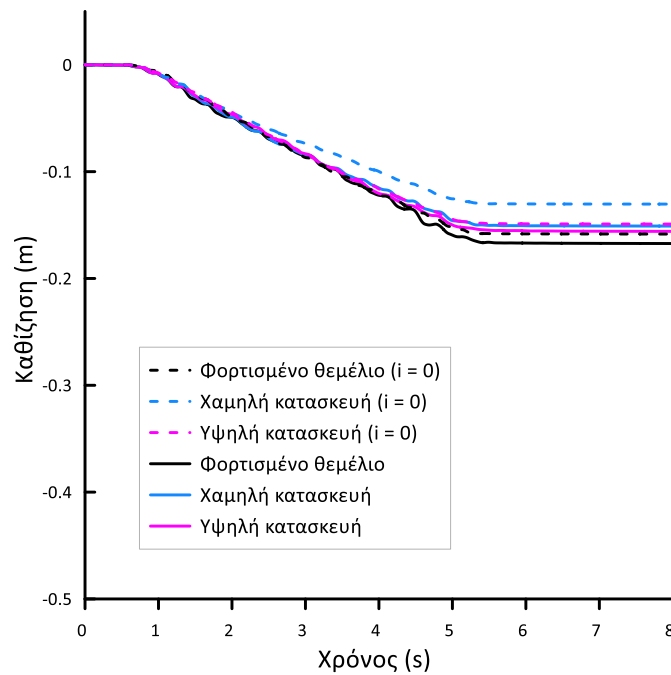
Σχήμα Α. 90: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



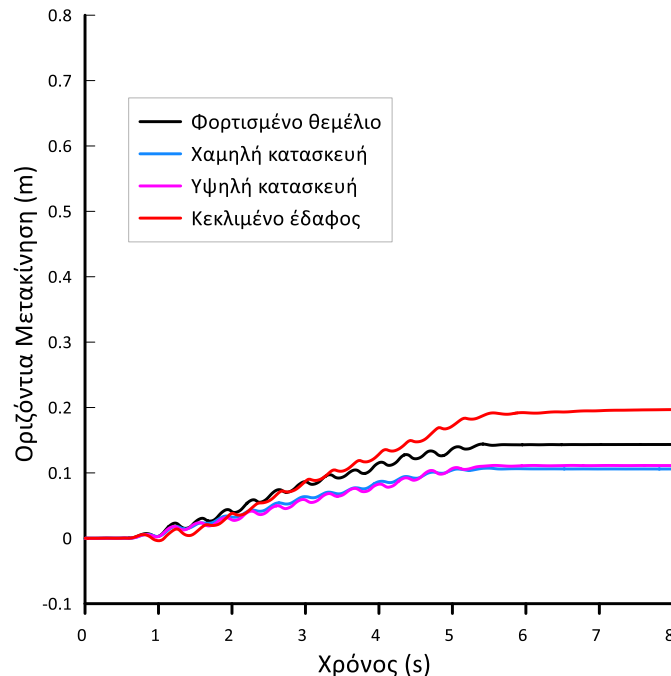
Σχήμα Α. 91: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



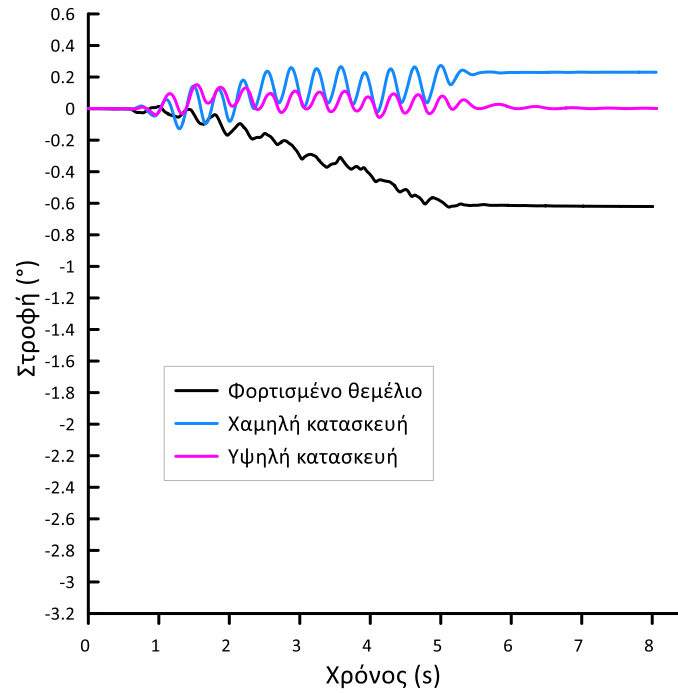
Σχήμα Α. 92: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



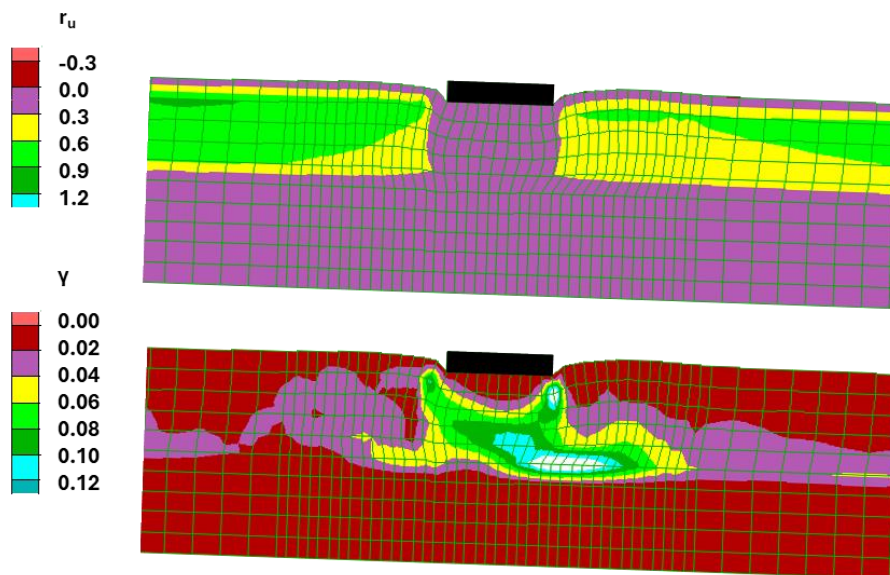
Σχήμα Α. 93: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



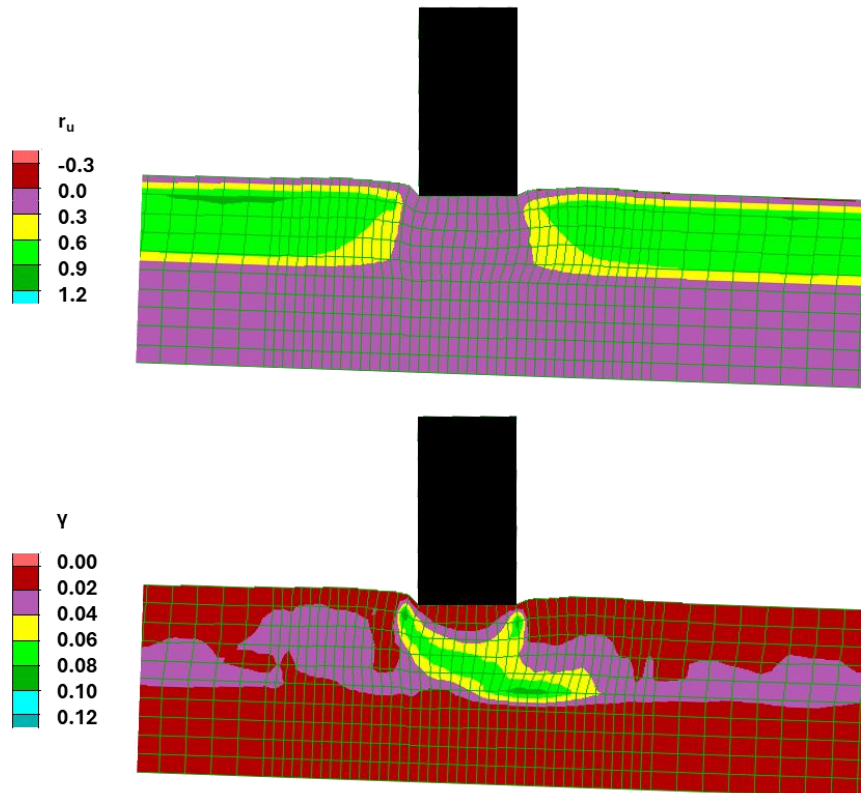
Σχήμα Α. 94: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



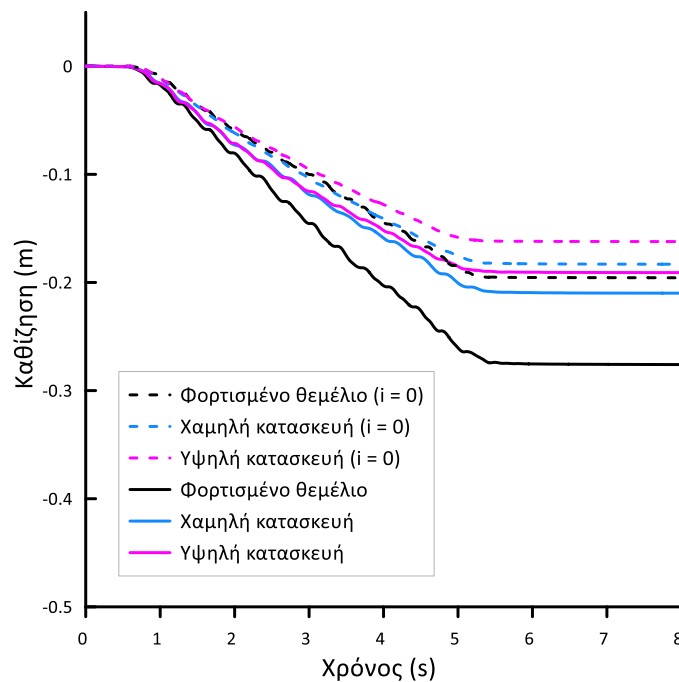
Σχήμα Α. 95: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



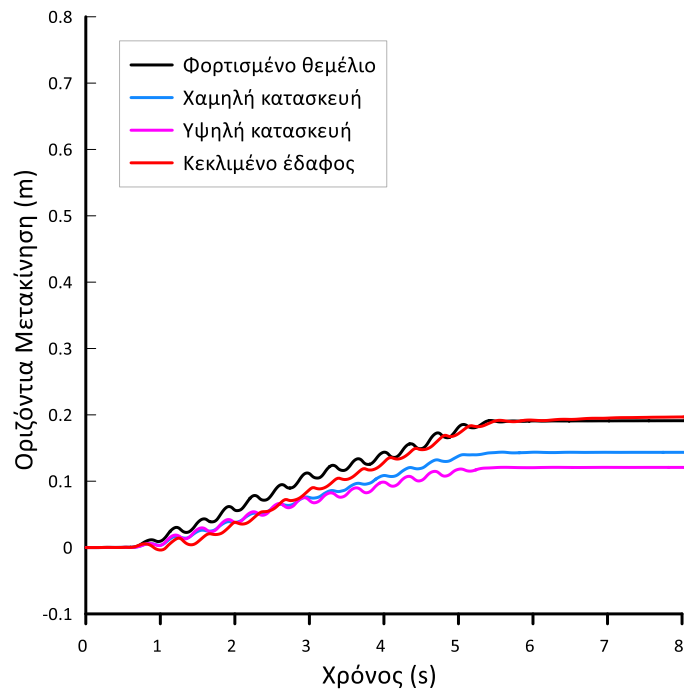
Σχήμα Α. 96: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



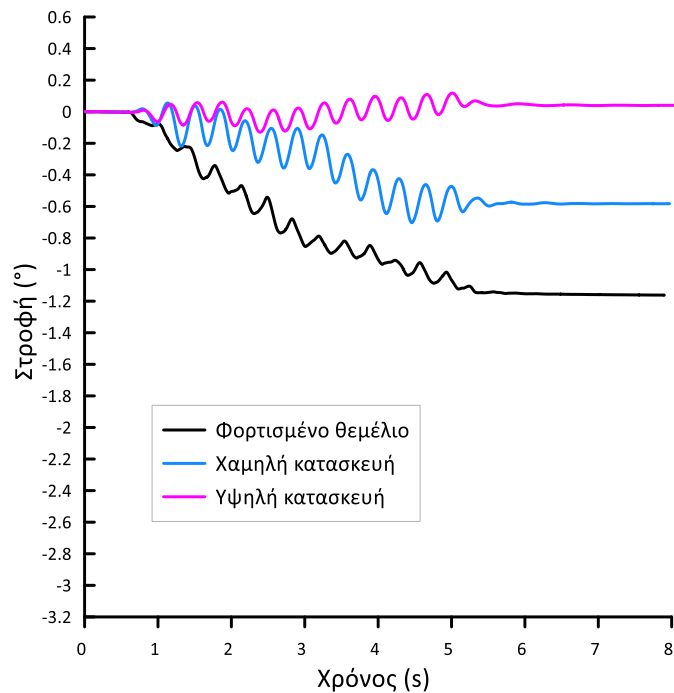
Σχήμα Α. 97: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



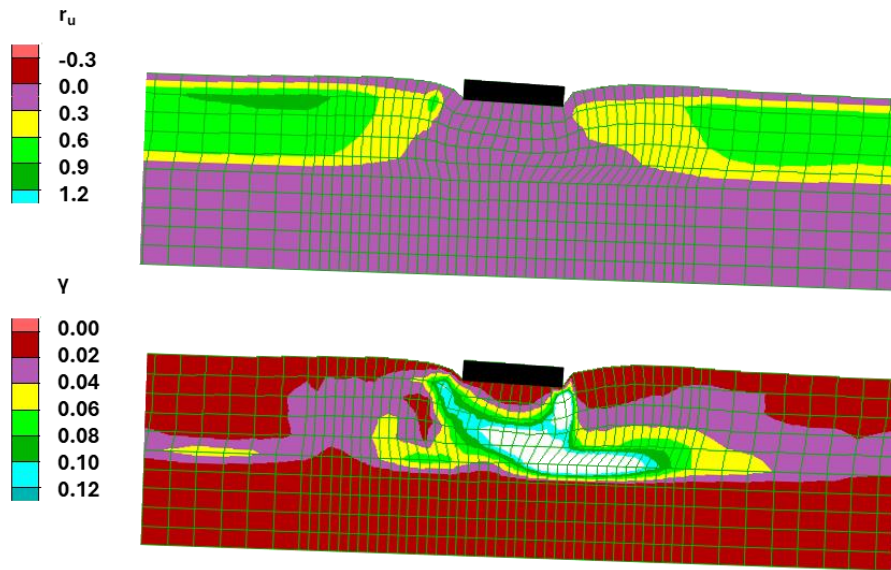
Σχήμα Α. 98: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



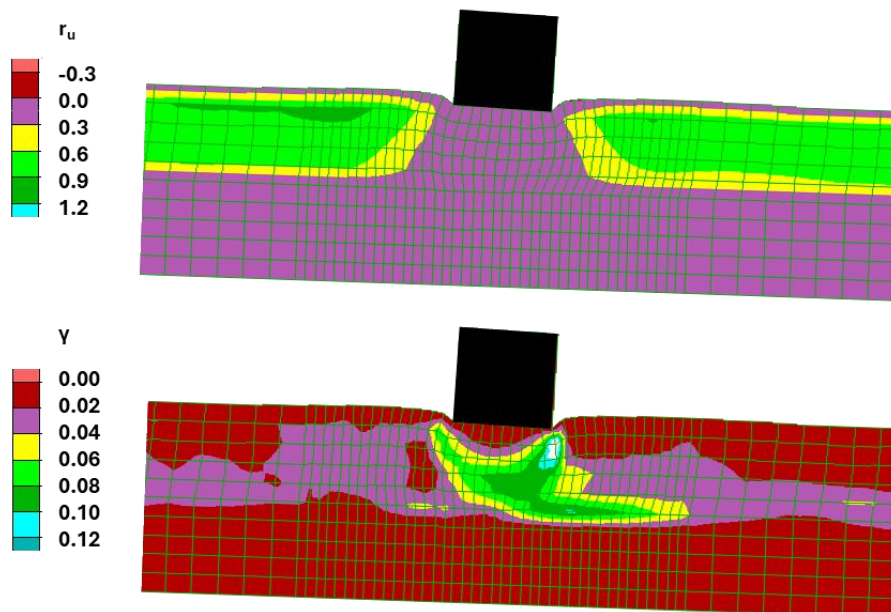
Σχήμα Α. 99: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



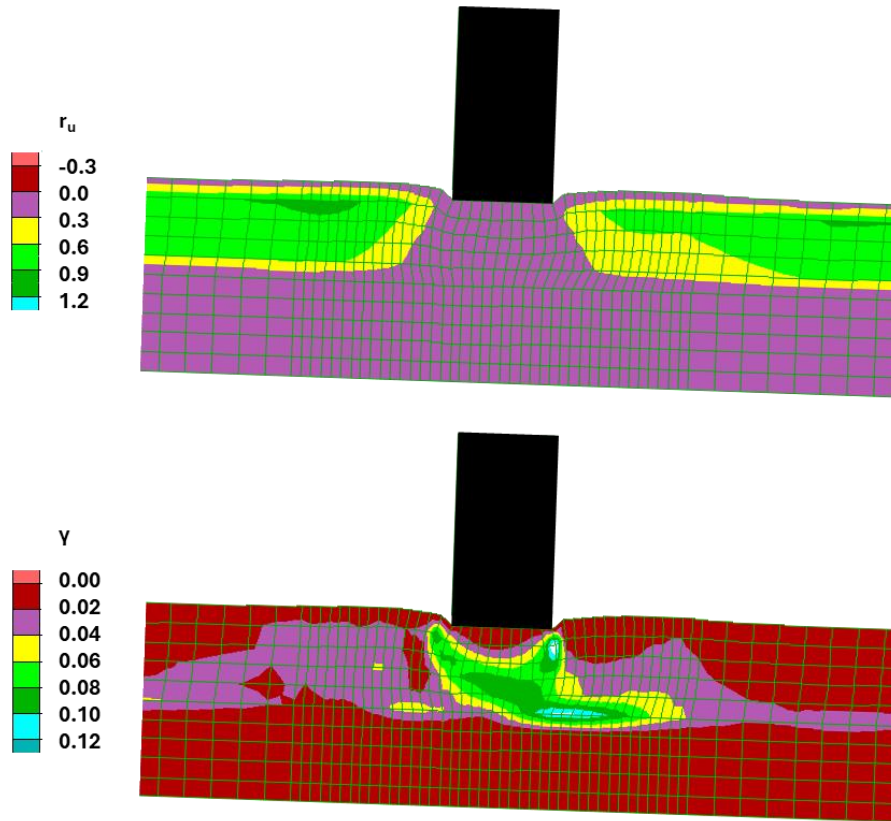
Σχήμα Α. 100: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



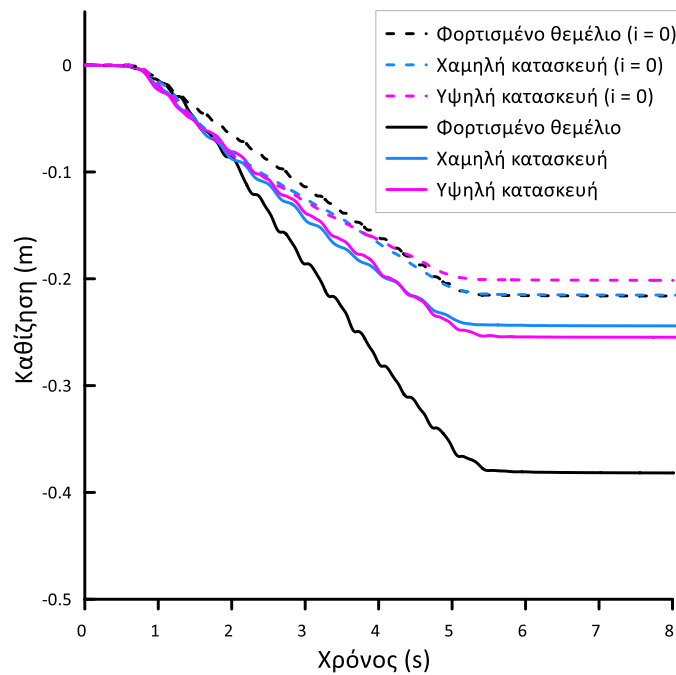
Σχήμα Α. 101: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 5$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



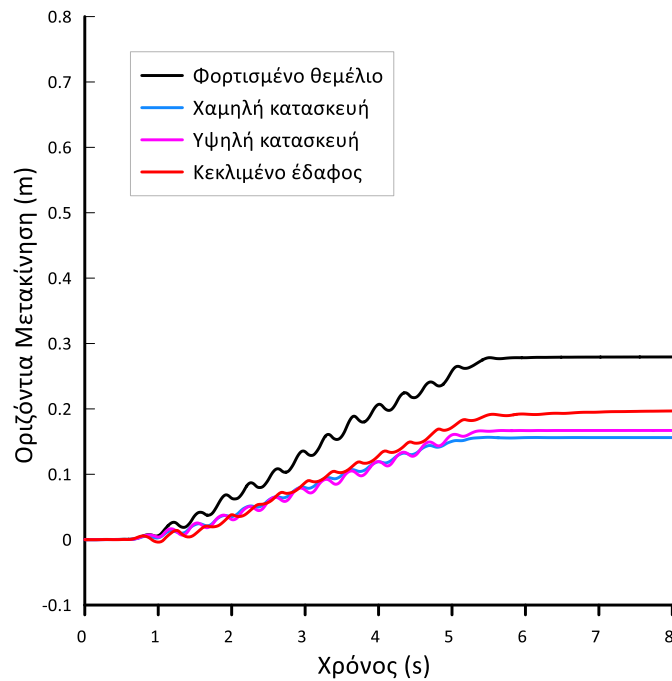
Σχήμα Α. 102: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



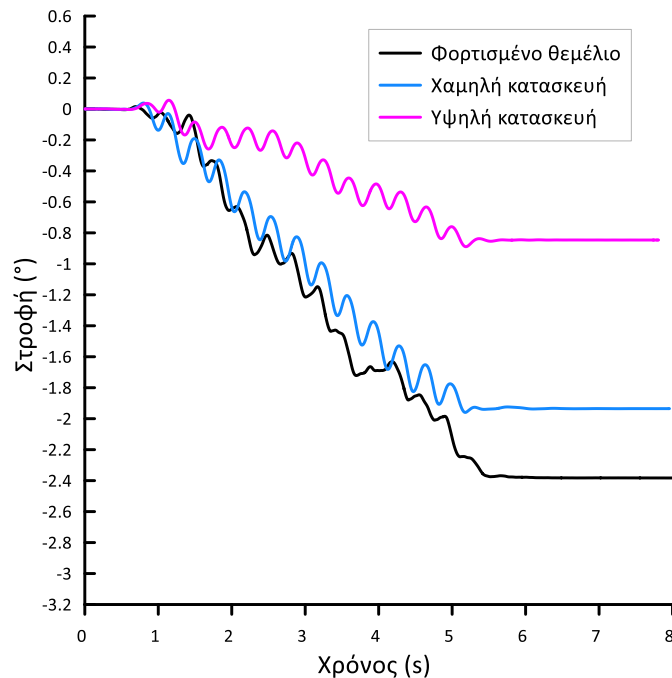
Σχήμα Α. 103: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



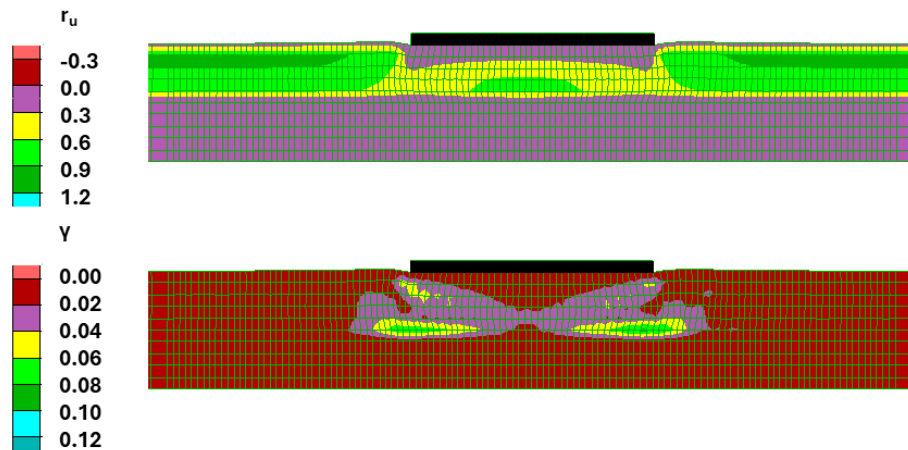
Σχήμα Α. 104: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



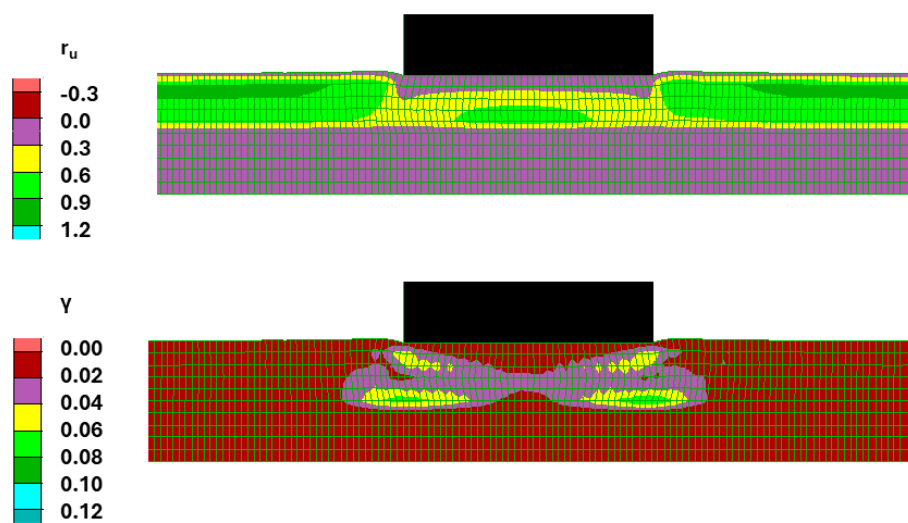
Σχήμα Α. 105: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



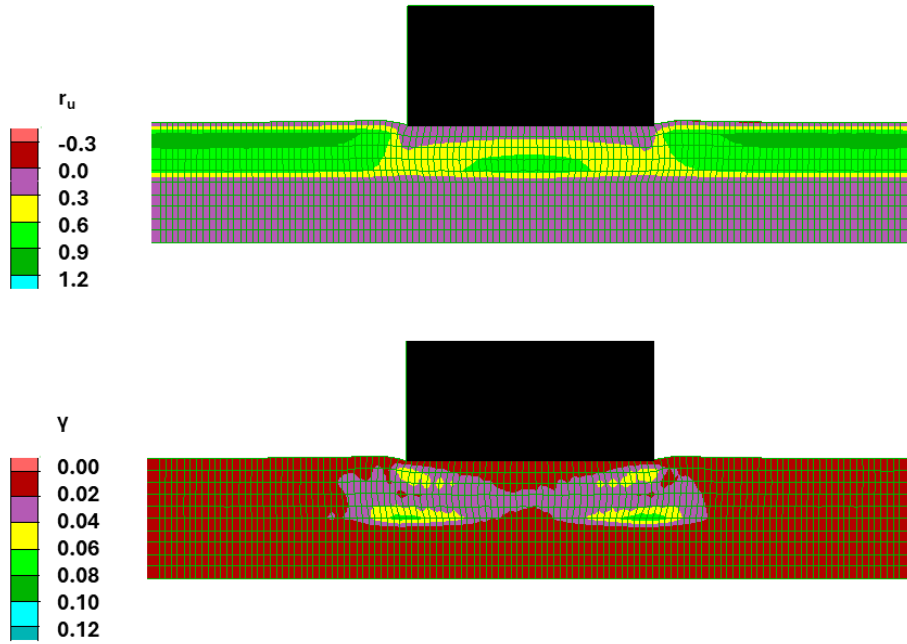
Σχήμα Α. 106: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 5$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



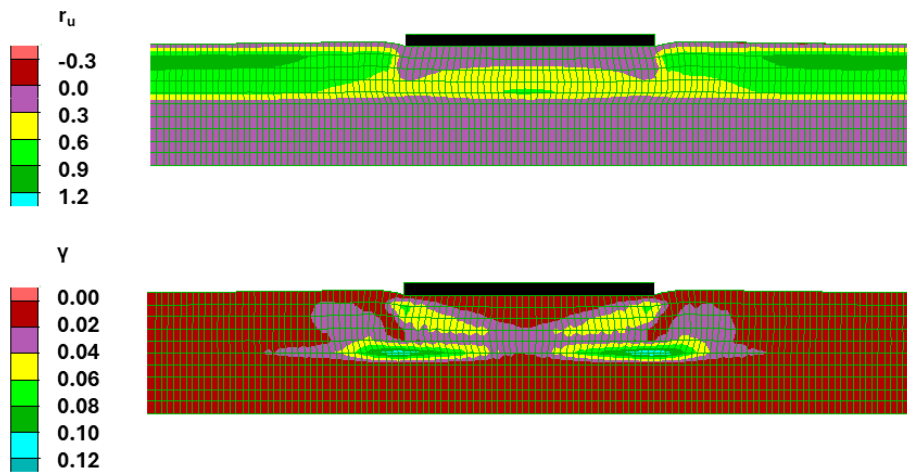
Σχήμα Α. 107: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



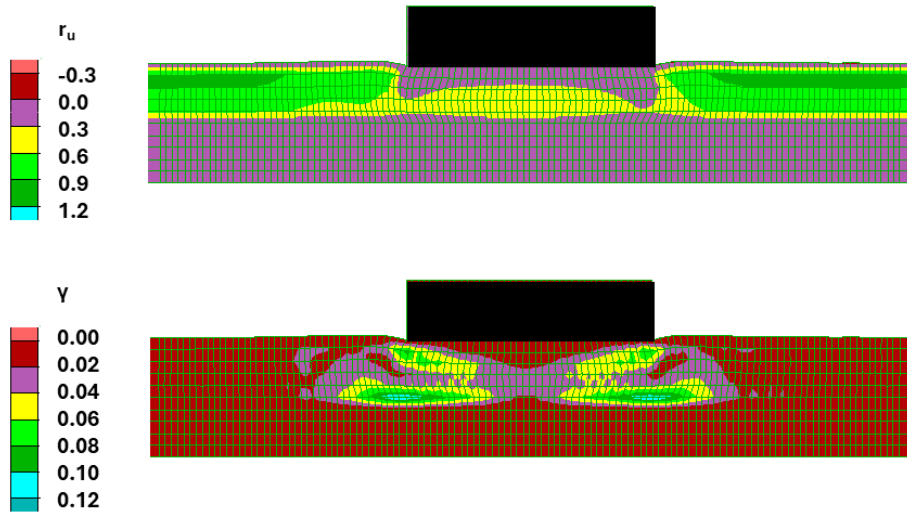
Σχήμα Α. 108: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



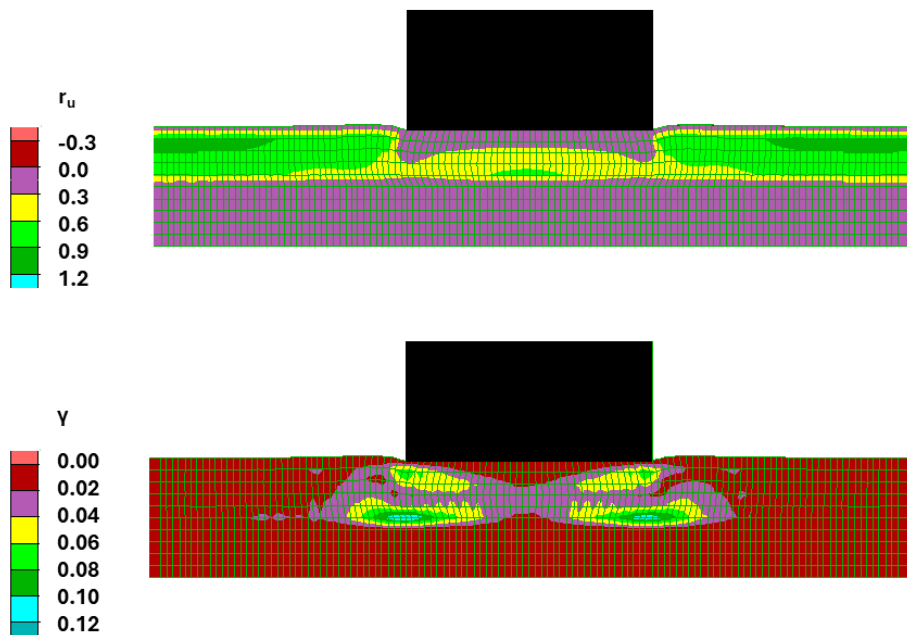
Σχήμα Α. 109: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



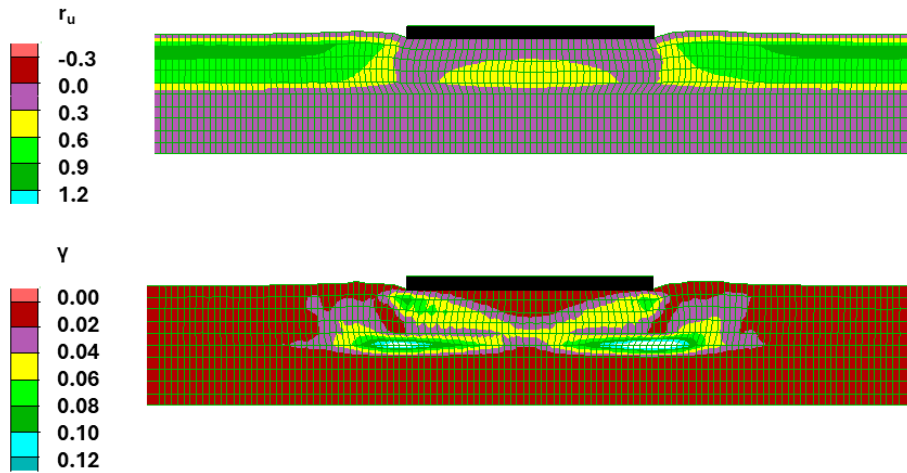
Σχήμα Α. 110: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



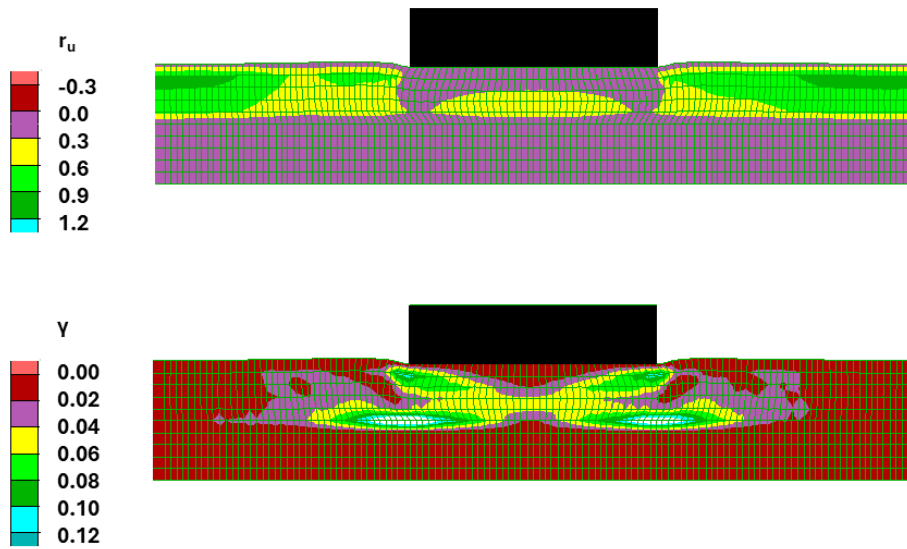
Σχήμα Α. 111: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



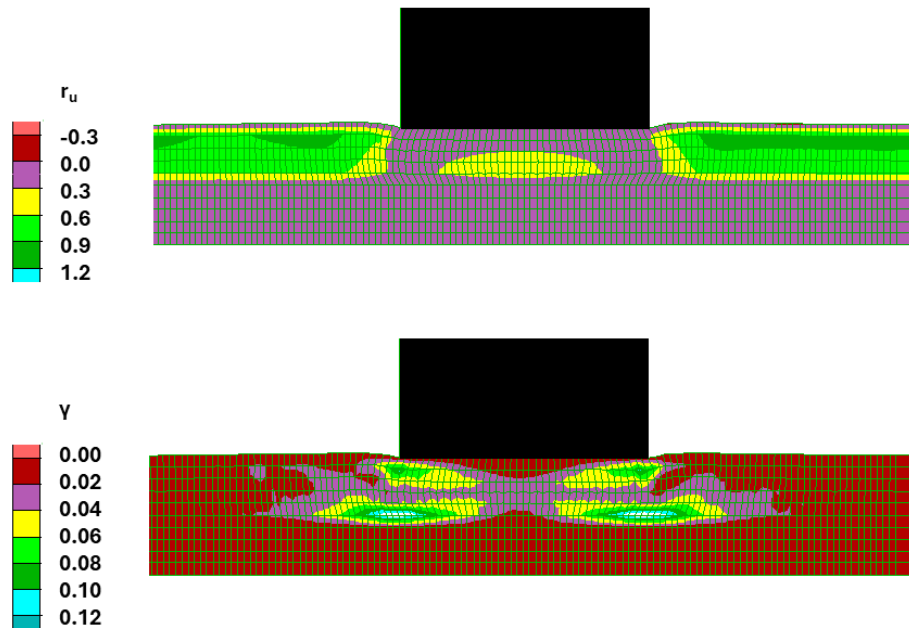
Σχήμα Α. 112: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



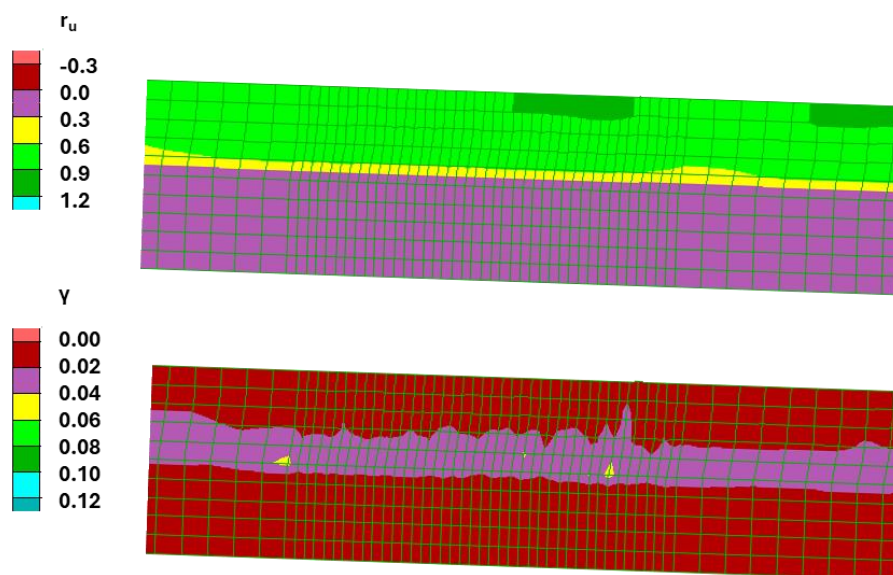
Σχήμα Α. 113: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



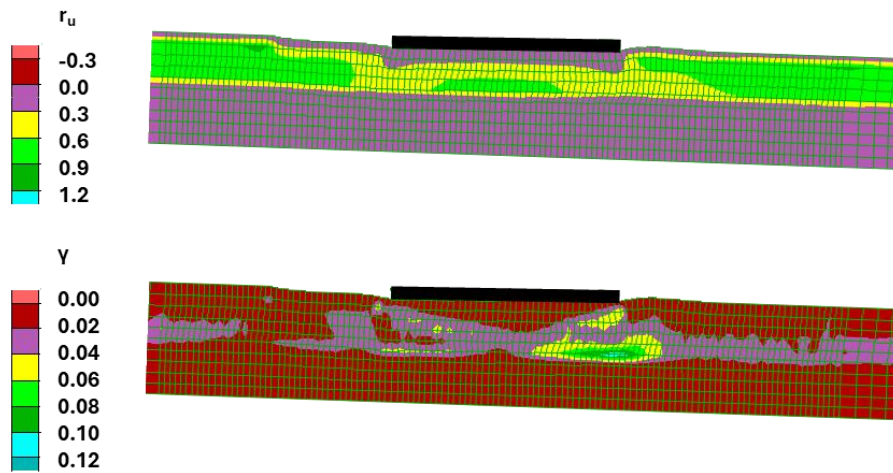
Σχήμα Α. 114: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.



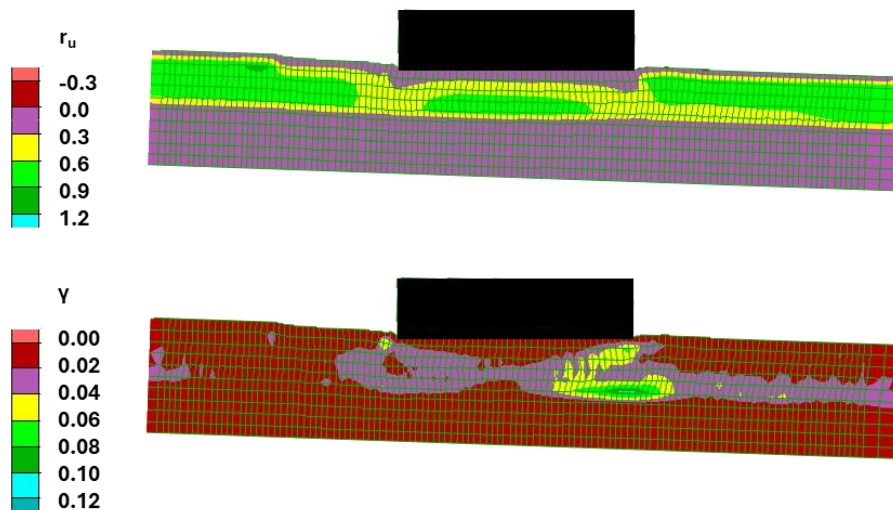
Σχήμα Α. 115: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



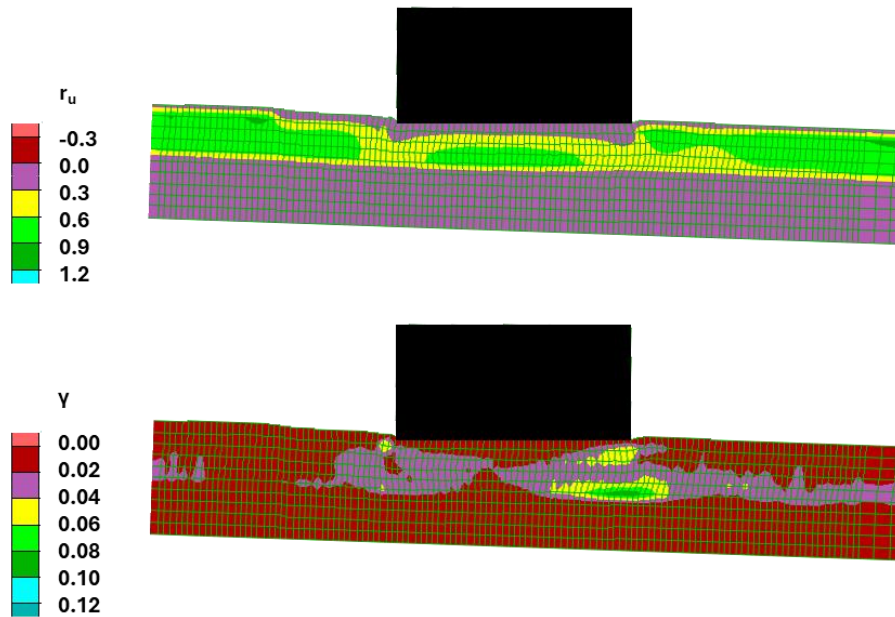
Σχήμα Α. 116: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m υπό γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



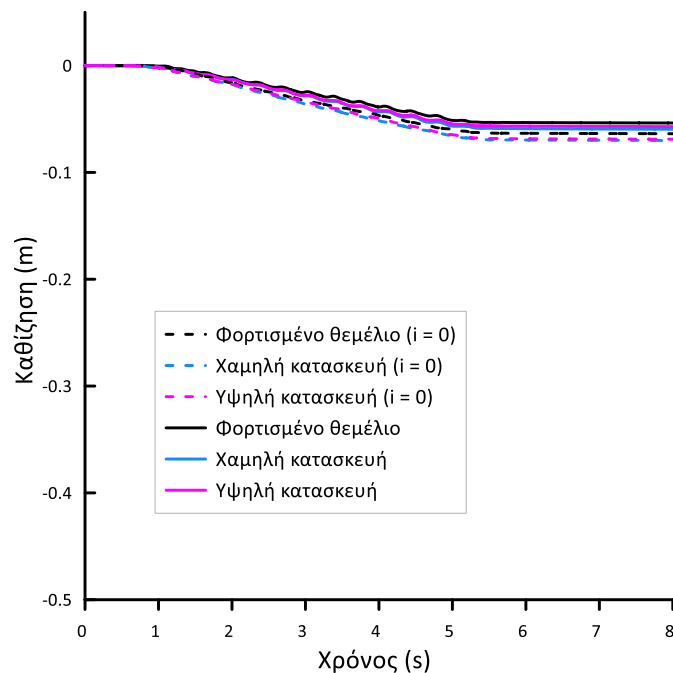
Σχήμα Α. 117: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



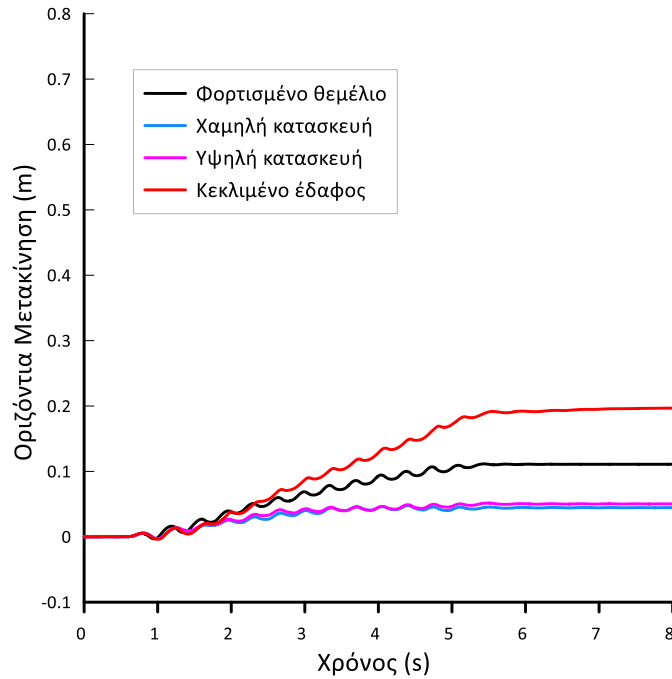
Σχήμα Α. 118: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



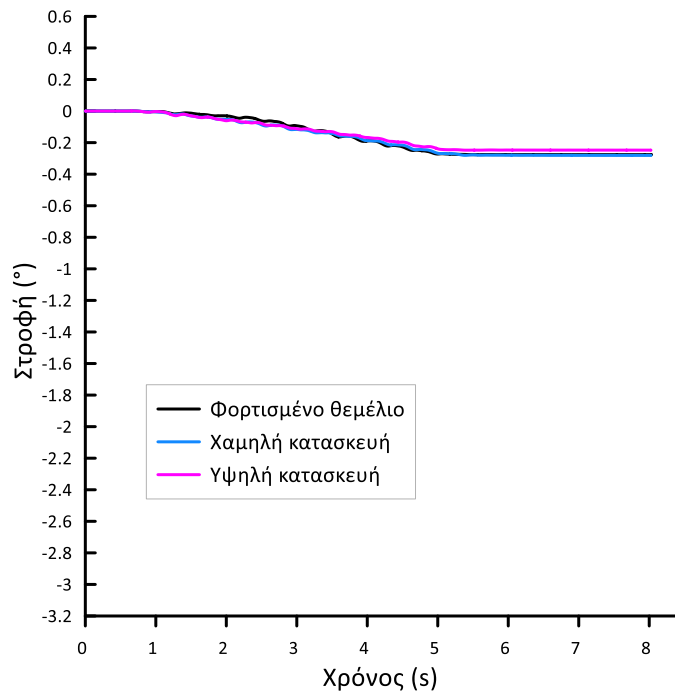
Σχήμα Α. 119: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



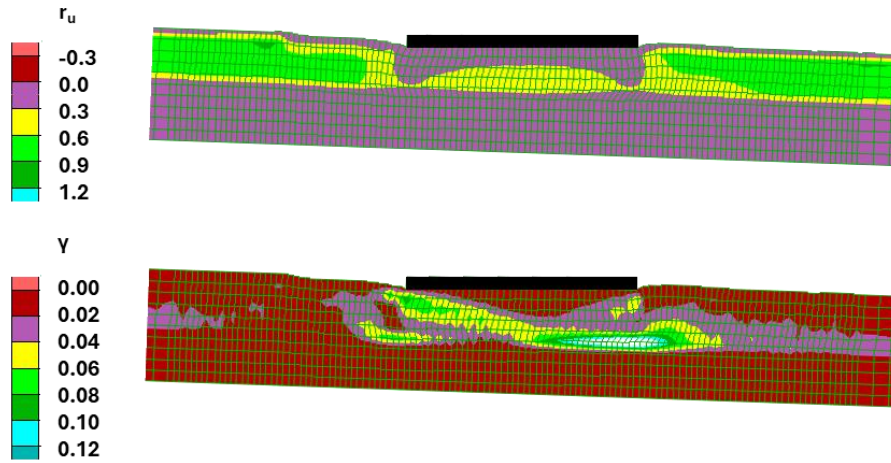
Σχήμα Α. 120: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνον του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



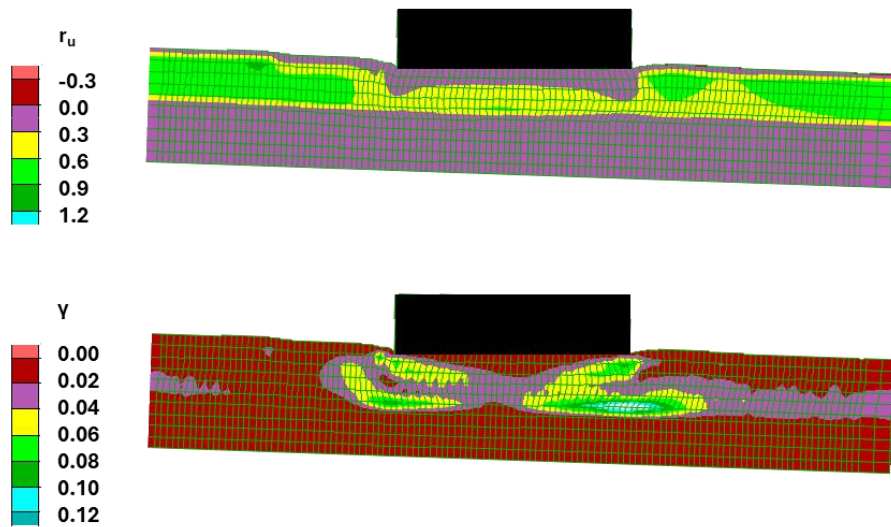
Σχήμα Α. 121: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



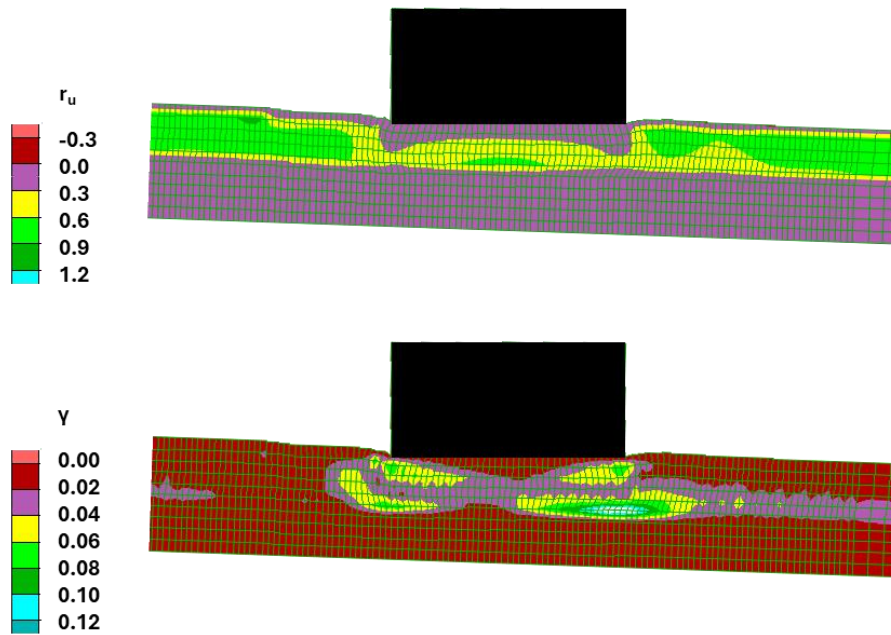
Σχήμα Α. 122: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 50$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



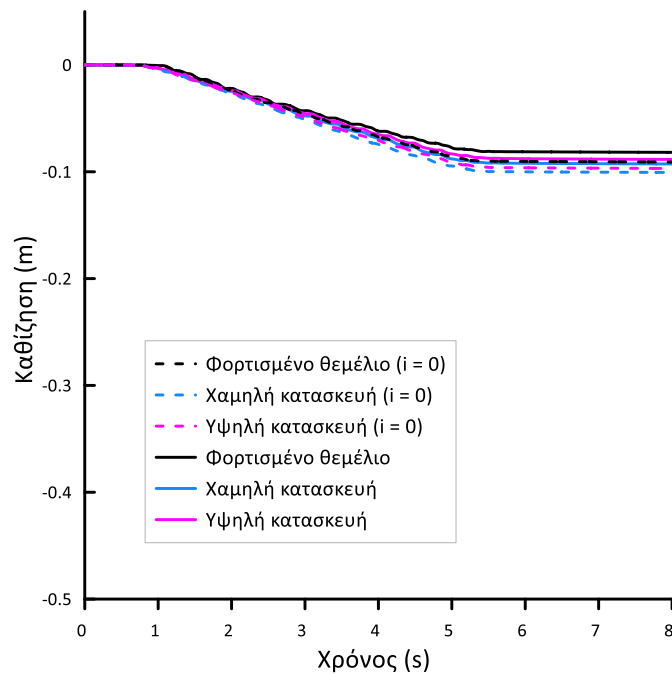
Σχήμα Α. 123: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



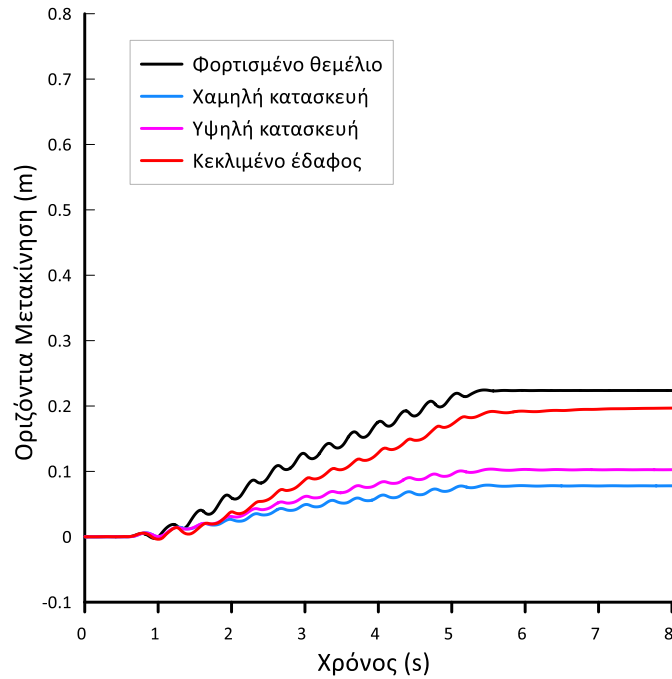
Σχήμα Α. 124: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



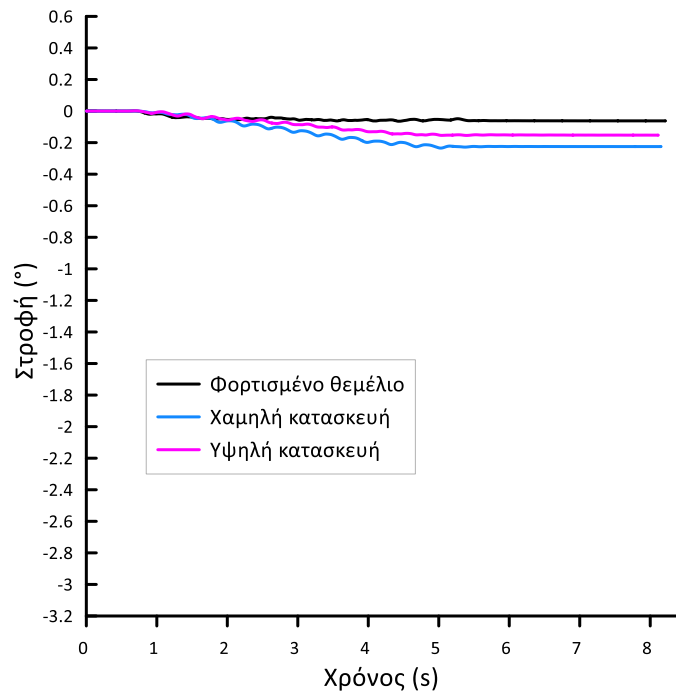
Σχήμα Α. 125: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



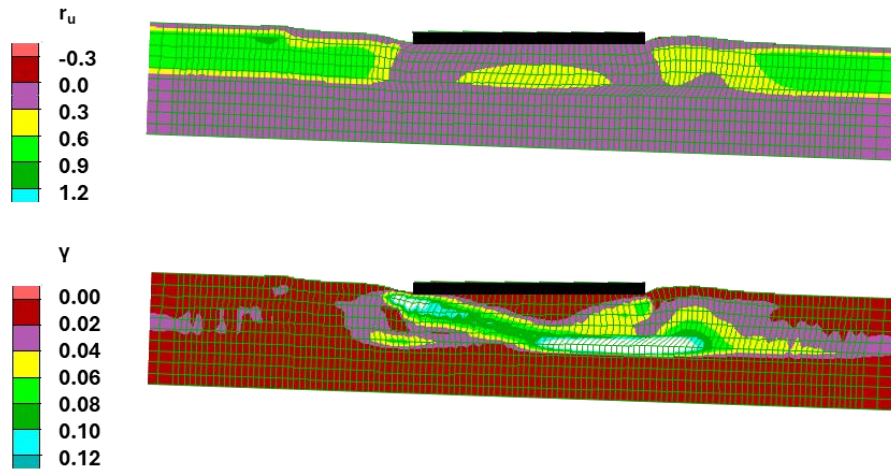
Σχήμα Α. 126: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



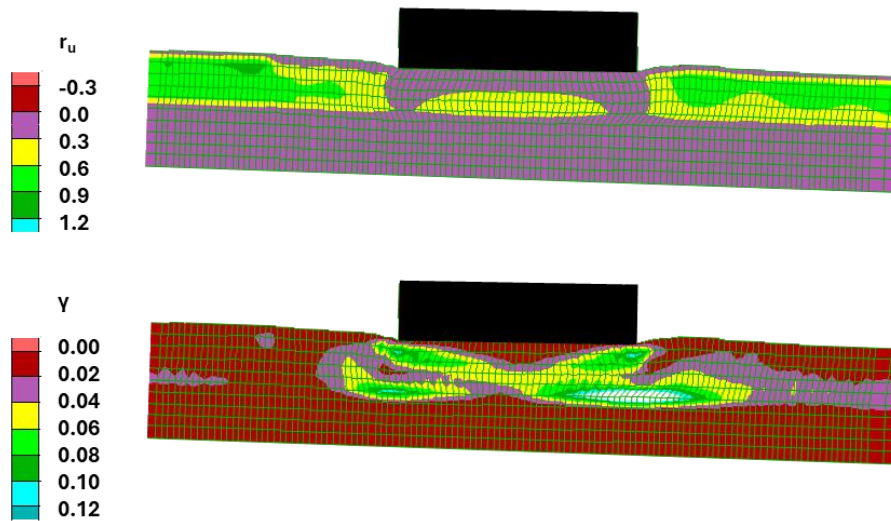
Σχήμα Α. 127: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



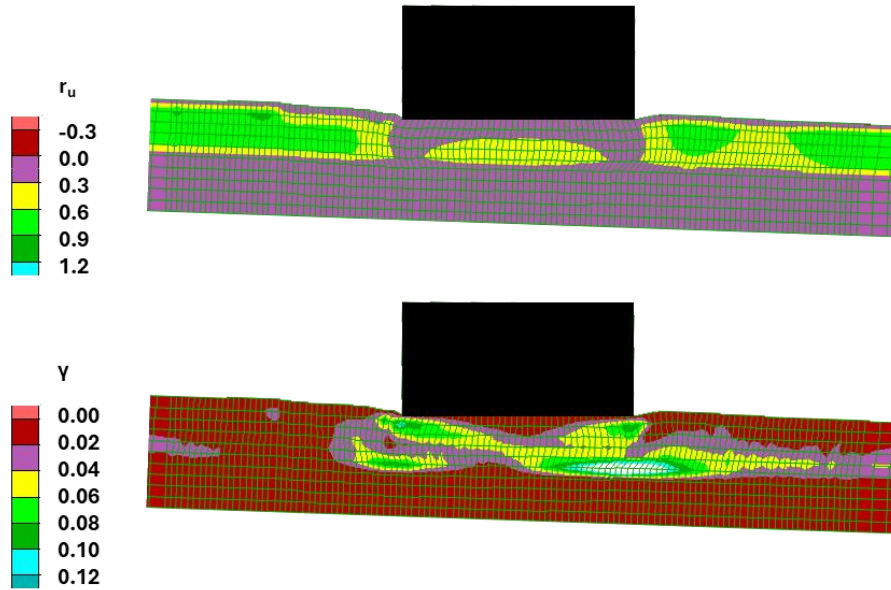
Σχήμα Α. 128: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 100$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



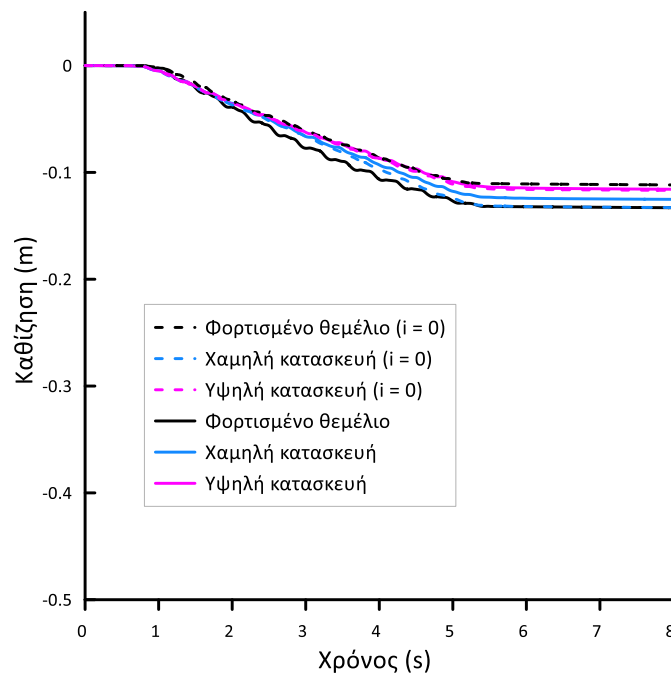
Σχήμα Α. 129: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για αβαρές θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



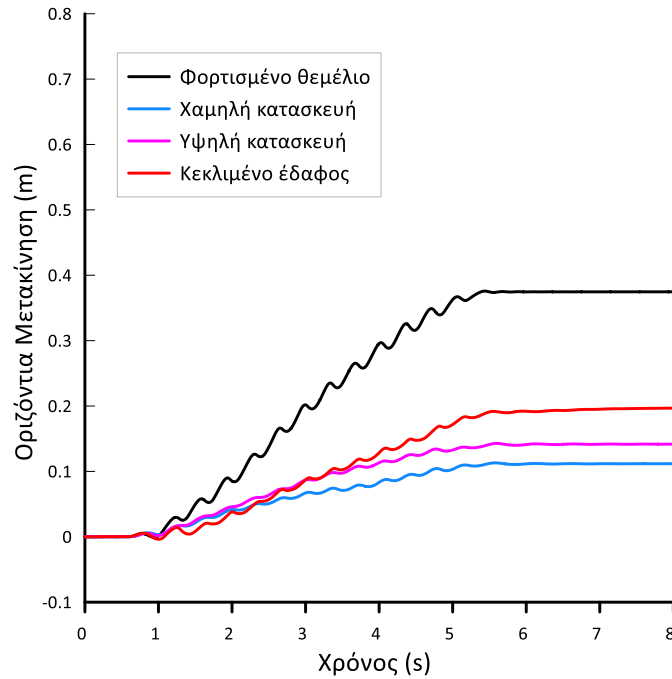
Σχήμα Α. 130: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για χαμηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



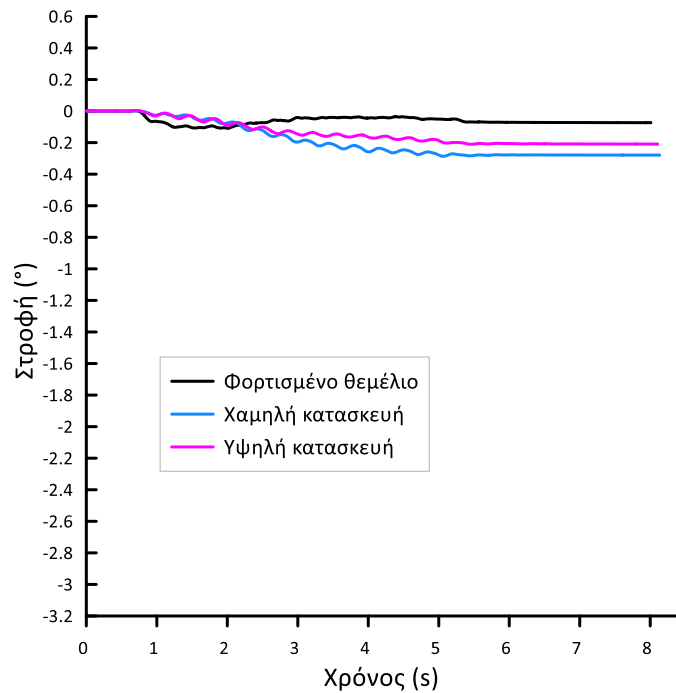
Σχήμα Α. 131: Ισοκαμπύλες λόγου υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης εδάφους γ , για υψηλή κατασκευή πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$, στο τέλος αρμονικής διέγερσης με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$.



Σχήμα Α. 132: Χρονοϊστορίες καθίζησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{\text{exc}} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με εκείνων του ίδιου θεμελίου και κατασκευών στην ίδια στρώση αν ήταν οριζόντια.



Σχήμα Α. 133: Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$ και σύγκριση με αυτή της ίδιας στρώσης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα Α. 134: Χρονοϊστορίες στροφής φορτισμένου θεμελίου χαμηλής και υψηλής κατασκευής πλάτους $B = 20$ m και ισοδύναμου φορτίου $q = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L = 5$ m και γωνία κλίσης $i = 2^\circ$ υπό αρμονική διέγερση με $a_{\max} = 0.2g$, $T_{exc} = 0.35$ s και $N = 10$.