

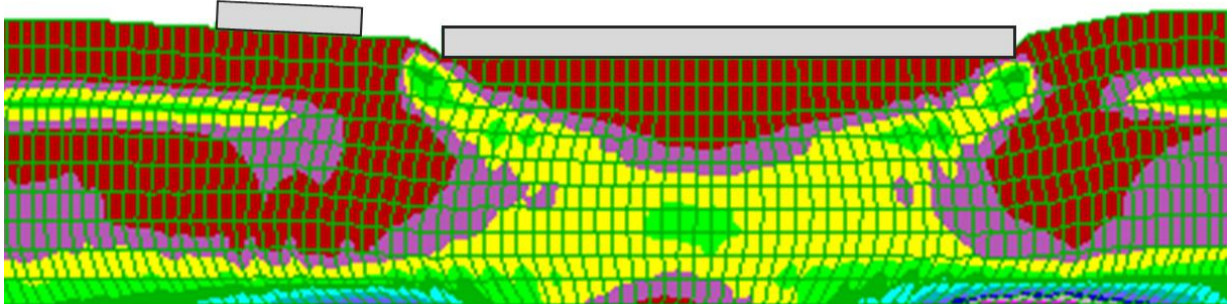


Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ-ΕΔΑΦΟΥΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΑ ΕΔΑΦΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΙΚΗ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΤΡΩΣΗ**

Μαρία Κ. Δημουλά

Επιβλέπων: **Αχιλλέας Γ. Παπαδημητρίου**, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ



Master Thesis

**STRUCTURE-SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN
LIQUEFIABLE SOILS WITH A CLAY CRUST**

Maria K. Dimoula

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

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία οφείλω ένα μεγάλο «ευχαριστώ» σε όλους εκείνους που με το δικό τους τρόπο με στήριξαν κατά την εκπόνησή της.

Πρώτα απ' όλους, στον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας, κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος ήταν σε διαρκή επικοινωνία μαζί μου, προκειμένου να ανταποκριθεί στους ερευνητικούς προβληματισμούς μου και να με καθοδηγήσει σε κάθε στάδιο της εργασίας. Η άριστη επιστημονική του κατάρτιση σε συνδυασμό με την εξαιρετική μεταδοτικότητα του συντέλεσαν στο να αποτελέσει η παρούσα εργασία μία πολύ εποικοδομητική διδακτική εμπειρία, την οποία θα ανακαλώ εκ των υστέρων με τις πιο ευχάριστες αναμνήσεις.

Σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου, Αθηνά και Κώστα, και τον αδερφό μου Θάνο, για την απεριόριστη στήριξη τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και γενικότερα για όλα όσα διαρκώς κάνουν με γνώμονα την δική μου ευτυχία.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, για την υπομονή και την ουσιαστική κατανόηση τους καθ' όλη την διάρκεια των τελευταίων δύο χρόνων. Ανάμεσα τους το μεγαλύτερο «ευχαριστώ» το οφείλω στον Δημήτρη, που είναι πάντα εκεί για να απαλύνει το άγχος μου και να υποστηρίξει έμπρακτα τις επιλογές μου.

Μαρία Δημουλά,

Ιούνιος 2022

Πρόσφατα ανεπτυγμένες μεθοδολογίες (π.χ. Dimitriadi et al. 2017, Karamitros et al. 2013b) έχουν καταφέρει να ποσοτικοποιήσουν τις παραμένουσες καθιζήσεις μεμονωμένων επιφανειακών κατασκευών λόγω σεισμικής ρευστοποίησης. Εντούτοις, είναι αμφίβολο αν οι μεθοδολογίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν ως έχουν σε περιπτώσεις γειτονικών κατασκευών, όπου η αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI, Structure – Soil – Structure Interaction) επηρεάζει τους μηχανισμούς ανάπτυξης μετακινήσεων (καθιζήσεων και στροφών) σε αυτές. Συνεπώς, η διεύρυνση χρήσης των υπάρχουσών μεθοδολογιών σε περιπτώσεις μη απομονωμένων θεμελίων μπορεί να καταστεί εφικτή μόνο αφού προηγηθεί η ποσοτικοποίηση της εν λόγω αλληλεπίδρασης.

Για τον σκοπό αυτό, η παρούσα εργασία διερευνά τη δυναμική αλληλεπίδραση ζεύγους άκαμπτων επιφανειακών θεμελιολωρίδων, εστιάζοντας στην περίπτωση όπου μεταξύ των κατασκευών και του ρευστοποιήσιμου εδάφους παρεμβάλλεται λεπτή επιφανειακή αργιλική στρώση. Τα μεγέθη ενδιαφέροντος που κυρίως αξιολογήθηκαν ήταν οι συσσωρευμένες καθιζήσεις z_{SSSI} και οι παραμένουσες στροφές θ καθενός εκ των δύο θεμελίων του ζεύγους, οι οποίες συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα μεγέθη όταν το κάθε θεμέλιο του ζεύγους είναι απομονωμένο, ήτοι την καθίζηση z και μηδενική στροφή ($\theta = 0$ λόγω ομοιόμορφης φόρτισης των θεμελίων). Εκτελέστηκαν συνολικά σαράντα μία (41) μη γραμμικές πλήρως συζευγμένες δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις με λογισμικό πεπερασμένων διαφορών (FLAC), για εδαφικό προφίλ αποτελούμενο από επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2m$ επί 8m άμμου σχετικής πυκνότητας $D_r = 45\%$. Σε όλες τις αναλύσεις υποβλήθηκε στη βάση της ρευστοποιήσιμης άμμου μια (οιωνεί) αρμονική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$ και περιόδου $T=0.35sec$. Τα καταστατικά προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους ήταν το Mohr-Coulomb για την άργιλο και το NTUA_SAND (Andrianopoulos et al. 2010) για την άμμο. Στην επιφάνεια θεωρήθηκαν αρχικά ένα ζεύγος θεμελίων ίδιου εύρους (στενών $B=5m$ και ευρέων $B=20m$) και ίδιου ομοιόμορφου φορτίου ($q=50kPa$) και ακολούθησαν αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1 = 5m$ και $B_2 = 20m$) με ίδιο ($q_1 = q_2 = 50kPa$) ή διαφορετικό φορτίο ($q_1 = 50kPa$ και $q_2 = 100kPa$). Άλλες παράμετροι ενδιαφέροντος ήταν η απόσταση D μεταξύ των θεμελίων του ζεύγους, η οποία έλαβε τιμές από 2.5m έως 40m, καθώς και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της άργιλου, η οποία πήρε δύο (2) τιμές $S_u=20kPa$ ή $40kPa$. Επιπλέον εκτελέστηκαν και είκοσι εννιά (29) στατικές αναλύσεις στα ίδια θεμέλια, με στόχο την αποτύπωση της

αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής στις στατικές καθιζήσεις και στη φέρουσα ικανότητα.

Στη συναξιολόγηση των ευρυμάτων συμπεριλήφθηκαν και αποτελέσματα από αναλύσεις όπου το έδαφος έδρασης είναι μια ομοιόμορφη άμμος πάχους $H = 10\text{m}$ και σχετικής πυκνότητας $D_r = 45\%$, δηλαδή με τα ίδια χαρακτηριστικά που είχε η άμμος πάχους 8m στις αναλύσεις με δίστρωτο έδαφος. Η πλειονότητα των αποτελεσμάτων αυτών αντλήθηκαν από τη Διπλωματική Εργασία της Τσεπελίδου (2021), η οποία υιοθέτησε την ίδια αριθμητική μεθοδολογία με την παρούσα εργασία.

Η διερεύνηση της στατικής αλληλεπίδρασης υπέδειξε ότι η γειτονία θεμελίων ή ακόμη και η σειρά κατασκευής τους επηρεάζει (μειώνει) ελαφρά τις στατικές καθιζήσεις, αλλά όχι τη (στατική) φέρουσα ικανότητα αυτών. Αυτή η μείωση των καθιζήσεων προκύπτει μη ουσιώδης για συνήθεις συντελεστές ασφαλείας (π.χ. $FS=3$), ενώ σε κάθε περίπτωση φθίνει με την απόσταση, μέχρι να εξαλειφθεί για τιμές $D \geq 40\text{m}$. Αντίστοιχα και η δυναμική αλληλεπίδραση φθίνει με την απόσταση, και ειδικά εάν υπάρχει ουσιώδης αργιλική κρούστα (π.χ. πάχους $H_c=2\text{m}$) είναι μη σημαντική για ενδιάμεσες αποστάσεις $D \geq 20\text{m}$. Εάν όμως δεν υπάρχει αργιλική κρούστα, τότε η αντίστοιχη απόσταση είναι μεγαλύτερη (π.χ. $D \geq 40\text{m}$). Σε όρους καθιζήσεων, στις περισσότερες περιπτώσεις (80%) προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση ($z_{SSSI}/z < 1$), με μέση τιμή των ευμενών λόγων καθιζήσεων $\mu=0.80$ και τυπική απόκλιση $\sigma=0.23$, αν και για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ($D \leq 10\text{m}$) ο λόγος $z_{SSSI}/z = 0.74 \pm 0.26$. Συστηματική εξαίρεση αποτελούν τα βαριά θεμέλια (φορτίου $q \geq 100\text{kPa}$) σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ($D \leq 10\text{m}$), όπου παρατηρείται δυσμενής αλληλεπίδραση, χωρίς ωστόσο να παρατηρείται σημαντική προσαύξηση καθιζήσεων, συγκριτικά με την καθίζηση των μεμονωμένων θεμελίων ($z_{SSSI}/z = 1.13 \pm 0.09$). Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να υπάρξει και πολύ ευμενής αλληλεπίδραση (π.χ. $z_{SSSI}/z = 0.07$) αλλά μόνο για στενά θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$ με γειτονικό ευρύ μεγαλύτερου φορτίου. Ως προς τις παραμέτρους που καθορίζουν την δυναμική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, οι σημαντικότερες είναι το φορτίο του θεμελίου q και το εάν υπάρχει ουσιώδης αργιλική κρούστα. Ακολουθούν κατά σειράς σπουδαιότητας, το εύρος του εξεταζόμενου θεμελίου B , και η τιμή των λόγων B/B_n και q/q_n , όπου B_n και q_n είναι το εύρος και το φορτίο του γειτονικού (neighboring) θεμελίου. Τέλος, όσον αφορά στις παραμένουσες στροφές, εκείνες είναι ουσιώδεις μόνο στα στενά θεμέλια (π.χ. εδώ έως και 1.2° κατ' απόλυτη τιμή) ενώ προκύπτουν πρακτικά μηδενικές για τα ευρέα. Οι στροφές των στενών θεμελίων τείνουν να είναι συγκλίνουσες προς το γειτονικό θεμέλιο για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (π.χ. $D=2.5\text{m}$) και αντίθετης φοράς για μεγαλύτερες (π.χ. $D=10\text{m}$).

Recently developed methodologies (e.g. Dimitriadi et al. 2017, Karamitros et al. 2013b) allow for the computation of permanent settlements of isolated surface structures due to seismic liquefaction. However, the usage of these methodologies in their present form is doubtful in cases of adjacent structures, where structure – soil – structure interaction (SSSI) affects their displacement (settlement and rotation) mechanisms. Thus, the use of the existing methodologies in cases of non-isolated shallow footings could only be made possible with the quantification of the aforementioned interaction effects.

For this purpose, the present study investigates the seismic interaction of a pair of rigid strip footings, focusing on the case where a thin clay crust lies between the foundation and the liquefiable subsoil. The measures of interest that were mainly examined are the seismic settlements z_{SSSI} and the permanent rotation θ of each of the two footings, in comparison to their corresponding values if the same footings were isolated, i.e., their settlement z and zero rotation ($\theta=0$ due to uniform footing loading). A total of forty-one (41) nonlinear fully-coupled dynamic numerical analyses were performed with a finite difference code (FLAC), for a soil profile consisting of a surface clay layer with thickness $H_c=2\text{m}$ over an 8m thick sand layer with relative density $D_r = 45\%$. In all analyses, an (approximately) harmonic excitation of amplitude $a_{\max}=0.2g$ and period $T=0.35\text{sec}$ was applied to the bottom of the liquefiable sand. The constitutive models that were used for the simulation of the soil behavior, were the Mohr-Coulomb for the clay layer and the NTUA_SAND (Andrianopoulos et al. 2010) for the sand layer. Firstly, a pair of surface footings of the same width (narrow $B=5\text{m}$ and wide $B=20\text{m}$) and the same uniform load ($q=50\text{kPa}$) were considered, and then additional analyses studied pairs of footings with different width ($B_1 = 5\text{m}$ and $B_2 = 20\text{m}$) with the same ($q_1 = q_2 = 50\text{kPa}$) or different uniform load ($q_1 = 50\text{kPa}$ and $q_2 = 100\text{kPa}$). Other parameters of interest were the distance D between the two footings of the pair, which took values from 2.5m to 40m, as well as the undrained shear strength of the clay which took two (2) values, $S_u=20\text{kPa}$ or 40kPa . Moreover, twenty-nine (29) static analyses were performed for the same footings, in order to identify structure – soil – structure interaction in terms of static settlements and bearing capacity.

For the evaluation of these findings, results from analyses for a uniform layer of sand with thickness $H = 10\text{m}$ and relative density $D_r = 45\%$, i.e., with the same properties as the 8m thick sand of the two-layered profile, were taken into account. Most of these results were extracted

from the Diploma Thesis of Tsepelidou (2021) which followed the same numerical methodology with the present study.

The investigation of the static interaction showed that having a neighboring footing, or constructing a footing later than an existing one reduces slightly its static settlements, but does not affect its bearing capacity. This reduction of settlements is not significant for common factors of safety (e.g., $FS=3$) and in all cases becomes less important as distance increases, until it vanishes for values of $D \geq 40\text{m}$. Correspondingly, dynamic interaction reduces as distance increases and specifically in cases where a substantial clay crust exists (e.g., with thickness $H_c=2\text{m}$) it becomes unimportant for distances $D \geq 20\text{m}$. However, if a clay crust does not exist, the corresponding distance is larger (e.g., $D \geq 40\text{m}$). In terms of settlements, in most cases (80%) the interaction is favorable ($z_{SSSI}/z < 1$), with the mean value of the beneficial settlement ratios to be $\mu=0.80$ and the standard deviation $\sigma=0.23$, although for smaller distances ($D \leq 10\text{m}$) the average settlement ratio is slightly lower. By exception, footings with a heavy load ($q \geq 100\text{kPa}$) at small distances ($D \leq 10\text{m}$), show systematically an unfavorable interaction, although the observed increase is not extremely significant, in comparison to the settlements of the isolated footings ($z_{SSSI}/z = 1.13 \pm 0.09$). In some cases, extremely favorable interaction can occur (e.g. $z_{SSSI}/z = 0.07$) but only for narrow footings adjacent to wider footings with a heavier load. Regarding the parameters that govern seismic interaction in terms of settlements, the most important of them are the load of the footing q and whether a significant clay crust exists. These are followed, in descending order of importance, by the width of the examined footing B , and the values of ratios B/B_n and q/q_n , where B_n and q_n are the width and the load of the neighboring footing. Finally, in regards to the permanent rotations, these may be important only for narrow footings (e.g., here up to 1.2° in absolute value) whereas they are practically zero for wide footings. Specifically, narrow footings tend to rotate towards the neighboring footing for small distances (e.g., $D=2.5\text{m}$) and towards the opposite direction for larger distances (e.g., $D=10\text{m}$).

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή.....	1
1.1	Αντικείμενο.....	1
1.2	Διάρθρωση	2
2.	Βιβλιογραφική Αναδρομή	4
2.1	Γενικά	4
2.2	Αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης.....	4
2.3	Απόκριση μεμονωμένου επιφανειακού θεμελίου επί δίστρωτου εδάφους υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης	14
3.	Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων	20
3.1	Γενικά	20
3.2	Αριθμητική Μεθοδολογία	21
3.2.1	Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC	21
3.2.2	Καταστατικό Προσομοίωμα NTUA_SAND	22
3.2.3	Εδαφικά Χαρακτηριστικά	23
3.2.4	Θεμέλια	24
3.2.5	Διακριτοποίηση Καννάβου	25
3.2.6	Συνοριακές Συνθήκες-Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα	26
3.2.7	Σεισμική Διέγερση – Απόσβεση.....	27
3.2.8	Παραμετρική Διερεύνηση.....	28
3.2.9	Στατικές Αναλύσεις υπολογισμού της Φέρουσας Ικανότητας.....	30
4.	Αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων	32
4.1	Γενικά	32
4.2	Στατική αλληλεπίδραση	34
4.2.1	Αλληλεπίδραση στενών θεμελίων.....	34
4.2.2	Αλληλεπίδραση ευρέων θεμελίων	39
4.2.3	Επίδραση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργίλου	43
4.3	Δυναμική αλληλεπίδραση	49
4.3.1	Αλληλεπίδραση στενών θεμελίων.....	49
4.3.2	Αλληλεπίδραση ευρέων θεμελίων	55
4.3.3	Επίδραση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργίλου	59
4.4	Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης δίδυμων θεμελίων.....	69

5.	Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού εύρους	72
5.1	Γενικά	72
5.2	Στατική αλληλεπίδραση	74
5.3	Δυναμική αλληλεπίδραση	79
5.3.1	Αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων ίδιου φορτίου	79
5.3.2	Αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού φορτίου	89
5.4	Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης θεμελίων διαφορετικού εύρους.....	99
6.	Δυναμική αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελίων	102
6.1	Γενικά	102
6.2	Απόκριση σε όρους καθιζήσεων.....	103
6.2.1	Γενικά.....	103
6.2.2	Θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$	104
6.2.3	Θεμέλια φορτίου $q=100\text{kPa}$	108
6.2.4	Θεμέλια φορτίου $q=200\text{kPa}$	111
6.3	Απόκριση σε όρους στροφών	113
6.3.1	Γενικά.....	113
6.3.2	Θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$	113
6.3.3	Θεμέλια φορτίου $q=100\text{kPa}$	116
6.3.4	Θεμέλια φορτίου $q=200\text{kPa}$	117
6.4	Σύνοψη δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων	118
7.	Συμπεράσματα-Προτάσεις	122
7.1	Βασικά συμπεράσματα	122
7.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	125
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	127

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Η σεισμική ρευστοποίηση κορεσμένων μη-συνεκτικών εδαφών μπορεί να αποβεί καταστροφική για τις υπερκείμενες επιφανειακές κατασκευές, οδηγώντας στη συσσώρευση μη αποδεκτών παραμενουσών καθιζήσεων ή και στροφών. Εντούτοις, πρόσφατη έρευνα (π.χ. Dimitriadi et al. 2017, Karamitros et al. 2013b) έχει δείξει ότι ο ικανοτικός σχεδιασμός μεμονωμένων επιφανειακών θεμελίων σε καθεστώς ρευστοποίησης, για οριζόντιο έδαφος με ή χωρίς επιφανειακή αργιλική κρούστα, μπορεί να καταστεί εφικτός μέσω της επιλογής κατάλληλων διαστάσεων και φορτίου των θεμελίων. Σε αστικά περιβάλλοντα όμως, όπου οι κατασκευές βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, η αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI, Structure – Soil – Structure Interaction) επηρεάζει τους μηχανισμούς ανάπτυξης μετακινήσεων (καθιζήσεων και στροφών) σε αυτές, καθιστώντας αμφίβολο εάν οι υπάρχουσες μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς κάποιου ή κάποιων διορθωτικών συντελεστών που θα ποσοτικοποιούν την εν λόγω αλληλεπίδραση.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη της δυναμικής αλληλεπίδρασης ζεύγους επιφανειακών θεμελίων, όταν μεταξύ των θεμελίων και του ρευστοποιήσιμου εδάφους παρεμβάλλεται λεπτή επιφανειακή αργιλική στρώση. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψιν προηγούμενη έρευνα που αναφέρεται στο ίδιο αντικείμενο αλλά για θεμέλια εδραζόμενα σε ομοιόμορφο ρευστοποιήσιμο εδαφικό προφίλ (Τσεπελίδου 2021), διερευνώνται εδώ οι παράμετροι που καθορίζουν την δυναμική αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελίων για διάφορες περιπτώσεις στρωματογραφίας του εδάφους έδρασης, διάφορους συνδυασμούς εύρους και φορτίων θεμελίων ευρισκόμενα σε διάφορες μεταξύ τους αποστάσεις. Απώτερος στόχος είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας εκτίμησης διορθωτικών συντελεστών στις υπάρχουσες μεθοδολογίες απόκρισης μεμονωμένων θεμελίων, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI).

1.2 Διάρθρωση

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 7 Κεφάλαια. Ειδικότερα, μετά το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο ακολουθεί το **Κεφάλαιο 2**, όπου παρουσιάζονται πρόσφατες έρευνες που αφορούν στη δυναμική αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελιώσεων υπό καθεστώς ρευστοποίησης, καθώς και μία μεθοδολογία εκτίμησης των σεισμικών καθιζήσεων μεμονωμένου επιφανειακού θεμελίου εδραζόμενου επί ρευστοποιήσιμου εδάφους με επιφανειακή αργιλική στρώση που είναι η κύρια έμφαση στην παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται αναλυτική περιγραφή της αριθμητικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των δισδιάστατων αναλύσεων με το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca Inc. 2011). Πιο συγκεκριμένα, δίνονται πληροφορίες σχετικά με το χρησιμοποιούμενο λογισμικό, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία και οι παραδοχές που έγιναν για την προσομοίωση της απόκρισης ζεύγους επιφανειακών θεμελιώσεων επί ρευστοποιήσιμου εδάφους με επιφανειακή αργιλική κρούστα.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διερεύνησης της δυναμικής αλληλεπίδρασης θεμελιολωρίδων ίδιου πλάτους και φορτίου (δηλαδή δίδυμων θεμελίων), για έδραση επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενου από ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση και αργιλική στρώση στην επιφάνεια. Γίνεται παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του εύρους των δίδυμων θεμελίων, της ενδιάμεσης απόστασης καθώς και της αντοχής της επιφανειακής αργίλου. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και στροφών των θεμελίων. Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος της σεισμικής αλληλεπίδρασης, στο ίδιο κεφάλαιο μελετάται αρχικώς το πρόβλημα της στατικής αλληλεπίδρασης για ίδιο εύρος θεμελίων, ενδιάμεσες αποστάσεις και χαρακτηριστικά του εδάφους έδρασης. Η στατική αλληλεπίδραση μελετάται σε όρους καθιζήσεων και φέρουσας ικανότητας.

Το **Κεφάλαιο 5** ακολουθεί επακριβώς τη δομή του Κεφαλαίου 4 με τη μόνη διαφορά πως εξετάζεται η στατική και δυναμική αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελιολωρίδων διαφορετικού εύρους, για έδραση επί του ίδιου δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση πραγματοποιείται για ζεύγη ίδιου αλλά και διαφορετικού φορτίου, μελετώντας την επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης στην απόκριση των δύο θεμελίων.

Ακολούθως, στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων, για έδραση επί ρευστοποιήσιμου εδάφους με ή χωρίς επιφανειακή αργιλική κρούστα. Κύριος στόχος είναι να εκτιμηθούν οι σημαντικές

παράμετροι που καθορίζουν την αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και στροφών, το πώς αυτές επιδρούν στα μεγέθη ενδιαφέροντος, αλλά και η απόσταση για την οποία η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο γειτονικών θεμελίων εξαλείφεται. Η διερεύνηση πραγματοποιείται μέσω συγκεντρωτικών γραφημάτων που συνοψίζουν τα αποτελέσματα από όλες τις αναλύσεις.

Τέλος στο **Κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Αναδρομή

2.1 Γενικά

Στόχος του παρόντος Κεφαλαίου είναι η ανασκόπηση πρόσφατων δημοσιεύσεων από τη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την απόκριση αβαθών θεμελιώσεων σε περιοχές με έντονα φαινόμενα ρευστοποίησης. Το ενδιαφέρον εστιάζεται σε έρευνες που αφορούν το πιο σύνθετο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής (SSSI) υπό καθεστώς ρευστοποίησης, το οποίο αποτελεί άλλωστε και αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας. Για το σκοπό αυτό συνοψίζονται αποτελέσματα της διερεύνησης μέσω δυναμικών δοκιμών φυγοκεντρική αλλά και μέσω αριθμητικών αναλύσεων, μία μέθοδο που επιτρέπει την συστηματικότερη διερεύνηση των παραμέτρων που επιδρούν στο πρόβλημα. Η έμφαση δίνεται στην αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής (SSSI) σε όρους καθιζήσεων και στροφών των θεμελίων, και δευτερευόντως στη σεισμική διέγερση που φτάνει στην ανωδομή.

Επιπρόσθετα, γίνεται εκτενής αναφορά σε μία μεθοδολογία εκτίμησης των σεισμικών καθιζήσεων μεμονωμένου επιφανειακού θεμελίου εδραζόμενου επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενου από επιφανειακή αργιλική κρούστα και ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση. Απώτερος στόχος είναι η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν την απόκριση ενός απομονωμένου θεμελίου σε τέτοιες συνθήκες, δηλαδή της απόκρισης αναφοράς στο πιο σύνθετο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής (SSSI) στις ίδιες συνθήκες, και το οποίο διερευνάται στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία.

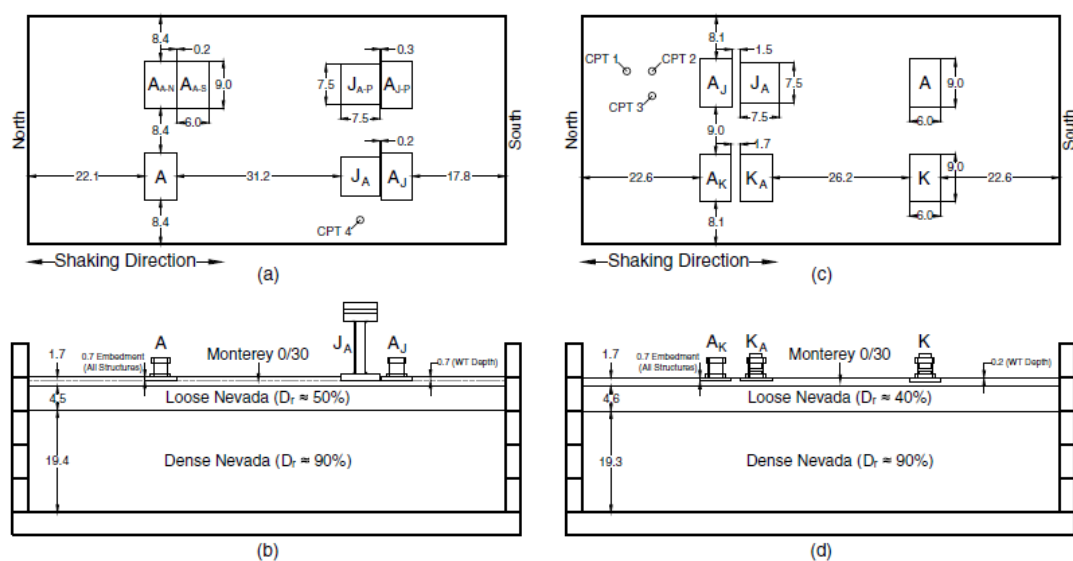
2.2 Αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης

Οι Hayden et al. (2015) μελέτησαν την δυναμική απόκριση απομονωμένων και γειτονικών κατασκευών υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης, μέσω της διεξαγωγής δυναμικών

πειραμάτων φυγοκεντριστή σε κορεσμένα ανομοιόμορφα εδαφικά προφίλ. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποίησαν δύο (2) πειράματα φυγοκεντριστή, όπου το εδαφικό προφίλ αποτελούνταν από μη-ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση (πάχους περίπου 20m) και στην επιφάνεια (πάχους περίπου 2m), ενώ ενδιάμεσα των μη-ρευστοποιήσιμων στρώσεων υπήρχε χαλαρή ρευστοποιήσιμη άμμος ενδιάμεσου πάχους (περίπου 4.5m) αλλά διαφορετικής σχετικής πυκνότητας ($D_r=40\%$ και $D_r=50\%$) για τα δύο πειράματα (T4.6-40 και T4.5-50, αντίστοιχα). Διερευνήθηκε η απόκριση τριών (3) προσομοιωμάτων κατασκευών (A,J και K) με διαφορετικά ύψη, ιδιοπεριόδους και φορτία έδρασης, ενώ η αλληλεπίδραση μεταξύ των κατασκευών μελετήθηκε για διαφορετικούς συνδυασμούς προσομοιωμάτων κατασκευών και απόστασης μεταξύ τους (από 0.2m έως 1.5m). Τέλος, προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην απόκριση των ανωδομών, εφαρμόστηκαν τέσσερις (4) σεισμικές δονήσεις στην βάση του φυγοκεντριστή, διαφορετικής έντασης αλλά και διάρκειας των σημαντικών κύκλων δόνησης (small Port Island, moderate Port Island, large Port Island και moderate TCU). Τα χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων των κατασκευών δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.1, ενώ στο Σχήμα 2.1 δίνεται σκαρίφημα των δύο πειραματικών διατάξεων.

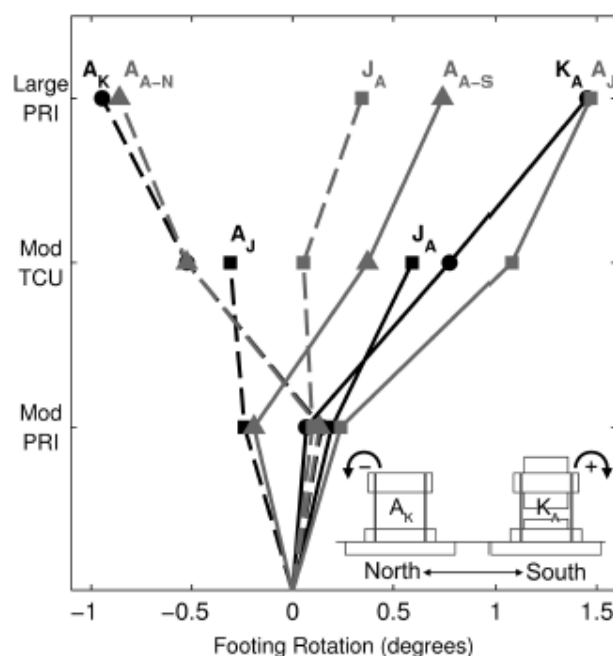
Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά κατασκευών A,J και K σε πραγματική κλίμακα (Hayden et al. 2015)

Structure	Mat width (m)	Mat length (m)	Height (m)	Weight (kN)	Bearing pressure (kPa)	Fixed-base period (s) ^a	Center of mass (m) ^b
A	6.0	9.0	4.4	3,510	65	0.33	3.9
K	6.0	9.0	5.3	9,700	180	0.38	3.9
J	7.5	7.5	13.5	10,470	186	0.85	15.0



Σχήμα 2.1: Κάτοψη και όψη των πειραματικών διατάξεων T4.5-50 (a,b) και T4.6-40 (c,d) σε πραγματική κλίμακα (Hayden et al. 2015)

Τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι οι σεισμικές καθιζήσεις συμβαίνουν κυρίως κατά την διάρκεια της διέγερσης και επομένως δεν μπορεί να οφείλονται στην μετέπειτα ογκομετρική παραμόρφωση λόγω στερεοποίησης του εδάφους. Πάντως στην απόκριση των κατασκευών σε όρους καθιζήσεων, σημασία φάνηκε να έχουν και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (διάρκεια δόνησης, ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας), εκτός της μέγιστης επιτάχυνσης. Για παράδειγμα, οι βαρύτερες κατασκευές τύπου J και K (τάσης έδρασης 180 kPa περίπου, αντί για 65kPa για τις κατασκευές τύπου A) ανέπτυξαν μεγαλύτερες σεισμικές καθιζήσεις κατά την δόνηση Port Island ισχυρής και μέτριας έντασης, ενώ το ακριβώς αντίθετο παρατηρήθηκε για την δόνηση TCU μέτριας έντασης, παρόλο που οι μέγιστες επιταχύνσεις ήταν σχεδόν ίδιες για τις δύο διεγέρσεις μέτριας έντασης (0.17g και 0.20g). Σχετικά με την επίδραση της σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης, η μείωση της από $D_r=50\%$ σε $D_r=40\%$ φάνηκε να οδηγεί σε συστηματική αύξηση των αναπτυσσόμενων σεισμικών καθιζήσεων, κατ' αντιστοιχία με τα συμπεράσματα προηγούμενων ερευνητών.



Σχήμα 2.2: Μόνιμη στροφή γειτονικών κατασκευών στο τέλος κάθε εξεταζόμενης σεισμικής δόνησης. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στην βορειότερη κατασκευή κάθε εξεταζόμενου ζεύγους και οι συνεχείς στην νοτιότερη κατασκευή. Με μαύρο χρώμα σχεδιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος T4.6-40 και με γκρι τα αποτελέσματα του πειράματος T4.5-50. (Hayden et al. 2015)

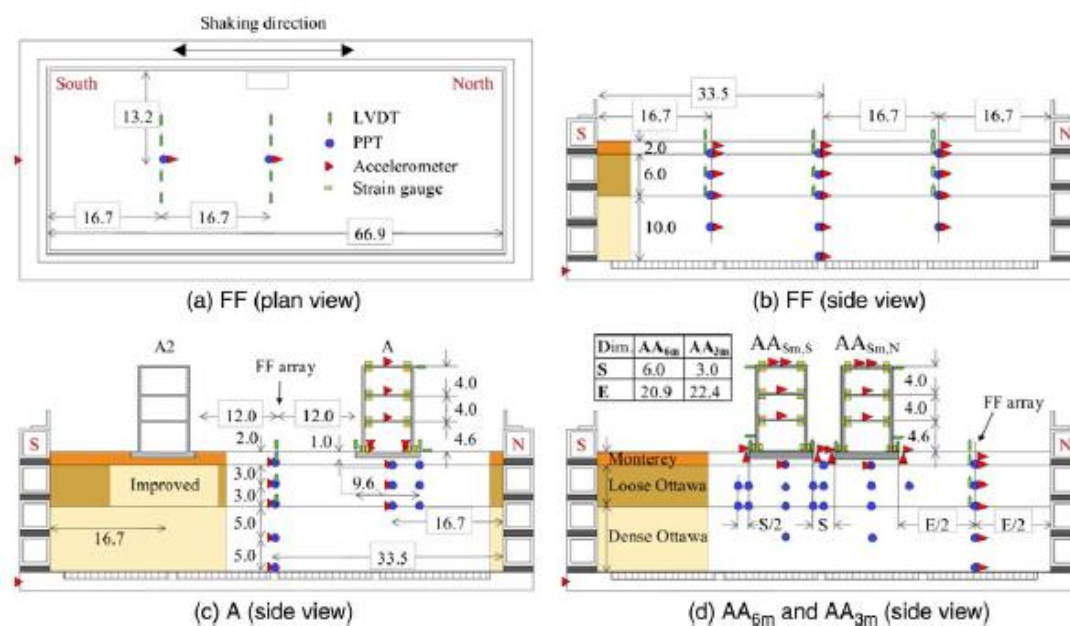
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 2.2**, απεικονίζονται οι αναπτυσσόμενες μόνιμες στροφές των γειτονικών κατασκευών στο τέλος κάθε σεισμικής διέγερσης, όπως εκείνες προέκυψαν στα πειράματα των Hayden et al. (2015). Παρατηρείται συστηματική τάση των γειτονικών

κατασκευών για αποκλίνουσα στροφή, με τις τελικές στροφές να είναι μεγαλύτερες όσο εντονότερη είναι η διέγερση. Οι λόγοι της αποκλίνουσας φύσης των στροφών αυτών είναι πολλοί. Αφενός θεωρήθηκε πως μπορεί να οφείλεται στις μεγαλύτερες αρχικές ενεργές τάσεις στο έδαφος ενδιάμεσα των θεμελίων, οι οποίες οδηγούν σε μικρότερες υπερπιέσεις πόρων στην ίδια περιοχή, συγκριτικά με το έδαφος κάτω από τα εξωτερικά άκρα των θεμελίων. Άλλη μια πιθανή αιτία θεωρήθηκε ο εγκιβωτισμός του εδάφους ενδιάμεσα των θεμελίων, που εμποδίζει την ιζηματοπόθεση προς την πλευρά της γειτονικής κατασκευής μετά το πέρας της διέγερσης. Ως αποτέλεσμα αυτού το έδαφος κάτω από τη θεμελίωση παραμορφώνεται εντονότερα προς τα εξωτερικά άκρα των δύο γειτονικών κατασκευών, με συνέπεια την ανάποδη περιστροφή τους. Τέλος, όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες σεισμικές επιταχύνσεις που φτάνουν στην ανωδομή, στις γειτονικές κατασκευές παρατηρήθηκε γενικώς απομείωση των επιταχύνσεων, συγκριτικά με την απομονωμένη κατασκευή στο ίδιο έδαφος.

Μεταγενέστερα, οι Kirkwood et al. (2018) πραγματοποίησαν τρία (3) δυναμικά πειράματα φυγοκεντριστή, για κατασκευές εδραζόμενες σε κορεσμένο εδαφικό προφίλ αντίστοιχης διαστρωμάτωσης με εκείνη των πειραμάτων των Hayden et al. (2015), ήτοι παχιά στρώση πυκνής άμμου στη βάση, λεπτή επιφανειακή κρούστα πυκνής άμμου και χαλαρή άμμος ενδιάμεσα. Προκειμένου να εστιάσουν σε μεταβολές της δυναμικής απόκρισης οφειλόμενες αποκλειστικά στο αναπτυσσόμενο τασικό πεδίο στην περιοχή έδρασης των κατασκευών αλλά και για να καταστήσουν άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των τριών πειραμάτων, το εδαφικό προφίλ και οι ιδιότητες των κατασκευών διατηρήθηκαν κοινά σε όλα τα πειράματα. Το προσομοίωμα της κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχούσε σε ένα τυπικό τριώροφο μεταλλικό κτήριο, άκαμπτης τετραγωνικής θεμελίωσης πλάτους 9.56 m και φορτίου έδρασης 76.5 kPa, θεμελιωμένο σε βάθος 1.0 m από την επιφάνεια του εδάφους. Εξετάστηκε η απόκριση στην περίπτωση της απομονωμένης κατασκευής, και η αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής για δύο γειτονικές κατασκευές σε ενδιάμεση απόσταση 3 m και 6 m, αντίστοιχα. Εφαρμόστηκαν συνολικά πέντε (5) δονήσεις αυξανόμενης έντασης (Joshua-L, Kobe-L, Joshua-H, Northridge, Kobe-H) με στόχο τη μελέτη της επιρροής των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην απόκριση των ανωδομών. Επισημαίνεται ότι το κεφαλαίο L υποδηλώνει χαμηλή ένταση (Low), ενώ το κεφαλαίο H υψηλή (High).

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αντίστοιχη απόκριση σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου και για να ποσοτικοποιηθούν οι μεταβολές που οφείλονται στην αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, καθώς και στην αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής, πραγματοποιήθηκε και

ένα τέταρτο πείραμα αναφοράς χωρίς κατασκευές, στο οποίο εφαρμόστηκαν οι ίδιες πέντε σεισμικές δονήσεις. Στο παρακάτω **Σχήμα 2.3** δίνεται σκαρίφημα των τεσσάρων πειραματικών διατάξεων των Kirkwood et al. (2018).



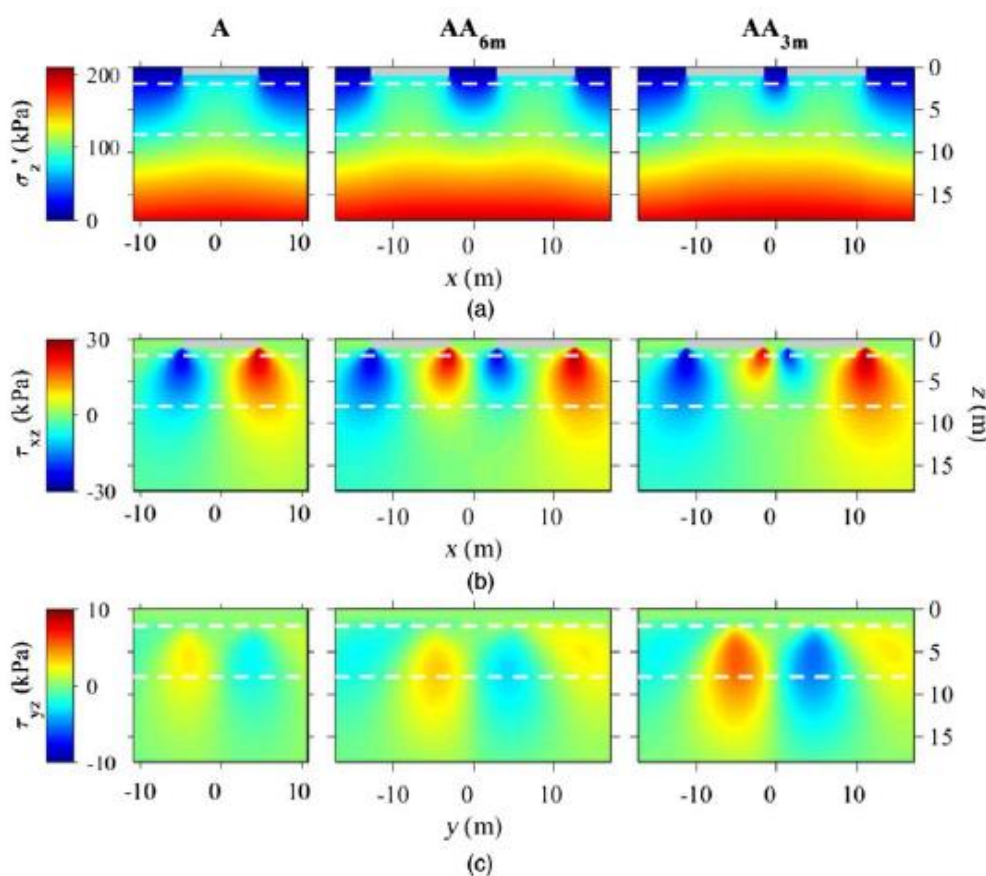
Σχήμα 2.3: Πειραματικές διατάξεις φυγοκεντριστή (σε πραγματική κλίμακα) των Kirkwood et al. (2018)

Σε αντίθεση με τα πειράματα των Hayden et al. (2015), τα πειράματα φυγοκεντριστή των Kirkwood et al. (2018) ανέδειξαν και περιπτώσεις στις οποίες οι γειτονικές κατασκευές στρέφονται η μία προς την άλλη. Η τελική φορά της στροφής φάνηκε να είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης τριών διαφορετικών μηχανισμών, καθένας από τους οποίους οδηγεί είτε σε τάση για αποκλίνουσες είτε σε τάση για συγκλίνουσες στροφές των γειτονικών κατασκευών.

Οι πρώτοι δύο μηχανισμοί σχετίζονται με την μεταβολή του αναπτυσσόμενου τασικού πεδίου για έδραση δύο γειτονικών κατασκευών, συγκριτικά με την περίπτωση της απομονωμένης κατασκευής. Για την καλύτερη εποπτεία της παραπάνω μεταβολής, στο **Σχήμα 2.4** παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ισοϋψείς των (στατικών) κατακόρυφων ενεργών τάσεων (a), καθώς και των εντός (b) και εκτός επιπέδου (c) διατμητικών τάσεων στο έδαφος έδρασης της απομονωμένης κατασκευής (A) και των γειτονικών κατασκευών σε ενδιαμέση απόσταση 3m (AA_{3m}) και 6m (AA_{6m}). Παρατηρείται ότι, στην περίπτωση των γειτονικών κατασκευών, η αλληλοεπικάλυψη των βολβών των τάσεων (π.χ., κατά Boussinesq 1883), αυξάνει υπέρμετρα τις κατακόρυφες ενεργές τάσεις στο έδαφος που βρίσκεται ανάμεσα στις δύο κατασκευές, συγκριτικά με τις τάσεις στο έδαφος που βρίσκεται στις εξωτερικές τους

παριές. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ασύμμετρη ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων και ογκομετρικών παραμορφώσεων, και τάση για συγκλίνουσα στροφή.

Σημασία όμως έχει και η επαλληλία των διατμητικών τάσεων. Εντός του επιπέδου της διεύθυνσης της δόνησης, οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις στις εξωτερικές άκρες των κατασκευών είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές στις εσωτερικές άκρες, κάτι που ενδεχομένως να τις οδηγήσει στο να στραφούν η μία μακριά από την άλλη. Το αντίθετο συμβαίνει σε επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση της δόνησης, όπου οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις είναι μεγαλύτερες στις εσωτερικές άκρες των κατασκευών. Για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των κατασκευών, οι πολύ μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις στο επίπεδο κάθετο στην σεισμική διέγερση μπορεί να οδηγήσουν σε ευρεία διόγκωση του εδάφους πλευρικά (εξωτερικό «φούσκωμα»), σημαντική απώλεια του υποκείμενου όγκου στο έδαφος εσωτερικά των κατασκευών, και συγκλίνουσες στροφές. Προφανώς αυτός ο μηχανισμός δεν προκύπτει σε οιονεί απειρομήκεις κατασκευές.

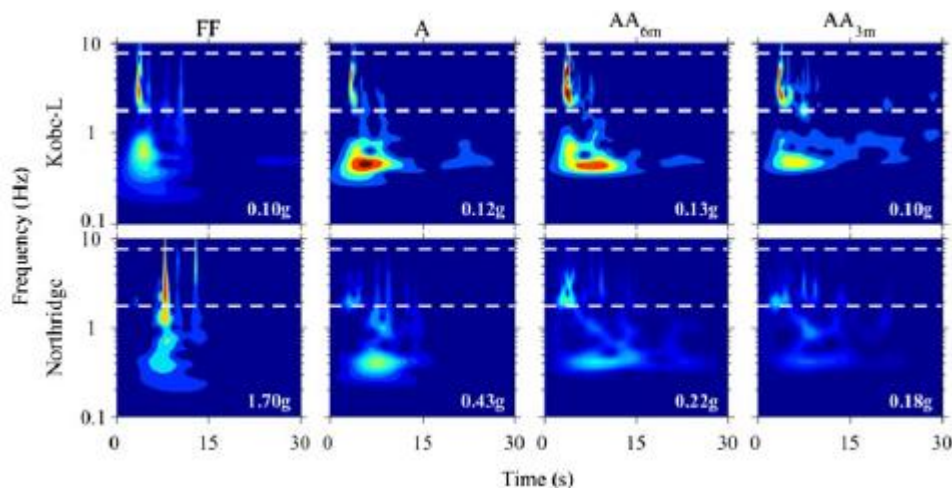


Σχήμα 2.4: Κατακόρυφες ενεργές τάσεις (a) , εντός επιπέδου διατμητικές τάσεις (b) και εκτός επιπέδου διατμητικές τάσεις (c) στο υποκείμενο έδαφος για απομονωμένη κατασκευή A και γειτονικές AA_{6m}, AA_{3m} σε ενδιάμεσες αποστάσεις 6m και 3m αντίστοιχα. (Kirkwood et al. 2018)

Τρίτον, οι στροφές των κατασκευών επηρεάζονται και από τις αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτές εξαιτίας της σεισμικής διέγερσης. Στην απομονωμένη κατασκευή, αυτή είναι και η κύρια αιτία ανάπτυξης σεισμικών στροφών, σε αντίθεση με την περίπτωση των γειτονικών κατασκευών, όπου το πρόσημο και το μέγεθος της στροφής επηρεάζεται και από τους τρεις παραπάνω μηχανισμούς.

Γενικότερα παρατηρήθηκε ευεργετική επίδραση της αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής στις αναπτυσσόμενες σεισμικές καθιζήσεις. Ωστόσο, δεν προέκυψε συστηματικότητα στην επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης, με τις κατασκευές σε ενδιάμεση απόσταση 3 m (ήτοι σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση 0.3 B , περίπου) να εμφανίζουν γενικώς μεγαλύτερες καθιζήσεις από αυτές σε ενδιάμεση απόσταση 6 m (ήτοι σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση 0.6 B, περίπου).

Όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες σεισμικές επιταχύνσεις, στην περίπτωση της απομονωμένης κατασκευής παρατηρήθηκε ενίσχυση των χαμηλόσυχων συνιστωσών της κίνησης (π.χ. πλησίον της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας της εδαφικής στρώσης), ταυτόχρονα με απομείωση των υψίσυχων συνιστωσών, συγκριτικά πάντα με ό,τι συμβαίνει στο ελεύθερο πεδίο. Η ύπαρξη μιας γειτονικής κατασκευής τείνει να απομειώσει την προαναφερθείσα ενίσχυση των χαμηλόσυχων συνιστωσών. Μάλιστα, η απομείωση γίνεται εντονότερη όσο μειώνεται η απόσταση ανάμεσα στις κατασκευές, λόγω εκτεταμένης ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων, μείωσης της εδαφικής στιβαρότητας και αύξησης της υστερητικής απόσβεσης στη διάρκεια ισχυρών διεγέρσεων. Τα ανωτέρω επιβεβαιώνονται και στο **Σχήμα 2.5**, όπου απεικονίζονται τα γραφήματα χρόνου-συχνότητας (τύπου Stockwell) των οριζόντιων επιταχύνσεων στο ελεύθερο πεδίο (FF) και στη βάση απομονωμένης (A) και γειτονικών κατασκευών σε ενδιάμεσες αποστάσεις 6m (AA_{6m}) και 3m (AA_{3m}) για μία ήπια και μία ισχυρή δόνηση (Kobe-L και Northridge, αντίστοιχα). Είναι εμφανές πως προκύπτει ενίσχυση των χαμηλόσυχων συνιστωσών των δύο διεγέρσεων (< 1.5 Hz) στην βάση της κατασκευής A, σε σύγκριση με την αντίστοιχη απόκριση του ελευθέρου πεδίου, καθώς επίσης και ότι υπάρχει σημαντική απομείωση της παραπάνω ενίσχυσης για την περίπτωση των πολύ κοντινών γειτονικών κατασκευών (AA_{3m}).



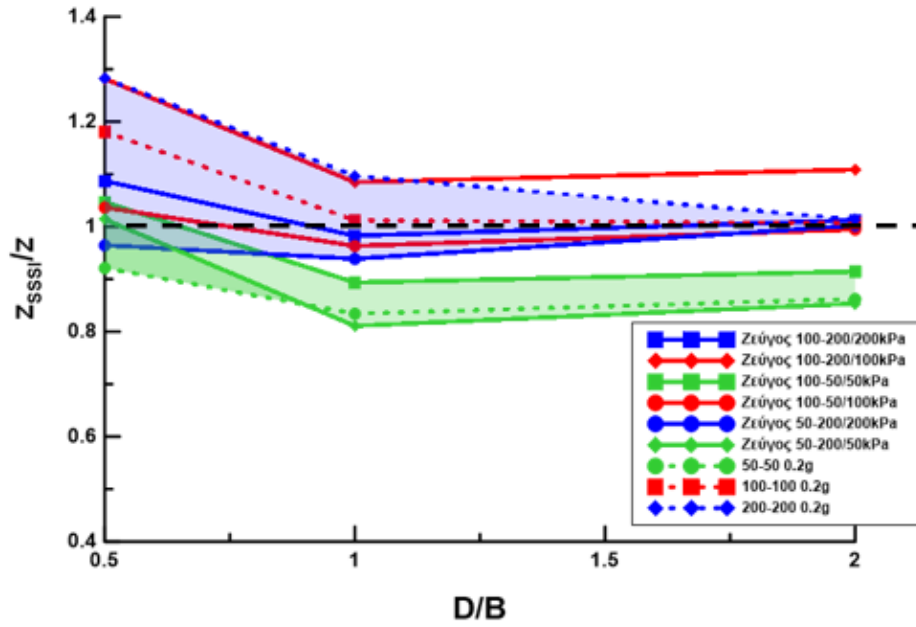
Σχήμα 2.5: Γραφήματα χρόνου-συχνότητας (τύπου Stockwell) των οριζόντιων επιταχύνσεων στο ελεύθερο πεδίο (FF) και στη βάση απομονωμένης (A) και γειτονικών κατασκευών (AA_{6m} , AA_{3m}) για μία ήπια (Kobe-L) και μία ισχυρή (Northridge) δόνηση (Kirkwood et al. 2018)

Εξαιτίας της προαναφερθείσας μεταβολής του συχνοτικού περιεχομένου που φτάνει στις κατασκευές, η αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής γενικώς τείνει να μειώσει τις μέγιστες επιταχύνσεις που καταγράφονται στην ανωδομή, αν και δεν αποκλείεται να συμβεί το αντίθετο στην περίπτωση που υπάρξει αυξημένη ενίσχυση των υψίσυχνων συνιστωσών (π.χ. πλησίον της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του κτηρίου).

Πρόσφατα, η Τσεπελίδου (2021) στην Διπλωματική της Εργασία ασχολήθηκε με την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης δύο γειτονικών επιφανειακών άκαμπτων θεμελιολωρίδων εδραζόμενων σε κορεσμένη ομοιογενή αμμώδη στρώση υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Η εν λόγω διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω της εκτέλεσης δισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC. Η συμπεριφορά της ρευστοποιήσιμης άμμου προσομοιώθηκε μέσω του σοφιστευμένου προσομοιώματος NTUA-SAND (Andriopoulos 2006). Διερευνήθηκαν θεμέλια ίδιου εύρους και φορτίου (δίδυμα), ίδιου εύρους αλλά διαφορετικών επιμέρους φορτίων, διαφορετικών επιμέρους ευρών αλλά ίδιου φορτίου, αλλά και συνδυασμοί όπου τόσο το εύρος όσο και το φορτίο των δύο γειτονικών θεμελίων ήταν διαφορετικό. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις z_{SSI} και στροφές θ των δύο γειτονικών θεμελίων και το πώς αυτές συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη z και $\theta = 0$, όταν το κάθε θεμέλιο είναι απομονωμένο, ακριβώς όπως δρομολογείται και η παρούσα εργασία.

Πιο λεπτομερώς, με βάση την Τσεπελίδου (2021) προέκυψε το αδρό συμπέρασμα ότι στην περίπτωση ζεύγους στενών θεμελίων, τα βαριά θεμέλια τείνουν να εμφανίσουν δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων (ήτοι αύξηση των καθιζήσεων) και αποκλίνοσες

στροφές, ενώ το αντίστροφο προκύπτει όταν τα θεμέλια είναι ελαφριά. Η απόκριση των στενών θεμελίων σε όρους καθιζήσεων, όταν αυτά βρίσκονται σε ζεύγος στενών θεμελίων, συνοψίζεται στο **Σχήμα 2.6**, στο οποίο παρατηρείται και η συστηματική τάση των βαρύτερων στενών θεμελίων (φορτίου $q = 100\text{kPa}$ και $q = 200\text{kPa}$) για ανάπτυξη λόγου καθιζήσεων $z_{\text{SSI}}/z > 1$, ενώ το αντίθετο παρατηρείται στα ελαφρύτερα θεμέλια (φορτίου $q=50\text{kPa}$).

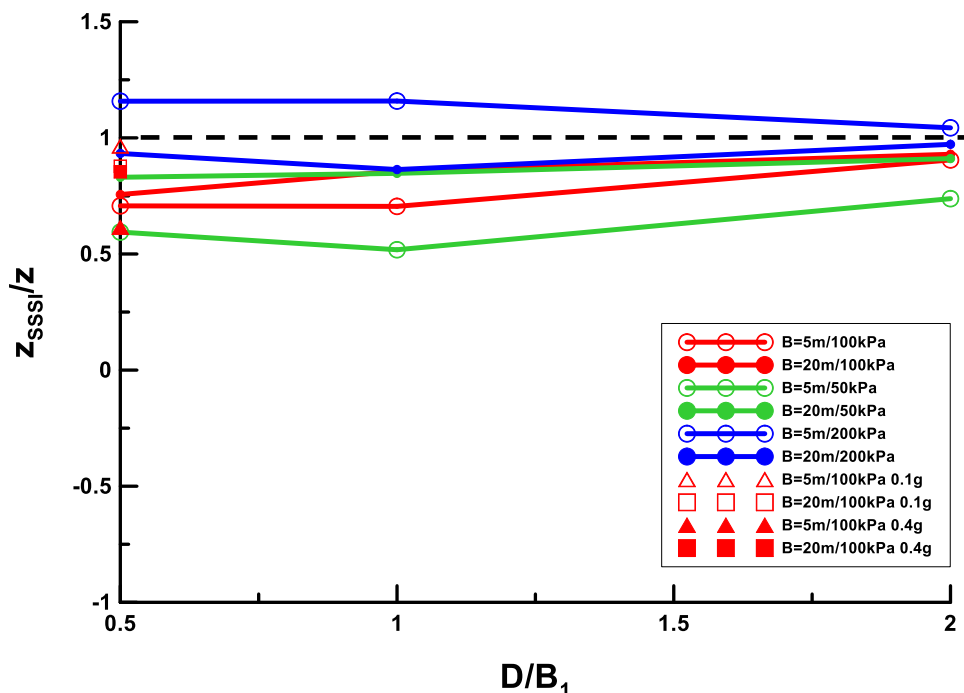


Σχήμα 2.6: Λόγος καθιζήσεων z_{SSI}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για ζεύγη θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$) για ίσο ή διαφορετικό φορτίο $q=50\text{-}200\text{kPa}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\text{max}}=0.2\text{g}$ (Τσεπελίδου 2021)

Αντίστοιχα, στην περίπτωση ζεύγους ευρέων θεμελίων, η Τσεπελίδου (2021) καταλήγει ότι αύξηση του φορτίου του θεμελίου οδηγεί σε απομείωση της αλληλεπίδρασης σε όρους καθιζήσεων και αύξηση της αποκλίνουσας στροφής. Ως προς την επίδραση που έχει το φορτίο του γειτονικού θεμελίου στην απόκριση θεμελίων τα οποία βρίσκονται σε ζεύγος ίδιου εύρους, αυτό φάνηκε να μην έχει τόσο σημασία για το ζεύγος των στενών θεμελίων, σε αντίθεση με ό,τι παρατηρήθηκε στο ζεύγος ευρέων θεμελίων, όπου το φορτίο του γειτονικού ευρέος θεμελίου έχει συγκρίσιμη σημασία με εκείνη που έχει το φορτίο του ίδιου του θεμελίου.

Σχετικά με την απόκριση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους αλλά ίδιου φορτίου, τα στενά και βαριά θεμέλια διαπιστώθηκε ότι εμφανίζουν δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, και ευεργετική αλληλεπίδραση σε όλες τις άλλες περιπτώσεις φορτίου. Αντίθετα, τα ευρέα θεμέλια εμφάνισαν ευεργετική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ανεξαρτήτως του φορτίου του ζεύγους. Η ποσοτικοποίηση των ως άνω συμπερασμάτων σε

όρους καθιζήσεων συνοψίζεται στο **Σχήμα 2.7** από την εργασία της Τσεπελίδου (2021). Όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες στροφές του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους αλλά ίδιου φορτίου, εκείνες προέκυψαν σημαντικές μόνο στα στενά θεμέλια, σε αντίθεση με τα ευρέα θεμέλια, τα οποία είχαν πάντα πρακτικώς μηδενικές παραμένουσες στροφές.



Σχήμα 2.7: Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$), ίδιου φορτίου $q = 50-200kPa$ υπό διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max} = 0.1, 0.2$ ή $0.4g$ (Τσεπελίδου 2021).

Επιπλέον, σε ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους και φορτίου, το βαρύ θεμέλιο φάνηκε να εμφανίζει πάντα ευεργετική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ενώ για το ελαφρύ θεμέλιο το αν η αλληλεπίδραση είναι ευεργετική ή μη εξαρτάται από το εύρος του. Σε όρους στροφής, το ευρύ θεμέλιο είχε πάντα αμελητέα αποκλίνουσα στροφή, σε αντίθεση με το στενό θεμέλιο, το οποίο συστηματικά απέκλινε από το γειτονικό του όταν ήταν βαρύ και ανέπτυσσε τόσο συγκλίνουσες όσο και αποκλίνουσες στροφές όταν ήταν ελαφρύ.

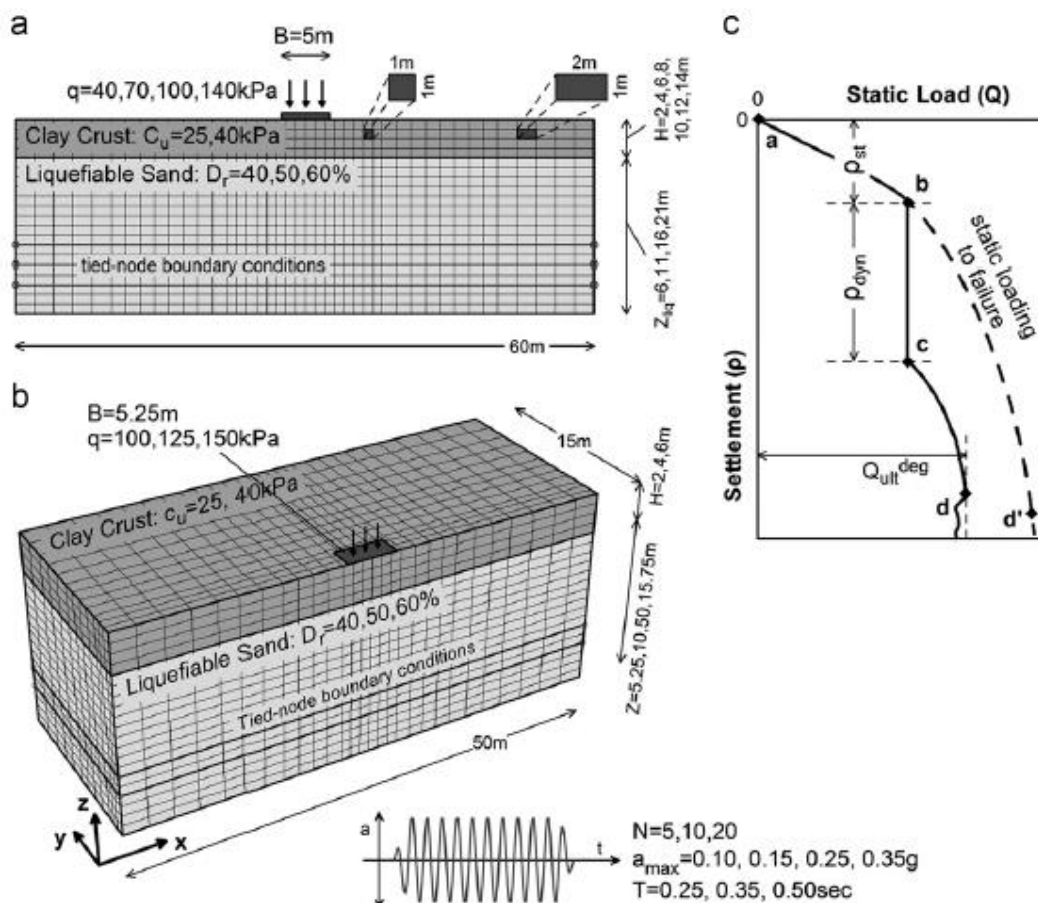
Γενικότερα, η Τσεπελίδου (2021) καταλήγει ότι η αναπτυσσόμενη αλληλεπίδραση δείχνει να απομειώνεται για αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων μεν, αλλά για ζεύγος θεμελίων ίδιου εύρους, ενδιάμεσες κανονικοποιημένες αποστάσεις $D/B = 2.0$ δεν ήταν επαρκείς, προκειμένου να εξαλειφθεί η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Όλα τα ανωτέρω συμπεράσματα αφορούν σε θεμέλια εδραζόμενα απευθείας επί της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Όμως, πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η (πιο συνήθης) περίπτωση αλληλεπίδρασης όταν τα θεμέλια εδράζονται σε μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική κρούστα που υπέρκειται της ρευστοποιήσιμης στρώσης, ένα αντικείμενο που διερευνάται εδώ.

2.3 Απόκριση μεμονωμένου επιφανειακού θεμελίου επί δίστρωτου εδάφους υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης

Οι Karamitros et al. (2013a, 2013b) πραγματοποίησαν εκτενή έρευνα πάνω στην σεισμική απόκριση επιφανειακών θεμελιώσεων σε καθεστώς ρευστοποίησης. Αξιολογώντας ως μη ρεαλιστική την (ηθελημένη έστω) έδραση των επιφανειακών θεμελίων απευθείας επί του ρευστοποιήσιμου εδάφους, εξετάστηκε η περίπτωση κατά την οποία μεταξύ της θεμελίωσης και του ρευστοποιήσιμου εδάφους παρεμβάλλεται λεπτόκοκκη (αργιλώδης) στρώση. Η έρευνα επικεντρώθηκε στην εκτίμηση της απομειωμένης (μετα-σεισμικής) φέρουσας ικανότητας και των αντίστοιχων δυναμικών καθιζήσεων των επιφανειακών θεμελίων, καθώς και στην κατανόηση και ερμηνεία των φυσικών μηχανισμών που διέπουν το υπό εξέταση φαινόμενο. Απώτερος στόχος ήταν να καταστεί εφικτός ο ικανοτικός σχεδιασμός επιφανειακών θεμελίων σε καθεστώς ρευστοποίησης, μέσω της κατάλληλης επιλογής διαστάσεων, επιτρεπόμενου φορτίου θεμελίωσης και πάχους βελτίωσης του εδάφους.

Για την μελέτη του φαινομένου οι Karamitros et al. (2013a, 2013b) εκτέλεσαν παραμετρικές μη-γραμμικές συζευγμένες δυναμικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών σε δύο και τρεις διαστάσεις (FLAC, FLAC^{3D}), για λωριδωτά και ορθογωνικά θεμέλια, αντίστοιχα. Η συμπεριφορά της ρευστοποιήσιμης άμμου προσομοιώθηκε μέσω του σοφιστευμένου προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianoπουλος 2006), ενώ για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της αργιλικής κρούστας έγινε χρήση του Mohr-Coulomb, ακριβώς όπως δρομολογείται και η παρούσα εργασία. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για μεταβλητό πάχος και αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u της αργιλικής στρώσης, φορτίο θεμελίων, σχετική πυκνότητα και πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου και μεταβλητά χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης, οι ακριβείς τιμές των οποίων συνοψίζονται, μεταξύ άλλων, στο **Σχήμα 2.8**.

Όλες οι αναλύσεις τους έγιναν σε τρία βήματα, όπως ακροθιγώς παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.8**. Συγκεκριμένα, στο πρώτο βήμα το φορτίο της θεμελίωσης Q εφαρμόστηκε στατικά έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή πίεση επαφής (κλάδος a-b), στο δεύτερο βήμα έγινε επιβολή της σεισμικής διέγερσης στην βάση της άμμου (κλάδος b-c) και στο τρίτο βήμα, μετά το πέρας του σεισμού, το στατικό φορτίο Q αυξήθηκε μέχρι την αστοχία (κλάδος c-d) υπό συνθήκες μη-μεταβολής των πιέσεων πόρων, οι οποίες έμειναν ίσες στις τιμές τους στο τέλος της σεισμικής διέγερσης (δεύτερο βήμα).

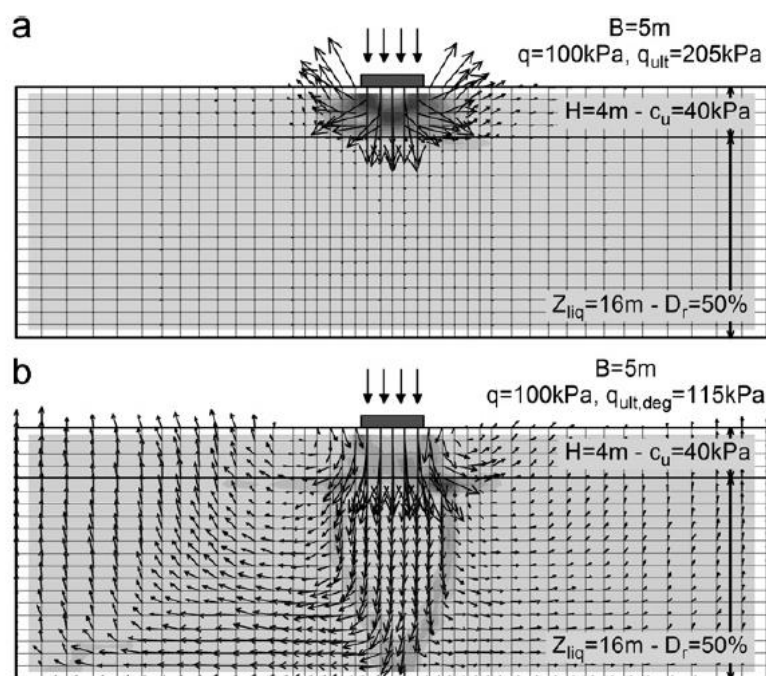


Σχήμα 2.8: Διάταξη αριθμητικών αναλύσεων σε δύο (a) και τρεις διαστάσεις (b) και τιμές των παραγόντων παραμετρικής διερεύνησης. Καμπύλη φορτίου-καθίζησης θεμελίου (c). (Karamitros et al. 2013a, 2013b)

Στη συνέχεια στο **Σχήμα 2.9** παρουσιάζονται οι ισοϋψείς των διατμητικών παραμορφώσεων και τα διανύσματα ταχυτήτων για στατική (a) και μετα-σεισμική (b) αστοχία σε φέρουσα ικανότητα μονού θεμελίου επί ρευστοποιήσιμου εδάφους με επιφανειακή αργιλική κρούστα, όπως προέκυψαν από μια τυπική ανάλυση των Karamitros et al. (2013a). Πριν την σεισμική διέγερση, η αστοχία σε φέρουσα ικανότητα παρατηρείται αποκλειστικά εντός της ασθενέστερης αργιλικής στρώσης. Αντίθετα, μετα-σεισμικά, το επιφανειακό θεμέλιο πιέζει την αργιλική στρώση και η αστοχία εξελίσσεται πλήρως εντός της ρευστοποιήσιμης άμμου, στην οποία η διατμητική αντοχή είναι πλέον σχεδόν μηδενική, και πάντως μικρότερη εκείνης της επιφανειακής αργιλικής κρούστας.

Η παραπάνω εικόνα οδήγησε τους Karamitros et al. (2013a) στο συμπέρασμα ότι ο μετα-σεισμικός μηχανισμός αστοχίας που αναπτύσσεται για επιφανειακά θεμέλια επί ρευστοποιήσιμου εδάφους με επιφανειακή αργιλική κρούστα είναι τύπου διάτρησης, όμοιος με αυτόν που προτείνεται από τους Meyerhof & Hanna (1978). Πρότειναν επομένως την υιοθέτηση της σχέσης των Cascone & Bouckovalas (1998) για την αναλυτική εκτίμηση της

μετα-σεισμικής φέρουσας ικανότητας, η οποία υιοθετεί την επιφάνεια αστοχίας κατά Meyerhof & Hanna (1978) και απομειώνει την γωνία τριβής της ρευστοποιήσιμης άμμου, συναρτήσει των υπερπίεσεων πόρων που αναπτύσσονται στην περιοχή έδρασης του θεμελίου. Επιπλέον, διατύπωσαν την άποψη ότι για επαρκώς μεγάλο πάχος της αργλικής στρώσης, η μετά-σεισμική αστοχία σε φέρουσα ικανότητα συμβαίνει αποκλειστικά εντός της αργίλου, όπως ακριβώς συνέβαινε και πριν την ρευστοποίηση του υποκείμενου εδάφους. Το κρίσιμο πάχος της αργλικής στρώσης εκτιμήθηκε συντηρητικά, για μηδενική συνεισφορά της ρευστοποιήσιμης άμμου, ίσο με $H_c = 2.57 B$.

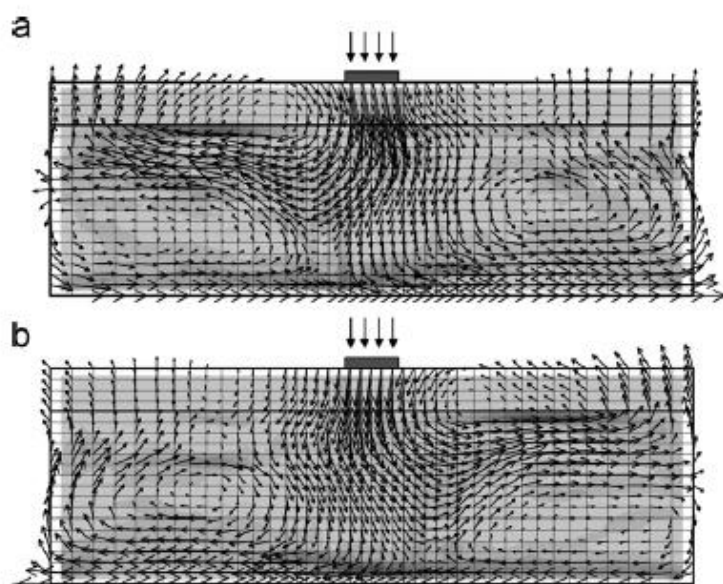


Σχήμα 2.9: Ισοψείς διατμητικών παραμορφώσεων και διανύσματα ταχυτήτων για στατική (a) και μετα-σεισμική (b) αστοχία σε φέρουσα ικανότητα (Karamitros et al. 2013a)

Στη συνέχεια, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η απομειωμένη διατμητική αντοχή της άμμου και να εκτιμηθεί η απομειωμένη φέρουσα ικανότητα, δόθηκε έμφαση στον υπολογισμό και τους μηχανισμούς ανάπτυξης των υπερπίεσεων πόρων U εντός της ρευστοποιημένης στρώσης. Συγκεκριμένα, οι Karamitros et al. (2013a) διαπίστωσαν ότι οι στατικές διατμητικές τάσεις που επιβάλλει το φορτίο της θεμελίωσης, αλλά και οι αναπτυσσόμενες διατμητικές παραμορφώσεις κατά την συσσώρευση δυναμικών καθιζήσεων, εμποδίζουν την πλήρη ρευστοποίηση του εδάφους κάτω από το θεμέλιο. Παρατηρώντας τις ισοκαμπύλες της κατανομής του συντελεστή υπερπίεσης πόρων, προτείναν τελικώς η αναλυτική εκτίμηση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας να γίνεται μέσω ενός σταθμισμένου μέσου όρου για τον συντελεστή υπερπίεσης πόρων, ο οποίος συνυπολογίζει τις υπερπίεσεις στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο και στο ελεύθερο πεδίο,

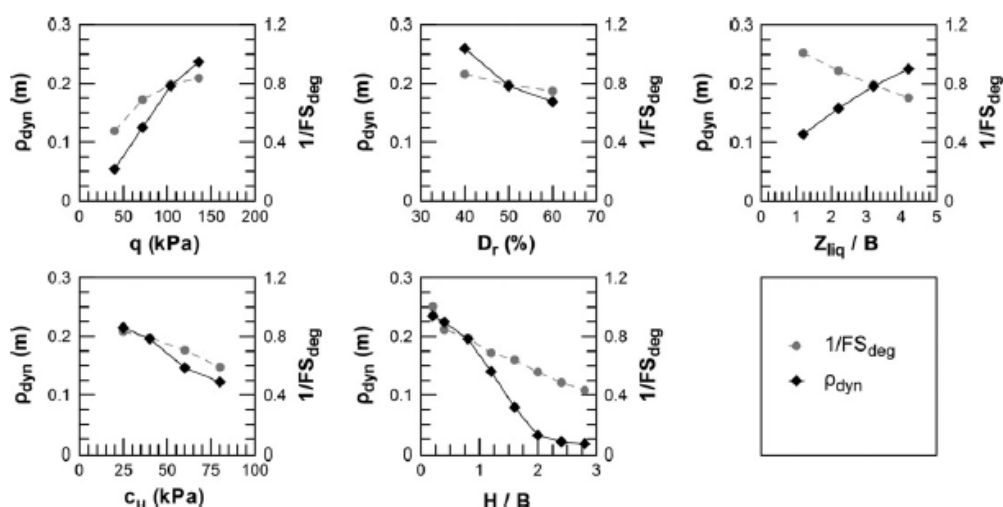
και λαμβάνει υπόψιν την μορφή του θεμελίου, συγκεκριμένα τον λόγο μήκος προς πλάτος του θεμελίου.

Σχετικά με την ανάπτυξη των σεισμικών καθιζήσεων, οι Karamitros et al. (2013b) επιβεβαίωσαν πως αυτές οφείλονται κυρίως στην ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων εντός του εδάφους, οι οποίες σε συνδυασμό με την τάση που επιβάλλεται από τη θεμελίωση ενεργοποιούν μηχανισμό αστοχίας μορφής ολισθαίνοντος στερεού κατά την θεωρία Newmark, άποψη η οποία διατυπώθηκε και από τους Richards et al. (1993). Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός αστοχίας τύπου Newmark αναπτύσσεται σε κάθε μισό κύκλο της επιβαλλόμενης διέγερσης, με φορά αντίθετη από τη μετακίνηση του σεισμικού υποβάθρου, με αποτέλεσμα την κατακόρυφη και οριζόντια μετακίνηση του θεμελίου. Στον επόμενο μισό κύκλο, η ανάπτυξη του ίδιου μηχανισμού αστοχίας γίνεται συμμετρικά (κατά τον κατακόρυφο άξονα), και ως εκ τούτου οι οριζόντιες μετακινήσεις αναιρούνται, σε αντίθεση με τις κατακόρυφες, οι οποίες προστίθενται και οδηγούν στην συσσώρευση δυναμικών καθιζήσεων. Οι ισοΰψείς των διατμητικών παραμορφώσεων και τα διανύσματα ταχυτήτων κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού (a) και του δεύτερου μισού (b) κάθε κύκλου μίας σεισμικής διέγερσης, όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.10**, επιβεβαιώνει την ύπαρξη των δύο προαναφερθέντων συμμετρικών μηχανισμών αστοχίας, αποτέλεσμα των οποίων είναι η ανάπτυξη σεισμικών καθιζήσεων.



Σχήμα 2.10: Ισοΰψείς διατμητικών παραμορφώσεων και διανύσματα ταχυτήτων που αντιστοιχούν στους δύο συμμετρικούς μηχανισμούς αστοχίας κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού (a) και του δεύτερου μισού (b) κάθε κύκλου της σεισμικής διέγερσης. (Karamitros et al. 2013b)

Η διακρίβωση του μηχανισμού ανάπτυξης των σεισμικών καθιζήσεων οδήγησε και στον εντοπισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν το πρόβλημα, οι οποίες χωρίζονται σε αυτές που σχετίζονται (α) με την αντοχή του εδάφους έδρασης και τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης και (β) σε αυτές που σχετίζονται με την επιβαλλόμενη διέγερση. Στο **Σχήμα 2.11** απεικονίζεται η επίδραση των παραμέτρων q , D_r , Z_{liq}/B , c_u και H/B (ήτοι των παραμέτρων που σχετίζονται με την αντοχή του εδάφους έδρασης και τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης) στις δυναμικές καθιζήσεις (ρ_{dyn}) και στον μετα-σεισμικό συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα (σε όρους $1/FS_{deg}$) θεμελιολωρίδων, με βάση τις αναλύσεις των Karamitros et al. (2013b). Είναι εμφανές ότι τέσσερις εκ των πέντε παραμέτρων που ανήκουν στην κατηγορία (α), έχουν ποιοτικά ανάλογη επίδραση στην ανάπτυξη των δυναμικών καθιζήσεων, με την επίδραση που έχει ο αντίστροφος του μετα-σεισμικού συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα. Σημειώνεται πως αντίστοιχη συσχέτιση προκύπτει και στην περίπτωση των ορθογωνικών θεμελίων. Ως εκ τούτου, στην τελική προτεινόμενη αναλυτική σχέση για την εκτίμηση των δυναμικών καθιζήσεων, οι παραπάνω παράμετροι μπόρεσαν να εκφραστούν μέσω του λόγου $1/FS_{deg}$, ενώ ο λόγος Z_{liq}/B ήταν η μόνη παράμετρος που ελήφθη άμεσα υπόψιν. Όσον αφορά στις παραμέτρους που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης, η επίδραση τους στην ανάπτυξη των δυναμικών καθιζήσεων εκτιμήθηκε μέσω του συντελεστή $a_{max} T^2 N$. Σημειώνεται πως η τελευταία έκφραση είναι ισοδύναμη με την v_{max}^2/a_{max} , η οποία χρησιμοποιείται στις περισσότερες θεωρίες που παρατηρείται αστοχία μορφής ολισθαίνοντος στερεού, όπως άλλωστε αποδείχτηκε ότι είναι και ο μηχανισμός ανάπτυξης των σεισμικών καθιζήσεων.



Σχήμα 2.11: Επίδραση των παραμέτρων q , D_r , Z_{liq}/B , c_u και H/B στις δυναμικές καθιζήσεις (ρ_{dyn}) και στον μετα-σεισμικό συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα (σε όρους $1/FS_{deg}$) θεμελιολωρίδων (Karamitros et al. 2013b)

Με βάση τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα, οι Karamitros et al (2013a, 2013b) ανέπτυξαν μια αναλυτική (επαναληπτική) μεθοδολογία για τον υπολογισμό των δυναμικών καθιζήσεων, συναρτήσει του μετα-σεισμικού συντελεστή ασφαλείας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τετραγωνικά, λωριδωτά και ορθογωνικά θεμέλια, αλλά και για μη αρμονικές διεγέρσεις. Η μεθοδολογία αυτή επικεντρώνει σε μεμονωμένα θεμέλια, ενώ πρακτικό ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και το πως αλλάζουν αυτές οι καθιζήσεις αν τα θεμέλια δεν είναι μεμονωμένα, ένα αντικείμενο που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

3.1 Γενικά

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, με στόχο τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελιώσεων σε καθεστώς ρευστοποίησης. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν πλήρως συζευγμένες (ήτοι ενεργών τάσεων και ροής του νερού των πόρων) μη-γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις στις δύο διαστάσεις (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) κάνοντας χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca Inc. 2011). Η μηχανική συμπεριφορά της αργίλου προσομοιώθηκε με το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, ενώ του ρευστοποιήσιμου εδάφους με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND, ένα σοφιστευμένο προσομοίωμα το οποίο αναπτύχθηκε στον Τομέα Γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Paradimitriou and Bouckovalas 2002, Andrianopoulos et al. 2010) και έχει την δυνατότητα για ακριβή προσομοίωση της απόκρισης μη συνεκτικών εδαφών υπό μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση.

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται αδρομερώς το χρησιμοποιούμενο λογισμικό και το σοφιστευμένο καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND. Η λεπτομερής περιγραφή της αριθμητικής μεθοδολογίας δεν αποτελεί σκοπό της παρούσας εργασίας, παρά μόνο η περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν (διακριτοποίηση καννάβου, συνοριακές συνθήκες, προσομοίωση θεμελίων και εδάφους, σεισμική διέγερση) όπως επίσης και οι τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας παραμετρικής διερεύνησης.

3.2 Αριθμητική Μεθοδολογία

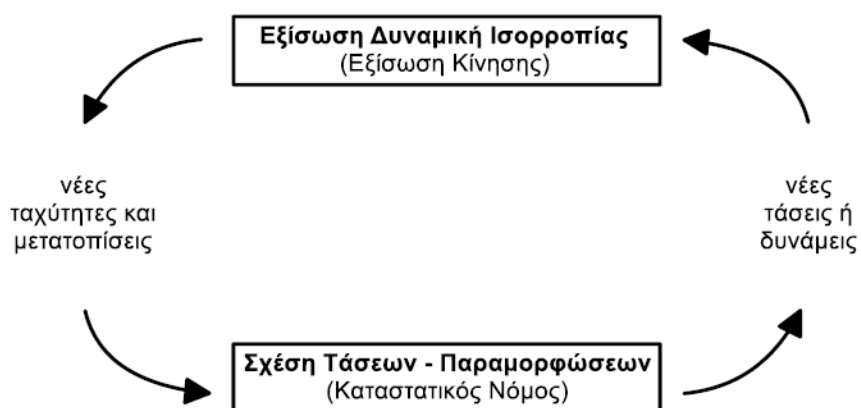
3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC

Το πρόβλημα που ερευνάται στην παρούσα εργασία προσομοιώθηκε κάνοντας χρήση του λογισμικού Πεπερασμένων Διαφορών FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) στις δύο διαστάσεις. Πρόκειται για έναν κώδικα που εφαρμόζει την Μέθοδο Κεντρικών Διαφορών στη μη-πεπλεγμένη μορφή της (Explicit Finite Difference Method), προκειμένου να επιλύσει την εξίσωση κίνησης σε υπολογιστικά προβλήματα που σχετίζονται με συνεχή μέσα. Το συνεχές μέσο διακριτοποιείται σε έναν κάρναβο (grid) που αποτελείται από τμήματα τετράπλευρου σχήματος, τα οποία στη γλώσσα του FLAC ονομάζονται ζώνες (zones), και σημεία που ορίζουν το δίκτυο των ζωνών και καλούνται κόμβοι (gridpoints). Η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας πραγματοποιείται στους κόμβους κάθε ζώνης, ενώ ο υπολογισμός των τάσεων και παραμορφώσεων κάτω από τις επιβαλλόμενες στους κόμβους δυνάμεις ή μετατοπίσεις, γίνεται μέσω του καταστατικού νόμου συμπεριφοράς που ακολουθεί η κάθε ζώνη. Το καταστατικό προσομοίωμα που ορίζεται σε κάθε ζώνη μπορεί είτε να είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα (π.χ. Mohr-Coulomb) είτε να εισάγεται εξολοκλήρου από τον χρήστη (π.χ. NTUA_SAND). Αυτή η δυνατότητα καθιστά το λογισμικό ικανό και για την μελέτη εξειδικευμένων προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής, η ορθή προσομοίωση των οποίων απαιτεί την χρήση σοφιστευμένων προσομοιωμάτων.

Οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται σε κάθε χρονικό βήμα Δt (time marching method). Οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις την χρονική στιγμή t εξαρτώνται από την τιμή τους την προηγούμενη χρονική στιγμή $t-\Delta t$, και παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια Δt του υπολογιστικού βήματος. Συνεπώς, απαιτείται η χρήση ενός υπολογιστικού βήματος επαρκώς μικρού προκειμένου η πληροφορία του φυσικού προβλήματος να μην προλαβαίνει να διαδοθεί μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων. Η διαδικασία που ακολουθείται σε κάθε χρονικό βήμα της μη-πεπλεγμένης μεθόδου επίλυσης του FLAC παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**.

Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από μια δεδομένη τασική κατάσταση η εξίσωση της κίνησης επιλύεται υπολογίζοντας τις ταχύτητες κόμβων και τις παραμορφώσεις της ζώνης που τους αντιστοιχούν, με την θεώρηση πως οι τάσεις παραμένουν σταθερές εντός κάθε ζώνης. Ακολουθεί ο επανυπολογισμός των τάσεων της κάθε ζώνης, διατηρώντας αυτή την φορά δεδομένες τις πρόσφατα υπολογισμένες ταχύτητες κόμβων και τις συνεπαγόμενες παραμορφώσεις της ζώνης. Η συσχέτιση των τάσεων με τις παραμορφώσεις της κάθε ζώνης γίνεται μέσω του καταστατικού προσομοιώματος που έχει ορισθεί στην κάθε ζώνη.

Πρόκειται για επαναλαμβανόμενη διαδικασία, έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση, ήτοι μηδενισμός της συνισταμένης των δυνάμεων που ασκούνται συνολικά στον κάρναβο (unbalanced force).

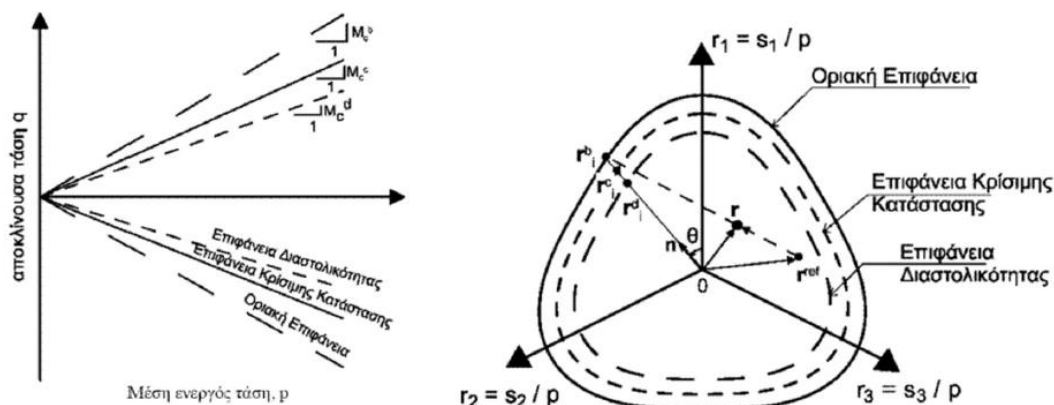


Σχήμα 3.1: Μη-πεπλεγμένη διαδικασία υπολογισμού του Κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC.

3.2.2 Καταστατικό Προσομοίωμα NTUA_SAND

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND καταστρώθηκε από τους Paradimitriou & Bouckonas (2002), αλλά η τελική του μορφή διατυπώθηκε στα πλαίσια των διδακτορικών διατριβών των Andrianopoulos (2006) και Karamitros (2010). Πρόκειται για ένα καταστατικό προσομοίωμα που έχει την δυνατότητα για ορθή προσομοίωση της απόκρισης μη-συνεκτικών (κοκκωδών) εδαφών (άμμων και ιλύων), τόσο υπό μονοτονική φόρτιση αλλά και σε συνθήκες ανακυκλικής διάτμησης σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις. Το ελαστο-πλαστικό αυτό προσομοίωμα είναι βασισμένο στη θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης. Θεωρεί τρεις επιφάνειες στον χώρο των τάσεων: την Οριακή Επιφάνεια, την Επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης και την Επιφάνεια Διαστολικότητας. Κάθε μία από αυτές τις επιφάνειες παριστάνει τον λόγο των αποκλιουσών τάσεων στην οριακή (μέγιστη) αντοχή, στην κρίσιμη κατάσταση και στην αλλαγή φάσης (από συστολή σε διαστολή), αντίστοιχα. Η κλίση της Επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο των τάσεων εισάγεται ως παράμετρος του προσομοιώματος. Η κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας και της Οριακής Επιφάνειας ορίζεται βάσει της παραμέτρου κατάστασης ψ των Been and Jefferies (1985), ενσωματώνοντας με αυτόν τον τρόπο την θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης στις εξισώσεις του προσομοιώματος, και δίνοντας την δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς εδαφών με διαφορετική αρχική κατάσταση (διαφορετική μέση ενεργό τάση και σχετική πυκνότητα), χρησιμοποιώντας το ίδιο σετ παραμέτρων. Στο **Σχήμα 3.2** απεικονίζονται οι τρεις επιφάνειες του προσομοιώματος στον τριαξονικό χώρο των τάσεων (αριστερά), όπου p είναι

η μέση ενεργός τάση ενώ q η αποκλίνουσα τάση, και η προβολή των επιφανειών στο αποκλίνον επίπεδο π του γενικευμένου χώρου αποκλινουσών τάσεων (δεξιά).



Σχήμα 3.2: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο $p - q$ (αριστερά) και η προβολή τους στο επίπεδο π (δεξιά).

3.2.3 Εδαφικά Χαρακτηριστικά

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης, το εδαφικό προφίλ που προσομοιώνεται αποτελείται από ρευστοποιήσιμη άμμο στην βάση (πάχους 8m) και άργιλο στην επιφάνεια (πάχους 2m).

Η ρευστοποιήσιμη άμμος είναι λεπτή άμμος τύπου Nevada και τα βασικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.1**. Για την προσομοίωση της απόκρισης της ρευστοποιήσιμης άμμου χρησιμοποιήθηκε το προαναφερθέν σοφιστευμένο καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND. Στις αναλύσεις υιοθετείται η βαθμονόμηση των Andrianopoulos et al. (2010), η ακρίβεια της οποίας έχει επαληθευτεί μέσω της επιτυχούς σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών αναλύσεων, τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου όσο και σε σχέση με τα αποτελέσματα πειραμάτων φυγοκεντριστή, στα πλαίσια του προγράμματος VELACS (Arulmoli et al. 1992).

Πίνακας 3.1: Βασικά Χαρακτηριστικά λεπτής άμμου τύπου Nevada για την προσομοίωση της ρευστοποιήσιμης στρώσης.

	Τιμή Παραμέτρου
Σχετική Πυκνότητα D_r (%)	45
Δείκτης πόρων e (-)	0.7178
Ξηρή πυκνότητα ρ (Mgr/m ³)	1.554
Διαπερατότητα k (m/s)	$6.5 \cdot 10^{-5}$

Αντίθετα για την συμπεριφορά της επιφανειακής αργίλου υιοθετείται το ελαστο-πλαστικό καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Οι επιλεγμένες παράμετροι διατμητικής αντοχής αντιστοιχούν σε υπερστερεοποιημένη άργιλο, γωνίας τριβής ίση με $\phi=0^\circ$, γωνίας διαστολικότητας ίσης με $\psi=0^\circ$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ίση με $S_u=40\text{kPa}$ και $S_u=20\text{kPa}$, ανάλογα με την ανάλυση. Σε εφελκυσμό, θεωρείται πως υπάρχει περιορισμός της επιτρεπόμενης αντοχής της αργίλου (tension cutoff), με την περιβάλλουσα αστοχίας να διακόπτεται στην τιμή $0.5 \cdot S_u$. Το μέγιστο μέτρο διάτμησης υπολογίστηκε βάσει της εμπειρικής σχέσης $G_{\max}=1500 \cdot S_u$, σύμφωνα με την εκάστοτε αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής κρούστας, ενώ όσον αφορά στη δυναμική φόρτιση, η τιμή του μέτρου διάτμησης G εκτιμήθηκε θεωρώντας απομείωση του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_{\max} κατά 50%, λόγω ανακυκλικής παραμόρφωσης. Η άργιλος θεωρείται πρακτικά αδιαπέρατη, με τον συντελεστή διαπερατότητας να τίθεται ίσος με $k = 6.5 \cdot 10^{-9} \text{m/s}$, για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης. Με βάση τα παραπάνω, η στρώση της αργίλου πάχους 2m στη δυναμική φόρτιση έχει τιμές μέτρου διάτμησης $G = 30\text{MPa}$ και μέτρου ισότροπης συμπίεσης $K = 80\text{MPa}$, όταν $S_u = 40\text{kPa}$, και τις μισές των τιμών αυτών όταν $S_u = 20\text{kPa}$.

3.2.4 Θεμέλια

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στις δύο διαστάσεις για άκαμπτα επιφανειακά (απειρομήκη) θεμέλια πλάτους B και ομοιόμορφης κατακόρυφης επιβαλλόμενης τάσης q . Η προσομοίωση των θεμελίων έγινε μέσω εδαφικών ζωνών κάνοντας χρήση του ελαστικού προσομοιώματος. Προκειμένου να μην μικρύνει το υπολογιστικό βήμα και αυξηθεί υπέρμετρα ο υπολογιστικός χρόνος, οι ζώνες των θεμελίων είχαν το ίδιο ύψος και εύρος με εκείνες του εδάφους, ήτοι ύψος 1.0m και εύρος 0.5m. Οι ζώνες προσομοίωσης των θεμελίων ήταν απολύτως συνδεδεμένες με τις υποκείμενες ζώνες προσομοίωσης του εδάφους, με αποτέλεσμα να πρόκειται για απολύτως τραχιά θεμέλια. Το πλάτος των θεμελίων έλαβε τις τιμές $B=5\text{m}$ και $B=20\text{m}$. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι τιμές των ελαστικών σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των δύο θεμελίων διαφορετικού πλάτους. Τονίζεται πως οι τιμές αυτές εξασφαλίζουν την «άκαμπτη» φύση των θεμελίων, ανεξαρτήτως του μεγέθους του θεμελίου.

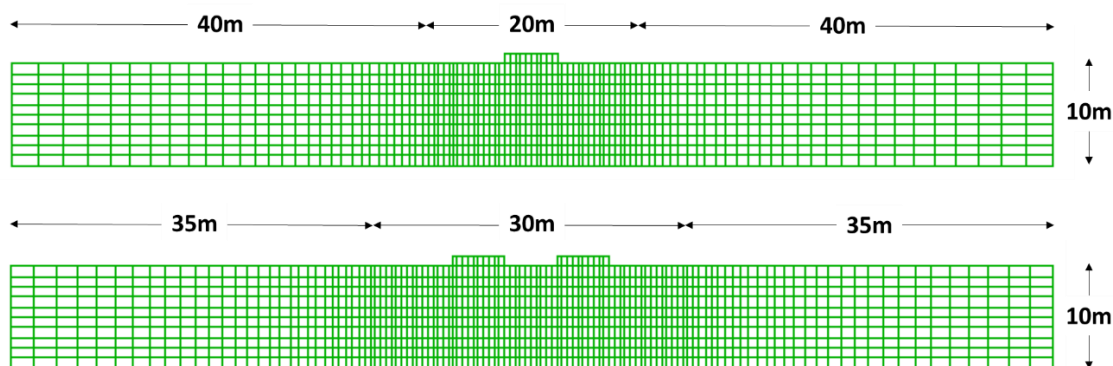
Πίνακας 3.2: Τιμές ελαστικών σταθερών για την προσομοίωση των θεμελίων

	B=5m	B=20m
Μέτρο Διάτμησης G (GPa)	1.0	10.0
Μέτρο Ισότροπης Συμπίεσης K (GPa)	2.0	20.0

Υπογραμμίζεται πως η πυκνότητα των θεμελίων λαμβάνεται ίση με $\rho=0.2 \text{ Mgr/m}^3$, η οποία είναι επαρκώς μικρή προκειμένου να μην αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις στα θεμέλια. Τέλος, η διαπερατότητα των θεμελίων ελήφθη ίση με $k=6.5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η πλήρης αδιαπερατότητά τους.

3.2.5 Διακριτοποίηση Καννάβου

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κάνναβοι διαφορετικού πλάτους αλλά ίδιου ύψους (συνολικό πάχος εδαφικών στρώσεων 10m). Η αναγκαιότητα του διαφορετικού πλάτους καννάβου προήλθε κυρίως εξαιτίας της διερεύνησης της απόκρισης θεμελίων σε διαφορετικές ενδιάμεσες αποστάσεις, και της επαγόμενης απαίτησης για επαρκή επέκταση των πλευρικών όριων πλευρικά από τις παρειές των θεμελίων, προκειμένου εκείνα να μην επηρεάζουν την συμπεριφορά των θεμελίων. Στο **Σχήμα 3.3** παρουσιάζεται ενδεικτικά η τυπική διάταξη του καννάβου για μονό θεμέλιο πλάτους $B=5\text{m}$ (άνω υποσχήμα) και για διπλά θεμέλια πλάτους $B=5\text{m}$ σε ενδιάμεση απόσταση θεμελίων ίση με $D=5\text{m}$ (κάτω υποσχήμα).



Σχήμα 3.3: Διάταξη καννάβου για μονό θεμέλιο πλάτους $B=5\text{m}$ και για διπλά θεμέλια πλάτους $B=5\text{m}$ σε ενδιάμεση απόσταση $D=5\text{m}$.

Οι κάνναβοι που παρουσιάζονται εκτείνονται κατά 100m στο πλάτος και κατά 10m στο ύψος. Στην περίπτωση του μονού θεμελίου, γίνεται πύκνωση των στοιχείων διακριτοποίησης στην περιοχή επιρροής του θεμελίου, ήτοι στην εδαφική περιοχή ακριβώς κάτω από το θεμέλιο και 7.5m (1.5B) εκατέρωθεν των παρειών του θεμελίου. Ως αποτέλεσμα, η συνολική περιοχή πύκνωσης ισούται με 20m (10m εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας της διάταξης), και αποτελείται από 40 στοιχεία πλάτους 0.5m και ύψους 1.0m. Μετά το πέρας της περιοχής επιρροής του θεμελίου, το πλάτος των στοιχείων αυξάνει σταδιακά με λόγο 1:1.05 μέχρι και τα πλευρικά όρια του καννάβου, ενώ το ύψος των στοιχείων παραμένει σε κάθε περίπτωση σταθερό και ίσο με 1.0m. Ως αποτέλεσμα, η εδαφική περιοχή εκατέρωθεν της περιοχής πύκνωσης διακριτοποιείται σε 30 στοιχεία, σταθερού ύψους και σταδιακά αυξανόμενου πλάτους, με την αύξηση της απόστασης του στοιχείου από την περιοχή ενδιαφέροντος.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση των διπλών θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$, η περιοχή επιρροής εκτείνεται σε συνολικό πλάτος 30m (7.5m εκατέρωθεν της εξωτερικής παρειάς του κάθε θεμελίου), η οποία διακριτοποιείται σε 60 στοιχεία ύψους 1.0m και πλάτους 0.5m . Κατ' αντιστοιχία της διακριτοποίησης στην διάταξη του μονού θεμελίου, τα εναπομείναντα 35m εκατέρωθεν της περιοχής επιρροής των θεμελίων διακριτοποιούνται σε 30 στοιχεία σταθερού ύψους 1.0m και σταδιακά αυξανόμενου πλάτους με λόγο $1:1.05$.

Υπογραμμίζεται ότι για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων, η περιοχή πύκνωσης σε στοιχεία πλάτους 0.5m αυξάνεται έτσι ώστε να καλύπτει κάθε φορά έκταση ίση με 7.5m εκατέρωθεν των εξωτερικών παρειών των θεμελίων. Ταυτόχρονα επεκτείνονται και τα πλευρικά σύνορα του καννάβου, προκειμένου να απέχουν κάθε φορά απόσταση ίση με 35m από την περιοχή επιρροής των θεμελίων.

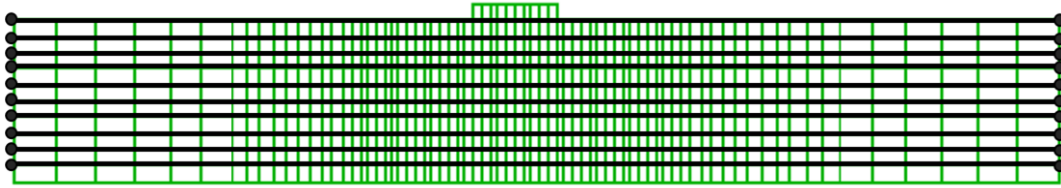
Αντίστοιχη λογική ακολουθεί και η διαμόρφωση των υπόλοιπων καννάβων, οι οποίοι όμως δεν παρουσιάζονται εδώ, χάριν συντομίας. Τέλος υπενθυμίζεται ότι σε κάθε περίπτωση, οι ζώνες των θεμελίων έχουν το ίδιο εύρος με εκείνο της εδαφικής περιοχής κάτω από τα θεμέλια. Συνεπώς, σε όλες τις αναλύσεις τα θεμέλια πλάτους $B = 5\text{m}$ απαρτίζονται από 10 στοιχεία πλάτους 0.5m , ενώ τα αντίστοιχα με πλάτος $B = 20\text{m}$ από 40 στοιχεία πλάτους 0.5m .

3.2.6 Συνοριακές Συνθήκες-Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα

Για όλες τις αναλύσεις θεωρείται πλήρης κορεσμός του εδάφους, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται στην επιφάνεια του εδαφικού προφίλ. Στην επίλυση περιλαμβάνεται ένα αρχικό στατικό στάδιο, στο οποίο πραγματοποιείται υπολογισμός των γεωστατικών τάσεων και ακολούθως υπολογισμός των τάσεων λόγω επιφόρτισης των θεμελίων. Σε αυτό το στάδιο τα κατακόρυφα σύνορα του προσομοιώματος δεσμεύονται κατά την οριζόντια διεύθυνση (κατακόρυφες κυλίσεις) και η βάση του προσομοιώματος δεσμεύεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (οριζόντιες κυλίσεις).

Μετά το πέρας των στατικών υπολογισμών οι συνοριακές συνθήκες μεταβάλλονται προκειμένου να αντιστοιχούν στην επιβολή της δυναμικής φόρτισης. Συγκεκριμένα επιλέγεται η εφαρμογή της μεθόδου των «συζευγμένων κόμβων» (Tied Nodes), ήτοι η δέσμευση των πλευρικών κόμβων ίδιου υψομέτρου με οριζόντια «καλώδια», προκειμένου να αναπτύσσουν κοινή μετατόπιση και ταχύτητα κατά τη διάρκεια της δόνησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην προσομοίωση της απόκρισης των πειραματικών δοχείων εύκαμπτων τοιχωμάτων (laminae boxes) που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πειράματα φυγοκεντρική και σεισμική τράπεζας, για την επιτυχή προσομοίωση της

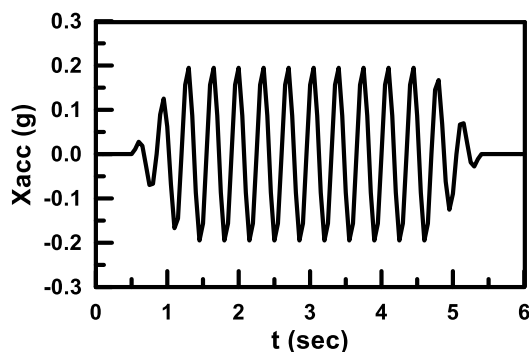
δυναμικής απόκρισης σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Η φιλοσοφία της μεθόδου των «συζευγμένων κόμβων» αποτυπώνεται στο **Σχήμα 3.4**.



Σχήμα 3.4: Προσομοίωμα με «συζευγμένους κόμβους» (Tied Nodes) ως συνθήκες στήριξης.

3.2.7 Σεισμική Διέγερση – Απόσβεση

Κατά τη διάρκεια της επιβολής της σεισμικής διέγερσης, αυτή επιβάλλεται ως χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης των κόμβων βάσης με ταυτόχρονη μηδενική κατακόρυφη επιτάχυνση. Σε όλες τις αναλύσεις, αυτή η οριζόντια επιτάχυνση ήταν μια (οιωνεί) αρμονική διέγερση, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max}=0.2g$ και περιόδου $T=0.35\text{sec}$. Συγκεκριμένα, η διέγερση αποτελείται από συνολικά 14 κύκλους, εκ των οποίων οι 10 ενδιάμεσοι κύκλοι διαθέτουν σταθερό πλάτος επιτάχυνσης $a_{\max}=0.2g$. Προκειμένου να υπάρξει σταδιακή αύξηση και αντίστοιχα μείωση της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, στην αρχή της χρονοϊστορίας προστέθηκαν δύο κύκλοι μικρότερου και μεταβαλλόμενου πλάτους. Αντίστοιχα, προστέθηκαν δύο τελευταίοι κύκλοι, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταδιακή μετάβαση στην ηρεμία. Η χρονοϊστορία της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.5**.



Σχήμα 3.5: Χρονοϊστορία επιβαλλόμενης διέγερσης στην βάση του εδαφικού προφίλ

Επιπλέον αναφέρεται ότι κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης θεωρήθηκε 10% τοπική απόσβεση (local damping) για την άργιλο και 2% τοπική απόσβεση για την άμμο. Η παραπάνω διαφοροποίηση στην τοπική απόσβεση που χρησιμοποιείται για τους δύο εδαφικούς σχηματισμούς οφείλεται στο γεγονός ότι η υστερητική απόσβεση της άμμου

αποδίδεται από το ίδιο το καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND, σε αντίθεση με το Mohr-Coulomb, που απαιτεί την προσθήκη μηχανικής απόσβεσης για την ορθή προσομοίωση της απόκρισης της αργίλου σε μεγαλύτερες ανακυκλικές παραμορφώσεις, σε περίπτωση που στο καταστατικό προσομοίωμα παραμένει στην ελαστική περιοχή.

3.2.8 Παραμετρική Διερεύνηση

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν για δίδυμα θεμέλια -ήτοι ίδιου πλάτους και φορτίου- εξετάζοντας αρχικά την περίπτωση στενών θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$ αλλά και ευρέων θεμελίων πλάτους $B=20\text{m}$, για έδραση επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$. Στην συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργλικής κρούστας, μελετώντας την απόκριση των προαναφερθέντων δίδυμων θεμελίων (εύρους $B=5\text{m}$ και $B=20\text{m}$) με την διαφοροποίηση ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου μειώθηκε στο μισό, ήτοι έλαβε την τιμή $S_u=20\text{kPa}$. Στις αναλύσεις δίδυμων θεμελίων το φορτίο των θεμελίων διατηρήθηκε σταθερό σε όλους τους συνδυασμούς, ίσο με $q=50\text{kPa}$, ανεξαρτήτως του εύρους του θεμελίου. Επιπλέον, σε όλους τους συνδυασμούς διερευνήθηκε η σημαντικότητα της απόστασης D μεταξύ των δύο θεμελίων, για κανονικοποιημένες τιμές $D/B = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 για τα δίδυμα στενά θεμέλια, και $D/B = 0.5, 1.0$ και 2.0 για τα δίδυμα ευρέα θεμέλια. Η μέγιστη ενδιάμεση απόσταση που εξετάστηκε προέκυψε παράλληλα με την διερεύνηση του προβλήματος, προκειμένου εκείνη να είναι επαρκής για να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο θεμελίων. Ακολούθησαν αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$) με ίδιο ($q_1 = q_2 = 50\text{kPa}$) ή διαφορετικό φορτίο έδρασης ($q_1 = 50\text{kPa}$ και $q_2 = 100\text{kPa}$), σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις (ως προς το εύρος του στενού θεμελίου) $D/B_1 = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 . Στις αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου εξετάστηκε διεξοδικά η περίπτωση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου ίσης με $S_u=40\text{kPa}$. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η απόκριση των θεμελίων συγκρίθηκε με την απόκριση αναφοράς σε όρους καθιζήσεων και στροφών, ήτοι την απόκριση του θεμελίου ίδιων χαρακτηριστικών και επί του ίδιου εδάφους έδρασης, αλλά απομονωμένου. Σημειώνεται πως για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και για αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου ίση με $S_u=20\text{kPa}$, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στα συγκεντρωτικά γραφήματα που συνοψίζουν την δυναμική αλληλεπίδραση (σε όρους λόγου καθιζήσεων και στροφών) θεμελίων υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης, στο Κεφαλαίο 6. Στη συνέχεια, στον Πίνακα 3.3 συνοψίζονται όλες οι δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την διερεύνηση της

αλληλεπίδρασης θεμελίων σε καθεστώς ρευστοποίησης, ενώ στον **Πίνακα 3.4** δίνονται τα χαρακτηριστικά των αναλύσεων που αφορούν στα θεμέλια αναφοράς.

Πίνακας 3.3: Βασικά δεδομένα παραμετρικών αναλύσεων απόκρισης θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με επιφανειακή αργλική κρούστα

B_1 (m)	B_2 (m)	q_1 (kPa)	q_2 (kPa)	D/ B_1	S_u (kPa)
5.0	5.0	50.0	50.0	0.5	40.0
				1.0	
				2.0	
				3.0	
				4.0	
				5.0	
20.0	20.0	50.0	50.0	0.5	40.0
				1.0	
				2.0	
5.0	5.0	50.0	50.0	0.5	20.0
				1.0	
				2.0	
				3.0	
				4.0	
				5.0	
20.0	20.0	50.0	50.0	0.5	20.0
				1.0	
				2.0	
5.0	20.0	50.0	50.0	0.5	40.0
				1.0	
				2.0	
				3.0	
				4.0	
				5.0	
5.0	20.0	50.0	100.0	0.5	40.0
				1.0	
				2.0	
				3.0	
				4.0	
				5.0	
5.0	20.0	50.0	50.0	0.5	20.0
				1.0	
				2.0	
				3.0	
				4.0	
				5.0	

Πίνακας 3.4: Βασικά δεδομένα παραμετρικών αναλύσεων μονών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με επιφανειακή αργλική κρούστα

B (m)	q (kPa)	S_u (kPa)
5.0	50.0	40.0
20.0	50.0	40.0
5.0	50.0	20.0
20.0	50.0	20.0
20.0	100.0	40.0

3.2.9 Στατικές Αναλύσεις υπολογισμού της Φέρουσας Ικανότητας

Τέλος αναφέρεται πως πέραν των παραπάνω δυναμικών αναλύσεων, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν και αμιγώς στατικές αναλύσεις εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας, κατ' αντιστοιχία με τις δυναμικές αναλύσεις μονών θεμελίων και τις δυναμικές αναλύσεις ζεύγους θεμελίων, ήτοι για ίδιο εύρος θεμελίων B, ενδιάμεσες αποστάσεις D και χαρακτηριστικά του εδάφους έδρασης. Στις αναλύσεις αυτές εφαρμόστηκε η ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε ως άνω (εδαφικά χαρακτηριστικά, εύρος θεμελίων, διακριτοποίηση καννάβου και συνοριακές συνθήκες) για την επίλυση του στατικού τμήματος των δυναμικών αναλύσεων. Για τις στατικές αναλύσεις υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας οι θεμελιολωρίδες θεωρήθηκαν άκαμπτες και τραχιές (fix_x_y), κατ' αντιστοιχία με τα χαρακτηριστικά των θεμελίων των δυναμικών αναλύσεων, και η αστοχία επήλθε μέσω σταδιακής επιβολής κατακόρυφης μετατόπισης των θεμελίων, με ταχύτητα επαρκώς μικρή (της τάξεως $v_{\text{velocity}}=10^{-7}\text{m/s}$) ώστε τα αποτελέσματα των αναλύσεων να είναι αξιόπιστα. Οι στατικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.5** και στον **Πίνακα 3.6**.

Πίνακας 3.5: Αναλύσεις υπολογισμού της Φέρουσας Ικανότητας θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με επιφανειακή αργλική κρούστα

B₁ (m)	B₂ (m)	D/B₁	S_u (kPa)
5.0	5.0	0.5*	40.0
		1.0	
		2.0	
		3.0	
		4.0	
		5.0	
20.0	20.0	0.5	40.0
		1.0	
		2.0	

*Θεμέλια ταυτόχρονα και διαδοχικά φορτιζόμενα

Πίνακας 3.5 (...συνέχεια) :Αναλύσεις υπολογισμού της Φέρουσας Ικανότητας θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με επιφανειακη αργλική κρούστα

B₁ (m)	B₂ (m)	D/B₁	S_u (kPa)
5.0	5.0	0.5	20.0
		1.0	
		2.0	
		3.0	
		4.0	
		5.0	
20.0	20.0	0.5	20.0
		1.0	
		2.0	
5.0	20.0	0.5	40.0
		1.0	
		2.0	
		3.0	
		4.0	
		5.0	

Πίνακας 3.6: Αναλύσεις υπολογισμού της Φέρουσας Ικανότητας μονών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με επιφανειακη αργλική κρούστα

B (m)	S_u (kPa)
5.0	40.0
20.0	40.0
5.0	20.0
20.0	20.0

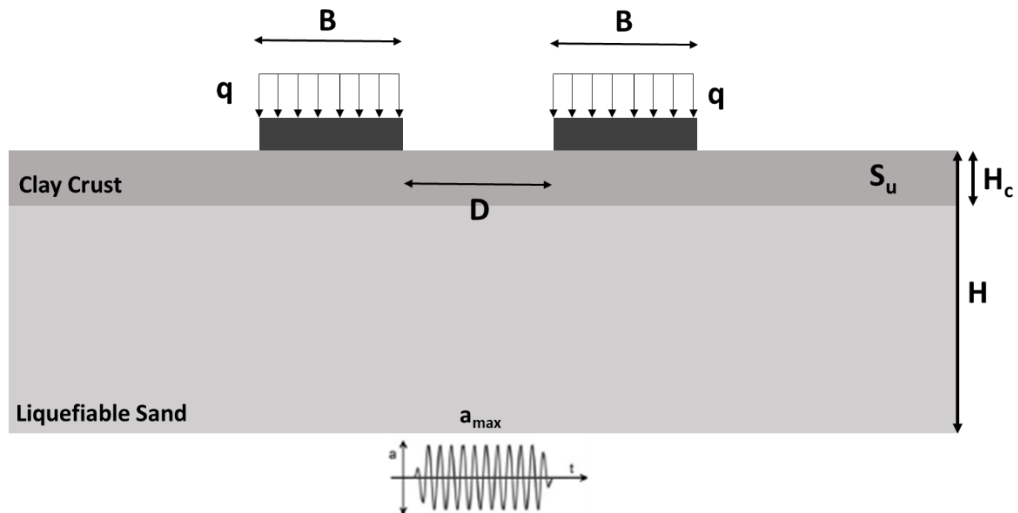
Κεφάλαιο 4

Αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων

4.1 Γενικά

Στο παρόν Κεφάλαιο μελετάται η δυναμική απόκριση δίδυμων θεμελιολωρίδων -ήτοι θεμελιολωρίδων ίδιου πλάτους και φορτίου- για έδραση επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενου από 8m ρευστοποιήσιμης άμμου στη βάση και 2m αργιλικής στρώσης στην επιφάνεια. Το ενδιαφέρον εδώ επικεντρώνεται στις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις και στροφές των δίδυμων θεμελίων, οι οποίες μελετώνται όχι κατ' απόλυτο μέγεθος αλλά ως προς το πώς αυτές συγκρίνονται με την απόκριση των αντίστοιχων μονών θεμελίων, η οποία μπορεί άλλωστε να εκτιμηθεί από ήδη υπάρχουσες μεθοδολογίες (π.χ., Karamitros 2010), για δεδομένα χαρακτηριστικά εδάφους και διέγερσης.

Η διερεύνηση της σεισμικής αλληλεπίδρασης έγινε με την πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων για μονά και δίδυμα θεμέλια. Από κάθε ανάλυση δίδυμων θεμελίων αξιοποιήθηκε η τελική καθίζηση του κέντρου των (άκαμπτων) θεμελίων στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία κανονικοποιήθηκε ως προς την αντίστοιχη απόκριση αναφοράς, δηλαδή την τελική καθίζηση για μονό θεμέλιο ίδιου πλάτους B και φορτίου q , που είναι και η συμπεριφορά που αναμένεται όταν η απόσταση μεταξύ των δίδυμων θεμελίων D γίνει άπειρη. Επιπλέον, αξιοποιήθηκε η τελική στροφή του κάθε θεμελίου (ως στερεό σώμα). Καθώς η τελική στροφή των μονών θεμελίων προκύπτει σε όλες τις περιπτώσεις μηδενική, η στροφή των δίδυμων θεμελίων παρουσιάζεται με την πραγματική αριθμητική τιμή της. Επίσης, για τις στροφές υιοθετείται η σύμβαση των θετικά προσημασμένων τιμών να υποδηλώνει στροφή θεμελίου προς το γειτονικό του, ενώ αρνητική τιμή να αντιστοιχεί σε στροφή κατά του γειτονικού του. Τέλος, για την ερμηνεία των ως άνω αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκαν η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης των θεμελίων στο τέλος της διέγερσης.



Σχήμα 4.1: Σκαρίφημα διάταξης δίδυμων θεμελίων πλάτους B , φορτίου έδρασης q και ενδιάμεσης απόστασης D , εδραζόμενων σε δίστρωτο έδαφος συνολικού πάχους H αποτελούμενο από επιφανειακή αργιλική κρούστα (πάχους H_c και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u) και ρευστοποιήσιμη άμμο, υπό αρμονική σεισμική διέγερση έντασης a_{max} , με στόχο τον υπολογισμό καθιζήσεων z και στροφών θ .

Από όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική αλληλεπίδραση θεμελίων, στην παρούσα διερεύνηση εξετάζεται κυρίως η επίδραση της απόστασης D μεταξύ των δύο θεμελίων, η οποία εδώ κανονικοποιείται ως προς το (κοινό) εύρος των θεμελίων B . Η διερεύνηση γίνεται για δύο σειρές θεμελίων, τα στενά πλάτους $B = 5\text{m}$ (δηλ. κανονικοποιημένου πάχους αργιλικής στρώσης $H_c/B = 0.4$) και τα ευρέα πλάτους $B = 20\text{m}$ (δηλ. κανονικοποιημένου πάχους αργιλικής στρώσης $H_c/B = 0.1$). Σε όλες τις περιπτώσεις το ομοιόμορφο και ίδιο φορτίο των θεμελίων, επιλέχθηκε να είναι ίσο με $q = 50\text{kPa}$, τιμή που αντιστοιχεί σε τυπικά θεμέλια, ούτε ιδιαίτερα ελαφριά ούτε πολύ βαριά. Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της επιφανειακής αργίλου, πραγματοποιώντας τις αρχικές αναλύσεις για $S_u=40\text{kPa}$ και στη συνέχεια εξετάζοντας την μεταβολή της απόκρισης των προαναφερθέντων δίδυμων θεμελίων (φορτίου $q=50\text{kPa}$ και εύρους $B=5\text{m}$ και $B=20\text{m}$) για τις ίδιες ενδιάμεσες αποστάσεις και πάχος εδαφικών στρώσεων, αλλά για υποδιπλάσια αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργίλου, ήτοι για $S_u=20\text{kPa}$.

Τέλος, για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος της σεισμικής αλληλεπίδρασης, στην Παράγραφο 4.2 του παρόντος κεφαλαίου μελετάται πρώτα το πρόβλημα της στατικής αλληλεπίδρασης δίδυμων θεμελιολωρίδων, για έδραση επί δίστρωτου εδάφους. Σε αυτή την παράγραφο πραγματοποιούνται στατικές αναλύσεις κατ' αντιστοιχία των σεισμικών αναλύσεων, δηλαδή για ίδιο εύρος θεμελίων B , ενδιάμεσες αποστάσεις D και χαρακτηριστικά του εδάφους έδρασης (H και H_c, S_u). Η στατική αλληλεπίδραση μελετάται σε

όρους καθιζήσεων και φέρουσας ικανότητας, μέσω των καμπυλών φορτίου-καθίξεως των θεμελίων, ενώ εξετάζεται και η μορφή του μηχανισμού στατικής αστοχίας των δίδυμων θεμελίων, για την οποία αξιοποιείται η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης κατά την αστοχία .

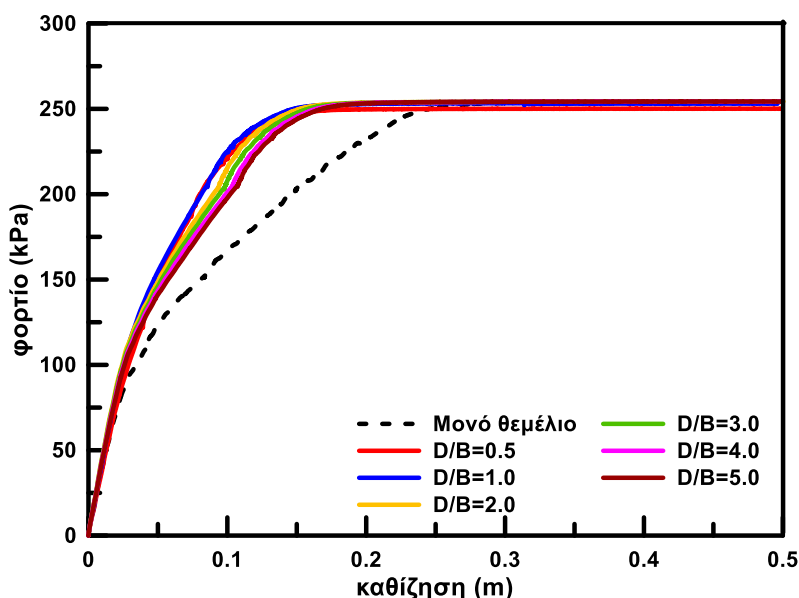
4.2 Στατική αλληλεπίδραση

4.2.1 Αλληλεπίδραση στενών θεμελίων

Στην συγκεκριμένη υπο-παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διερεύνησης της στατικής αλληλεπίδρασης δίδυμων θεμελίων πλάτους $B = 5$ m για έδραση επί δίστρωτου εδάφους αποτελούμενο από ρευστοποιήσιμη άμμο (πάχους 8m) στη βάση, και άργιλο πάχους $H_c=2$ m (ήτοι κανονικοποιημένου πάχους $H_c/B=0.4$) και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40$ kPa στην επιφάνεια. Συγκεκριμένα εξετάζεται η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, φέρουσας ικανότητας και μορφής του μηχανισμού αστοχίας για την περίπτωση ταυτόχρονα φορτιζόμενων δίδυμων θεμελίων τα οποία βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις $D = 2.5$ έως 25 m (δηλ. κανονικοποιημένες αποστάσεις $D/B = 0.5$ έως 5.0). Υπογραμμίζεται πως για την απαλοιφή διαφοροποιήσεων αριθμητικής φύσης, στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων η καμπύλη φορτίου-καθίξεως προκύπτει ως η μέση απόκριση των δύο θεμελίων.

Επιπλέον, προκειμένου να διερευνηθεί εάν υπάρχει επίδραση της χρονικής σειράς κατασκευής των δύο θεμελίων στα μεγέθη ενδιαφέροντος, πραγματοποιείται μία στοχευμένη ανάλυση στην οποία η φόρτιση των δύο θεμελίων επιβάλλεται διαδοχικά και συγκεκριμένα η επιβολή φόρτισης του δεύτερου θεμελίου γίνεται αμέσως μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης του πρώτου θεμελίου. Η ανάλυση αυτή παρουσιάζεται μετά το πέρας των αποτελεσμάτων που αφορούν τα ταυτόχρονα φορτιζόμενα θεμέλια και αντιστοιχεί σε πολύ κοντινή κανονικοποιημένη απόσταση μεταξύ των θεμελίων ίση με $D/B = 0.5$, δηλαδή στην περίπτωση όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ των θεμελίων αναμένεται να είναι η εντονότερη. Σε αυτή την ανάλυση, η καμπύλη φορτίου- καθίξεως του καθενός διαδοχικά φορτιζόμενου δίδυμου θεμελίου παρουσιάζεται ξεχωριστά.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-καθίξεως για τις περιπτώσεις μονού και δίδυμων -ταυτόχρονα φορτιζόμενων - θεμελίων κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης ίσης με $D/B = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 .

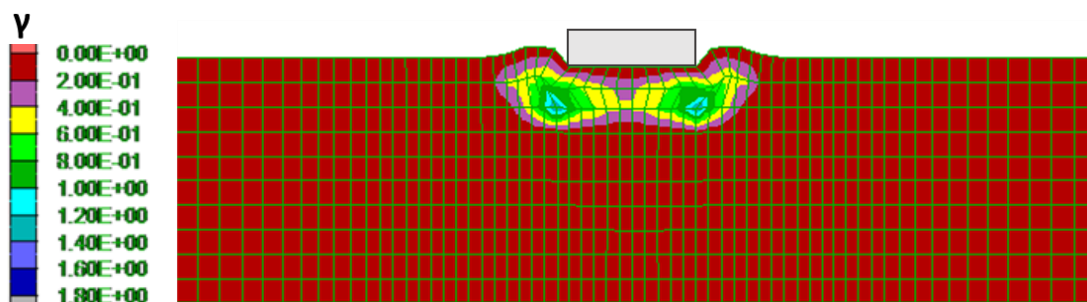


Σχήμα 4.2: Καμπύλη φορτίου-καθίζησης μονού και δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 , για έδραση θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.

Συγκρίνοντας τις καμπύλες φορτίου-καθίζησης προκύπτει το συμπέρασμα πως οι καθιζήσεις είναι μικρότερες στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων, με την διαφοροποίηση αυτή να μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της ενδιάμεσης μεταξύ τους απόστασης. Η μείωση των καθιζήσεων στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων πρέπει να οφείλεται στην αλληλεμπλοκή των βολβών των τάσεων που επιβάλλουν τα δύο θεμέλια, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση των κατακόρυφων ενεργών τάσεων συγκριτικά με την περίπτωση του μονού θεμελίου και επαγόμενη αύξηση της στιβαρότητας του εδάφους.

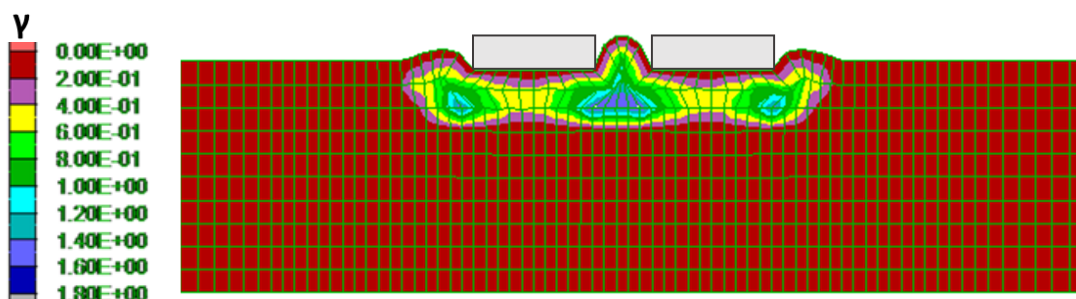
Σε αντίθεση με την διαφοροποίηση σε όρους καθιζήσεων, η φέρουσα ικανότητα φαίνεται να προκύπτει ίση με 250 kPa , ανεξάρτητα από την ύπαρξη γειτονικού δίδυμου θεμελίου και την απόσταση στην οποία αυτό βρίσκεται. Η τιμή αυτή της φέρουσας ικανότητας αντιστοιχεί σε τιμή ελαφρώς μεγαλύτερη από την φέρουσα ικανότητα μονής θεμελιολωρίδας επί αργλικού ημιχώρου, ήτοι $(\pi+2)S_u = 205\text{ kPa}$ (Prandtl 1921), υποδεικνύοντας την συγκριτικά μικρή συνεισφορά της υποκείμενης άμμου στην φέρουσα ικανότητα. Με άλλα λόγια, το συγκεκριμένο κανονικοποιημένο πάχος αργλικής στρώσης $H_c/B=0.4$ είναι επαρκώς μεγάλο προκειμένου η συνεισφορά της αργίλου στην τιμή της φέρουσας ικανότητας να υπερισχύει, παρά την ύπαρξη της στιβαρότερης και μεγαλύτερης αντοχής υποκείμενης άμμου, με το συγκεκριμένο συμπέρασμα να γενικεύεται τόσο σε δίδυμα όσο και στο μονό στενό θεμέλιο.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ (ss_i σε όρους FLAC) κατά την αστοχία, για την περίπτωση μονού θεμελίου πλάτους $B=5m$ επί δίστρωτου εδάφους ($H_c/B=0.4$ και $S_u=40kPa$).

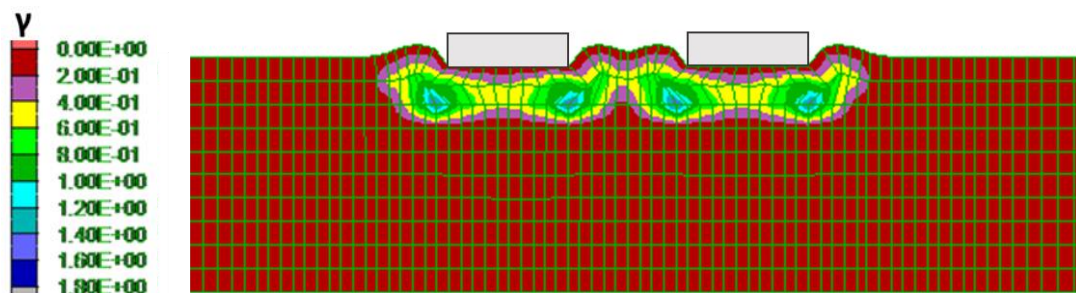


Σχήμα 4.3: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$) κάτω από μονό στενό θεμέλιο ($B=5m$)

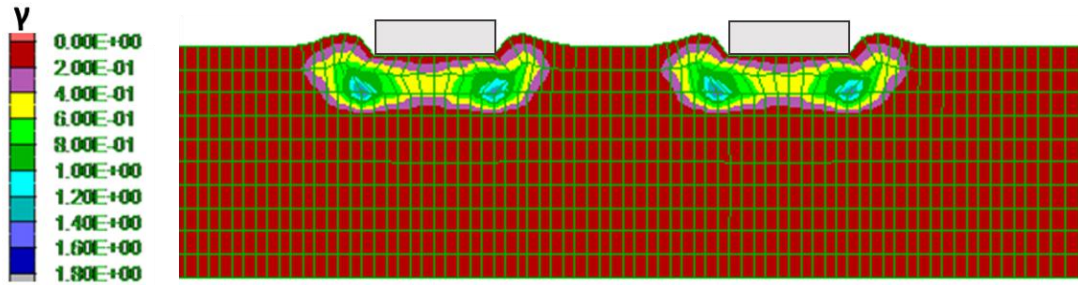
Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.4** έως το **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους κατά την αστοχία, για τις περιπτώσεις δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=5m$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B = 0.5, 1.0$ και 2.0 . Για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, η εικόνα των διατμητικών παραμορφώσεων του εδάφους πρακτικά ταυτίζεται με την περίπτωση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης $D/B=2$ και ως εκ τούτου τα σχήματα που αντιστοιχούν σε αυτές τις περιπτώσεις δεν παρουσιάζονται.



Σχήμα 4.4: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$) κάτω από δίδυμα στενά θεμέλια ($B=5m$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$



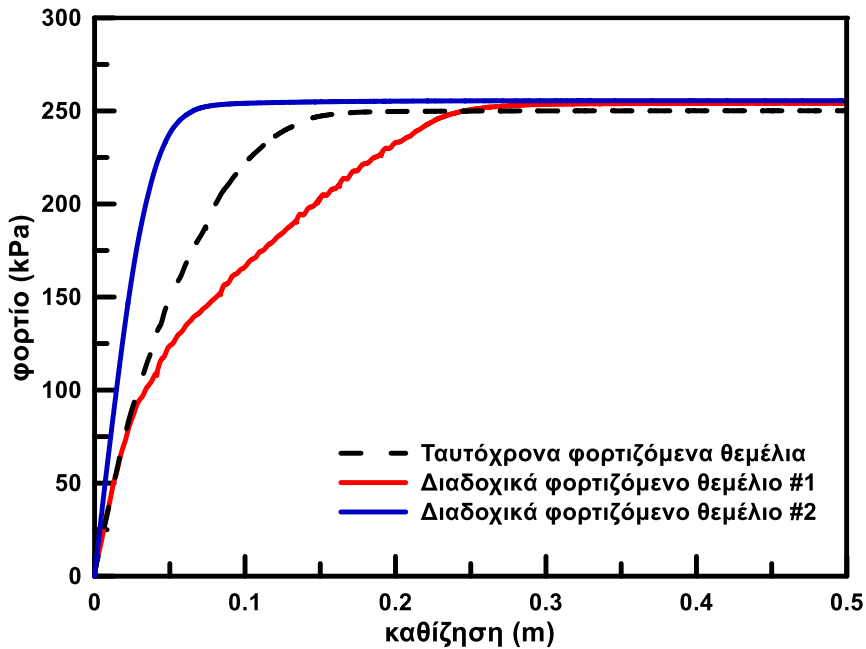
Σχήμα 4.5: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$) κάτω από δίδυμα στενά θεμέλια ($B=5m$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=1.0$.



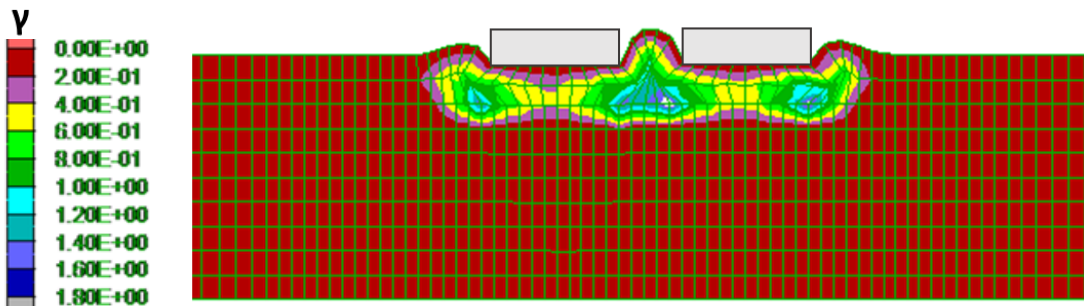
Σχήμα 4.6: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) κάτω από δίδυμα στενά θεμέλια ($B=5\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=2.0$.

Παρατηρείται ότι τόσο στην περίπτωση του μονού όσο και στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων, ο μηχανισμός αστοχίας αναπτύσσεται εντός της αργλικής στρώσης και οι διατμητικές παραμορφώσεις στην στιβαρότερη άμμο είναι ασήμαντες. Πέραν αυτής της ομοιότητας, όταν υπάρχει γειτονικό δίδυμο θεμέλιο σε κοντινή απόσταση (π.χ. κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5$) οι πρόσθετες διατμητικές τάσεις στο έδαφος ενδιάμεσα των θεμελίων επικαλύπτονται, με αποτέλεσμα την προσαύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων στην συγκεκριμένη περιοχή και την συνένωση των μηχανισμών αστοχίας του κάθε θεμελίου σε έναν ενιαίο, χωρίς αυτό να έχει επίδραση στη φέρουσα ικανότητα. Για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις των δίδυμων θεμελίων, ο μηχανισμός αστοχίας κάτω από κάθε θεμέλιο γίνεται και πάλι διακριτός και όμοιος με εκείνον του μονού θεμελίου.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-καθίζησης δίδυμων διαδοχικά φορτιζόμενων θεμελίων κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης ίσης με $D/B = 0.5$. Χάρην σύγκρισης, στο ίδιο Σχήμα απεικονίζεται και η (μέση) καμπύλη καθίζησης δύο ταυτόχρονα φορτιζόμενων δίδυμων θεμελίων, για την ίδια κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5$. Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ κατά την αστοχία, για την περίπτωση διαδοχικά φορτιζόμενων δίδυμων στενών θεμελίων σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$.



Σχήμα 4.7: Καμπύλη φορτίου-καθίζησης διαδοχικά και ταυτόχρονα φορτιζόμενων δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$ σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$, για έδραση θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.



Σχήμα 4.8: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) κάτω από δίδυμα **διαδοχικά φορτιζόμενα** στενά θεμέλια ($B=5\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$.

Από την σύγκριση των καμπυλών φορτίου-καθίζησης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η σειρά φόρτισης επηρεάζει τις καθιζήσεις, αλλά όχι τη φέρουσα ικανότητα των θεμελίων, η οποία ισούται και πάλι με 250 kPa. Συμπεραίνεται επίσης πως φορτίζοντας ταυτόχρονα τα δύο θεμέλια προκύπτει η μέση απόκριση σε όρους καθιζήσεων, ενώ το δεύτερο θεμέλιο έχει λιγότερες καθιζήσεις, καθώς οι τάσεις στο έδαφος θεμελίωσης του είναι εξ αρχής μεγαλύτερες, εξαιτίας του βολβού των τάσεων του πρώτου θεμελίου. Μάλιστα, οι καθιζήσεις του δεύτερου θεμελίου είναι το μόνο στατικό μέγεθος που φαίνεται να επηρεάζεται από την χρονική σειρά επιβολής των θεμελίων, καθώς από το **Σχήμα 4.8** προκύπτει ότι, τουλάχιστον στην αστοχία, ούτε σε όρους διατμητικών παραμορφώσεων γ του εδάφους παρατηρούνται

ουσιώδεις διαφορές συγκριτικά με την περίπτωση των ταυτόχρονα φορτιζόμενων δίδυμων θεμελίων.

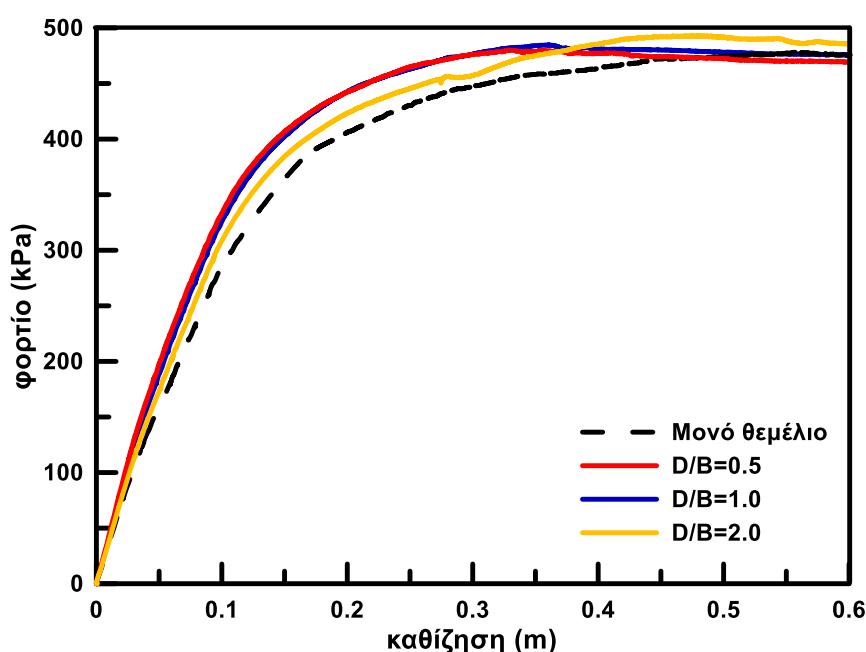
4.2.2 Αλληλεπίδραση ευρέων θεμελίων

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διερεύνησης της στατικής αλληλεπίδρασης δίδυμων ευρέων θεμελίων, ήτοι πλάτους $B = 20$ m. Υπενθυμίζεται πως ο όρος «ευρύ» θεμέλιο είναι σχετικός και προκύπτει συγκριτικά με το κανονικοποιημένο πάχος της αργιλικής κρούστας, το οποίο σε αυτή την περίπτωση είναι ίσο με $H_c/B=0.1$, αλλά και της υποκείμενης αμμώδους στρώσης (8m). Κατ' αναλογία με την διερεύνηση της στατικής αλληλεπίδρασης στενών θεμελίων, εξετάζεται η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, φέρουσας ικανότητας και μορφής του μηχανισμού αστοχίας. Στόχος των αναλύσεων που παρουσιάζονται είναι να διερευνηθεί η μεταβολή της στατικής απόκρισης των δίδυμων θεμελίων η οποία οφείλεται αποκλειστικά στην αύξηση του πλάτους των θεμελίων. Ως εκ τούτου εκτός από το σταθερό (αλλά διαφορετικό) πάχος των δύο εδαφικών στρώσεων, σταθερά διατηρούνται και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου να λαμβάνει την τιμή $S_u = 40$ kPa, αλλά και το φορτίο των θεμελίων το οποίο ισούται με $q = 50$ kPa.

Υπενθυμίζεται ότι από την στοχευμένη ανάλυση που αφορούσε στην περίπτωση δύο διαδοχικά φορτιζόμενων στενών δίδυμων θεμελίων σε ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5$ (βλ. Παράγραφο 4.2.1) προέκυψε πως η ταυτόχρονη φόρτιση των θεμελίων δίνει τη μέση απόκριση σε όρους καθιζήσεων και δεν επηρεάζει την φέρουσα ικανότητα αλλά ούτε και την κατανομή των διατμητικών παραμορφώσεων του εδάφους στην αστοχία. Συνεπώς, στις τρέχουσες στατικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ευρέων θεμελίων επιλέχθηκε να εξεταστεί μόνο η περίπτωση ταυτόχρονα φορτιζόμενων δίδυμων θεμελίων, τα οποία βρίσκονται σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B = 0.5$ έως 2.0.

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.9** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-καθίξεως για τις περιπτώσεις μονού και δίδυμων θεμελίων κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης ίσης με $D/B = 0.5, 1.0$ και 2.0. Υπογραμμίζεται πως για την απαλοιφή διαφοροποιήσεων αριθμητικής φύσης, κατ' αντιστοιχία με τις στατικές αναλύσεις δίδυμων (ταυτόχρονα φορτιζόμενων) στενών θεμελίων, η καμπύλη φορτίου-καθίξεως προκύπτει ως η μέση απόκριση των δύο δίδυμων ευρέων θεμελίων. Από την σύγκριση των καμπυλών φορτίου-καθίξεως προκύπτει ότι η φέρουσα ικανότητα των δίδυμων ευρέων θεμελίων ταυτίζεται με εκείνη του μονού, ανεξαιρέτως της μεταξύ τους ενδιάμεσης απόστασης. Συγκεκριμένα, η

φέρουσα ικανότητα των ευρέων θεμελίων είναι ίση με 480 kPa, σχεδόν διπλάσια από εκείνη των στενών θεμελίων στο ίδιο έδαφος. Αυτό είναι σαφής ένδειξη ότι στα ευρέα θεμέλια παίζει συγκριτικά μεγαλύτερο ρόλο η υποκείμενη αμμώδης στρώση, με αποτέλεσμα την αύξηση της φέρουσας ικανότητας. Ο λόγος είναι ότι η στρώση αυτή φορτίζεται πιο έντονα κάτω από ένα ευρύ, συγκριτικά με ένα στενό θεμέλιο ίδιου φορτίου. Όμως, καθώς υπάρχει πάντα η ασθενής αργιλική στρώση στην επιφάνεια, η φέρουσα ικανότητα δεν τετραπλασιάζεται λόγω τετραπλασιασμού του εύρους του θεμελίου, αλλά μόνο διπλασιάζεται. Σε ό,τι αφορά στις καθιζήσεις, κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση στενών δίδυμων θεμελίων, τα ευρέα δίδυμα θεμέλια έχουν μικρότερες καθιζήσεις συγκριτικά με το μονό θεμέλιο ίδιου εύρους.

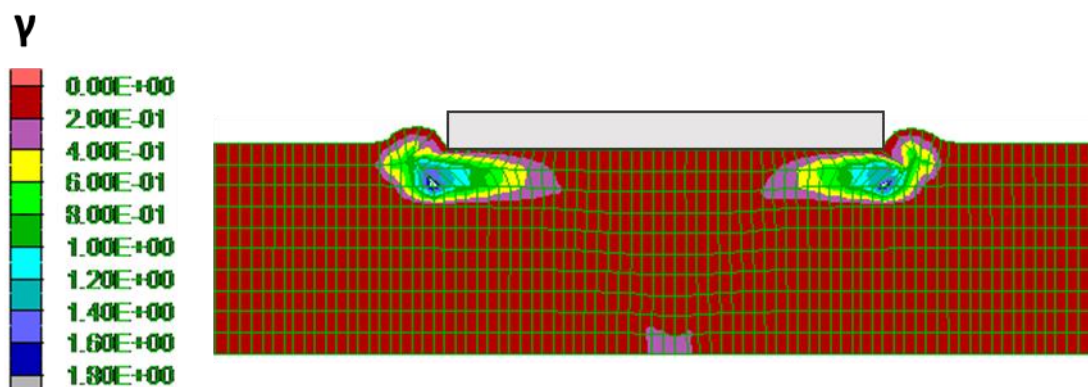


Σχήμα 4.9: Καμπύλη φορτίου-καθίzyσης μονού και δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=20\text{m}$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B=0.5$, 1.0 και 2.0 , για έδραση θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ κατά την αστοχία, για την περίπτωση μονού θεμελίου πλάτους $B=20\text{m}$ επί δίστρωτου εδάφους ($H_c/B = 0.1$ και $S_u=40\text{kPa}$).

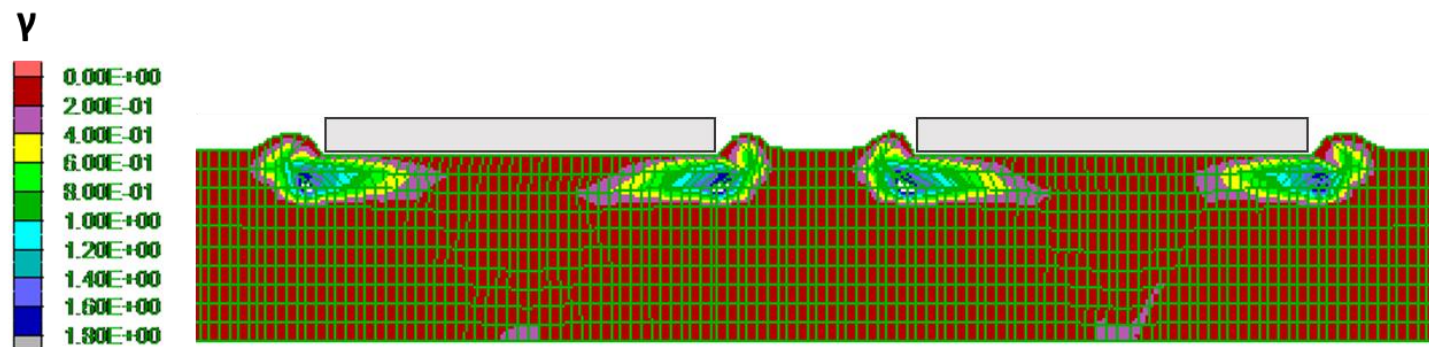
Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.11** και το **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους για τις περιπτώσεις δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=20\text{m}$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B=0.5$ και 1.0 . Για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, η εικόνα των διατμητικών παραμορφώσεων του εδάφους πρακτικά

ταυτίζεται με την περίπτωση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης $D/B=1$ και ως εκ τούτου τα σχήματα που αντιστοιχούν σε αυτές τις περιπτώσεις δεν παρουσιάζονται.

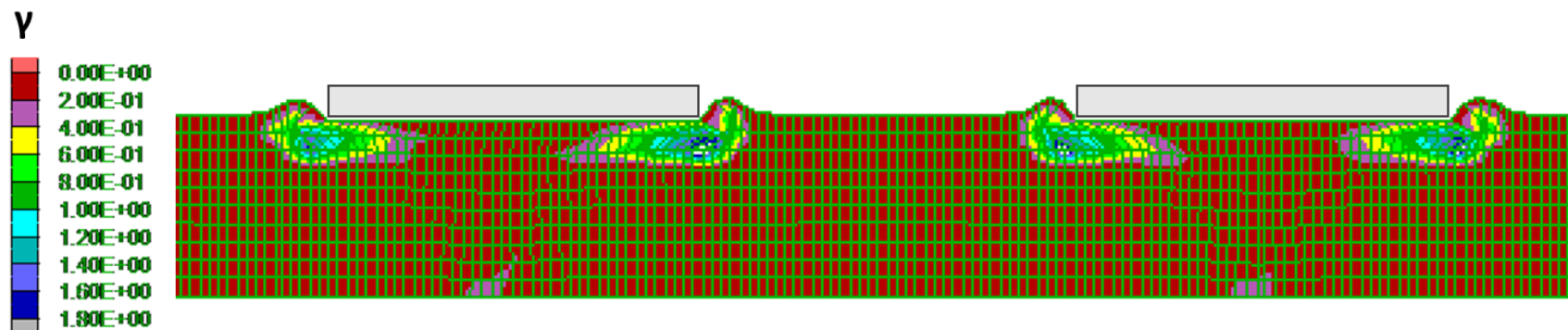


Σχήμα 4.10: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) κάτω από μονό ευρύ θεμέλιο ($B=20\text{m}$).

Παρατηρείται ότι παρά το μεγάλο πλάτος των επιβαλλόμενων θεμελιολωρίδων, οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις συγκεντρώνονται κάτω από τα άκρα των θεμελίων και περιορίζονται στο βάθος της αργλικής στρώσης. Πάντως σε αντίθεση με τα στενά θεμέλια, στην περίπτωση των ευρέων θεμελίων προκύπτει διακριτός μηχανισμός αστοχίας κάτω από κάθε δίδυμο θεμέλιο, ο οποίος ταυτίζεται με εκείνον κάτω από το μονό ευρύ θεμέλιο, ακόμα και για την περίπτωση της μικρότερης εξεταζόμενης ενδιάμεσης απόστασης ($D/B = 0.5$). Ο λόγος είναι ότι σημασία για τη στατική αλληλεπίδραση δείχνει να παίζει η πραγματική τιμή της απόστασης D , και όχι η κανονικοποιημένη τιμή της D/B , καθώς ακόμη και η «μικρή» κανονικοποιημένη απόσταση $D/B = 0.5$ αντιστοιχεί σε απόσταση $D = 10\text{m}$ στο ευρύ θεμέλιο, που για το στενό θεμέλιο αντιστοιχούσε σε «μεγάλη» κανονικοποιημένη απόσταση $D/B = 2.0$, για την οποία είχαν απεμπλακεί οι μηχανισμοί αστοχίας (βλ. **Σχήμα 4.6**).



Σχήμα 4.11: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$) κάτω από δίδυμα ευρέα θεμέλια ($B=20m$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$.

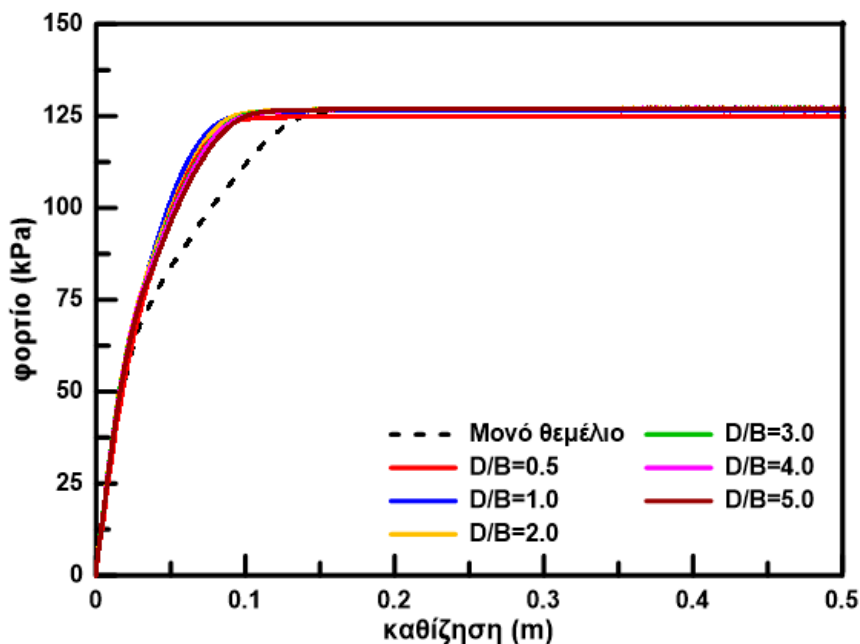


Σχήμα 4.12: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$) κάτω από δίδυμα ευρέα θεμέλια ($B=20m$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=1.0$.

4.2.3 Επίδραση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργίλου

Στόχος της παρούσας υποενότητας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου στην στατική αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενο από ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση και αργλική κρούστα στην επιφάνεια. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιούνται αναλύσεις, κατ' αντιστοιχία των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 4.2.1 και 4.2.2 (δηλαδή για τα ίδια χαρακτηριστικά θεμελίων, ενδιάμεσες αποστάσεις και πάχος εδαφικών στρώσεων) με την διαφορά ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργλικής κρούστας υποδιπλασιάζεται, ήτοι λαμβάνει την τιμή $S_u=20\text{kPa}$. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στην αλληλεπίδραση δίδυμων στενών θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$) και στη συνέχεια εκείνα που αφορούν στα δίδυμα ευρέα θεμέλια (πλάτους $B=20\text{m}$). Σε όλες τις περιπτώσεις εξετάζεται η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, φέρουσας ικανότητας και μορφής του μηχανισμού αστοχίας για την περίπτωση ταυτόχρονα φορτιζόμενων δίδυμων θεμελίων φορτίου $q = 50\text{kPa}$.

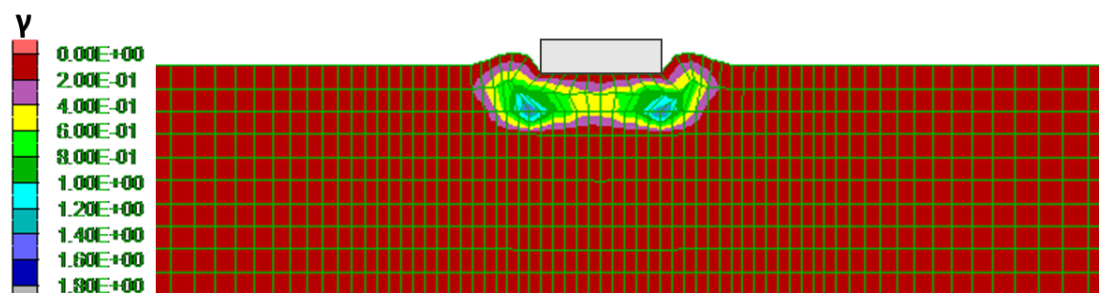
Ακολούθως, στο **Σχήμα 4.13** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-καθίξεσης για τις περιπτώσεις μονού και δίδυμων στενών θεμελίων σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση ίση με $D/B = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 , για έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



Σχήμα 4.13: Καμπύλη φορτίου-καθίξεσης μονού και δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 , για έδραση θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.

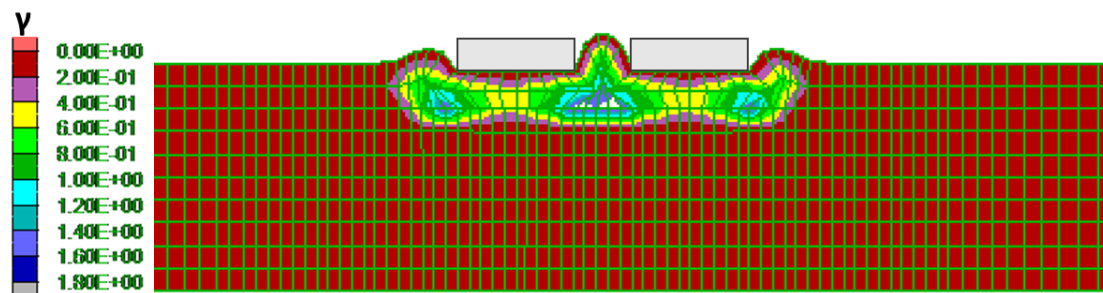
Παρατηρείται πως ο υποδιπλασιασμός της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου από $S_u=40\text{kPa}$ σε $S_u=20\text{kPa}$ έχει ως αποτέλεσμα τον υποδιπλασιασμό της φέρουσας ικανότητας των στενών θεμελίων, η οποία πλέον ισούται με $q_{ult}=125\text{kPa}$ (αντί για $q_{ult}=250\text{kPa}$ στην περίπτωση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$). Ωστόσο, παρά την αριθμητική μείωση της φέρουσας ικανότητας, η τιμή της εξακολουθεί να μην επηρεάζεται από την ύπαρξη και την απόσταση του γειτονικού δίδυμου θεμελίου, κατ' αντιστοιχία με ό,τι παρατηρήθηκε στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 4.2.1. Συν τοις άλλοις, οι καθιζήσεις των δίδυμων στενών θεμελίων εξακολουθούν να είναι μικρότερες από εκείνες του θεμελίου αναφοράς, ανεξάρτητα από την αντοχή της επιφανειακής αργίλου. Με άλλα λόγια δεν παρατηρείται ποιοτική μεταβολή της καμπύλης φορτίου-καθίζησης για το μονό θεμέλιο, αλλά ούτε και για τα δίδυμα στενά θεμέλια, για διαφορετική αντοχή της λεπτόκοκκης επιφανειακής κρούστας.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.14** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ κατά την αστοχία, για την περίπτωση μονού θεμελίου πλάτους $B=5\text{m}$, επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή αργιλική κρούστα κανονικοποιημένου πάχους $H_c/B=0.4$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.

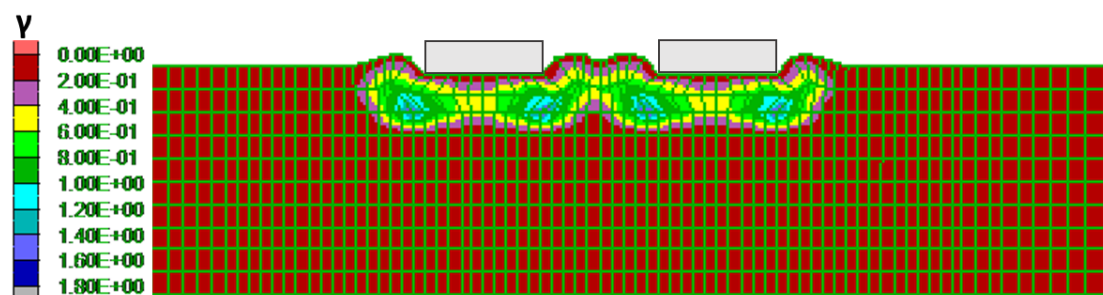


Σχήμα 4.14: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) κάτω από μονό στενό θεμέλιο ($B=5\text{m}$).

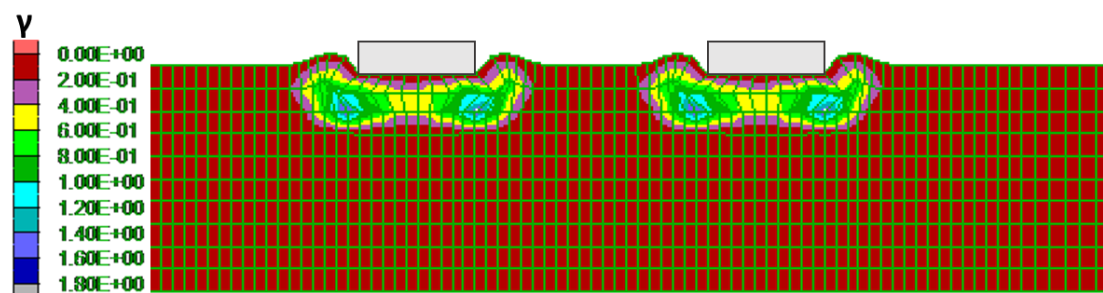
Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.15** έως το **Σχήμα 4.17** παρουσιάζονται για το ίδιο εδαφικό προφίλ, οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις κατά την αστοχία δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B = 0.5, 1.0$ και 2.0 . Για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, η εικόνα των διατμητικών παραμορφώσεων του εδάφους πρακτικά ταυτίζεται με την περίπτωση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης $D/B=2$ και ως εκ τούτου δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν τα αντίστοιχα σχήματα.



Σχήμα 4.15: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) κάτω από δίδυμα στενά θεμέλια ($B=5\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$.



Σχήμα 4.16: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) κάτω από δίδυμα στενά θεμέλια ($B=5\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=1.0$.



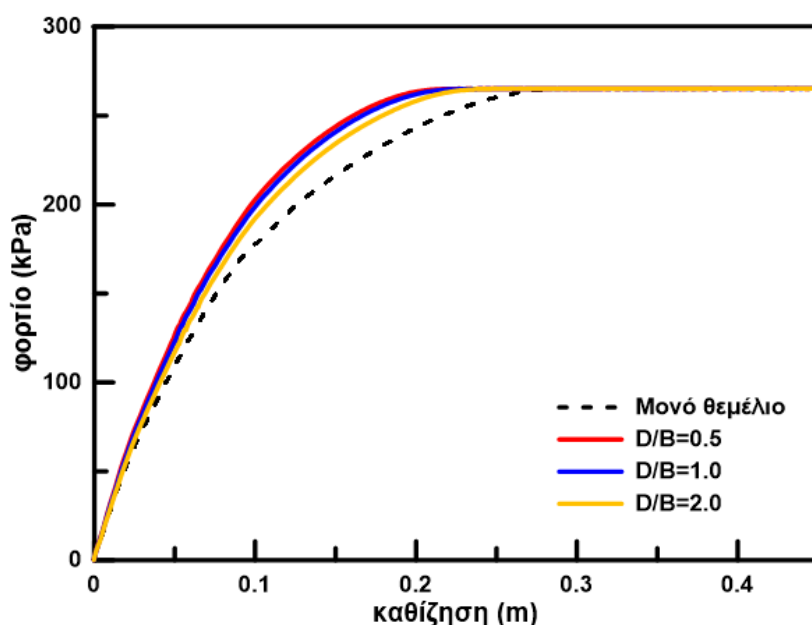
Σχήμα 4.17: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) κάτω από δίδυμα στενά θεμέλια ($B=5\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=2.0$.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω Σχήματα με το **Σχήμα 4.3** έως το **Σχήμα 4.6** παρατηρείται ότι τόσο για το μονό στενό θεμέλιο όσο και για τα δίδυμα στενά θεμέλια σε σταθερή ενδιάμεση απόσταση, ο μηχανισμός αστοχίας για τις δύο εξεταζόμενες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της επιφανειακής αργίλου ($S_u=20\text{kPa}$ και $S_u=40\text{kPa}$) παραμένει ίδιος. Με άλλα λόγια, η μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου, διατηρώντας όμως σταθερό το πάχος της, δεν επιδρά στην μορφή του μηχανισμού αστοχίας στο έδαφος

έδρασης των θεμελίων, ανεξάρτητα από το εάν αναφερόμαστε σε μονό ή δίδυμα στενά θεμέλια.

Συνοψίζοντας, η διαφορετική αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργίλου δεν επηρεάζει ποιοτικά την απόκριση του μονού αλλά ούτε και την στατική αλληλεπίδραση των δίδυμων στενών θεμελίων, τόσο σε όρους καμπύλης φορτίου-καθίζησης όσο και σε όρους μηχανισμού αστοχίας στο έδαφος έδρασης των θεμελίων.

Ακολουθως, στο **Σχήμα 4.18** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-καθίζησης για τις περιπτώσεις μονού και δίδυμων ευρέων θεμελίων σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση ίση με $D/B = 0.5, 1.0$ και 2.0 , για έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



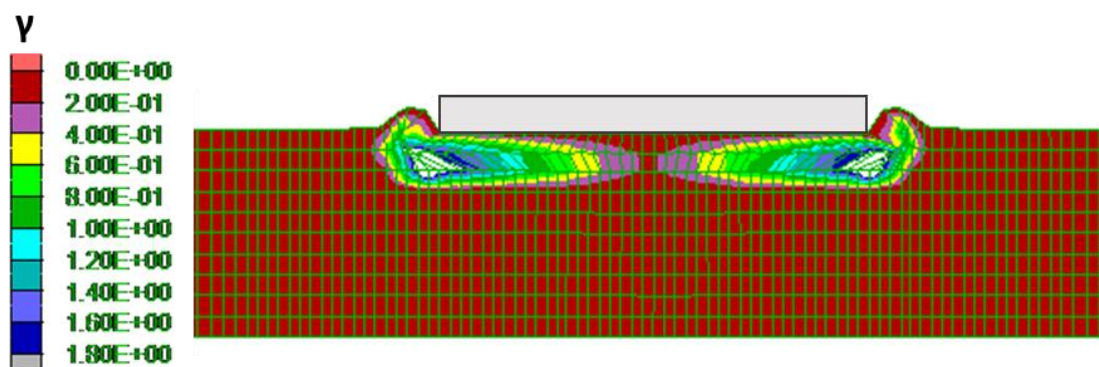
Σχήμα 4.18: Καμπύλη φορτίου-καθίζησης μονού και δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=20m$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B=0.5, 1.0$ και 2.0 , για έδραση θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.

Κατ'αναλογία με τα δίδυμα στενά θεμέλια, η απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της επιφανειακής αργίλου έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της φέρουσας ικανότητας σε $q_{ult}=265kPa$ (αντί για $q_{ult}=480kPa$ στην περίπτωση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$). Η διαφορά σε σχέση με τα δίδυμα στενά θεμέλια είναι ότι στα ευρέα θεμέλια η απομείωση της φέρουσας ικανότητας είναι λιγότερο έντονη, με τον υποδιπλασιασμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής να μην οδηγεί σε ακριβώς υποδιπλάσια τιμή της φέρουσας ικανότητας. Ο λόγος είναι ότι στα ευρέα θεμέλια παίζει

συγκριτικά μεγαλύτερο ρόλο η υποκείμενη αμμόδης στρώση, η αντοχή της οποίας παραμένει σταθερή και σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη της αργίλου.

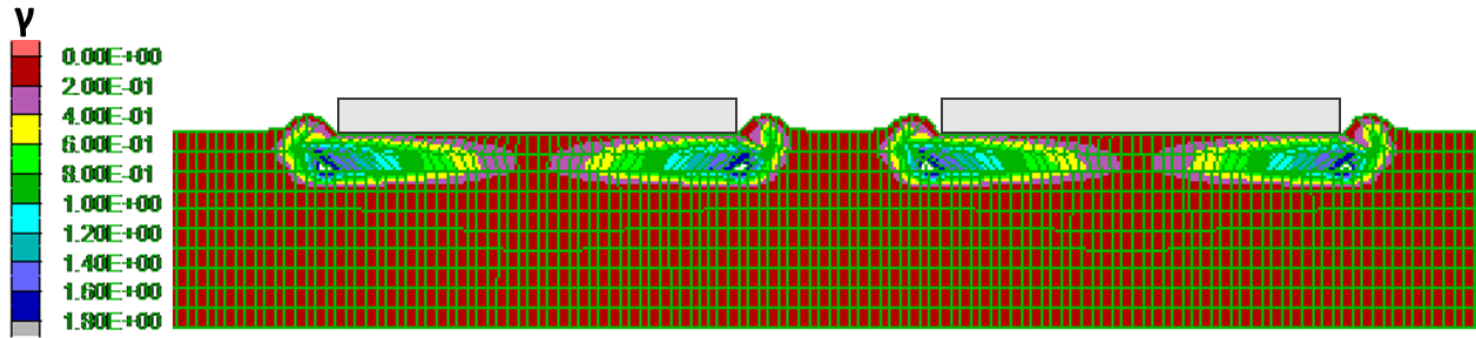
Σε ό,τι αφορά στις καθιζήσεις, τα ευρέα δίδυμα θεμέλια έχουν μικρότερες καθιζήσεις συγκριτικά με το μονό θεμέλιο ίδιου εύρους, κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση ευρέων δίδυμων θεμελίων επί αργιλικής κρούστας αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.

Παρακάτω, στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ κατά την αστοχία, για την περίπτωση μονού θεμελίου πλάτους $B=20\text{m}$ επί δίστρωτου εδάφους ($H_c/B = 0.1$ και $S_u=20\text{kPa}$).

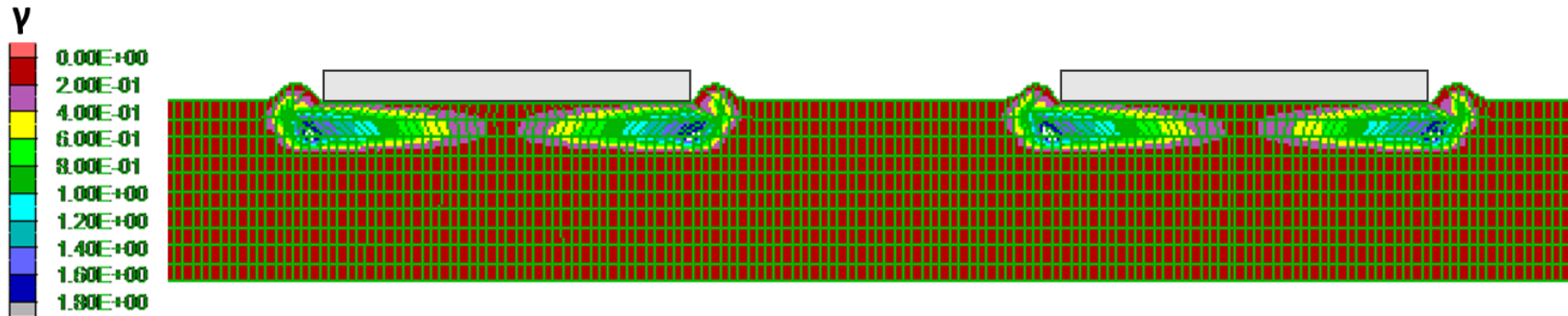


Σχήμα 4.19: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) κάτω από μονό ευρύ θεμέλιο ($B=20\text{m}$).

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.20** και το **Σχήμα 4.21** παρουσιάζονται για το ίδιο εδαφικό προφίλ, οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις κατά την αστοχία δίδυμων θεμελίων πλάτους $B=20\text{m}$ σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B=0.5$ και 1.0 . Για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, η εικόνα των διατμητικών παραμορφώσεων του εδάφους πρακτικά ταυτίζεται με την περίπτωση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης $D/B=1$ και ως εκ τούτου τα σχήματα που αντιστοιχούν σε αυτές τις περιπτώσεις δεν παρουσιάζονται.



Σχήμα 4.20: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$) κάτω από δίδυμα ευρέα θεμέλια ($B=20m$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$.



Σχήμα 4.21: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$) κάτω από δίδυμα ευρέα θεμέλια ($B=20m$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=1.0$..

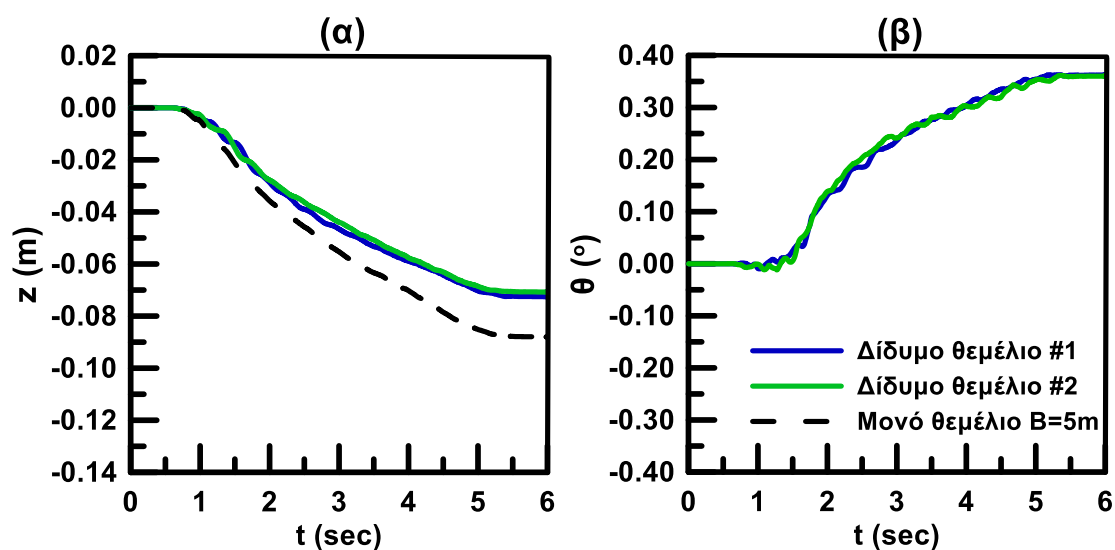
Παρατηρείται ότι η μορφή του μηχανισμού αστοχίας στο έδαφος του μονού αλλά και των δίδυμων ευρέων θεμελίων δεν επηρεάζεται από την απομείωση της αντοχής της επιφανειακής αργίλου.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ούτε στην απόκριση του μονού και των δίδυμων στενών θεμελίων παρατηρήθηκαν ποιοτικές μεταβολές εξαιτίας της απομείωσης της αντοχής της λεπτόκοκκης κρούστας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η στατική αλληλεπίδραση των δίδυμων θεμελίων δεν επηρεάζεται από την αντοχής της επιφανειακής αργίλου, ανεξαρτήτως του εύρους των θεμελίων.

4.3 Δυναμική αλληλεπίδραση

4.3.1 Αλληλεπίδραση στενών θεμελίων

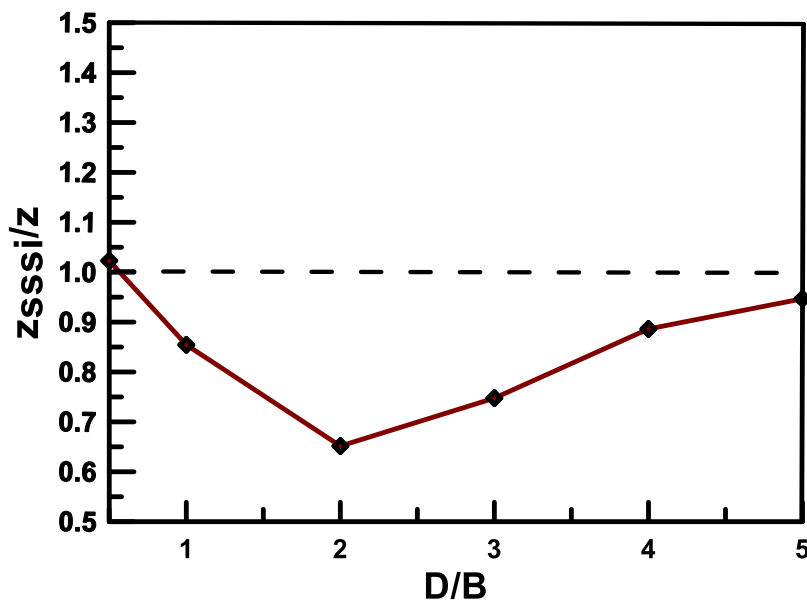
Στο **Σχήμα 4.22** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης (υποσχήμα α) και στροφής (υποσχήμα β) δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D = 1.0B = 5.0\text{m}$, για έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο (πάχους $H_c = 2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 40\text{kPa}$) υπό αρμονική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max} = 0.2\text{g}$. Χάριν σύγκρισης, στο υποσχήμα α, με διακεκομμένη μαύρη καμπύλη παρουσιάζεται και η χρονοϊστορία καθίζησης του μονού θεμελίου πλάτους $B = 5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$, για έδραση επί του ίδιου εδάφους και υπό την ίδια διέγερση αναφοράς. Η αντίστοιχη χρονοϊστορία στροφής του μονού θεμελίου είναι πρακτικώς μηδενική και δεν παρουσιάζεται.



Σχήμα 4.22: Χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής μονού και δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=1.0B=5.0\text{m}$. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος πάχους αργιλικής κρούστας $H_c=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$, υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2\text{g}$

Αυτή είναι μία τυπική μορφή των χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφής που προκύπτουν από κάθε ανάλυση, και αξιοποιούνται ώστε να αντληθούν τα μεγέθη ενδιαφέροντος της παρούσας διερεύνησης, δηλαδή ο λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z και η στροφή των θεμελίων θ . Συγκεκριμένα, για την εκτίμηση του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z , αξιοποιείται η (μέση) τελική τιμή της καθίζησης των δίδυμων θεμελίων (στο τέλος της διέγερσης) z_{sssi} , η οποία κανονικοποιείται ως προς την αντίστοιχη απόκριση αναφοράς, δηλαδή την τελική καθίζηση z του μονού θεμελίου ίδιων χαρακτηριστικών (πλάτους B και φορτίου q) εδραζόμενο επί του ίδιου εδάφους και υπό την ίδια διέγερση. Αξιοποιείται επιπλέον η (μέση) τελική στροφή θ των δίδυμων θεμελίων, δηλαδή αυτή η οποία αντιστοιχεί στο τέλος της διέγερσης.

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για διαφορετικές κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις των δίδυμων θεμελίων και τελικώς παρουσιάζεται η μεταβολή των μεγεθών ενδιαφέροντος z_{sssi}/z και θ , συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης. Με βάση τα παραπάνω, στο **Σχήμα 4.23** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των στενών δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B , για κοινό φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$ (στατικός συντελεστής ασφαλείας $FS_{\text{static}} = 5 = 250/50$), έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c = 2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 40\text{kPa}$, και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (βάσης) $a_{\text{max}} = 0.2g$.

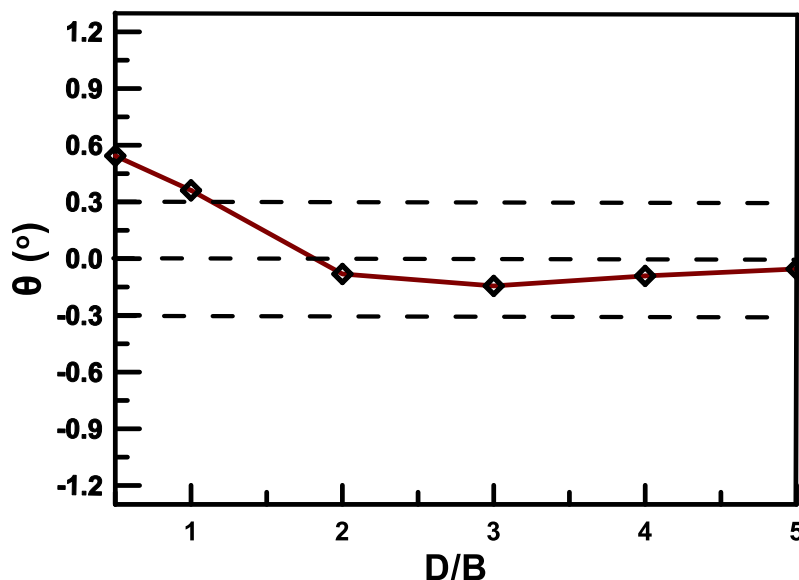


Σχήμα 4.23: Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=5\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}} = 5$). Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2g$.

Αρχικώς παρατηρείται ότι ο λόγος καθιζήσεων κυμαίνεται στο εύρος $z_{sssi}/z = 0.65-1.02$, δηλαδή προκύπτει είτε πρακτικά καθόλου αλληλεπίδραση είτε ευμενής αλληλεπίδραση σε

όρους καθιζήσεων. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή του λόγου $z_{sssl}/z = 1.02$ παρουσιάζεται για ενδιάμεση απόσταση θεμελίων $D/B = 0.5$ και η ελάχιστη τιμή του λόγου $z_{sssl}/z = 0.65$ παρουσιάζεται για ενδιάμεση απόσταση θεμελίων ίση με $D/B = 2.0$. Για ενδιάμεσες αποστάσεις μεγαλύτερες από $D = 2B = 10\text{m}$ η αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων οδηγεί σε μείωση της θετικής αλληλεπίδρασης, ήτοι αύξηση του λόγου z_{sssl}/z . Σε απόσταση μεγαλύτερη από $D/B = 4$ ο λόγος z_{sssl}/z τείνει στο 1.0, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των δύο θεμελίων είναι πλέον επαρκώς μεγάλη ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων.

Ακολούθως, στο **Σχήμα 4.24** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ των στενών δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B , για έδραση επί δίστρωτου εδάφους ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), κοινό φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$ (στατικός συντελεστής ασφαλείας $FS_{\text{static}}= 5$) και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}} = 0.2\text{ g}$. Υπενθυμίζεται ότι $\theta > 0$ υπονοεί συγκλίνουσα στροφή (δηλ. το θεμέλιο στρίβει προς το άλλο), ενώ $\theta < 0$ δείχνει αποκλίνουσα στροφή. Επιπλέον, σημειώνεται πως η στροφή του μονού θεμελίου προκύπτει πρακτικώς μηδενική και δεν παρουσιάζεται. Αντίστοιχα, τιμές στροφής θ για θεμέλια που είναι μικρότερες, κατ' απόλυτη τιμή, από την οριακή τιμή των 0.3° μπορούν και αυτές να θεωρηθούν πρακτικώς μηδενικές. Συνεπώς, η έμφαση της διερεύνησης εδώ θα είναι για το πότε προκύπτουν τιμές θ μεγαλύτερες, κατ' απόλυτη τιμή, από αυτή την οριακή τιμή.



Σχήμα 4.24: Στροφή θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=5\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}}= 5$). Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2\text{g}$.

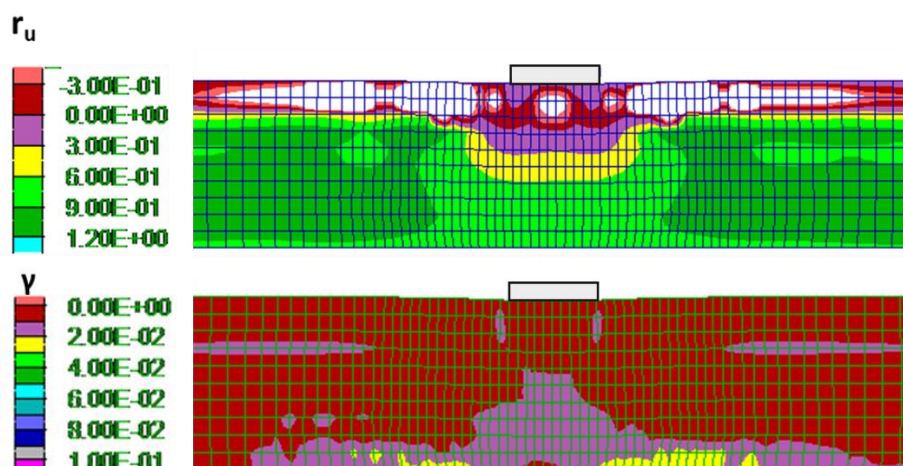
Με βάση τις παραπάνω επισημάνσεις, από το **Σχήμα 4.24** μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ουσιαστικές στροφές των δίδυμων θεμελίων παρουσιάζονται μόνο όταν η ενδιάμεση μεταξύ τους απόσταση είναι επαρκώς μικρή, στη συγκεκριμένη περίπτωση μικρότερη ή ίση από $D/B = 1$. Οι στροφές αυτές προκύπτουν αποκλειστικά συγκλίνουσες, γεγονός που υποδηλώνει ότι η περιοχή του εδάφους ανάμεσα στα θεμέλια έχει απομειωμένη στιβαρότητα, συγκριτικά με το έδαφος κάτω από τις εξωτερικές παρειές του κάθε θεμελίου. Συν τοις άλλοις, η μέγιστη τιμή της στροφής παρατηρείται για τα δίδυμα θεμέλια στην μικρότερη ενδιάμεση απόσταση, δηλαδή για $D/B=0.5$ και φθίνει -κατ' απόλυτη τιμή- με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης-

Για την ερμηνεία των παραπάνω παρατηρήσεων, στο **Σχήμα 4.25** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος μονού θεμελίου πλάτους $B = 5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$ μετά το πέρας διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max}=0.2g$, ενώ χάριν σύγκρισης στο **Σχήμα 4.26** έως το **Σχήμα 4.28** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για δίδυμο θεμέλιο (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5, 2.0$ και 4.0 υπό την ίδια διέγερση αναφοράς. Υπενθυμίζεται ότι το έδαφος έδρασης αποτελείται από ρευστοποιήσιμη άμμο (πάχους 8m) και επιφανειακή άργιλο (πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$). Υπογραμμίζεται ότι για να διευκολύνεται η σύγκριση, η χρωματική κλίμακα μεταβολής του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ είναι η ίδια και στα τέσσερα παραπάνω σχήματα, ενώ αυτή η τυπική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε όρους ισοκαμπυλών ακολουθείται σε όλο το παρόν κεφάλαιο.

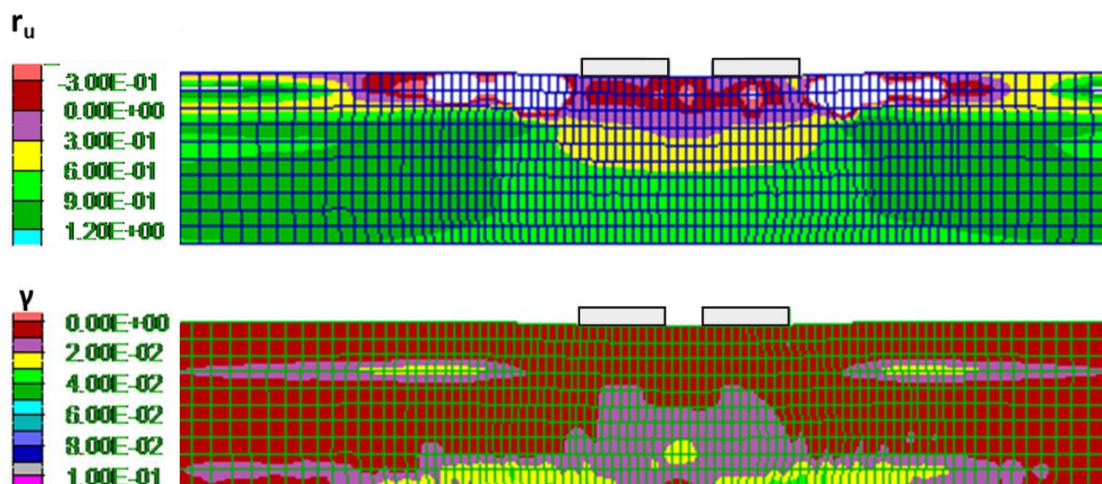
Η παρουσία ενός δίδυμου γειτονικού θεμελίου εξαφανίζει τον συμμετρικό μηχανισμό αστοχίας που προκύπτει για μονό θεμέλιο, με την εμπέδωση της αστοχίας να συμβαίνει πλέον στην περιοχή του εδάφους που βρίσκεται ενδιάμεσα των θεμελίων. Μάλιστα, η μείωση της ενδιάμεσης απόστασης εντείνει την εν λόγω ασυμμετρία, οδηγώντας σε αυξημένες διατμητικές παραμορφώσεις, οι οποίες προκύπτουν μέγιστες για την μικρότερα εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5$ και σταδιακά φθίνουν, για αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων. Τελικώς, σε ενδιάμεση απόσταση ίση με $D/B = 4.0$ παρατηρείται πρακτικά μη αλληλεπίδραση των μηχανισμών αστοχίας, με την εικόνα των διατμητικών παραμορφώσεων κάτω από κάθε θεμέλιο να ταυτίζεται, ουσιαστικά, με εκείνη του ανεξάρτητου-μονού θεμελίου.

Επιπροσθέτως, όταν η ενδιάμεση απόσταση των δύο θεμελίων είναι επαρκώς μικρή, οι τιμές του συντελεστή υπερπίεσης πόρων είναι μικρότερες στις εξωτερικές παρειές των θεμελίων, με αποτέλεσμα την στροφή των θεμελίων προς το γειτονικό θεμέλιο. Η εικόνα αυτή

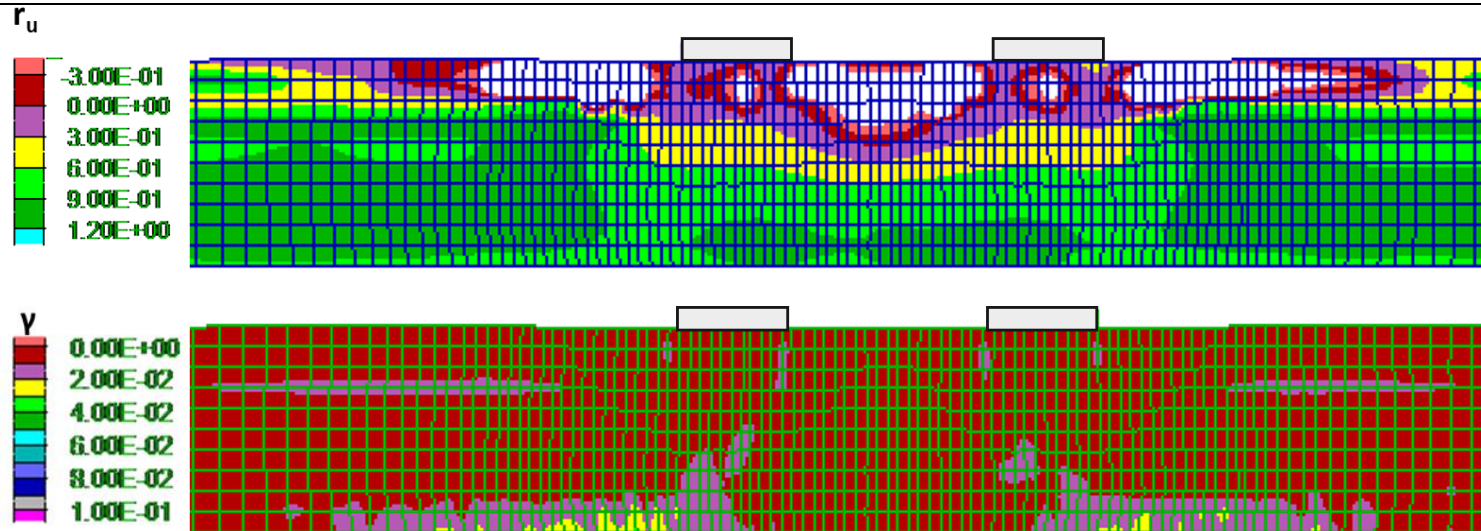
αντιστρέφεται για ενδιάμεση απόσταση $D/B = 2.0$, στην οποία παρατηρούνται οι μέγιστες υποπίεσεις στο έδαφος που βρίσκεται ενδιάμεσα των θεμελίων. Για αποστάσεις μεγαλύτερες από $D/B = 2.0$, οι υποπίεσεις δεξιά και αριστερά των θεμελίων τείνουν να εξισωθούν και τελικώς σε απόσταση ίση με $D/B = 4.0$ προκύπτει πρακτικά ταύτιση της κατανομής του συντελεστή r_u με εκείνη που παρατηρείται στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο (και ουσιαστικά μηδενικές στροφές).



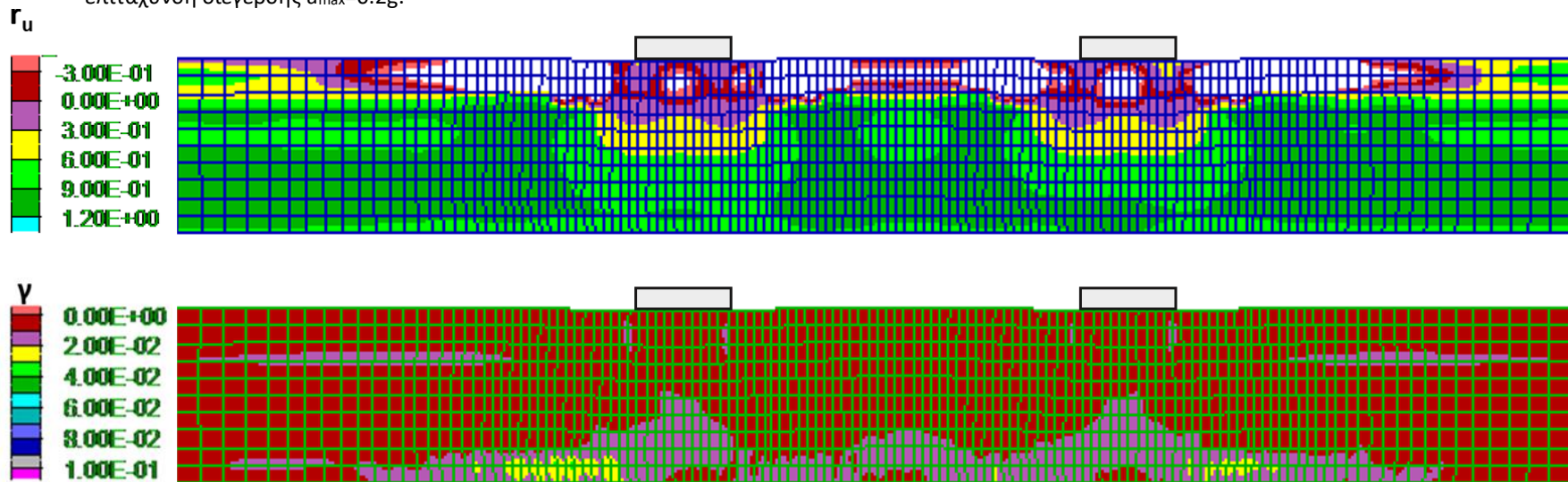
Σχήμα 4.25: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση μονού θεμελίου πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}}= 5$) υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2g$.



Σχήμα 4.26: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2g$.



Σχήμα 4.27: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=2.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.



Σχήμα 4.28: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=4.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

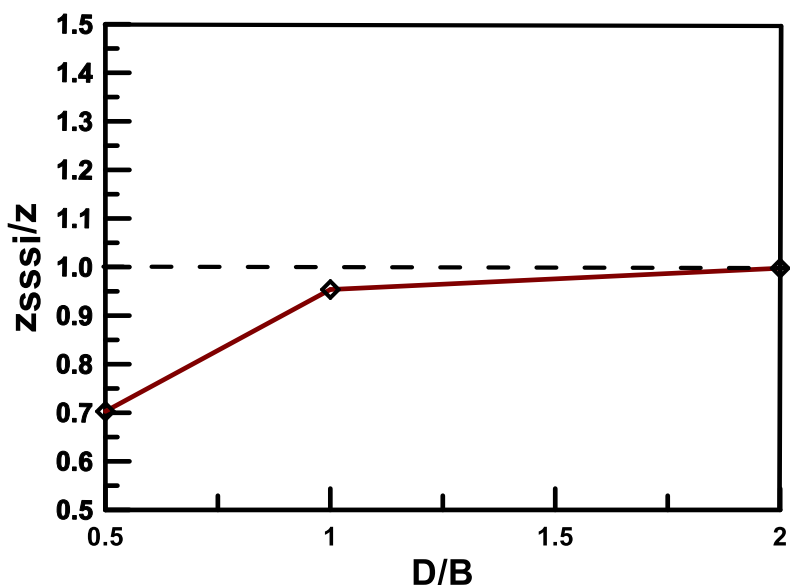
4.3.2 Αλληλεπίδραση ευρέων θεμελίων

Στην προηγούμενη παράγραφο διερευνήθηκε η επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης D στην δυναμική αλληλεπίδραση δίδυμων στενών θεμελίων ($B = 5\text{m}$) φορτίου $q = 50\text{kPa}$, για έδραση σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση σε όρους καθιζήσεων, στροφών, υπερπιέσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων για την επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης D στην αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων ίδιου φορτίου $q = 50\text{kPa}$ αλλά ευρέων, ήτοι πλάτους $B = 20\text{m}$. Όπως και στα στενά θεμέλια, η μέγιστη επιτάχυνση της επιβαλλόμενης διέγερσης στη βάση παραμένει ίση με $a_{\max}=0.2g$ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης, δηλαδή σε όρους D/B . Ωστόσο τονίζεται πως παρόλο που τα χαρακτηριστικά του εδάφους έδρασης αλλά και το φορτίο των ευρέων θεμελίων παραμένουν σταθερά σε σχέση με την περίπτωση που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τον στατικό συντελεστή ασφαλείας, ο οποίος στην περίπτωση των ευρέων θεμελίων είναι σχεδόν διπλάσιος ($FS_{\text{static}}=9.6=480/50$, αντί για $FS_{\text{static}}=5$ για τα στενά θεμέλια).

Κατ' αντιστοιχία με τα δίδυμα στενά θεμέλια, προκειμένου να προκύψουν τα συγκεντρωτικά γραφήματα μεταβολής των τιμών z_{SSI}/z και θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B , από κάθε ανάλυση δίδυμων ευρέων θεμελίων αξιοποιούνται οι τελικές (μέσες) τιμές των χρονοϊστοριών καθιζήσεως και στροφής (βλ. ενδεικτικά **Σχήμα 4.22**), οι οποίες συγκρίνονται με την αντίστοιχη απόκριση του μονού ευρέος θεμελίου.

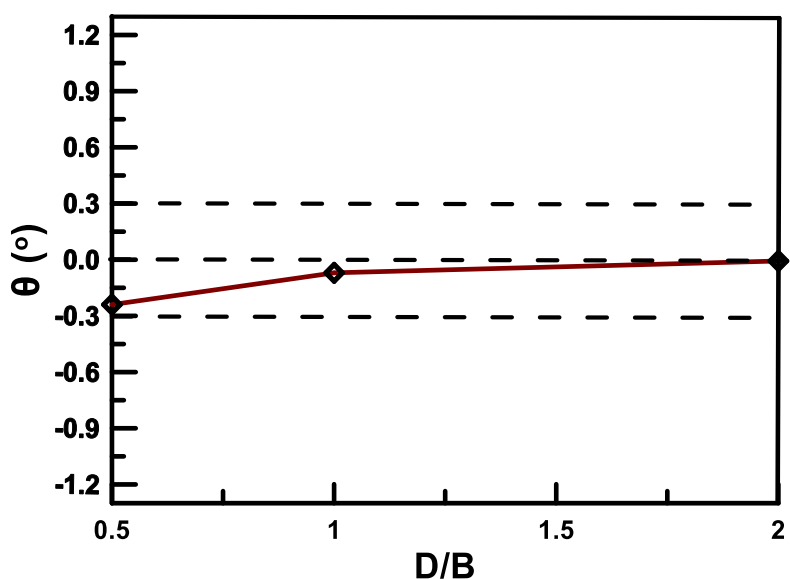
Με βάση τις παραπάνω επισημάνσεις, στο **Σχήμα 4.29** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των ευρέων δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B , για κοινό φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}}=9.6$), έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$, και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σεισμικού υποβάθρου ίση με $a_{\max}=0.2g$.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι ο λόγος καθιζήσεων στα ευρέα θεμέλια κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $z_{\text{SSI}}/z = 0.70-0.99$, δηλαδή προκύπτει αποκλειστικά ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, για την μικρότερη εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ παρατηρείται η μέγιστη θετική αλληλεπίδραση, η οποία φθίνει με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων. Τελικώς, μπορεί να θεωρηθεί πως για ενδιάμεση απόσταση $D/B=1.0$ ($D=20\text{m}$), η καθιζήση των δίδυμων ευρέων θεμελίων πρακτικά ταυτίζεται με εκείνη του αντίστοιχου μονού.



Σχήμα 4.29: Λόγος καθιζήσεων z_{SSi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=20\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$ ($F_{S_{static}}=9.6$). Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Ακολουθως, στο **Σχήμα 4.30** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ των ευρέων δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση D/B , για κοινό φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$ (στατικός συντελεστής ασφαλείας $F_{S_{static}}=9.6$), έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$, και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (βάσης) $a_{max} = 0.2 g$.

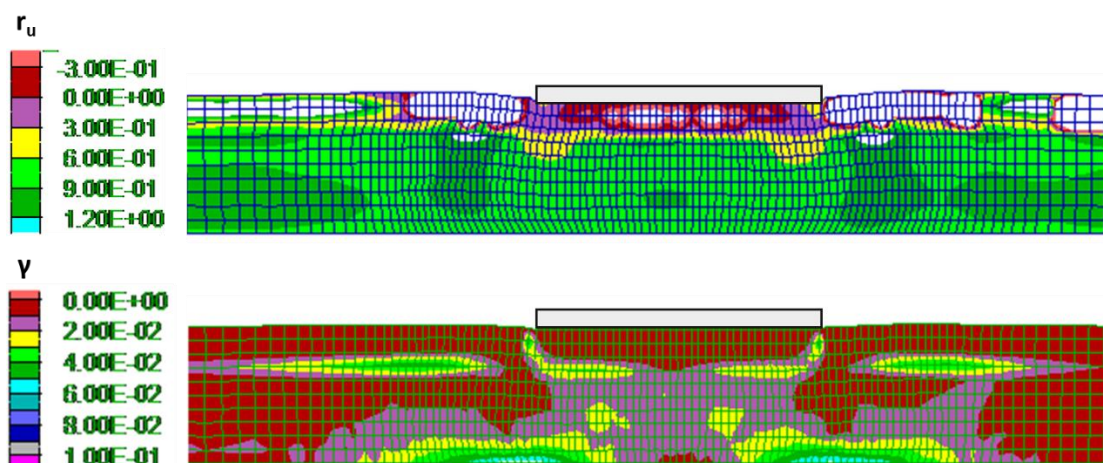


Σχήμα 4.30: Στροφή θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=20\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$ ($F_{S_{static}}=9.6$). Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

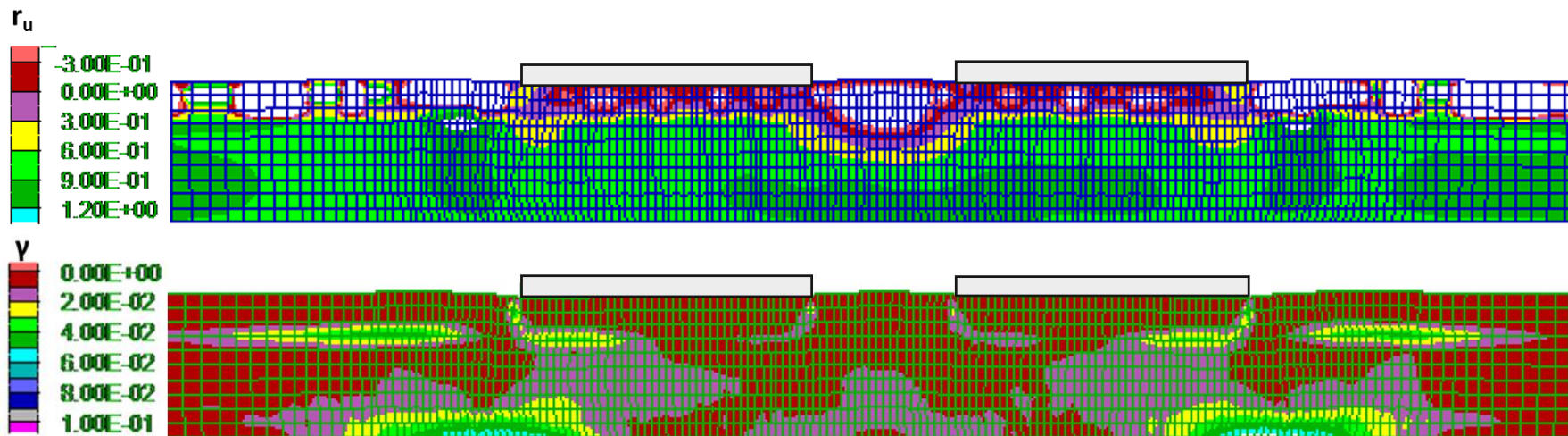
Η στροφή του μονού ευρέος θεμελίου προκύπτει πρακτικά μηδενική και -όπως και στην περίπτωση του μονού στενού θεμελίου- δεν παρουσιάζεται. Επιπλέον, κατ' αντιστοιχία με τις στροφές στενών θεμελίων, θετικές τιμές της στροφής αντιστοιχούν σε στροφή προς το γειτονικό θεμέλιο, ενώ αρνητικές τιμές υποδεικνύουν στροφή κατά του γειτονικού θεμελίου. Τέλος, τιμές στροφής θ μικρότερες από 0.3° αξιολογούνται και σε αυτή την περίπτωση ως μη ουσιώδεις και συνεπώς λαμβάνονται υπόψιν ως πρακτικά μηδενικές.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατηρείται ότι η τιμή της στροφής των δίδυμων ευρέων θεμελίων προκύπτει πρακτικώς μηδενική, ανεξαιρέτως της ενδιάμεσης μεταξύ τους απόστασης. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της μικρότερης εξεταζόμενης ενδιάμεσης απόστασης ($D/B=0.5$) η τιμή της στροφής προκύπτει ελαφρώς μικρότερη από 0.3° , ενώ φθίνει ακόμα περισσότερο για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων.

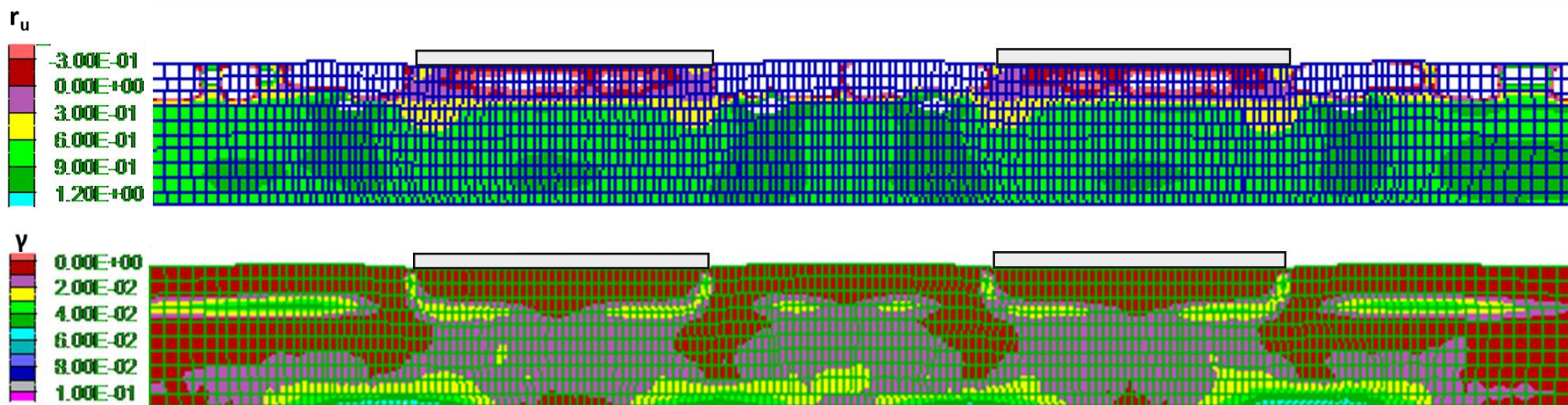
Ακολούθως, στο **Σχήμα 4.31** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος μονού θεμελίου πλάτους $B = 20$ m και φορτίου έδρασης $q = 50$ kPa μετά το πέρας διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$, ενώ χάριν σύγκρισης στο **Σχήμα 4.32** και το **Σχήμα 4.33** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B = 20$ m, φορτίου έδρασης $q = 50$ kPa) με ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5$ και 1.0 υπό την ίδια διέγερση αναφοράς. Υπενθυμίζεται πως στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργίλου ισούται με $S_u=40$ kPa.



Σχήμα 4.31: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2$ m και $S_u=40$ kPa) για έδραση μονού θεμελίου πλάτους $B=20$ m και φορτίου έδρασης $q=50$ kPa ($FS_{static}=9.6$) υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.



Σχήμα 4.32: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.



Σχήμα 4.33: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=1.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των ισοκαμπυλών που απεικονίζονται στο παραπάνω **Σχήμα 4.31** με εκείνες που προκύπτουν μετά το πέρας της ίδιας σεισμικής διέγερσης και για το ίδιο εδαφικό προφίλ, αλλά για έδραση μονού στενού θεμελίου (πλάτους $B=5\text{m}$) ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$ (βλ. **Σχήμα 4.25**). Με βάση αυτή την σύγκριση, οι διατμητικές παραμορφώσεις φαίνεται να προκύπτουν μεγαλύτερες στην περιοχή έδρασης του μονού ευρέος θεμελίου, ενώ το ίδιο παρατηρείται και με τις τιμές του λόγου r_u , οι οποίες είναι μικρότερες στην περιοχή έδρασης του στενού θεμελίου.

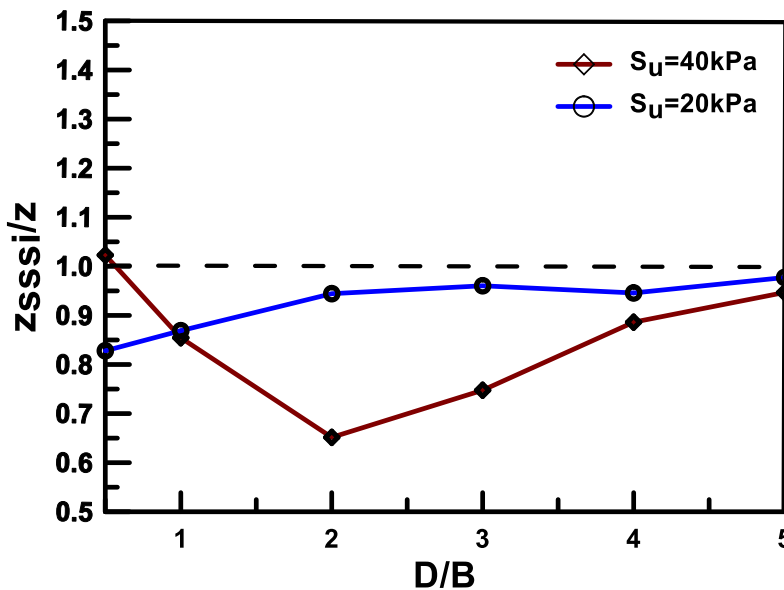
Πάντως, όσον αφορά στην αλληλεπίδραση δίδυμων ευρέων θεμελίων, η ύπαρξη ενός γειτονικού θεμελίου οδηγεί σε μείωση των διατμητικών παραμορφώσεων στην περιοχή του εδάφους που βρίσκεται ενδιάμεσα των θεμελίων. Συν τοις άλλοις, στην ίδια εδαφική περιοχή παρατηρείται σημαντική μείωση των υπερπίεσεων πόρων, οι οποίες λαμβάνουν ακόμα και αρνητικές τιμές, στα επιφανειακότερα βάθη της ρευστοποιήσιμης αμμώδους στρώσης. Η μείωση των υπερπίεσεων και των διατμητικών παραμορφώσεων είναι ιδιαίτερα αισθητή στην περίπτωση της μικρότερης ενδιάμεσης απόστασης $D/B=0.5$, και εξαλείφεται με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης. Πρακτικώς, για κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις θεμελίων μεγαλύτερες από $D/B=1.0$, η εικόνα των ισοκαμπυλών συντελεστή υπερπίεσης πόρων και συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων ταυτίζεται με εκείνη του μονού-ανεξάρτητου ευρέος θεμελίου.

4.3.3 Επίδραση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργίλου

Στόχος της παρούσας υποενότητας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου στην δυναμική αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενο από ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση και αργλική κρούστα στην επιφάνεια. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιούνται αναλύσεις, κατ'αντιστοιχία των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 4.3.1 και 4.3.2 (δηλαδή για τα ίδια χαρακτηριστικά θεμελίων, διέγερση, ενδιάμεσες αποστάσεις και πάχος εδαφικών στρώσεων) με την διαφορά ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργλικής κρούστας υποδιπλασιάζεται, ήτοι λαμβάνει την τιμή $S_u=20\text{kPa}$. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στην αλληλεπίδραση δίδυμων στενών θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου $q=50\text{kPa}$) και στη συνέχεια εκείνα που αφορούν στα δίδυμα ευρέα θεμέλια (πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου $q=50\text{kPa}$). Σημειώνεται πως με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την διερεύνηση της επίδρασης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργλικής κρούστας στην στατική αλληλεπίδραση των δίδυμων στενών και ευρέων θεμελίων (βλ. Παράγραφο 4.2.3), η απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της επιφανειακής αργίλου πάχους $H_c=2\text{m}$ από $S_u=40\text{kPa}$ σε $S_u=20\text{kPa}$, συνεπάγεται ότι για τα

Θεμέλια ίδιου φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$, ο στατικός συντελεστής ασφαλείας απομειώνεται σε $FS_{\text{static}}=2.5=125/50$ και $FS_{\text{static}}=5.3=265/50$ για τα στενά και ευρέα θεμέλια, αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω, στο **Σχήμα 4.34** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των στενών δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B , για κοινό φορτίο έδρασης $q=50\text{kPa}$ (στατικός συντελεστής ασφαλείας $FS_{\text{static}}=2.5=125/50$), έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$, και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (βάσης) $a_{\text{max}}=0.2g$. Χάρην σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων δίδυμων στενών θεμελίων, ίδιου πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$, για το ίδιο πάχος εδαφικών στρώσεων και την ίδια διέγερση αναφοράς, αλλά για αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργλικής κρούστας ίση με $S_u=40\text{kPa}$ (στατικός συντελεστής ασφαλείας $FS_{\text{static}}=5=250/50$).



Σχήμα 4.34: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=5\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$, αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ και $S_u=40\text{kPa}$, υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2g$.

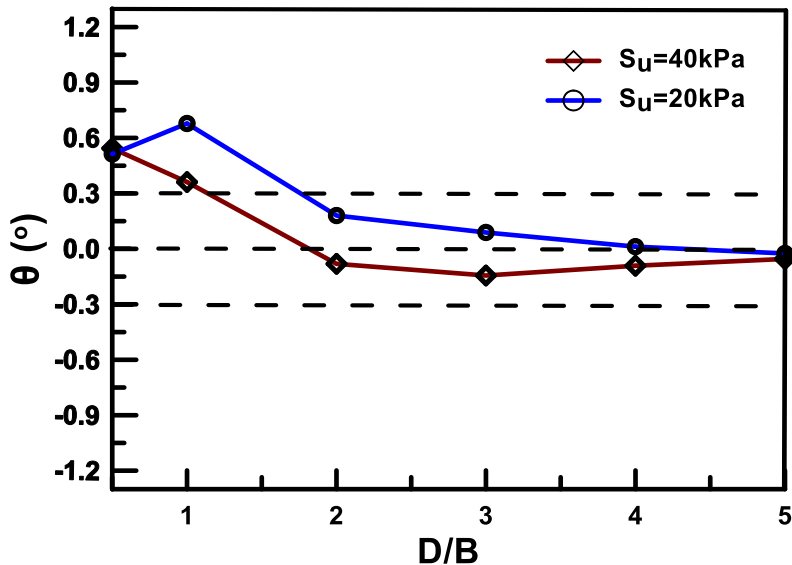
Στην περίπτωση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$, παρατηρείται ότι ο λόγος καθιζήσεων κυμαίνεται στο εύρος $z_{\text{SSSI}}/z = 0.83-0.98$, δηλαδή προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, κατ' αναλογία με ό,τι παρατηρήθηκε για διπλάσια αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργλικής κρούστας, ήτοι για $S_u=40\text{kPa}$. Ωστόσο, η μορφή της καμπύλης που παρουσιάζει την μεταβολή του λόγου z_{SSSI}/z συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων δεν είναι ίδια, για τις δύο περιπτώσεις αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της άργιλου. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση $S_u=20\text{kPa}$ η ελάχιστη τιμή του λόγου

καθιζήσεων (δηλ. η ευμενέστερη αλληλεπίδραση) προκύπτει για την μικρότερη εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των δίδυμων θεμελίων, ήτοι για ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5\text{m}$, και σταδιακά προσεγγίζει την μονάδα, με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης. Αντίθετα, για διπλάσια αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου ($S_u = 40\text{kPa}$), ο μικρότερος λόγος καθιζήσεων παρατηρείται σε ενδιάμεση απόσταση $D = 2B = 10\text{m}$, ενώ για μικρότερες και μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, παρατηρούνται μικρότεροι και μεγαλύτεροι λόγοι καθιζήσεων, αντίστοιχα. Γενικότερα πάντως, η απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της λεπτόκοκκης κρούστας φαίνεται να απομειώνει την θετική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, τουλάχιστον για ενδιάμεσες αποστάσεις μεγαλύτερες από $D = 1B = 5\text{m}$. Μάλιστα, για $S_u = 20\text{kPa}$, ο λόγος z_{SSI}/z πρακτικά ισούται με την μονάδα, ήδη για ενδιάμεση απόσταση θεμελίων ίση με $D = 2B = 10\text{m}$, χωρίς ωστόσο αυτό να συνεπάγεται ότι για την ίδια ενδιάμεση απόσταση ($D = 10\text{m}$), η αλληλεπίδραση μεταξύ των θεμελίων έχει εξαλείφει και για τα υπόλοιπα μεγέθη ενδιαφέροντος (π.χ. στροφές και κατανομή r_u και γ).

Ακολουθως, στο **Σχήμα 4.35** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ των στενών δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B , για έδραση επί δίστρωτου εδάφους ($H_c = 2\text{m}$ και $S_u = 20\text{kPa}$), κοινό φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$ (στατικός συντελεστής ασφαλείας $FS_{\text{static}} = 2.5$) και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}} = 0.2\text{g}$. Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η μεταβολή της στροφής θ δίδυμων στενών θεμελίων, ίδιου φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$, για το ίδιο πάχος εδαφικών στρώσεων και την ίδια διέγερση αναφοράς, αλλά για αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργλικής κρούστας ίση με $S_u = 40\text{kPa}$ (στατικός συντελεστής ασφαλείας $FS_{\text{static}} = 5$). Η (μηδενική) στροφή των μονών θεμελίων δεν παρουσιάζεται. Επιπλέον, τιμές στροφής θ για θεμέλια που είναι μικρότερες, κατ' απόλυτη τιμή, από την οριακή τιμή των 0.3° , αξιολογούνται και σε αυτή την περίπτωση ως μη ουσιώδεις και συνεπώς λαμβάνονται υπόψιν ως πρακτικά μηδενικές.

Για αστράγγιστη διατμητική αντοχή $S_u = 20\text{kPa}$, ουσιώδεις στροφές των δίδυμων θεμελίων παρουσιάζονται μόνο όταν η ενδιάμεση μεταξύ τους απόσταση είναι μικρότερη ή ίση από $D/B = 1$, κατ' αναλογία με την περίπτωση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 40\text{kPa}$. Συντοίς άλλους, οι στροφές αυτές προκύπτουν συγκλίνουσες, και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Ωστόσο, η ενδιάμεση απόσταση στην οποία παρατηρείται η μέγιστη, κατ' απόλυτη τιμή στροφή δεν είναι η ίδια, για τις δύο απεικονιζόμενες καμπύλες. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση $S_u = 20\text{kPa}$, η μέγιστη στροφή παρατηρείται σε ενδιάμεση απόσταση $D = 1B = 5\text{m}$, ενώ για $D = 0.5B = 2.5\text{m}$ η στροφή των δίδυμων θεμελίων προκύπτει

ελαφρώς μικρότερη. Αντίθετα, για $S_u = 40\text{kPa}$ η μέγιστη στροφή παρατηρείται στην μικρότερη εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση θεμελίων ($D = 0.5B = 2.5\text{m}$), και φθίνει με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης. Γενικότερα πάντως, η απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της επιφανειακής αργίλου φαίνεται να οδηγεί σε δυσμενέστερη αλληλεπίδραση σε όρους στροφών (ήτοι αύξηση της απόλυτης τιμής της στροφής) για τα δίδυμα στενά θεμέλια φορτίου $q = 50\text{kPa}$, τουλάχιστον για ενδιάμεσες αποστάσεις θεμελίων μικρότερες από 10m , για τις οποίες προκύπτουν και ουσιώδεις στροφές των θεμελίων.

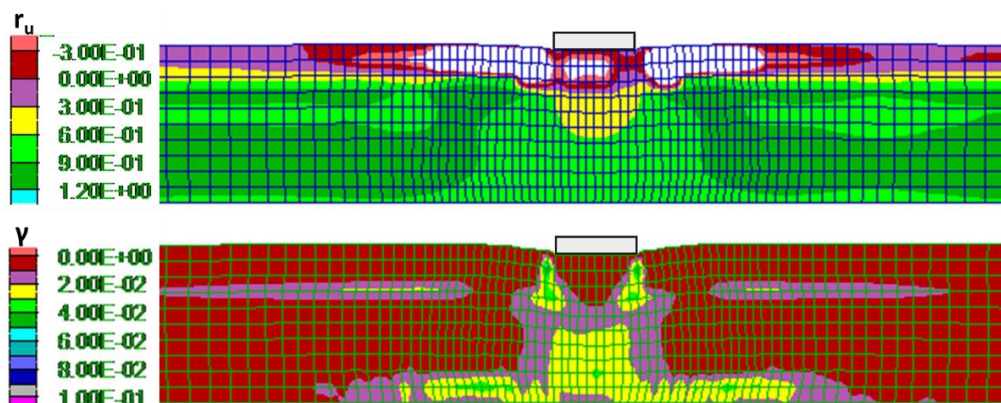


Σχήμα 4.35: Στροφή θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=5\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$, αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ και $S_u=40\text{kPa}$, υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

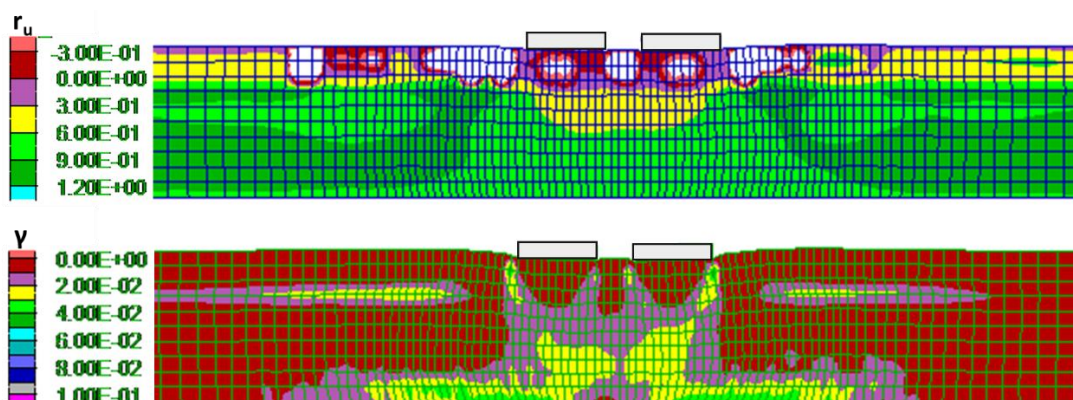
Ακολούθως, στο **Σχήμα 4.36** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο δίστρωτο εδαφικό προφίλ (αποτελούμενο από ρευστοποιήσιμη άμμο πάχους 8m και επιφανειακή άργιλο πάχους 2m και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση μονού θεμελίου πλάτους $B = 5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$, μετά το πέρας διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max}=0.2g$. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.37** έως το **Σχήμα 4.39** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5, 2.0$ και 4.0 , υπό την ίδια διέγερση αναφοράς και για το ίδιο έδαφος έδρασης.

Κατ'αναλογία με την περίπτωση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 40\text{kPa}$, η παρουσία ενός δίδυμου γειτονικού θεμελίου εξαφανίζει τον συμμετρικό μηχανισμό αστοχίας που προκύπτει για μονό θεμέλιο. Συγκεκριμένα, για ενδιάμεσες αποστάσεις μεγαλύτερες από $D = 0.5B = 2.5\text{m}$, η εμπέδωση της αστοχίας συμβαίνει στην περιοχή του εδάφους που βρίσκεται

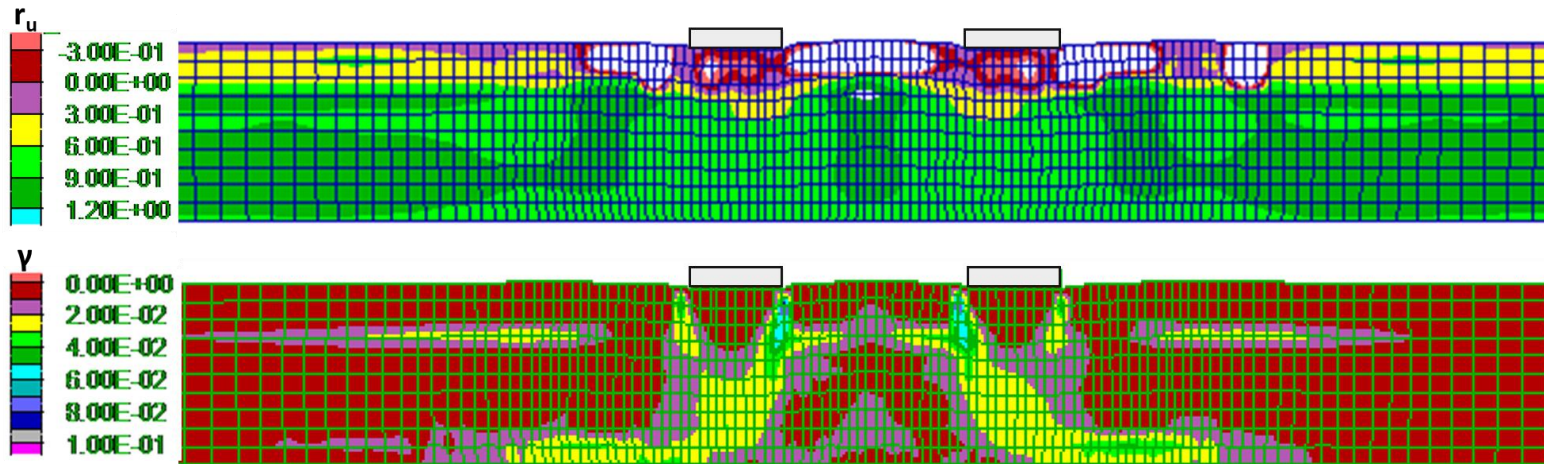
ενδιάμεσα των θεμελίων, όπως ακριβώς συνέβη και στην περίπτωση διπλάσιας αντοχής της αργλικής κρούστας. Η διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση, είναι πως για $S_u = 20\text{kPa}$ και ενδιάμεση απόσταση θεμελίων ίση με $D = 0.5B = 2.5\text{m}$, παρατηρούνται μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις στις εξωτερικές παρειές των θεμελίων, συγκριτικά με το έδαφος εσωτερικά των θεμελίων. Αντίθετα, για αντοχή $S_u = 40\text{kPa}$, είχε παρατηρηθεί εμπέδωση της αστοχίας στο έδαφος εσωτερικά των δίδυμων στενών θεμελίων, ανεξάρτητα από την εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των θεμελίων. Πάντως, η κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση στην οποία πρακτικά εξαλείφεται η αλληλεπίδραση σε όρους διατμητικών παραμορφώσεων, για την περίπτωση $S_u = 20\text{kPa}$, είναι ίση με $D/B = 4.0$, κατ' αντιστοιχία με ό τι παρατηρήθηκε στα δίδυμα στενά θεμέλια ίδιου φορτίου, αλλά για έδραση σε άργιλο διπλάσιας αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.



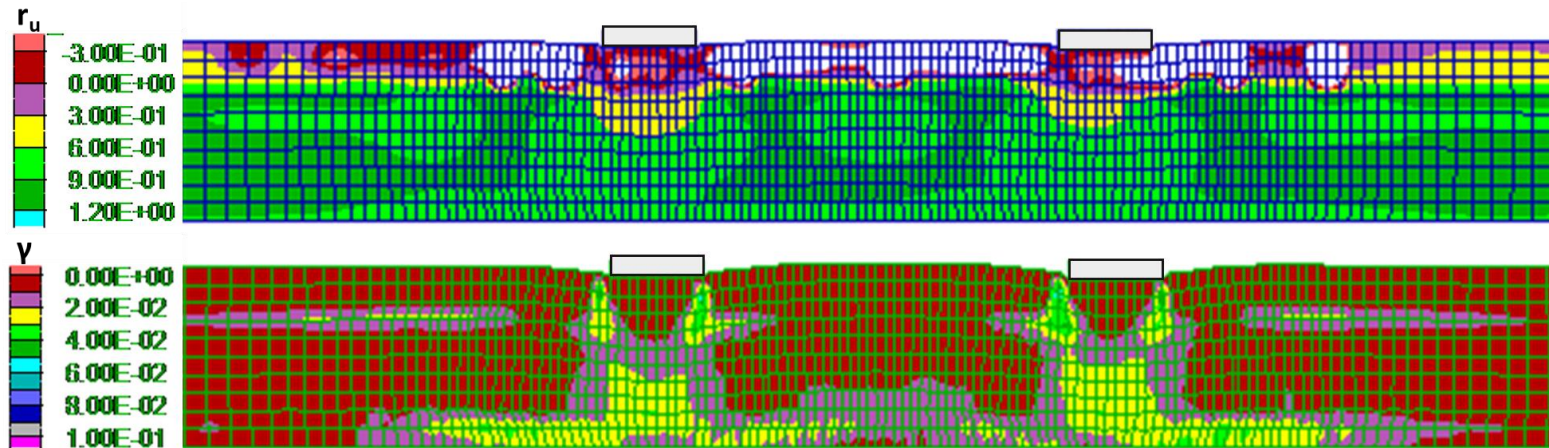
Σχήμα 4.36: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση μονού θεμελίου πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}}=2.5$) υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2g$.



Σχήμα 4.37: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2g$.



Σχήμα 4.38: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=2.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.



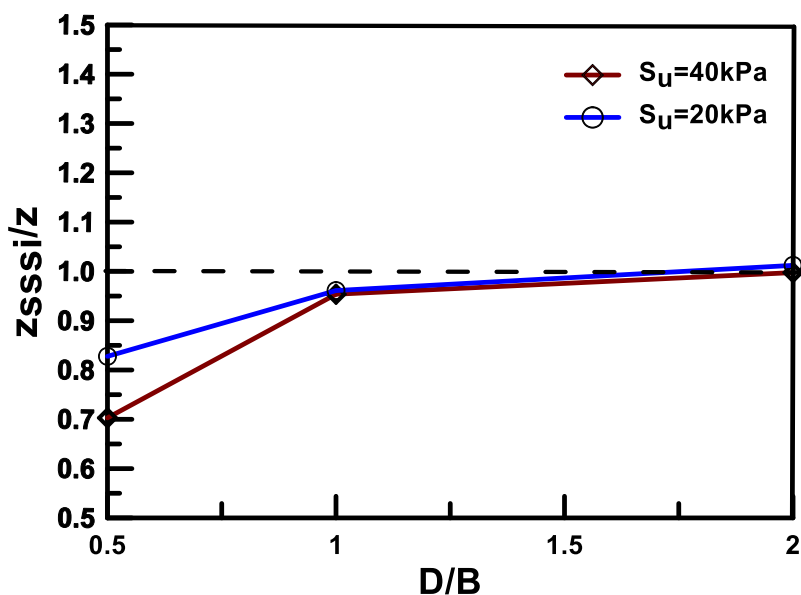
Σχήμα 4.39: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=4.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Σε όρους συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u , η απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργλικής κρούστας φαίνεται να απομειώνει την αλληλεπίδραση των δίδυμων στενών θεμελίων. Κατ' αναλογία με την περίπτωση $S_u=40\text{kPa}$, παρατηρείται τάση για μικρότερες υπερπίεσεις πόρων στο έδαφος που βρίσκεται εσωτερικά των δύο θεμελίων, σε σχέση με το έδαφος στις εξωτερικές παρειές τους, ιδιαίτερα σε ενδιάμεσες αποστάσεις μικρότερες ή ίσες από $D = 2B = 10\text{m}$. Ωστόσο, η εμφανιζόμενη ασυμμετρία στην κατανομή των υπερπίεσεων πόρων εκατέρωθεν των θεμελίων είναι λιγότερο έντονη για την περίπτωση αντοχής $S_u = 20\text{kPa}$, συγκριτικά με την περίπτωση δίδυμων στενών θεμελίων επί αργίλου αντοχής $S_u = 40\text{kPa}$. Πάντως, η αλληλεπίδραση σε όρους συντελεστή υπερπίεσης πόρων έχει εξαιρεθεί σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση ίση με $D/B = 4.0$, ανεξάρτητα από την αντοχή της επιφανειακής αργίλου.

Ακολουθως, στο **Σχήμα 4.40** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των ευρέων δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B , για κοινό φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}} = 5.3 = 265/50$), έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$, και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σεισμικού υποβάθρου ίση με $a_{\text{max}} = 0.2g$. Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων δίδυμων ευρέων θεμελίων, ίδιου πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$, για το ίδιο πάχος εδαφικών στρώσεων και την ίδια διέγερση αναφοράς, αλλά για αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργλικής κρούστας ίση με $S_u=40\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}} = 9.6 = 480/50$)

Για αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου ίση με $S_u=20\text{kPa}$ και δίδυμα ευρέα θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$, ο λόγος καθιζήσεων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $z_{\text{sssl}}/z = 0.83-1.00$, δηλαδή προκύπτει αποκλειστικά ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, κατ' αναλογία με την περίπτωση $S_u=40\text{kPa}$. Επιπρόσθετα, η μορφή της καμπύλης που παρουσιάζει την μεταβολή του λόγου z_{sssl}/z συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων είναι ποιοτικά ίδια, για τις δύο περιπτώσεις αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου. Συγκεκριμένα, η ελάχιστη τιμή του λόγου καθιζήσεων (δηλ. η ευμενέστερη αλληλεπίδραση) προκύπτει για την μικρότερη εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των δίδυμων θεμελίων, ήτοι για ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 10\text{m}$, και σταδιακά προσεγγίζει την μονάδα, με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης. Σε ενδιάμεση απόσταση $D = 1B = 20\text{m}$, η αλληλεπίδραση των δίδυμων ευρέων θεμελίων σε όρους καθιζήσεων πρακτικά εξαλείφεται, ανεξάρτητα από την αντοχή της επιφανειακής αργίλου. Η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων, είναι ότι για απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε $S_u=20\text{kPa}$, απομειώνεται και η θετική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, δηλαδή για την ίδια

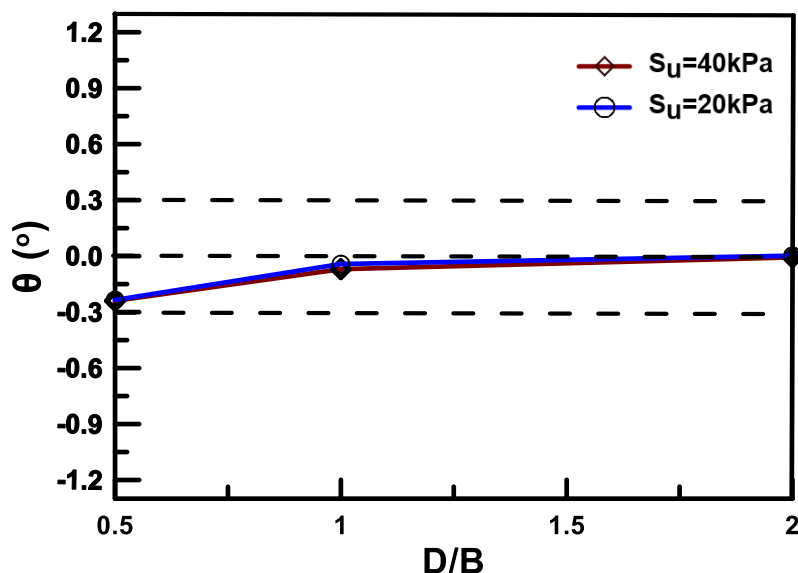
ενδιάμεση απόσταση θεμελίων οι τιμές του λόγου καθιζήσεων προκύπτουν μεγαλύτερες (και πάντα μικρότερες από την μονάδα)



Σχήμα 4.40: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=20\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$, αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ και $S_u=40\text{kPa}$, υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

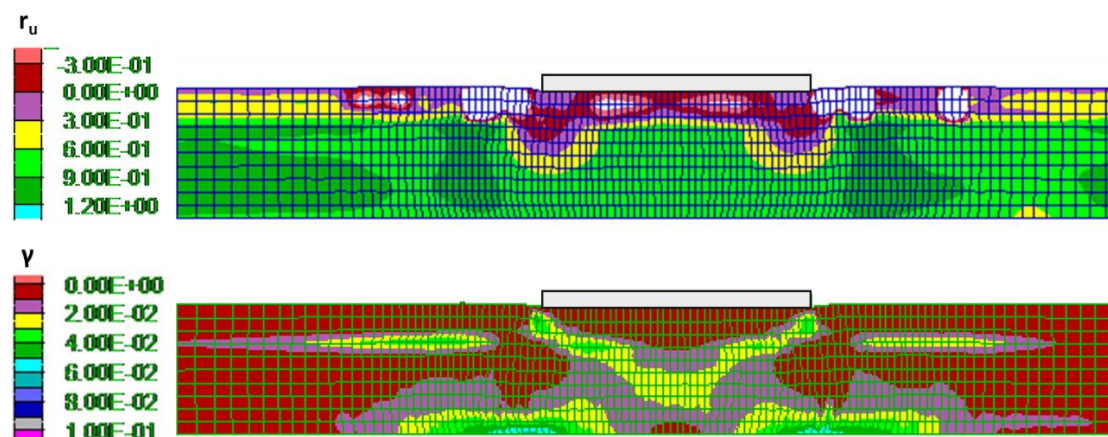
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.41** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ των ευρέων δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B , για κοινό φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$ ($FS_{static} = 5.3 = 265/50$), έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$, και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση σεισμικού υποβάθρου ίση με $a_{max} = 0.2g$. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η μεταβολή της στροφής των δίδυμων ευρέων θεμελίων, ίδιου πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$, για το ίδιο πάχος εδαφικών στρώσεων και την ίδια διέγερση αναφοράς, αλλά για αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργλικής κρούστας ίση με $S_u=40\text{kPa}$ ($FS_{static} = 9.6 = 480/50$).

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατηρείται ότι η τιμή της στροφής των δίδυμων ευρέων θεμελίων δεν επηρεάζεται από την μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της επιφανειακής αργίλου. Συγκεκριμένα, στα δίδυμα ευρέα θεμέλια προκύπτουν πρακτικά μηδενικές στροφές, ανεξαιρέτως της ενδιάμεσης μεταξύ τους απόστασης αλλά και της αντοχής της λεπτόκοκκης κρούστας.

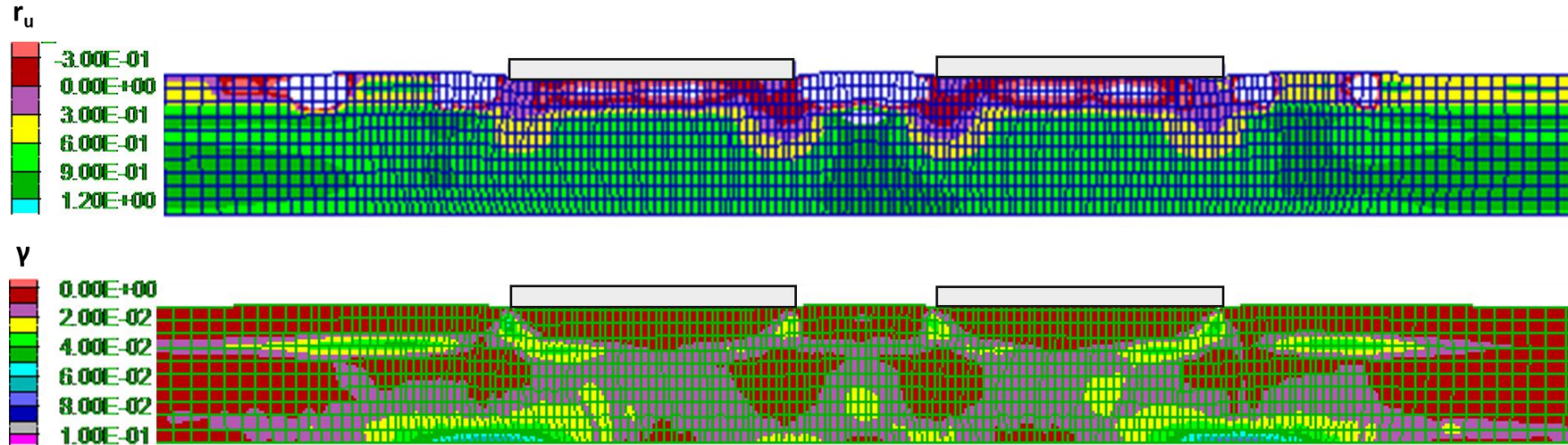


Σχήμα 4.41: Στροφή θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=20\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q=50\text{kPa}$. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$, αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ και $S_u=40\text{kPa}$, υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

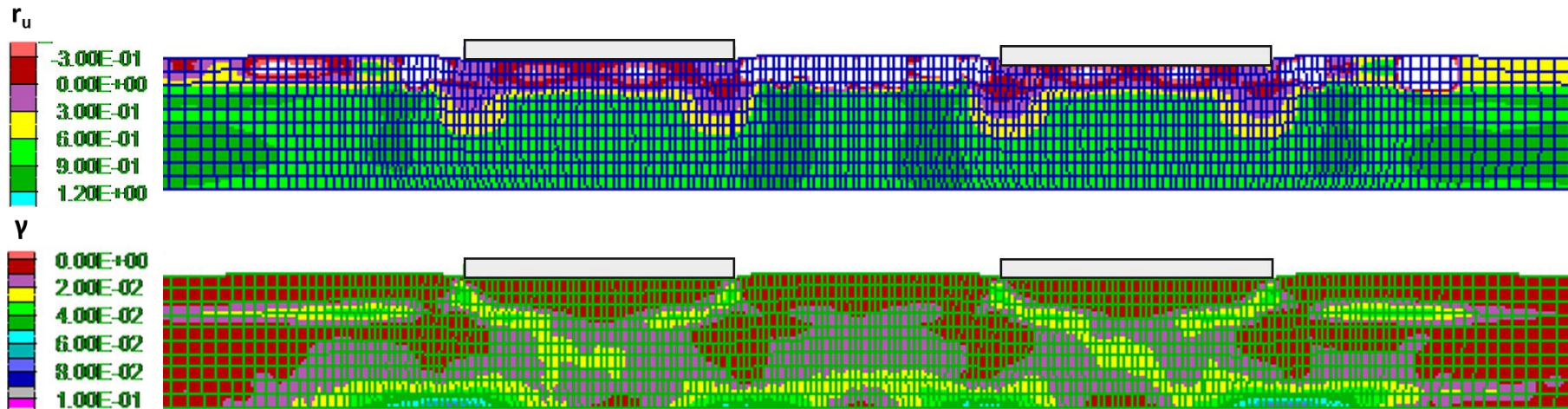
Ακολούθως, στο **Σχήμα 4.42** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος μονού θεμελίου πλάτους $B = 20 \text{ m}$ και φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$ μετά το πέρας διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max}=0.2g$, ενώ χάριν σύγκρισης στο **Σχήμα 4.43** και το **Σχήμα 4.44** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B = 20 \text{ m}$, φορτίου έδρασης $q = 50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D/B = 0.5$ και 1.0 υπό την ίδια διέγερση αναφοράς. Υπενθυμίζεται πως στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής άργιλου ισούται με $S_u=20\text{kPa}$.



Σχήμα 4.42: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση μονού θεμελίου πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$ ($F_{S_{\text{static}}}=5.3$) υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.



Σχήμα 4.43: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.



Σχήμα 4.44: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$) για έδραση δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=1.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Κατ' αναλογία με την περίπτωση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$, στα ευρέα θεμέλια επί αργλικής κρούστας αντοχής $S_u=20\text{kPa}$, η ύπαρξη ενός γειτονικού δίδυμου θεμελίου οδηγεί σε μείωση των διατμητικών παραμορφώσεων στην περιοχή του εδάφους που βρίσκεται ενδιάμεσα των θεμελίων. Συν τοις άλλοις, στην ίδια εδαφική περιοχή παρατηρείται μείωση των υπερπίεσεων πόρων, ακριβώς όπως παρατηρήθηκε στα ευρέα θεμέλια επί αργίλου αντοχής $S_u=40\text{kPa}$. Η διαφορά είναι ότι, η εμφανιζόμενη ασυμμετρία στην κατανομή των υπερπίεσεων πόρων εκατέρωθεν των θεμελίων είναι λιγότερο έντονη για την περίπτωση αντοχής $S_u=20\text{kPa}$, συγκριτικά με την περίπτωση δίδυμων ευρέων θεμελίων επί αργίλου αντοχής $S_u=40\text{kPa}$. Υπενθυμίζεται πως εντονότερη ασυμμετρία στην κατανομή του συντελεστή r_u για την περίπτωση $S_u=40\text{kPa}$ είχε παρατηρηθεί και δίδυμα στενά θεμέλια. Πάντως, σε ενδιάμεση απόσταση ίση με $D=20\text{m}$, η αλληλεπίδραση σε όρους διατμητικών παραμορφώσεων αλλά και σε όρους κατανομής του συντελεστή υπερπίεσης πόρων εξαλείφεται, για τα δίδυμα ευρέα θεμέλια.

4.4 Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης δίδυμων θεμελίων

Στο παρόν Κεφάλαιο διερευνήθηκε η στατική και δυναμική αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελιολωρίδων για έδραση επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενου από ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση και αργλική στρώση στην επιφάνεια. Εξετάστηκε η περίπτωση στενών θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$ και ευρέων θεμελίων πλάτους $B=20\text{m}$, μελετώντας κυρίως την επίδραση της απόστασης D μεταξύ των δύο θεμελίων, τόσο στις στατικές όσο και στις δυναμικές συνθήκες. Η στατική αλληλεπίδραση των δίδυμων θεμελίων μελετήθηκε σε όρους καθιζήσεων και φέρουσας ικανότητας, ενώ εξετάστηκε και η μορφή του μηχανισμού στατικής αστοχίας των δίδυμων θεμελίων. Σε όρους δυναμικής αλληλεπίδρασης, μελετήθηκε η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z και των αναπτυσσόμενων στροφών των δίδυμων θεμελίων, ενώ για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκαν η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης των θεμελίων στο τέλος της διέγερσης. Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της επιφανειακής αργίλου στην στατική και δυναμική αλληλεπίδραση των προαναφερθέντων δίδυμων θεμελίων (φορτίου $q=50\text{kPa}$ και εύρους $B=5\text{m}$ και $B=20\text{m}$), εξετάζοντας την μεταβολή της αλληλεπίδρασης για τις ίδιες ενδιάμεσες αποστάσεις και πάχος εδαφικών στρώσεων, αλλά για υποδιπλάσια αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργίλου, ήτοι για $S_u=20\text{kPa}$.

Σε μια προσπάθεια σύνοψης των αποτελεσμάτων όλου του Κεφαλαίου:

- i. Η τιμή του φορτίου στο οποίο συμβαίνει στατική αστοχία σε φέρουσα ικανότητα δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη ενός γειτονικού δίδυμου θεμελίου, τόσο στην περίπτωση των στενών όσο και των ευρέων θεμελίων. Ωστόσο, οι καθιζήσεις των δίδυμων θεμελίων είναι μικρότερες, συγκριτικά με τις καθιζήσεις του αντίστοιχου μονού θεμελίου, ανεξαρτήτως του εξεταζόμενου πλάτους των θεμελίων. Γενικότερα, σημασία για τη στατική αλληλεπίδραση δείχνει να παίζει η πραγματική τιμή της απόστασης D μεταξύ των θεμελίων, με αποτέλεσμα να παρατηρείται πλήρης απεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας των δίδυμων ευρέων θεμελίων για τις ενδιάμεσες αποστάσεις που εξετάστηκαν, ενώ αντίθετα να υπάρχει αλληλεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας στην περίπτωση της ενδιάμεσης απόστασης $D=2.5m$, για τα δίδυμα στενά θεμέλια.
- ii. Η απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u της επιφανειακής αργίλου απομειώνει την φέρουσα ικανότητα των θεμελίων, αλλά δεν μεταβάλλει τον τρόπο που αλληλεπιδρούν στατικά, με την παρατήρηση αυτή να αφορά τόσο στα στενά όσο και στα ευρέα δίδυμα θεμέλια.
- iii. Για τα δίδυμα θεμέλια φορτίου $q = 50kPa$, η δυναμική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων είναι ευμενής, ανεξαρτήτως του πλάτους των θεμελίων αλλά και της αντοχής της επιφανειακής αργίλου. Στα ευρέα θεμέλια η θετική αλληλεπίδραση φθίνει μονότονα με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων, αλλά δεν παρατηρείται απαραίτητα το ίδιο και στα στενά θεμέλια, όπου η μέγιστη θετική αλληλεπίδραση μπορεί να παρουσιαστεί για μεγαλύτερη ενδιάμεση απόσταση των θεμελίων. Όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες στροφές, για τα δίδυμα ευρέα θεμέλια φορτίου $q= 50 kPa$ προέκυψαν πρακτικώς μηδενικές, ανεξαρτήτως της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων και της αντοχής της επιφανειακής αργίλου. Αντίθετα, τα δίδυμα στενά θεμέλια ίδιου φορτίου εμφάνισαν συγκλίνουσες στροφές για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (εδώ $D \leq B$) και μηδενικές στροφές σε μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις. Πάντως στα στενά θεμέλια, (τα οποία είναι τα μόνα που εμφάνισαν ουσιώδεις στροφές) η μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή στροφή, δεν παρουσιάζεται απαραίτητα στην ελάχιστη ενδιάμεση απόσταση των θεμελίων.
- iv. Δεν παρατηρούνται ποιοτικές διαφορές στην δυναμική αλληλεπίδραση των δίδυμων ευρέων θεμελίων, για διαφορετική αντοχής της επιφανειακής αργίλικής κρούστας. Αντίθετα, η μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u της επιφανειακής

αργίλου επηρεάζει την δυναμική αλληλεπίδραση των δίδυμων στενών θεμελίων. Οι διαφορές που εντοπίστηκαν στα στενά θεμέλια δεν αφορούν στο «πρόσημο» της απόκρισης σε όρους λόγου καθιζήσεων και στροφών (παρατηρούνται μόνο ευμενείς λόγοι z_{sssi}/z (ήτοι < 1) και συγκλίνουσες ουσιώδεις στροφές, στα στενά θεμέλια φορτίου $q = 50\text{kPa}$) αλλά κυρίως στις ενδιάμεσες αποστάσεις που εμφανίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μεγεθών ενδιαφέροντος.

- v. Η απομείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u της επιφανειακής αργίλου φαίνεται να απομειώνει την ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων (δηλ. αυξάνει τον λόγο z_{sssi}/z) για τα δίδυμα θεμέλια. Αντιθέτως, αυξάνει την αλληλεπίδραση σε όρους στροφής, οδηγώντας σε μεγαλύτερες κατ' απόλυτο τιμή στροφές για τα στενά θεμέλια. Η στροφή των δίδυμων ευρέων προκύπτει πρακτικώς μηδενική, ανεξάρτητα από την αντοχή της αργλικής κρούστας.
- vi. Στα στενά δίδυμα θεμέλια που εξετάστηκαν πρακτικώς μπορεί να θεωρηθεί ότι η δυναμική αλληλεπίδραση παύει για κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B = 4$ ενώ στα ευρέα για κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B = 1$. Η παραπάνω παρατήρηση επαληθεύεται ανεξάρτητα από την αντοχή της επιφανειακής αργίλου. Σε κάθε περίπτωση, η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των θεμελίων είναι ίση με $D = 20\text{m}$, υποδεικνύοντας ότι παρόλο που η δυναμική αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων εξαρτάται ποιοτικά από το πλάτος του θεμελίου -και την αντοχή της επιφανειακής αργίλου, για τα στενά θεμέλια- δεν φαίνεται να ισχύει το ίδιο και για την ενδιάμεση απόσταση στην οποία αυτή εξαλείφεται.

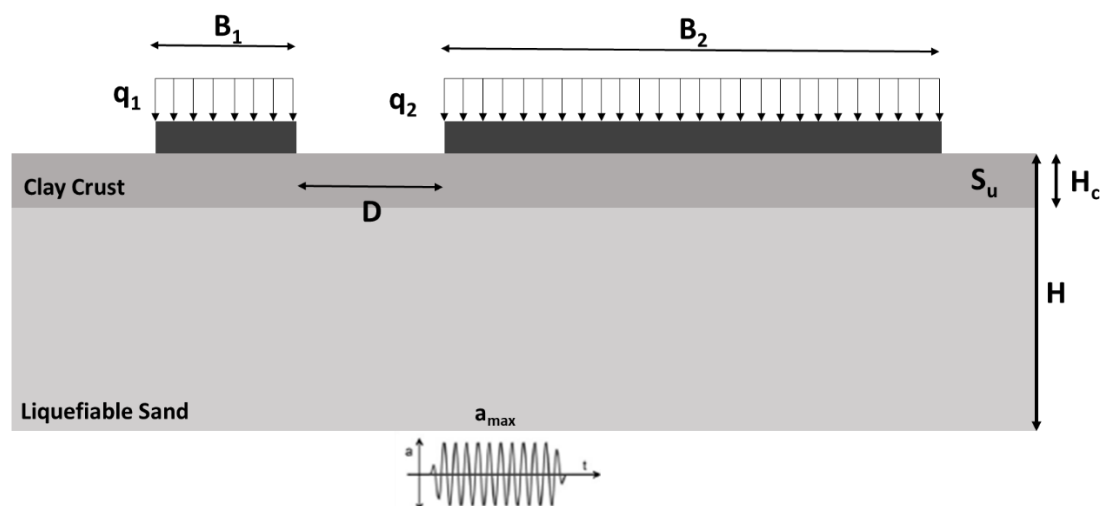
Κεφάλαιο 5

Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού εύρους

5.1 Γενικά

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο διερευνήθηκε η δυναμική απόκριση δίδυμων θεμελιολωρίδων επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενου από ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση και αργιλική στρώση στην επιφάνεια. Στο παρόν Κεφάλαιο μελετάται το ίδιο πρόβλημα για θεμέλια διαφορετικού εύρους, ένα πρόβλημα πιο περίπλοκο αλλά και πιο ρεαλιστικό, ιδίως σε αστικά περιβάλλοντα.

Κατ' αναλογία με την περίπτωση δίδυμων θεμελίων, η διερεύνηση επικεντρώνεται στις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις και στροφές των θεμελίων διαφορετικού εύρους, οι οποίες συγκρίνονται με την απόκριση του αντίστοιχου θεμελίου αναφοράς, ήτοι εκείνη που προκύπτει για θεμέλιο ίδιου εύρους και φορτίου όταν η απόσταση της γειτονικής κατασκευής γίνει είναι άπειρη. Η διαφορά με την περίπτωση των δίδυμων θεμελίων είναι πως εδώ η απόκριση του κάθε θεμελίου εξετάζεται ξεχωριστά, καθώς ακόμα και στην περίπτωση που διαθέτουν το ίδιο φορτίο, το εύρος τους διαφέρει. Συνεπώς, από κάθε αριθμητική ανάλυση αξιοποιήθηκε η τελική καθίζηση του κέντρου καθενός εκ των δύο (άκαμπτων) θεμελίων, η οποία κανονικοποιήθηκε ως προς την καθίζηση του αντίστοιχου απομονωμένου θεμελίου. Αξιοποιήθηκε επίσης η τελική στροφή του κάθε θεμελίου (ως στερεό σώμα), η οποία παρουσιάζεται με την πραγματική αριθμητική τιμή της, λόγω μηδενικής στροφής των μονών θεμελίων. Για τις στροφές των θεμελίων εξακολουθεί να ισχύει η σύμβαση ότι οι θετικά προσημασμένες τιμές υποδηλώνουν σύγκλιση του θεμελίου προς το γειτονικό του, και ότι οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε στροφή κατά του γειτονικού θεμελίου. Τέλος, για την ερμηνεία των ως άνω αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκαν η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης στο τέλος της διέγερσης.



Σχήμα 5.1: Σκαρίφημα διάταξης ζεύγους θεμελίων πλάτους B_1 και B_2 , φορτίων έδρασης q_1 και q_2 , ενδιάμεσης απόστασης D , εδραζόμενων σε δίστρωτο έδαφος συνολικού πάχους H αποτελούμενο από επιφανειακή αργιλική κρούστα (πάχους H_c και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u) και ρευστοποιήσιμη άμμο, υπό αρμονική σεισμική διέγερση έντασης a_{max} , με στόχο τον υπολογισμό καθιζήσεων z και στροφών θ .

Το πλάτος των δύο θεμελίων διατηρήθηκε σταθερό σε όλες τις αναλύσεις, ίσο με $B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$, για το στενό και ευρύ θεμέλιο, αντίστοιχα. Επιπλέον, σταθερά διατηρήθηκαν και τα πάχη των εδαφικών στρώσεων ($H=10\text{m}$ και $H_c=2\text{m}$) αλλά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου να λαμβάνει μόνο μία τιμή ($S_u=40\text{kPa}$). Από τους παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική αλληλεπίδραση θεμελίων, εξετάστηκε κυρίως η επίδραση της απόστασης D μεταξύ των δύο θεμελίων, η οποία εδώ παρουσιάζεται αδιαστατοποιημένη ως προς το εύρος του στενού θεμελίου, ήτοι σε όρους D/B_1 . Επιπλέον, διερευνήθηκαν δυο διαφορετικές περιπτώσεις φορτίου: εκείνη στην οποία το φορτίο είναι κοινό για τα δύο θεμέλια και ίσο με $q=50\text{kPa}$, και εκείνη στην οποία το φορτίο του στενού θεμελίου διατηρείται σε $q=50\text{kPa}$, αλλά το φορτίο του γειτονικού του ευρέος διπλασιάζεται σε $q=100\text{kPa}$.

Τέλος, όπως και στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων, η διερεύνηση της στατικής αλληλεπίδρασης προηγείται της μελέτης του σεισμικού προβλήματος. Συνεπώς, στην Παράγραφο 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στατικών αναλύσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται κατ' αντιστοιχία των δυναμικών αναλύσεων των Παραγράφων 5.3 και 5.4, δηλαδή για ίδιο εύρος θεμελίων (B_1, B_2), ενδιάμεσες αποστάσεις D και στρωματογραφία και χαρακτηριστικά του εδάφους έδρασης (H και H_c, S_u). Η στατική αλληλεπίδραση μελετάται σε όρους καθιζήσεων και φέρουσας ικανότητας, μέσω των καμπυλών φορτίου-καθίξεως του εκάστοτε θεμελίου, ενώ εξετάζεται και η μορφή του μηχανισμού στατικής αστοχίας, για

την οποία αξιοποιείται η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης κατά την αστοχία .

5.2 Στατική αλληλεπίδραση

Στην συγκεκριμένη υπο-παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διερεύνησης της στατικής αλληλεπίδρασης ζεύγους θεμελίων πλάτους $B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$, για έδραση επί δίστρωτου εδάφους αποτελούμενο από ρευστοποιήσιμη άμμο (πάχους 8m) στη βάση, και άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ (ήτοι κανονικοποιημένου πάχους $H_c/B_1=0.4$ και $H_c/B_2=0.1$ για το στενό και ευρύ θεμέλιο, αντίστοιχα) και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$ στην επιφάνεια. Συγκεκριμένα εξετάζεται η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, φέρουσας ικανότητας και μορφής του μηχανισμού αστοχίας για την περίπτωση ταυτόχρονα φορτιζόμενου ζεύγους θεμελίων σε ενδιάμεσες αποστάσεις $D = 2.5$ έως 25 m (δηλ. κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 = 0.5$ έως 5.0). Από κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-καθίζησης για το στενό και ευρύ θεμέλιο, αντίστοιχα. Εξετάζονται επιπλέον οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ κατά την αστοχία, και παρουσιάζεται η χωρική κατανομή τους (σε μορφή ισοκαμπυλών) για χαρακτηριστικές αναλύσεις, που καλύπτουν όλες τις εμφανιζόμενες περιπτώσεις.

Παρακάτω, στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-καθίζησης για μονό στενό θεμέλιο και για στενό θεμέλιο σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 . Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται, για το ίδιο έδαφος έδρασης, και η καμπύλη φορτίου-καθίζησης δίδυμων στενών θεμελίων ($B=5\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ ($D=2.5\text{m}$). Υπενθυμίζεται πως τα δίδυμα στενά θεμέλια σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ παρουσίαζαν ελαφρώς εντονότερη μείωση καθιζήσεων, συγκριτικά με τα δίδυμα στενά θεμέλια σε μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, παρατήρηση η οποία είχε αποδοθεί, στο Κεφάλαιο 4, στην μέγιστη αλληλεμπλοκή των βολβών των τάσεων των δύο θεμελίων και την επαγόμενη αύξηση της στιβαρότητας του εδάφους στην περιοχή ενδιάμεσα των θεμελίων.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-καθίζησης για τις περιπτώσεις μονού ευρέος θεμελίου και ευρέος θεμελίου σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 . Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και η καμπύλη φορτίου-καθίζησης δίδυμων ευρέων θεμελίων ($B=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση

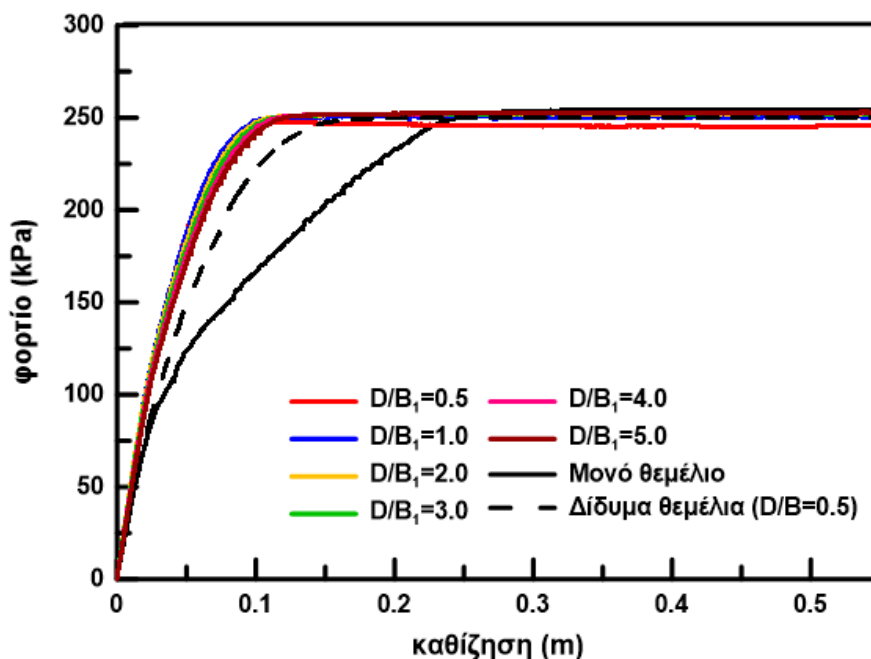
$D/B=0.5$ ($D=10m$). Υπενθυμίζεται, και πάλι, πως η (μέση) καμπύλη φορτίου-καθίζησης δίδυμων ευρέων θεμελίων σε ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ πρακτικά ταυτίζεται με τις καμπύλες φορτίου-καθίζησης δίδυμων ευρέων θεμελίων σε μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις (βλ. Κεφάλαιο 4).

Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να αντληθεί από τα παραπάνω σχήματα είναι πως η φέρουσα ικανότητα καθενός εκ των δύο θεμελίων του ζεύγους δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του γειτονικού του θεμελίου, ανεξαρτήτως της ενδιάμεσης απόστασης των δύο θεμελίων. Υπενθυμίζεται πως μηδενική μεταβολή στην τιμή της φέρουσας ικανότητας παρατηρήθηκε και στην περίπτωση των δίδυμων (στενών και ευρέων) θεμελίων, ανεξαρτήτως της ενδιάμεσης μεταξύ τους απόστασης.

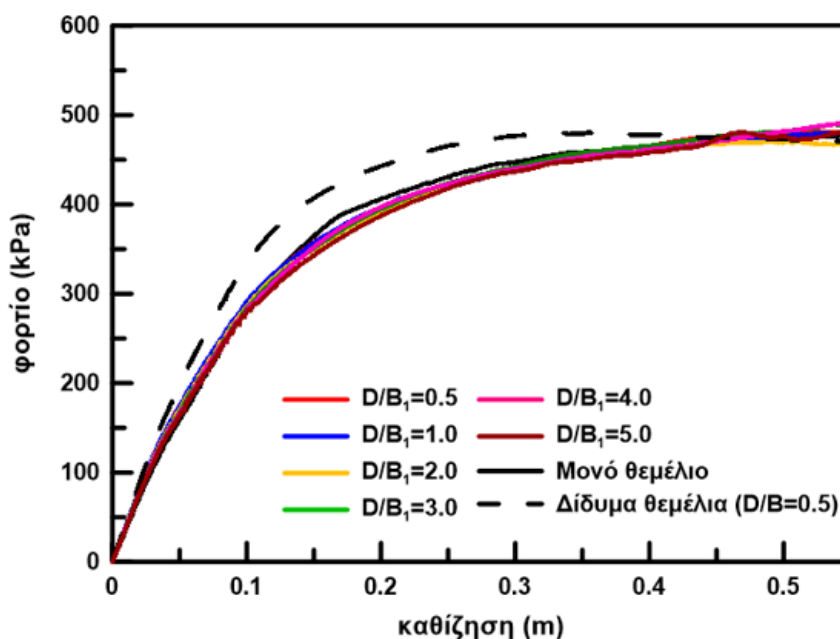
Αυτό σημαίνει ότι, για το συγκεκριμένο εδαφικό προφίλ, η φέρουσα ικανότητα του στενού θεμελίου παραμένει ίση με 250 kPa σε όλες τις περιπτώσεις: στο απομονωμένο στενό θεμέλιο, στο στενό θεμέλιο όταν βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων ίδιου εύρους, αλλά και στην περίπτωση που βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους. Αντίστοιχα, η φέρουσα ικανότητα του ευρέος θεμελίου παραμένει ίση με 480 kPa ανεξαρτήτως της ύπαρξης ή/και του εύρους του γειτονικού θεμελίου.

Εν αντιθέσει με τη μη-μεταβολή της τιμής της φέρουσας ικανότητας του στενού θεμελίου, οι καθιζήσεις του μειώνονται αισθητά, όταν αυτό βρίσκεται δίπλα σε ευρύ θεμέλιο. Η μείωση των καθιζήσεων είναι ακόμα εντονότερη από εκείνη που προκύπτει στην περίπτωση όπου υπήρχε γειτονικό στενό θεμέλιο, αντί για ευρύ. Ο λόγος είναι η μεγαλύτερη έκταση του βολβού τάσεων του ευρέος θεμελίου, συγκριτικά με του στενού, και η επαγόμενη ενίσχυση της στιβαρότητας σε μεγαλύτερη περιοχή του υποκείμενου εδάφους, με αποτέλεσμα και την περαιτέρω μείωση των καθιζήσεων του στενού θεμελίου.

Αντίθετα, η καμπύλη φορτίου-καθίζησης του μονού ευρέος θεμελίου ταυτίζεται πρακτικά με τις καμπύλες φορτίου-καθίζησης που προκύπτουν όταν στην γειτονία του ευρέος θεμελίου βρίσκεται στενό θεμέλιο. Η παρατήρηση αυτή αποδίδεται στο ότι ο βολβός των τάσεων του στενού θεμελίου επηρεάζει πολύ μικρή έκταση, συγκριτικά πάντα με το πλάτος του γειτονικού ευρέος θεμελίου, η οποία δεν μπορεί να οδηγήσει σε επαρκή αύξηση της στιβαρότητας του εδάφους, προκειμένου να υπάρξει μείωση των στατικών καθιζήσεων του πολύ ευρύτερου γειτονικού θεμελίου. Υπενθυμίζεται από το Κεφάλαιο 4 πως στην περίπτωση δίδυμων ευρέων θεμελίων είχε παρατηρηθεί μείωση των στατικών καθιζήσεων, ενισχύοντας ακόμα περισσότερο την παραπάνω πεποίθηση.



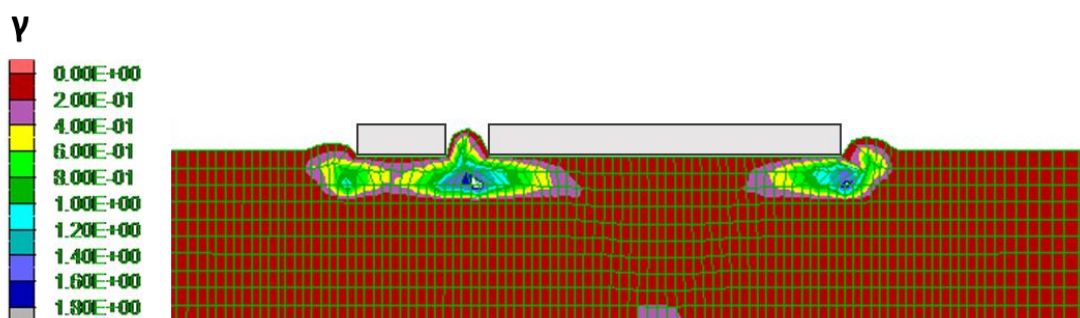
Σχήμα 5.2: Καμπύλη φορτίου-καθίζησης μονού στενού θεμελίου ($B=5\text{m}$), δίδυμων στενών θεμελίων ($B_1=B_2=5\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ και στενού θεμελίου σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες απόστασεις $D/B_1 = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 . Έδραση θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.



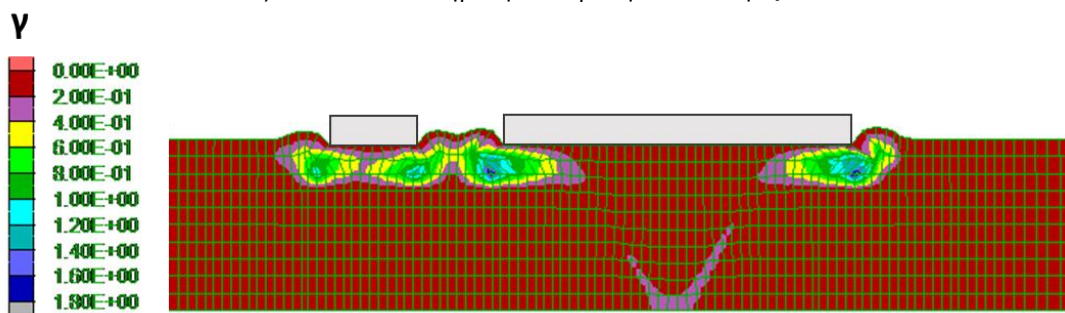
Σχήμα 5.3: Καμπύλη φορτίου-καθίζησης μονού ευρέος θεμελίου ($B=20\text{m}$), δίδυμων ευρέων θεμελίων ($B_1=B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B=0.5$ και ευρέος θεμελίου σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες απόστασεις $D/B_1 = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ και 5.0 . Έδραση θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.4** έως το **Σχήμα 5.6** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ (*ssi* σε όρους FLAC) κατά την αστοχία, για την περίπτωση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) εδραζόμενων επί δίστρωτου εδάφους ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 = 0.5, 1.0$ και 2.0 . Για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, η εικόνα των διατμητικών παραμορφώσεων του εδάφους πρακτικά ταυτίζεται με την περίπτωση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης $D/B_1 = 2.0$ και ως εκ τούτου τα σχήματα που αντιστοιχούν σε αυτές τις περιπτώσεις δεν παρουσιάζονται.

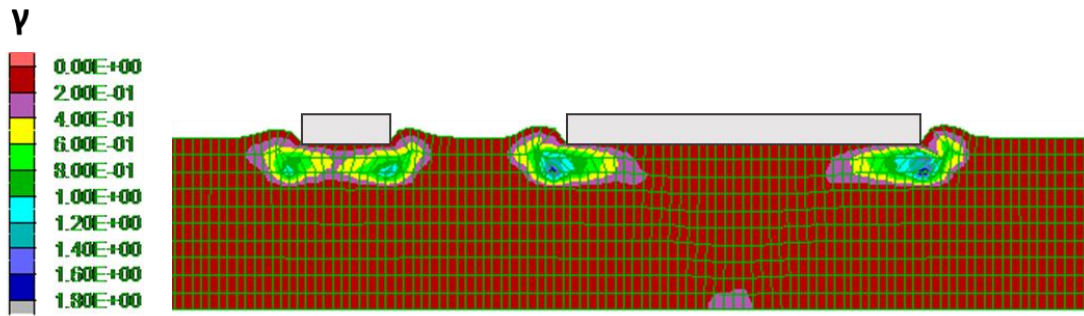
Επιπλέον υπενθυμίζεται πως οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους γ κατά την αστοχία, για το στενό και ευρύ θεμέλιο αναφοράς είχαν παρουσιαστεί στο **Σχήμα 4.3** και το **Σχήμα 4.10**, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=0.5$.



Σχήμα 5.5: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=1.0$.



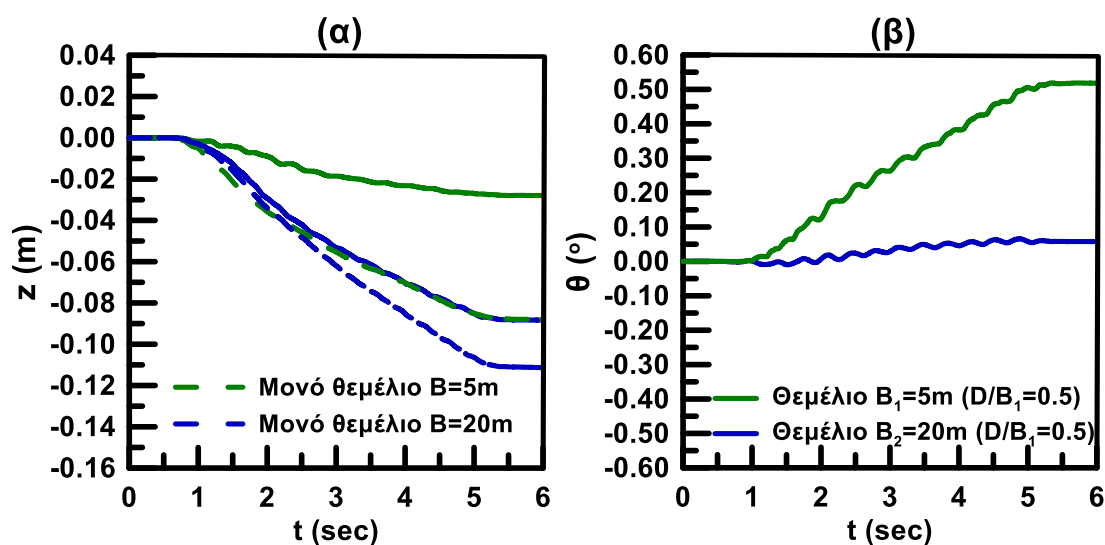
Σχήμα 5.6: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ κατά την αστοχία στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=2.0$.

Κατ' αντιστοιχία με τα μονά και τα δίδυμα θεμέλια, ο μηχανισμός αστοχίας του ζεύγους θεμελίων αναπτύσσεται εντός της αργιλικής στρώσης και οι διατμητικές παραμορφώσεις στην στιβαρότερη άμμο είναι ασήμαντες. Για επαρκώς μικρή ενδιάμεση απόσταση των θεμελίων του ζεύγους (π.χ. κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=0.5$) οι πρόσθετες διατμητικές τάσεις στο έδαφος ενδιάμεσα των θεμελίων επαλληλίζονται, με αποτέλεσμα την αλληλεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας του κάθε θεμελίου σε έναν ενιαίο, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και στην περίπτωση των δίδυμων στενών θεμελίων. Για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις των θεμελίων του ζεύγους, ο μηχανισμός αστοχίας κάτω από κάθε θεμέλιο γίνεται και πάλι διακριτός και όμοιος με εκείνον του αντίστοιχου μονού θεμελίου. Μάλιστα, η απεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας των δύο θεμελίων πραγματοποιείται σε ενδιάμεση απόσταση $D/B_1 \geq 1.0$, ήτοι $D \geq 5.0\text{m}$, η οποία είναι ίση με την απαιτούμενη ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των δίδυμων στενών θεμελίων (βλ. Παράγραφο 4.2.1) προκειμένου να υπάρξει απεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας στο έδαφος κάτω από τα δίδυμα στενά θεμέλια. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει την πεποίθηση ότι σημασία για τη στατική αλληλεπίδραση παίζει η πραγματική τιμή της απόστασης D μεταξύ των θεμελίων, και όχι η κανονικοποιημένη τιμή της D/B . Ως αποτέλεσμα αυτού, παρατηρείται αλληλεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας στα δίδυμα στενά θεμέλια και στο ζεύγος στενού-ευρέος θεμελίου, ήτοι στις περιπτώσεις όπου η «μικρή» κανονικοποιημένη απόσταση $D/B = D/B_1 = 0.5$ αντιστοιχεί σε απόσταση $D = 2.5\text{m}$, σε αντίθεση με τα δίδυμα ευρέα θεμέλια, όπου υπάρχει πλήρης απεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας κάθε θεμελίου ακόμα και στην «μικρή» κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση, καθώς εκείνη είναι ίση με $D = 10.0\text{m}$, κατ' απόλυτη τιμή (βλ. Παράγραφο 4.2.2).

5.3 Δυναμική αλληλεπίδραση

5.3.1 Αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων ίδιου φορτίου

Στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης (υποσχήμα α) και στροφής (υποσχήμα β) θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$) όταν αυτά βρίσκονται σε ζεύγος θεμελίων ίδιου φορτίου έδρασης ($q = 50\text{kPa}$), με ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5 B_1 = 2.5\text{m}$, για έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο (πάχους $H_c = 2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 40\text{kPa}$) υπό αρμονική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max} = 0.2\text{g}$. Χάρην σύγκρισης, στο υποσχήμα α, με διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζονται και οι χρονοϊστορίες καθίζησης του μονού στενού ($B = 5\text{m}$) και του μονού ευρέος θεμελίου ($B = 20\text{m}$), για το ίδιο φορτίο έδρασης $q = 50\text{kPa}$, για έδραση επί του ίδιου εδάφους και υπό την ίδια διέγερση αναφοράς. Οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες στροφής των μονών θεμελίων είναι πρακτικώς μηδενικές και δεν παρουσιάζονται.



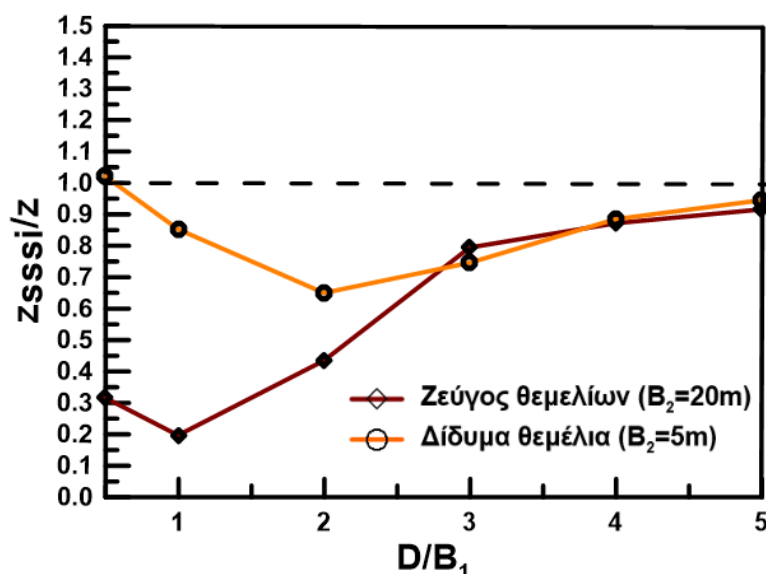
Σχήμα 5.7: Χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής μονού στενού ($B=5\text{m}$) και μονού ευρέος ($B=20\text{m}$) θεμελίου φορτίου $q=50\text{kPa}$, και ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και ίδιου φορτίου $q = 50\text{kPa}$ με ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=0.5$. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος πάχους αργιλικής κρούστας $H_c=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$, υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2\text{g}$.

Αυτή είναι μία τυπική μορφή των χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφής που προκύπτουν από κάθε ανάλυση, και αξιοποιούνται ώστε να αντληθούν τα μεγέθη ενδιαφέροντος της παρούσας διερεύνησης, δηλαδή ο λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z και η στροφή θ του στενού θεμελίου και ο λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z και η στροφή θ του ευρέος θεμελίου. Συγκεκριμένα, για την εκτίμηση του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z θεμελίου πλάτους B και φορτίου q , όταν αυτό βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους, αξιοποιείται η τελική τιμή της καθιζήσεως του (στο τέλος της διέγερσης) z_{SSSI} , η οποία κανονικοποιείται ως προς την

αντίστοιχη απόκριση αναφοράς, δηλαδή την τελική καθίζηση z του μονού θεμελίου ίδιου πλάτους B και φορτίου q υπό την ίδια διέγερση. Αξιοποιείται επιπλέον η τελική στροφή θ του θεμελίου πλάτους B του ζεύγους, δηλαδή αυτή η οποία αντιστοιχεί στο τέλος της διέγερσης.

Κατ' αναλογία όσων παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 (δίδυμα θεμέλια), οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για διαφορετικές ενδιάμεσες αποστάσεις D του ζεύγους θεμελίων, οι οποίες εδώ -λόγω του διαφορετικού εύρους των δύο θεμελίων- κανονικοποιούνται ως προς το πλάτος του στενού θεμελίου $B_1=5\text{m}$. Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάζεται τελικώς η μεταβολή των μεγεθών ενδιαφέροντος z_{SSSI}/z και θ , για το στενό και -αντίστοιχα- για το ευρύ θεμέλιο του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους, συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_1 .

Λαμβάνοντας υπόψιν τις ως άνω επισημάνσεις, στο **Σχήμα 5.8** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων του στενού θεμελίου όταν εκείνο βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και ίδιου φορτίου ($q=50\text{kPa}$), σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 , για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$ και για μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{\text{max}} = 0.2g$. Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των δίδυμων στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 , για το ίδιο έδαφος έδρασης και την ίδια διέγερση αναφοράς. Υπενθυμίζεται πως τα αποτελέσματα της διερεύνησης της απόκρισης δίδυμων στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, για έδραση επί αργίλου αντοχής $S_u=40\text{kPa}$, παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 4.3.1. Από τα αποτελέσματα αυτής της παραγράφου αντλήθηκε και η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των στενών δίδυμων θεμελίων συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_1 (βλ. **Σχήμα 4.23**) η οποία παρουσιάζεται και εδώ.



Σχήμα 5.8: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z θεμελίου πλάτους $B_1=5$ m και φορτίου $q = 50$ kPa συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_2=20m$) και ίδιου φορτίου και για δίδυμα στενά θεμέλια. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

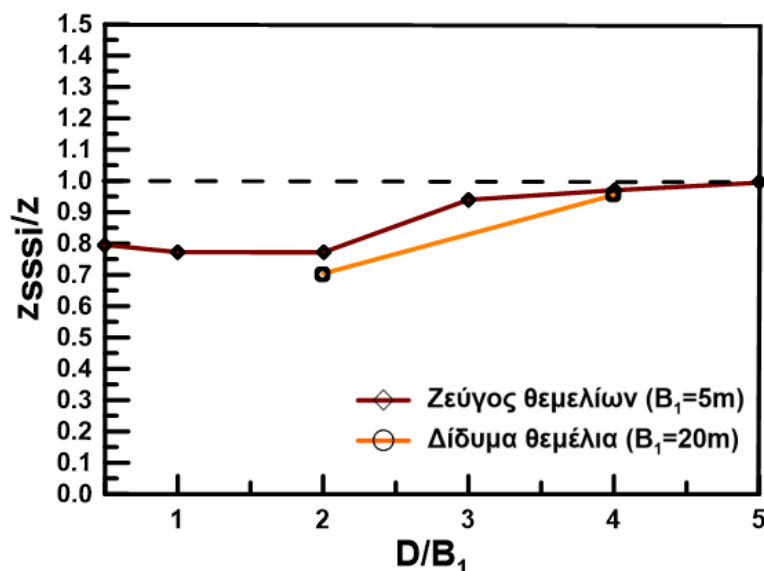
Το πρώτο αδρό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας την μεταβολή του λόγου καθιζήσεων του στενού θεμελίου, όταν εκείνο βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, είναι πως η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων είναι ευεργετική, για όλες τις εξεταζόμενες ενδιάμεσες αποστάσεις. Μάλιστα, η μείωση των καθιζήσεων του στενού θεμελίου προκύπτει πολύ έντονη, ιδιαίτερα για τις μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις, με την ελάχιστη τιμή του λόγου καθιζήσεων να ισούται με $z_{SSSI}/z = 0.20$ (σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=1$). Η αντίστοιχη ευεργετική επίδραση στην περίπτωση δίδυμων στενών θεμελίων προκύπτει εμφανώς πιο ήπια, με την ελάχιστη τιμή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z να είναι σχεδόν τριπλάσια, ήτοι ίση με $z_{SSSI}/z = 0.65$ (σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=2$), αλλά πάντα ευεργετική.

Με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, ο λόγος καθιζήσεων του στενού θεμελίου προσεγγίζει την μονάδα και πρακτικά, για αποστάσεις μεγαλύτερες από $D/B_1=4$, η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των δύο θεμελίων είναι πλέον επαρκώς μεγάλη ώστε η καθίζηση του στενού θεμελίου να μην επηρεάζεται από την ύπαρξη του γειτονικού ευρέος.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.9** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων του ευρέος θεμελίου όταν εκείνο βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου ($q=50kPa$), πάντα σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 , για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους

$H_c=2m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ και για την ίδια σεισμική διέγερση αναφοράς ($a_{max} = 0.2 g$). Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των δίδυμων ευρέων θεμελίων φορτίου $q=50kPa$, συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 , για το ίδιο έδαφος έδρασης και την ίδια διέγερση αναφοράς. Υπενθυμίζεται πως τα αποτελέσματα της διερεύνησης της απόκρισης δίδυμων ευρέων θεμελίων φορτίου $q=50kPa$, για έδραση επί αργίλου αντοχής $S_u=40kPa$, παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 4.3.2. Από τα αποτελέσματα αυτής της παραγράφου αντλήθηκε και η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των ευρέων δίδυμων θεμελίων συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_1 (βλ. **Σχήμα 4.29**) η οποία παρουσιάζεται και εδώ. Ωστόσο, τονίζεται πως η διερεύνηση της απόκρισης δίδυμων ευρέων θεμελίων είχε πραγματοποιηθεί συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων κανονικοποιημένης ως προς το πλάτος τους $B=20m$, ήτοι σε όρους $D/B_2=D/20m$. Ως αποτέλεσμα δεν υπάρχει πλήρης αντιστοιχία με τα αποτελέσματα της παρούσας παραγράφου, όπου η διερεύνηση γίνεται σε όρους $D/B_1=D/5m$, με συνέπεια η σύγκριση να περιορίζεται αναγκαστικά στο μικρότερο, κοινό εύρος κανονικοποιημένων ενδιάμεσων αποστάσεων.

Βάσει του **Σχήματος 5.9** παρατηρείται ότι για το ευρύ θεμέλιο του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων προκύπτει επίσης ευεργετική, αν και η μείωση του λόγου καθιζήσεων δεν είναι τόσο σημαντική (ελάχιστη τιμή του λόγου καθιζήσεων $z_{SSSI}/z = 0.77$), συγκριτικά με την μείωση του λόγου καθιζήσεων του γειτονικού στενού θεμέλιου. Συν τοις άλλοις, ουσιώδης αλληλεπίδραση στις καθιζήσεις του ευρέος θεμέλιου παρατηρείται μόνο για τις πολύ μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 \leq 2.0$. Επιπλέον, και η απαιτούμενη ενδιάμεση απόσταση προκειμένου να μην επηρεάζονται πρακτικώς οι καθιζήσεις του ευρέος θεμέλιου, είναι μικρότερη (ίση με $D = 3B_1 = 15m$, αντί για $D = 4B_1 = 20m$ για το στενό).

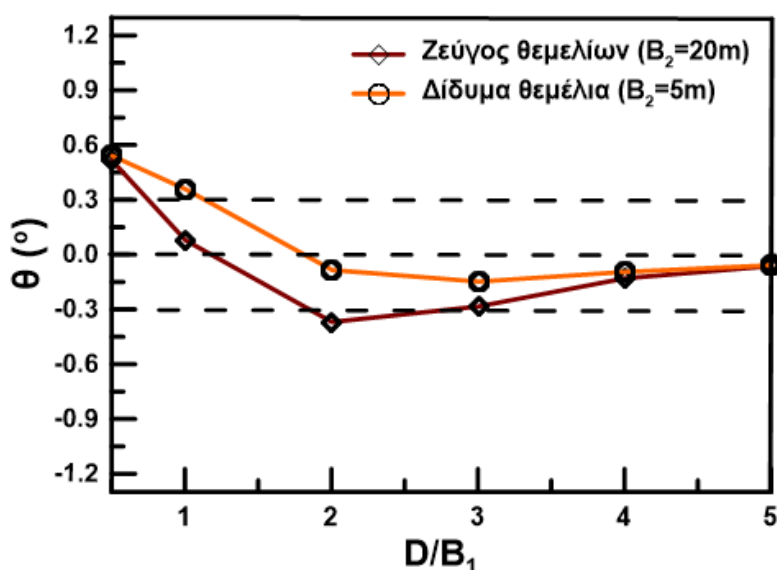


Σχήμα 5.9: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z θεμελίου πλάτους $B_2=20\text{ m}$ και φορτίου $q = 50\text{ kPa}$ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$) και ίδιου φορτίου και για δίδυμα ευρέα θεμέλια. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Η αντίστοιχη ευμενής αλληλεπίδραση στην περίπτωση όπου το γειτονικό θεμέλιο είναι δίδυμο ευρύ, αντί για στενό θεμέλιο ίδιου φορτίου, φαίνεται να προκύπτει εντονότερη, τουλάχιστον βάσει των διαθέσιμων στοιχείων προς σύγκριση. Συγκεκριμένα, στα δίδυμα ευρέα θεμέλια η ελάχιστη τιμή του λόγου καθιζήσεων είναι ίση με $z_{SSSI}/z = 0.70$, και προκύπτει για ενδιάμεση απόσταση θεμελίων ίση με $D=10\text{m}$ ($D/B_1=2$). Για την ίδια ενδιάμεση απόσταση θεμελίων, αλλά για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους, η τιμή του λόγου καθιζήσεων του ευρέος θεμελίου είναι ίση με $z_{SSSI}/z = 0.77$. Μάλιστα, η ενδιάμεση απόσταση θεμελίων $D=10\text{m}$ είναι και η μικρότερη ενδιάμεση απόσταση που εξετάστηκε στην περίπτωση των δίδυμων ευρέων θεμελίων. Για ακόμα μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις των δίδυμων ευρέων θεμελίων εκτιμάται ότι θα είχε προκύψει περαιτέρω μείωση του λόγου z_{SSSI}/z και ακόμα μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο περιπτώσεων.

Ακολουθως, στο **Σχήμα 5.10** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ του στενού θεμελίου για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και ίδιου φορτίου ($q=50\text{kPa}$), σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 , για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$ και για μέγιστη επιτάχυνση βάσης $a_{\max} = 0.2g$. Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και η μεταβολή της στροφής των δίδυμων στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ (για το ίδιο έδαφος έδρασης) η οποία παρουσιάστηκε και στην Παράγραφο 4.3.1 (βλ. **Σχήμα 4.24**).

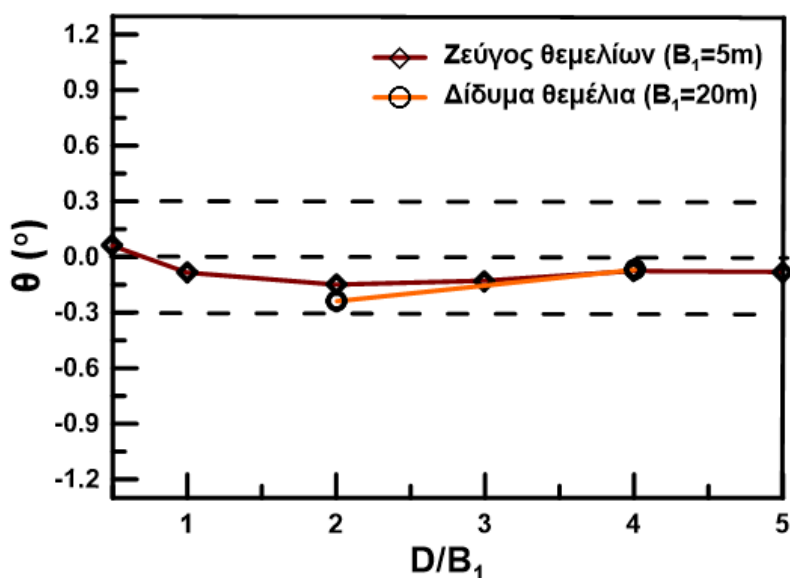
Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.11** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ του ευρέος θεμελίου, για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και ίδιου φορτίου ($q=50\text{kPa}$), πάντα σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 , για αντοχή της επιφανειακής αργίλου ίση με $S_u=40\text{kPa}$ και για την ίδια σεισμική διέγερση αναφοράς ($a_{\max} = 0.2\text{ g}$). Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η μεταβολή της στροφής των δίδυμων ευρέων θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, η οποία παρουσιάστηκε και στην Παράγραφο 4.3.2 (βλ. **Σχήμα 4.30**). Για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και στην σύγκριση του λόγου καθιζήσεων του ευρέος θεμελίου, για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου και για δίδυμα ευρέα θεμέλια, η σύγκριση της μεταβολής της στροφής του ευρέος θεμελίου περιορίζεται αναγκαστικά στα αποτελέσματα που αφορούν τις κοινές ενδιάμεσες κανονικοποιημένες αποστάσεις των δύο διερευνήσεων, ήτοι για $D/B_1=2$ και $D/B_1=4$.



Σχήμα 5.10: Στροφή θ θεμελίου πλάτους $B_1=5\text{ m}$ και φορτίου $q = 50\text{ kPa}$ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_2=20\text{m}$) και ίδιου φορτίου και για δίδυμα στενά θεμέλια. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2\text{g}$.

Αρχικά, για το στενό θεμέλιο παρατηρούνται ουσιώδεις στροφές μόνο όταν η κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση μεταξύ του ζεύγους θεμελίων είναι μικρότερη ή ίση από $D = 3B_1 = 15\text{m}$. Η στροφή αυτή προκύπτει συγκλίνουσα για την μικρότερη εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση ($D = 0.5B_1 = 2.5\text{m}$) και αποκλίνουσα για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις. Για ενδιάμεση απόσταση του ζεύγους θεμελίων μεγαλύτερη ή ίση από $D = 4B_1 = 20\text{m}$, πρακτικά η στροφή του στενού θεμελίου μπορεί να θεωρηθεί μηδενική, ως αποτέλεσμα της εξάλειψης της αλληλεπίδρασης των δύο θεμελίων εξαιτίας της αύξησης της μεταξύ τους απόστασης. Πάντως, οι στροφές του στενού θεμελίου όταν είναι σε ζεύγος

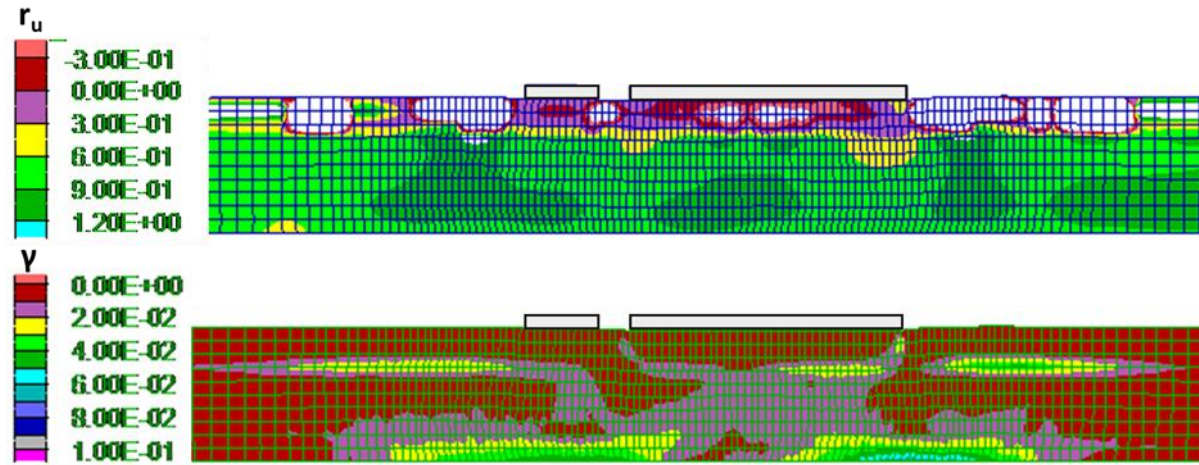
θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, προκύπτουν γενικώς πιο αποκλίνουσες, σε σύγκριση με την περίπτωση δίδυμων στενών θεμελίων. Η τελική φορά της στροφής ωστόσο διατηρείται, δηλαδή προκύπτει συγκλίνουσα στροφή προς το γειτονικό θεμέλιο, για μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων και αποκλίνουσα ή μηδενική για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις, είτε το γειτονικό θεμέλιο είναι ευρύ ίδιου φορτίου, είτε είναι δίδυμο στενό.



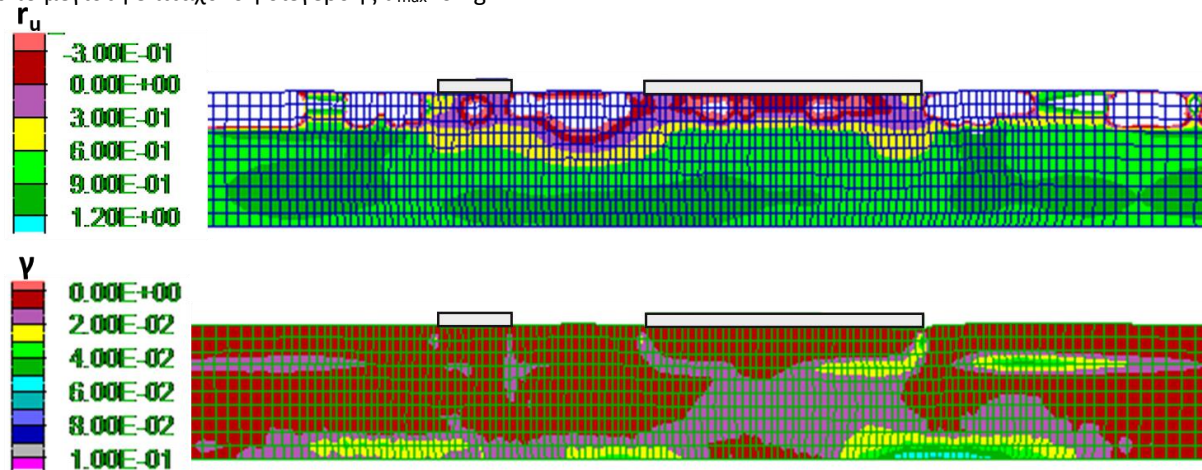
Σχήμα 5.11: Στροφή θεμελίου πλάτους $B_2=20$ m και φορτίου $q = 50$ kPa συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5$ m) και ίδιου φορτίου και για δίδυμα ευρέα θεμέλια. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2$ m και $S_u=40$ kPa), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Αντίθετα το ευρύ θεμέλιο εμφανίζει μηδενικές στροφές, όταν βρίσκεται σε ζεύγος στενού-ευρέος θεμελίου ίδιου φορτίου $q=50$ kPa, με την παρατήρηση αυτή να ισχύει ανεξάρτητα από την ενδιάμεση απόσταση των δύο θεμελίων. Μηδενικές είναι οι στροφές και στην περίπτωση των δίδυμων ευρέων θεμελίων.

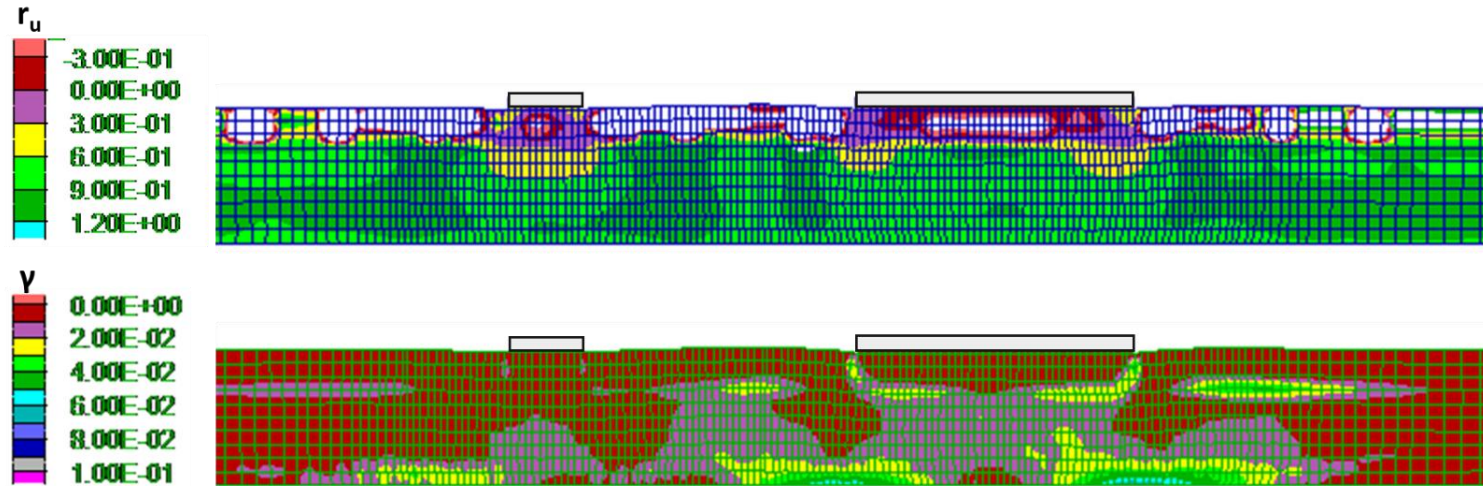
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.12** έως το **Σχήμα 5.14** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος ($H_c=2$ m και $S_u=40$ kPa) ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5$ m και $B_2=20$ m) και ίδιου φορτίου έδρασης ($q = 50$ kPa) μετά το πέρας διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$, σε ενδιάμεσες αποστάσεις $D=2.5$ m, 10 m και 20 m (κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 = 0.5$, 2.0 και 4.0).



Σχήμα 5.12: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και ίδιου φορτίου ($q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=0.5$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.



Σχήμα 5.13: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και ίδιου φορτίου ($q=50\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=2.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.



Σχήμα 5.14: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$) για έδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου ($q = 50kPa$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=4.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Τονίζεται ότι για να διευκολύνεται η σύγκριση, η χρωματική κλίμακα μεταβολής του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ παραμένει αμετάβλητη για τα τρία παραπάνω σχήματα, και είναι ίδια με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε για τα αντίστοιχα σχήματα ισοκαμπυλών του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος δίδυμων στενών και ευρέων θεμελίων (βλ. Κεφάλαιο 4). Επιπλέον υπενθυμίζεται πως οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ για το στενό και ευρύ θεμέλιο αναφοράς είχαν παρουσιαστεί στο **Σχήμα 4.25** και το **Σχήμα 4.31**, αντίστοιχα.

Συνολικά προκύπτει ότι η παρουσία ενός γειτονικού θεμελίου ίδιου φορτίου αλλά πολύ μεγαλύτερου πλάτους, εμποδίζει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη του μηχανισμού αστοχίας του στενού θεμελίου. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα αισθητή για την μικρότερα εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου ($D = 0.5B_1 = 2.5\text{m}$) για την οποία προκύπτουν πρακτικώς μηδενικές διατμητικές παραμορφώσεις στις παρειές του στενού θεμελίου. Αντίθετα, ο μηχανισμός αστοχίας του ευρέος θεμελίου εξακολουθεί να είναι εμφανής ακόμα και στην μικρότερα εξεταζόμενη ενδιάμεση απόσταση ($D = 0.5B_1 = 2.5\text{m}$). Παρόλα αυτά, οι διατμητικές παραμορφώσεις κάτω από την εσωτερική παρειά του ευρέος θεμελίου είναι σαφώς μικρότερες από εκείνες που αναπτύσσονται στην εξωτερική του παρειά, γεγονός που πρέπει να οφείλεται στην αύξηση της στιβαρότητας του εδάφους στην περιοχή ενδιάμεσα των θεμελίων, λόγω επαλληλίας των κατακόρυφων ενεργών τάσεων που επιβάλλονται από το (στατικό) φορτίο των θεμελίων. Με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των δύο θεμελίων, η αλληλεπίδραση φθίνει, και σε ενδιάμεση απόσταση ίση με $D = 4B_1 = 20\text{m}$ ο μηχανισμός αστοχίας κάθε θεμελίου αναπτύσσεται πλέον σχεδόν απρόσκοπτα, κατ' αντιστοιχία με τον μηχανισμό αστοχίας του εκάστοτε θεμελίου αναφοράς.

Όσον αφορά στην κατανομή του συντελεστή υπερπίεσεων πόρων κάτω από το ευρύ θεμέλιο, εκείνη δεν επηρεάζεται ουσιωδώς από την ύπαρξη του γειτονικού στενού θεμελίου. Αντίθετα, το έδαφος κάτω από το στενό θεμέλιο εμφανίζει πολύ μεγαλύτερες τιμές υπερπίεσεων πόρων, σε σύγκριση με το αντίστοιχο θεμέλιο αναφοράς. Με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης μεταξύ των δύο θεμελίων, οι τιμές του συντελεστή υπερπίεσης πόρων κάτω από το στενό θεμέλιο μειώνονται, και η κατανομή του συντελεστή υπερπίεσεων πόρων προσεγγίζει ολοένα και περισσότερο την αντίστοιχη κατανομή κάτω από το μονό θεμέλιο αναφοράς. Για ενδιάμεσες αποστάσεις μεγαλύτερες ή ίσες από $D = 4B_1 = 20\text{m}$, η κατανομή του συντελεστή υπερπίεσης πόρων στο έδαφος έδρασης του ζεύγους θεμελίων φορτίου $q=50\text{ kPa}$ πρακτικά ταυτίζεται με εκείνη που θα πρόκυπτε εάν τα δύο θεμέλια ήταν ανεξάρτητα.

Για να κατανοηθούν οι λόγοι που οδηγούν σε έντονη μεταβολή της δυναμικής απόκρισης του στενού θεμελίου και σε πρακτικώς μη ουσιώδη μεταβολή της απόκρισης του ευρέος θεμελίου, θα πρέπει αφενός να ληφθεί υπόψη ότι σε όρους τάσεων, το εύρος του θεμελίου καθορίζει την έκταση της περιοχής με προσαυξημένο φορτίο αλλά και το πόσο αυξάνει το φορτίο για το ίδιο βάθος. Συγκεκριμένα, ευρύτερο θεμέλιο συνεπάγεται μεγαλύτερη σε έκταση περιοχή με προσαυξημένο φορτίο, αλλά και εντονότερη προσαύξηση του φορτίου για το ίδιο βάθος. Ως αποτέλεσμα, η ενίσχυση της στιβαρότητας του εδάφους κάτω από ένα ευρύ θεμέλιο είναι συνολικά εντονότερη (σε έκταση και μέγεθος) σε σχέση με το έδαφος κάτω από ένα στενό θεμέλιο ίδιου φορτίου. Συν τοις άλλοις, σε όρους παραμορφώσεων, ο όγκος του εδάφους που εκτοπίζεται από ένα ευρύ θεμέλιο, εξαιτίας του μηχανισμού διπλού ολισθαίνοντος στερεού που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο όγκο που τείνει να εκτοπιστεί από το στενό θεμέλιο. Το γεγονός ότι το ευρύ θεμέλιο εκτοπίζει όχι μόνο περισσότερο αλλά και στιβαρότερο έδαφος, έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσονται σχεδόν απρόσκοπτα οι σεισμικές του καθιζήσεις, καθώς ο μηχανισμός που οδηγεί σε αυτές δεν μπορεί να επηρεαστεί από το έδαφος που τείνει να εκτοπίσει το στενό θεμέλιο. Έτσι, καθώς το ευρύ θεμέλιο αναπτύσσει σεισμικές καθιζήσεις, λόγω σχετικής ασυμπίεστοτητας του εδάφους οδηγεί το έδαφος πλευρικά σε διόγκωση, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται και η ανάπτυξη σεισμικών καθιζήσεων για το στενό θεμέλιο.

Η μείωση των σεισμικών καθιζήσεων του στενού θεμελίου είναι αλληλοεμπλεκόμενη με την μείωση των διατμητικών παραμορφώσεων που παρατηρείται στο έδαφος που βρίσκεται κάτω από το στενό θεμέλιο. Με τη σειρά τους, μικρότερες διατμητικές παραμορφώσεις οδηγούν σε μικρότερη τάση για διαστολή της υποκείμενης άμμου (shear-induced dilation), γεγονός που θα μπορούσε να συσχετιστεί και με την παρατήρηση μεγαλύτερων υπερπιέσεων κάτω από το στενό θεμέλιο, συγκριτικά με την περίπτωση του θεμελίου αναφοράς.

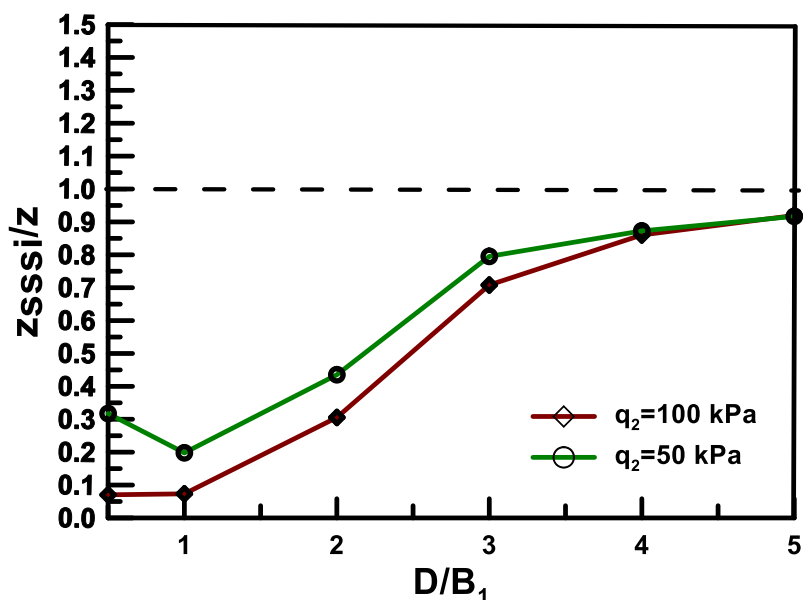
5.3.2 Αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού φορτίου

Στην προηγούμενη παράγραφο διερευνήθηκε η επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης D στην δυναμική αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$) και ίδιου φορτίου έδρασης ($q_1 = q_2 = 50\text{kPa}$) για έδραση επί δίστρωτου εδάφους αποτελούμενο από 8m ρευστοποιήσιμης άμμου και 2m επιφανειακής αργίλου (αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$). Στην παρούσα παράγραφο γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση σε όρους καθιζήσεων, στροφών, υπερπιέσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων για την επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης D στην αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού εύρους

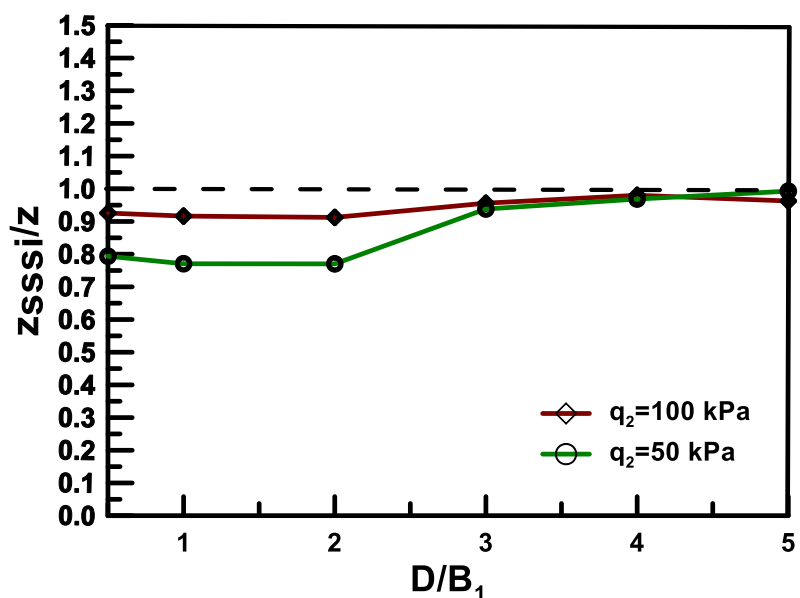
($B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$) αλλά και διαφορετικού φορτίου. Συγκεκριμένα, το φορτίο του στενού θεμελίου διατηρείται ίσο με $q_1=50\text{ kPa}$, σε αντίθεση με το φορτίο του ευρέος θεμελίου το οποίο διπλασιάζεται, ήτοι λαμβάνει την τιμή $q_2=100\text{kPa}$. Υπογραμμίζεται πως ο διπλασιασμός του φορτίου του ευρέος θεμελίου, διατηρώντας σταθερά τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων, οδηγεί σε υποδιπλασιασμό του (στατικού) συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα για το ευρύ θεμέλιο ($FS = 4.8 = 480/100$), και σε μη-μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα για το στενό θεμέλιο ($FS = 5 = 250/50$). Ως αποτέλεσμα, η τιμή του συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα είναι πρακτικά η ίδια ($FS \approx 5$), για τα δύο θεμέλια της παρούσας διερεύνησης.

Όπως και στα θεμέλια διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, η μέγιστη επιτάχυνση της επιβαλλόμενης διέγερσης στη βάση παραμένει ίση με $a_{\max}=0.2\text{g}$ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_1 . Αντίστοιχα, προκειμένου να προκύψουν τα συγκεντρωτικά γραφήματα μεταβολής των τιμών z_{SSI}/z και θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_1 για το στενό και για το ευρύ θεμέλιο του ζεύγους, από κάθε ανάλυση αξιοποιούνται οι τελικές τιμές των χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφής των θεμελίων διαφορετικού εύρους (βλ. ενδεικτικά **Σχήμα 5.7**), οι οποίες συγκρίνονται με την αντίστοιχη απόκριση του μονού θεμελίου αναφοράς, ήτοι εκείνη που προκύπτει για το θεμέλιο ίδιου πλάτους και ίδιου φορτίου αλλά χωρίς την ύπαρξη ενός γειτονικού θεμελίου.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω επισημάνσεις, στο **Σχήμα 5.15** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων του στενού θεμελίου όταν εκείνο βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1=50\text{kPa}$ και $q_2=100\text{kPa}$), σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 , για αντοχή της επιφανειακής αργίλου ίση με $S_u=40\text{kPa}$ και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση βάσης $a_{\max} = 0.2\text{ g}$. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.16** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων του ευρέος θεμελίου για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1=50\text{kPa}$ και $q_2=100\text{kPa}$), πάντα σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 και για τα ίδια χαρακτηριστικά εδάφους και επιβαλλόμενης διέγερσης.



Σχήμα 5.15: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z θεμελίου πλάτους $B_1=5$ m συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_2=20$ m), ίδιου ($q_1 = q_2 = 50$ kPa) και διαφορετικού ($q_1=50$ kPa και $q_2=100$ kPa) φορτίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2$ m και $S_u=40$ kPa), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.



Σχήμα 5.16: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z θεμελίου πλάτους $B_2=20$ m συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5$ m), ίδιου ($q_1 = q_2 = 50$ kPa) και διαφορετικού ($q_1=50$ kPa και $q_2=100$ kPa) φορτίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2$ m και $S_u=40$ kPa), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

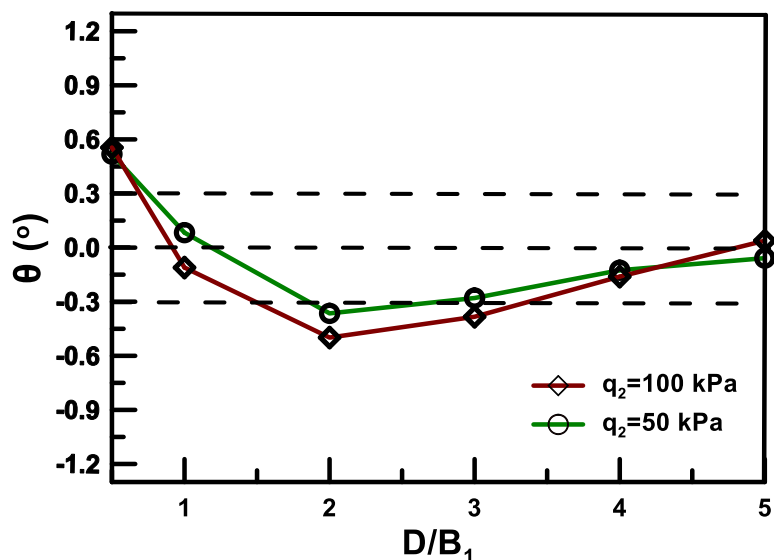
Χάριν σύγκρισης της επίδρασης που επιφέρει ο διπλασιασμός του φορτίου του ευρέος θεμελίου, στα δύο παραπάνω σχήματα απεικονίζεται και η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων του στενού θεμελίου και του ευρέος θεμελίου, αντίστοιχα, για ζεύγος θεμελίων

διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) αλλά ίδιου φορτίου ($q_1 = q_2 = 50\text{kPa}$), επί του ίδιου εδάφους και για την ίδια διέγερση αναφοράς (βλ. **Σχήμα 5.8** και **Σχήμα 5.9**).

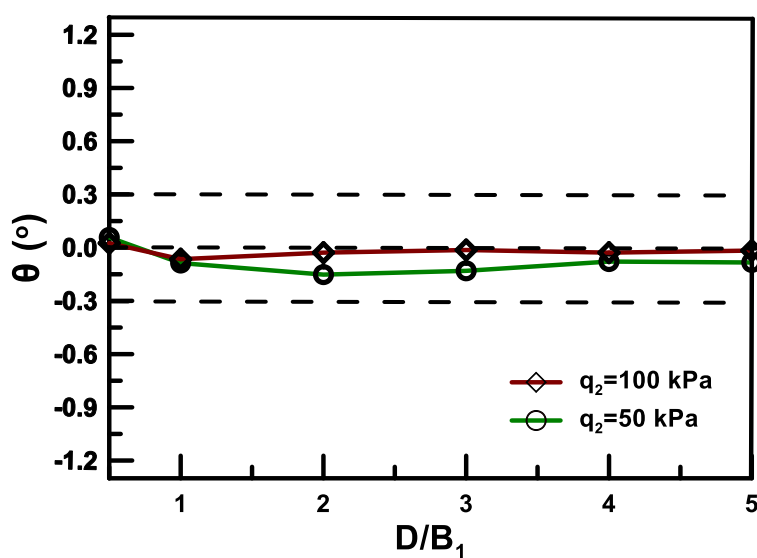
Η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων για το στενό θεμέλιο του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου είναι ευεργετική, για όλες τις εξεταζόμενες ενδιάμεσες αποστάσεις. Μάλιστα, η απομείωση των καθιζήσεων είναι τόσο έντονη, ώστε για τις πολύ μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ($D/B_1 \leq 1$) η τιμή του λόγου καθιζήσεων του στενού θεμελίου σχεδόν μηδενίζεται ($z_{SSSI}/z = 0.07$). Με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης μεταξύ των θεμελίων του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου, ο λόγος z_{SSSI}/z αυξάνει και πρακτικώς για ενδιάμεση απόσταση $D/B_1 = 4$, οι καθιζήσεις του στενού θεμελίου ταυτίζονται με την απόκριση του θεμελίου αναφοράς. Η αντίστοιχη απόκριση στην περίπτωση όπου το φορτίο του γειτονικού ευρέος θεμελίου είναι υποδιπλάσιο ($q_2 = 50\text{kPa}$) είναι ποιοτικά ανάλογη, αλλά οι τιμές του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z προκύπτουν μεγαλύτερες. Για ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 \geq 4$, ο λόγος καθιζήσεων του στενού θεμελίου προκύπτει ίδιος, ανεξαρτήτως του φορτίου του γειτονικού ευρέος θεμελίου, λόγω εξάλειψης της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους. Με άλλα λόγια, η αύξηση του φορτίου του ευρέος θεμελίου από $q = 50\text{kPa}$ σε $q = 100\text{kPa}$, έχει ποιοτικά ανάλογη επίδραση στις καθιζήσεις του στενού θεμελίου, αλλά απομειώνει σε εντονότερο βαθμό τις καθιζήσεις του, ήτοι ενισχύει την ευεργετική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων για το στενό θεμέλιο.

Αντιθέτως, για το ευρύ θεμέλιο παρατηρείται απομείωση της ευεργετικής αλληλεπίδρασης σε όρους καθιζήσεων, συγκριτικά με την απόκριση του ευρέος θεμελίου όταν και τα δύο θεμέλια του ζεύγους είχαν φορτίο $q = 50\text{kPa}$. Μάλιστα, ο ελάχιστος λόγος καθιζήσεων του ευρέος θεμελίου φορτίου $q = 100\text{kPa}$ ισούται με $z_{SSSI}/z = 0.91$, δηλαδή πρακτικά παρατηρείται ταύτιση σε όρους καθιζήσεων, όταν το θεμέλιο βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους και φορτίου και όταν το ίδιο είναι απομονωμένο. Για ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 \geq 3$ ο λόγος καθιζήσεων του ευρέος θεμελίου φορτίου $q = 100\text{kPa}$ ταυτίζεται με εκείνον για φορτίο $q = 50\text{kPa}$, καθώς πλέον η απόσταση μεταξύ στενού και ευρέος θεμελίου είναι επαρκώς μεγάλη, ώστε το ευρύ θεμέλιο να μην επηρεάζεται, ακόμα και όταν το φορτίο του είναι ίσο με εκείνο του γειτονικού στενού.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.17** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής του στενού θεμελίου όταν εκείνο βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1=50\text{kPa}$ και $q_2=100\text{kPa}$), σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 , για έδραση επί αργιλικής κρούστας αντοχής $S_u=40\text{kPa}$ και για μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση βάσης $a_{\max} = 0.2\text{g}$.



Σχήμα 5.17: Στροφή θ θεμελίου πλάτους $B_1=5$ m συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_2=20$ m), ίδιου ($q_1 = q_2 = 50$ kPa) και διαφορετικού ($q_1 = 50$ kPa και $q_2 = 100$ kPa) φορτίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2$ m και $S_u=40$ kPa), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.



Σχήμα 5.18: Στροφή θ θεμελίου πλάτους $B_2=20$ m συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5$ m), ίδιου ($q_1 = q_2 = 50$ kPa) και διαφορετικού ($q_1 = 50$ kPa και $q_2 = 100$ kPa) φορτίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2$ m και $S_u=40$ kPa), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.18** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής του ευρέος θεμελίου του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου, πάντα σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 , για το ίδιο δίστρωτο εδαφικό προφίλ και για την ίδια διέγερση αναφοράς. Όπως και στα σχήματα μεταβολής του λόγου καθιζήσεων, έτσι και στα σχήματα όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της στροφής θ των θεμελίων, για ζεύγος θεμελίων

διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου, απεικονίζεται -χάριν σύγκρισης- και η αντίστοιχη απόκριση για θεμέλια σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους αλλά ίδιου φορτίου (βλ. **Σχήμα 5.10** και **Σχήμα 5.11**).

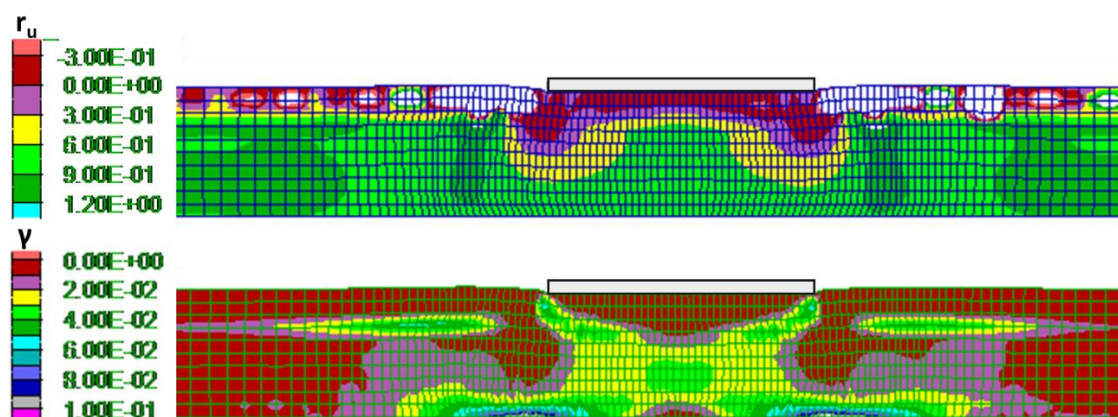
Οι στροφές του στενού θεμελίου, για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου, προκύπτουν ουσιώδεις για ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 \leq 3$. Για ενδιάμεση απόσταση $D/B_1 > 3$, πρακτικά το στενό θεμέλιο δεν στρέφεται, ως αποτέλεσμα της σταδιακής εξάλειψης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο θεμελίων του ζεύγους. Όσον αφορά στο πρόσημο της στροφής του στενού θεμελίου, εκείνο στρέφεται προς το γειτονικό ευρύ θεμέλιο για πολύ μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (π.χ. για $D/B_1=0.5$) και αποκλίνει για μεγαλύτερες, ήτοι για $D/B_1 > 1$. Σε κάθε περίπτωση, η μεταβολή της στροφής του στενού θεμελίου, όταν το γειτονικό ευρύ θεμέλιο έχει φορτίο $q = 100\text{kPa}$, είναι ποιοτικά ίδια με εκείνη για στενό θεμέλιο ίδιου φορτίου, αλλά για γειτονικό ευρύ θεμέλιο φορτίου $q = 50\text{kPa}$. Η διαφορά είναι ότι όταν το ευρύ θεμέλιο έχει υποδιπλάσιο φορτίο, η στροφή του στενού θεμελίου είναι συστηματικά μικρότερη, κατ' απόλυτη τιμή. Όσον αφορά στις στροφές του ευρέος θεμελίου, για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους, εκείνες προκύπτουν πρακτικά μηδενικές, ανεξαρτήτως του φορτίου του ευρέος θεμελίου αλλά και της απόστασης στην οποία βρίσκεται το γειτονικό στενό θεμέλιο.

Παρακάτω, στο **Σχήμα 5.20** έως το **Σχήμα 5.22** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1=50\text{kPa}$ και $q_2=100\text{kPa}$) μετά το πέρας διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max}=0.2g$, σε ενδιάμεσες αποστάσεις $D = 2.5\text{m}$, 10m και 20m (κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_1 = 0.5, 2.0$ και 4.0). Χάριν σύγκρισης της μεταβολής της απόκρισης του ευρέος θεμελίου, στο **Σχήμα 5.19** παρουσιάζονται, για την ίδια διέγερση και χαρακτηριστικά εδάφους έδρασης, οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ για έδραση μονού θεμελίου εύρους $B=20\text{m}$ και φορτίου $q=100\text{kPa}$, ενώ υπενθυμίζεται πως η αντίστοιχη απόκριση αναφοράς για το στενό θεμέλιο είχε παρουσιαστεί στο **Σχήμα 4.25**. Η χρωματική κλίμακα μεταβολής του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ παραμένει αμετάβλητη για τα τέσσερα παρακάτω σχήματα, και είναι ίδια με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε για τα αντίστοιχα σχήματα ισοκαμπυλών του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου (βλ. Παράγραφο 5.3.1), αλλά και στο έδαφος θεμελίωσης δίδυμων στενών και ευρέων θεμελίων (βλ. Κεφάλαιο 4).

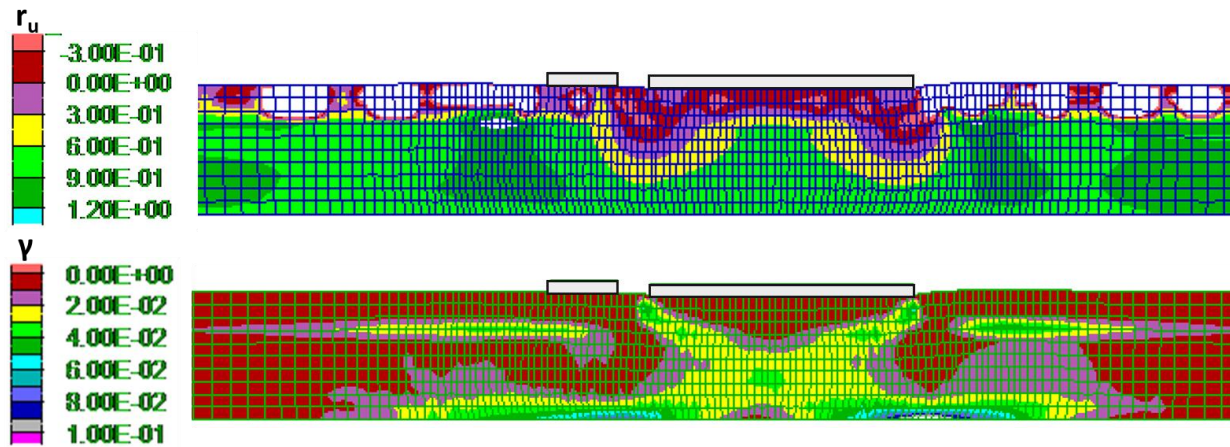
Συνολικά, η απόκριση του ευρέος θεμελίου φορτίου $q=100\text{kPa}$, πρακτικά δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του γειτονικού στενού θεμελίου, με την παρατήρηση αυτή να ισχύει τόσο σε

όρους κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων όσο και σε όρους κατανομής του συντελεστή υπερπίεσεων πόρων στην περιοχή έδρασης του θεμελίου. Αντίθετα, το έδαφος κάτω από το στενό θεμέλιο εμφανίζει πολύ διαφορετική απόκριση, συγκριτικά με το έδαφος κάτω από το αντίστοιχο θεμέλιο αναφοράς. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση των υπερπίεσεων πόρων κάτω από το στενό θεμέλιο και ταυτόχρονη μείωση των διατμητικών παραμορφώσεων στις παρειές του θεμελίου. Οι παραπάνω διαφορές φθίνουν με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης μεταξύ των θεμελίων, με τον μηχανισμό αστοχίας του στενού θεμελίου να είναι πλήρως εμφανής, για ενδιάμεση απόσταση μεγαλύτερη ή ίση από $D = 4B_1 = 20\text{m}$.

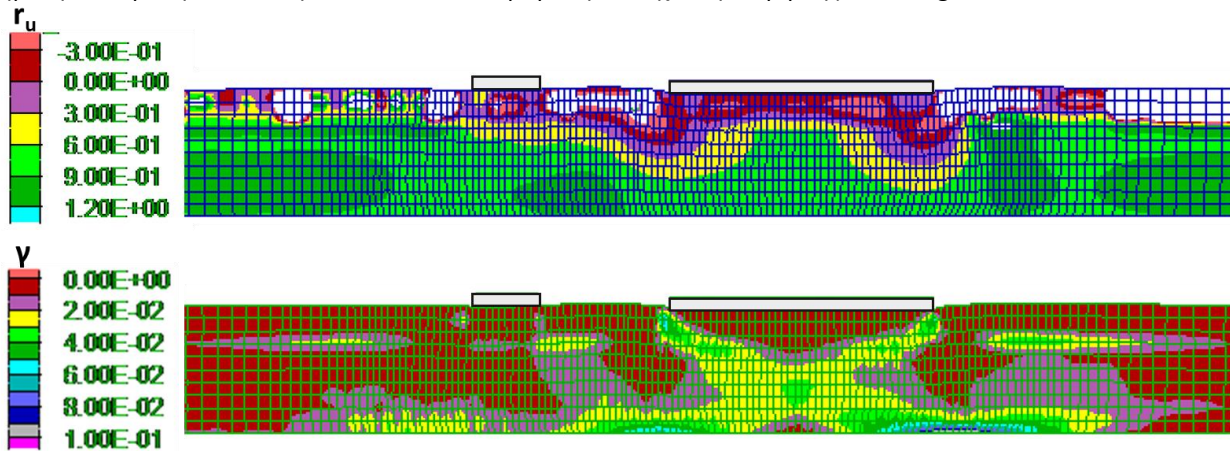
Ποιοτικά πάντως, η μεταβολή της απόκρισης του εδάφους κάτω από το στενό θεμέλιο, είναι ίδια με την αντίστοιχη μεταβολή για στενό θεμέλιο φορτίου $q=50\text{kPa}$, αλλά για υποδιπλάσιο φορτίο του γειτονικού ευρέος θεμελίου, ήτοι φορτίο $q=50\text{kPa}$ αντί για $q=100\text{kPa}$. Η διαφορά έγκειται στο ότι η αύξηση του φορτίου του ευρέος θεμελίου μεγεθύνει την παραπάνω μεταβολή, δηλαδή οδηγεί σε εντονότερη αύξηση των υπερπίεσεων πόρων και αντίστοιχα, σε εντονότερη μείωση των διατμητικών παραμορφώσεων κάτω από το στενό θεμέλιο. Υπενθυμίζεται πως αντίστοιχη ποιοτική συμφωνία μεταξύ του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, και διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου παρατηρείται τόσο σε όρους καθιζήσεων όσο και σε όρους στροφών, με την αλληλεπίδραση να είναι συγκριτικά εντονότερη για το στενό θεμέλιο και συγκριτικά μικρότερη για το ευρύ θεμέλιο, στην περίπτωση του ευρέος θεμελίου φορτίου $q=100\text{kPa}$.



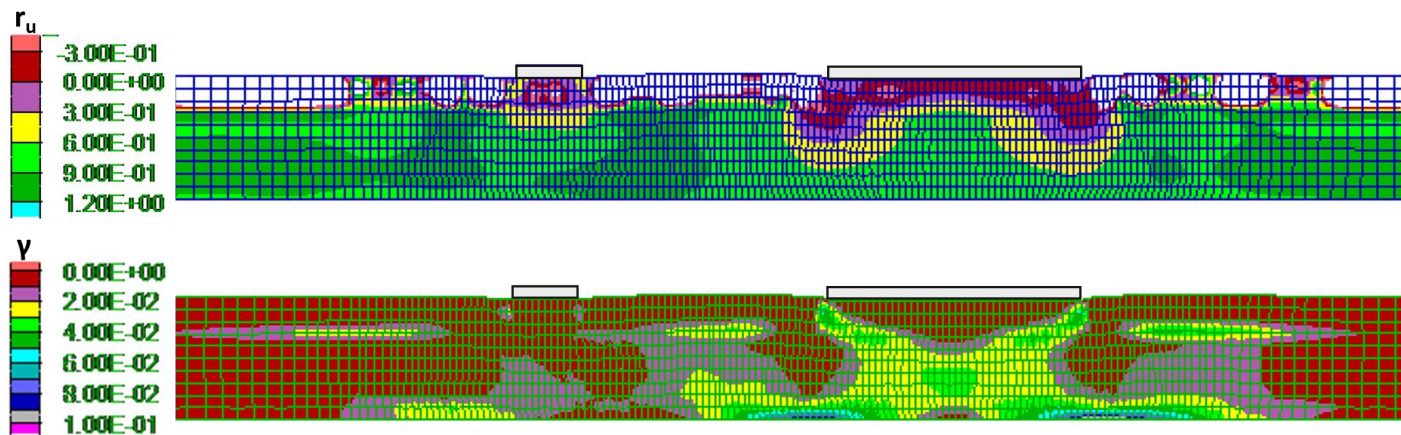
Σχήμα 5.19: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση μονού θεμελίου πλάτους $B=20\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$ ($FS_{\text{static}}= 4.8$) υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\text{max}}=0.2g$.



Σχήμα 5.20: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1=50\text{kPa}$ και $q_2=100\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=0.5$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.



Σχήμα 5.21: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$) για έδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1=50\text{kPa}$ και $q_2=100\text{kPa}$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=2.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.



Σχήμα 5.22: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$) για έδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1=50kPa$ και $q_2=100kPa$) σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1=4.0$ και υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Συνοψίζοντας, η ποιοτική ερμηνεία που δόθηκε στην Παράγραφο 5.3.1, για την επεξήγηση της μεταβολής της κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων, της μεταβολής του συντελεστή υπερπιέσεων πόρων, αλλά και των καθιζήσεων και στροφών σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου εξακολουθεί να ισχύει, με την διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση, η σχετική επιρροή του ευρέος θεμελίου αυξάνει περισσότερο λόγω προσαύξησης του φορτίου του, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με την ούτως ή άλλως μικρότερη επιρροή του στενού θεμελίου στην συμπεριφορά του γειτονικού ευρέος.

5.4 Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης θεμελίων διαφορετικού εύρους

Στο παρόν Κεφάλαιο διερευνήθηκε η στατική και δυναμική αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) για έδραση επί δίστρωτου εδάφους, αποτελούμενου από ρευστοποιήσιμη άμμο (πάχους 8m) στη βάση και αργιλική στρώση στην επιφάνεια (πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$). Όπως και στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων (βλ. Κεφάλαιο 4), η στατική αλληλεπίδραση του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους μελετήθηκε σε όρους καθιζήσεων και φέρουσας ικανότητας. Κύριος στόχος των στατικών αναλύσεων ήταν η εκτίμηση της επίδρασης της απόστασης D μεταξύ των δύο θεμελίων στα παραπάνω μεγέθη ενδιαφέροντος.

Σε όρους δυναμικής αλληλεπίδρασης, μελετήθηκε η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z και των αναπτυσσόμενων στροφών του καθενός εκ των δύο θεμελίων του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , ενώ για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκαν η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης στο τέλος της διέγερσης. Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους: εκείνη στην οποία το φορτίο των δύο θεμελίων είναι το ίδιο και ίσο με $q = 50\text{kPa}$, αλλά και εκείνη στην οποία το φορτίο του στενού θεμελίου παραμένει σταθερό ($q = 50\text{kPa}$), αλλά το φορτίο του γειτονικού του ευρέος θεμελίου διπλασιάζεται, ήτοι λαμβάνει την τιμή $q = 100\text{kPa}$. Τονίζεται πως ίδιο φορτίο θεμελίων ίσο με $q=50\text{kPa}$, αντιστοιχεί σε στατικό συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα $FS = 9.6$ για το ευρύ θεμέλιο, και σε $FS = 5$ για το στενό θεμέλιο. Ο διπλασιασμός του φορτίου του ευρέος θεμελίου υποδιπλασιάζει τον συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα του ευρέος θεμελίου (ήτοι $FS = 4.8$) και διατηρεί σταθερό τον συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα του στενού θεμελίου, με αποτέλεσμα να προκύπτει πρακτικά ίδιος συντελεστής ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα και για τα δύο γειτονικά θεμέλια ($FS \approx 5$).

Σε μια προσπάθεια σύνοψης των αποτελεσμάτων όλου του Κεφαλαίου:

- i. Η τιμή του φορτίου στο οποίο συμβαίνει στατική αστοχία σε φέρουσα ικανότητα δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του γειτονικού θεμελίου, με το συμπέρασμα αυτό να αφορά τόσο το στενό όσο και το ευρύ θεμέλιο του ζεύγους (θεμελίων διαφορετικού εύρους). Όσον αφορά στις στατικές καθιζήσεις του στενού θεμελίου, προκύπτουν μικρότερες σε σχέση με τις καθιζήσεις του ίδιου θεμελίου όταν είναι μεμονωμένο, με την προαναφερθείσα μείωση να είναι εντονότερη όταν το γειτονικό θεμέλιο είναι ευρύ. Αντίθετα, οι στατικές καθιζήσεις του ευρέος θεμελίου δεν επηρεάζονται από

την ύπαρξη γειτονικού στενού θεμελίου. Γενικότερα, σημασία για τη στατική αλληλεπίδραση δείχνει να παίζει η πραγματική τιμή της απόστασης D μεταξύ των θεμελίων, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αλληλεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας στην περίπτωση της ενδιάμεσης απόστασης $D = 2.5m$ και απεμπλοκή για ενδιάμεση απόσταση $D \geq 10m$, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων (στο Κεφάλαιο 4).

- ii. Όσον αφορά στην αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου $q = 50kPa$, σε όρους καθιζήσεων προκύπτει ευεργετική αλληλεπίδραση (μείωση του λόγου z_{SSSI}/z), και για τα δύο θεμέλια. Η μείωση των καθιζήσεων του στενού θεμελίου είναι πολύ έντονη. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις καθιζήσεις του ευρέος θεμελίου, οι οποίες μειώνονται ελάχιστα σε σχέση με την απόκριση αναφοράς, και μόνο για πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ των δύο θεμελίων. Όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες στροφές, για το ευρύ θεμέλιο προκύπτουν πρακτικώς μηδενικές ανεξαρτήτως της ενδιάμεσης απόστασης των δύο θεμελίων. Το στενό θεμέλιο συγκλίνει προς το γειτονικό ευρύ για τις πολύ μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (εδώ $D/B_1 \leq 1$ ή $D \leq 5m$), αποκλίνει για μεγαλύτερες, και πρακτικώς δεν στρέφεται για κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D/B_1 \geq 4$ (ή $D \geq 20m$).
- iii. Για το στενό θεμέλιο, η ύπαρξη ενός γειτονικού θεμελίου ίδιου φορτίου αλλά ευρέος, αντί για ίδιου εύρους, οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z και σε πιο αποκλίνουσες δυναμικές στροφές. Ταυτόχρονα, το ευρύ θεμέλιο εμφανίζει πιο έντονη ευεργετική αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων όταν το γειτονικό θεμέλιο έχει ίδιο φορτίο και πλάτος, αντί για ίδιο φορτίο αλλά μικρότερο πλάτος. Η τελική δυναμική στροφή του ευρέος θεμελίου προκύπτει πρακτικά μηδενική, ανεξαρτήτως του πλάτους του γειτονικού θεμελίου.
- iv. Σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους, η δυναμική απόκριση του ευρέος θεμελίου δεν επηρεάζεται ουσιαδώς από την ύπαρξη ενός γειτονικού στενού. Ο λόγος είναι ότι το έδαφος που εκτοπίζει το ευρύ θεμέλιο καθώς αναπτύσσει σεισμικές καθιζήσεις, είναι πολύ περισσότερο σε όγκο και είναι στιβαρότερο, συγκριτικά με το αντίστοιχο έδαφος που τείνει να εκτοπιστεί από το στενό θεμέλιο ίδιου φορτίου. Ο μηχανισμός αυτός δεν υπήρχε στα δίδυμα θεμέλια, όπου η δυναμική αλληλεπίδραση ήταν αποκλειστικά το αποτέλεσμα του αναπτυσσόμενου τασικού πεδίου, λόγω επαλληλίας διατμητικών και κατακορύφων τάσεων. Έτσι, σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους, το στενό θεμέλιο «ακολουθεί» την απόκριση του μονού ευρέος θεμελίου, αναπτύσσοντας μικρότερες δυναμικές καθιζήσεις

συγκριτικά με το μεμονωμένο θεμέλιο εύρους $B=5\text{m}$, αλλά και συγκριτικά με τα δίδυμα στενά θεμέλια ίδιου φορτίου. Αντίθετα η απόκριση του ευρέος θεμελίου προσεγγίζει εκείνη του μεμονωμένου θεμελίου εύρους $B=20\text{m}$, ακόμα και στην περίπτωση κοινού φορτίου για τα δύο θεμέλια του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους.

- v. Αύξηση του φορτίου του ευρέος θεμελίου οδηγεί σε ευμενέστερη αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, αλλά σε μεγαλύτερες δυναμικές στροφές για το στενό θεμέλιο του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους. Αντίθετα, η ίδια αυτή αύξηση καθιστά την δυναμική απόκριση του ευρέος θεμελίου πρακτικά ταυτόσημη με εκείνη του θεμελίου αναφοράς.
- vi. Η αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους- ίδιου ή διαφορετικού φορτίου- πρακτικώς εξαλείφεται σε κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση $D = 4B_1 = 20\text{m}$, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και στην περίπτωση των δίδυμων στενών και ευρέων θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, ανεξάρτητα από την αντοχή της επιφανειακής αργιλικής κρούστας (στο Κεφάλαιο 4). Φαίνεται επομένως πως η ενδιάμεση απόσταση στην οποία παύει η δυναμική αλληλεπίδραση είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά (εύρος, φορτίο) των δύο θεμελίων, αλλά και την αντοχή της αργιλικής κρούστας έδρασης, παρά την επίδραση που έχουν οι παραπάνω παράμετροι στην δυναμική απόκριση των θεμελίων για μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις.

Κεφάλαιο 6

Δυναμική αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελίων

6.1 Γενικά

Το παρόν Κεφάλαιο στοχεύει στην αδρή ποσοτικοποίηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελιώσεων υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις αναπτυσσόμενες παραμένουσες μετακινήσεις των θεμελίων, και συγκεκριμένα στη σύγκριση των τελικών καθιζήσεων και στροφών των επιφανειακών θεμελίων σε σχέση με την απόκριση των θεμελίων αναφοράς, ήτοι των αντίστοιχων θεμελίων όταν είναι μεμονωμένα επί του ίδιου εδάφους και υπό την ίδια διέγερση. Σε όρους καθιζήσεων, αυτό επιτυγχάνεται μέσω του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z , που συγκρίνει τις καθιζήσεις κάθε θεμελίου z_{sssi} με την αντίστοιχη του ίδιου αν ήταν μεμονωμένο. Σε όρους στροφών, τα μεμονωμένα θεμέλια έχουν πρακτικώς μηδενική στροφή, με αποτέλεσμα η αλληλεπίδραση των θεμελίων να εκφράζεται μέσω της μη-μηδενικής παραμένουσας στροφής θ των θεμελίων όταν είναι σε ζεύγος.

Πρωταρχικός στόχος είναι να εκτιμηθούν οι σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν την αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και στροφών, το πώς αυτές επιδρούν στα μεγέθη ενδιαφέροντος, αλλά και η απόσταση για την οποία η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο γειτονικών θεμελίων εξαλείφεται. Απώτερος στόχος όλης αυτής της διαδικασίας είναι να γίνει εφικτή η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης σε όρους λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z και παραμένουσας στροφής θ , συναρτήσει των χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου και του γειτονικού θεμελίου, της μεταξύ τους ενδιάμεσης απόστασης και του εδάφους έδρασης.

Η διερεύνηση της απόκρισης επιφανειακών θεμελίων γίνεται μέσω συγκεντρωτικών γραφημάτων που συνοψίζουν την δυναμική αλληλεπίδραση των θεμελίων σε όρους λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z και παραμένουσας στροφής θ . Σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, έχει επιβληθεί η ίδια αρμονική διέγερση, μέγιστης επιτάχυνσης (βάσης) $a_{max}=0.2$ g. Το κάθε διάγραμμα που παρουσιάζεται αφορά θεμέλια δεδομένου

φορτίου $q=50,100$ και 200kPa και δεδομένο έδαφος έδρασης, το οποίο μπορεί να είναι είτε ομοιόμορφη άμμος πάχους 10m , είτε δίστρωτο έδαφος αποτελούμενο από ομοιόμορφη άμμο πάχους 8m και επιφανειακή αργιλική κρούστα πάχους 2m . Στην περίπτωση που υπάρχει αργιλική κρούστα, γίνεται επιπλέον διαχωρισμός των αποτελεσμάτων αναλόγως και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της, η οποία μπορεί να είναι ίση με $S_u=20$ ή 40kPa . Σε κάθε διάγραμμα που αφορά δεδομένο φορτίο θεμελίου και έδαφος έδρασης, η μεταβολή των μεγεθών ενδιαφέροντος (ήτοι του λόγου καθιζήσεων z_{SSI}/z και των στροφών θ) παρουσιάζεται συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , και των λόγων B/B_n και q/q_n , που συγκρίνουν το εύρος B και το φορτίο q του εξεταζόμενου θεμελίου, με το εύρος B_n και το φορτίο q_n του γειτονικού θεμελίου (όπου ο δείκτης n αναφέρεται στον «γείτονα» neighbor). Με αυτόν τον τρόπο συνοψίζεται η αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελίων συναρτήσει όλων των παραμέτρων διερεύνησης, για έδαφος με ή χωρίς επιφανειακή αργιλική κρούστα. Τονίζεται ότι προκειμένου να γίνει αυτό εφικτό, στα διαγράμματα που παρουσιάζονται έχουν συμπεριληφθεί και αποτελέσματα που έχουν αντληθεί από τη Διπλωματική Εργασία της Τσεπελίδου (2021). Συγκεκριμένα, από την Διπλωματική Εργασία της Τσεπελίδου (2021) έχει αντληθεί η πλειονότητα των αποτελεσμάτων που αφορούν σε επιφανειακά θεμέλια επί ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης άμμου. Εξάιρεση αποτελούν τα αποτελέσματα τριών (3) αναλύσεων, οι οποίες έγιναν στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, και αφορούν ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5\text{m}$ και $B_2=20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1 = 50\text{kPa}$ και $q_2 = 100\text{kPa}$) σε ενδιάμεσες αποστάσεις $D=2.5, 5.0$ και 10m .

6.2 Απόκριση σε όρους καθιζήσεων

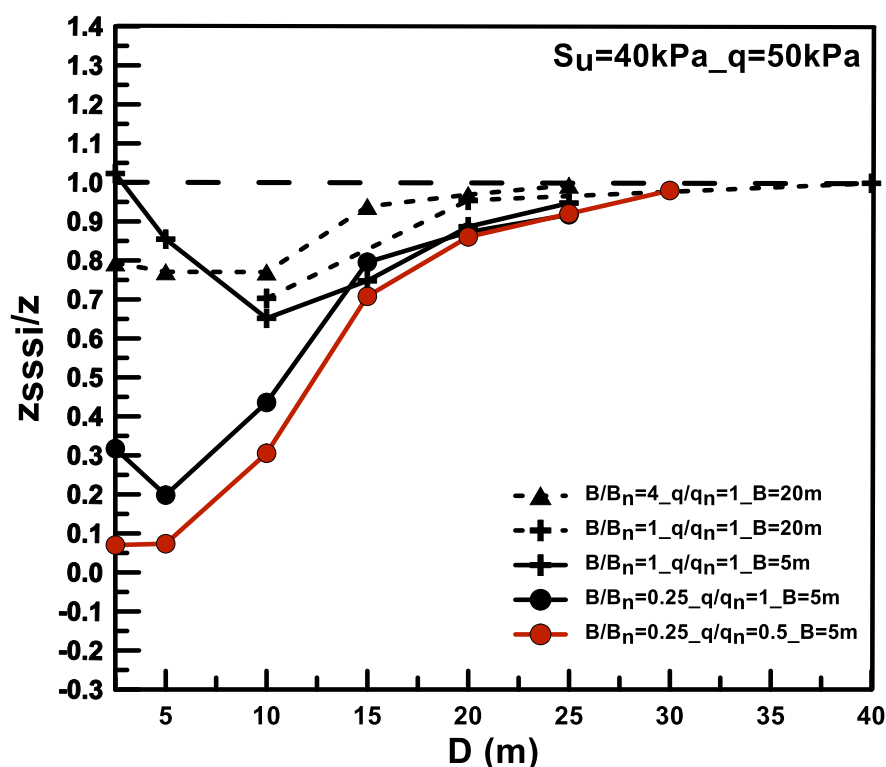
6.2.1 Γενικά

Στην συγκεκριμένη παράγραφο συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων σε όρους καθιζήσεων. Υπενθυμίζεται ότι η εκείνη εκφράζεται μέσω του λόγου καθιζήσεων z_{SSI}/z , ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί σε πρακτικές εφαρμογές ως διορθωτικός συντελεστής της καθιζήσης z που εκτιμάται από τις υπάρχουσες εμπειρικές μεθοδολογίες για μονά θεμέλια (π.χ. Karanimitros 2013b για εδάφη με επιφανειακή αργιλική κρούστα). Στα διαγράμματα που ακολουθούν, η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSI}/z παρουσιάζεται συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , για διαφορετικές τιμές των αδιάστατων λόγων B/B_n και q/q_n . Σημειώνεται πως καμπύλες διαφορετικού χρώματος αντιστοιχούν σε διαφορετικούς λόγους q/q_n και διαφορετικά σύμβολα σε διαφορετικούς λόγους B/B_n . Τέλος αναφέρεται ότι στα διαγράμματα παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν τόσο στενά όσο και ευρέα θεμέλια, με τα πρώτα ($B=5\text{m}$) να συμβολίζονται

χρησιμοποιώντας συνεχείς καμπύλες, ενώ αντίθετα τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στα θεμέλια εύρους $B=20\text{m}$ συμβολίζονται χρησιμοποιώντας διακεκομμένες καμπύλες.

6.2.2 Θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$

Ακολουθως, στο **Σχήμα 6.1** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, συναρτήσεως των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους (συνολικού πάχους $H=10\text{m}$) με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.



Σχήμα 6.1: Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z στενών και ευρέων θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ συναρτήσεως της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

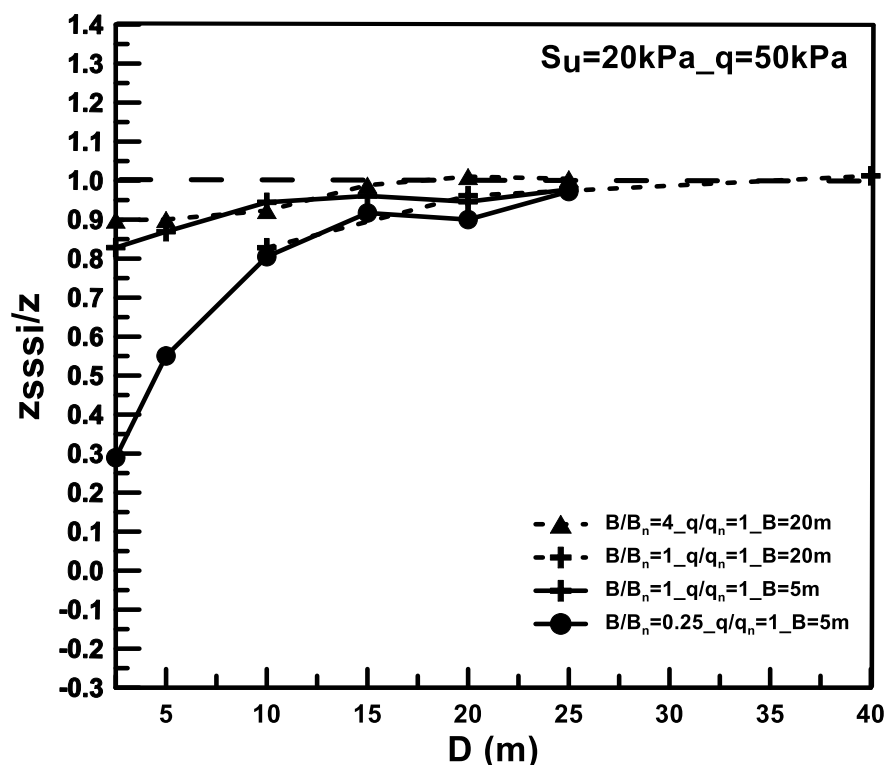
Για ενδιάμεσες αποστάσεις θεμελίων μικρότερες από $D=20\text{m}$, η τιμή του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z μπορεί να παρουσιάζει μεγάλη διασπορά, αναλόγως και της τιμής των παραμέτρων B , B/B_n και q/q_n , αλλά σε κάθε περίπτωση προκύπτει μόνο ευμενής αλληλεπίδραση, ήτοι λόγος $z_{sssi}/z < 1$. Με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των θεμελίων η αλληλεπίδραση φθίνει, και ανεξαρτήτως της τιμής των υπολοίπων παραμέτρων ενδιαφέροντος- σε ενδιάμεση απόσταση θεμελίων ίση με $D=20\text{m}$, πρακτικά εξαλείφεται (λόγος καθιζήσεων $0.85 < z_{sssi}/z < 1$). Πέραν της ενδιάμεσης απόστασης, σημαντική επίδραση στην αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων φαίνεται να έχει η μεταβολή της τιμής του λόγου B/B_n . Αύξηση του εύρους του γειτονικού θεμελίου, ήτοι μείωση του λόγου B/B_n , οδηγεί σε ευμενέστερη αλληλεπίδραση σε

όρους καθιζήσεων, με τα στενά θεμέλια να είναι τα πιο επιρρεπή στην παραπάνω μεταβολή και να παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z , όταν εκείνα βρίσκονται σε ζεύγος στενού-ευρέος θεμελίου. Αύξηση του φορτίου του γειτονικού ευρέος, δηλαδή μείωση του λόγου q/q_n , καθιστά ακόμα πιο ευμενή την απόκριση του στενού θεμελίου. Εντούτοις, για απομείωση του λόγου q/q_n , η παρατηρούμενη μεταβολή στην απόκριση του στενού θεμελίου δεν προκύπτει ιδιαίτερα έντονη, υποδεικνύοντας ότι η συγκεκριμένη παράμετρος δεν έχει τόσο καθοριστική σημασία στην αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσης, συγκριτικά με τις παραμέτρους D και B/B_n .

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.2** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, συναρτήσεως των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$, αλλά για αστράγγιστη διατμητική αντοχή της άργιλου ίση με $S_u=20\text{kPa}$, δηλαδή μικρότερη εκείνης στο **Σχήμα 6.1**. Επισημαίνεται εδώ οι τιμές της σεισμικής καθιζήσης z του μεμονωμένου θεμελίου όταν η επιφανειακή στρώση είναι μικρότερης αντοχής ($S_u = 20\text{kPa}$) είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με την περίπτωση όπου το ίδιο θεμέλιο βρίσκεται επί στρώσης μεγαλύτερης αντοχής ($S_u = 40\text{kPa}$). Σε κάθε περίπτωση όμως, στο **Σχήμα 6.2**, όπως και στο **Σχήμα 6.1**, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται και πάλι στον λόγο καθιζήσεων.

Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων προκύπτει συστηματικά ευμενής, όπως και στην περίπτωση θεμελίων ίδιου φορτίου επί στρώσης με διπλάσια αντοχή (βλ. **Σχήμα 6.1**),. Συν τοις άλλοις, από το **Σχήμα 6.2** γίνεται σαφές ότι προκύπτει ευμενέστερη αλληλεπίδραση, για μικρότερες τιμές του λόγου B/B_n , με τα στενά θεμέλια να είναι τα πιο επιρρεπή στην συγκεκριμένη μεταβολή. Εντούτοις, υπάρχει μια σημαντική διαφορά στην απόκριση των επιφανειακών θεμελίων, εξαιτίας της απομείωσης της αντοχής της επιφανειακής άργιλου. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι, για σταθερές τιμές των παραμέτρων B , B/B_n , q/q_n και D , ο λόγος καθιζήσεων είναι συστηματικά μεγαλύτερος (αλλά πάντα μικρότερος από 1.0) όταν η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της άργιλου είναι ίση με $S_u=20\text{kPa}$. Με άλλα λόγια, η απομείωση της αντοχής της επιφανειακής άργιλου, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους, φαίνεται να οδηγεί και σε απομείωση της αλληλεπίδρασης σε όρους καθιζήσεων. Άμεση συνέπεια αυτής της παρατήρησης είναι και η μικρότερη απαιτούμενη ενδιάμεση απόσταση μεταξύ δύο θεμελίων, προκειμένου να υπάρξει εξάλειψη της αλληλεπίδρασης σε όρους καθιζήσεων. Πιο αναλυτικά, η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων εξαλείφεται σε ενδιάμεση απόσταση $D=15\text{m}$ (λόγος καθιζήσεων $0.85 < z_{sssi}/z < 1$) όταν η αντοχή της άργιλου είναι ίση με $S_u=20\text{kPa}$, ενώ η

αντίστοιχη απόσταση είναι ίση με $D=20\text{m}$, στην περίπτωση αργιλικής κρούστας ίδιου πάχους αλλά διπλάσιας αντοχής (ήτοι $S_u=40\text{kPa}$).

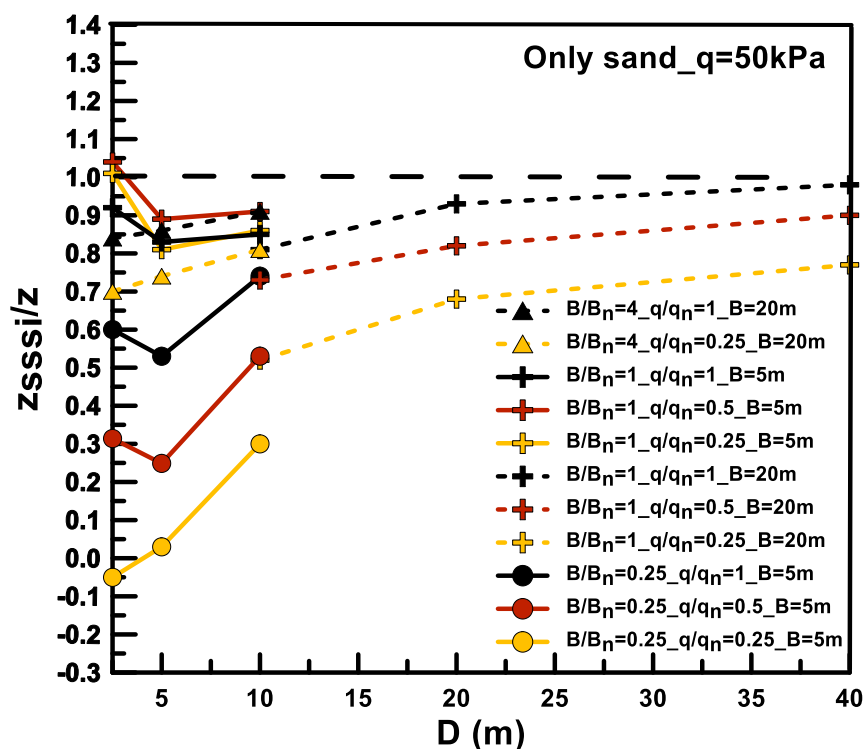


Σχήμα 6.2: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z στενών και ευρέων θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Ακολούθως, στο **Σχήμα 6.3**, παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων επί ομοιόμορφης αμμώδους στρώσης πάχους 10m . Δηλαδή στα δεδομένου αυτού του σχήματος, το έδαφος θεμελίωσης δεν είναι πιο δίστρωτο. Επισημαίνεται εδώ οι τιμές της σεισμικής καθιζήσης z του μεμονωμένου θεμελίου επί ομοιόμορφης αμμώδους στρώσης είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με την περίπτωση όπου το ίδιο θεμέλιο βρίσκεται επί δίστρωτου εδάφους με αργιλική κρούστα. Σε κάθε περίπτωση όμως, στο **Σχήμα 6.3**, όπως και στο **Σχήμα 6.1** και **Σχήμα 6.2**, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται και πάλι στον λόγο καθιζήσεων.

Συγκεκριμένα, σε συμφωνία με ό,τι παρατηρήθηκε για έδραση των θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ επί δίστρωτου εδάφους, η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων εξακολουθεί να είναι ευμενής, όταν η έδραση γίνεται απευθείας επί της ρευστοποιήσιμης άμμου. Η σημαντικότερη διαφορά σε σχέση με την περίπτωση δίστρωτου εδάφους είναι ότι εδώ, η απαιτούμενη ενδιάμεση απόσταση $D=20\text{m}$ δεν είναι επαρκής προκειμένου να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων. Μάλιστα, από τα αποτελέσματα που αφορούν ευρέα

θεμέλια, φαίνεται ότι χρειάζονται ενδιάμεσες αποστάσεις μεγαλύτερες από $D=40m$, προκειμένου να υπάρξει εξάλειψη της αλληλεπίδρασης των ευρέων θεμελίων. Όσον αφορά στην επίδραση του εύρους του γειτονικού θεμελίου, επιβεβαιώνεται η περαιτέρω μείωση του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z όσο μικραίνει ο λόγος B/B_n , ιδιαίτερα για το στενό θεμέλιο. Για παράδειγμα, στενό θεμέλιο με γειτονικό ευρύ τετραπλάσιου φορτίου ($B/B_n = 0.25$ και $q/q_n = 0.25$) μπορεί να εμφανίσει ανύψωση (δηλ. $z_{SSSI}/z < 0$), ενώ αντίθετα στενό θεμέλιο με γειτονικό ίδιου εύρους και τετραπλάσιου φορτίου ($B/B_n = 1$ και $q/q_n = 0.25$) εμφανίζει λόγους καθιζήσεων z_{SSSI}/z κοντά στην μονάδα.



Σχήμα 6.3: Λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z στενών και ευρέων θεμελίων φορτίου $q=50kPa$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη άμμο υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

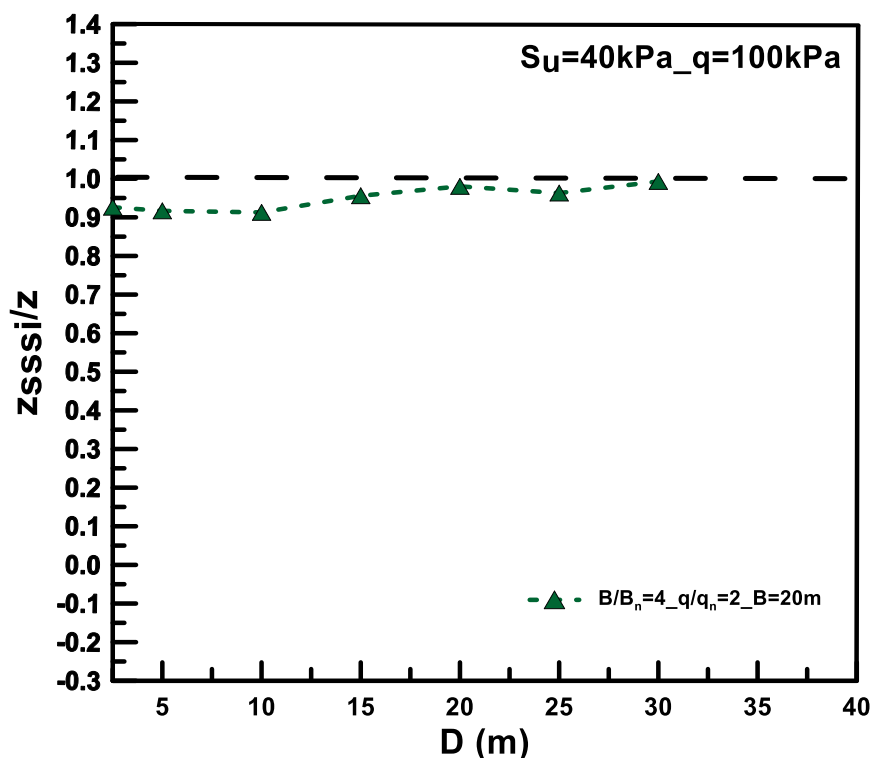
Σχετικά με την επίδραση της παραμέτρου q/q_n , αύξηση του φορτίου του γειτονικού θεμελίου επιδρά ευμενώς στην απόκριση των ευρέων θεμελίων (μειώνει τον λόγο καθιζήσεων). Εντούτοις, όσον αφορά στην απόκριση των στενών θεμελίων, το αποτέλεσμα της αύξησης του φορτίου του γειτονικού θεμελίου q_n , εξαρτάται και από το εύρος του γειτονικού θεμελίου B_n . Συγκεκριμένα, όταν το γειτονικό θεμέλιο είναι ίδιου εύρους, μείωση του λόγου q/q_n οδηγεί σε δυσμενέστερες τιμές του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z , ενώ το αντίθετο παρατηρείται εάν το γειτονικό θεμέλιο είναι ευρύ. Η διαφορά αυτή είναι σαφώς αιτιολογημένη. Αύξηση του φορτίου ενός γειτονικού στενού θεμελίου οδηγεί σε εντονότερη διάτμηση στο έδαφος ενδιάμεσα των δύο θεμελίων και απομείωση της σιβαρότητας στην

ίδια περιοχή. Αντίθετα, όταν το γειτονικό θεμέλιο είναι ευρύ, αύξηση του φορτίου q_n οδηγεί σε μεγαλύτερες καθιζήσεις για το ευρύ θεμέλιο, οι οποίες υλοποιούνται υπό γενικώς αστράγγιστες συνθήκες, με ταυτόχρονη διόγκωση του εδάφους πλευρικά. Όσο μεγαλύτερη είναι η καθίζηση του ευρέος θεμελίου, τόσο εντονότερη είναι η προαναφερθείσα διόγκωση, με αποτέλεσμα να αντισταθμίζεται η τάση για καθίζηση του γειτονικού στενού θεμελίου. Συγκριτικά πάντως, η μεταβολή του λόγου q/q_n φαίνεται να οδηγεί σε ηπιότερες μεταβολές στην αλληλεπίδραση θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, σε σχέση με την επίδραση που επιφέρει η μεταβολή του λόγου B/B_n , που δείχνει και πάλι ως συγκριτικά πιο σημαντική παράμετρος.

Όσον αφορά στην σύγκριση της απόκρισης θεμελίων για έδραση σε ομοιόμορφη άμμο και σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο, παρατηρείται ότι για σταθερές τιμές των παραμέτρων B , B/B_n , q/q_n και D , ο λόγος καθιζήσεων είναι συστηματικά μικρότερος όταν υπάρχει επιφανειακή αργλική κρούστα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$. Αντίθετα, η αντίστοιχη σύγκριση της απόκρισης σε ομοιόμορφη άμμο ή με επιφανειακή άργιλο αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ δεν οδηγεί σε κάποιο συστηματικό συμπέρασμα ως προς το εδαφικό προφίλ για το οποίο προκύπτει η ευμενέστερη αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων.

6.2.3 Θεμέλια φορτίου $q=100\text{kPa}$

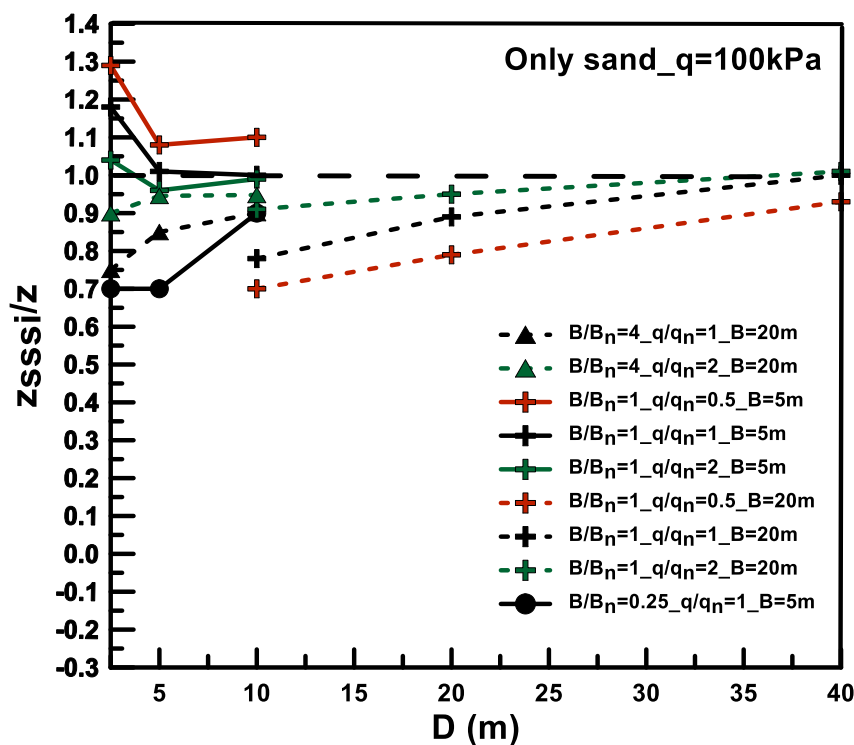
Για θεμέλια με φορτίο $q = 100\text{kPa}$ δεν εκτελέστηκαν εξίσου πολλές αριθμητικές αναλύσεις, αλλά μόνο στοχευμένες. Ο λόγος είναι ότι δεν είναι τόσο συχνά που εμφανίζονται θεμέλια με τέτοια φορτία, ειδικά σε εδάφη με επιφανειακή αργλική κρούστα που απομειώνει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα (βλέπε Κεφάλαια 4 και 5). Έτσι, στο **Σχήμα 6.4** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση επί δίστρωτου εδάφους (συνολικού πάχους $H=10\text{m}$) με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$. Επισημαίνεται εδώ ότι στο **Σχήμα 6.4** η διερεύνηση γίνεται σε όρους λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z (όπως και στο **Σχήμα 6.1**), αλλά ο παρονομαστής του λόγου (ήτοι η καθίζηση z του μεμονωμένου θεμελίου) είναι μεγαλύτερος για $q = 100\text{kPa}$ συγκριτικά με ό,τι προκύπτει για $q = 50\text{kPa}$.



Σχήμα 6.4: Λόγος καθιζήσεων z_{SSI}/z στενών και ευρέων θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Καθώς η περίπτωση που εξετάστηκε αντιστοιχεί σε μία μόνο τιμή των παραμέτρων B , B/B_n και q/q_n , το μοναδικό συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω σχήμα είναι ότι η αλληλεπίδραση ενός ευρέος θεμελίου φορτίου $q=100\text{kPa}$ είναι ελαφρώς ευμενής (και πρακτικά μη σημαντική), όταν εκείνο εδράζεται επί δίστρωτου εδαφικού προφίλ, με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.

Παρακάτω, στο **Σχήμα 6.5** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSI}/z θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , αλλά για έδραση των θεμελίων επί ομοιόμορφης αμμώδους στρώσης, πάχους 10m . Όπως πάντα, στο **Σχήμα 6.5** διερεύνηση γίνεται σε όρους λόγου καθιζήσεων z_{SSI}/z (όπως και στο **Σχήμα 6.3**), αλλά ο παρονομαστής του λόγου (ήτοι η καθίζηση z του μεμονωμένου θεμελίου) είναι μεγαλύτερος για $q = 100\text{kPa}$ συγκριτικά με ό,τι προκύπτει για $q = 50\text{kPa}$.



Σχήμα 6.5: Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z στενών και ευρέων θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη άμμο υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Σε αντίθεση με ό,τι παρατηρήθηκε για την αλληλεπίδραση θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, τα θεμέλια φορτίου $q=100\text{kPa}$ μπορούν να αναπτύξουν και δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων ($z_{sssi}/z > 1$), αλλά μόνο για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ($D \leq 10\text{m}$) και μόνο εάν πρόκειται για στενό θεμέλιο με γειτονικό ίδιου εύρους. Όσον αφορά στην ενδιάμεση απόσταση για την οποία εξαλείφεται η αλληλεπίδραση, εξακολουθεί να ισχύει η παρατήρηση ότι για έδραση σε ομοιόμορφη άμμο, αυτή προκύπτει μεγαλύτερη από $D = 20\text{m}$ (όπως και για $q = 50\text{kPa}$). Πάντως, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, ενδιάμεσες αποστάσεις $D = 40\text{m}$ φαίνεται να είναι επαρκείς ώστε να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, για τα θεμέλια φορτίου $q=100\text{kPa}$. Εντούτοις, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι αυτό εξακολουθεί να ισχύει και για μεγαλύτερα φορτία έδρασης του γειτονικού θεμελίου (π.χ. για $q/q_n = 0.25$), αν και τέτοια φορτία είναι μικρού πρακτικού ενδιαφέροντος. Σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων q/q_n και B/B_n , ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις που διατυπώθηκαν για την αλληλεπίδραση θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ και έδραση σε ομοιόμορφη άμμο. Υπενθυμίζεται ότι για τα θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$ επί ομοιόμορφης άμμου, είχε διαπιστωθεί η σπουδαιότητα της παραμέτρου B/B_n και η ευμενής μεταβολή της απόκρισης ενός θεμελίου, για αύξηση του εύρους του γειτονικού θεμελίου B_n . Όσον αφορά στην επίδραση της παραμέτρου q/q_n , είχε παρατηρηθεί ότι αύξηση του φορτίου

του γειτονικού θεμελίου επιδρά ευμενώς στην απόκριση των ευρέων θεμελίων, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στα στενά θεμέλια με γειτονικό ίδιου εύρους. Οι παρατηρήσεις αυτές επαληθεύονται και για την αλληλεπίδραση θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$.

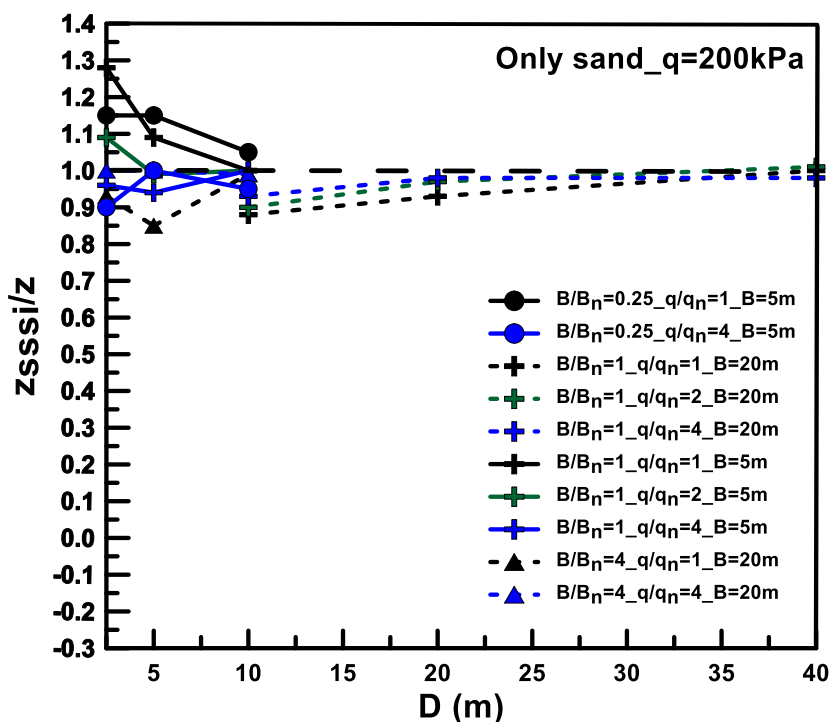
Τέλος, συγκρίνοντας την μεταβολή του λόγου καθιζήσεων θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$ για έδραση σε ομοιόμορφη άμμο, με την αντίστοιχη μεταβολή του λόγου καθιζήσεων θεμελίων υποδιπλάσιου φορτίου (βλ. **Σχήμα 6.3**), παρατηρείται ότι αύξηση του φορτίου q ενός ευρέος θεμελίου διατηρώντας όμως σταθερές τις παραμέτρους B/B_n , q/q_n και D , δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την απόκριση του θεμελίου, καθώς οι τιμές του λόγου z_{SSSI}/z προκύπτουν πρακτικά ίδιες, για τις δύο περιπτώσεις. Εντούτοις, η αύξηση του φορτίου ενός στενού θεμελίου από $q = 50\text{kPa}$ σε $q = 100\text{kPa}$, διατηρώντας και πάλι σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους B/B_n , q/q_n και D , μεταβάλλει σημαντικά την απόκριση του, καθιστώντας την απόκριση του δυσμενέστερη, ήτοι οδηγώντας σε αύξηση του λόγου z_{SSSI}/z .

6.2.4 Θεμέλια φορτίου $q=200\text{kPa}$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.6** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z θεμελίων φορτίου $q=200\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων επί ομοιόμορφης αμμώδους στρώσης, πάχους 10m . Λόγω της πολύ μεγάλης τιμής του φορτίου q , έγιναν αναλύσεις μόνο για έδραση σε ομοιόμορφη άμμο, καθώς η ύπαρξη επιφανειακής αργιλικής κρούστας μειώνει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα. Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα σε όρους λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z , υπογραμμίζεται ότι οι τιμές καθιζήσεων z του μεμονωμένου θεμελίου με φορτίο $q = 200\text{kPa}$ είναι μεγαλύτερες (π.χ. κατά $1.2 - 1.3$ φορές) από εκείνες για $q = 100\text{kPa}$ και ακόμη μεγαλύτερες από εκείνες με φορτίο $q = 50\text{kPa}$ (π.χ. κατά $1.4 - 1.9$ φορές) επί του ίδιου πάντα εδαφικού προφίλ.

Συγκεκριμένα, κατ' αναλογία με την περίπτωση θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$ επί του ίδιου εδάφους έδρασης (βλ. **Σχήμα 6.5**), τα θεμέλια φορτίου $q=200\text{kPa}$ μπορούν να αναπτύξουν και δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, αλλά μόνο για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ($D \leq 10\text{m}$) και μόνο εάν πρόκειται για στενό θεμέλιο (βλ. **Σχήμα 6.6**). Η διαφορά μεταξύ της απόκρισης στενών θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$ και $q=200\text{kPa}$ για έδραση σε ομοιόμορφη άμμο είναι ότι τα στενά θεμέλια φορτίου $q=200\text{kPa}$ μπορεί να αναπτύξουν δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων ακόμα και όταν βρίσκονται σε ζεύγος στενού-ευρέος θεμελίου. Όσον αφορά στην ενδιάμεση απόσταση D που παρατηρείται εξάλειψη της αλληλεπίδρασης σε όρους καθιζήσεων, εκείνη φαίνεται να είναι ίση με $D=10\text{m}$, τουλάχιστον για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται. Ωστόσο τονίζεται ότι οι αναλύσεις που έγιναν αφορούν μόνο περιπτώσεις που το γειτονικό θεμέλιο είναι ίσου ή μικρότερου φορτίου (q/q_n

≥ 1), με αποτέλεσμα το παραπάνω συμπέρασμα να μην μπορεί να γενικευτεί για όλες τις περιπτώσεις θεμελίων φορτίου $q=200\text{kPa}$ επί ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης άμμου.



Σχήμα 6.6: Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z στενών και ευρέων θεμελίων φορτίου $q=200\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη άμμο υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{max}=0.2g$.

Σχετικά με την επίδραση του φορτίου του γειτονικού θεμελίου q_n , αύξηση της τιμής του φαίνεται να επιδρά θετικά στην αλληλεπίδραση ευρέων θεμελίων φορτίου $q=200\text{kPa}$, κατ' αναλογία με ό,τι παρατηρήθηκε στα ευρέα θεμέλια φορτίου $q=50-100\text{kPa}$ εδραζόμενα επί του ίδιου εδαφικού προφίλ. Αντίθετα, τα στενά θεμέλια φορτίου $q=200\text{kPa}$ επιβάλλουν πολύ μεγάλη προσαύξηση των διατμητικών τάσεων του εδάφους, με αποτέλεσμα η αύξηση του φορτίου του γειτονικού θεμελίου να οδηγεί σε δυσμενέστερη αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ακόμα και όταν το γειτονικό θεμέλιο είναι ευρύ.

Τέλος, συγκρίνοντας την μεταβολή του λόγου καθιζήσεων θεμελίων φορτίου $q=200\text{kPa}$ για έδραση σε ομοιόμορφη άμμο, με την αντίστοιχη μεταβολή του λόγου καθιζήσεων θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$ (βλ. **Σχήμα 6.5**), παρατηρείται ότι αύξηση του φορτίου q ενός ευρέος θεμελίου, διατηρώντας όμως σταθερές τις παραμέτρους B/B_n , q/q_n και D , δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την απόκριση του θεμελίου, ενώ αντιθέτως καθιστά την απόκριση του στενού θεμελίου δυσμενέστερη, κατ' αναλογία με ό,τι παρατηρήθηκε από την σύγκριση της απόκρισης θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ και $q=100\text{kPa}$ εδραζόμενα επί ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης άμμου.

6.3 Απόκριση σε όρους στροφών

6.3.1 Γενικά

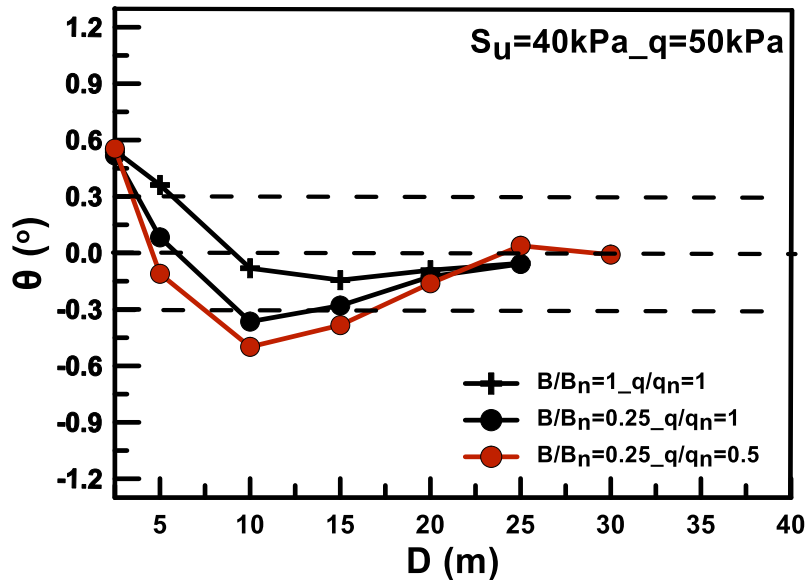
Στην συγκεκριμένη παράγραφο συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων σε όρους στροφών. Η αλληλεπίδραση αυτή εκφράζεται μέσω της πραγματικής τιμής της στροφής των θεμελίων θ , καθώς η τιμή της είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη μηδενική παραμένουσα στροφή των απομονωμένων θεμελίων. Κατ' αναλογία με τα διαγράμματα μεταβολής του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D και των λόγων B/B_n και q/q_n , στα διαγράμματα που συνοψίζουν τη δυναμική απόκριση επιφανειακών θεμελίων σε όρους παραμένουσας στροφής, καμπύλες διαφορετικού χρώματος αντιστοιχούν σε διαφορετικούς λόγους q/q_n και διαφορετικά σύμβολα σε διαφορετικούς λόγους B/B_n . Υπενθυμίζεται ότι $\theta > 0$ υπονοεί συγκλίνουσα στροφή (δηλ. το θεμέλιο στρίβει προς το γειτονικό του), ενώ $\theta < 0$ δείχνει αποκλίνουσα στροφή. Τέλος, τονίζεται ότι η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας αλλά και στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας της Τσεπελίδου (2021), υπέδειξε ότι τα ευρέα θεμέλια έχουν μηδενικές παραμένουσες στροφές θ , ανεξαρτήτως από το έδαφος έδρασης, την ύπαρξη γειτονικού θεμελίου αλλά και την απόσταση στην οποία εκείνο βρίσκεται. Γίνεται επομένως εμφανές πως ενδιαφέρει μόνο η μελέτη των αναπτυσσόμενων στροφών των στενών θεμελίων, η οποία γίνεται μέσω των διαγραμμάτων που ακολουθούν. Τονίζεται πως ο συμβολισμός που αφορά στα αποτελέσματα για στενά θεμέλια διατηρείται κοινός με εκείνον που χρησιμοποιήθηκε για τα διαγράμματα της παραγράφου 6.2, ήτοι χρησιμοποιούνται συνεχείς καμπύλες για τη παρουσίαση της μεταβολής της στροφής θεμελίων εύρους $B=5\text{m}$.

6.3.2 Θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$

Ακολούθως, στο **Σχήμα 6.7** παρουσιάζεται η μεταβολή της παραμένουσας στροφής θ στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους (συνολικού πάχους $H=10\text{m}$) με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η στροφή των στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ μπορεί να προκύψει είτε συγκλίνουσα είτε αποκλίνουσα, αλλά σε κάθε περίπτωση κυμαίνεται μεταξύ του εύρους $\pm 0.6^\circ$. Για πολύ μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (π.χ. $D=2.5\text{m}$) προκύπτουν μόνο συγκλίνουσες ουσιαστικές στροφές, ενώ το αντίθετο παρατηρείται για αποστάσεις $D \geq 10\text{m}$. Το δεύτερο σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι για ενδιάμεση απόσταση $D=20\text{m}$, η αλληλεπίδραση σε όρους στροφής εξαλείφεται, ανεξάρτητα από τις τιμές των παραμέτρων

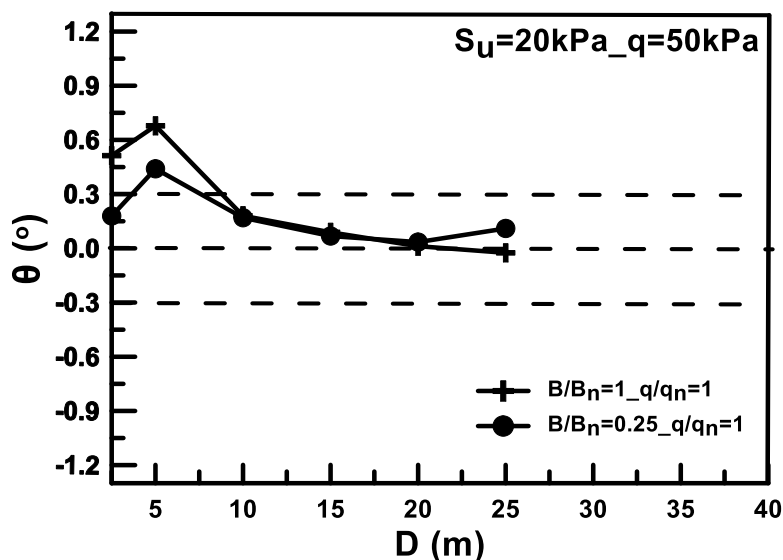
B/B_n και q/q_n . Υπενθυμίζεται ότι ενδιάμεσες αποστάσεις $D=20\text{m}$ ήταν επαρκείς προκειμένου να μην υπάρχει αλληλεπίδραση ούτε σε όρους καθιζήσεων, για τα ίδια θεμέλια και επί του ίδιου εδάφους έδρασης (βλ. Παράγραφο 6.2.1). Πέραν αυτών, παρατηρείται μια τάση του στενού θεμελίου να αναπτύσσει περισσότερο αποκλίνουσες στροφές, με την αύξηση του εύρους του γειτονικού θεμελίου (δηλ. για μείωση του λόγου B/B_n).



Σχήμα 6.7: Στροφή θ στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=40\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

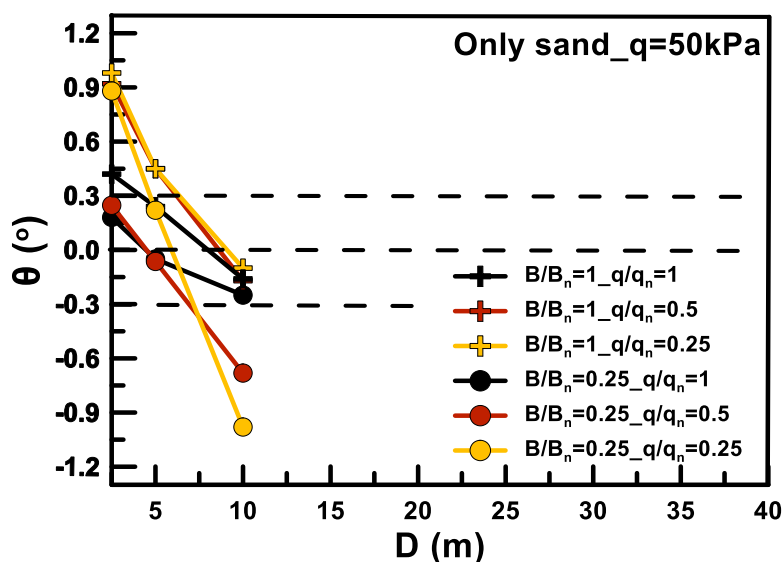
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.8** παρουσιάζεται η μεταβολή της παραμένουσας στροφής θ στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους (συνολικού πάχους $H=10\text{m}$) με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$, αλλά υποδιπλάσιας αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, ήτοι $S_u=20\text{kPa}$.

Σε αυτή την περίπτωση, η στροφή των στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ προκύπτει αποκλειστικά συγκλίνουσα, και κυμαίνεται μεταξύ του εύρους 0° έως 0.7° . Για ενδιάμεση απόσταση $D=10\text{m}$, η αλληλεπίδραση σε όρους στροφής έχει εξαλειφθεί, ανεξάρτητα από τις τιμές των παραμέτρων B/B_n και q/q_n . Πάντως κατ' αναλογία με ό,τι παρατηρήθηκε στην αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου φορτίου, αλλά για διπλάσια αντοχή της επιφανειακής αργίλου, η στροφή του στενού θεμελίου τείνει να γίνει αποκλίνουσα με την αύξηση του εύρους του γειτονικού θεμελίου.



Σχήμα 6.8: Στροφή θ στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20\text{kPa}$), υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Προκειμένου να διερευνηθεί εάν υπάρχει μεταβολή της δυναμικής αλληλεπίδρασης των στενών θεμελίων σε όρους στροφής για έδραση των θεμελίων απευθείας επί του ρευστοποιήσιμου εδάφους, στο **Σχήμα 6.9** παρουσιάζεται η παραμένουσα στροφή θ στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , όταν εκείνα εδράζονται σε ομοιόμορφη άμμο πάχους 10m .



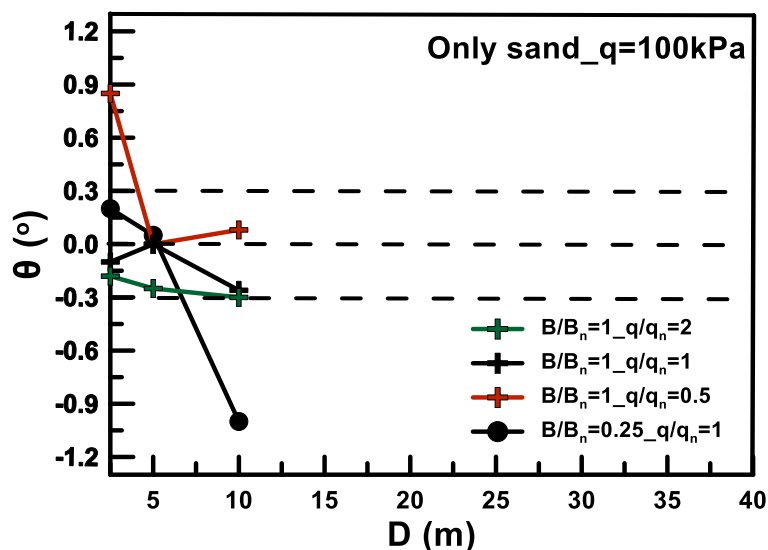
Σχήμα 6.9: Στροφή θ στενών θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη άμμο υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Σε αυτή την περίπτωση, οι στροφές των στενών θεμελίων κυμαίνονται μεταξύ του εύρους $\pm 1.0^\circ$, μεγαλύτερες δηλαδή (κατ' απόλυτη τιμή) από τις στροφές στενών θεμελίων φορτίου

$q=50\text{kPa}$, αλλά για έδραση επί δίστρωτου εδάφους. Όσον αφορά στο πρόσημο της στροφής, συγκλίνουσες ουσιώδεις στροφές παρατηρούνται σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (π.χ. $D=2.5\text{m}$), ενώ ουσιώδεις στροφές κατά του γειτονικού θεμελίου προκύπτουν μόνο για ενδιάμεσες αποστάσεις $D \geq 10\text{m}$. Η δεύτερη σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από το **Σχήμα 6.9** είναι ότι ενδιάμεσες αποστάσεις θεμελίων $D=10\text{m}$ δεν είναι επαρκείς ώστε να προκύψει εξάλειψη της αλληλεπίδρασης σε όρους στροφών. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι για ενδιάμεση απόσταση $D=10\text{m}$ προκύπτουν αποκλίνουσες στροφές έως και 1.0° (κατ' απόλυτη τιμή), ενδεχομένως να χρειαστούν αποστάσεις μεγαλύτερες από $D=20\text{m}$, προκειμένου αυτό να γίνει εφικτό. Σχετικά με την επίδραση του λόγου B/B_n , αύξηση του εύρους του γειτονικού θεμελίου, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους (q/q_n και D) φαίνεται να οδηγεί σε πιο αποκλίνουσα στροφή για το στενό θεμέλιο, κατ' αναλογία με ότι παρατηρήθηκε για τα θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$ επί δίστρωτου εδάφους με επιφανειακή άργιλο αντοχής $S_u=20\text{-}40\text{kPa}$.

6.3.3 Θεμέλια φορτίου $q=100\text{kPa}$

Ακολούθως, στο **Σχήμα 6.10** παρουσιάζεται η μεταβολή της παραμένουσας στροφής θ στενών θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων απευθείας επί ρευστοποιήσιμης άμμου πάχους 10m .



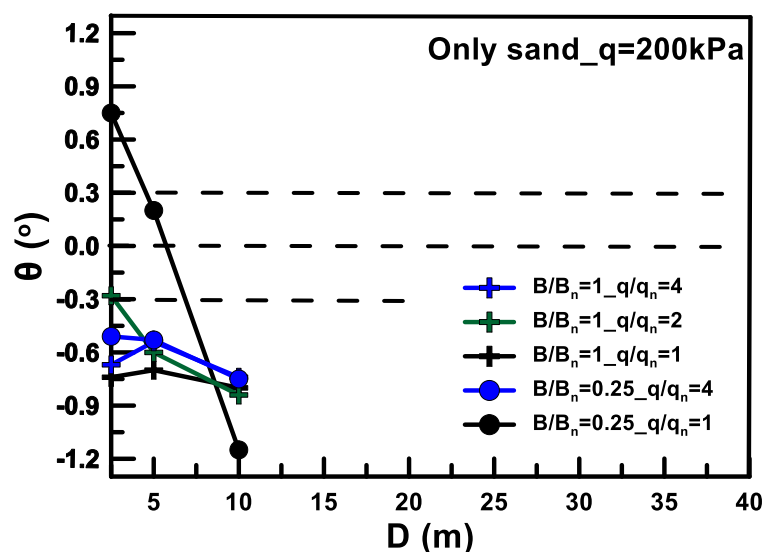
Σχήμα 6.10: Στροφή θ στενών θεμελίων φορτίου $q=100\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη άμμο υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Βάσει του παραπάνω σχήματος, παρατηρείται ότι οι τιμές της στροφής κυμαίνονται από 0.9° έως -1.0° , όσο περίπου ήταν και το αντίστοιχο εύρος για έδραση στενών θεμελίων επί ομοιόμορφης άμμου, αλλά για φορτίο θεμελίων ίσο με $q=50\text{kPa}$. Σε πλήρη συμφωνία με ό,τι

παρατηρήθηκε για θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$ εδραζόμενα επί ρευστοποιήσιμου εδάφους με ή χωρίς επιφανειακή άργιλο, συγκλίνουσες ουσιώδεις στροφές παρατηρούνται σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (π.χ. $D=2.5\text{m}$), ενώ αντίθετο πρόσημο στροφών προκύπτει για ενδιάμεσες αποστάσεις $D \geq 10\text{m}$. Συν τοις άλλοις, όπως και στην περίπτωση θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ επί ομοιόμορφης αμμώδους στρώσης, εξακολουθεί να ισχύει ότι ενδιάμεσες αποστάσεις $D=10\text{m}$ δεν είναι αρκετές προκειμένου να υπάρξει εξάλειψη της αλληλεπίδρασης σε όρους στροφών.

6.3.4 Θεμέλια φορτίου $q=200\text{kPa}$

Η μεταβολή της παραμένουσας στροφής θ στενών θεμελίων φορτίου $q=200\text{kPa}$, συναρτήσει των παραμέτρων D , B/B_n και q/q_n , για έδραση των θεμελίων επί ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης άμμου παρουσιάζεται στο ακόλουθο **Σχήμα 6.11**.



Σχήμα 6.11: Στροφή θ στενών θεμελίων φορτίου $q=200\text{kPa}$ συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D , του φορτίου q_n και του εύρους B_n του γειτονικού θεμελίου. Έδραση σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη άμμο υπό μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης $a_{\max}=0.2g$.

Το εύρος τιμών αυτών των αποτελεσμάτων κυμαίνεται από 0.75° έως -1.2° . Οι μεγαλύτερες (κατ' απόλυτη τιμή) στροφές, συγκριτικά με την περίπτωση θεμελίων επί ομοιόμορφης άμμου, αλλά υποδιπλάσιου φορτίου (δηλ. $q=100\text{kPa}$), υπονοεί ότι αύξηση του φορτίου του θεμελίου, ενδεχομένως να οδηγεί σε τάση για εντονότερη στροφή του θεμελίου. Όσον αφορά στην ενδιάμεση απόσταση για την οποία δεν υπάρχει πλέον αλληλεπίδραση, θα χρειαστεί να γίνουν αναλύσεις για μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις θεμελίων, προκειμένου να γίνει εφικτός ο προσδιορισμός της. Το βέβαιο συμπέρασμα είναι ότι αποστάσεις $D=10\text{m}$ δεν είναι επαρκείς προκειμένου να υπάρξει εξάλειψη της αλληλεπίδρασης σε όρους στροφής, ενώ υπενθυμίζεται ότι η παρατήρηση αυτή

επαληθεύεται ανεξάρτητα από το φορτίο του εξεταζόμενου θεμελίου, όταν τα γειτονικά θεμέλια εδράζονται απευθείας επί ρευστοποιήσιμης άμμου.

6.4 Σύνοψη δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων

Στο παρόν Κεφάλαιο συνοψίστηκαν τα χαρακτηριστικά δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων υπό καθεστώς ρευστοποίησης. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στις αναπτυσσόμενες παραμένουσες μετακινήσεις (καθιζήσεις και στροφές) των θεμελίων και το πώς αυτές συγκρίνονται με την αντίστοιχη απόκριση των αντίστοιχων μεμονωμένων θεμελίων. Σε όρους καθιζήσεων η σύγκριση γίνεται μέσω του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z , ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως διορθωτικός συντελεστής της καθιζήσης z που εκτιμάται από τις υπάρχουσες εμπειρικές μεθοδολογίες για μεμονωμένα θεμέλια (π.χ. Karamitros 2013b για δίστρωτο έδαφος με αργιλική κρούστα). Σε όρους στροφών, ενδιαφέρει η πραγματική στροφή θ των θεμελίων, δεδομένου ότι η στροφή των μεμονωμένων θεμελίων είναι πρακτικά μηδενική.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στο παρόν Κεφάλαιο μέσω συγκεντρωτικών διαγραμμάτων, που απεικονίζουν την μεταβολή των μεγεθών ενδιαφέροντος (ήτοι του λόγου καθιζήσεων z_{sssi}/z και των στροφών θ) συναρτήσει της ενδιάμεσης απόστασης D και των λόγων B/B_n και q/q_n , που συγκρίνουν το εύρος B και το φορτίο q του εξεταζόμενου θεμελίου, με το εύρος B_n και το φορτίο q_n του γειτονικού (neighboring) θεμελίου, για δεδομένο έδαφος έδρασης (με ή χωρίς επιφανειακή αργιλική κρούστα) και φορτίο των θεμελίων ($q=50-200\text{kPa}$). Με αυτόν τον τρόπο κατέστη εφικτή η μελέτη της δυναμικής αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων συναρτήσει όλων των παραμέτρων διερεύνησης, δηλαδή των χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου (B, q) και του γειτονικού θεμελίου (B_n, q_n), της ενδιάμεσης απόστασης D αλλά και της στρωματογραφίας του εδάφους έδρασης. Σε όλες τις περιπτώσεις, η διερεύνηση έγινε με αρμονική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση στη βάση του εδάφους θεμελίωσης ίση $a_{\max}=0.2g$. Διερεύνηση της επίδρασης της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} δεν δίνει ποιοτικά διαφορετική απόκριση, αλλά η ποσοτική της επίδραση κρίνεται μη-συστηματική, τουλάχιστον για έδραση σε ομοιόμορφη αμμώδη στρώση (Τσεπελίδου 2021).

Σε μια προσπάθεια σύνοψης των αποτελεσμάτων όλου του Κεφαλαίου:

(α) Σε όρους καθιζήσεων:

- i. Η αλληλεπίδραση (στενών και ευρέων) θεμελίων φορτίου $q = 50\text{kPa}$ είναι ευμενής, ανεξάρτητα από το εάν εκείνα εδράζονται σε έδαφος με επιφανειακή αργιλική κρούστα ($H_c=2\text{m}$ και $S_u=20-40\text{kPa}$) ή απευθείας επί της ρευστοποιήσιμης άμμου.

Αντίθετα, θεμέλια φορτίου $q \geq 100\text{kPa}$ επί ομοιόμορφης άμμου, ενδέχεται να εμφανίσουν και δυσμενή αλληλεπίδραση, αλλά μόνο για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (π.χ. $D \leq 10\text{m}$) και μόνο εάν είναι στενά. Στην συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων, το γειτονικό θεμέλιο πρέπει να είναι επίσης στενό, προκειμένου να παρατηρηθεί δυσμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης.

- ii. Για θεμέλια φορτίου $q=50-100\text{kPa}$ εδραζόμενα επί δίστρωτου εδάφους (ανεξάρτητα της αντοχής της αργιλικής κρούστας), ενδιάμεσες αποστάσεις $D=20\text{m}$ είναι επαρκείς προκειμένου να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων. Αντίθετα, απαιτούνται μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις προκειμένου να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση για θεμέλια φορτίου $q=50-100\text{kPa}$ που εδράζονται απευθείας επί της ρευστοποιήσιμης άμμου.
- iii. Η τιμή της παραμέτρου B/B_n επιδρά σημαντικά στην αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, με την αύξηση του εύρους του γειτονικού θεμελίου B_n να συνεπάγεται ευμενέστερη αλληλεπίδραση για το θεμέλιο εύρους B . Τα στενά θεμέλια είναι πιο επιρρεπή στην παραπάνω μεταβολή και εμφανίζουν πολύ ευμενή αλληλεπίδραση (ενδεχομένως έως και ανύψωση) όταν εκείνα βρίσκονται σε γειτονιά ευρέος θεμελίου.
- iv. Γενικά η τιμή της παραμέτρου q/q_n επιδρά στην απόκριση των θεμελίων σε όρους καθιζήσεων, αλλά η σπουδαιότητα αυτής της παραμέτρου δεν είναι τόσο σημαντική, συγκριτικά με την αντίστοιχη επίδραση των παραμέτρων D και B/B_n . Αύξηση του φορτίου του γειτονικού θεμελίου q_n οδηγεί σε ευμενέστερη αλληλεπίδραση για ένα ευρύ θεμέλιο. Εντούτοις, όσον αφορά στην απόκριση των στενών θεμελίων, το αποτέλεσμα της αύξησης του φορτίου του γειτονικού θεμελίου q_n , εξαρτάται και από το εύρος του γειτονικού θεμελίου B_n . Συγκεκριμένα, όταν το γειτονικό θεμέλιο είναι ίδιου εύρους, μείωση του λόγου q/q_n οδηγεί σε δυσμενέστερες τιμές του λόγου καθιζήσεων z_{SSI}/z , ενώ το αντίθετο παρατηρείται εάν το γειτονικό θεμέλιο είναι ευρύ.
- v. Αύξηση του φορτίου του εξεταζόμενου θεμελίου q , διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους D , q/q_n και B/B_n οδηγεί σε δυσμενέστερες τιμές του λόγου z_{SSI}/z (αλγεβρικά μεγαλύτερες), εάν το εξεταζόμενο θεμέλιο είναι στενό. Αντίθετα, η αντίστοιχη μεταβολή του φορτίου ενός ευρέος θεμελίου, διατηρώντας και πάλι σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους D , q/q_n και B/B_n δεν μεταβάλλει σημαντικά την απόκριση του θεμελίου.

- vi. Η σύγκριση της απόκρισης θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$ για έδραση σε δίστρωτο έδαφος με επιφανειακή άργιλο αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ και $S_u=40\text{kPa}$, υποδεικνύει ότι απομείωση της αντοχής της επιφανειακής αργίλου οδηγεί σε απομείωση της αλληλεπίδρασης σε όρους καθιζήσεων, αυξάνοντας αλγεβρικά τον λόγο καθιζήσεων προς την μονάδα. Η αντίστοιχη σύγκριση της απόκρισης θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, για έδραση επί ομοιόμορφης άμμου ή επί δίστρωτου εδάφους δεν οδήγησε σε κάποιο συστηματικό συμπέρασμα ως προς το εδαφικό προφίλ για το οποίο προκύπτει η ευμενέστερη αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αύξηση του λόγου καθιζήσεων προς την μονάδα (δηλ. απομείωση της αλληλεπίδρασης σε όρους καθιζήσεων) για έδραση των θεμελίων σε ομοιόμορφη άμμο, αντί επί επιφανειακής αργίλου αντοχής $S_u=40\text{kPa}$, αλλά όταν η έδραση των θεμελίων γίνεται σε επιφανειακή άργιλο αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ προκύπτουν τόσο μικρότερες όσο και μεγαλύτερες τιμές του λόγου καθιζήσεων, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο λόγο καθιζήσεων αλλά για θεμέλια επί ομοιόμορφου εδάφους.

(β) Σε όρους στροφών:

- i. Τα ευρέα θεμέλια παρουσιάζουν πρακτικώς μηδενικές παραμένουσες στροφές, ανεξάρτητα από το φορτίο τους, το έδαφος στο οποίο εδράζονται, και τα χαρακτηριστικά (B_n, q_n) ή την απόσταση D του γειτονικού θεμελίου.
- ii. Οι στροφές των στενών θεμελίων μπορεί να προκύψουν τόσο συγκλίνουσες όσο και αποκλίνουσες αλλά σε κάθε περίπτωση δεν ξεπέρασαν τις 1.2° (κατ' απόλυτη τιμή). Συνήθως, για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις των θεμελίων (π.χ. $D=2.5\text{m}$) προκύπτουν μόνο συγκλίνουσες ουσιώδεις στροφές, ενώ το αντίθετο παρατηρείται για $D \geq 10\text{m}$ (δηλ. ουσιώδεις αποκλίνουσες στροφές). Εξαιρέση αποτελούν τα βαριά ($q=200\text{kPa}$) στενά θεμέλια που εμφανίζουν συστηματικά αποκλίνουσες ουσιώδεις στροφές, ακόμα και για πολύ μικρή ενδιάμεση απόσταση του γειτονικού θεμελίου (π.χ. $D=2.5\text{m}$).
- iii. Για θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$ εδραζόμενα επί δίστρωτου εδάφους, ενδιάμεσες αποστάσεις $D=20\text{m}$ είναι επαρκείς προκειμένου να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση σε όρους στροφών. Για έδραση απευθείας επί ρευστοποιήσιμης άμμου, στενά θεμέλια φορτίου $q=50-200\text{kPa}$, εμφανίζουν ουσιώδεις στροφές για την μέγιστη ενδιάμεση απόσταση που εξετάστηκε ($D=10\text{m}$). Δεδομένου ότι για $D=10\text{m}$, τα στενά θεμέλια επί ομοιόμορφης άμμου παρουσιάζουν στροφές έως και -1.2° , ενδεχομένως να απαιτούνται ενδιάμεσες αποστάσεις μεγαλύτερες από $D=20\text{m}$

προκειμένου να μην υπάρχει πλέον αλληλεπίδραση σε όρους στροφών, για αυτές τις συνθήκες έδρασης.

- iv. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για θεμέλια φορτίου $q=50\text{kPa}$, επί δίστρωτου εδάφους αντοχής $S_u=20\text{-}40\text{kPa}$, και επί ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης άμμου, υποδεικνύουν ότι για αύξηση του εύρους του γειτονικού θεμελίου (ήτοι μείωση του λόγου B/B_n) η στροφή του στενού θεμελίου αναμένεται περισσότερο αποκλίνουσα, πιθανώς λόγω έντονης διόγκωσης του εδάφους πλευρικά του ευρύτερου θεμελίου.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα-Προτάσεις

7.1 Βασικά συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας διερευνήθηκε η δυναμική αλληλεπίδραση ζεύγους επιφανειακών άκαμπτων θεμελιολωρίδων υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης, εστιάζοντας στην περίπτωση δίστρωτου κορεσμένου εδαφικού προφίλ, αποτελούμενο από ρευστοποιήσιμη άμμο στη βάση και αργιλική κρούστα στην επιφάνεια. Τα μεγέθη ενδιαφέροντος που κυρίως αξιολογήθηκαν ήταν οι συσσωρευμένες καθιζήσεις z_{SSSI} και οι παραμένουσες στροφές θ καθενός εκ των δύο θεμελίων του ζεύγους, οι οποίες συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα μεγέθη όταν το κάθε θεμέλιο του ζεύγους είναι απομονωμένο, ήτοι καθιζηση z και μηδενική στροφή ($\theta = 0$ λόγω ομοιόμορφης φόρτισης των θεμελίων).

Η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης έγινε με τη βοήθεια του αδιάστατου λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z με τις τιμές $z_{SSSI}/z > 1$ και $z_{SSSI}/z < 1$ να δείχνουν δυσμενή και ευμενή αλληλεπίδραση και τις στροφές $\theta(^{\circ})$ με τις τιμές $\theta > 0$ και $\theta < 0$ να δείχνουν στροφή συγκλίνουσα προς και αποκλίνουσα από το γειτονικό θεμέλιο, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψιν προηγούμενη έρευνα που αναφέρεται στο ίδιο αντικείμενο, αλλά για επιφανειακά θεμέλια εδραζόμενα σε ομοιόμορφη κορεσμένη εδαφική στρώση (Τσεπελίδου 2021) κύριος στόχος ήταν ο καθορισμός των παραμέτρων που καθορίζουν το υπό εξέταση φαινόμενο, για διάφορες συνθήκες εδάφους έδρασης, προκειμένου να καταστεί εφικτή η διεύρυνση της εφαρμογής των υπάρχουσών μεθοδολογιών απόκρισης μεμονωμένων θεμελίων σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI, Structure – Soil – Structure Interaction) .

Η μελέτη του υπό εξέταση φαινομένου πραγματοποιήθηκε μέσω της εκτέλεσης πλήρως συζευγμένων μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων στις δύο διαστάσεις, κάνοντας χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca Inc. 2011). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εκτελέστηκαν συνολικά σαράντα μία (41) δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις

απόκρισης θεμελίων για δίστρωτο εδαφικό προφίλ και τρεις (3) δυναμικές αναλύσεις απόκρισης θεμελίων για ομοιόμορφο ρευστοποιήσιμο εδαφικό προφίλ. Επιπλέον έγιναν και είκοσι εννιά (29) στατικές αναλύσεις στα ίδια θεμέλια με στόχο την αποτύπωση της αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής και στις στατικές καθιζήσεις και στη φέρουσα ικανότητα.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν αρχικά για δίδυμα θεμέλια -ήτοι ίδιου πλάτους και φορτίου- εξετάζοντας την απόκριση θεμελίων φορτίου $q=50\text{kPa}$, στενών (πλάτους $B=5\text{m}$) αλλά και ευρέων (πλάτους $B=20\text{m}$), για έδραση επί δίστρωτου εδάφους (συνολικού πάχους $H=10\text{m}$) με επιφανειακή άργιλο πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 20\text{kPa}$ ή 40kPa επί 8m άμμου με σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$. Σε όλους τους συνδυασμούς διερευνήθηκε η σημαντικότητα της ενδιάμεσης απόστασης D μεταξύ των δύο θεμελίων, για τιμές D από 2.5m έως 40m . Ακολούθησαν αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$) με ίδιο ($q_1 = q_2 = 50\text{kPa}$) ή διαφορετικό φορτίο έδρασης ($q_1 = 50\text{kPa}$ και $q_2 = 100\text{kPa}$), σε ενδιάμεσες αποστάσεις D από 2.5m έως 25m . Στις αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους και ίδιου φορτίου, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου ίσης με $S_u = 20\text{kPa}$ ή 40kPa , ενώ αντίθετα η αντοχή της επιφανειακής αργίλου έλαβε μόνο την τιμή $S_u = 40\text{kPa}$ στις αναλύσεις θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου. Επιπρόσθετα εκτελέστηκαν και τρεις (3) δυναμικές αναλύσεις σε ομοιόμορφο κορεσμένο εδαφικό προφίλ, για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$) και διαφορετικού φορτίου ($q_1 = 50\text{kPa}$ και $q_2 = 100\text{kPa}$) σε ενδιάμεσες αποστάσεις $D = 2.5\text{m}$ έως 10m . Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων αφορούν στις ίδιες συνθήκες έδρασης με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας της Τσεπελίδου (2021), και συνεκτιμήθηκαν εδώ προκειμένου να διερευνηθεί η αλληλεπίδραση θεμελίων όταν το έδαφος έδρασης αποτελείται από ομοιόμορφη στρώση κορεσμένης λεπτής άμμου (πάχους $H = 10\text{m}$ και σχετικής πυκνότητας $D_r = 45\%$).

Τα βασικότερα πρακτικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα κάτωθι:

- i. Η γειτονία θεμελίων ή ακόμη και η σειρά κατασκευής τους επηρεάζει ελαφρά τις στατικές καθιζήσεις, αλλά όχι τη (στατική) φέρουσα ικανότητα αυτών. Πρακτικά, η ταυτόχρονη κατασκευή γειτονικών θεμελίων μειώνει ελαφρά τις στατικές καθιζήσεις συγκριτικά με το αν αυτά τα θεμέλια ήταν μεμονωμένα (π.χ. κατά 10% για φορτίο λειτουργίας στο $1/3$ της φέρουσας ικανότητας ($FS=3$), αλλά περισσότερο για υψηλότερα φορτία λειτουργίας). Αυτή η μείωση των καθιζήσεων εξαλείφεται με την απόσταση και δείχνει να εξαλείφεται σε αποστάσεις $D=40\text{m}$. Το θεμέλιο που

- κατασκευάζεται δεύτερο έχει ακόμη πιο μειωμένες στατικές καθιζήσεις, με τις διαφορές να μην είναι σημαντικές για συνήθεις συντελεστές ασφαλείας (π.χ. $FS = 3$).
- ii. Η δυναμική αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελίων σε όρους παραμενουσών μετακινήσεων (καθιζήσεων και στροφών) είναι περίπλοκο πρόβλημα. Φθίνει με την απόσταση και ειδικά εάν υπάρχει ουσιώδης αργιλική κρούστα (π.χ. πάχους $H_c = 2m$) είναι μη σημαντική για ενδιάμεσες αποστάσεις $D \geq 20m$. Εάν τα θεμέλια εδράζονται απευθείας επί ομοιόμορφου ρευστοποιήσιμου εδάφους χρειάζονται μεγαλύτερες ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων, προκειμένου να μην υπάρχει πλέον αλληλεπίδραση (π.χ. $D = 40m$).
- iii. Στις περισσότερες περιπτώσεις (80 %) η αλληλεπίδραση είναι ευμενής ($z_{SSSI}/z < 1$) σε όρους σεισμικών καθιζήσεων, με μέση τιμή των ευμενών λόγων καθιζήσεων $\mu = 0.80$ και τυπική απόκλιση $\sigma = 0.23$, αν και για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ($D \leq 10m$) η ευμενής αλληλεπίδραση είναι ακόμα πιο έντονη ($z_{SSSI}/z = 0.74 \pm 0.26$). Εξαιρεση αποτελούν βαριά θεμέλια (φορτίου $q \geq 100kPa$) σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις ($D \leq 10m$) που συστηματικά εμφανίζουν δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, χωρίς ωστόσο να παρατηρείται σημαντική προσαύξηση συγκριτικά με την καθίζηση των αντίστοιχων μεμονωμένων θεμελίων ($z_{SSSI}/z = 1.13 \pm 0.09$). Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να προκύψει πολύ ευμενής αλληλεπίδραση (π.χ. λόγος $z_{SSSI}/z = 0.07$) έως και ανύψωση (λόγος $z_{SSSI}/z < 0$) αλλά μόνο για στενά θεμέλια φορτίου $q=50kPa$ με γειτονικό ευρύ μεγαλύτερου φορτίου.
- iv. Οι σημαντικότερες παράμετροι που καθορίζουν την αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων είναι το φορτίο του θεμελίου q και το εάν υπάρχει ουσιώδης αργιλική κρούστα. Πέραν αυτών, κατά σειράς σπουδαιότητας, σημασία έχει το εύρος του εξεταζόμενου θεμελίου B , η τιμή του λόγου B/B_n και η τιμή του λόγου q/q_n , όπου B_n και q_n είναι το εύρος και το φορτίο του γειτονικού (neighboring) θεμελίου.
- v. Τα ευρέα θεμέλια εμφανίζουν πρακτικώς μηδενικές παραμένουσες στροφές ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχει γειτονικό θεμέλιο. Αντίθετα, τα στενά θεμέλια αναπτύσσουν ουσιώδεις στροφές (π.χ. εδώ έως και 1.2° κατ' απόλυτη τιμή), οι οποίες είναι συνήθως συγκλίνουσες προς το γειτονικό θεμέλιο για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις (π.χ. $D=2.5m$) και αποκλίνουσες κατά του γειτονικού θεμελίου για μεγαλύτερες (π.χ. $D=10m$).

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία ανέδειξε ένα πρόβλημα πολλών παραμέτρων, το οποίο χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Στο πλαίσιο αυτό, γίνονται οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο:

- i. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για θεμέλια εδραζόμενα επί δίστρωτου εδάφους και επί ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης στρώσης ανέδειξαν πολλές σημαντικές παραμέτρους της αλληλεπίδρασης θεμελίων σε καθεστώς ρευστοποίησης. Ωστόσο, για θεμέλια εδραζόμενα επί ομοιόμορφης άμμου χρήζει διερεύνησης η ενδιάμεση απόσταση D για την οποία δεν υπάρχει πλέον αλληλεπίδραση. Για έδραση των θεμελίων επί δίστρωτου εδάφους, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν εξακολουθούν να ισχύουν για βαρύτερα θεμέλια (σε περιπτώσεις όπου ο στατικός συντελεστής ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα είναι επαρκής προκειμένου να υπάρχει πρακτικό ενδιαφέρον) και για περισσότερους συνδυασμούς του αδιάστατου λόγου q/q_n . Τέλος, εκτός των δομικών παραμέτρων έχει νόημα να εξεταστεί και η επίδραση βασικών σεισμικών παραμέτρων (π.χ. μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης a_{max} , ιδιοπερίοδος αρμονικής διέγερσης T , αριθμός κύκλων N , επιβολή μη-αρμονικής διέγερσης) αλλά και στοχευμένες περιπτώσεις όπου οι αδρανειακές δυνάμεις της ανωδομής μπορεί να επιφέρουν σημαντικές διαφοροποιήσεις.
- ii. Βάσει των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας προέκυψαν ποιοτικά συμπεράσματα για την επίδραση βασικών παραμέτρων που καθορίζουν την αλληλεπίδραση θεμελίων σε καθεστώς ρευστοποίησης. Χρήσιμη είναι η περαιτέρω επεξεργασία των εν λόγω αριθμητικών αποτελεσμάτων (ειδικά αν συμπληρωθούν με επιπλέον αναλύσεις), προκειμένου να αναπτυχθεί μία αναλυτική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των διορθωτικών συντελεστών z_{SSI}/z και θ , βάσει της οποίας θα γίνει εφικτός ο ικανοτικός σχεδιασμός θεμελίων σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής σε καθεστώς ρευστοποίησης.
- iii. Προκειμένου να διερευνηθούν διαφορές που οφείλονται στην δυνατότητα στράγγισης της στρώσης έδρασης, χρήσιμη κρίνεται και η εξέταση περιπτώσεων όπου μεταξύ των θεμελίων και του ρευστοποιήσιμου εδάφους παρεμβάλλεται διαπερατή κοκκώδης στρώση, αντί για λεπτόκοκκη αδιαπέρατη κρούστα, που μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

- iv. Τέλος, προτείνεται η εξέταση του ίδιου προβλήματος με τρισδιάστατες αναλύσεις, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των εκτός επιπέδου διατμητικών τάσεων στη σεισμική απόκριση του ζεύγους, αλλά κυρίως προκειμένου να διερευνηθεί η δυναμική αλληλεπίδραση για θεμέλια πεπερασμένων διαστάσεων (π.χ. ορθογωνικά, τετραγωνικά).

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Andrianopoulos K. (2006). “Numerical simulation of static and dynamic loading on elastoplastic soils”, PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department (in Greek).

Andrianopoulos K. I., Papadimitriou A. G. & Bouckovalas G. D. (2010). “Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geotechnical structures”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 30(10), pp. 895–911.

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

Been K. and Jefferies M.G. (1985): “State parameter for sands”, *Geotechnique*, 35 (2), pp.99-112.

Boussinesq J. (1883). “Application des Potentiels a L’Étude de L’Équilibre et due Mouvement des Solides Élastiques” Paris, France.

Cascone E. and Bouckovalas G. (1998). “Seismic bearing capacity of footings on saturated sand with a clay cap”, *Proceedings of the 11th European conference on Earthquake Engineering*, Paris, France.

Dimitriadi V.E., Bouckovalas G.D., Papadimitriou A.G. (2017): “Seismic performance of strip foundations on liquefiable soils with a permeable crust”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 100, pp.396-409.

Hayden C.P., Zupan J.D., Bray J.D., Allmond J.D. and Kutter B.L. (2015): “Centrifuge Tests of Adjacent Mat-Supported Buildings Affected by Liquefaction”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 141 (3).

Itasca. (2011). “FLAC version 7.0.” Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota.

Karamitros D.K. (2010). “Development of a numerical algorithm for the dynamic elastoplastic analysis of geotechnical structures in two and three dimensions” PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department.

Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Chaloulos Y.K. (2013). “Numerical analysis of liquefaction-induced bearing capacity degradation of shallow foundations on a two-layered soil profile”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 139, pp.90-101.

Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Chaloulos Y.K. (2013). “Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 46, pp.64-76.

Kirkwood P. and Dashti S. (2018): “A Centrifuge Study of Seismic Structure – Soil – Structure Interaction on Liquefiable Ground and Implications for Design in Dense Urban Areas”, *Earthquake Spectra*, Volume 34 (3), pp 1113 – 1134, Earthquake Engineering Research Institute

Meyerhof G.G. and Hanna A.M. (1978). "Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load", *Can. Geotech. J.*, Vol. 15 (4), pp. 565-572.

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*, Vol. 22 (3), pp. 191-204

Prandtl, L. (1921): "Über die Eindringungs-festigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden", *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 1 (1), pp 15-20 (in German)

Richards Jr. R., Elms D.G., Budhu M. (1993): "Seismic bearing capacity and settlements of foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119 (4), pp. 662–674

Tsepelidou N. (2021): "Structure-soil-structure interaction in a seismic liquefaction regime", Diploma Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department (in Greek).