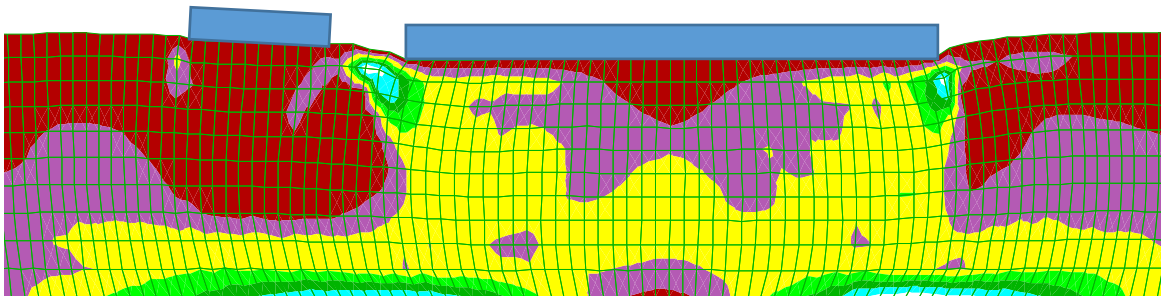




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλληλεπίδραση κατασκευής- εδάφους- κατασκευής σε καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης



Structure-soil-structure interaction in a seismic liquefaction regime

Τσεπελίδου Νικολέττα

Επιβλέπων καθηγητής

Παπαδημητρίου Αχιλλέας - Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, κ. Παπαδημητρίου Αχιλλέα για την ανάθεση του θέματος, το αμέριστο ενδιαφέρον και τη συνεχή καθοδήγησή του. Οι πολύτιμες υποδείξεις και παρατηρήσεις του έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Αντικείμενο.....	9
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	9
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Γενικά χαρακτηριστικά των δοκιμών φυγοκεντρίστη.....	11
2.3 Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευών στις καλλιέργειες θεμελίων.....	14
2.4 Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευών στη διέγερση της ανωδομής.....	20
3. Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων.....	24
3.1 Εισαγωγή.....	24
3.2 Αριθμητική μεθοδολογία.....	24
4. Αλληλεπίδραση Θεμελίων Ίδιου Εύρους σε Ρευστοποιήσιμο Έδαφος.....	32
4.1 Γενικά.....	32
4.2 Αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου φορτίου.....	32
4.2.1 Απόκριση στενών θεμελίων.....	32
4.2.2 Απόκριση ευρέων θεμελίων.....	37
4.2.3 Επίδραση φορτίου θεμελίων.....	42
4.2.4 Επίδραση έντασης διέγερσης.....	50
4.3 Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού φορτίου.....	56
4.3.1 Απόκριση στενών θεμελίων.....	56
4.3.2 Απόκριση ευρέων θεμελίων.....	62
4.4 Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης θεμελίων ίδιου εύρους.....	66
5. Αλληλεπίδραση Θεμελίων Διαφορετικού Εύρους σε Ρευστοποιήσιμο Έδαφος.....	77
5.1 Γενικά.....	77
5.2 Αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου φορτίου.....	80
5.2.1 Απόκριση θεμελίων ίδιου φορτίου.....	80
5.2.2 Επίδραση έντασης διέγερσης.....	92
5.3 Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού φορτίου.....	96
5.3.1 Απόκριση θεμελίων διαφορετικού φορτίου.....	96
5.3.2 Επίδραση έντασης διέγερσης.....	100
5.4 Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης θεμελίων διαφορετικού εύρους.....	104
6. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	111
6.1 Βασικά συμπεράσματα.....	111
6.2 Προτάσεις.....	113

Βιβλιογραφία.....	114
Παραρτήματα Α & Β.....	115

Περίληψη

Η ρευστοποίηση των κορεσμένων χονδρόκοκκων εδαφών είναι ένα από τα πιο καταστροφικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών και προκαλεί προβλήματα σε υπερκείμενες κατασκευές. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μελέτες και πειράματα για την ερμηνεία των μηχανισμών που διέπουν την ανάπτυξη μόνιμων μετακινήσεων σε μεμονωμένες κατασκευές λόγω ρευστοποίησης. 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 σε αυτές. Η έκταση και η φύση αυτής της αλληλεπίδρασης παραμένει μη-πλήρως κατανοητή, ιδιαίτερα όταν το έδαφος είναι ρευστοποιήσιμο.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των δομικών και σεισμικών παραμέτρων που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση ζεύγους κεντρικά φορτισμένων θεμελιολωρίδων υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης, καθώς και η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτής. Συγκεκριμένα, αυτή εκτιμάται αρχικώς μέσω του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z , που συγκρίνει τις καθιζήσεις κάθε θεμελίου z_{SSSI} με την αντίστοιχη του ίδιου αν ήταν μεμονωμένο επί της ίδιας στρώσης και υπό την ίδια διέγερση. Η δεύτερη παράμετρος αλληλεπίδρασης είναι η παραμένουσα στροφή θ των θεμελίων, δεδομένου ότι τα ίδια έχουν πρακτικώς μηδενική στροφή όταν είναι μεμονωμένα. Εκτελέστηκαν συνολικά 87 μη γραμμικές δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις με λογισμικό πεπερασμένων διαφορών (FLAC) για οριζόντια στρώση ομοιόμορφης λεπτής άμμου πάχους $H = 10\text{m}$ και σχετικής πυκνότητας $D_r = 45\%$ για 3 διαφορετικές αρμονικές διεγέρσεις με μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.1 - 0.4g$. Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND. Στην επιφάνεια θεωρήθηκαν αρχικά ένα ζεύγος θεμελίων ίδιου εύρους B για 2 διαφορετικές τιμές, στενά με $B = 5\text{m}$ και ευρέα με $B = 20\text{m}$, και στη συνέχεια ένα ζεύγος θεμελίων με διαφορετικά εύρη, στενό με $B_1 = 5\text{m}$ και ευρύ με $B_2 = 20\text{m}$. Η έννοια του στενού ή ευρέος θεμελίου είναι σχετική και συγκρίσιμη με το πάχος της εδαφικής στρώσης $H = 10\text{m}$. Άλλα μεγέθη ενδιαφέροντος ήταν η απόσταση D μεταξύ των δύο θεμελίων του ζεύγους, καθώς και το ομοιόμορφο φορτίο των θεμελίων, το οποίο πήρε 3 τιμές: $q = 50\text{kPa}$, 100kPa και 200kPa , είτε κοινό ή διαφορετικό στα δύο γειτονικά θεμέλια.

Από τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ζεύγους θεμελίων ίδιου εύρους προκύπτουν αδρά τιμές $z_{SSI}/z = 0.5 - 1.3$ και παραμένουσες στροφές θ έως 1° , είτε συγκλίνουσες είτε αποκλίνουσες μεταξύ των δύο θεμελίων. Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι ευρέα θεμέλια ($B/H = 2$) εμφανίζουν πρακτικά πάντα ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων ($z_{SSI}/z < 1$) και μηδενικές στροφές. Στενά θεμέλια ($B/H = 0.5$) με μεγάλο φορτίο ($q = 200\text{kPa}$) εμφανίζουν δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων ($z_{SSI}/z > 1$) και αποκλίνουσες στροφές, ενώ όταν το φορτίο τους είναι μικρό ($q = 50\text{kPa}$) προκύπτει το αντίστροφο. Γενικότερα, σημασία έχει το φορτίο του ίδιου του θεμελίου παρά του γειτονικού στενού. Από την άλλη, στα ευρέα θεμέλια, αυξανόμενου του φορτίου θεμελίου απομειώνεται η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, αλλά ενισχύεται η αποκλίνουσα στροφή. Εν αντιθέσει με τα στενά, στα ευρέα θεμέλια έχει συγκρίσιμη σημασία και το φορτίο του γειτονικού θεμελίου. Επίσης, ανεξαρτήτως εύρους θεμελίων, η αύξηση της κανονικοποιημένης απόστασης D/B προκαλεί απομείωση της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης προσεγγίζοντας ασυμπτωτικά τιμές λόγου $z_{SSSI}/z = 1$ και μηδενικές στροφές, αν και τιμές $D/B =$

2.0 δεν επαρκούν για να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση. Τέλος, προκύπτει ότι ο λόγος καθιζήσεων και οι παραμένουσες στροφές ζεύγους τόσο στενών όσο και ευρέων θεμελίων μπορούν να επηρεαστούν από τη μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης, όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρή, όμως η επίδραση αυτή δε διαφαίνεται συστηματική.

Από τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ζεύγους θεμελίων με διαφορετικά εύρη προκύπτει τεράστιο εύρος τιμών $z_{ssi}/z = -0.5$ έως 1.3 και παραμένουσες στροφές θ έως 1.3° , και πάλι είτε αποκλίνουσες είτε συγκλίνουσες του ενός προς το άλλο. Συγκεκριμένα, αν το φορτίο των δύο θεμελίων είναι ίδιο, τότε το εύρος $z_{ssi}/z = 0.5 - 1.2$, δηλαδή αντίστοιχο με εκείνο για θεμέλια ίδιου εύρους, ενώ οι ακραία χαμηλές τιμές z_{ssi}/z από -0.5 έως 0.5 μπορούν να προκύψουν μόνο για θεμέλια διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου, με τις αρνητικές τιμές να προκύπτουν για στενό και ελαφρύ θεμέλια δίπλα σε ευρύ και βαρύ. Ειδικότερα, τα στενά θεμέλια αλληλεπιδρούν ευμενώς σε όρους καθιζήσεων, εκτός αν έχουν μεγάλο φορτίο έδρασης. Από την άλλη, τα ευρέα θεμέλια γενικώς εμφανίζουν τιμές $z_{ssi}/z \leq 1$. Αντιθέτως, σε όρους παραμενουσών στροφών, τα στενά θεμέλια ανάλογα με το φορτίο τους εμφανίζουν σημαντικές αποκλίνουσες ή συγκλίνουσες στροφές, ενώ τα ευρέα αναπτύσσουν πάντα αμελητέες αποκλίνουσες στροφές. Επιπροσθέτως, η κανονικοποιημένη απόσταση D/B_{max} είναι αυτή που έχει σημασία στην αλληλεπίδραση, όπου B_{max} αντιστοιχεί στο ευρύτερο από τα δύο θεμέλια. Τέλος, και πάλι, η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση του ζεύγους θεμελίων τόσο σε όρους καθιζήσεων όσο και σε όρους στροφών, όταν τα δύο θεμέλια βρίσκονται σε μικρή κανονικοποιημένη απόσταση, αλλά η επίδραση αυτή δε διαφαίνεται συστηματική.

Abstract

Seismic liquefaction of saturated coarse-grained soils is one of the most destructive phenomena that occur during strong earthquakes and cause problems in overlying structures. In the literature there are many studies and experiments to interpret the mechanisms underlying the development of permanent displacements of isolated structures due to liquefaction. In urban environments, however, where structures are in close proximity to each other, structure – soil – structure interaction (SSSI) affects their settlement mechanisms. The extent and nature of these interactions are poorly understood, particularly on ground susceptible to liquefaction.

The aim of the present study is to investigate the structural and seismic parameters that affect the interaction of a pair of centrally loaded strip footings in a seismic liquefaction regime, as well as to quantify this interaction. Specifically, this is firstly estimated through the z_{SSSI}/z settlement ratio, which compares the settlement of each footing z_{SSSI} with the corresponding settlement z of the same footing if it was isolated on the same soil layer under the same excitation. The second interaction parameter is the residual rotation angle θ of each footing, since these footings have practically zero residual rotation angle θ if isolated. A total of 87 nonlinear dynamic numerical analyses were performed with a finite difference code (FLAC) for a horizontal layer of uniform fine sand, with thickness $H = 10\text{m}$ and relative density $Dr = 45\%$, under 3 different harmonic excitations with maximum acceleration $a_{max} = 0.1 - 0.4 g$. For the simulation of the soil, the constitutive model NTUA_SAND was used. Firstly, a pair of surface footings of the same width B were considered, with the B taking 2 different values, $B = 5\text{m}$ and $B = 20\text{m}$ for a narrow and a wide footing, respectively. Then, a pair of footings with different width was considered, a narrow with $B_1 = 5\text{m}$ and a wide one with $B_2 = 20\text{m}$. The term narrow or wide footing is used relatively, based on the comparison of their width to the thickness of the soil layer $H = 10\text{m}$. Other parameters of interest were the distance D between the two footings of the pair, as well as the uniform load of the foundations, which took 3 values: $q = 50\text{kPa}$, 100kPa and 200kPa , either being the same or different for the two neighboring footings.

The investigation of the seismic response of a pair of footings with the same width shows values roughly equal to $z_{SSSI}/z = 0.5-1.3$, concurrently with permanent rotations θ up to 1° , either divergent or convergent to one another. In particular, it is concluded that wide footings ($B/H = 2$) show practically always favorable interaction in terms of settlements ($z_{SSSI}/z < 1$) and zero permanent rotations. Narrow foundations ($B/H = 0.5$) with a large load ($q = 200\text{kPa}$) show unfavorable interaction in terms of settlements ($z_{SSSI}/z > 1$) and divergent permanent rotations, while when their load is small ($q = 50\text{kPa}$) the opposite occurs. Generally, of most importance is the load of the footing itself rather than that of the neighboring narrow one. On the other hand, for wide footings, increasing the load reduces the interaction in terms of settlements, but enhances the divergent rotations. In contrast to the narrow footings, the load on the neighboring footing is of comparable importance for wide footings. Also, regardless of footing width, increasing the normalized distance D/B causes a reduction of the developing interaction, leading

asymptotically to values $z_{SSSI}/z = 1$ and zero rotation angles. However, it is shown that distances of $D/B = 2.0$ are not sufficient to diminish the interaction. Finally, the settlement ratio and the permanent rotations of both narrow and wide pairs of footings can be affected by the peak ground acceleration when their distance is small, yet the effect is not found to be systematic.

The investigation of the seismic response of a pair of footings with different widths shows a huge range of values of $z_{SSSI}/z = -0.5$ to 1.3 and rotation angles θ up to 1.3° , again both divergent and convergent to one another. In particular, if the load of the two footings is the same, then the range $z_{SSSI}/z = 0.5-1.2$, that is, equivalent to that for equal width footings. The extremely low values of z_{SSSI}/z from -0.5 to 0.5 can occur only for footings of different width and different load, with the negative values appearing for narrow and light footings next to wide and heavy ones. Namely, narrow footings interact favorably in terms of settlements, unless they have a large load. On the other hand, wide footings will generally portray values of $z_{SSSI}/z \leq 1$. On the contrary, in terms of permanent rotations, the narrow footings, depending on their load, exhibit significant divergent or convergent rotations, while the wide ones always develop negligible divergent rotations. Additionally, it is the normalized distance D/B_{max} that governs the interaction, where B_{max} is the larger width of the two neighboring footings. Finally, again, the peak ground acceleration may significantly affect the response of the pair of footings, both in terms of settlements and rotations, when the footings are at a small normalized distance, but this effect does not seem systematic.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών, η ρευστοποίηση των κορεσμένων χονδρόκοκκων εδαφών έχει αποδειχθεί ως ένα από τα πιο καταστροφικά φαινόμενα σε έργα Πολιτικού Μηχανικού. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μελέτες και πειράματα για την ερμηνεία των μηχανισμών που διέπουν την ανάπτυξη μόνιμων μετακινήσεων (π.χ., καθιζήσεις) σε μεμονωμένες κατασκευές λόγω ρευστοποίησης. Όμως, σε αστικά περιβάλλοντα, οι κατασκευές βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, και συνεπώς η αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI, Structure – Soil – Structure Interaction) επηρεάζει τους μηχανισμούς ανάπτυξης μετακινήσεων σε αυτές. Η έκταση και η φύση αυτής της αλληλεπίδρασης παραμένει μη-πλήρως κατανοητή, ιδιαίτερα σε καθεστώς ρευστοποίησης.

Έτσι, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση δομικών και σεισμικών παραμέτρων που επιδρούν στην αλληλεπίδραση δύο γειτονικών θεμελιολωρίδων υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Η διερεύνηση έγινε υπολογιστικά με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών και περιλαμβάνει 87 μη γραμμικές δισδιάστατες αναλύσεις απόκρισης του εδάφους σε σεισμική διέγερση.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 6 Κεφάλαια. Αναλυτικά, μετά το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο ακολουθεί το Κεφάλαιο 2 στο οποίο παρουσιάζονται εκτενώς ορισμένες δυναμικές δοκιμές φυγοκεντρική από τη διεθνή βιβλιογραφία με στόχο την ερμηνεία των μηχανισμών που διέπουν την αλληλεπίδραση επιφανειακών κατασκευών με το έδαφος θεμελίωσης υπό καθεστώς ρευστοποίησης.

Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία των δισδιάστατων αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca Inc. 2011). Ειδικότερα, δίνονται πληροφορίες σχετικά με τις υπολογιστικές δυνατότητες του προγράμματος και παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία και οι παραδοχές που έγιναν για την προσομοίωση της απόκρισης ζεύγους επιφανειακών θεμελιώσεων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε δύο γειτονικές θεμελιολωρίδες ίδιου εύρους επί ρευστοποιήσιμης στρώσης, για διαφορετικές τιμές ευρών, φορτίων έδρασης, ενδιάμεσης απόστασης και μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για ζεύγη θεμελίων ίδιων και στη συνέχεια διαφορετικών επιμέρους φορτίων. Η έμφαση σε κάθε περίπτωση δίνεται στις χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών, καθώς και στις ισοκαμπύλες του συντελεστή υπερπίεσης πόρων και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης στο έδαφος θεμελίωσης στο τέλος της διέγερσης.

Το Κεφάλαιο 5 ακολουθεί επακριβώς τη δομή του Κεφαλαίου 4 με τη μόνη διαφορά πως εξετάζονται γειτονικές επιφανειακές θεμελιολωρίδες διαφορετικού εύρους επί ρευστοποιήσιμης στρώσης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

Στα Παραρτήματα Α & Β παρατίθενται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής όλων των περιπτώσεων που δεν παρουσιάστηκαν, χάριν συντομίας, στα Κεφάλαια 4 και 5.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανασκόπηση πρόσφατων δημοσιεύσεων από τη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την αλληλεπίδραση επιφανειακών κατασκευών με το έδαφος θεμελίωσης υπό καθεστώς ρευστοποίησης. Επιδιώκεται η εμβάθυνση στους μηχανισμούς που διέπουν τη συζευγμένη συμπεριφορά παρακείμενων κατασκευών εδραζόμενων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Απώτερος στόχος της εμβάθυνσης είναι η ενδεχόμενη εφαρμογή συνδυασμένων μεθόδων αποτροπής της ρευστοποίησης σε κατασκευές σε αστικό περιβάλλον, ώστε η βελτίωση σε μία να μην επιδρά δυσμενώς στην απόκριση της γειτονικής της. Η απόκριση διερευνάται σε όρους καθιζήσεων και στροφών των θεμελίων κυρίως, και δευτερευόντως στη σεισμική διέγερση που φτάνει στην ανωδομή.

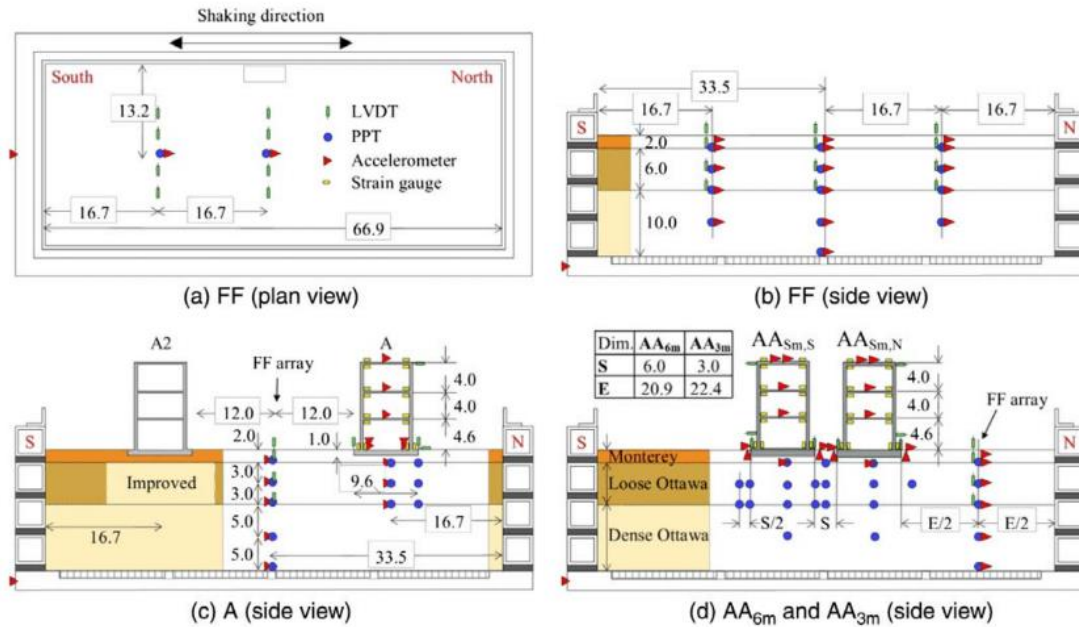
Πιο συγκεκριμένα, για τις καθιζήσεις θεμελίων σε καθεστώς ρευστοποίησης συνεισφέρουν διαφορετικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης, ογκομετρικής (λόγω στράγγισης, ιζηματοπόθεσης, στερεοποίησης) και αποκλίνουσας (λόγω μείωσης της φέρουσας ικανότητας, λόγω διαδοχικών εμπήξεων των άκρων του θεμελίου). Οι μηχανισμοί ογκομετρικής παραμόρφωσης υπάρχουν και στις καθιζήσεις του ελευθέρου πεδίου (Free-Field, FF). Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε θέση αναφοράς, η οποία είναι αρκετά απομακρυσμένη από κατασκευές, ώστε να μην επηρεάζεται από την ύπαρξή τους. Σε κοντινότερες θέσεις όμως, η απόκριση του εδάφους επηρεάζεται από την ύπαρξη της κατασκευής, ενώ σε περίπτωση που υπάρχουν πάνω από μια γειτονικές κατασκευές, πλέον προκύπτει και αλληλεπίδραση από κατασκευή προς κατασκευή. Συνολικά, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής (SSI), ή αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής (SSSI) όταν πρόκειται για αστικό περιβάλλον με γειτνιάζουσες κατασκευές.

Η έμφαση εδώ δίνεται σε δυναμικές δοκιμές φυγοκεντριστή που διερευνούν συστηματικά το πιο σύνθετο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής (SSSI).

2.2 Γενικά χαρακτηριστικά των δοκιμών φυγοκεντριστή

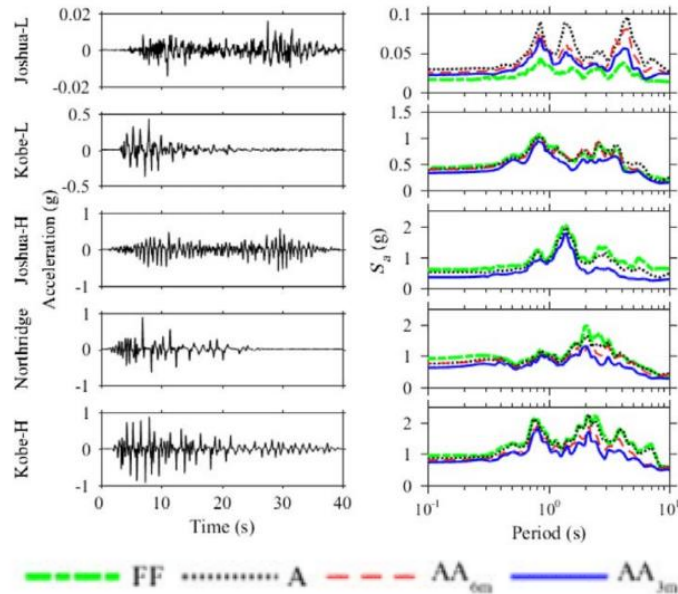
Προκειμένου να διερευνηθεί και να κατανοηθεί σε βάθος η διάδραση μεταξύ εδάφους και υπερκείμενων κατασκευών σε ένα αστικό περιβάλλον εντοπίστηκαν και θα μελετηθούν εδώ 3 σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν από τους Hayden et al (2015) και Kirkwood et al (2018, 2019). Συγκεκριμένα, αφορούν πειραματικές διατάξεις σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή που απαρτίζονταν από προσομοιώματα κατασκευών εδραζόμενα σε ανομοιόμορφα, κορεσμένα εδαφικά προφίλ αποτελούμενα από μια παχιά στρώση (περίπου 10-20m) πυκνής άμμου (dense Nevada/dense Ottawa sand σχετικής πυκνότητας $D_r \approx 90\%$) στη βάση, ακριβώς από πάνω μια χαλαρή ρευστοποιήσιμη άμμο (loose Nevada/loose Ottawa sand σχετικής πυκνότητας $D_r = 40\%$) με πάχος περίπου υποδιπλάσιο της υποκείμενης στρώσης και μια επιφανειακή στρώση μόλις λίγων μέτρων ($\approx 2\text{m}$) από πυκνή Monterey sand για την έδραση των κατασκευών.

Ενδεικτικά στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζονται οι διατάξεις από τους Kirkwood et al (2018) απ' όπου φαίνεται η προαναφερθείσα τυπική διαστρωμάτωση, αλλά και οι διαφορετικές διατάξεις χάρην σύγκρισης: ελεύθερου πεδίου (χωρίς κατασκευή, στα υποσχήματα α και β), απομονωμένη κατασκευή (στο υποσχήμα γ), γειτονικές κατασκευές (στο υποσχήμα δ).



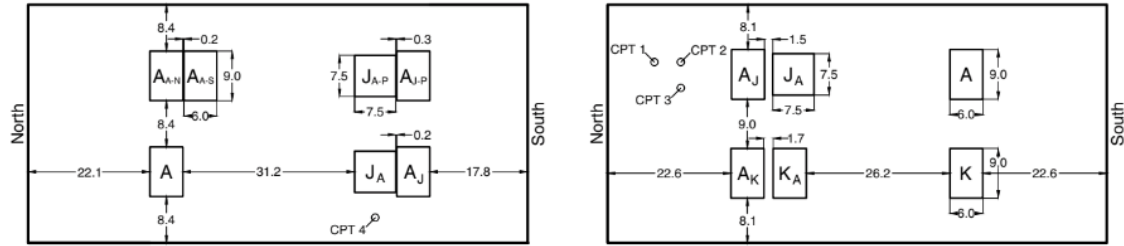
Σχήμα 2.1 Πειραματική διάταξη: α) ελεύθερου πεδίου (κάτοψη) β) ελεύθερου πεδίου (όψη) γ) απομονωμένη κατασκευή Α (όψη) δ) γειτονικές κατασκευές AA_{6m} και AA_{3m} σε αποστάσεις 6m και 3m αντίστοιχα (όψη) (Kirkwood et al. 2018)

Εφαρμόστηκαν δονήσεις αυξανόμενης έντασης με στόχο τη μελέτη της επιρροής των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην απόκριση των ανωδομών. Παρατηρείστε στο **Σχήμα 2.2** τυπικές δονήσεις (χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ελαστικά φάσματα απόκρισης) από τα πειράματα φυγοκεντριστή, απ' όπου προκύπτει η αυξανόμενη ένταση. Επισημαίνεται ότι το κεφαλαίο L υποδηλώνει χαμηλή ένταση (Low), ενώ το κεφαλαίο H υψηλή (High).

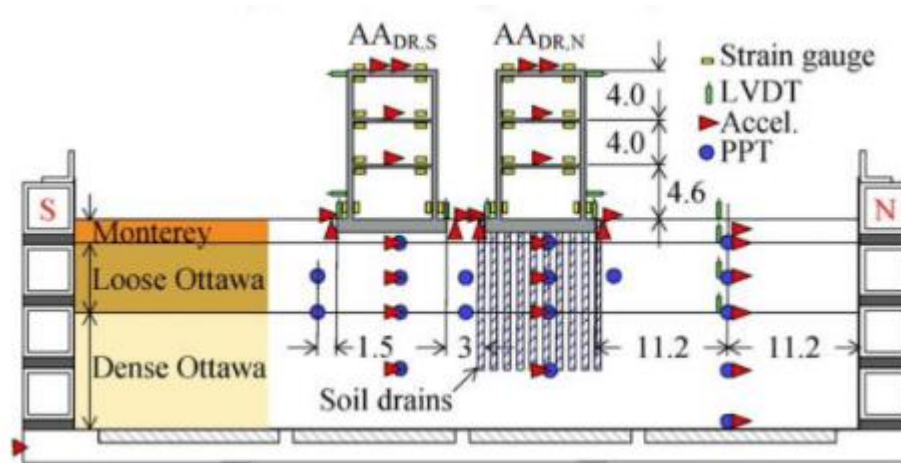


Σχήμα 2.2 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στη βάση και σχετιζόμενα ελαστικά φάσματα απόκρισης (για απόσβεση 5%) στο ελεύθερο πεδίο, στην απομονωμένη και τις γειτονικές κατασκευές (Kirkwood et al. 2018)

Τα ανωτέρω ήταν τα γενικά χαρακτηριστικά των πειραμάτων, αλλά υπήρξαν διαφοροποιήσεις στα επιμέρους κατασκευαστικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε πείραμα. Ειδικότερα, οι Hayden et al (2015) έκαναν χρήση κατασκευών με διαφορετικά ύψη, ιδιοπεριόδους και φορτία έδρασης και διερεύνησαν με ποιον τρόπο θα άλλαζε η αλληλεπίδρασή τους για διαφορετική απόσταση ανάμεσά τους (από 0.2m έως 1.5m) για δύο διαφορετικές πυκνότητες ($D_r=40\%$ και $D_r=50\%$) της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Αντίθετα, οι Kirkwood et al (2018, 2019) χρησιμοποίησαν μοντέλα ίδια μεταξύ τους και έκαναν δοκιμές για διαφορετικές επιμέρους αποστάσεις (3m και 6m), καθώς και για εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης της ρευστοποίησης σε ένα από τα δύο γειτονικά μοντέλα. Για παράδειγμα στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται η διάταξη των Hayden et al (2015) όπου φαίνονται οι διαφορετικών χαρακτηριστικών ανωδομές (ελαφρύτερες τύπου A και βαρύτερες τύπου J, K) τόσο για απομονωμένες όσο και για γειτονικές σε διαφορετικούς συνδυασμούς ζευγαριών και αποστάσεων, ενώ στο **Σχήμα 2.4** φαίνεται μια τυπική διάταξη όπου εισάγεται βελτίωση εδάφους με χρήση πλαστικών κατακόρυφων στραγγιστηρίων σε μια από δύο γειτονικές κατασκευές.



Σχήμα 2.3 Διαρρύθμιση απομακρυσμένων και γειτονικών κατασκευών σε διάφορους συνδυασμούς στα πειράματα φυγοκεντριστή των Hayden et al. (2015)



Σχήμα 2.4 Διάταξη γειτονικών κατασκευών με εφαρμογή μεθόδου βελτίωσης εδάφους σε μία από τις δύο ανωδομές (Kirkwood et al. 2019)

2.3 Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών στις καθιζήσεις θεμελίων

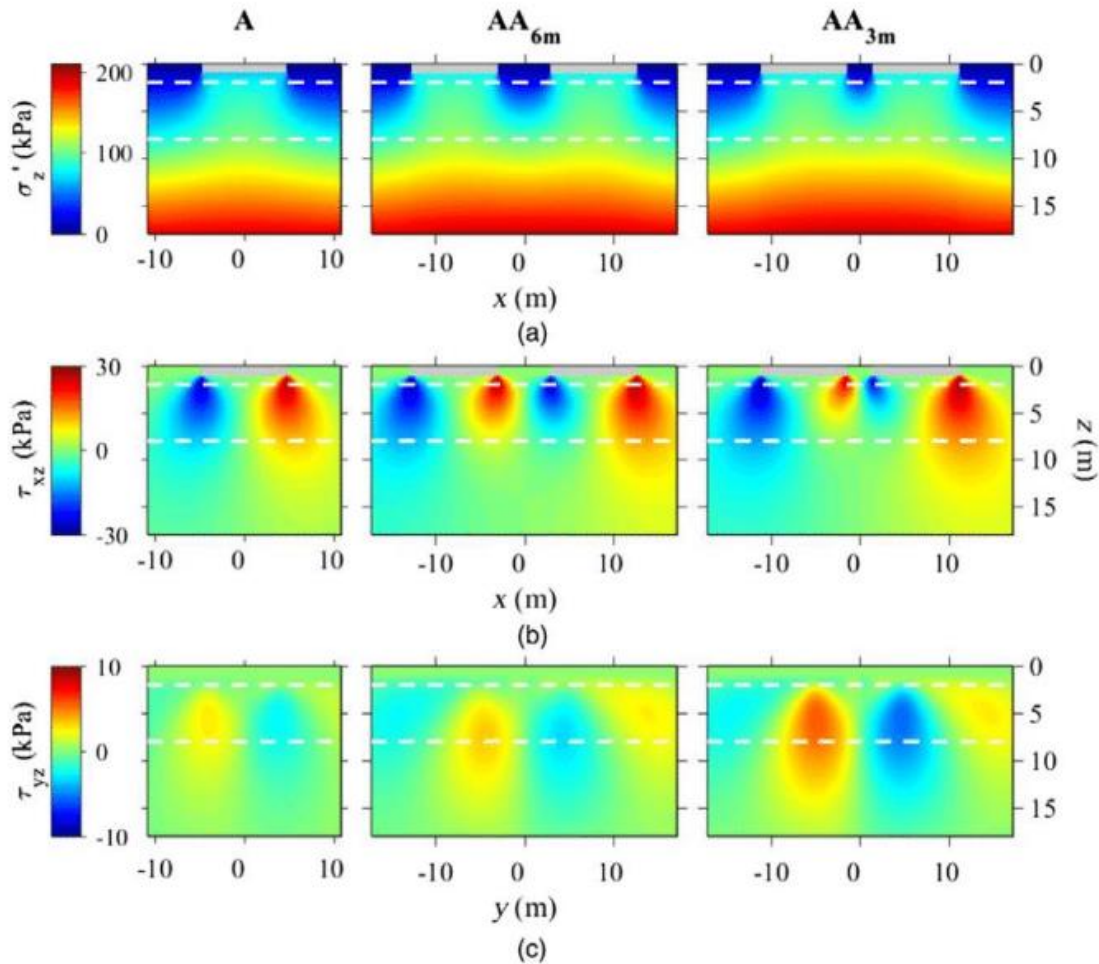
Οι προαναφερθέντες ερευνητές προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν την επιρροή της διάδρασης παρακείμενων κατασκευών σε καθεστώς ρευστοποίησης εστίασαν στην ανάπτυξη καθιζήσεων και στροφών (που συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων), καθώς και στην ταλάντωση που φτάνει στην ανωδομή.

Κοινό εύρημα όλων των δημοσιεύσεων είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της καθίζησης κατασκευών συμβαίνει στη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, δηλαδή οι μηχανισμοί αποκλίνουσας παραμόρφωσης είναι σημαντικότεροι. Αποτέλεσμα αυτού ήταν ότι πάντα οι καθιζήσεις των θεμελίων είναι μεγαλύτερες από εκείνες του ελευθέρου πεδίου.

Για να κατανοηθεί αυτή η διαφοροποίηση, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η συνύπαρξη δύο παρακείμενων κατασκευών οδηγεί στην ανάπτυξη μιας αλληλεπενέργειας ανάμεσά τους. Ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο γειτονικών κατασκευών καθορίζεται ουσιαστικά από το

τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στο υποκείμενο έδαφος. Συγκεκριμένα, η αλληλοεπικάλυψη των βολβών των τάσεων, κατά Boussinesq για ελαστικό ημίχωρο, αυξάνει τις κατακόρυφες ενεργές τάσεις στο έδαφος και κυρίως στο χώρο ανάμεσα στις δύο κατασκευές γεγονός που οδηγεί σε μεγάλες υπερβάλλουσες πιέσεις πόρων και κατ' επέκταση μεγαλύτερες καθιζήσεις, απ' ότι προκύπτει για μια απομονωμένη κατασκευή. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 2.5** απεικονίζονται οι βολβοί των κατακόρυφων ενεργών και διατμητικών τάσεων τόσο για επίπεδο παράλληλο (επίπεδο xz) όσο και κάθετο (επίπεδο yz) στην σεισμική δόνηση, όπως προέκυψαν από τα πειράματα των Kirkwood et al. (2018) για απομακρυσμένη και γειτονικές ανωδομές (για αποστάσεις 3m και 6m μεταξύ τους). Από το σχήμα αυτό προκύπτει η επαύξηση της φόρτισης όσο πλησιάζουν οι κατασκευές μεταξύ τους, η οποία μπορεί να επεξηγήσει και την επαύξηση των καθιζήσεων, αλλά και η απώλεια συμμετρίας αυτής.

Ακόμα, κάτω από την απομονωμένη κατασκευή τόσο οι ενεργές όσο και οι διατμητικές τάσεις είναι συμμετρικές ως προς άξονα διερχόμενο από το κέντρο της, επόμενως υποθέτοντας μία εξίσου συμμετρική ανάπτυξη υπερπιέσεων μπορεί να θεωρηθεί πως και η στιβαρότητα του εδάφους θα είναι γεωμετρικά συμμετρική. Όμως, στην περίπτωση που έχουμε γειτονικές κατασκευές το υποκείμενο τασικό πεδίο παρουσιάζει ασυμμετρία η οποία μάλιστα εντείνεται με μείωση της απόστασης μεταξύ των κατασκευών. Συγκεκριμένα, σε επίπεδο παράλληλο της διεύθυνσης της δόνησης οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις στις εξωτερικές άκρες των κατασκευών είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές στις εσωτερικές άκρες, επομένως μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη διαφορά και στη στιβαρότητα του εδάφους, κάτι που ενδεχομένως να τις οδηγήσει στο να στραφούν η μία μακριά από την άλλη, ακόμη κι αν η στατική εκκεντρότητά τους είναι μηδενική (Hayden et al. 2015). Βέβαια, αυτή η ανάποδη περιστροφή μπορεί επίσης να αποδοθεί στο γεγονός ότι καθώς η ρευστοποίηση πραγματοποιείται αρχικά στην ελεύθερη επιφάνεια, η απώλεια πλευρικής υποστήριξης εξαναγκάζει το έδαφος κάτω από τη θεμελίωση και προς το ελεύθερο πεδίο να παραμορφωθεί υπό τα φορτία της κατασκευής, αλλά η παρουσία μιας γειτονικής κατασκευής παρεμποδίζει την εξάπλωση πλευρικά προς εκείνη την κατεύθυνση.



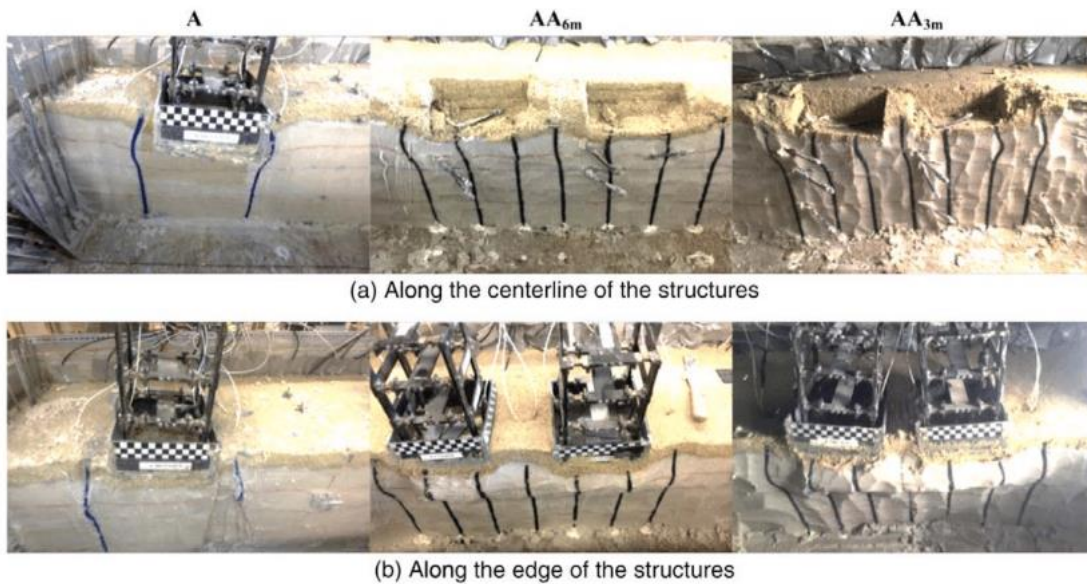
Σχήμα 2.5 Τάσεις στο υποκείμενο έδαφος για απομονωμένη κατασκευή A και γειτονικές AA_{6m}, AA_{3m} για αποστάσεις 6m και 3m αντίστοιχα (a) κατακόρυφες ενεργές τάσεις (b) εντός επιπέδου διατμητικές τάσεις (c) εκτός επιπέδου διατμητικές τάσεις, οι λευκές διακεκομμένες σηματοδοτούν τα όρια των αμμωδών στρώσεων (Kirkwood et al. 2018)

Όμως τα πειράματα των Kirkwood et al. (2018) υπέδειξαν ότι δεν συμβαίνει πάντα αυτό. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι όσο πιο κοντά βρίσκονται η μία κατασκευή στην άλλη, υπάρχει κίνδυνος να στραφούν η μία προς την άλλη. Αυτό το απέδωσαν στο ότι οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε επίπεδο κάθετο στην κίνηση του σεισμού είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι στο επίπεδο παράλληλο στη διεύθυνση της κίνησης και προκαλούν ευρεία διόγκωση του εδάφους πλευρικά (εξωτερικό «φούσκωμα») και άρα αυτή η απώλεια του υποκείμενου όγκου θα οδηγήσει τις κατασκευές να στραφούν η μία προς την άλλη, υπερνικώντας τον μηχανισμό λόγω επαλληλίας των κατακόρυφων και διατμητικών τάσεων που οδηγεί σε ανάποδη περιστροφή. Σε κάθε περίπτωση, το προς τα που θα στραφούν οι γειτονικές κατασκευές φαίνεται να είναι συνδυασμός πολλαπλών μηχανισμών, και δεν μπορεί να εξαχθεί ενιαίο συμπέρασμα.

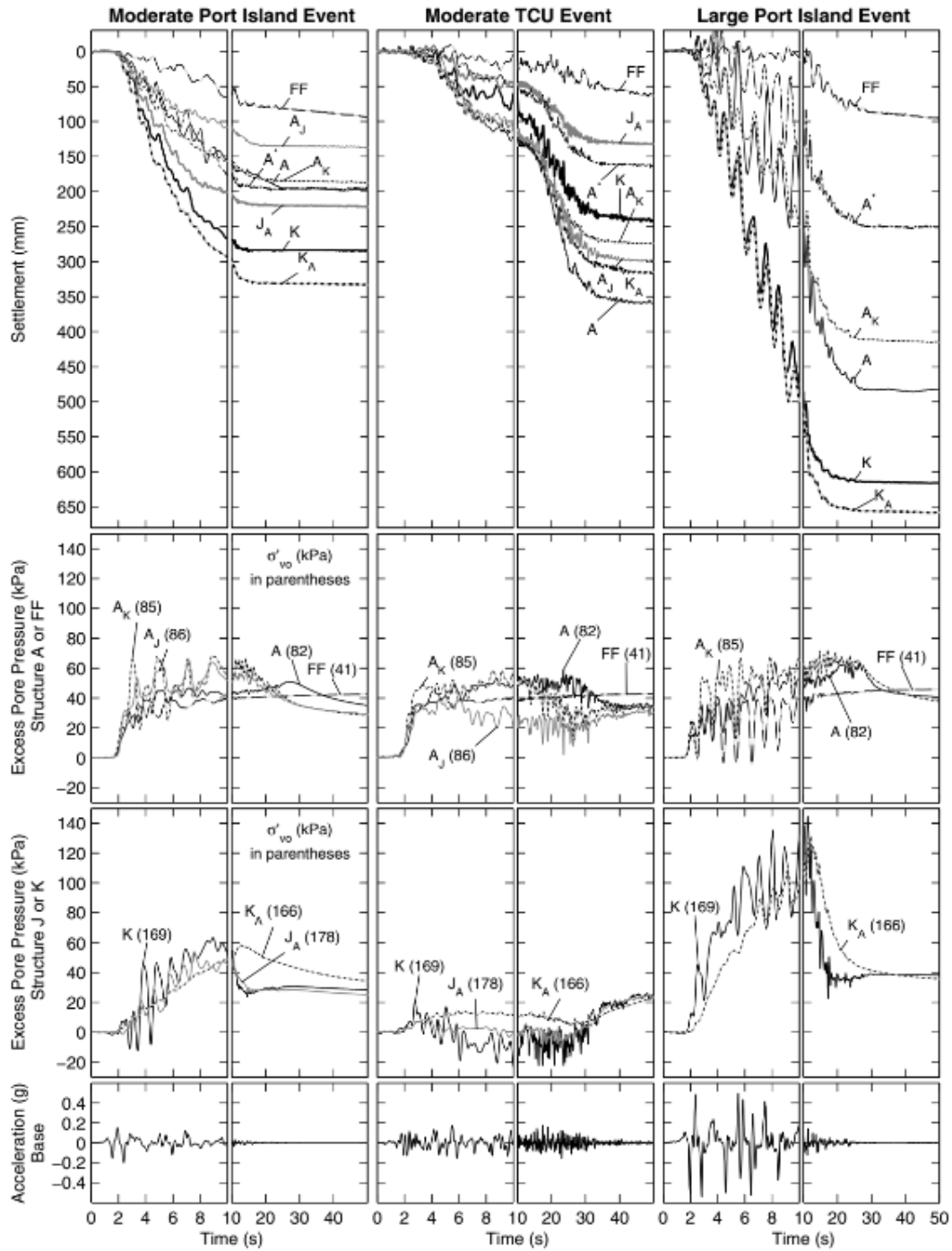
Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται τομή του εδαφικού προφίλ στο τέλος της σειράς πειραμάτων που διεξήγαγαν οι Kirkwood et al. (2018). Κατά την προετοιμασία των πειραματικών διατάξεων είχαν

χρωματιστεί εδαφικές στήλες πλευρικά και ανάμεσα από τις κατασκευές ώστε να υποδείξουν τις μετακινήσεις και παραμορφώσεις του εδάφους μετά το πείραμα. Έτσι, επιβεβαιώνεται η επαλληλία των τάσεων και η επαγόμενη αύξηση της στιβαρότητας στον ενδιάμεσο χώρο με τη διατήρηση της κεντρικής στήλης σχεδόν κατακόρυφης. Επιπλέον, οι εικόνες υποδεικνύουν μια ευμεγέθη πλευρική διόγκωση στην εκτός επιπέδου διεύθυνση που οδήγησε τις ανωδομές με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους να στραφούν η μία προς την άλλη.

Πέραν της στροφής, ένα σημαντικό θέμα αποτελεί και το μέτρο της μέσης καθίζησης κάτω από δύο γειτονικές (ίδιες) κατασκευές, και το αν θα είναι μεγαλύτερο από αυτό μιας απομονωμένης. Εδώ ρόλο παίζουν και τα χαρακτηριστικά της δόνησης. Μία ήπια σεισμική δόνηση ενδέχεται να τις εξαναγκάσει να στραφούν κατ' απόκλιση, δηλαδή μακριά η μία από την άλλη, μια τάση που θα επιφέρει μείωση στις (μέσες) καθιζήσεις. Υπενθυμίζεται ότι αυτή η στροφή κατ' απόκλιση αποδόθηκε στην αλληλοεπικάλυψη των βολβών τάσεων. Αυτό δεν αναμένεται να συμβεί όμως σε μια ισχυρή σεισμική δόνηση, καθώς οι μεγάλες παραμορφώσεις θα αναδείξουν τον άλλο μηχανισμό της εκτός επιπέδου πλευρικής διόγκωσης με αποτέλεσμα την κατά σύγκλιση στροφή των γειτονικών κατασκευών. Αυτή η στροφή, σε συνδυασμό με τη μείωση της στιβαρότητας του εδάφους λόγω των μεγάλων υπερπίεσεων πόρων, θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερες καθιζήσεις.



Σχήμα 2.6 Εδαφική τομή των προσομοιωμάτων φυγοκεντριστή μετά το τέλος της σεισμικής φόρτισης για απομονωμένες και γειτονικές κατασκευές α) εκσκαφή στο κέντρο του προσομοιώματος, β) εκσκαφή στην άκρη του προσομοιώματος (Kirkwood et al. 2018)

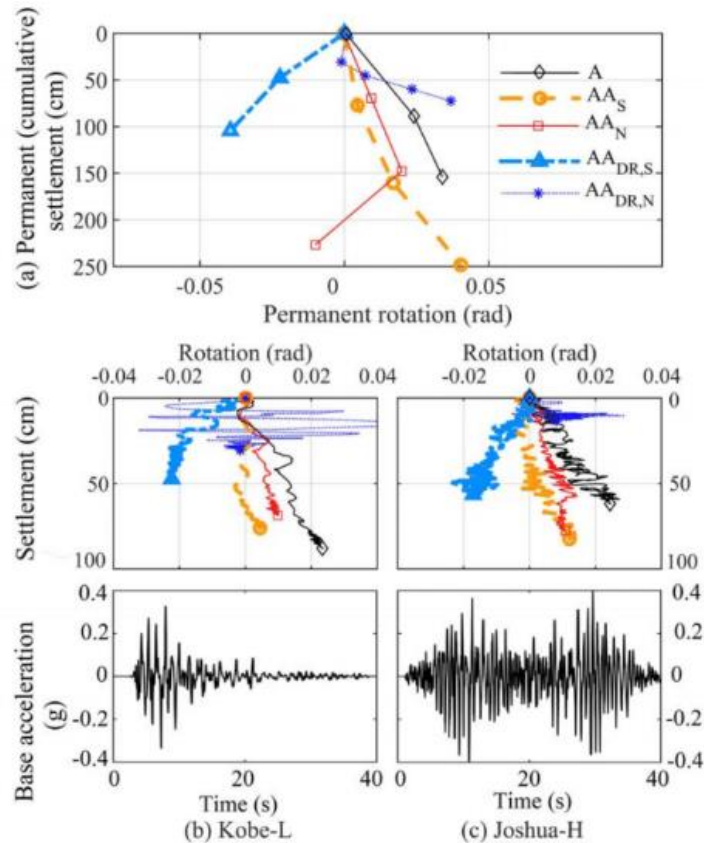


Σχήμα 2.7 Καθιζήσεις, υπερπείσεις πόρων στο μέσον της ρευστοποιήσιμης στρώσης κάτω από το κέντρων των κατασκευών και επιτάχυνση στη βάση για 3 διαφορετικές δονήσεις, κάθε τύπος κατασκευής συμβολίζεται με ένα κεφαλαίο (π.χ. τύπου A) ενώ η γειτονική της με ένα πεζό (π.χ. τύπου A_K), στις παρενθέσεις αναγράφεται η αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση σ'_{vo} (Hayden et al. 2015)

Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν με τα αποτελέσματα των πειραμάτων κατά Hayden et al. (2015) του **Σχήματος 2.7** τα οποία έδειξαν ότι για ισχυρές δονήσεις (Large Port Island Event) ζευγάρια βαρύτερων κατασκευών (τύπου J, K) ανέπτυξαν πολύ μεγαλύτερες πιέσεις πόρων, και μεγάλες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων με αποτέλεσμα να «καθίσουν» περισσότερο από τις ελαφρύτερες απομακρυσμένες (τύπου A), ενώ το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει για τις ήπιες δονήσεις (Moderate Port Island και TCU Event). Αξίζει να παρατηρηθεί πως σε ήπιες δονήσεις και κάτω από βαριές γειτονικές κατασκευές προέκυψε σχεδόν μηδενική υπερπίεση πόρων με αποτέλεσμα τον σημαντικό περιορισμό των καθιζήσεων σε αντίθεση με μια ελαφρύτερη και απομονωμένη ανωδομή, αποτέλεσμα που θα μπορούσε να χαρακτηρίσει την SSSI ευεργετική, παρότι πρόκειται για κατασκευές με μεγαλύτερα φορτία έδρασης.

Υπογραμμίζεται ότι το ίδιο μοτίβο μετατοπίσεων και στροφών ακολούθησαν οι κατασκευές και για τις δύο τιμές σχετικής πυκνότητας ($D_r=40\%$ και $D_r=50\%$) με την διαφορά πως οι καθιζήσεις ήταν σχεδόν διπλάσιες για την χαλαρότερη άμμο, υποδεικνύοντας έτσι την έντονη επιρροή της πυκνότητας στο σχηματισμό καθιζήσεων, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για μεμονωμένες ή για γειτονικές κατασκευές.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση εφαρμογής κατακόρυφων στραγγιστηρίων για την αντιμετώπιση της ρευστοποίησης κάτω από ανωδομή, τοποθετημένη παραπλήσια μιας άλλης χωρίς όμως να έχουν ληφθεί τα αντίστοιχα μέτρα και για τις δύο, μια περίπτωση που μελετήθηκε πειραματικά από τους Kirkwood et al. (2019). Με την παρουσία των στραγγιστηρίων πραγματοποιείται ταχύτερη εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων επιτρέποντας στο έδαφος να ενισχύσει τη στιβαρότητά του με αποτέλεσμα τη μείωση των αναμενόμενων καθιζήσεων και τον περιορισμό των στροφών και κλίσεων. Αντιθέτως, στην παρακείμενη της κατασκευή το υποκείμενο έδαφος παρουσιάζει ανομοιομορφες ογκομετρικές καταπονήσεις λόγω τμηματικής μόνον στράγγισης οδηγώντας την σε υπέρμετρες υποχωρήσεις και στροφές ακόμα και σε ήπιες σεισμικές διεγέρσεις. Προκύπτει λοιπόν ευεργετική η συμβολή των στραγγιστηρίων στον περιορισμό των καθιζήσεων και κλίσεων στην κατασκευή όπου τοποθετούνται αυτά, αλλά συγχρόνως καταστροφική για την γειτονική της (μη αποδεκτές στροφές). Τα ανωτέρω παρουσιάζονται ενδεικτικά στο **Σχήμα 2.8**, απ' όπου προκύπτει πως η βελτιωμένη κατασκευή ($AA_{DR,N}$) ανέπτυξε την μικρότερη καθίζηση από όλες και παρέμεινε σχεδόν κατακόρυφη ακόμα και για ισχυρή δόνηση (Joshua-H), ενώ η διπλανή της ($AA_{DR,S}$) όχι μόνον παρουσίασε μεγαλύτερες καθιζήσεις, αλλά οδηγήθηκε και σε υπέρμετρη στροφή. Αξίζει να παρατηρηθεί επίσης πως οι γειτονικές κατασκευές σε μία ισχυρή σεισμική διέγερση (Joshua-H) ανέπτυξαν μεγαλύτερες καθιζήσεις από την απομονωμένη, ενώ ακριβώς το αντίστροφο συνέβη για μια ηπιότερη διέγερση (Kobe-L), σε συμφωνία και με τα πειράματα των Hayden et al. (2015).



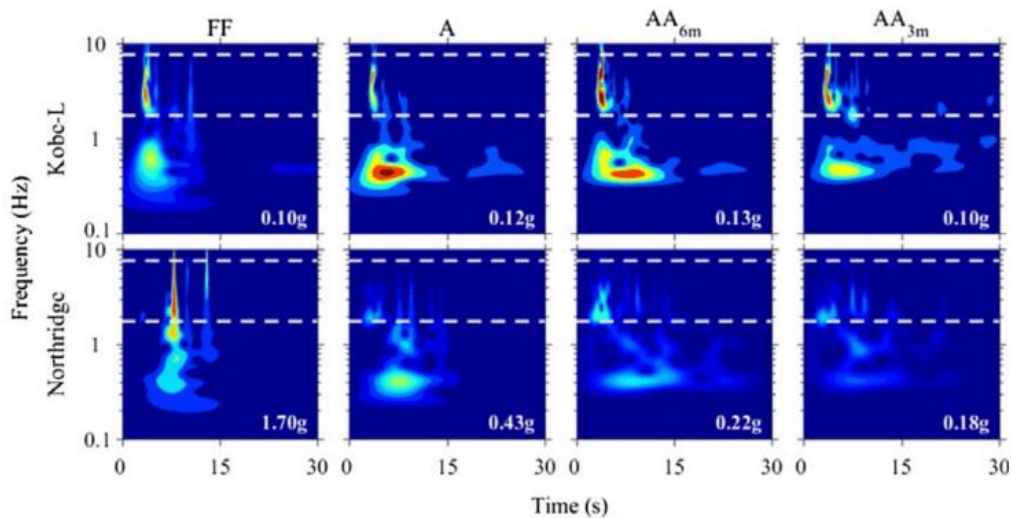
Σχήμα 2.8 α) Μόνιμη (αθροιστική) μέση καθίζηση και στροφή διαφόρων κατασκευών για διάφορες δονήσεις β) καθίζηση και στροφή διαφόρων κατασκευών για ήπια (Kobe-L) και ισχυρή (Joshua-H) δόνηση (Kirkwood et al. 2019)

2.4 Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών στη διέγερση της ανωδομής

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να αξιοποιηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ κατασκευών στο σχεδιασμό μεθόδων αποτροπής της ρευστοποίησης, κρίνεται αναγκαίο να εξετασθεί η επίδρασή της και στη σεισμική απόκριση της ανωδομής. Ο λόγος είναι ότι μετά τη σαφή και έντονη επιρροή της SSSI στην ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων και στην εδαφική στιβαρότητα, είναι σίγουρο ότι θα επηρεαστεί και η επιτάχυνση που επιβάλλεται ως διέγερση στην ανωδομή.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων (π.χ. Hayden et al. 2015) έδειξαν πως σε μία ήπια σεισμική διέγερση η απομονωμένη κατασκευή ανέπτυξε μεγαλύτερες επιταχύνσεις από ότι η επιφάνεια του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στο ελεύθερο πεδίο οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύχθηκαν ήταν αρκετά μεγαλύτερες από εκείνες κάτω από την απομονωμένη κατασκευή με αποτέλεσμα την πρόκληση ρευστοποίησης και συνακόλουθη την απομείωση των επιταχύνσεων. Για έναν ισχυρότερο σεισμό παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα με την διαφορά πως στο ελεύθερο πεδίο το έδαφος εμφάνισε και διασταλτική

συμπεριφορά, που αύξησε σημαντικά τη διακύμανση των υπερπιέσεων πόρων (φτάνοντας στιγμιαία σε τιμές αρκετά μικρότερες εκείνων για ρευστοποίηση). Αυτό είχε ως τελικό αποτέλεσμα, να μην προκύπτει πλήρης απομείωση της ταλάντωσης στο ελεύθερο πεδίο. Αυτό γίνεται εμφανές και στο **Σχήμα 2.2**, όπου συγκρίνονται ελαστικά φάσματα απόκρισης και το φάσμα για το ελεύθερο πεδίο (FF) είναι σαφώς χαμηλότερο απ' ό,τι τα φάσματα για τις κατασκευές στον ασθενή σεισμό (π.χ. Joshua-L) αλλά όχι στον ισχυρό (π.χ. Joshua-H). Επισημαίνεται εδώ ότι η διασταλτική ή μη απόκριση στο ελεύθερο πεδίο σχετίζεται και με το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης (Bouckonavalas et al. 2016), συνεπώς το ως άνω συμπέρασμα για ισχυρές δονήσεις δεν θα πρέπει να γενικεύεται.

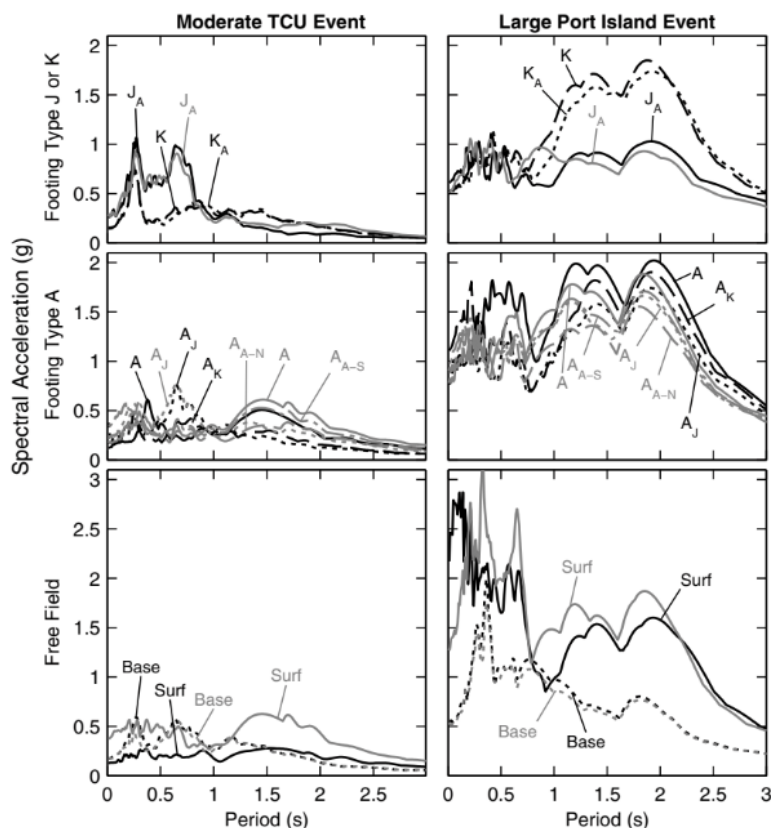


Σχήμα 2.9 Φάσματα απόκρισης (με 5% απόσβεση) για οριζόντιες επιταχύνσεις (στη βάση) κατασκευών (απομονωμένης A, γειτονικών AA με διαφορετική απόσταση 3m και 6m) και ελεύθερου πεδίου σε γράφημα τύπου Stockwell για μια ασθενή (Kobe-L) και μια ισχυρή (Northridge) δόνηση (Kirkwood et al. 2018)

Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως η αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών κατασκευών οδηγεί σε μια γενικότερη απομείωση των αναπτυσσόμενων επιταχύνσεων, συγκριτικά με την απομονωμένη κατασκευή. Μάλιστα, η απομείωση των επιταχύνσεων γίνεται εντονότερη, όσο μειώνεται η απόσταση ανάμεσα στις κατασκευές. Τα ανωτέρω επιβεβαιώνονται από το **Σχήμα 2.9** στο οποίο παρουσιάζονται ενδεικτικά τα γραφήματα χρόνου-συχνότητας τύπου Stockwell των επιταχύνσεων από τα πειράματα των Kirkwood et al. (2018) για μία ήπια (Kobe-L) και μία ισχυρή (Northridge) δόνηση τα οποία συγκρίνουν τις εγκάρσιες επιταχύνσεις που ανέπτυξαν το ελεύθερο πεδίο, η απομονωμένη και οι γειτονικές κατασκευές. Στο κάτω δεξί άκρο έχει σημειωθεί η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και με την αλλαγή του χρώματος από σκούρο μπλε σε κόκκινο υποδηλώνεται η ενίσχυση. Γενικότερα, η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών και η προσαύξηση των κατακόρυφων τάσεων κάτω από μια απομονωμένη κατασκευή οδηγούν σε ενίσχυση των χαμηλόσυχνων συνιστωσών της κίνησης (π.χ. πλησίον της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας της εδαφικής στρώσης), ταυτόχρονα με απομείωση των υψίσυχνων συνιστωσών, πάντα σε σύγκριση με ό,τι συμβαίνει στο ελεύθερο πεδίο. Αυτό μπορεί να

αποδειχθεί δυσμενές για το κτίριο, ανάλογα με την ιδιοσυχνότητά του. Όμως η αλληλεπίδραση γειτονικών κατασκευών, ειδικά πολύ κοντινών, τείνει να απομειώσει την προαναφερθείσα ενίσχυση των χαμηλόσυχνων συνιστωσών, λόγω της πιο εκτεταμένης ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων και της συνακόλουθης μείωσης της εδαφικής στιβαρότητας και αύξησης της υστερητικής απόσβεσης στη διάρκεια ισχυρών διεγέρσεων. Τελικό αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η μείωση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στη βάση των κατασκευών, ειδικά στις ισχυρές διεγέρσεις που έχουν το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

Επιπλέον, κρίνεται αναγκαίο να διερευνηθεί και η επίδραση του βάρους των κατασκευών στην τελική τους απόκριση. Στο **Σχήμα 2.10** παρουσιάζονται οι φασματικές επιταχύνσεις που προέκυψαν κατά Hayden et al. (2015) για μία ήπια και μία ισχυρή δόνηση για διαφορετικά φορτία έδρασης ανωδομών, αλλά και για ελεύθερο πεδίο. Είναι φανερό πως σε μία ήπια δόνηση, αυξανόμενου το φορτίου έδρασης (ανωδομές τύπου J, K) αναπτύχθηκαν μεγαλύτερες επιταχύνσεις, ενώ σε ισχυρότερες δονήσεις λόγω υπέρμετρων υπερπιέσεων πόρων κάτω από τις βαριές κατασκευές παρατηρήθηκε απομείωση της εδαφικής ταλάντωσης. Τέλος, στο ίδιο σχήμα παρατηρείται και η απομείωση της κίνησης της εδαφικής επιφάνειας σε έναν μικρής έντασης σεισμό, καθώς και ενίσχυσή της λόγω φαινομένων διαστολικότητας σε έναν μεγαλύτερης έντασης, όπως έχει ήδη περιγραφεί ανωτέρω. Πρέπει να σημειωθεί πως για μεγαλύτερες τιμές της σχετικής πυκνότητας ($D_r \approx 50\%$) οι φασματικές επιταχύνσεις στο ελεύθερο πεδίο ήταν σημαντικά μεγαλύτερες ανεξάρτητα της έντασης της δόνησης, γεγονός που υποδηλώνει και πάλι την σημαντική επιρροή της πυκνότητας στην συμπεριφορά της εδαφικής στρώσης. Υπενθυμίζεται ότι μεγαλύτερη σχετική πυκνότητα αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τάση για διαστολή υπό διάτμηση.



Σχήμα 2.10 Φασματικές επιταχύνσεις ανωδομών και ελεύθερου πεδίου για ήπια (Moderate TCU) και ισχυρή (Large Port Island) δόνηση, με μαύρο υποδηλώνεται $D_r=40\%$ ενώ με γκρι $D_r=50\%$ (Hayden et al. 2015)

Τέλος, στην περίπτωση δύο γειτονικών κατασκευών όπου μόνον στη μία έχουν ληφθεί μέτρα αντιμετώπισης ρευστοποίησης φαίνεται να αλλάζει ριζικά η γενικότερη συμπεριφορά και η απόκρισή τους (Kirkwood et al. 2019). Με την τοποθέτηση των κατακόρυφων στραγγιστηρίων πραγματοποιείται εκτόνωση των υπερπιέσεων πόρων με αποτέλεσμα τη διατήρηση της εδαφικής στιβαρότητας και τον ταυτόχρονο περιορισμό της απόσβεσης. Συνεπώς η κατασκευή αναπτύσσει τις μεγαλύτερες συγκριτικά επιταχύνσεις, γεγονός που ενισχύει τις κατασκευαστικές της απαιτήσεις έναντι σεισμού. Γίνεται αντιληπτό πως η εφαρμογή μέτρων βελτίωσης έναντι ρευστοποίησης μειώνει τη διακινδύνευση της κατασκευής σε όρους καθιζήσεων και στροφών, αλλά προϋποθέτει επαρκή αντισεισμικό σχεδιασμό της ανωδομής. Αντιθέτως, η γειτονική της κατασκευή πλέον εδράζεται σε εδαφικό υλικό, το οποίο εν μέρει στραγγίζει προς τα στραγγιστήρια της διπλανής κατασκευής, ενώ το υπόλοιπο αναπτύσσει μεγάλες υπερπιέσεις πόρων. Αυτή η ανομοιομορφία στις υπερπιέσεις πόρων σε οριζόντιο επίπεδο έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του εύρους των επιταχύνσεων που φτάνουν και στην μη-βελτιωμένη κατασκευή, με τις διαφοροποιήσεις να είναι εντονότερες για ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις (Kirkwood et al. 2019).

3. Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων

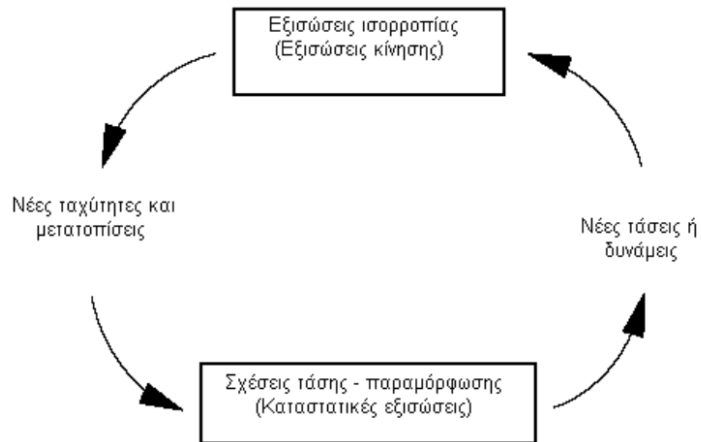
3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία των μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μεταξύ δύο γειτονικών επιφανειακών θεμελιώσεων (θεμελιολωρίδων) σε καθεστώς ρευστοποίησης. Για τη διερεύνηση πραγματοποιήθηκαν δισδιάστατες αναλύσεις με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca Inc. 2011), ενώ η μηχανική συμπεριφορά του ρευστοποιήσιμου εδάφους αναπαράχθηκε με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND, το οποίο αναπτύχθηκε στον τομέα Γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Paradimitriou and Bouckovalas, 2002, Andrianopoulos et al. 2010).

3.2 Αριθμητική Μεθοδολογία

Το λογισμικό FLAC

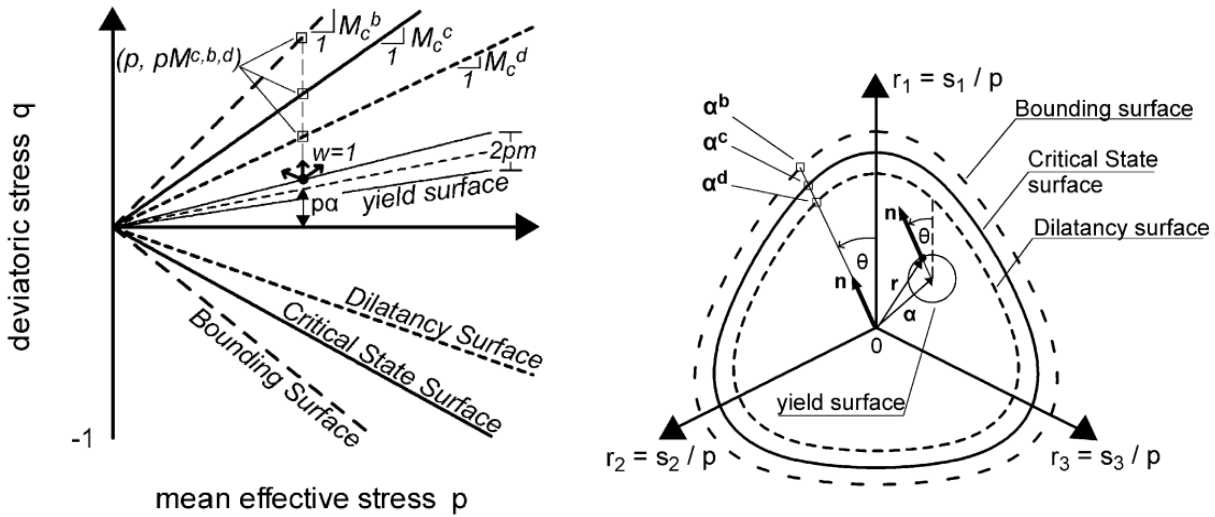
Το FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, 2 Dimensions) είναι ένα πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων σε δύο διαστάσεις που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Έχει τη δυνατότητα να διακριτοποιεί εδαφικούς σχηματισμούς και δομικά στοιχεία σε πεπερασμένες ζώνες (zones) και κόμβους (nodes/gridpoints) τα οποία στο σύνολό τους αποτελούν έναν κάνναβο (grid). Πέραν των ενσωματωμένων δυνατοτήτων του, διαθέτει και γλώσσα προγραμματισμού, την FISH, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να γράψει εφαρμογές και καταστατικά προσομοιώματα με τη μορφή υπο-ρουτινών και με αυτό τον τρόπο να επεκτείνει τη χρησιμότητα του λογισμικού. Στο **Σχήμα 3.1** απεικονίζεται η αλληλουχία υπολογισμών που ακολουθεί το FLAC. Ξεκινώντας από μια γνωστή τασική κατάσταση, η εξίσωση της κίνησης επιλύεται για τις ταχύτητες και τις μετατοπίσεις για κάθε στοιχείο, με την θεώρηση πως οι τάσεις παραμένουν σταθερές εντός κάθε ζώνης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις πρόσφατα υπολογισμένες ταχύτητες και μετατοπίσεις, σε συνδυασμό με τον καθορισμένο καταστατικό προσομοίωμα (σχέση τάσεων – παραμορφώσεων), οι τάσεις υπολογίζονται για κάθε ζώνη, με την υπόθεση πως τώρα οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις είναι σταθερές. Πρόκειται για μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία της οποίας κάθε ολοκληρωμένος υπολογιστικός κύκλος αποτελεί ένα χρονικό βήμα (timestep). Το μέγεθος του χρονικού βήματος εξαρτάται από τη διάσταση των ζωνών, τη στιβαρότητα του υλικού της ζώνης (μέσω της ταχύτητας διάδοσης κυμάτων) και τον τύπο απόσβεσης που καθορίζεται στην ανάλυση. Η παραδοχή «παγωμένων» ταχυτήτων και μετατοπίσεων ενώ υπολογίζονται οι τάσεις και αντίστροφα παράγει ακριβή αποτελέσματα μόνον εάν το χρονικό βήμα είναι μικρότερο από μία κρίσιμη τιμή. Αυτό δημιουργεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα του FLAC, δηλαδή μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους, ιδιαίτερα κατά την προσομοίωση στιβαρών υλικών.



3.1 Κύκλος υπολογισμών που ακολουθεί το FLAC

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND

Το προσομοίωμα NTUA_SAND καταστρώθηκε από τους Papadimitriou & Bouckovalas (2002) και πήρε την οριστική του μορφή στα πλαίσια διδακτορικών διατριβών των Andrianopoulos (2006) και Karamitros (2010). Βασίζεται στις αρχές της θεωρίας πλαστικότητας καθώς και της Κρίσιμης Κατάστασης και αναπτύχθηκε με στόχο την ακριβή προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης των χονδρόκοκκων εδαφών κάτω από μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις. Το προσομοίωμα υιοθετεί τρεις ανοιχτές κωνοειδείς μη κυκλικές επιφάνειες στο χώρο των τάσεων, με κοινή κορυφή στην αρχή των αξόνων. Αυτές οι επιφάνειες, που ονομάζονται επιφάνεια κρίσιμης κατάστασης, οριακή επιφάνεια και επιφάνεια διαστολικότητας, αντιστοιχούν στους λόγους αποκλίνουσας τάσης στην κρίσιμη κατάσταση, στη μέγιστη αντοχή και στο σημείο αλλαγής φάσης (από συστολή σε διαστολή), αντίστοιχα. Το άνοιγμα αυτών των επιφανειών, ή οι τιμές των τριών προαναφερθέντων λόγων αποκλίνουσας τάσης, σχετίζεται ρητά με την παράμετρο κατάστασης ψ (Been and Jefferies, 1985), επιτρέποντας έτσι την ενσωμάτωση της θεωρίας κρίσιμης κατάστασης στις εξισώσεις και τη χρήση ενός ενιαίου σετ τιμών για τις σταθερές του προσομοιώματος, ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες τάσης, σχετικής πυκνότητας και φόρτισης. Στο **Σχήμα 3.2** απεικονίζονται οι τρεις επιφάνειες του προσομοιώματος στον τριαξονικό χώρο 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 Κωνοειδείς επιφάνειες προσομοιώματος NTUA_SAND στο χώρο p - q και η προβολή τους στο αποκλίνον επίπεδο π (Paradimitriou & Bouckovalas, 2002)

Εδαφικά χαρακτηριστικά

Για όλες τις αναλύσεις το έδαφος προσομοιώθηκε με μία στρώση κορεσμένης ρευστοποιήσιμης άμμου τύπου Nevada, πάχους 10m με σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$, δείκτη πόρων $e = 0.7178$ (πορώδες $n = 0.418$), ξηρή πυκνότητα $\rho = 1.554 \text{ Mgr/m}^3$ και διαπερατότητα $k = 6.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Για να επιτευχθεί αυτό, υιοθετούνται οι τιμές των παραμέτρων του NTUA_Sand που αφορούν στην άμμο Nevada, με βάση τη βαθμονόμηση των Andrianopoulos et al. (2010).

Θεμέλια

Τα θεμέλια τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους και προσομοιώθηκαν με εδαφικές ζώνες όπως του εδάφους. Θεωρούνται απολύτως τραχιά, καθώς οι ζώνες τους είναι συνδεδεμένες απολύτως με τις ζώνες του υποκείμενου εδάφους. Τα θεμέλια που προσομοιώθηκαν είχαν πλάτος $B = 5 \text{ m}$ και 20 m . Για να μην μικρύνει το υπολογιστικό βήμα θεωρήθηκαν οι ζώνες τους ήταν ίδιου εύρους και ύψους (1m) με του εδάφους. Είχαν πυκνότητα ίση με 0.2 Mgr/m^3 , ώστε να μην δημιουργούνται αδρανειακές δυνάμεις κατά τη διέγερση. Είχαν διαπερατότητα 10^4 φορές μικρότερη εκείνης του εδάφους, καθιστώντας τα πρακτικώς αδιαπεράτα. Προσομοιώθηκαν ως ελαστικά μέσα με τιμές:

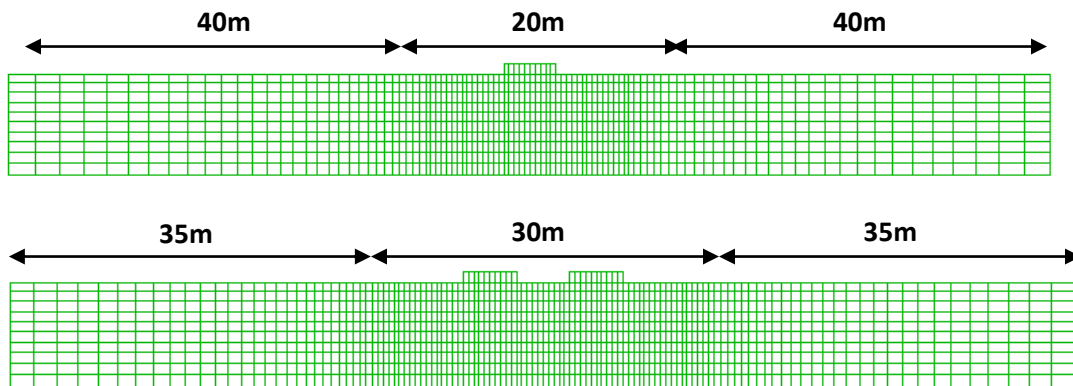
- Μέτρο διάτμησης $G = 1 \text{ GPa}$, Μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K = 2 \text{ GPa}$, για $B = 5 \text{ m}$.
- Μέτρο διάτμησης $G = 10 \text{ GPa}$, Μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K = 20 \text{ GPa}$, για $B = 20 \text{ m}$.

Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν την άκαμπτη φύση των θεμελίων. Υπογραμμίζεται η ανάγκη αύξησης των ελαστικών σταθερών για το θεμέλιο $B = 20 \text{ m}$, ώστε να εξασφαλιστεί η άκαμπτη φύση τους παρά το μεγάλο πλάτος. Οι αναλύσεις είναι 2Δ, και τα θεμέλια θεωρούνται απείρου μήκους, δηλαδή θεμελιολωρίδες. Χάριν συντομίας θα ονομάζονται απλώς θεμέλια.

Διακριτοποίηση καννάβου

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν κάνναβοι διαφορετικού πλάτους, αλλά σταθερού ύψους (πάχος στρώσης 10m). Στο **Σχήμα 3.3** παρουσιάζεται η τυπική διάταξη του μονού θεμελίου (άνω) και των διπλών (ίσου και ίδιου εύρους) θεμελίων, τοποθετημένα με ενδιάμεση απόσταση D ίση με το πλάτος B (κάτω). Παρουσιάζονται ενδεικτικά μόνο οι κάνναβοι για $B = 5\text{m}$, αλλά αντίστοιχη είναι η λογική όλων των καννάβων που χρησιμοποιήθηκαν και δεν παρουσιάζονται εδώ χάριν συντομίας.

Πρόκειται για καννάβους διαστάσεων 100m κατά x και 10m κατά y οι οποίοι εμφανίζουν πύκνωση στον ευρύτερο χώρο που εδράζονται τα θεμέλια. Ειδικότερα, για το μονό θεμέλιο ο χώρος επιρροής της είναι 20m τα οποία αποτελούνται από 40 στοιχεία πλάτους 0.5m, ενώ τα 40m δεξιά και αριστερά του θεμελίου αποτελούνται από 30 στοιχεία τα οποία μειώνονται και αυξάνονται κατά 5% και 2% αυξανόμενης της απόστασης x και y αντίστοιχα. Με ίδιο τρόπο είναι κατασκευασμένος και ο κάνναβος των διπλών θεμελίων με τη διαφορά πως ο χώρος επιρροής τους είναι 30m, αποτελούμενα από 60 στοιχεία πλάτους 0.5m, και τα τμήματα δεξιά και αριστερά 35m. Για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων, $D = B/2$ και $D = 2B$, μειώθηκε και αυξήθηκε κατά 5m αντίστοιχα ο κάνναβος που προαναφέρθηκε. Σε όλες τις αναλύσεις και για όλους τους καννάβους τα θεμέλια με πλάτος $B = 5\text{m}$ απαρτίζονται από 10 στοιχεία πλάτους 0.5m, ενώ τα αντίστοιχα με πλάτος $B = 20\text{m}$ από 40 στοιχεία πλάτους 0.5m.



Σχήμα 3.3 Τυπική διάταξη καννάβων για μονό θεμέλιο πλάτους $B=5\text{m}$ και διπλών θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$ και ενδιάμεσης απόστασης $D=B$

Διέγερση – Απόσβεση

Σε όλες τις αναλύσεις η εδαφική στρώση υποβλήθηκε σε σεισμική διέγερση 10 κύκλων περιόδου $T=0.35\text{s}$ και σταθερής μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} . Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταδιακή αύξηση και μείωση της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης, προστέθηκαν 2 κύκλοι μικρότερου και μεταβαλλόμενου πλάτους στην αρχή και στο τέλος της διέγερσης αντίστοιχα. Η επιβολή της διέγερσης έγινε στη βάση του καννάβου. Οι αναλύσεις αναφοράς έγιναν για $a_{\max} = 0.2g$, ενώ έγιναν επιπλέον στοχευμένες αναλύσεις για $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$. Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε απόσβεση 2% τύπου local, καθώς το προσομοίωμα NTUA_SAND αποδίδει την πραγματική υστερητική απόσβεση του εδάφους κατά τη διάρκεια της διέγερσης.

Συνοριακές συνθήκες – Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα

Σε όλες τις αναλύσεις το έδαφος θεωρήθηκε κορεσμένο, με τη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους.

Προτού εφαρμοστεί η σεισμική διέγερση στην εδαφική στρώση, γίνεται στατική επίλυση του συστήματος με σκοπό τον προσδιορισμό των αρχικών τάσεων λόγω ιδίου βάρους και στατικής επιφόρτισης των θεμελίων. Για την επίλυση αυτή, τα πλευρικά όρια του καννάβου δεσμεύονται κατά την οριζόντια διεύθυνση x (κατακόρυφες κυλίσεις), ενώ η βάση του κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση y (οριζόντιες κυλίσεις). Σημειώνεται ότι κατά την στατική επίλυση θεωρήθηκαν στραγγιζόμενες συνθήκες, όπως αυτές που επικρατούν σε χονδρόκοκκα εδάφη υπό στατική φόρτιση.

Για την επίλυση της δυναμικής φόρτισης, απελευθερώθηκαν οι οριζόντιες μετακινήσεις και όλα τα στοιχεία ίδιου υψομέτρου στα πλευρικά όρια του καννάβου δεσμεύθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να αναπτύξουν κοινή μετακίνηση και ταχύτητα, όπως θα συνέβαινε σε μία πειραματική διάταξη δοχείου με εύκαμπτα τοιχώματα (τύπου *laminar box*), η οποία προσομοιώνει με επιτυχία την απόκριση ελευθέρου πεδίου.

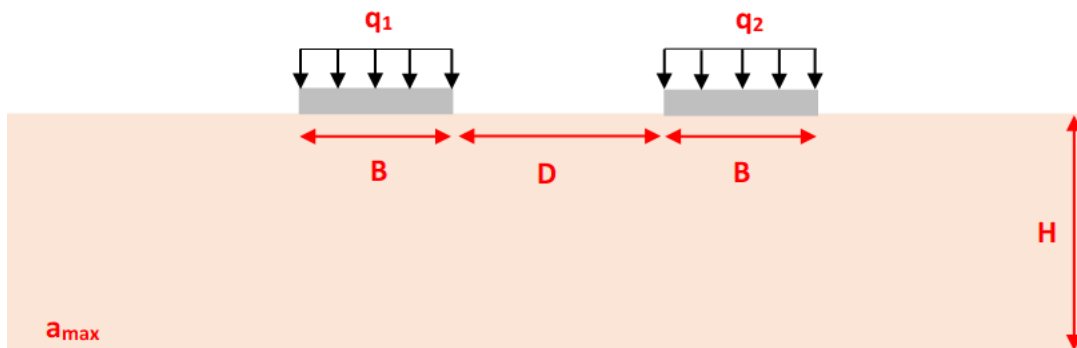
Παραμετρική διερεύνηση

Έγιναν αναλύσεις αναφοράς για θεμέλια μονά ($B = 5\text{m}$ ή $B = 20\text{m}$) με φορτίο έδρασης $q = 50, 100$ και 200 kPa , που αντιστοιχούν σε ελαφρύ, σύνηθες και βαρύ θεμέλιο. Στη συνέχεια έγιναν αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων ίδιου εύρους ($B_1 = B_2 = 5\text{m}$ ή 20m), με ίδιο ($q_1 = q_2$) ή διαφορετικό φορτίο έδρασης ($q_1 \neq q_2$), πάντα με τιμές q που να αντιστοιχούν στις προαναφερθείσες τρεις τιμές και όλους τους συνδυασμούς τους. Στο τέλος έγιναν αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$), με ίδιο ($q_1 = q_2$) ή διαφορετικό φορτίο έδρασης ($q_1 \neq q_2$), όπως και παραπάνω. Σε όλους τους συνδυασμούς διερευνήθηκε η σημαντικότητα της απόστασης D μεταξύ των δύο θεμελίων, σε αποστάσεις $D = 2.5\text{m}, 5.0\text{m}$ και 10m που αντιστοιχούν σε κανονικοποιημένες τιμές $D/B_1 = 0.5, 1.0$ και 2.0 . Διερευνήθηκε επίσης και η επίδραση της έντασης της διέγερσης, με τιμές $a_{\max} = 0.1$ έως $0.4g$. Σε όλες τις περιπτώσεις, η σύγκριση έγινε με την την απόκριση του μονού θεμελίου σε όρους καθιζήσεων και στροφών.

4. Αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου εύρους σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για δύο γειτονικές θεμελιολωρίδες ίδιου εύρους εδραζόμενων σε ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση υπό σεισμική διέγερση. Στόχος της παρουσίασης είναι η μελέτη της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης SSSI (Structure-Soil-Structure Interaction) μεταξύ τους, καθώς και των παραμέτρων που την επηρεάζουν. Στο **Σχήμα 4.1** απεικονίζεται η τυπική διάταξη του προβλήματος, δηλαδή μιας ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης πάχους H επί της οποίας βρίσκονται οι δύο επιφανειακές θεμελιολωρίδες ίσου πλάτους B και φορτίων έδρασης q_1 και q_2 , με ενδιάμεση μεταξύ τους απόσταση D , μια διάταξη που υποβάλλεται σε αρμονική διέγερση βάσης με μέγιστη επιτάχυνση a_{max} .



Σχήμα 4.1 Σκαρίφημα διάταξης ζεύγους θεμελίων πλάτους B , φορτίων έδρασης q_1 , q_2 και ενδιάμεσης απόστασης D εδραζόμενων σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους H υπό σεισμική διέγερση a_{max} για τον υπολογισμό καθιζήσεων z και στροφών θ

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί **Πίνακες 4.1** και **4.2** οι οποίοι παρουσιάζουν τα παραμετρικά χαρακτηριστικά κάθε ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του παρόντος Κεφαλαίου, που αντιστοιχούν σε ζεύγη θεμελίων καθώς και για αντίστοιχο μονό θεμέλιο, χάριν σύγκρισης. Δηλαδή, όταν υπάρχει ένα ζεύγος θεμελίων πλάτους B σε απόσταση D με φορτίο $q = q_1 = q_2$, η απόκριση αναφοράς είναι εκείνη για μονό θεμέλιο πλάτους B με φορτίο q , που είναι η συμπεριφορά που αναμένεται όταν η απόσταση $D \rightarrow \infty$. Χάριν πληρότητας στην αριστερή πλευρά των πινάκων εμφανίζεται η αρίθμηση της παραγράφου του παρόντος κεφαλαίου όπου εμφανίζονται τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης.

	B(m)	B(m)	q ₁ (kPa)	q ₂ (kPa)	D/B ₁	a _{max} (g)
<u>4.2.1</u>	5	5	100	100	0.5	0.2
	5	5	100	100	1	0.2
	5	5	100	100	2	0.2
<u>4.2.2</u>	20	20	100	100	0.5	0.2
	20	20	100	100	1	0.2
	20	20	100	100	2	0.2
<u>4.2.3</u>	5	5	50	50	0.5	0.2
	5	5	50	50	1	0.2
	5	5	50	50	2	0.2
	5	5	200	200	0.5	0.2
	5	5	200	200	1	0.2
	5	5	200	200	2	0.2
	20	20	50	50	0.5	0.2
	20	20	50	50	1	0.2
	20	20	50	50	2	0.2
	20	20	200	200	0.5	0.2
	20	20	200	200	1	0.2
	20	20	200	200	2	0.2
<u>4.2.4</u>	5	5	100	100	0.5	0.1
	5	5	100	100	0.5	0.4
	5	5	50	50	0.5	0.1
	5	5	50	50	0.5	0.4
	5	5	200	200	0.5	0.1
	5	5	200	200	0.5	0.4
	20	20	100	100	0.5	0.1
	20	20	100	100	0.5	0.4
	20	20	50	50	0.5	0.1
	20	20	50	50	0.5	0.4
	20	20	200	200	0.5	0.1
	20	20	200	200	0.5	0.4
<u>4.3.1</u>	5	5	100	50	0.5	0.2
	5	5	100	50	1	0.2
	5	5	100	50	2	0.2
	5	5	100	200	0.5	0.2
	5	5	100	200	1	0.2
	5	5	100	200	2	0.2
	5	5	50	200	0.5	0.2
	5	5	50	200	1	0.2
	5	5	50	200	2	0.2
<u>4.3.2</u>	20	20	100	50	0.5	0.2
	20	20	100	50	1	0.2
	20	20	100	50	2	0.2
	20	20	100	200	0.5	0.2
	20	20	100	200	1	0.2
	20	20	100	200	2	0.2
	20	20	50	200	0.5	0.2
	20	20	50	200	1	0.2
	20	20	50	200	2	0.2

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση ζεύγους θεμελίων που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο

	B(m)	q(kPa)	a _{max} (g)
4.2.1/4.3.1	5	100	0.2
4.2.2/4.3.2	20	100	0.2
4.2.3	5	50	0.2
	5	200	0.2
	20	50	0.2
	20	200	0.2
4.2.4	5	100	0.1
	5	100	0.4
	5	50	0.1
	5	50	0.4
	5	200	0.1
	5	200	0.4
	20	100	0.1
	20	100	0.4
	20	50	0.1
	20	50	0.4
	20	200	0.1
	20	200	0.4

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά αναλύσεων αναφοράς για σεισμική απόκριση μονού θεμελίου που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο

Από όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε ανάλυση, για τις ανάγκες του κεφαλαίου αξιοποιήθηκαν η καθίζηση του κέντρου του (άκαμπτου) θεμελίου στην επιφάνεια του εδάφους, η στροφή του θεμελίου (ως στερεό σώμα) και η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης των θεμελίων. Οι καθιζήσεις και οι στροφές παρουσιάζονται με τη μορφή χρονοϊστοριών, ενώ η χωρική κατανομή των r_u και γ μόνο στο τέλος της διέγερσης. Τιμές καθίζησης αρνητικές υποδηλώνουν ταπείνωση του θεμελίου και θετικές υποδηλώνουν ανύψωση. Αντίστοιχα, για τη στροφή έχει υιοθετηθεί 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.

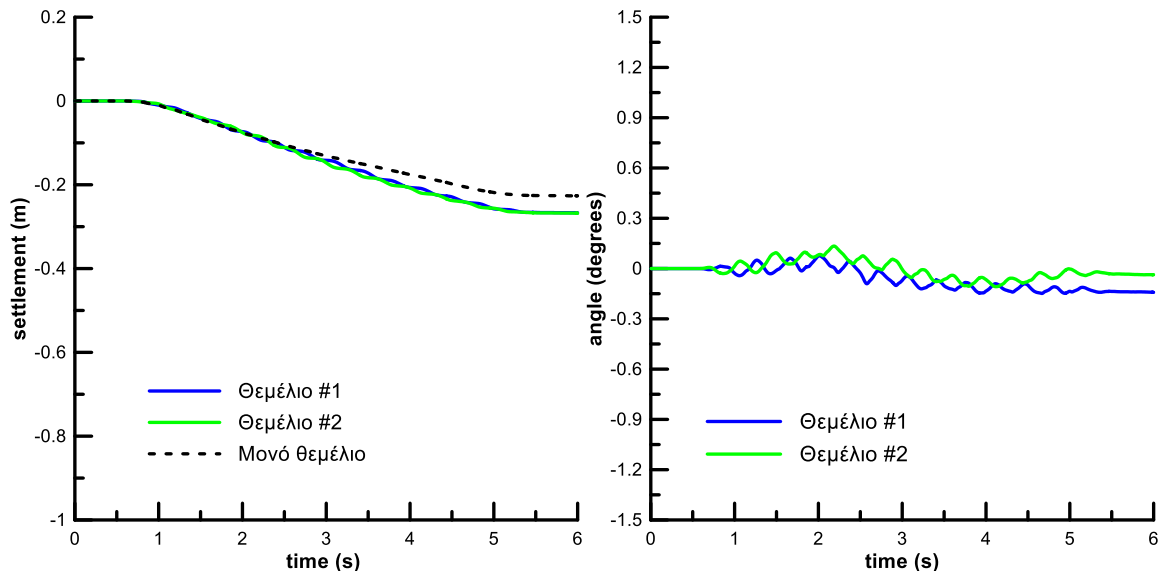
Έτσι στην παράγραφο 4.2 διερευνάται η αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου φορτίου, ενώ στην παράγραφο 4.3 γίνεται το ίδιο για θεμέλια διαφορετικού φορτίου. Τέλος, στην παράγραφο 4.4 γίνεται μια σύνοψη των χαρακτηριστικών της απόκρισης για θεμέλια ίδιου εύρους, ίδιου ή διαφορετικού φορτίου, με έμφαση στις τελικές τιμές της καθίζησης και στροφής.

4.2 Αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου φορτίου

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η σεισμική απόκριση, κυρίως σε όρους καθιζήσεων και στροφών, στενών ($B = 5\text{m}$) και ευρέων ($B = 20\text{m}$) δίδυμων θεμελιολωρίδων υποβαλλόμενων σε σεισμική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης $0.2g$ για τρεις τιμές του ίδιου φορτίου $q(=q_1=q_2) = 50\text{kPa}$, 100kPa και 200kPa . Υπογραμμίζεται ότι οι όροι στενό και ευρύ θεμέλιο είναι συγκριτικοί και σχετίζονται με τη σχέση του εύρους συγκριτικά με το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης $H = 10\text{m}$. Στόχος είναι η ποσοτικοποίηση της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης μέσω συσχέτισης της με το κοινό φορτίο έδρασης q και την κανονικοποιημένη απόσταση D/B μεταξύ των δίδυμων θεμελίων. Επισημαίνεται ότι ο όρος δίδυμα θεμέλια υπονοεί ίδιο εύρος $B (=B_1=B_2)$ και ίδιο φορτίο q . Τέλος, παρουσιάζονται και στοχευμένες αναλύσεις, αλλά για σεισμική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση ίση με $0.1g$ και $0.4g$, δηλαδή υποδιπλάσια και διπλάσια της τιμής αναφοράς $0.2g$.

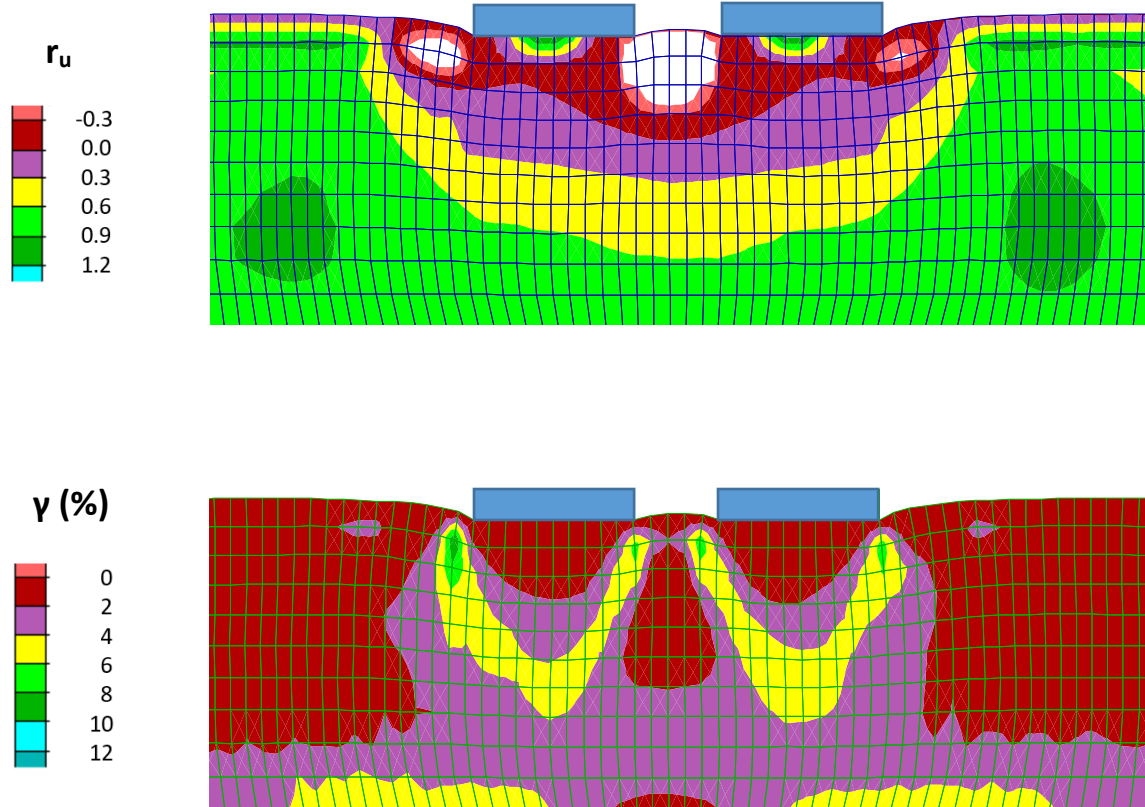
4.2.1 Απόκριση στενών θεμελίων

Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$) με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$. Χάρην σύγκρισης, με διακεκομμένη μαύρη καμπύλη παρουσιάζεται και η χρονοϊστορία καθίζησης του μονού θεμελίου πλάτους $B = 5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση, ενώ η αντίστοιχη χρονοϊστορία στροφής είναι πρακτικώς μηδενική (και δεν παρουσιάζεται). Αυτή είναι η τυπική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε όρους χρονοϊστοριών και ακολουθείται σε όλη την παράγραφο 4.2. Από τη σύγκριση προκύπτει ελαφρώς δυσμενής αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων, καθώς προκύπτει ελαφρά αύξηση των καθιζήσεων με πολύ μικρές στροφές των θεμελίων (αποκλίνουσες).

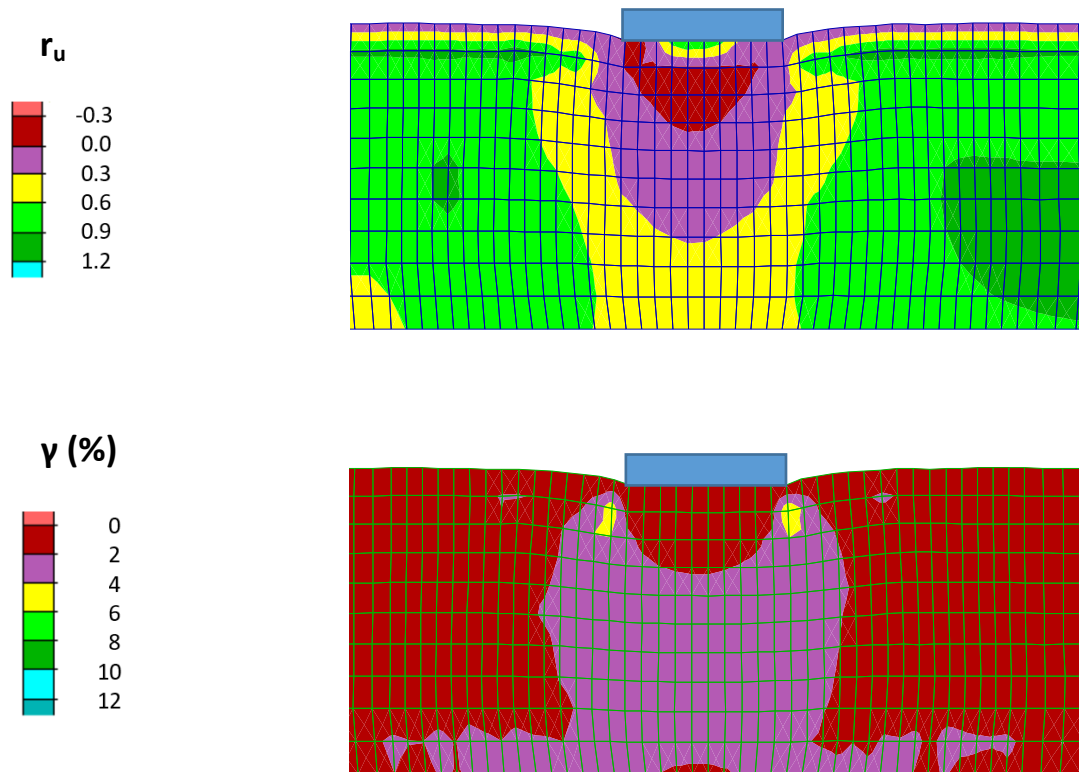


Σχήμα 4.2 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος δίδυμο θεμελίου (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$) με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$, ενώ χάριν σύγκρισης στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για το μόνο θεμέλιο πλάτους $B = 5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση. Για να διευκολύνεται η σύγκριση, η χρωματική κλίμακα μεταβολής του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ είναι η ίδια και στα δύο σχήματα, ενώ αυτή η τυπική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε όρους ισοκαμπυλών ακολουθείται σε όλο το παρόν κεφάλαιο. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι ενώ στο μονό θεμέλιο ο μηχανισμός αστοχίας είναι συμμετρικός, στο δίδυμο θεμέλιο είναι πιο έντονος ειδικά στις εξωτερικές παρειές, γεγονός που αποτυπώνεται στις ελαφρώς αποκλίνουσες στροφές των δύο θεμελίων. Η αποκλίνουσα στροφή των δύο θεμελίων σχετίζεται και με την ανάπτυξη $r_u < 0$ στην επιφανειακή περιοχή ανάμεσα στα θεμέλια, που την ισχυροποιεί λόγω αύξησης των ενεργών τάσεων σε αυτή οδηγώντας στην στροφή τους προς τις εξωτερικές παρειές με χαμηλότερες ενεργές τάσεις. Γενικώς πάντως οι υπερπίεσεις πόρων κάτω από τα δίδυμα θεμέλια είναι πιο αυξημένες σε σχέση με το μόνο θεμέλιο, με εξαίρεση αυτή την επιφανειακή περιοχή ανάμεσά τους.

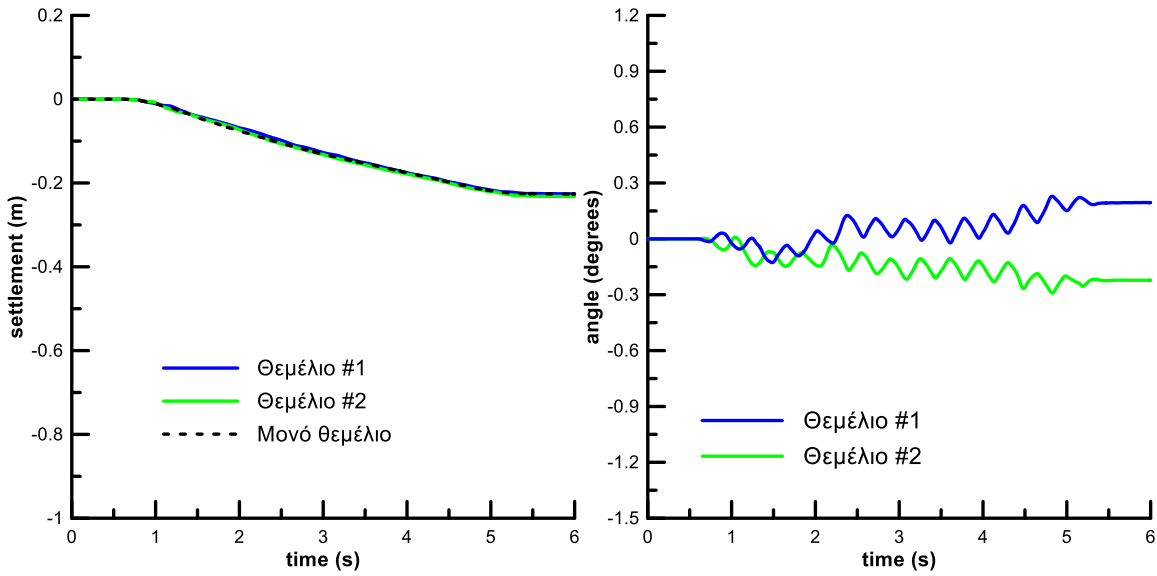


Σχήμα 4.3 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

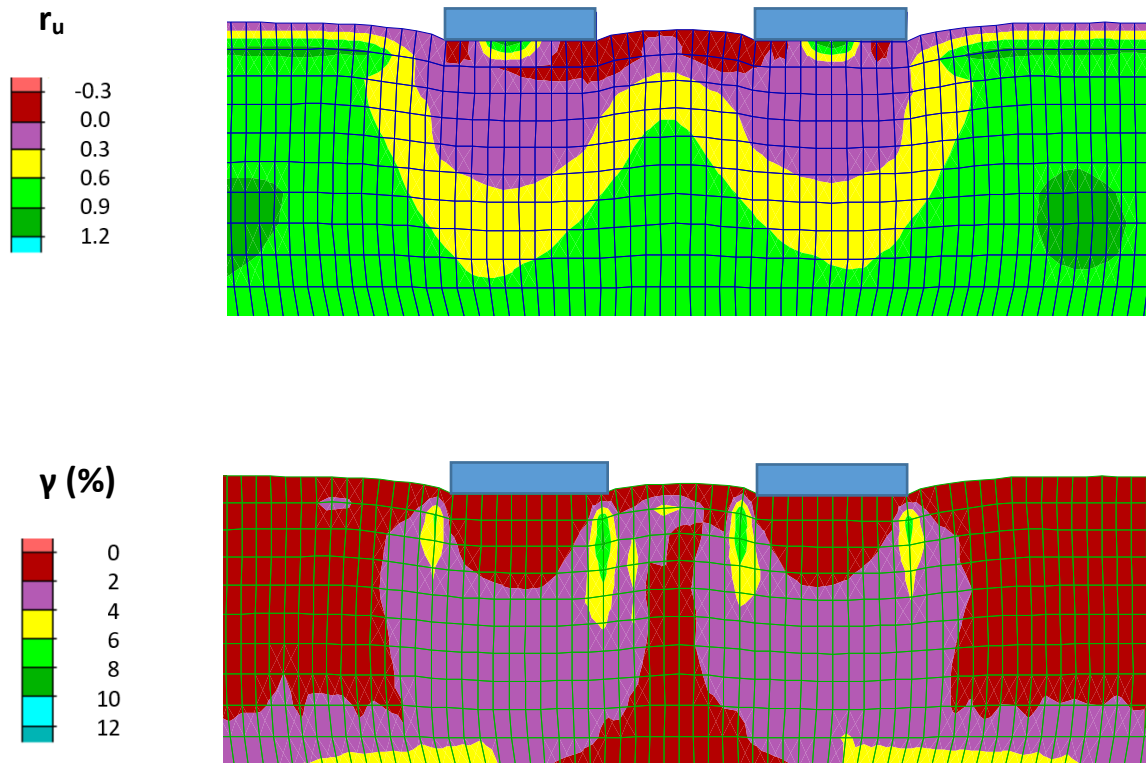


Σχήμα 4.4 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.5** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής των ίδιων δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με μέση ενδιάμεση απόσταση $D = B = 5.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$, χρησιμοποιώντας την ίδια τυπική μορφή παρουσίασης. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι λόγω αύξησης της ενδιάμεσης απόστασης εξαφανίζεται η ελαφρώς δυσμενής αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων σε όρους καθίζησης, καθώς τα δίδυμα θεμέλια έχουν την ίδια καθίζηση με το μονό. Ούτε σε όρους στροφής δεν προκύπτουν ουσιώδεις τιμές.



Σχήμα 4.5 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

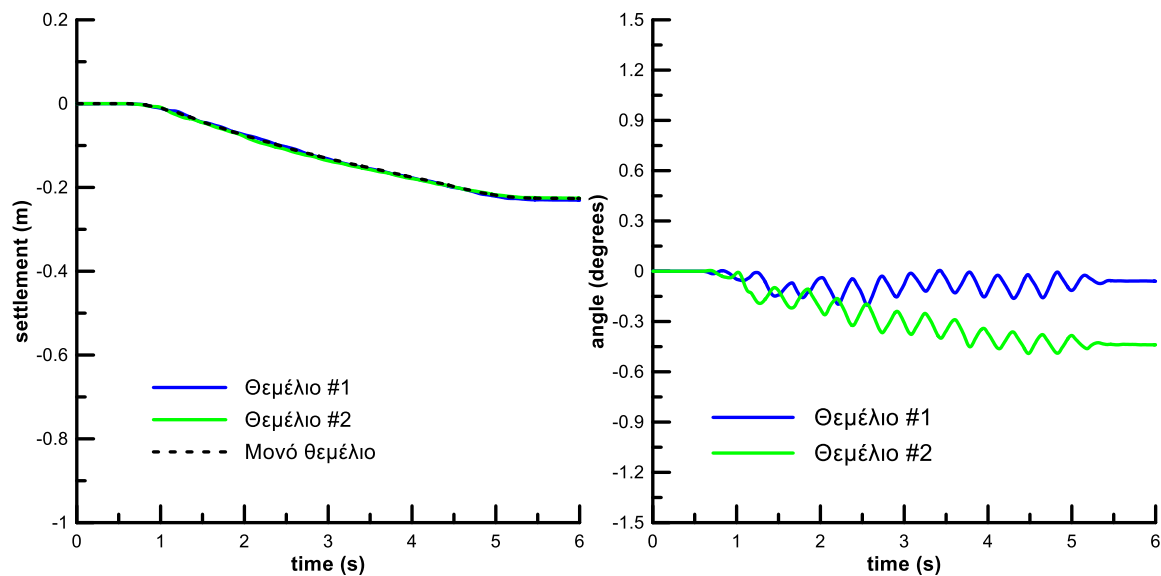


Σχήμα 4.6 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

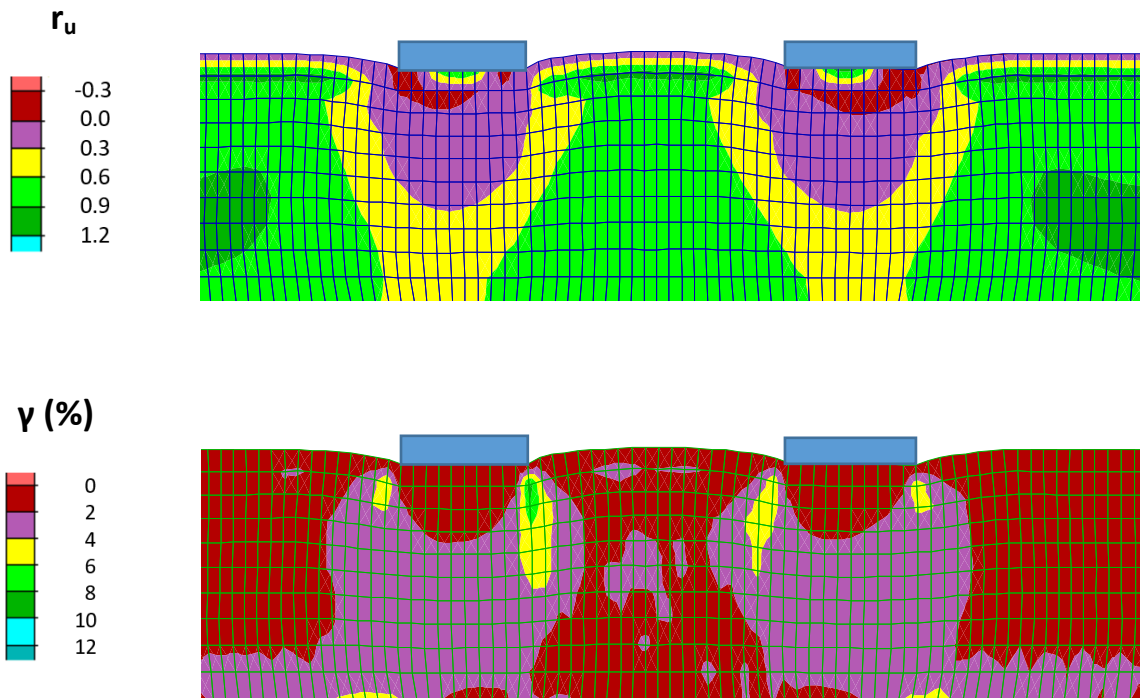
Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος των ως άνω δίδυμων θεμελίων με τη μέση ενδιάμεση απόσταση $D = B = 5.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Σε σύγκριση με το μονό θεμέλιο (**Σχήμα 4.4**) προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας (σε όρους γ) κάτω από κάθε δίδυμο θεμέλιο αρχίζει να μοιάζει με εκείνον του μονού, αλλά όχι τόσο το καθεστώς υπερπίεσεων (σε όρους r_u) που εξακολουθεί να ομοιάζει σχετικώς με εκείνο των δίδυμων θεμελίων σε μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5m$ (**Σχήμα 4.3**).

Τέλος, στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής των ίδιων δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με μεγάλη ενδιάμεση απόσταση $D = 2B = 10.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$, χρησιμοποιώντας την ίδια τυπική μορφή παρουσίασης. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι λόγω περαιτέρω αύξησης της ενδιάμεσης απόστασης εξαφανίζεται η ελαφρώς δυσμενής αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων σε όρους καθίζησης, καθώς τα δίδυμα θεμέλια έχουν και πάλι την ίδια καθίζηση με το μονό. Ούτε σε όρους στροφής δεν προκύπτουν ουσιώδεις τιμές.

Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος των ως άνω δίδυμων θεμελίων με τη μεγάλη ενδιάμεση απόσταση $D = 2B = 10.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Σε σύγκριση με το μονό θεμέλιο (**Σχήμα 4.4**) προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας (σε όρους γ) κάτω από κάθε δίδυμο θεμέλιο πρακτικώς ταυτίζεται με εκείνον του μονού, καθώς δεν υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ τους. Το ίδιο ισχύει πρακτικώς και για το καθεστώς υπερπίεσεων (σε όρους r_u) που πλέον δεν ομοιάζει με εκείνο των δίδυμων θεμελίων σε μικρή ή μέση ενδιάμεση απόσταση, αλλά με εκείνο του μονού θεμελίου.



Σχήμα 4.7 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

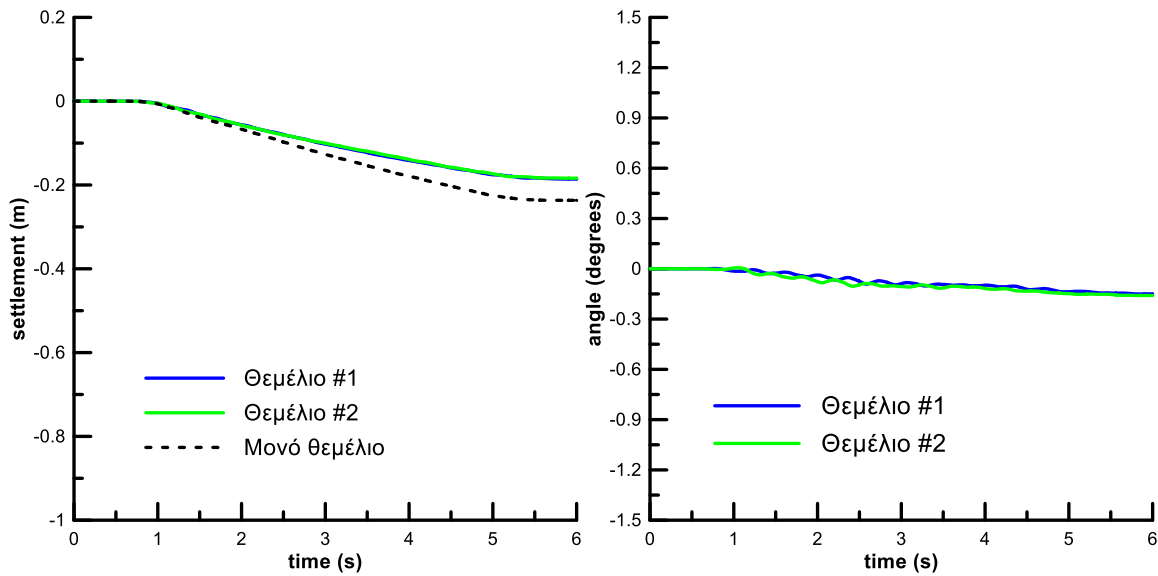


Σχήμα 4.8 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

4.2.2 Απόκριση ευρέων θεμελίων

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση σε όρους καθιζήσεων, στροφών, υπερπίεσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων για την επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης D στην αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων με $q = 100\text{kPa}$, όχι όμως στενών ($B = 5\text{m}$) αλλά ευρέων ($B = 20\text{m}$). Η ενδιάμεση απόσταση D ποσοτικοποιείται σε όρους D/B , και όχι σε απόλυτες τιμές της D , συνεπώς το ενδιαφέρον εστιάζεται σε αποστάσεις μεταξύ των ευρέων δίδυμων θεμελίων ίσων με $D = 0.5B = 10\text{m}$, $D = B = 20\text{m}$ και $D = 2B = 40\text{m}$. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη επιτάχυνση παραμένει ίση με $a_{\max} = 0.2g$, όπως και στα στενά θεμέλια.

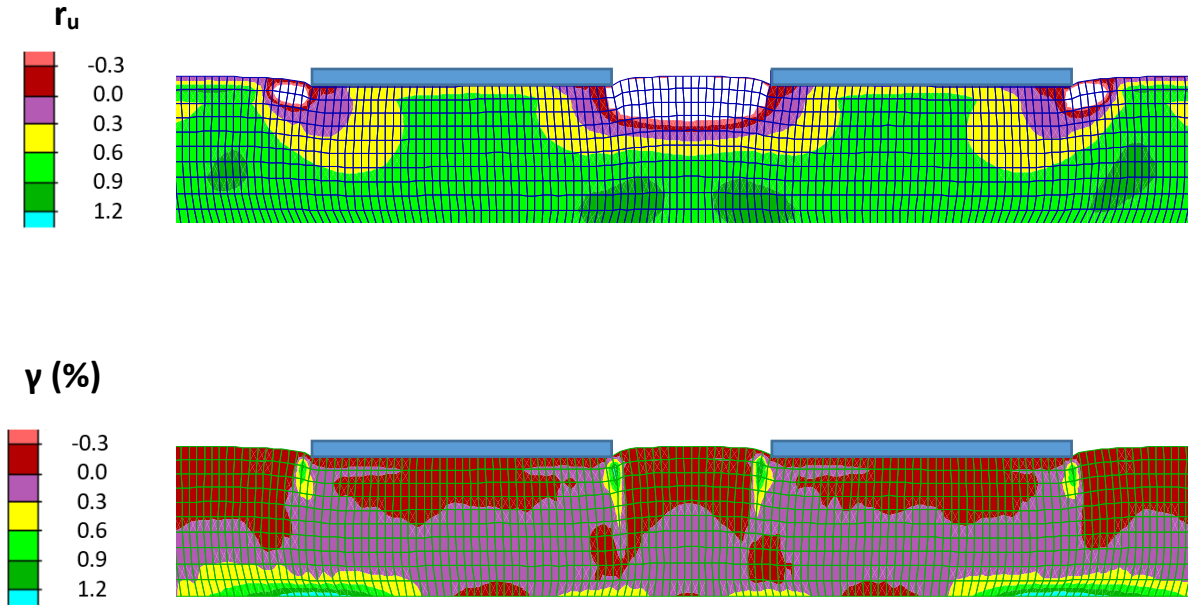
Σε αντίθεση με τα στενά θεμέλια, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.9, 4.12 και 4.14 που παρουσιάζουν τις ιστορίες καθιζήσεων και στροφών, η παρουσία δύο παραπλήσιων θεμελιολωρίδων μεγάλου εύρους οδηγεί σε μικρότερες ή ίσες καθιζήσεις από εκείνες ενός αντίστοιχου μονού. Ειδικότερα, η ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων είναι μέγιστη για την μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = B/2$ (Σχήμα 4.9), φθίνει με την αύξηση της απόστασης σε $D = B$ και εξαφανίζεται σε ενδιάμεση απόσταση $D=2B$ (Σχήμα 4.14).



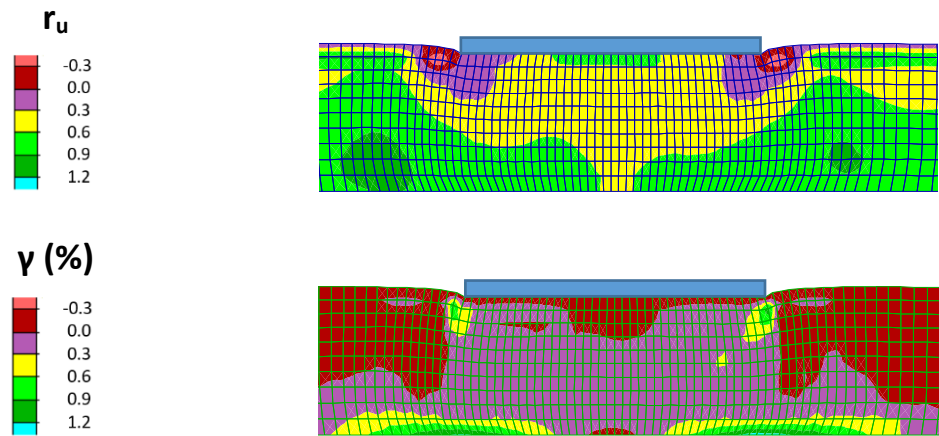
Σχήμα 4.9 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Σε όρους στροφής δεν υπάρχουν σημαντικές παρατηρήσεις, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις τα δίδυμα θεμέλια έχουν μια ελάχιστη αποκλίνουσα στροφή, μικρότερη από εκείνη των στενών θεμελίων και άνευ πρακτικής σημασίας.

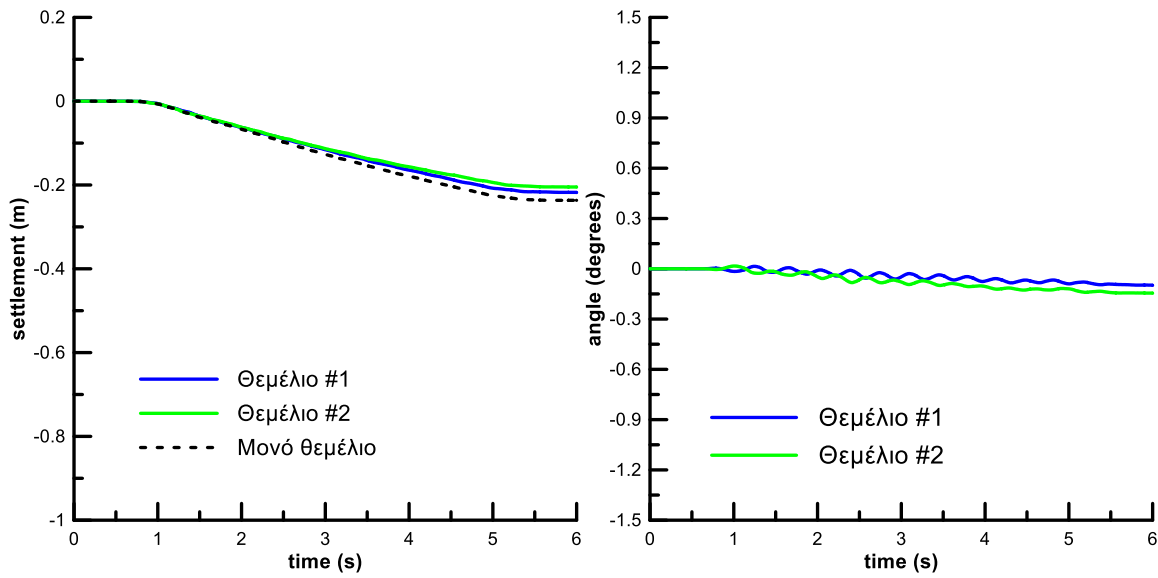
Επιπλέον, στα Σχήματα 4.10, 4.13 και 4.15 παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ εδάφους στο τέλος της διέγερσης ευρέων θεμελίων που βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις $D = 0.5B = 10\text{m}$, $D = B = 20\text{m}$ και $D = 2B = 40\text{m}$, αντίστοιχα. Η εικόνα των ισοκαμπυλών είναι συγκρίσιμη με εκείνη για το μονό ευρύ θεμέλιο υπό το ίδιο φορτίο $q = 100\text{kPa}$ και την ίδια διέγερση (με $a_{\max} = 0.2g$) στο Σχήμα 4.11. Λόγω του μεγάλου εύρους B συγκριτικά με το πάχος H της εδαφικής στρώσης, ο μηχανισμός αστοχίας (σε όρους γ) φτάνει μέχρι τον πυθμένα της στρώσης, ενώ οι υπερπιέσεις πόρων (σε όρους r_u) είναι αρκετά μειωμένες όταν το θεμέλιο είναι μονό (Σχήμα 4.11). Η εικόνα είναι εντελώς ταυτόσημη κάτω από κάθε δίδυμο θεμέλιο σε μεγάλη ενδιάμεση απόσταση $D=2B$ (Σχήμα 4.15). Όσο πλησιάζουν τα δύο θεμέλια, στην περιοχή ανάμεσά τους οι υπερπιέσεις μειώνονται και γίνονται και αρνητικές για $D/B = 0.5$ (Σχήμα 4.10). Το ίδιο συμβαίνει και κάτω από τις ακμές των θεμελίων. Αποτέλεσμα αυτού, οι καθιζήσεις των δίδυμων θεμελίων να μειώνονται όσο πλησιάζουν τα δύο θεμέλια.



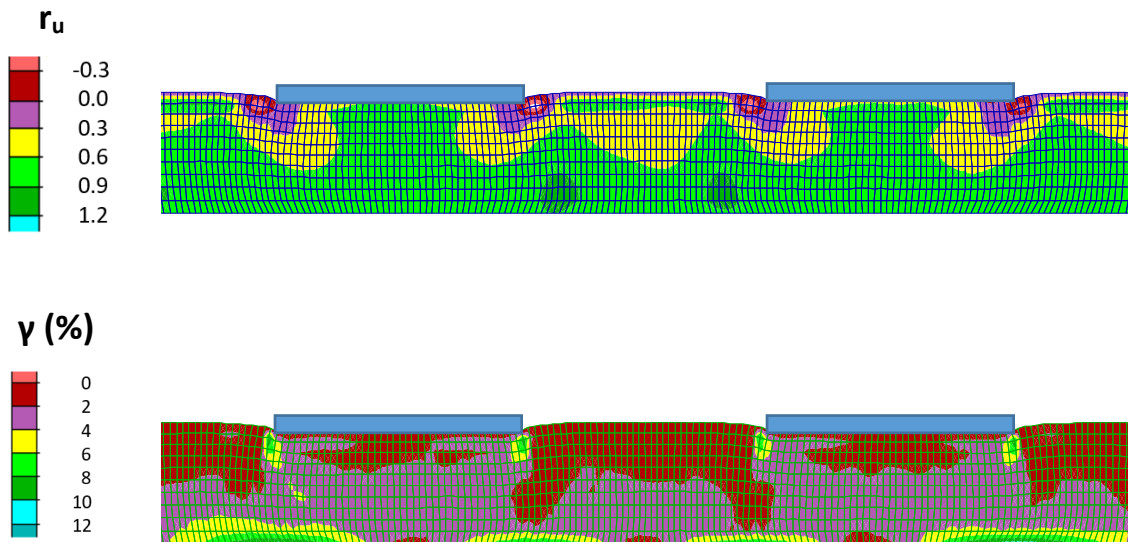
Σχήμα 4.10 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



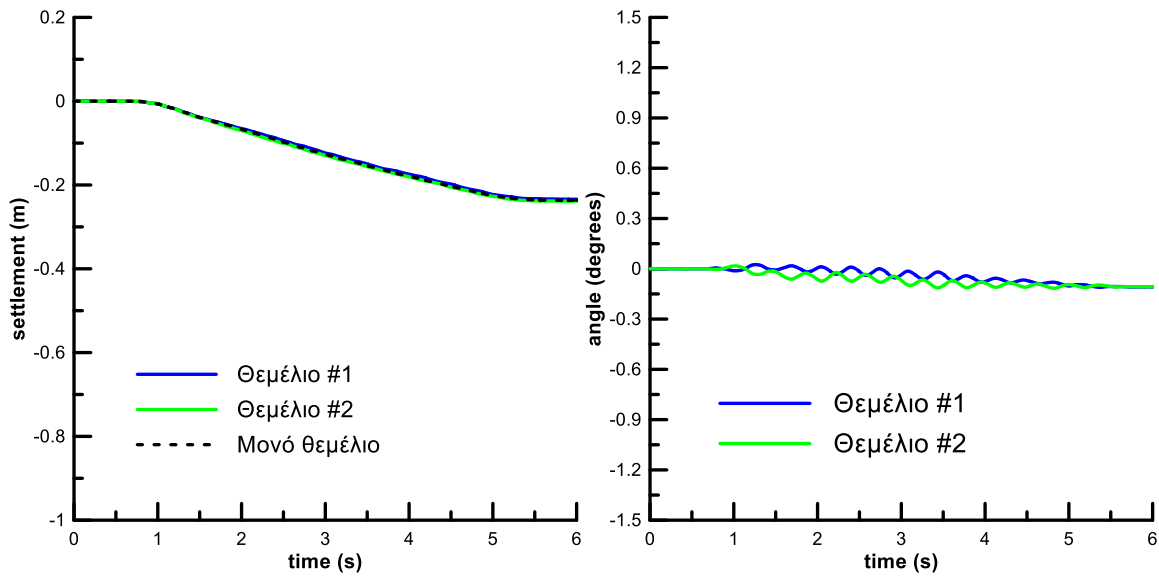
Σχήμα 4.11 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



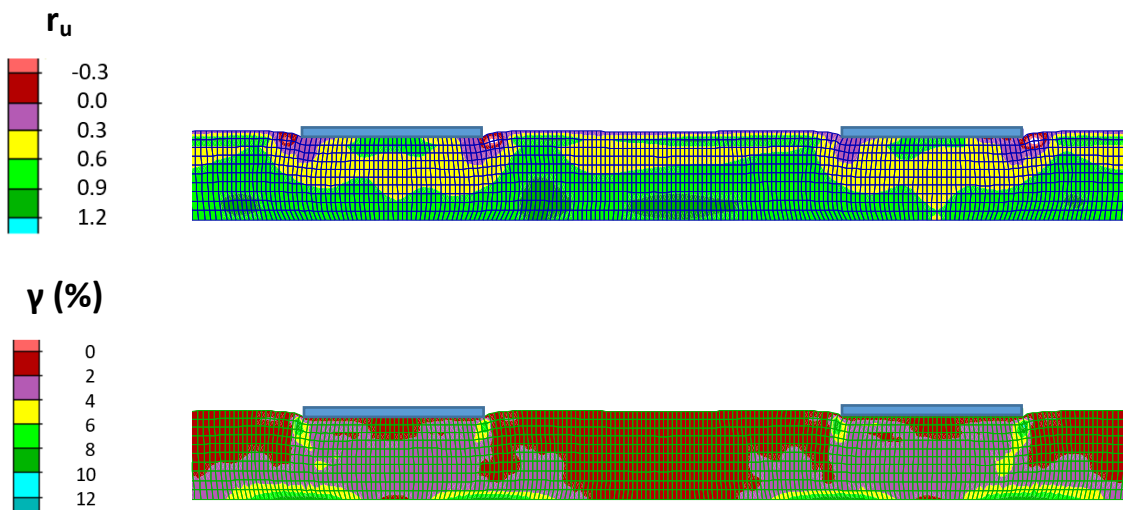
Σχήμα 4.12 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=20m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα 4.13 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=20m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



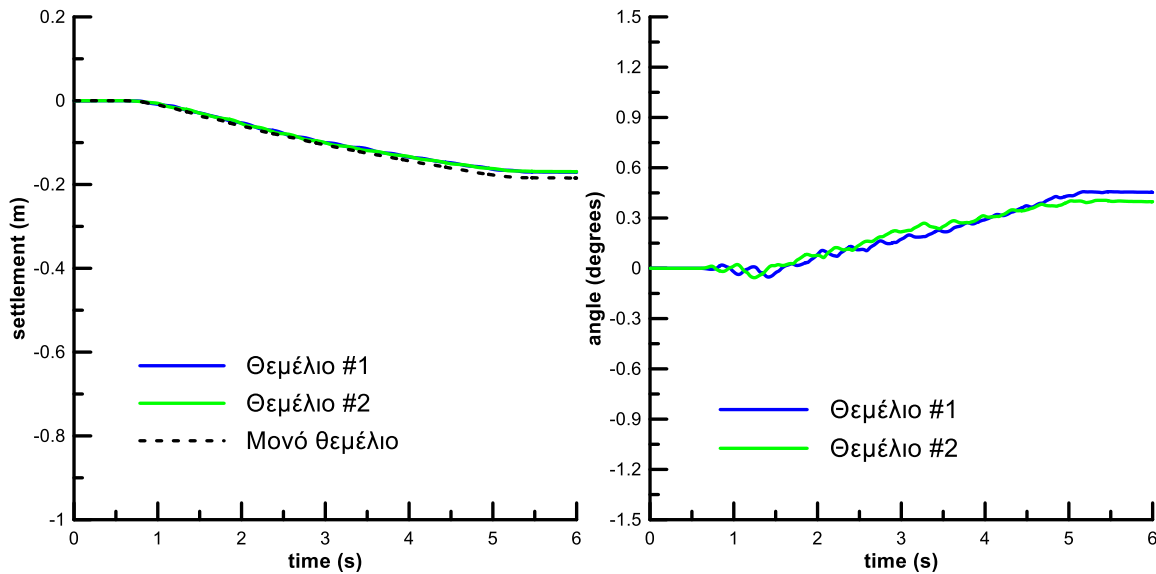
Σχήμα 4.14 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=40m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα 4.15 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=40m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

4.2.3 Επίδραση φορτίου θεμελίων

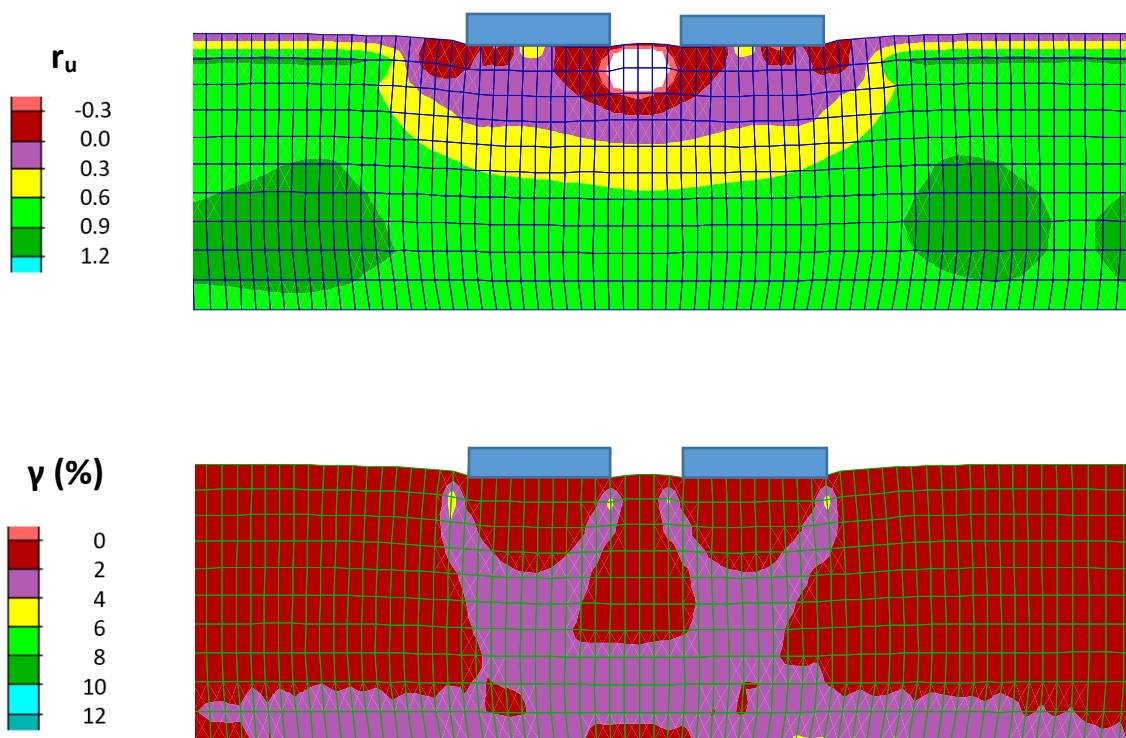
Στην παρούσα παράγραφο διερευνάται η επίδραση του κοινού φορτίου q των θεμελίων ίδιου εύρους στην αλληλεπίδρασή τους. Δεδομένου ότι η μέγιστη αλληλεπίδραση (δυσμενής για $B = 5\text{m}$ και ευμενής για $B = 20\text{m}$) για $q = 100\text{kPa}$ προκύπτει για $D/B = 0.5$, εδώ η επίδραση του φορτίου q παρουσιάζεται μόνο για αυτή τη μικρή απόσταση μεταξύ των δίδυμων θεμελίων. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα και για τις άλλες αποστάσεις D/B παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Α**.



Σχήμα 4.16 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

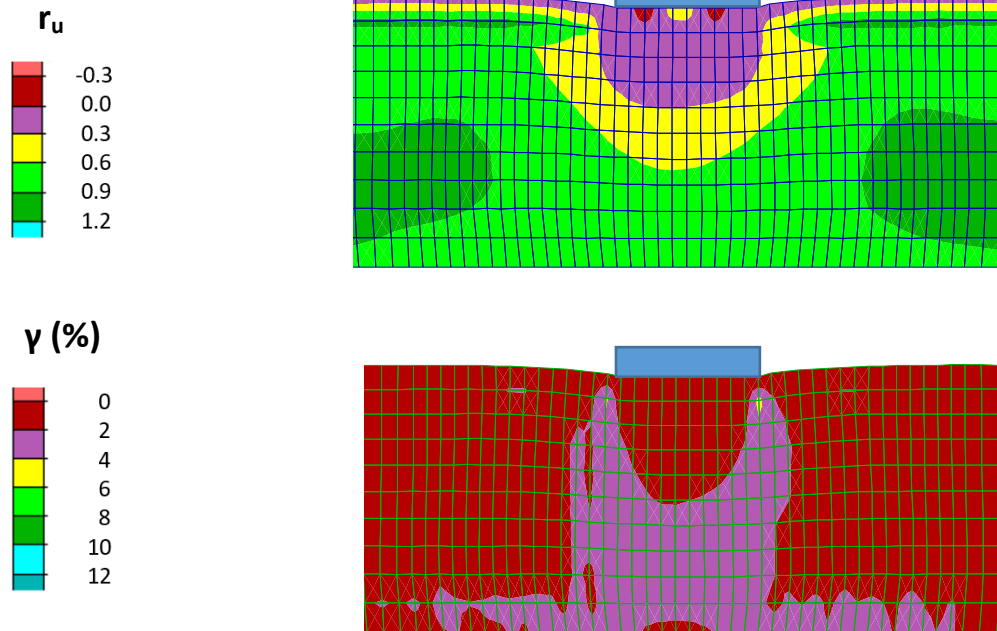
Διερευνάται η επίδραση του φορτίου q για τα στενά θεμέλια, και στη συνέχεια για τα ευρέα. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής θεμελίου $B = 5\text{m}$ για $q = 50\text{kPa}$, ενώ στο **Σχήμα 4.19** οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες για $q = 200\text{kPa}$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απευθείας συγκρίσιμα με εκείνα για $q = 100\text{kPa}$ στο **Σχήμα 4.2**. Όπως αναμένεται από τη βιβλιογραφία, αύξηση του φορτίου q για το ίδιο θεμέλιο και την ίδια διέγερση οδηγεί σε αύξηση της σεισμικής καθίζησής του, χωρίς αυτή η σχέση να είναι γραμμική. Αυτό οφείλεται στο ότι οι καθιζήσεις λόγω σεισμού είναι κυρίως θέμα διατμητικής αστοχίας, δύο φορές ανά κύκλο φόρτισης και η συσσώρευση ουσιαστικά γίνεται λόγω διαδοχικών στιγμιαίων απωλειών ισορροπίας στη λογική του ολισθαίνοντος στερεού.

Από εκεί και πέρα, προκύπτει ότι η δυσμενής αλληλεπίδραση για $q = 100\text{kPa}$, γίνεται ελαφρώς ευμενής για $q = 50\text{kPa}$ και έντονα δυσμενής για $q = 200\text{kPa}$. Επιπλέον ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι στροφές των θεμελίων, τα οποία συγκλίνουν ελαφρώς για $q = 50\text{kPa}$ και αποκλίνουν σημαντικά για $q = 200\text{kPa}$.

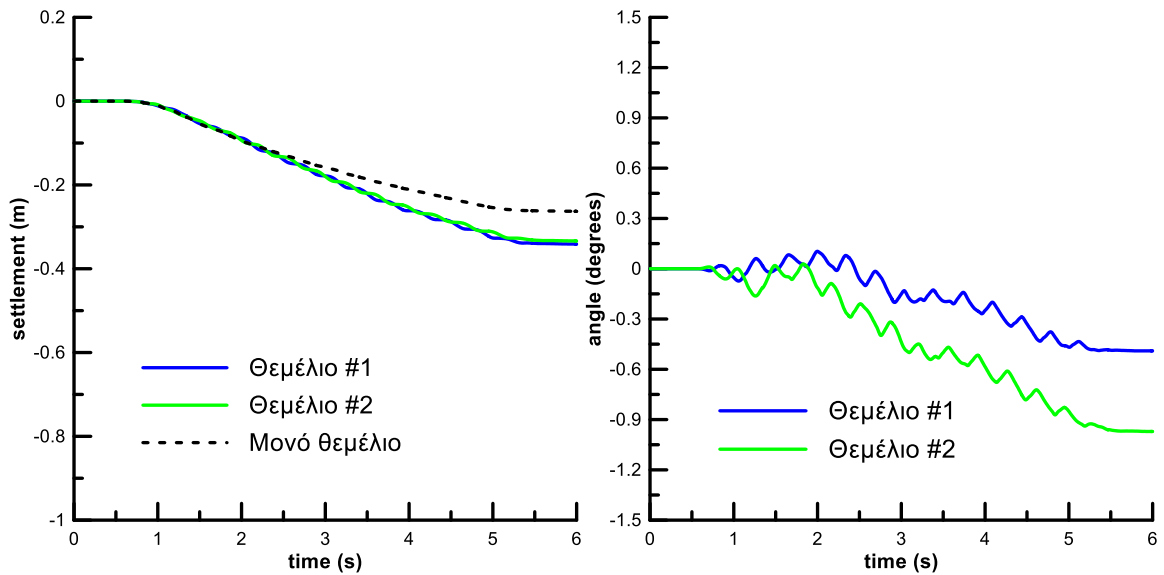


Σχήμα 4.17 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

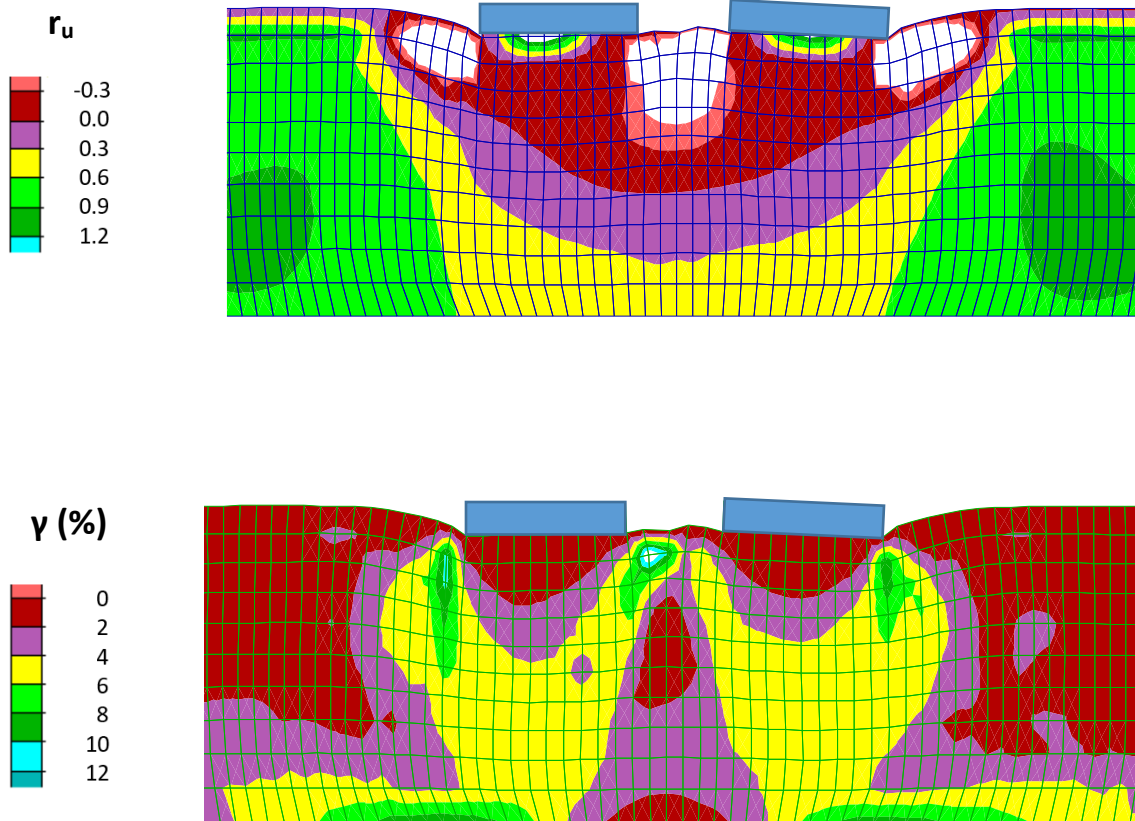
Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ στο έδαφος δίδυμων θεμελίων εύρους $B = 5m$ σε απόσταση $D/B = 0.5$ για $q = 50kPa$, ενώ στο **Σχήμα 4.20** οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για $q = 200kPa$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απευθείας συγκρίσιμα με εκείνα για τα ίδια στενά θεμέλια, στην ίδια μικρή απόσταση, αλλά με $q = 100kPa$ στο **Σχήμα 4.3**, αλλά και με τις αντίστοιχες ισοκαμπύλες αναφοράς για μονά στενά θεμέλια με $q = 50kPa$ (**Σχήμα 4.18**) και $q = 200kPa$ (**Σχήμα 4.21**). Συγκεκριμένα, για $q = 50kPa$ η ελαφρώς ευμενής αλληλεπίδραση θα πρέπει να σχετίζεται με την εντονότερη ρευστοποίηση σε μεγάλα βάθη κάτω από τα δίδυμα θεμέλια, γεγονός που θα οδήγησε σε απομείωση της επιτάχυνσης του θεμελίου και συνεπώς και της καθίζησής του. Αντίστοιχα, η δημιουργία ουσιαδούς συγκλίνουσας στροφής είναι αποτέλεσμα της ανομοιόμορφης κατανομής υπερπίεσεων κάτω από τα θεμέλια.



Σχήμα 4.18 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

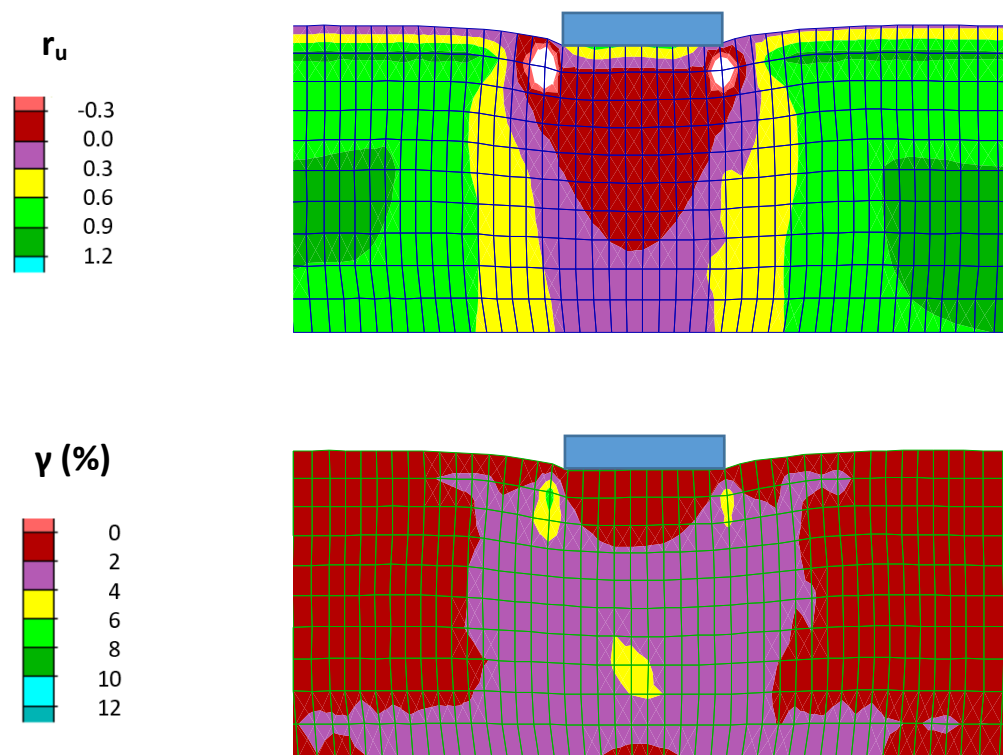


Σχήμα 4.19 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=200\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



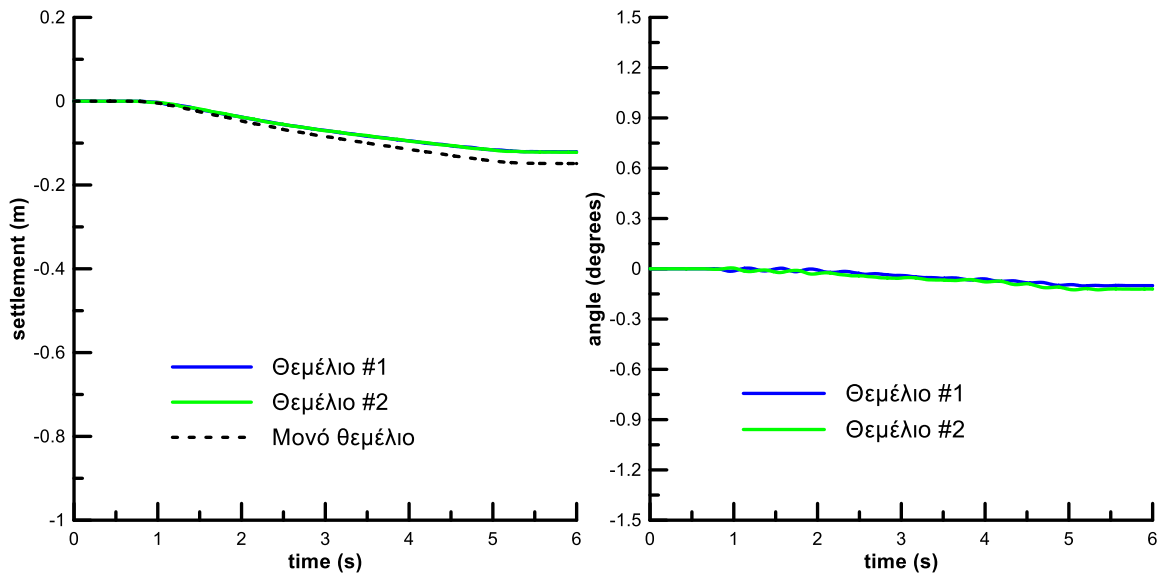
Σχήμα 4.20 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Αντίθετα, για $q = 200kPa$ η δυσμενής αλληλεπίδραση θα πρέπει να σχετίζεται με τις αυξημένες υπερπίεσεις πόρων ακριβώς κάτω από τα δίδυμα θεμέλια, γεγονός που θα οδήγησε σε μείωση της αντοχής του εδάφους και επακόλουθη αύξηση των καθιζήσεων. Αυτή η αύξηση αποτυπώνεται και με τη δημιουργία πολύ εντονότερων μηχανισμών αστοχίας κάτω από τα δίδυμα θεμέλια. Από την άλλη, η δημιουργία αποκλίνουσας στροφής θα πρέπει να αποδοθεί στην δημιουργία μιας ουσιώδους βάρους περιοχής με υποπίεσεις πόρων ($r_u < 0$) ανάμεσα στα δύο θεμέλια, που έκανε αυτή την περιοχή να εμφανίσει αύξηση διατμητικής αντοχής και συνεπώς να οδηγήσει σε αποκλίνουσες στροφές τα δύο θεμέλια.

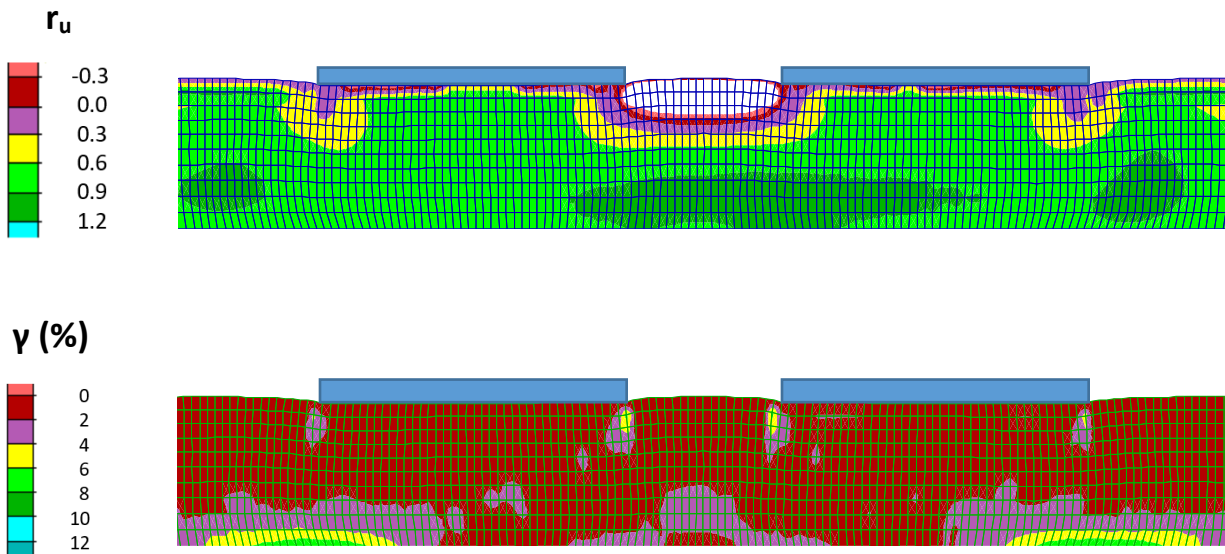


Σχήμα 4.21 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μόνο θεμέλιο (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

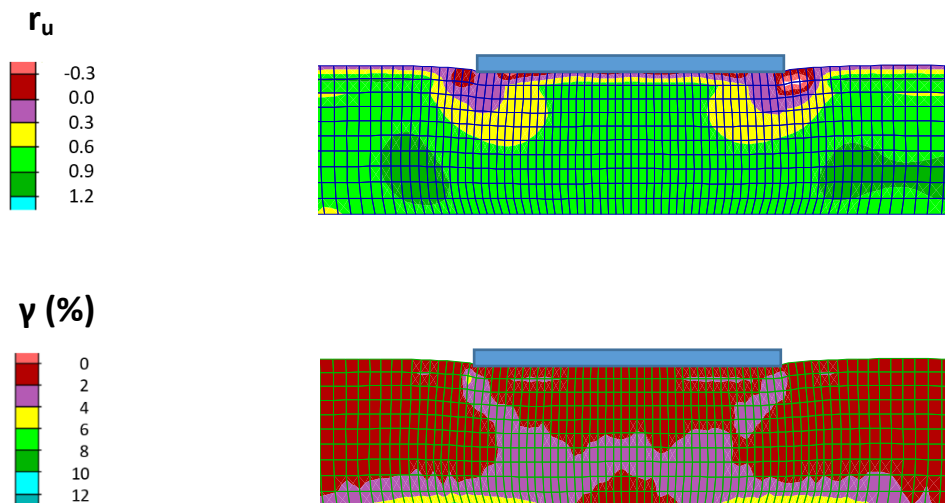
Στη συνέχεια, διερευνάται η επίδραση του φορτίου q για τα ευρέα θεμέλια. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.22** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής θεμελίου $B = 20m$ για $q = 50kPa$, ενώ στο **Σχήμα 4.25** οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες για $q = 200kPa$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απευθείας συγκρίσιμα με εκείνα για $q = 100kPa$ στο **Σχήμα 4.9**. Όπως και για τα στενά θεμέλια, η αύξηση του φορτίου q για το ίδιο θεμέλιο και την ίδια διέγερση οδηγεί σε αύξηση της σεισμικής καθίζησής του. Το ζητούμενο εδώ όμως είναι η αλληλεπίδραση των θεμελίων, σε όρους καθιζήσεων και στροφών. Συγκεκριμένα, σε όρους καθιζήσεων, η αλληλεπίδραση προκύπτει (ελαφρώς) ευμενής, πρακτικά ανεξάρτητα από το φορτίο θεμελίου. Επιπλέον, οι στροφές των θεμελίων παραμένουν μικρές και αποκλίνουσες ανεξαρτήτως φορτίου q , με μια ελαφριά αύξηση με αύξηση του q .



Σχήμα 4.22 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



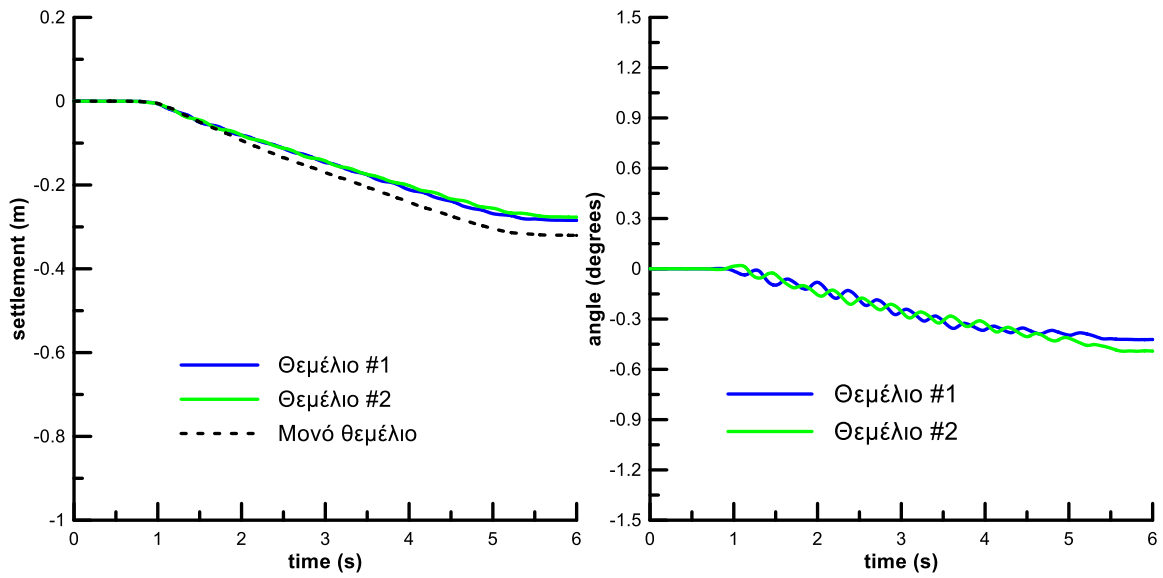
Σχήμα 4.23 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



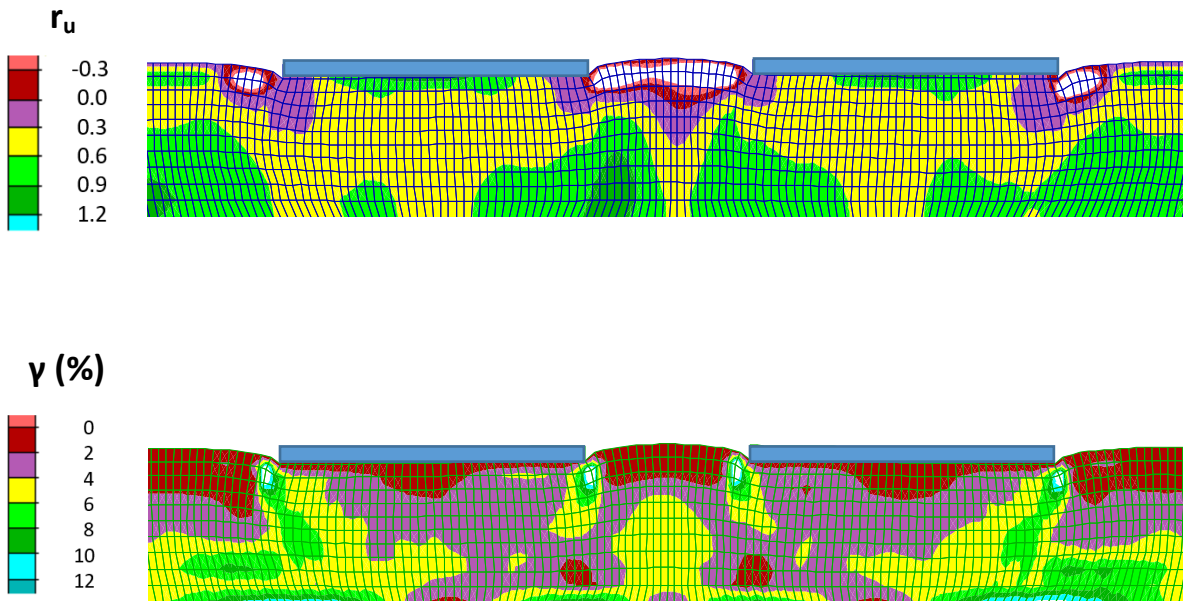
Σχήμα 4.24 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο (πλάτους $B=20\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=50\text{kPa}$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.23** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ στο έδαφος δίδυμων θεμελίων εύρους $B = 20\text{m}$ σε απόσταση $D/B = 0.5$ για $q = 50\text{kPa}$, ενώ στο **Σχήμα 4.26** οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για $q = 200\text{kPa}$. Φυσικά, τα αποτελέσματα αυτά είναι απευθείας συγκρίσιμα με εκείνα για τα ίδια ευρέα θεμέλια, στην ίδια μικρή απόσταση $D = 0.5B$, αλλά με $q = 100\text{kPa}$ στο **Σχήμα 4.10**, αλλά και τις αντίστοιχες ισοκαμπύλες αναφοράς για μονά ευρέα θεμέλια με $q = 50\text{kPa}$ (**Σχήμα 4.24**) και $q = 200\text{kPa}$ (**Σχήμα 4.27**). Συγκεκριμένα, για $q = 50\text{kPa}$ η ευμενής αλληλεπίδραση θα πρέπει να σχετίζεται με την εντονότερη ρευστοποίηση σε μεγάλα βάθη κάτω από τα δίδυμα θεμέλια, γεγονός που θα οδήγησε σε απομείωση της επιτάχυνσης του θεμελίου και συνεπώς και της καθίζησής του, όπως ακριβώς συνέβη και στα στενά θεμέλια. Αντίστοιχα, η δημιουργία μικρής αποκλίνουσας στροφής θα πρέπει να συσχετίζεται με την επιφανειακή περιοχή ανάμεσα στα δύο θεμέλια που εμφανίζει υποπιέσεις και συνεπώς επαυξημένη αντοχή, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπει η βύθιση των θεμελίων από την εσωτερική τους παρειά.

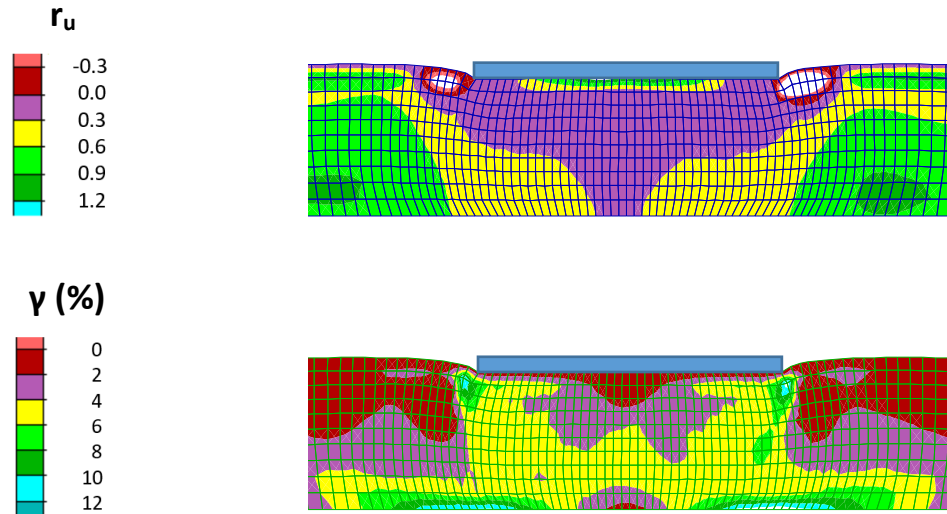
Το ίδιο πρέπει να συμβαίνει και για $q = 200\text{kPa}$, καθώς και πάλι προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση. Η διαφορά σε σχέση με τα στενά θεμέλια είναι ότι εδώ το πολύ μεγάλο εύρος θεμελίου, ο μηχανισμός αστοχίας είναι πρακτικώς κατακόρυφος, αφού φτάνει εύκολα μέχρι τον πυθμένα της ρευστοποιήσιμης στρώσης για όλες τις τιμές του q . Συνεπώς, δεν παίζει ρόλο η ακριβής τιμή του φορτίου q στην ανάπτυξη του μηχανισμού αστοχίας, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει για τα στενά θεμέλια. Συνεπώς, ποιοτικά η απόκριση τόσο σε όρους καθιζήσεων όσο και στροφών δεν επηρεάζεται από το φορτίο ευρέων θεμελίων.



Σχήμα 4.25 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα 4.26 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

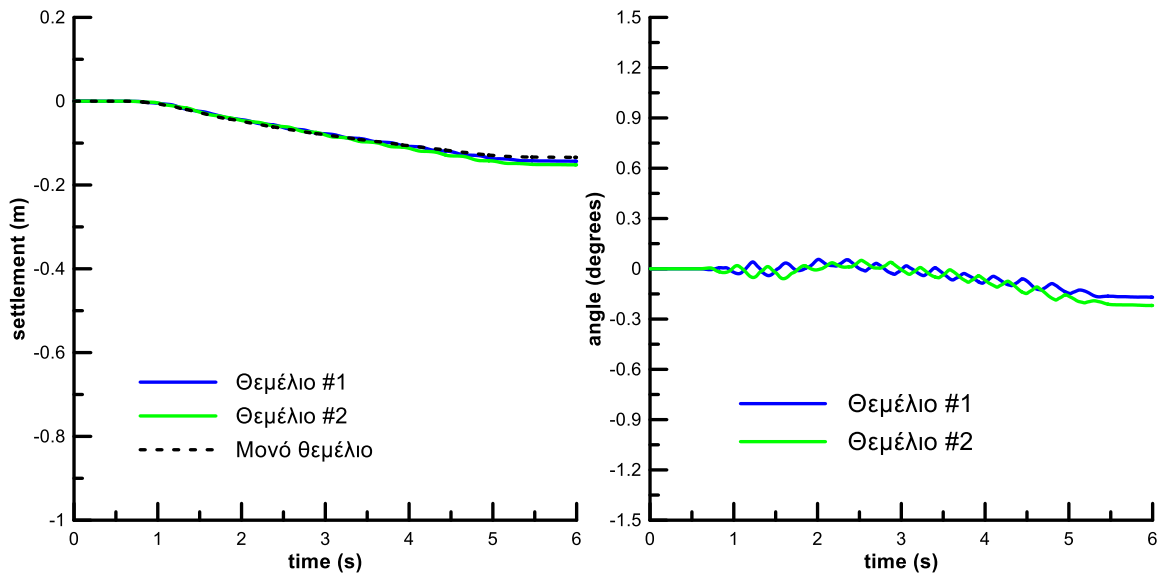


Σχήμα 4.27 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο (πλάτους $B=20\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=200\text{kPa}$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

4.2.4 Επίδραση έντασης διέγερσης

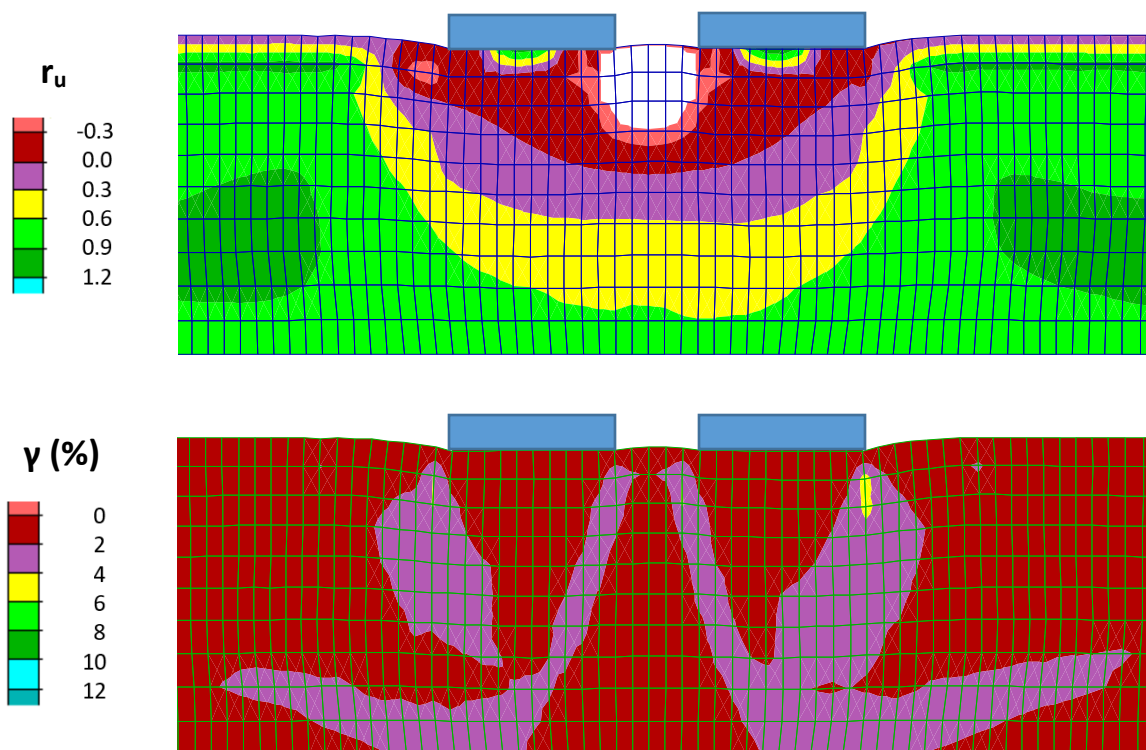
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα για στενά και ευρέα θεμέλια τοποθετημένα με ενδιάμεση απόσταση μεταξύ τους ίση με $D=0.5B$ για δύο διαφορετικές μέγιστες σεισμικές επιταχύνσεις, $0.1g$ και $0.4g$. Δηλαδή και πάλι διερευνάται εδώ μόνο η μικρή απόσταση μεταξύ θεμελίων, καθώς οι προηγούμενες αναλύσεις υποδεικνύουν ότι γι' αυτή προκύπτει η πιο έντονη αλληλεπίδρασή τους. Όμως έγιναν αναλύσεις και για τα τρία φορτία έδρασης q ($= 50\text{kPa}$, 100kPa και 200kPa) που διερευνώνται εδώ, αλλά χάριν συντομίας στην παρούσα παράγραφο εμφανίζονται μόνο τα αποτελέσματα για $q=100\text{kPa}$. Για τις λοιπές αναλύσεις για θεμέλια με διαφορετικά φορτία q , υπό διαφορετικές τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο **Παράρτημα Α**.

Συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 4.28** και **4.30** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφών για στενά θεμέλια ($B = 5\text{m}$) υπό φορτίο $q = 100\text{kPa}$ σε απόσταση $D/B = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο **Σχήμα 4.2**, για $a_{\max} = 0.2g$. Επιπλέον, στα **Σχήματα 4.29** και **4.31** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους ισοκαμπυλών συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ , για τα ίδια στενά θεμέλια ($B = 5\text{m}$) υπό φορτίο $q = 100\text{kPa}$ σε απόσταση $D/B = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα, με τα αποτελέσματα αυτά να είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο **Σχήμα 4.3** για $a_{\max} = 0.2g$.



Σχήμα 4.28 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.1g$

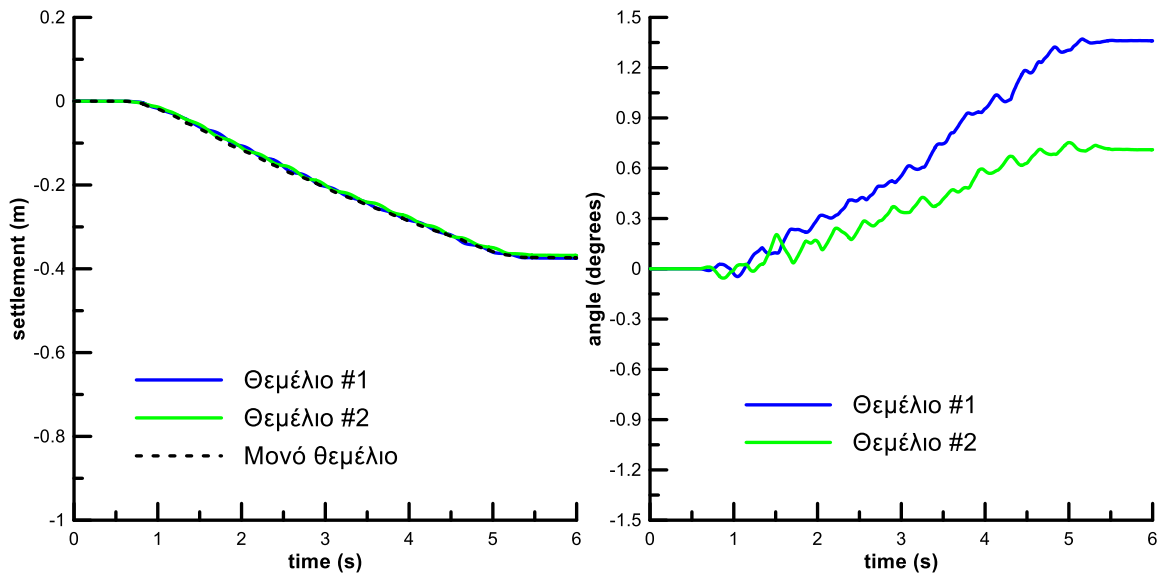
Προκύπτει αρχικώς ότι η αύξηση της επιτάχυνσης a_{\max} οδηγεί σε αύξηση των καθιζήσεων των θεμελίων, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Από εκεί και πέρα, παρατηρώντας τα **Σχήματα 4.28** και **4.30** φαίνεται ότι ο υποδιπλασιασμός της a_{\max} σχεδόν εκμηδένισε τη δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ενώ ο διπλασιασμός της a_{\max} πρακτικώς εξαφάνισε την εν λόγω αλληλεπίδραση. Από την άλλη, σε όρους στροφών, η μεγάλη τιμή επιτάχυνσης δημιουργεί συγκλίνουσες στροφές. Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση της a_{\max} δε δείχνει συστηματική στην αλληλεπίδραση των θεμελίων, αντίθετα από τη συστηματική αύξηση των καθιζήσεων των μονών θεμελίων.



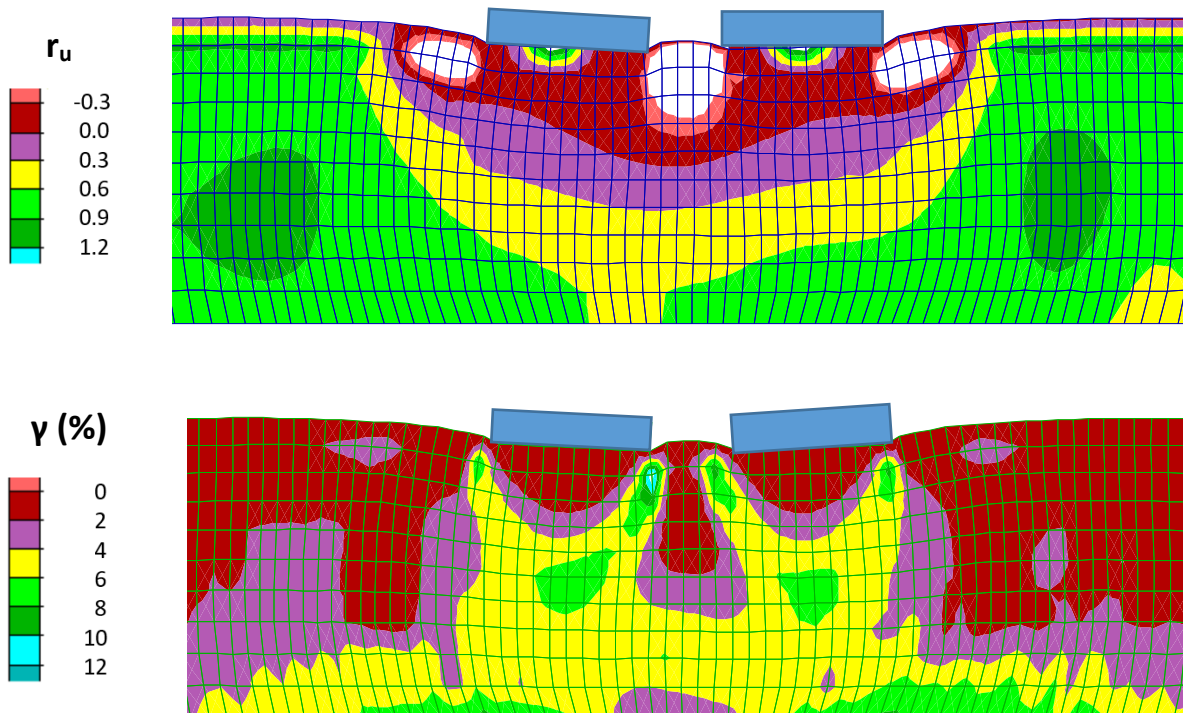
Σχήμα 4.29 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.1g$

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων στα Σχήματα 4.3, 4.29 και 4.31 προκύπτει μεγάλη επίδραση στις ισοκαμπύλες συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ λόγω αύξησης της επιτάχυνσης a_{\max} , αλλά ασαφής επίδραση στην αλληλεπίδραση των στενών θεμελίων αυτών.

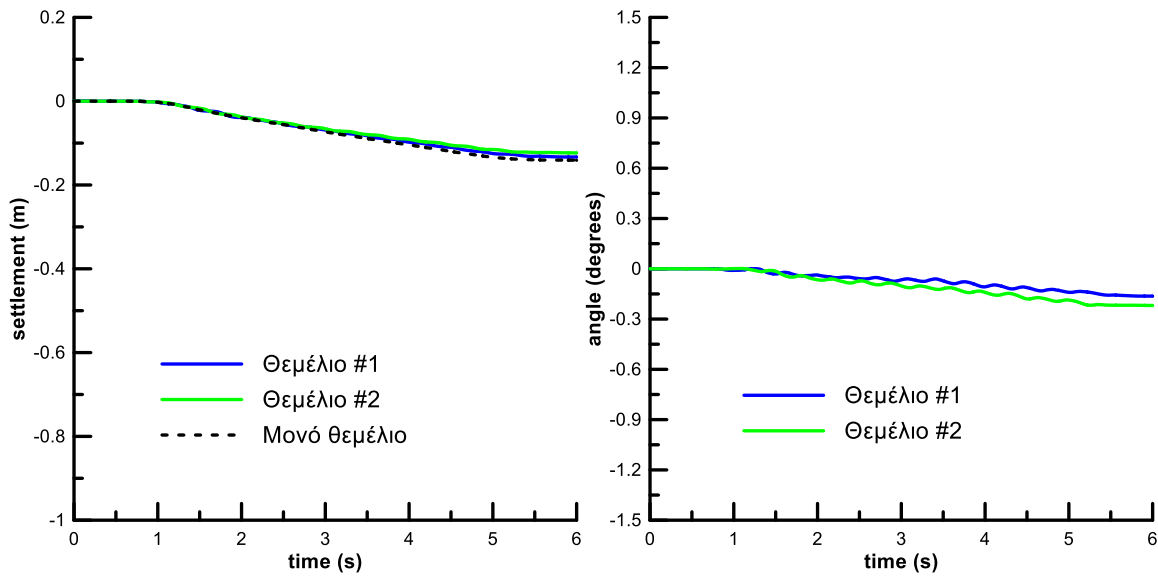
Στη συνέχεια, η επίδραση της a_{\max} διερευνάται στην αλληλεπίδραση ευρέων θεμελίων. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 4.32 και 4.34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφών για ευρέα θεμέλια ($B = 20\text{m}$) υπό φορτίο $q = 100\text{kPa}$ σε απόσταση $D/B = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο Σχήμα 4.9 για $a_{\max} = 0.2g$. Επιπλέον, στα Σχήματα 4.33 και 4.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους ισοκαμπυλών συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ , για τα ίδια ευρέα θεμέλια ($B = 20\text{m}$) υπό φορτίο $q = 100\text{kPa}$ σε απόσταση $D/B = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα, με τα αποτελέσματα αυτά να είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο Σχήμα 4.10 για $a_{\max} = 0.2g$.



Σχήμα 4.30 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$

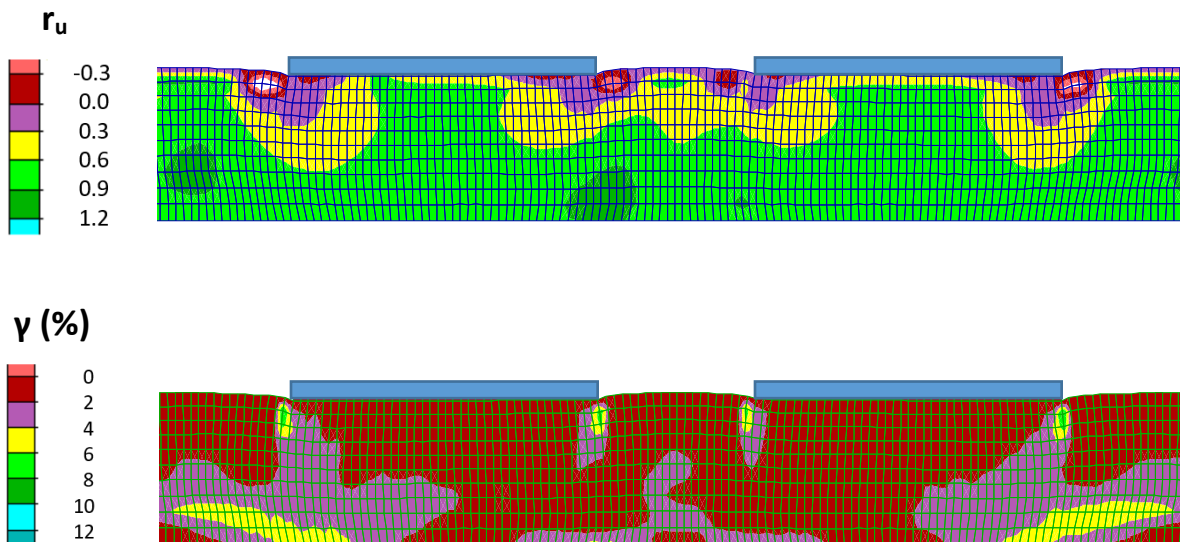


Σχήμα 4.31 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$

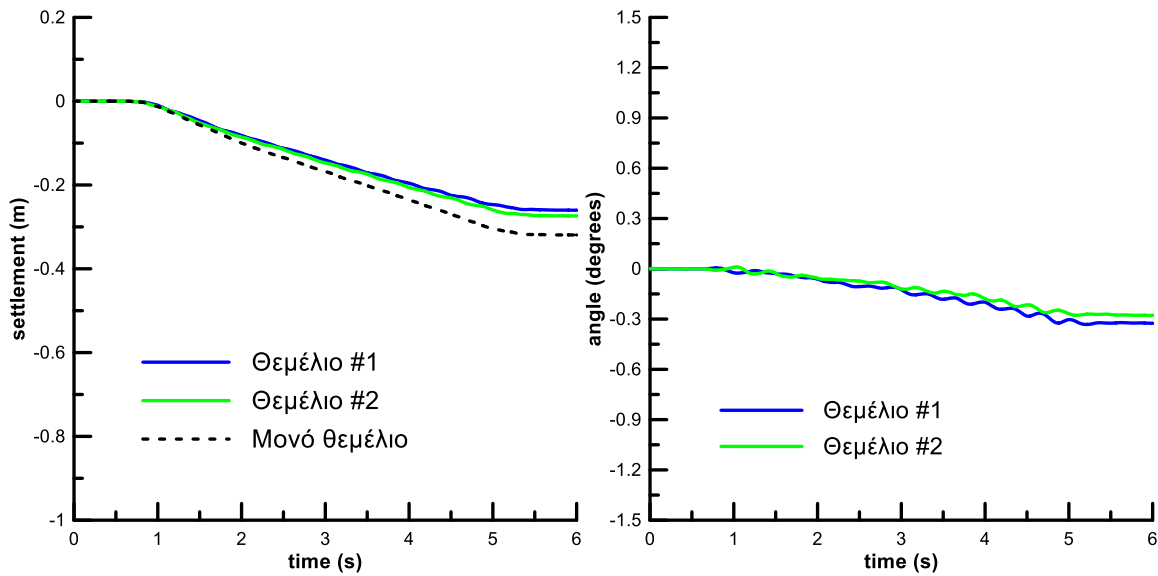


Σχήμα 4.32 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$

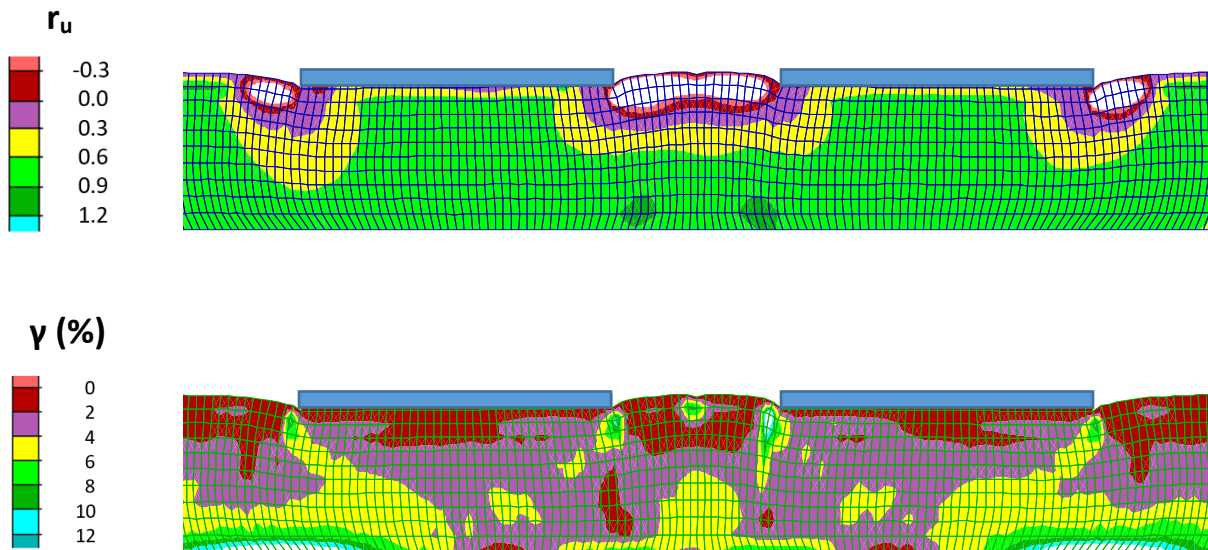
Όπως και για τα στενά θεμέλια, η αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} αυξάνει τις καθιζήσεις. Σε όρους αλληλεπίδρασης όμως, ο υποδιπλασιασμός της a_{max} οδήγησε σε απομείωση της ευμενούς αλληλεπίδρασης, ενώ ο διπλασιασμός της την επανέφερε. Με άλλα λόγια, η επίδραση της a_{max} στην αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων δεν είναι συστηματική. Σε όρους στροφών, καθώς πρόκειται για ευρέα θεμέλια, οι στροφές είναι γενικώς μικρές και αποκλίνουσες, χωρίς σαφή επίδραση της a_{max} στις τιμές τους.



Σχήμα 4.33 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$



Σχήμα 4.34 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$



Σχήμα 4.35 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων στα Σχήματα 4.10, 4.44 και 4.35 προκύπτει μεγάλη επίδραση στις ισοκαμπύλες συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ λόγω αύξησης της επιτάχυνσης a_{max} , αλλά ασαφής επίδραση στην αλληλεπίδραση των ευρέων θεμελίων αυτών λόγω a_{max} .

4.3 Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού φορτίου

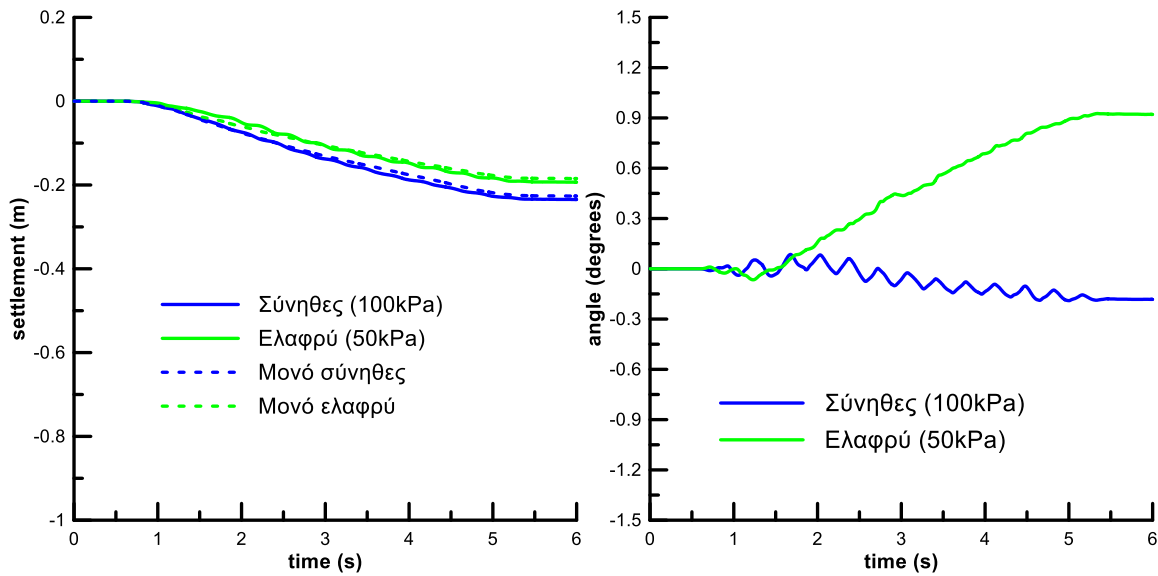
Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η σεισμική απόκριση κυρίως σε όρους καθιζήσεων και στροφών ζεύγους θεμελιολωρίδων ίδιου εύρους υποβαλλόμενων σε σεισμική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης 0.2g για διαφορετικές τιμές φορτίων έδρασης $q_1 \neq q_2$. Αρχικά εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί φορτίσεων ($q_1=100\text{kPa}$ και $q_2=50\text{kPa}$, $q_1=100\text{kPa}$ και $q_2=200\text{kPa}$, $q_1=50\text{kPa}$ και $q_2=200\text{kPa}$) για στενά και στη συνέχεια για ευρέα θεμέλια. Το θεμέλιο με το φορτίο αναφοράς $q=100\text{kPa}$ αποκαλείται σύνηθες, ενώ ελαφρύ και βαρύ θεμέλιο αποκαλούνται εκείνα με υποδιπλάσιο $q=50\text{kPa}$ και διπλάσιο φορτίο $q=200\text{kPa}$, αντίστοιχα. Στόχος είναι η ποσοτικοποίηση της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης μεταξύ στενών και ευρέων θεμελίων, όταν αυτά δεν είναι δίδυμα, καθώς έχουν διαφορετικό φορτίο. Οι παράμετροι ενδιαφέροντος είναι η απόσταση D/B των θεμελίων ίδιου εύρους B και τα φορτία αυτών. Πρόκειται για ένα πρόβλημα πιο περίπλοκο από εκείνο της παραγράφου 4.2, όπου το φορτίο q ήταν ίδιο στο ζεύγος θεμελίων ίδιου εύρους, και γι' αυτό αποκαλούνταν δίδυμα.

Για κάθε ζεύγος θεμελίων παρουσιάζονται εδώ μόνο τα αποτελέσματα για τη μικρή ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B$ όπου η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη. Για τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες αποστάσεις D/B θεμελίων ίδιου εύρους με διαφορετικού φορτίου, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο **Παράρτημα Α**.

4.3.1 Απόκριση στενών θεμελίων

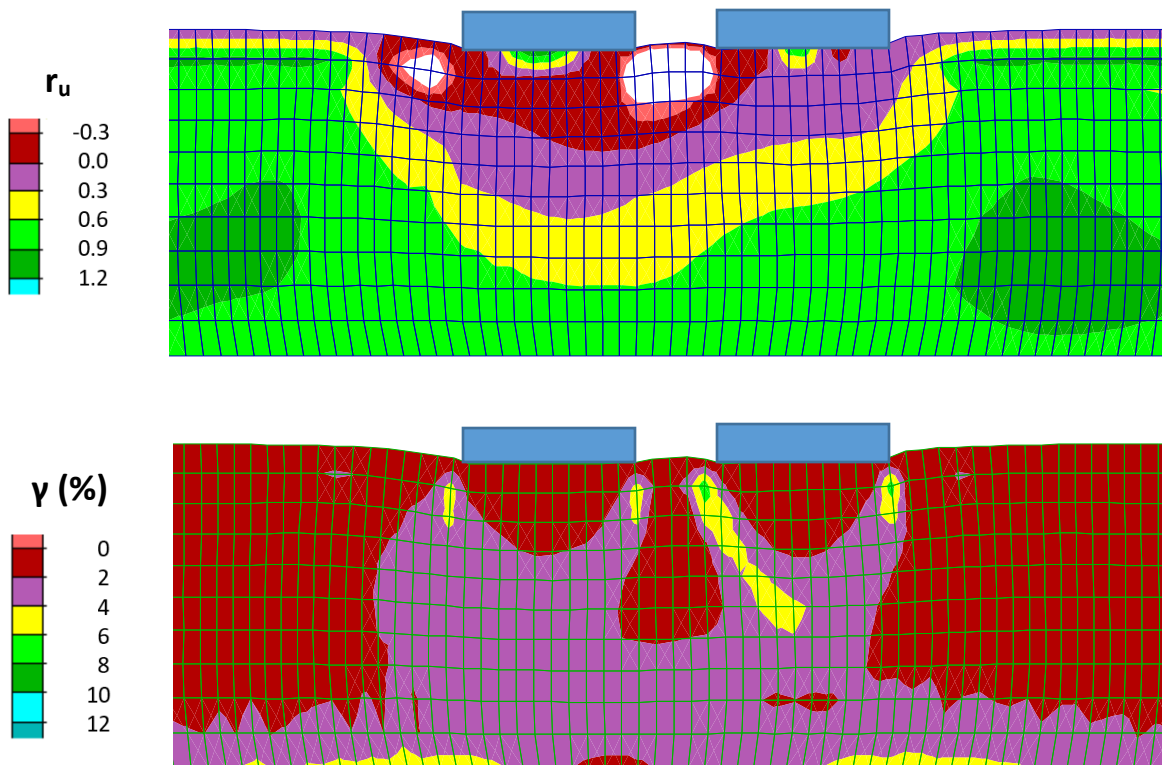
Στο **Σχήμα 4.36** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθιζήσης και στροφής ζεύγους στενών θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$), ενός συνήθους ($q = 100\text{kPa}$) κι ενός ελαφρύ ($q = 50\text{kPa}$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$. Χάρην σύγκρισης, με διακεκομμένες καμπύλες ίδιου χρώματος παρουσιάζονται και οι χρονοϊστορίες καθιζήσης των αντίστοιχων μονών θεμελίων πλάτους $B = 5\text{m}$ και ίδιου φορτίου $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση, ενώ οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες στροφής μονών θεμελίων είναι πρακτικώς μηδενικές (και δεν παρουσιάζονται). Αυτή είναι η τυπική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε όρους χρονοϊστοριών και ακολουθείται σε όλη την παράγραφο 4.3.

Από τη σύγκριση προκύπτει ότι το σύνηθες θεμέλιο καθιζάνει περισσότερο από το ελαφρύ, κι ότι η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσης είναι πολύ ελαφρώς δυσμενής και για τα δύο. Αντιθέτως, η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη σε όρους στροφής, καθώς το ελαφρύ θεμέλιο στρέφεται έντονα προς την πλευρά του συνήθους. Το σύνηθες θεμέλιο εμφανίζει πολύ μικρή αποκλίνουσα στροφή. Αυτή η διαφορά στη στροφή είναι μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τα αποτελέσματα της παραγράφου 4.2.



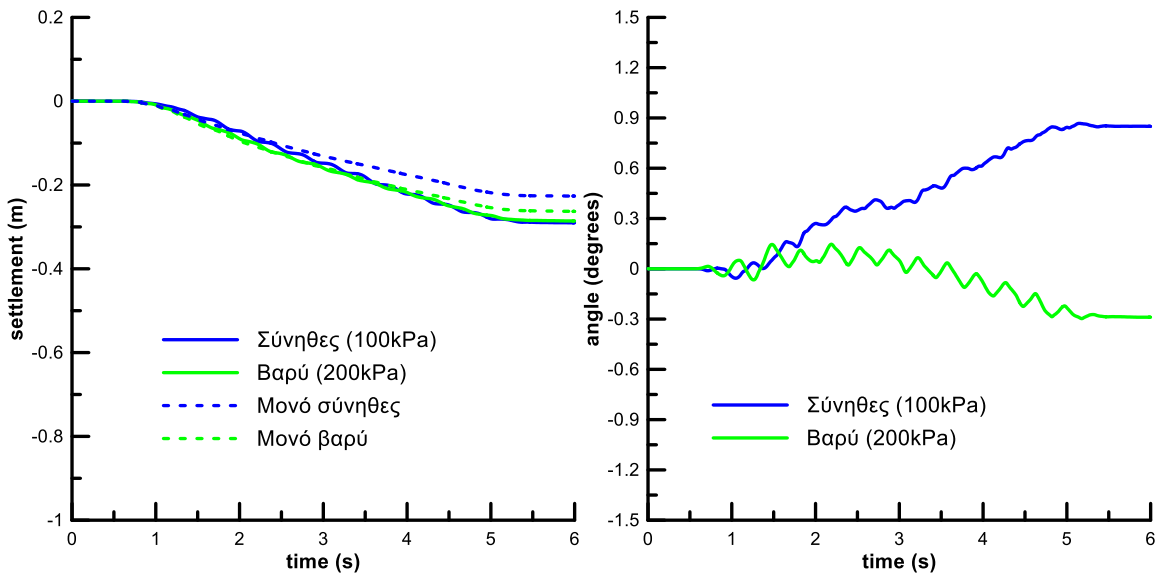
Σχήμα 4.36 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στο **Σχήμα 4.37** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος ζεύγους στενών θεμελίων (πλάτους $B = 5m$), ενός συνήθους ($q = 100kPa$) κι ενός ελαφρύ ($q = 50kPa$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Για να διευκολύνεται η σύγκριση, η χρωματική κλίμακα μεταβολής του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ είναι η ίδια στο σχήμα αυτό, όπως και σε όλο το κεφάλαιο. Προκύπτει σαφώς διαφορετικό προφίλ υπερπιέσεων κάτω από τα δύο θεμέλια, με το σύνηθες να έχει μικρότερες τιμές όπως συμβαίνει και στα μονά θεμέλια διαφορετικού φορτίου. Αντίστοιχα προκύπτει και διαφορετικός μηχανισμός αστοχίας, που μοιάζει συμμετρικός για το σύνηθες, αλλά σαφώς μη συμμετρικός για το ελαφρύ, γεγονός που σχετίζεται με τη στρόφη του εν λόγω θεμελίου προς το σύνηθες.

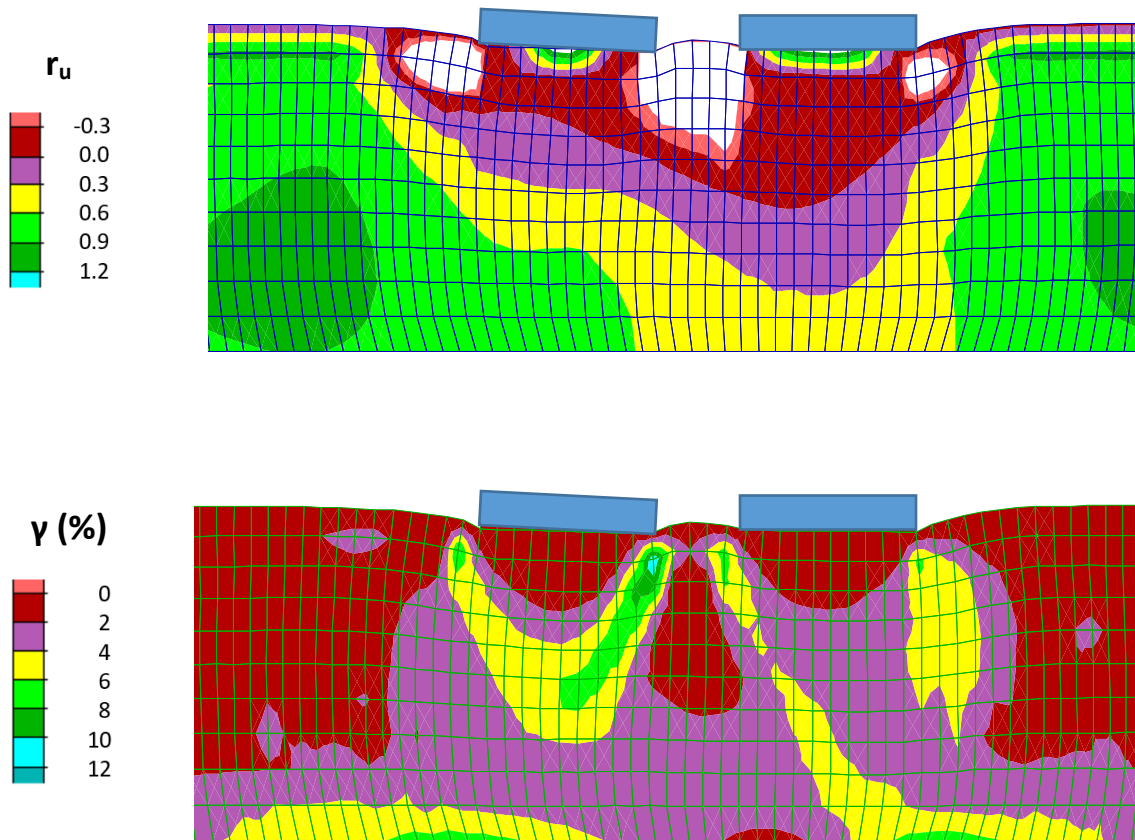


Σχήμα 4.37 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίων έδρασης $q_1=100\text{kPa}$, $q_2=50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.38** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής ζεύγους στενών θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$), ενός συνήθους ($q = 100\text{kPa}$) κι ενός βαρύ ($q = 50\text{kPa}$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι σύννηθες θεμέλιο καθιζάνει λιγότερο από το βαρύ, κι ότι η αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης είναι δυσμενής και για τα δύο. Αντιθέτως, η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη σε όρους στροφής, καθώς το σύννηθες θεμέλιο στρέφεται έντονα προς την πλευρά του βαρύ, ενώ το βαρύ θεμέλιο εμφανίζει μικρή αποκλίνουσα στροφή. Έτσι, όπως και στο **Σχήμα 4.36**, η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων είναι (ελαφρώς) δυσμενής και το σχετικά ελαφρύτερο θεμέλιο στρέφεται προς το σχετικά βαρύτερο.

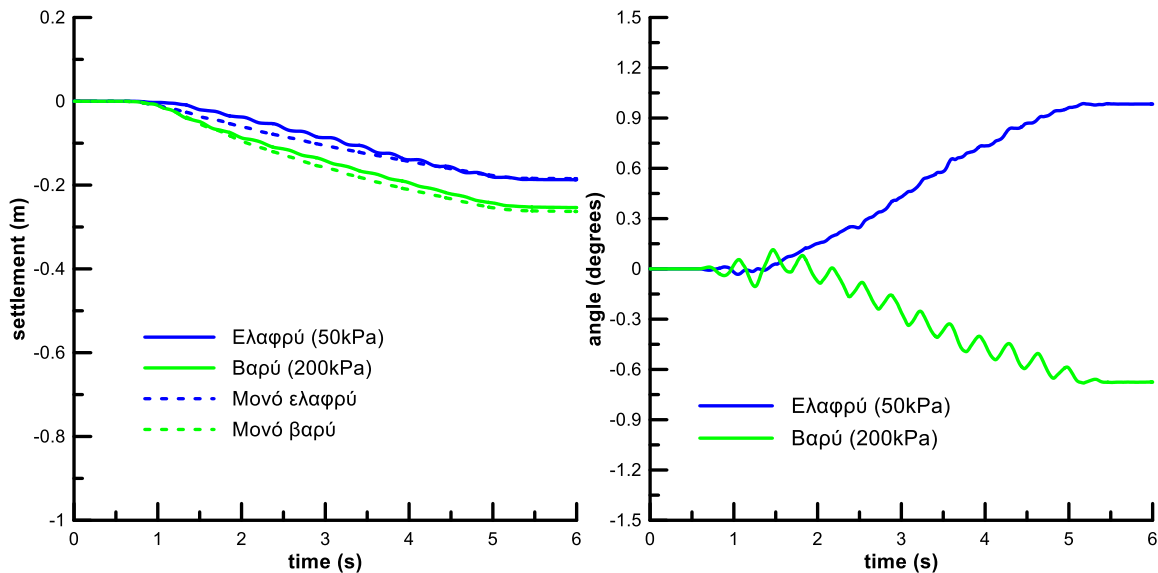


Σχήμα 4.38 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



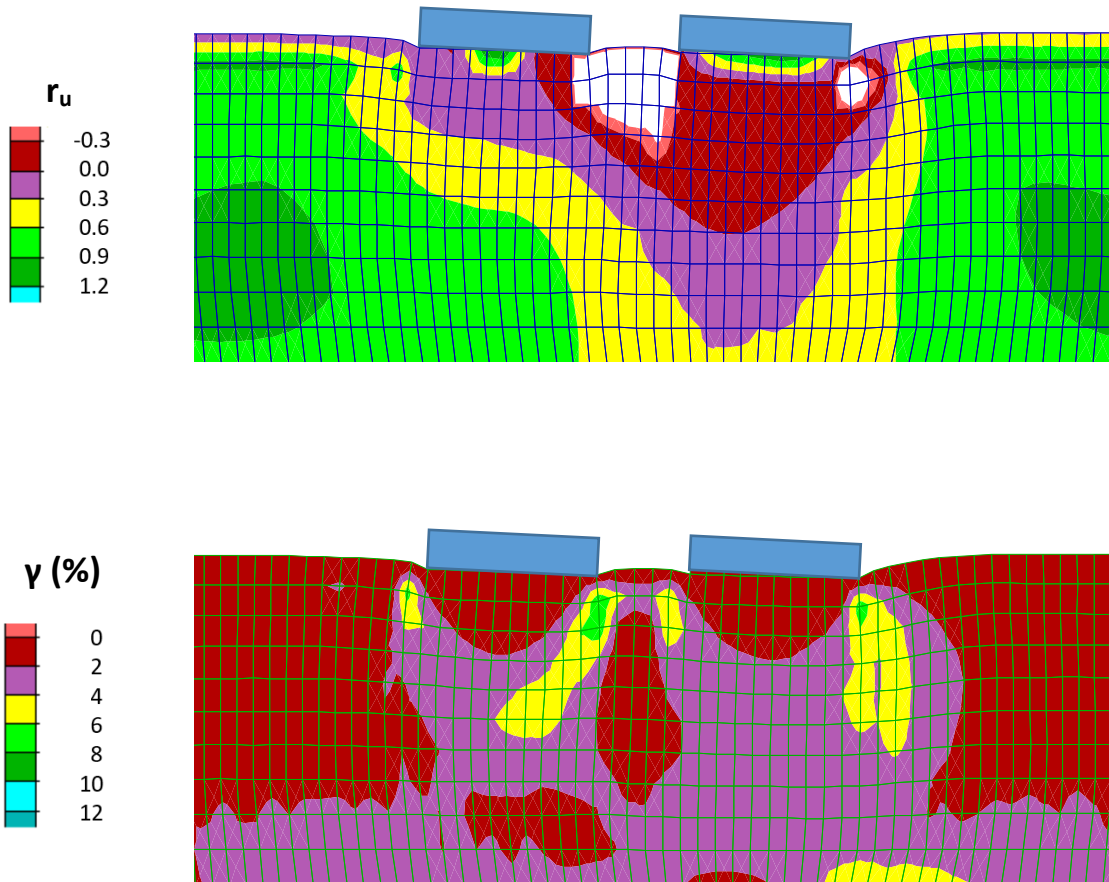
Σχήμα 4.39 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.39** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος ζεύγους στενών θεμελίων (πλάτους $B = 5m$), ενός συνήθους ($q = 100kPa$) κι ενός βαρύ ($q = 200kPa$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Αντίστοιχα και με το **Σχήμα 4.37**, προκύπτει και πάλι σαφώς διαφορετικό προφίλ υπερπιέσεων κάτω από τα δύο θεμέλια, με το σύνηθες να έχει μεγαλύτερες τιμές όπως συμβαίνει και στα μονά θεμέλια διαφορετικού φορτίου. Αντίστοιχα προκύπτει και διαφορετικός μηχανισμός αστοχίας, που μοιάζει συμμετρικός για το σύνηθες, αλλά σαφώς μη συμμετρικός για το βαρύ, γεγονός που σχετίζεται με τη στροφή του εν λόγω θεμελίου προς το σύνηθες, και πάλι αντίστοιχα με το **Σχήμα 4.37**.



Σχήμα 4.40 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Δεδομένων των διαφορών στην αλληλεπίδραση θεμελίων που προκαλούν τα διαφορετικά φορτία, στο **Σχήμα 4.40** συγκρίνεται η απόκριση ενός βαρύ και ενός ελαφρύ θεμελίου. Προκύπτει πρακτικώς μηδενική αλληλεπίδραση σε όρους (τελικών) καθιζήσεων, αλλά προκύπτει εντυπωσιακή επίδραση στις στροφές. Συγκεκριμένα, τα δύο θεμέλια στρέφονται ομόρροπα εδώ, με το ελαφρύ να στρέφεται σημαντικά προς το βαρύ. Αυτό που πρέπει να επεξηγηθεί είναι ο λόγος που στρέφεται αντίστοιχα και το βαρύ θεμέλιο.

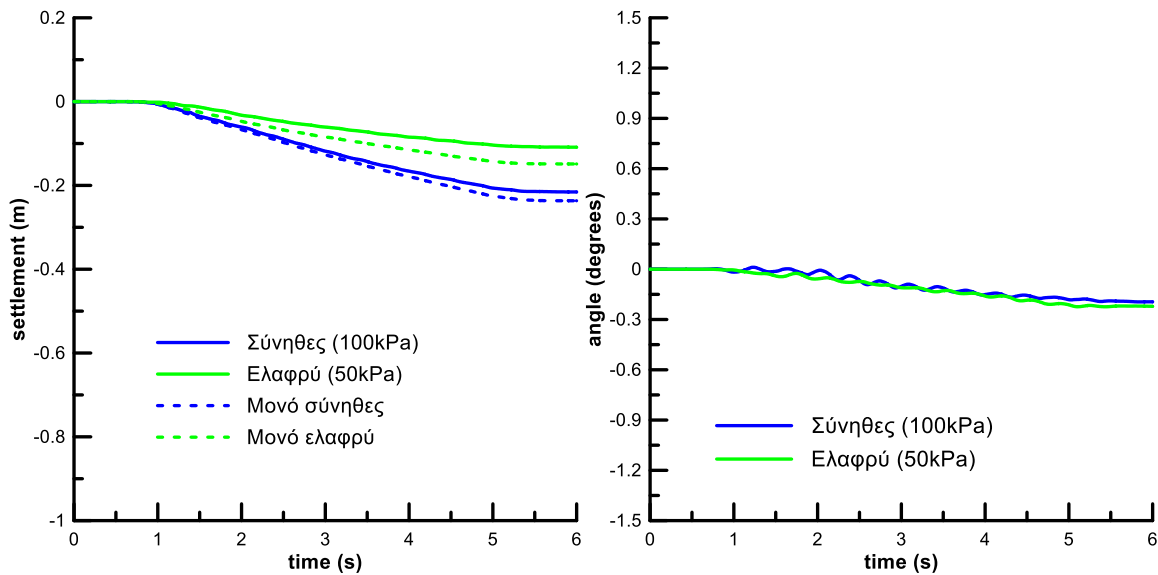


Σχήμα 4.41 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Έτσι, στο **Σχήμα 4.41** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος ζεύγους στενών θεμελίων (πλάτους $B = 5m$), ενός ελαφρύ ($q = 50kPa$) κι ενός βαρύ ($q = 200kPa$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Δεδομένης της μεγάλης διαφοράς στα φορτία των δύο γειτονικών θεμελίων, προκύπτει πολύ διαφορετικό προφίλ υπερπιέσεων κάτω από τα δύο θεμέλια, με το βαρύ να έχει συγκριτικά μικρότερες τιμές όπως συμβαίνει και στα μονά θεμέλια αντίστοιχου φορτίου. Αντιθέτως, ο μηχανισμός αστοχίας μοιάζει αντίστοιχος, με τα θεμέλια να στρέφονται ωρολογιακά. Ο λόγος που προκύπτει αυτό είναι ότι το βαρύ θεμέλιο παρασύρει και το ελαφρύ σε αυτή την ωρολογιακή στροφή, κάτι που δε συμβαίνει όταν η διαφορά στα φορτία στενών θεμελίων δεν είναι τόσο μεγάλη.

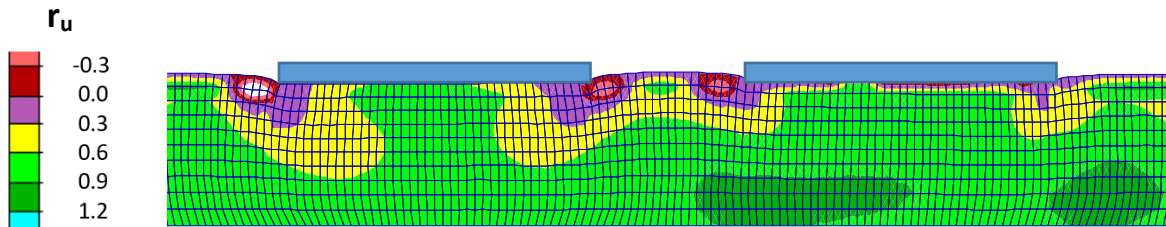
4.3.2 Απόκριση ευρέων θεμελίων

Στο **Σχήμα 4.42** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής ζεύγους ευρέων θεμελίων (πλάτους $B = 20\text{m}$), ενός συνήθους ($q = 100\text{kPa}$) κι ενός ελαφρύ ($q = 50\text{kPa}$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι σύννηθες θεμέλιο καθιζάνει περισσότερο από το ελαφρύ (όπως αναμένεται από τη βιβλιογραφία), κι ότι η αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης είναι ευμενής και για τα δύο, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στα στενά θεμέλια όπου η αλληλεπίδραση είναι δυσμενής. Περαιτέρω, η αλληλεπίδραση είναι μηδενική σε όρους στροφής, αφού οι στροφές είναι ούτως ή άλλως μικρές για τα ευρέα θεμέλια.



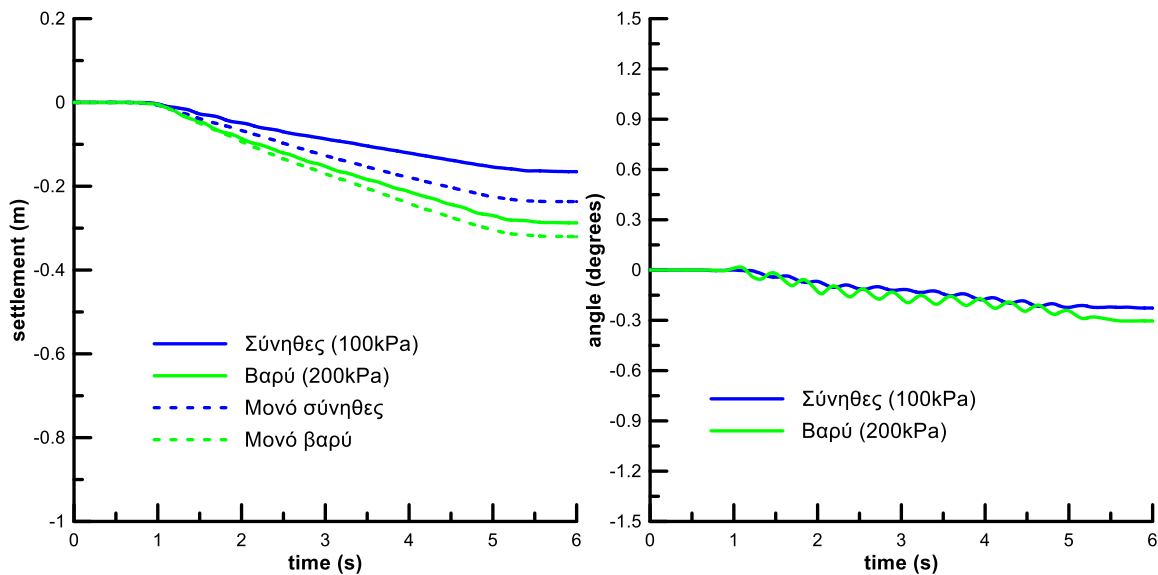
Σχήμα 4.42 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$, φορτίων έδρασης $q_1=100\text{kPa}$, $q_2=50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.43** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος ζεύγους ευρέων θεμελίων (πλάτους $B = 20\text{m}$), ενός συνήθους ($q = 100\text{kPa}$) κι ενός ελαφρύ ($q = 200\text{kPa}$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$. Εδώ το προφίλ των υπερπιέσεων πόρων δεν είναι τόσο διαφορετικό για τα δύο ευρέα θεμέλια, αντίθετα με ό,τι προκύπτει στα δύο στενά. Υπάρχει όμως μια μικρή διαφορά στους μηχανισμούς αστοχίας, με το σύννηθες να έχει λίγο πιο διακριτό μηχανισμό αστοχίας.



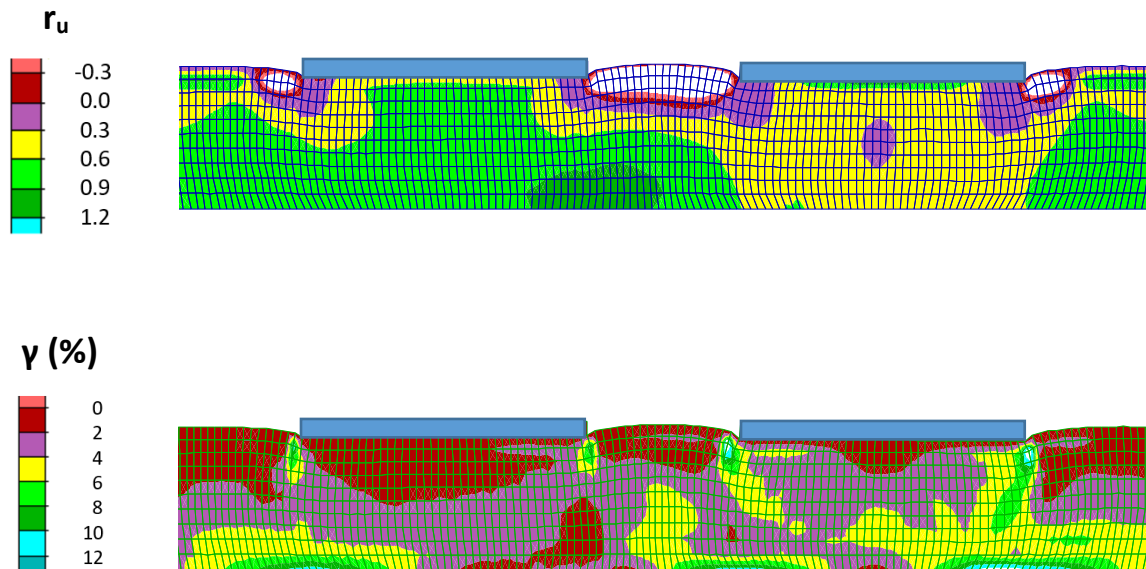
Σχήμα 4.43 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$, φορτίων έδρασης $q_1=100\text{kPa}$, $q_2=50\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.44** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής ζεύγους ευρέων θεμελίων (πλάτους $B = 20\text{m}$), ενός συνήθους ($q = 100\text{kPa}$) κι ενός βαρύ ($q = 200\text{kPa}$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$.



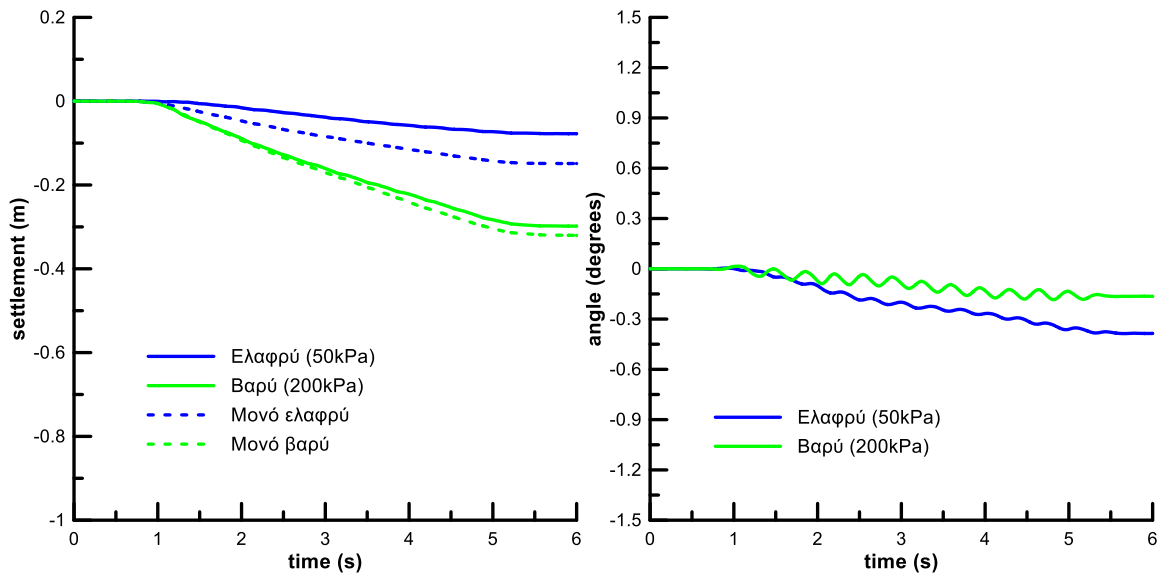
Σχήμα 4.44 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$, φορτίων έδρασης $q_1=100\text{kPa}$, $q_2=200\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, όπως και για το ζεύγος συνήθους και ελαφρύ ευρέων θεμελίων, ενώ και πάλι προκύπτουν μη-σημαντικές αποκλίνουσες στροφές, όπως συνήθως συμβαίνει για τα ζεύγη ευρέων θεμελίων. Η κατανομή των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτει με βάση τις ισοκαμπύλες λόγου r_u και παραμόρφωσης γ στο τέλος της διέγερσης ζεύγους συνήθους ($q = 100\text{kPa}$) και βαρύ ($q = 200\text{kPa}$) ευρέων θεμελίων (πλάτους $B = 20\text{m}$) με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$ στο **Σχήμα 4.45**. Εδώ το προφίλ των υπερπιέσεων πόρων είναι σχετικώς διαφορετικό για τα δύο ευρέα θεμέλια, με το βαρύ θεμέλιο να παρουσιάζει μικρότερες υπερπιέσεις πόρων, και διαφαίνεται και διαφορά στους μηχανισμούς αστοχίας, με το βαρύ να έχει σαφώς πιο διακριτό μηχανισμό αστοχίας.

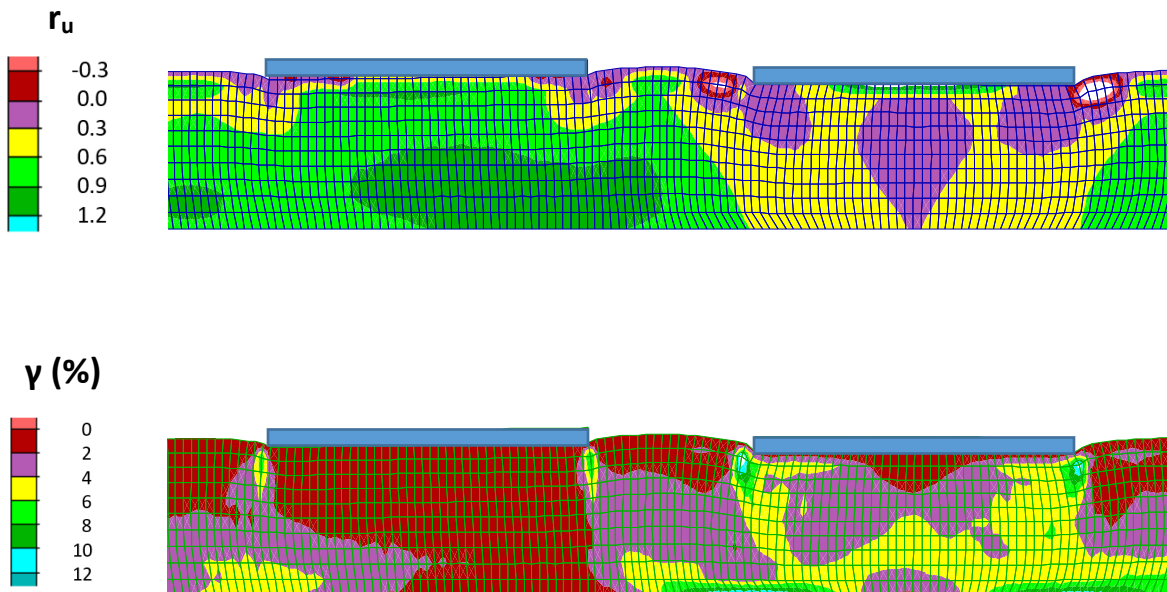


Σχήμα 4.45 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων (πλάτους $B=20\text{m}$, φορτίων έδρασης $q_1=100\text{kPa}$, $q_2=200\text{kPa}$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$

Δεδομένων των διαφορών στην αλληλεπίδραση θεμελίων που προκαλούν τα διαφορετικά φορτία, στο **Σχήμα 4.46** συγκρίνεται η απόκριση ενός βαρύ και ενός ελαφρύ ευρύ θεμελίου σε ζεύγος. Προκύπτει σημαντική ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ειδικά για το ελαφρύ θεμέλιο. Οι στροφές δεν είναι σημαντικές, αλλά παραμένουν αποκλίνουσες με μεγαλύτερη να είναι του ελαφρύ θεμελίου. Τέλος, στο **Σχήμα 4.47** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες λόγου r_u και παραμορφώσεις γ στο τέλος της διέγερσης ζεύγους ελαφρύ ($q = 50\text{kPa}$) και βαρύ ($q = 200\text{kPa}$) ευρέων θεμελίων (πλάτους $B = 20\text{m}$) με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B = 10\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$. Εδώ το προφίλ των υπερπιέσεων πόρων είναι έντονα διαφορετικό για τα δύο ευρέα θεμέλια, με το βαρύ θεμέλιο να παρουσιάζει σημαντικά μικρότερες υπερπιέσεις πόρων, και σημαντική διαφορά στους μηχανισμούς αστοχίας, με το βαρύ να έχει σαφώς πιο διακριτό μηχανισμό αστοχίας.



Σχήμα 4.46 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα 4.47 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

4.4 Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης θεμελίων ίδιου εύρους

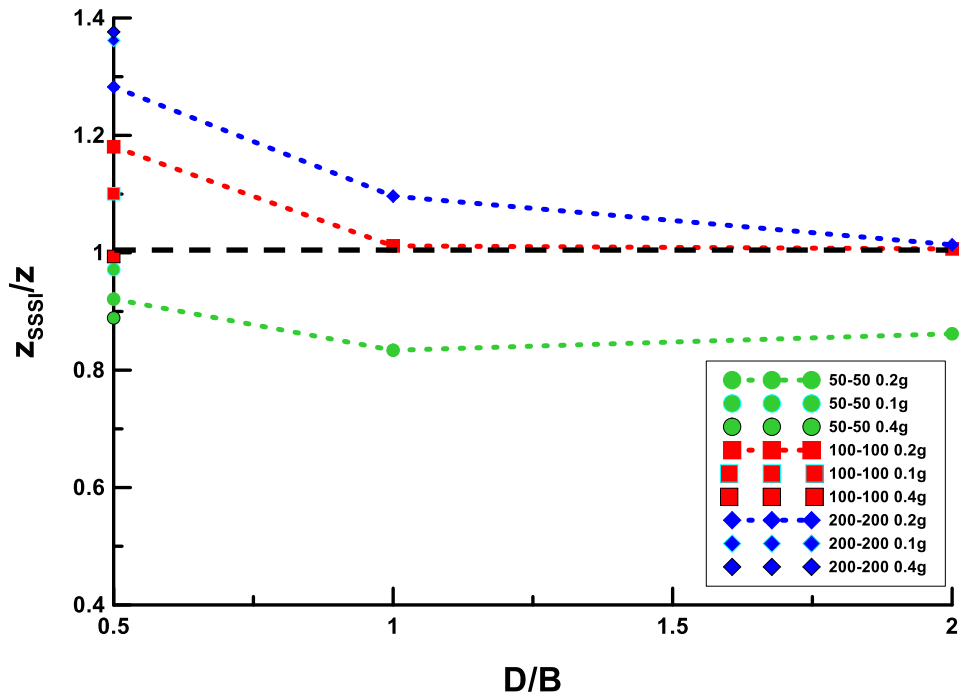
Οι τιμές της τελικής καθίζησης z μονών θεμελίων που προέκυψαν από τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας είναι ενδεικτικές και δεν γενικεύονται, καθώς εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, της διέγερσης και των θεμελίων. Άλλωστε υπάρχουν εμπειρικές μεθοδολογίες που μπορούν να εκτιμήσουν, με μικρότερη ή μεγαλύτερη ακρίβεια, τις καθιζήσεις αυτές, για δεδομένα χαρακτηριστικά εδάφους και διέγερσης (π.χ. Dimitriadi et al. 2017). Αυτό που έχει ενδιαφέρον εδώ είναι οι τιμές της τελικής καθίζησης z_{SSSI} ζεύγους ή διδύμων θεμελίων ίδιου εύρους και το πως αυτές συγκρίνονται με τις τιμές z των μονών θεμελίων αναφοράς κάθε περίπτωσης. Συνεπώς εδώ θα μελετηθεί ο λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z , ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί σε πρακτικές εφαρμογές ως διορθωτικός συντελεστής της τιμής z που εκτιμάται από τις υπάρχουσες εμπειρικές μεθοδολογίες για μονά θεμέλια. Υπογραμμίζεται εδώ ότι σε κάποιες αριθμητικές αναλύσεις τα δίδυμα θεμέλια έδιναν λίγο διαφορετική τιμή καθίζησης, οπότε εδώ ως z_{SSSI} θεωρείται η μέση τιμή των δύο. Σε περιπτώσεις ζεύγους και όχι διδύμων θεμελίων, λαμβάνεται ακριβώς η (διαφορετική) τιμή z_{SSSI} για κάθε θεμέλιο, και κανονικοποιείται με την αρμόζουσα τιμή z για κάθε θεμέλιο. Συνεπώς, οι τιμές z_{SSSI}/z που εμφανίζονται εδώ είναι περισσότερες από τις αναλύσεις ζεύγους ή διδύμων θεμελίων που εκτελέστηκαν, με τις τιμές $z_{SSSI}/z > 1$ και $z_{SSSI}/z < 1$ δείχνουν δυσμενή και ευμενή αλληλεπίδραση, αντίστοιχα.

Το ενδιαφέρον εστιάζεται επίσης στη στροφή θ των ζεύγους ή διδύμων θεμελίων, η οποία θεωρείται πρακτικώς μηδενική σε περιπτώσεις μονών θεμελίων. Ο όρος «πρακτικώς» υπονοεί ότι κάποιες από τις αριθμητικές αναλύσεις μονών θεμελίων, ανάλογα με τη διέγερση, πιθανώς να έδειχναν μικρή παραμένουσα στροφή των θεμελίων, η οποία δεν ήταν όμως μεγαλύτερη από 0.26° . Αντίστοιχα, τιμές στροφής θ για ζεύγος ή δίδυμα θεμέλια που είναι μικρότερες, κατ' απόλυτη τιμή, από αυτή την οριακή τιμή 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. Υπενθυμίζεται ότι $\theta > 0$ υπονοεί συγκλίνουσα στροφή (δηλ. το θεμέλιο στρίβει προς το άλλο), ενώ $\theta < 0$ δείχνει αποκλίνουσα στροφή. Υπογραμμίζεται εδώ ότι σε κάποιες αριθμητικές αναλύσεις τα δίδυμα θεμέλια έδιναν λίγο διαφορετική τιμή στροφής, οπότε εδώ ως θ θεωρείται η μέση τιμή των δύο. Σε περιπτώσεις ζεύγους και όχι διδύμων θεμελίων, λαμβάνεται ακριβώς η (διαφορετική) τιμή θ για κάθε θεμέλιο. Συνεπώς, οι τιμές θ που εμφανίζονται εδώ είναι περισσότερες από τις αναλύσεις ζεύγους ή διδύμων θεμελίων που εκτελέστηκαν.

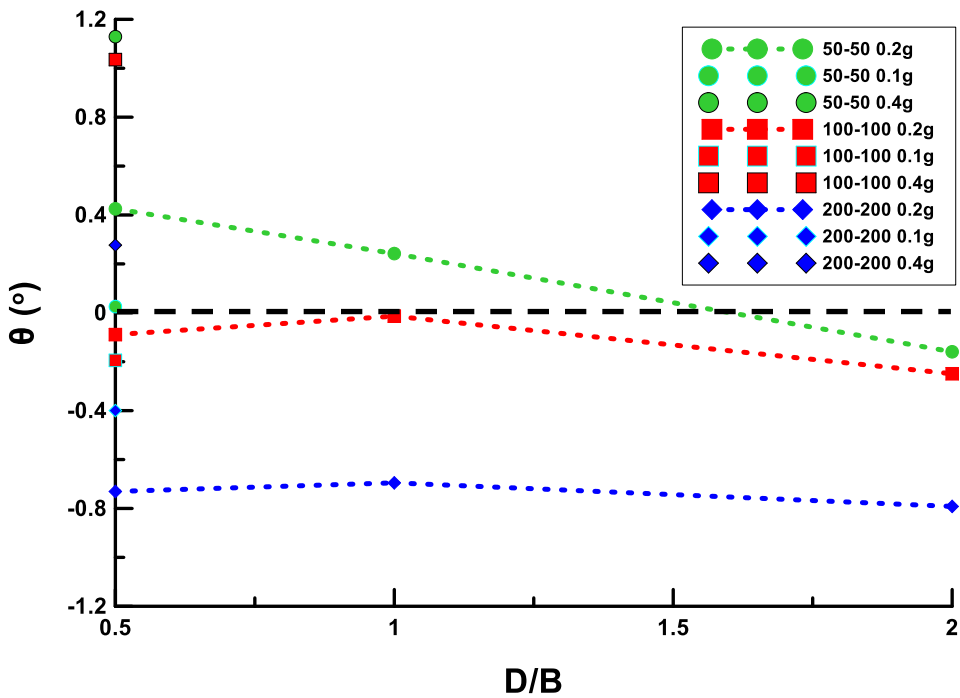
Τα μεγέθη ενδιαφέροντος στην παρούσα διερεύνηση είναι η απόσταση D μεταξύ των δύο θεμελίων του ζεύγους, η οποία εδώ αδιαστατοποιείται ως προς το εύρος του θεμελίου B . Επιπλέον, διερευνήθηκαν δύο σειρές θεμελίων, τα στενά με $B = 5\text{m}$ και τα ευρέα με $B = 20\text{m}$. Η έννοια του στενού ή ευρέος θεμελίου είναι και πάλι σχετική, και συγκρίσιμη με το πάχος της εδαφικής στρώσης $H = 10\text{m}$. Συνεπώς, τα στενά θεμέλια νοούνται όσα έχουν $B/H = 0.5$ (ή γενικότερα $B/H < 1$) και ως ευρέα θεμέλια νοούνται όσα έχουν $B/H = 2.0$ (ή γενικότερα $B/H \gg 1$). Σημασία έχει επίσης και το ομοιόμορφο φορτίο των θεμελίων, το οποίο στην παρούσα εργασία πήρε 3 τιμές: $q = 50\text{kPa}$, 100kPa και 200kPa , οι οποίες αντιστοιχούν σε ελαφρύ, σύνηθες και βαρύ θεμέλιο.

Στο **Σχήμα 4.48** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των στενών δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200\text{kPa}$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{\max} = 0.1-0.4g$. Αρχικώς παρατηρείται ότι $z_{SSSI}/z = 0.83 - 1.38$ για τα στενά δίδυμα θεμέλια, κι ότι γενικά ο λόγος z_{SSSI}/z τείνει στο 1.0 με αύξηση της απόστασης D/B , όπως είναι και το λογικό καθώς δεν υπάρχει πια αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων. Επιπλέον προκύπτει ότι ο λόγος z_{SSSI}/z αυξάνει με το φορτίο q , δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η φόρτιση, τόσο δυσμενέστερη γίνεται η αλληλεπίδραση. Δηλαδή όσο πιο κοντά στη (στατική) αστοχία είναι τα δίδυμα θεμέλια, τόσο πιο ευάλωτα γίνονται σε δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσης. Ειδικά για τις περιπτώσεις του σχήματος, για $q = 50\text{kPa}$ έχουμε αποκλειστικά ευμενή αλληλεπίδραση, ενώ για $q = 100$ και 200 kPa έχουμε δυσμενή ή μηδενική αλληλεπίδραση. Τέλος, η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} είναι ίδιας τάξης μεγέθους επίδραση (π.χ. ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός μπορεί μεταβάλλει το λόγο z_{SSSI}/z κατά ± 0.2), χωρίς όμως να προκύπτει συστηματική για τις αναλύσεις με $D/B = 0.5$ που εκτελέστηκαν.

Στο **Σχήμα 4.49** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ των στενών δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200\text{kPa}$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{\max} = 0.1-0.4g$. Αρχικώς παρατηρείται ότι $\theta = -0.79^\circ$ έως 1.13° για τα στενά δίδυμα θεμέλια, κι ότι γενικά η στροφή θ τείνει ασαφώς προς πρακτικώς μηδενικές τιμές με αύξηση της απόστασης D/B , όπως είναι και το λογικό καθώς δεν υπάρχει πια αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων. Πάντως πρακτικά μόνο τα θεμέλια με $q = 200\text{kPa}$ δείχνουν να έχουν ουσιώδη στροφή για $a_{\max} = 0.2g$, ενώ γενικότερα όσο αυξάνει το φορτίο q προκαλούνται περισσότερο αποκλίνουσες στροφές (αλγεβρική μείωση της θ). Τέλος, η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} δείχνει μάλλον σημαντική, καθώς ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός της μπορεί μεταβάλλει τη στροφή κατά $\pm 1^\circ$, χωρίς όμως να προκύπτει συστηματική για τις αναλύσεις με $D/B = 0.5$ που εκτελέστηκαν.



Σχήμα 4.48 Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=5m$) ίδιου φορτίου $q=50-200kPa$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max}=0.1-0.4g$

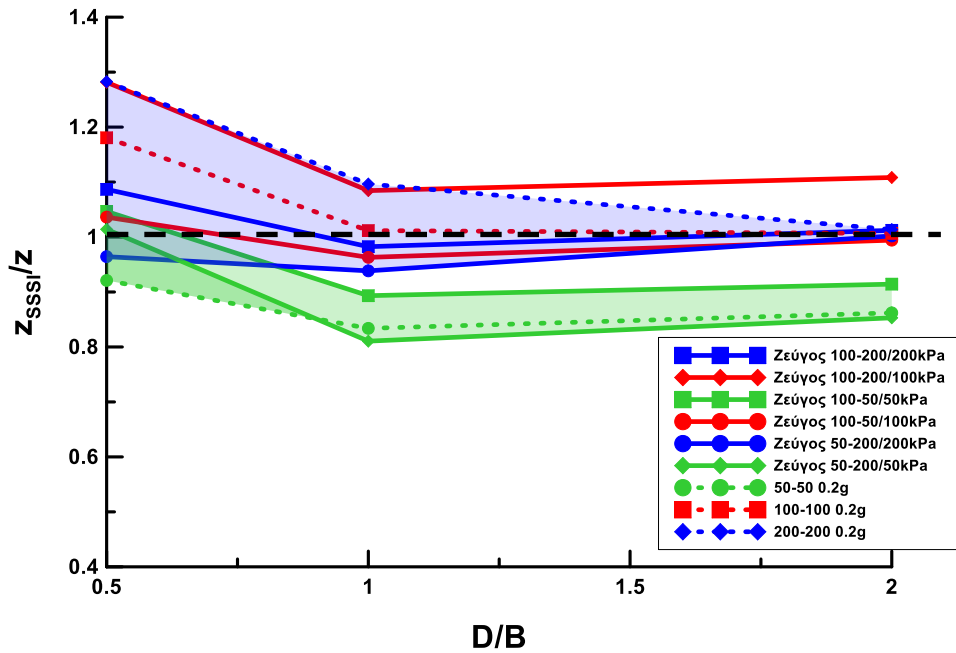


Σχήμα 4.49 Στροφή θεμελίων θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=5m$) ίδιου φορτίου $q=50-200kPa$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max}=0.1-0.4g$

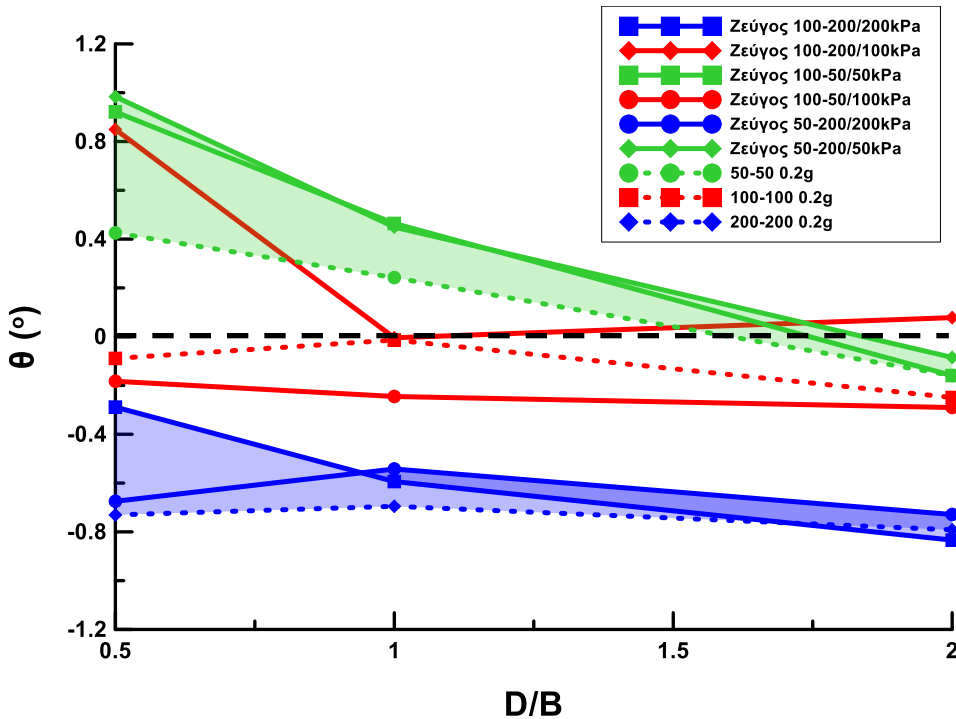
Στα σχήματα που ακολουθούν, πέραν των αποτελεσμάτων για στενά δίδυμα θεμέλια, προστίθενται και αποτελέσματα για ζεύγη στενών θεμελίων υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$. Οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τα δίδυμα θεμέλια (αυτά των **Σχημάτων 4.48** και **4.49**), ενώ με συνεχείς γραμμές ίδιου χρώματος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ζεύγη στενών θεμελίων με ίδιο φορτίο q .

Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.50** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z του ζεύγους στενών θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200kPa$, αλλά μόνο για $a_{\max} = 0.2g$ καθώς έχει βρεθεί ότι η μέγιστη επιτάχυνση δεν έχει συστηματική επίδραση. Για να γίνει ευκρινέστερη η επίδραση του φορτίου q , το εύρος αποτελεσμάτων για ελαφριά ($q = 50kPa$) και βαριά ($q = 200kPa$) θεμέλια εμφανίζονται με γραμμοσκίαση, ενώ χωρίς γραμμοσκίαση παραμένουν οι κόκκινες γραμμές που αντιστοιχούν στα συνήθη θεμέλια. Αρχικώς παρατηρείται ότι η γενική εικόνα που προέκυψε από τα δίδυμα θεμέλια εξακολουθεί να ισχύει και για ζεύγη θεμελίων. Για παράδειγμα, η αύξηση του φορτίου θεμελίου q αυξάνει την τιμή του λόγου z_{SSSI}/z και μπορεί να μετατρέψει την ευμενή αλληλεπίδραση (για $q = 50kPa$) σε δυσμενή (για $q = 200kPa$). Φυσικά, οι τιμές του λόγου z_{SSSI}/z για ζεύγος στενών θεμελίων δεν συμπίπτουν με εκείνα για δίδυμα στενά θεμέλια, οπότε η επίδραση του λόγου D/B δεν είναι τόσο ευκρινής, όσο είναι για δίδυμα θεμέλια. Για παράδειγμα, όταν πρόκειται για ζεύγος και όχι δίδυμα στενά θεμέλια, πιθανώς να χρειάζεται μεγαλύτερη απόσταση D/B για να προκύψει $z_{SSSI}/z = 1.0$.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.51** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ του ζεύγους στενών θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200kPa$, αλλά μόνο για $a_{\max} = 0.2g$. Και πάλι, για να γίνει ευκρινέστερη η επίδραση του φορτίου q , το εύρος αποτελεσμάτων για ελαφριά ($q = 50kPa$) και βαριά ($q = 200kPa$) στενά θεμέλια εμφανίζονται με γραμμοσκίαση, ενώ χωρίς γραμμοσκίαση παραμένουν οι κόκκινες γραμμές που αντιστοιχούν στα συνήθη στενά θεμέλια. Όπως και για το λόγο z_{SSSI}/z παρατηρείται ότι η γενική εικόνα που προέκυψε από τα δίδυμα στενά θεμέλια για τη σχέση $\theta-D/B$ εξακολουθεί να ισχύει και για ζεύγη στενών θεμελίων. Για παράδειγμα, η αύξηση του φορτίου θεμελίου q μειώνει αλγεβρικά την τιμή της στροφής θ και μπορεί να μετατρέψει τη συγκλίνουσα στροφή (για $q = 50kPa$) σε αποκλίνουσα (για $q = 200kPa$).



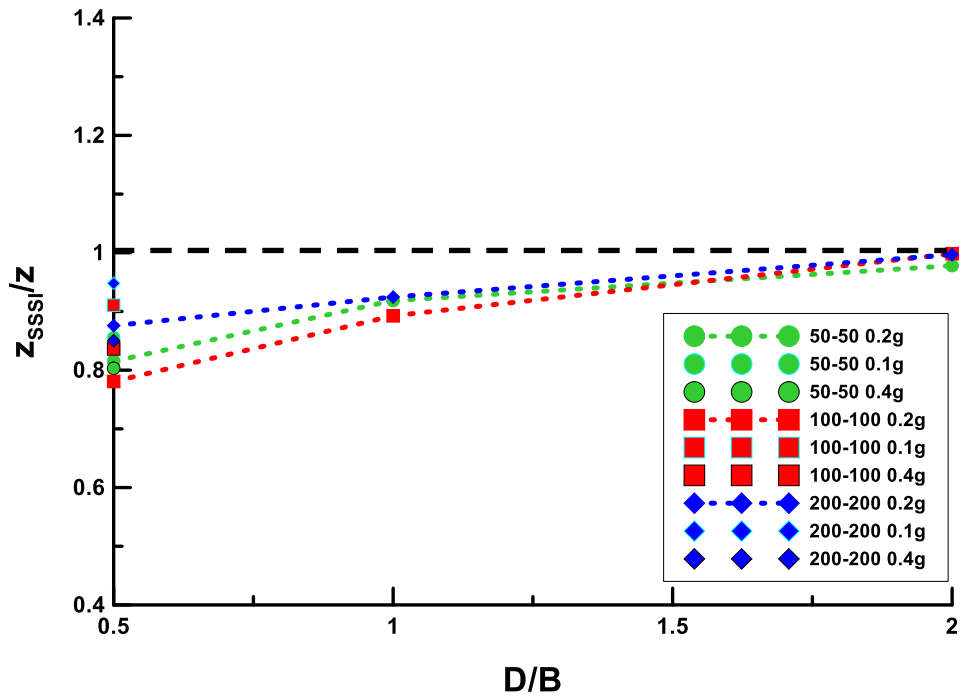
Σχήμα 4.50 Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για ζεύγη θεμελίων πλάτους $B=5m$) για ίσο ή διαφορετικό φορτίο $q=50-200kPa$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



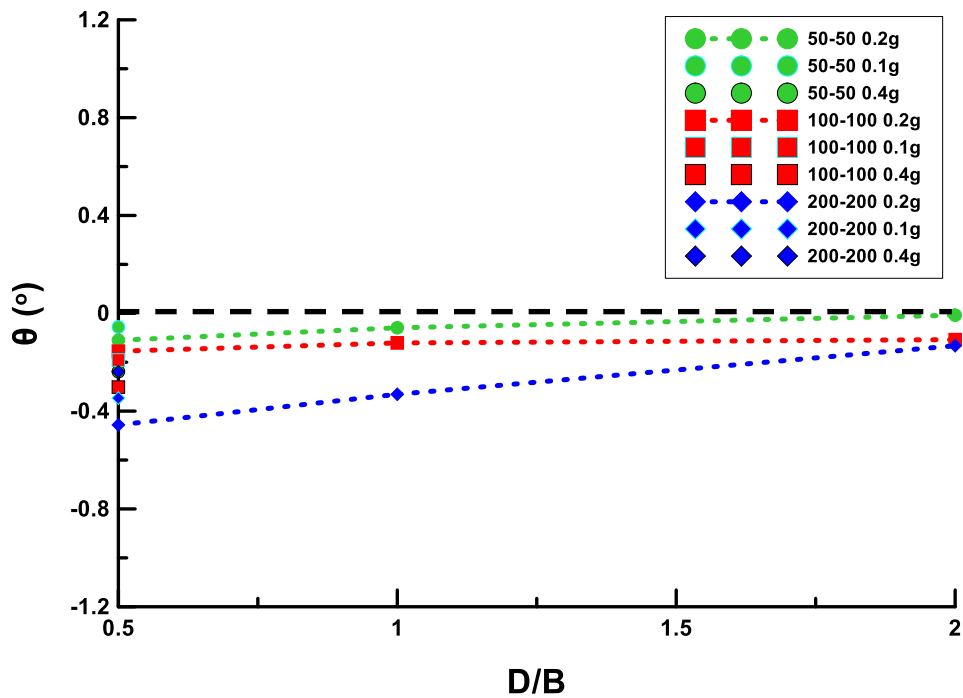
Σχήμα 4.51 Στροφή θεμελίων θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για ζεύγη θεμελίων πλάτους $B=5m$) για ίσο ή διαφορετικό φορτίο $q=50-200kPa$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα για τα ευρέα θεμέλια, και ακριβώς στην ίδια μορφή σχημάτων. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.52** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων των ευρέων δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200\text{kPa}$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{\max} = 0.1-0.4g$. Αρχικώς παρατηρείται ότι $z_{SSSI}/z = 0.78 - 0.99$ για τα ευρέα δίδυμα θεμέλια, κι ότι ο λόγος z_{SSSI}/z τείνει σαφώς προς το 1.0 με αύξηση της απόστασης D/B , όπως είναι και το λογικό καθώς δεν υπάρχει πια αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων. Δηλαδή αντίθετα με ό,τι προκύπτει για στενά θεμέλια, εδώ αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων ευρέων δίδυμων θεμελίων είναι αποκλειστικά ευμενής, ενώ η απομειωτική επίδραση του D/B είναι πολύ σαφέστερη καθώς για $D/B = 2.0$ ουσιαστικά δεν υπάρχει αλληλεπίδραση. Δεδομένου του μικρού εύρους τιμών του λόγου z_{SSSI}/z , η επίδραση του φορτίου q είναι ασαφής, αν και πάλι η σχετικώς λιγότερη ευμενής αλληλεπίδραση είναι για τα βαριά θεμέλια. Όπως συμβαίνει και για τα στενά δίδυμα θεμέλια, η μέγιστη επιτάχυνση a_{\max} έχει ίδιας τάξης μεγέθους επίδραση, δηλαδή για τα ευρέα θεμέλια μικρότερη από ότι για τα στενά (π.χ. ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός μπορεί μεταβάλλει το λόγο z_{SSSI}/z κατά ± 0.1). Σε κάθε περίπτωση όμως δεν προκύπτει συστηματικότητα για τις αναλύσεις με $D/B = 0.5$ που εκτελέστηκαν.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.53** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ των ευρέων δίδυμων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200\text{kPa}$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{\max} = 0.1-0.4g$. Αρχικώς παρατηρείται ότι $\theta = -0.45^\circ$ έως 0.01° για τα ευρέα δίδυμα θεμέλια, κι ότι η στροφή θ απομειώνεται, κατ' απόλυτη τιμή, σαφώς με αύξηση της απόστασης D/B . Μάλιστα, όπως και για το λόγο z_{SSSI}/z , για $D/B = 2.0$ ουσιαστικά δεν υπάρχει αλληλεπίδραση. Παρά το μικρό εύρος τιμών της στροφής θ , η επίδραση του φορτίου q σαφής, και σε συμφωνία με τα στενά δίδυμα θεμέλια, δηλαδή μειώνεται αλγεβρικά με αύξηση του φορτίου. Με άλλα λόγια, καθώς $\theta < 0$, όσο μεγαλύτερο το φορτίο q ευρέως δίδυμου θεμελίου, τόσο πιο αποκλίνουσα είναι η στροφή μεταξύ τους. Τέλος, όπως συμβαίνει και για τα στενά δίδυμα θεμέλια, η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} δείχνει μάλλον σημαντική, καθώς ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός της μπορεί μεταβάλλει τη στροφή κατά $\pm 0.2^\circ$, η οποία είναι ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού εύρους. Σε κάθε περίπτωση, δεν προκύπτει συστηματική επίδραση της a_{\max} για τις αναλύσεις με $D/B = 0.5$ που εκτελέστηκαν.



Σχήμα 4.52 Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για δίδυμα θεμελίων πλάτους $B=20m$) ίδιου φορτίου $q=50-200kPa$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max}=0.1-0.4g$

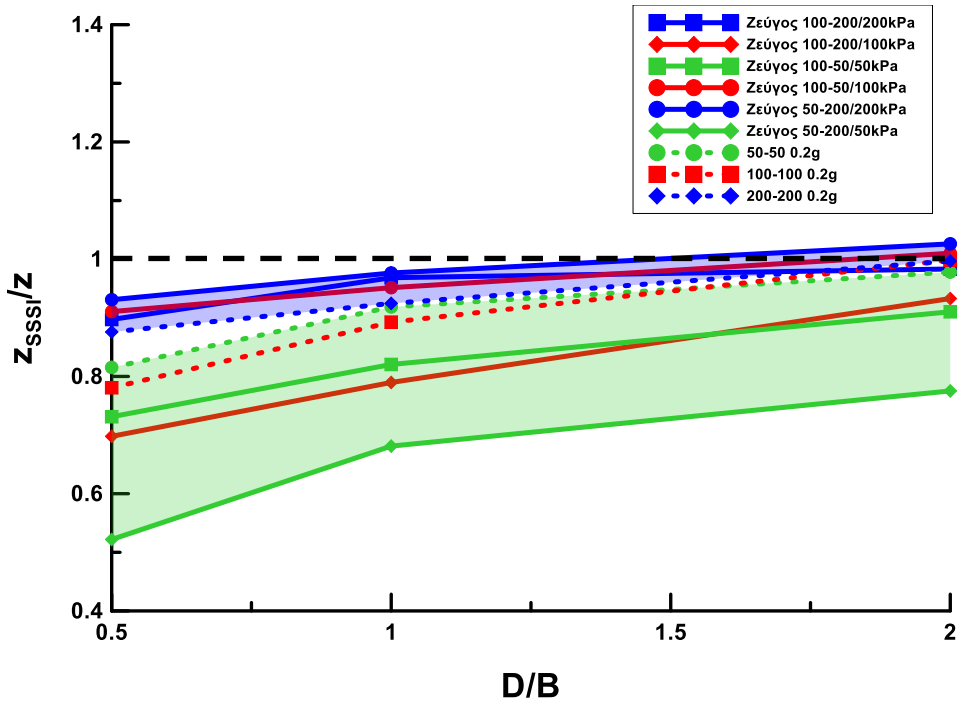


Σχήμα 4.53 Στροφή θεμελίων θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για δίδυμα θεμέλια πλάτους $B=20m$) ίδιου φορτίου $q=50-200kPa$ και για διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max}=0.1-0.4g$

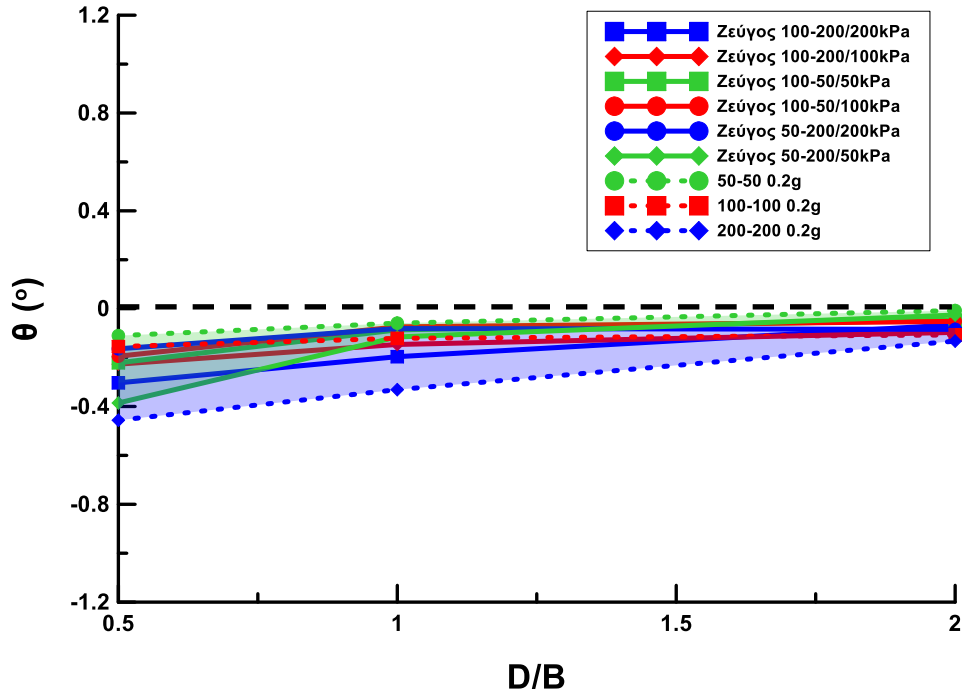
Στη συνέχεια, στα σχήματα που κλείνουν το παρόν κεφάλαιο, πέραν των αποτελεσμάτων για ευρέα δίδυμα θεμέλια, προστίθενται και αποτελέσματα για ζεύγη ευρέων θεμελίων υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$. Και πάλι, οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τα δίδυμα θεμέλια (αυτά των **Σχημάτων 4.52** και **4.53**), ενώ με συνεχείς γραμμές ίδιου χρώματος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ζεύγη ευρέων θεμελίων με ίδιο φορτίο q .

Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.54** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z του ζεύγους ευρέων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200kPa$, αλλά μόνο για $a_{\max} = 0.2g$ καθώς έχει βρεθεί ότι η μέγιστη επιτάχυνση δεν έχει συστηματική επίδραση. Για να γίνει ευκρινέστερη η επίδραση του φορτίου q , το εύρος αποτελεσμάτων για ελαφριά ($q = 50kPa$) και βαριά ($q = 200kPa$) ευρέα θεμέλια εμφανίζονται με γραμμοσκίαση, ενώ χωρίς γραμμοσκίαση παραμένουν οι κόκκινες γραμμές που αντιστοιχούν στα συνήθη ευρέα θεμέλια. Παρατηρείται και πάλι ότι η γενική εικόνα που προέκυψε από τα δίδυμα ευρέα θεμέλια εξακολουθεί να ισχύει και για ζεύγη ευρέων θεμελίων. Για παράδειγμα, η αύξηση του φορτίου θεμελίου q αυξάνει την τιμή του λόγου z_{SSSI}/z . Η διαφορά σε σχέση με τα στενά θεμέλια είναι ότι πρακτικώς δεν μπορεί να προκύψει δυσμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσης, απλά να μειωθεί η ευμενής και ο λόγος z_{SSSI}/z να προσεγγίσει το 1.0. Φυσικά, οι τιμές του λόγου z_{SSSI}/z για ζεύγους θεμελίων δεν συμπίπτουν με εκείνα για δίδυμα θεμέλια, και μάλιστα μεγαλώνει το εύρος τιμών συγκριτικά με τα δίδυμα ευρέα θεμέλια. Για παράδειγμα, για τα ελαφριά ευρέα θεμέλια ο λόγος z_{SSSI}/z έχει ελάχιστη τιμή 0.52, ενώ για τα αντίστοιχα δίδυμα η ελάχιστη τιμή του λόγου είναι 0.82. Παρά την αύξηση του εύρους τιμών, η επίδραση του λόγου D/B παραμένει ευκρινής, όπως και στα δίδυμα ευρέα θεμέλια.

Τέλος, στο **Σχήμα 4.55** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ του ζεύγους ευρέων θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B για φορτία έδρασης $q = 50-200kPa$, αλλά μόνο για $a_{\max} = 0.2g$. Όπως και ανωτέρω, για να γίνει ευκρινέστερη η επίδραση του φορτίου q , το εύρος αποτελεσμάτων για ελαφριά ($q = 50kPa$) και βαριά ($q = 200kPa$) ευρέα θεμέλια εμφανίζονται με γραμμοσκίαση, ενώ χωρίς γραμμοσκίαση παραμένουν οι κόκκινες γραμμές που αντιστοιχούν στα συνήθη ευρέα θεμέλια. Επίσης, όπως και για το λόγο z_{SSSI}/z παρατηρείται και εδώ ότι η γενική εικόνα που προέκυψε από τα δίδυμα ευρέα θεμέλια για τη σχέση $\theta-D/B$ εξακολουθεί να ισχύει και για ζεύγη ευρέων θεμελίων. Δηλαδή $\theta < 0$ σε κάθε περίπτωση ζεύγους ευρέος θεμελίου, και προκύπτει αλγεβρική μείωση της θ , όσο μεγαλώνει το φορτίο θεμελίου.



Σχήμα 4.54 Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για ζεύγη θεμελίων πλάτους $B=20m$) για ίσο ή διαφορετικό φορτίο $q=50-200kPa$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα 4.55 Στροφή θεμελίων θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B (για ζεύγη θεμελίων πλάτους $B=20m$) για ίσο ή διαφορετικό φορτίο $q=50-200kPa$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Σε μια προσπάθεια σύνοψης των αποτελεσμάτων όλου του Κεφαλαίου:

Α) Για ζεύγος στενών θεμελίων προκύπτουν τιμές λόγου καθιζήσεων $z_{SSSI}/z = 0.81 - 1.28$ και στροφές $\theta = -0.83^\circ$ έως 0.98° , δηλαδή τόσο ευμενής όσο και δυσμενής αλληλεπίδραση. Η αλληλεπίδραση αυτή υπόκειται σε ελαφρά απομείωση με την απόσταση D/B. Γενικώς, βαριά θεμέλια εμφανίζουν δυσμενή αλληλεπίδραση στις καθιζήσεις και αποκλίνουσες στροφές, ενώ τα ελαφριά θεμέλια το ανάποδο. Για συνήθη θεμέλια, η εικόνα δεν είναι συστηματική, αν και συνήθως χαρακτηρίζονται από ελαφρώς δυσμενή αλληλεπίδραση στις καθιζήσεις και πρακτικώς μηδενικές στροφές. Γενικότερα, έχει μεγαλύτερη σημασία το φορτίο του ίδιου του θεμελίου, παρά το φορτίο του γειτονικού του (αφού οι συνεχείς καμπύλες ανά φορτίο q είναι σχετικά κοντά στις διακεκομμένες καμπύλες του ίδιου φορτίου), και αυτό ισχύει τόσο για το λόγο καθιζήσεων z_{SSSI}/z όσο και για τη στροφή θ , αν και είναι σαφέστερο στις στροφές, δεδομένου ότι στο λόγο καθιζήσεων τα αποτελέσματα για συνήθη και βαριά στενά θεμέλια έχουν σημαντική επικάλυψη. Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης μπορεί να επηρεάσει την απόκριση για μικρή απόσταση D/B = 0.5, τόσο σε όρους καθιζήσεων όσο και σε όρους στροφών, αλλά η επίδραση δεν είναι συστηματική.

Β) Για ζεύγος ευρέων θεμελίων προκύπτουν τιμές λόγου καθιζήσεων $z_{SSSI}/z = 0.52 - 1.03$ και στροφές $\theta = -0.39^\circ$ έως -0.03° , δηλαδή πρακτικώς μόνο ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και μικρές αποκλίνουσες στροφές, δύο χαρακτηριστικά της απόκρισης που εξαλείφονται σαφώς με την απόσταση D/B. Γενικώς, όσο αυξάνει το φορτίο θεμελίου, τόσο απομειώνεται η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, αλλά και τόσο αυξάνει η αποκλίνουσα στροφή. Διαφαίνεται να έχουν συγκρίσιμη σημασία τα φορτία των δύο γειτονικών θεμελίων, και όχι μόνο το φορτίο του θεμελίου αναφοράς. Για παράδειγμα, σε ελαφρύ θεμέλιο ($q = 50\text{kPa}$), όσο μεγαλώνει το φορτίο του γειτονικού θεμελίου τόσο μειώνονται οι καθιζήσεις του, ενώ για βαρύ θεμέλιο ($q = 200\text{kPa}$), όσο μικραίνει το φορτίο του γειτονικού θεμελίου τόσο αυξάνει η καθιζήσή του. Αντίστοιχα, προκύπτουν μόνο αποκλίνουσες στροφές ζεύγους ευρέων θεμελίων, οι οποίες είναι γενικώς μικρές και αυξάνουν, κατ' απόλυτο τιμή, με το φορτίο θεμελίου, χωρίς το φορτίο του γειτονικού θεμελίου να αλλάζει την εικόνα σε όρους στροφής. Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης μπορεί να επηρεάσει την απόκριση για μικρή απόσταση D/B = 0.5, τόσο σε όρους καθιζήσεων όσο και σε όρους στροφών, αλλά η επίδραση δεν είναι σημαντική, ούτε συστηματική.

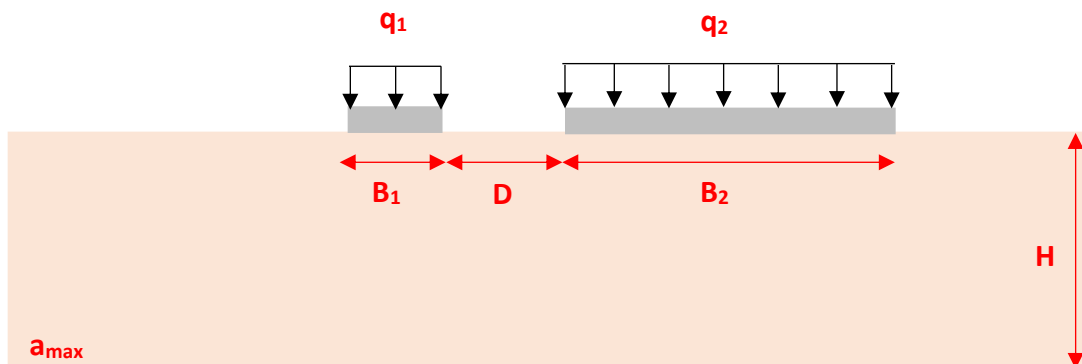
Γ) Στο έδαφος θεμελίωσης τα στενά θεμέλια επιβάλλουν μικρή αύξηση των κατακόρυφων τάσεων και συγκριτικά έντονη διάτμηση. Αντιθέτως, τα ευρέα θεμέλια επιβάλλουν μεγάλη αύξηση των κατακόρυφων τάσεων και συγκριτικά λιγότερο έντονη διάτμηση. Δηλαδή είναι σαν τα στενά θεμέλια να επιβάλλουν τριαξονική θλίψη, ενώ τα ευρέα θεμέλια να επιβάλλουν μονοδιάστατη συμπίεση. Συνεπώς, η αλληλεπίδραση είναι κυρίως δυσμενής για τα στενά θεμέλια (λόγω επαλληλίας των συγκριτικά μεγάλων διατμητικών τάσεων) και ευμενής για τα ευρέα θεμέλια (λόγω επαλληλίας των συγκριτικά μεγάλων κατακόρυφων τάσεων). Η επίδραση του φορτίου θεμελίου είναι σημαντική στα στενά θεμέλια, γιατί επηρεάζει το μέγεθος της επιβαλλόμενης διάτμησης που είναι ο κύριος λόγος συσσώρευσης σεισμικών καθιζήσεων. Αντιθέτως, το φορτίο θεμελίου δεν είναι τόσο σημαντική παράμετρος στα ευρέα θεμέλια, γιατί είναι η συνεισφορά του στην επιβαλλόμενη διάτμηση που καθορίζει τις σεισμικές καθιζήσεις δεν είναι τόσο σημαντική όσο στην επαλληλία των κατακόρυφων τάσεων. Πρακτικά, το κάθε ευρύ θεμέλιο αυξάνει την αντοχή του εδάφους θεμελίωσης του γειτονικού του ευρέος θεμελίου, ενώ

η περιοχή ανάμεσα στα δύο ευρέα θεμέλια έχει τη βέλτιστη αντοχή, οδηγώντας τα θεμέλια σε αποκλίνουσες στροφές. Η απόκριση ελαφρών στενών θεμελίων μοιάζει με εκείνη των ευρέων θεμελίων, γιατί δεν επιβάλλουν μεγάλη διάτμηση. Αντιθέτως για βαριά στενά θεμέλια, η διάτμηση επαλληλίζεται, με αποτέλεσμα προσαύξηση των καθιζήσεων, ενώ η περιοχή ανάμεσα στα δύο στενά θεμέλια υπόκειται στη μέγιστη καταπόνηση, οδηγώντας τα θεμέλια σε συγκλίνουσες στροφές.

5. Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού εύρους σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για δύο γειτονικές θεμελιολωρίδες διαφορετικού εύρους αυτή τη φορά, εδραζόμενων σε ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση υπό σεισμική διέγερση. Στόχος της παρουσίασης είναι η μελέτη της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης SSSI (Structure-Soil-Structure Interaction) μεταξύ τους, καθώς και των παραμέτρων που την επηρεάζουν, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου οι δύο θεμελιολωρίδες ήταν ίδιου εύρους. Στο **Σχήμα 5.1** απεικονίζεται η τυπική διάταξη του προβλήματος, δηλαδή μιας ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης πάχους H επί της οποίας βρίσκονται οι δύο επιφανειακές θεμελιολωρίδες διαφορετικών ευρών B_1 και B_2 και διαφορετικών φορτίων έδρασης q_1 και q_2 , με ενδιάμεση μεταξύ τους απόσταση D , μια διάταξη που υποβάλλεται σε αρμονική διέγερση βάσης με μέγιστη επιτάχυνση a_{max} .



Σχήμα 5.1 Σκαρίφημα διάταξης ζεύγους θεμελίων διαφορετικών ευρών B_1 και B_2 , διαφορετικών φορτίων έδρασης q_1 και q_2 σε ενδιάμεση απόσταση D εδραζόμενων σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους H υπό σεισμική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση a_{max} για τον υπολογισμό καθιζήσεων z και στρωφών θ

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί Πίνακες 5.1 και 5.2 οι οποίοι παρουσιάζουν τα παραμετρικά χαρακτηριστικά κάθε ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του παρόντος Κεφαλαίου. Οι αναλύσεις αυτές αντιστοιχούν σε ζεύγη θεμελίων, καθώς και σε αναλύσεις με αντίστοιχα μονά θεμέλια, χάριν σύγκρισης. Δηλαδή, όταν υπάρχει ένα ζεύγος θεμελίων με διαφορετικά εύρη B_1 και B_2 σε απόσταση D με φορτίο $q = q_1 = q_2$, οι αποκρίσεις αναφοράς είναι εκείνες για μονά θεμέλια εύρους B_1 ή B_2 με φορτίο q , που αντιστοιχούν στην απόκριση που αναμένεται όταν η απόσταση $D \rightarrow \infty$. Χάριν πληρότητας στην αριστερή πλευρά των Πινάκων εμφανίζεται η αρίθμηση της παραγράφου του παρόντος κεφαλαίου όπου εμφανίζονται τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης.

	$B_1(m)$	$B_2(m)$	$q_1(kPa)$	$q_2(kPa)$	D/B_1	$a_{max}(g)$
5.2.1	5	20	100	100	0.5	0.2
	5	20	100	100	1	0.2
	5	20	100	100	2	0.2
	5	20	50	50	0.5	0.2
	5	20	50	50	1	0.2
	5	20	50	50	2	0.2
	5	20	200	200	0.5	0.2
	5	20	200	200	1	0.2
	5	20	200	200	2	0.2
5.2.2	5	20	100	100	0.5	0.1
	5	20	100	100	0.5	0.4
5.3.1	5	20	200	50	0.5	0.2
	5	20	200	50	1	0.2
	5	20	200	50	2	0.2
	5	20	50	200	0.5	0.2
	5	20	50	200	1	0.2
	5	20	50	200	2	0.2
5.3.2	5	20	200	50	0.5	0.1
	5	20	200	50	0.5	0.4
	5	20	50	200	0.5	0.1
	5	20	50	200	0.5	0.4

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση ζεύγους θεμελίων που παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο

	B(m)	q(kPa)	a _{max} (g)
5.2.1/5.3.1	5	100	0.2
	20	100	0.2
	5	50	0.2
	5	200	0.2
	20	50	0.2
	20	200	0.2
5.2.2/5.3.2	5	100	0.1
	5	100	0.4
	5	50	0.1
	5	50	0.4
	5	200	0.1
	5	200	0.4
	20	100	0.1
	20	100	0.4
	20	50	0.1
	20	50	0.4
	20	200	0.1
	20	200	0.4

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά αναλύσεων αναφοράς για σεισμική απόκριση μονού θεμελίου που παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο

Από όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε ανάλυση, για τις ανάγκες του Κεφαλαίου αξιοποιήθηκαν η καθίζηση του κέντρου του (άκαμπτου) θεμελίου στην επιφάνεια του εδάφους, η στροφή του θεμελίου (ως στερεό σώμα) και η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος υπό τα θεμέλια. Οι καθιζήσεις και οι στροφές παρουσιάζονται με τη μορφή χρονοϊστοριών, ενώ η χωρική κατανομή των r_u και γ μόνο στο τέλος της διέγερσης. Τιμές καθίζησης αρνητικές υποδηλώνουν ταπείνωση του θεμελίου και θετικές υποδηλώνουν ανύψωση. Αντίστοιχα, για τη στροφή έχει υιοθετηθεί 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.

Ακολουθείται η ίδια δομή παραγράφων με εκείνη του Κεφαλαίου 4. Έτσι, στην παράγραφο 5.2 διερευνάται η αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού εύρους αλλά ίδιου φορτίου, ενώ στην παράγραφο 5.3 γίνεται το ίδιο για θεμέλια διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου. Τέλος, στην παράγραφο 5.4 γίνεται μια σύνοψη των χαρακτηριστικών της απόκρισης για θεμέλια διαφορετικού εύρους, ίδιου ή διαφορετικού φορτίου, με έμφαση στις τελικές τιμές της καθίζησης και της στροφής.

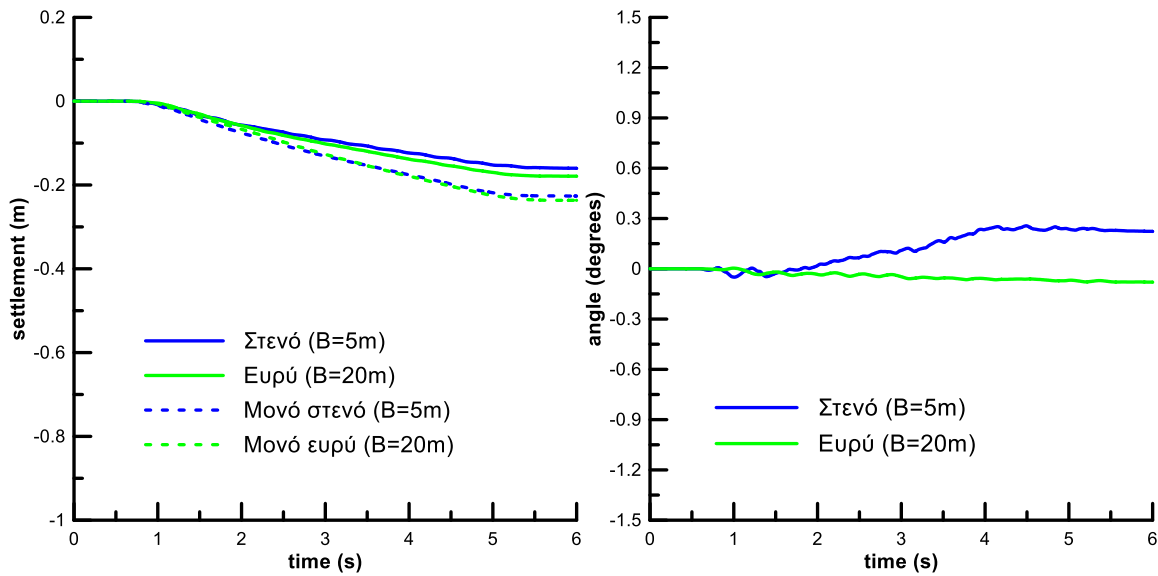
5.2 Αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου φορτίου

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η σεισμική απόκριση, κυρίως σε όρους καθιζήσεων και στροφών, ζεύγους θεμελίων με διαφορετικά εύρη, ενός στενού ($B_1 = 5\text{m}$) και ενός ευρέος ($B_2 = 20\text{m}$), υποβαλλόμενων σε σεισμική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης $0.2g$ για τρεις τιμές του ίδιου φορτίου ($q=q_1=q_2$) = 50kPa , 100kPa και 200kPa . Υπογραμμίζεται ότι οι όροι στενό και ευρύ θεμέλιο είναι συγκριτικοί και σχετίζονται με τη σχέση του εύρους τους συγκριτικά με το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης $H = 10\text{m}$. Στόχος είναι η ποσοτικοποίηση της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης μέσω συσχέτισης της με το κοινό φορτίο έδρασης q και την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 μεταξύ των δίδυμων θεμελίων. Επισημαίνεται πως για τις τιμές φορτίου $q = 50\text{kPa}$ και 200kPa παρουσιάζονται εδώ μόνο τα αποτελέσματα για τη μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1$ όπου η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη. Για τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες αποστάσεις D/B_1 ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο **Παράρτημα Β**.

Τέλος, παρουσιάζονται και στοχευμένες αναλύσεις, αλλά για σεισμική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση ίση με $0.1g$ και $0.4g$, δηλαδή υποδιπλάσια και διπλάσια της τιμής αναφοράς $0.2g$.

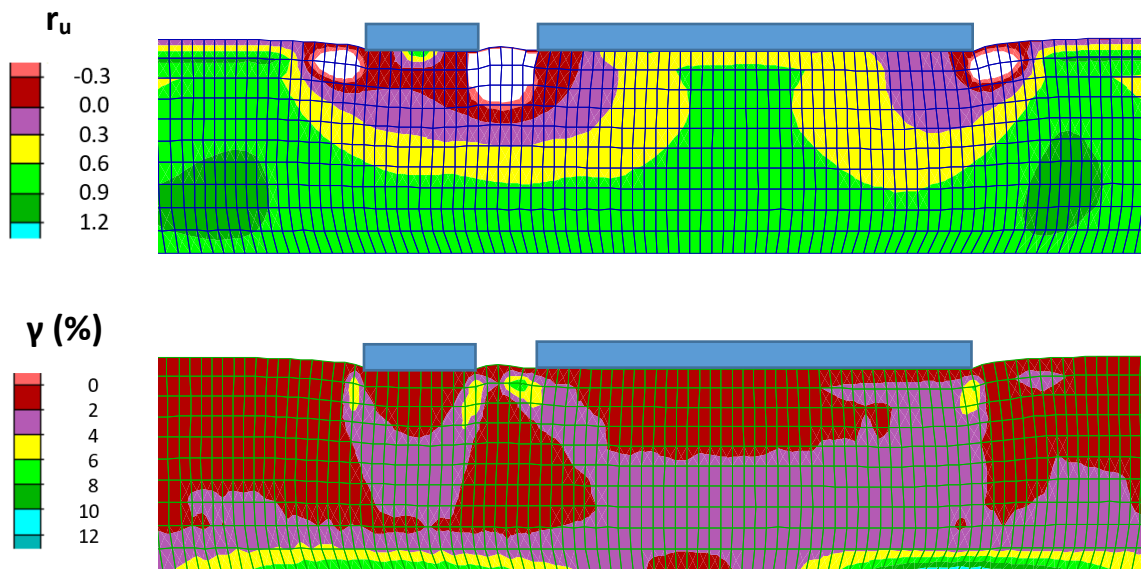
5.2.1 Απόκριση θεμελίων ίδιου φορτίου

Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής ζεύγους θεμελίων (ευρών $B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$) με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1 = 2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$. Χάριν σύγκρισης, με διακεκομμένη μπλε και πράσινη καμπύλη παρουσιάζονται και οι χρονοϊστορίες καθίζησης των αντίστοιχων μονών θεμελίων εύρους $B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 2\text{m}$, αντίστοιχα, και φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση, ενώ οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες στροφής των μονών θεμελίων είναι πρακτικώς μηδενικές (και δεν παρουσιάζονται). Αυτή είναι η τυπική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε όρους χρονοϊστοριών και ακολουθείται σε όλη την παράγραφο 5.2. Από τη σύγκριση προκύπτει αρκετά ευμενής αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων, καθώς υπάρχει ορατή μείωση των καθιζήσεων συγκριτικά με τα αντίστοιχα μονά θεμέλια, συνοδευόμενη από ελαφρά συγκλίνουσα στροφή του στενού και αμελητέα αποκλίνουσα στροφή του ευρέος θεμελίου.



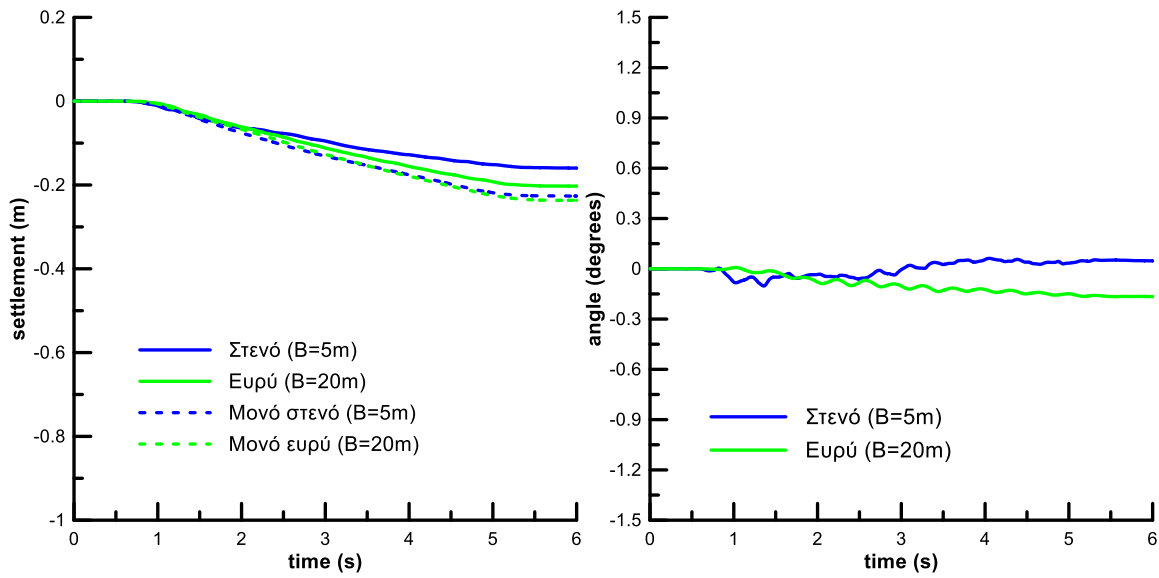
Σχήμα 5.2 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και της παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος ζεύγους θεμελίων (ευρών $B_1 = 5m$ και $B_2 = 20m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1 = 2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$, ενώ χάριν σύγκρισης στα Σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για τα μονά θεμέλια ευρών $B_1 = 5m$ και $B_2 = 20m$ και φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ υπό την ίδια διέγερση. Για να διευκολύνεται η σύγκριση, η χρωματική κλίμακα μεταβολής του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ είναι η ίδια και στα δύο σχήματα, ενώ αυτή η τυπική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε όρους ισοκαμπυλών ακολουθείται σε όλο το παρόν Κεφάλαιο. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι στο στενό μονό θεμέλιο ο μηχανισμός αστοχίας είναι συμμετρικός και παραμένει συμμετρικός και στο ζεύγος, με τη διαφορά πως είναι ελάχιστα πιο έντονος στις εσωτερικές παρειές, γεγονός που αποτυπώνεται στην ελαφρώς συγκλίνουσα στροφή του. Στο ευρύ μονό θεμέλιο η συμμετρία του μηχανισμού αστοχίας δεν διατηρείται στην περίπτωση του ζεύγους παρά μόνο στη βάση της εδαφικής στρώσης και μάλιστα η συμμετρία αυτή φαίνεται να εκτείνεται σε όλο το εύρος κάτω από τα δύο θεμέλια και όχι μόνον κάτω από το ευρύ. Η συγκλίνουσα στροφή του στενού θεμελίου σχετίζεται και με την ανάπτυξη $r_u < 0$ στην εξωτερική περιοχή του, που ισχυροποιείται λόγω αύξησης των ενεργών τάσεων σε αυτή οδηγώντας στην στροφή του προς τις εσωτερικές παρειές με χαμηλότερες ενεργές τάσεις. Όσο για το ευρύ, παρατηρούνται ορατά μεγαλύτερες τιμές r_u σε σύγκριση με το αντίστοιχο μονό θεμέλιο. Γενικότερα πάντως, οι υπερπιέσεις πόρων κάτω από το ζεύγος θεμελίων είναι πιο αυξημένες σε σχέση με τα αντίστοιχα μονά θεμέλια, με εξαίρεση την επιφανειακή περιοχή ανάμεσα και γύρω τους.

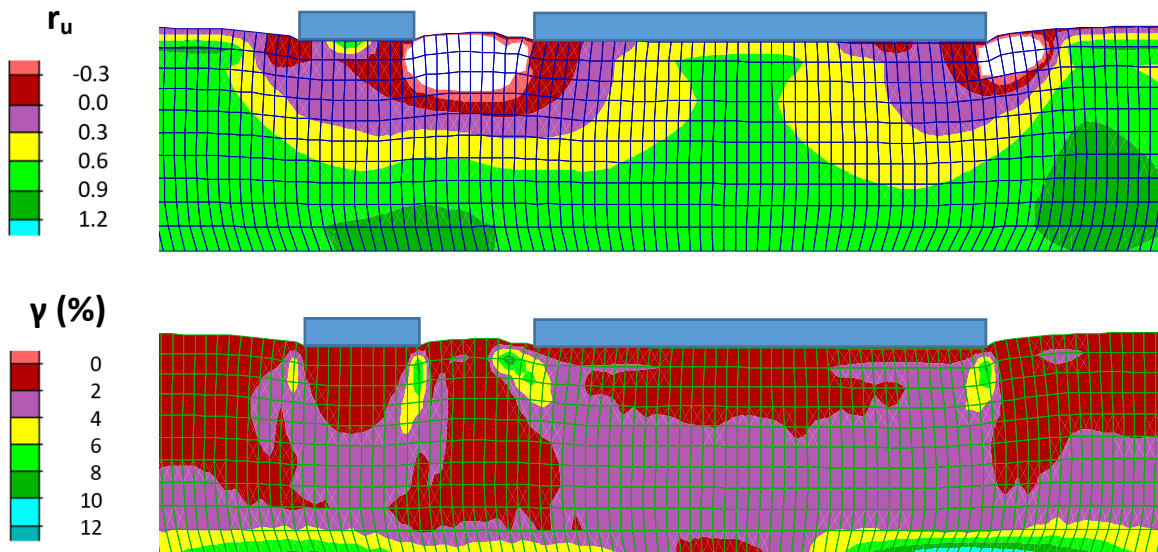


Σχήμα 5.3 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.4** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής του ίδιου ζεύγους θεμελίων (ευρών $B_1 = 5.0m$ και $B_2 = 20.0m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με μέση ενδιάμεση απόσταση $D = B_1 = 5.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$, χρησιμοποιώντας την ίδια τυπική μορφή παρουσίασης. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης η καθίζηση του στενού θεμελίου παραμένει ίδια με εκείνη της προηγούμενης περίπτωσης ενώ αυξάνεται ελαφρώς η καθίζηση του ευρέος. Σε όρους στροφών, η αμελητέα αποκλίνουσα στροφή του ευρέος διατηρείται όπως και η συγκλίνουσα στροφή του στενού, ελαφρώς μειωμένη συγκριτικά με προηγούμενως (**Σχήμα 5.2**).

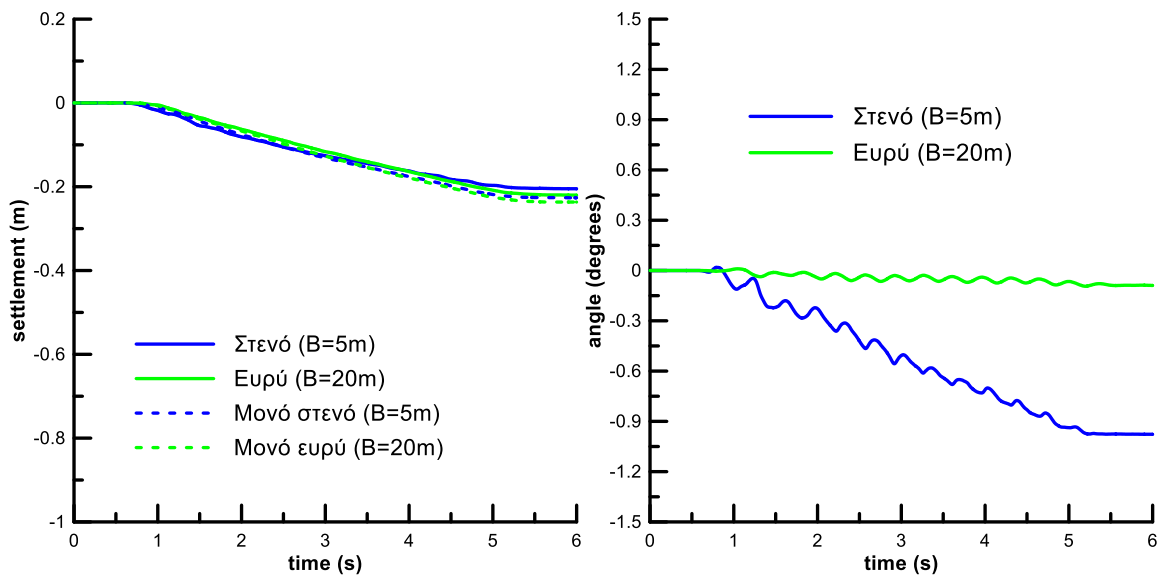


Σχήμα 5.4 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=B_1=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



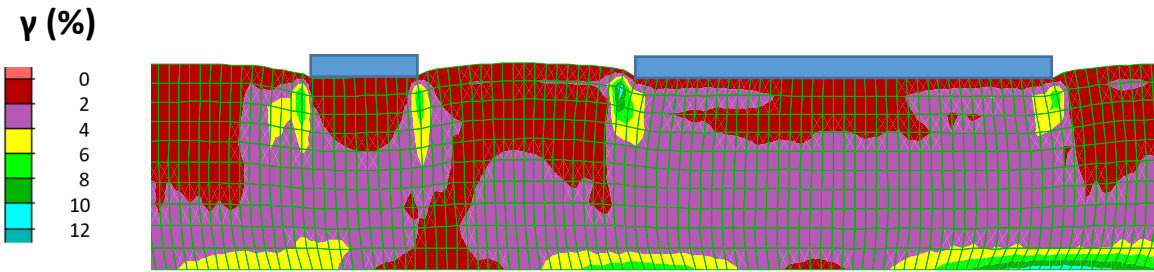
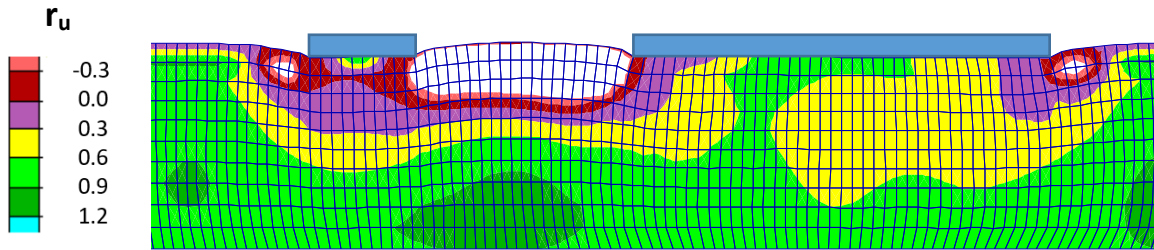
Σχήμα 5.5 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=B_1=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Επιπλέον, στο **Σχήμα 5.5** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος του ως άνω ζεύγους θεμελίων με τη μέση ενδιάμεση απόσταση $D = B_1 = 5.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Σε σύγκριση με τα μονά θεμέλια (**Σχήματα 5.8** και **5.9**) προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας (σε όρους γ) κάτω από το στενό παραμένει συμμετρικός αλλά ακόμα πιο έντονος στην εσωτερική παρειά του ενώ στο ευρύ αρχίζει να προσεγγίζει κατά πολύ τον αντίστοιχο μονό του. Το καθεστώς υπερπίεσεων (σε όρους r_u) εξακολουθεί να ομοιάζει σχετικώς με εκείνο της προηγούμενης περίπτωσης για ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1 = 2.5m$ (**Σχήμα 5.3**) με εξαίρεση τις μεγαλύτερες εύρους τιμές $r_u < 0$ στο χώρο ανάμεσά τους αλλά και την αύξηση των τιμών r_u στην εξωτερική παρειά του στενού. Αυτή η αύξηση οδήγησε στην ελαφρή μείωση της συγκλίνουσας στροφής του στενού.

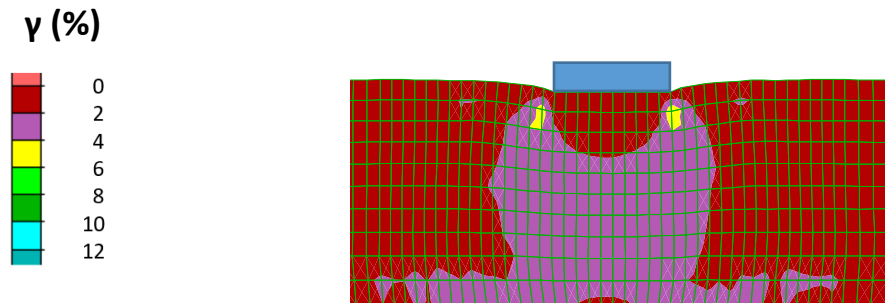
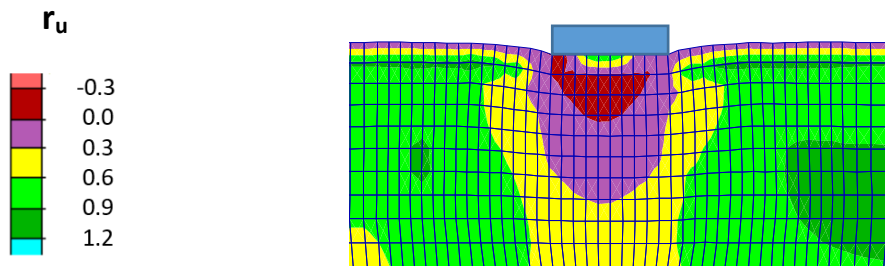


Σχήμα 5.6 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=2B_1=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

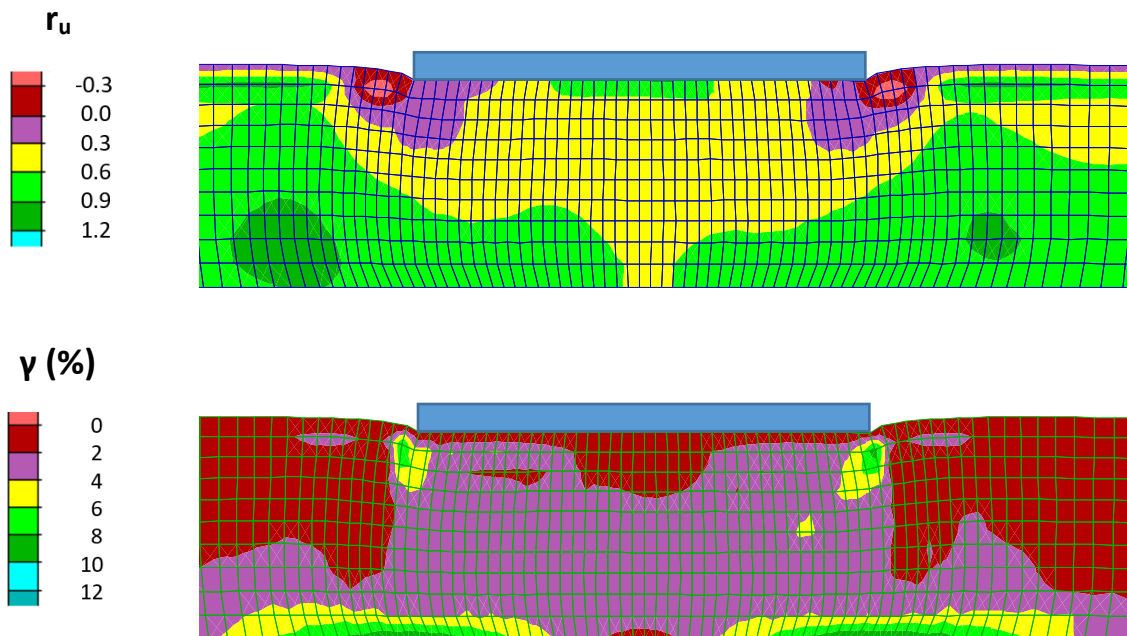
Τέλος, στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθιζησης και στροφής του ίδιου ζεύγους θεμελίων (ευρών $B_1 = 5.0m$ και $B_2 = 20.0m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με μεγάλη ενδιάμεση απόσταση $D = 2B_1 = 10.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$, χρησιμοποιώντας την ίδια τυπική μορφή παρουσίασης. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι λόγω περαιτέρω αύξησης της ενδιάμεσης απόστασης οριακά δεν εξαφανίζεται η ευμενής αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων σε όρους καθιζησης, καθώς και τα δύο θεμέλια εξακολουθούν να έχουν μικρότερες καθιζήσεις και από τα δύο αντίστοιχα μονά. Είναι σημαντική όμως η αποκλίνουσα στροφή του στενού.



Σχήμα 5.7 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=2B_1=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

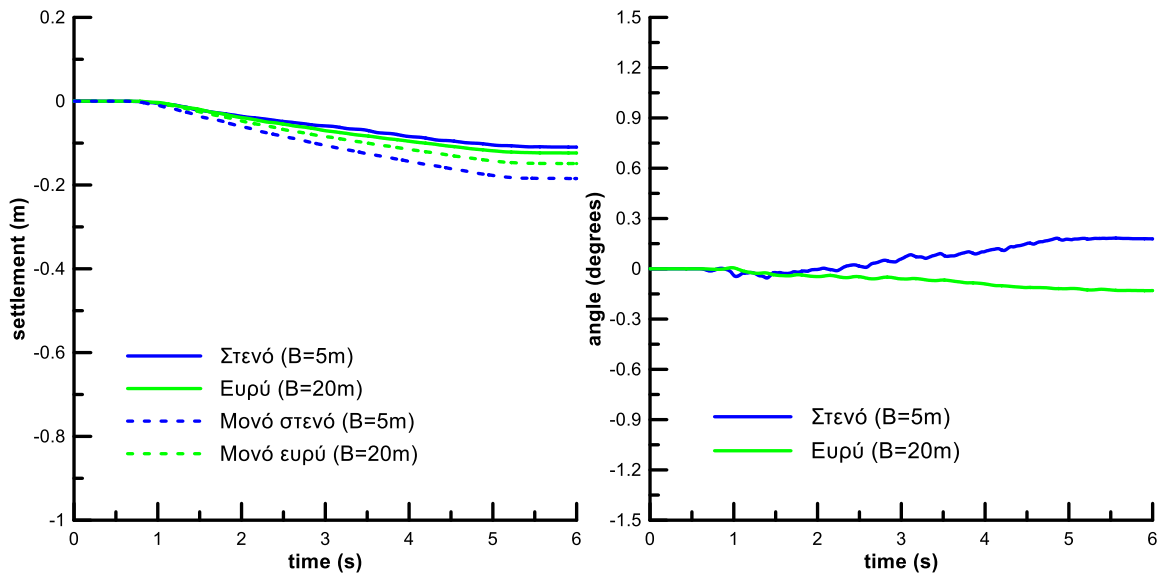


Σχήμα 5.8 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό στενό θεμέλιο (εύρους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα 5.9 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό ευρύ θεμέλιο (εύρους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

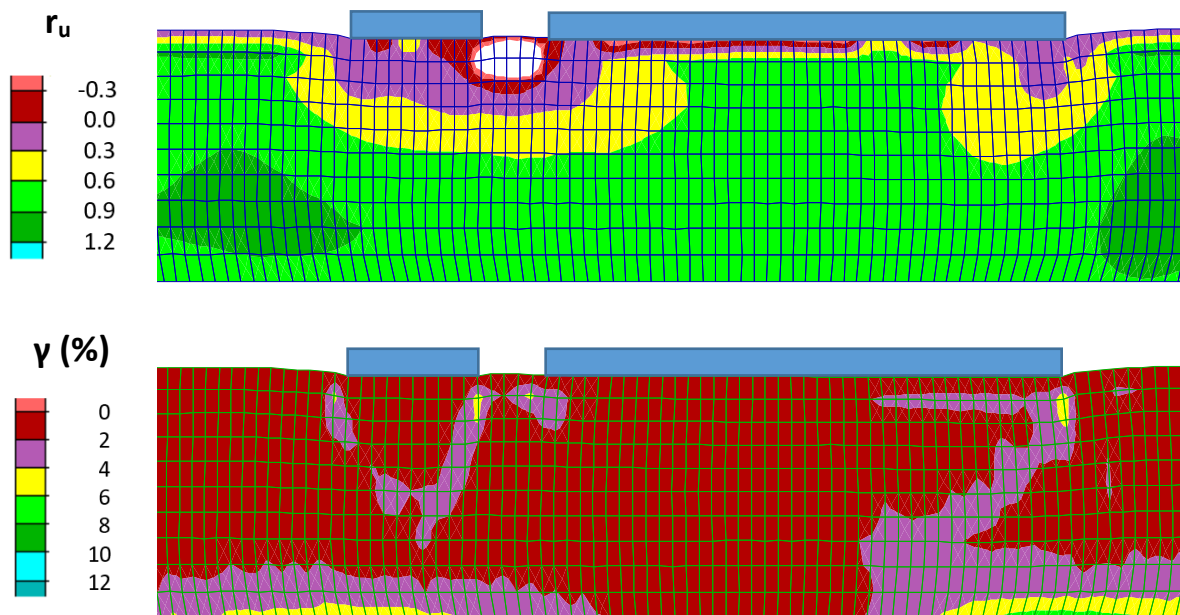
Επιπλέον, στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος του ως άνω ζεύγους θεμελίων με τη μεγάλη ενδιάμεση απόσταση $D = 2B_1 = 10.0m$ υπό την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Σε σύγκριση με το μονά θεμέλιο (**Σχήματα 5.8 και 5.9**) προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας (σε όρους γ) κάτω από το στενό θεμέλιο εξακολουθεί να είναι συμμετρικός για το μεγαλύτερο βάθος του αλλά πολύ πιο έντονος πλέον και στις δύο παρειές του. Στο ευρύ θεμέλιο ο μηχανισμός πρακτικώς ταυτίζεται με εκείνον του μονού. Αναφορικά με το καθεστώς υπερπίεσεων (σε όρους r_u), ομοιάζει σχετικώς με εκείνο του ζεύγους θεμελίων σε μικρή ή μέση ενδιάμεση απόσταση, με εξαίρεση την ακόμα μεγαλύτερου εύρους περιοχή τιμών $r_u < 0$ ανάμεσα τους αλλά και την ορατή αύξηση των τιμών r_u στην εξωτερική παρεία του ευρέος.



Σχήμα 5.10 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=50kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

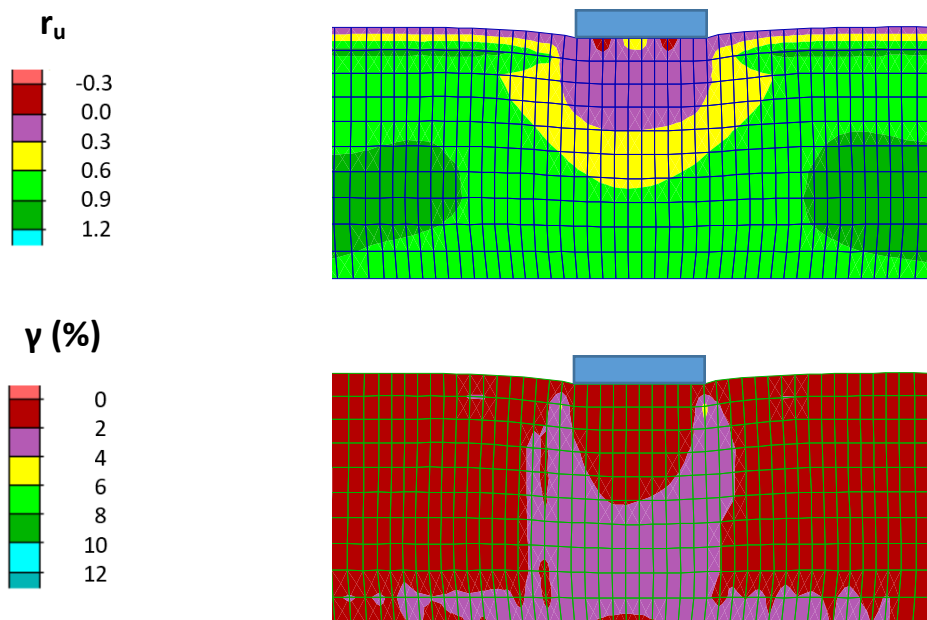
Στη συνέχεια στα **Σχήματα 5.10 – 5.11** και **5.14 – 5.15** διερευνάται η επίδραση του κοινού φορτίου q των θεμελίων διαφορετικού εύρους στην αλληλεπίδρασή τους. Δεδομένου ότι η μέγιστη αλληλεπίδραση για $q = 100kPa$ προκύπτει για $D/B_1 = 0.5$, εδώ η επίδραση του φορτίου q παρουσιάζεται μόνο για αυτή τη μικρή απόσταση μεταξύ του ζεύγους θεμελίων. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα και για τις άλλες αποστάσεις D/B_1 παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Β**.

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.10** παρουσιάζονται οι ιστορίες καθίζησης και στροφής ζεύγους θεμελίων (ευρών $B_1 = 5.0m$ και $B_2 = 20.0m$) για $q = 50kPa$, ενώ στο **Σχήμα 5.14** οι αντίστοιχες ιστορίες για $q = 200kPa$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απευθείας συγκρίσιμα με εκείνα για $q = 100kPa$ στο **Σχήμα 5.2**. Όπως αναμένεται από τη βιβλιογραφία, αύξηση του φορτίου q για το ίδιο θεμέλιο και την ίδια διέγερση οδηγεί σε αύξηση της σεισμικής καθίζησής του, χωρίς αυτή η σχέση να είναι γραμμική, όπως επίσης και το αντίθετο, μείωση του φορτίου q οδηγεί σε μείωση της σεισμικής καθίζησης. Για την περίπτωση όπου $q=50kPa$ (**Σχήμα 5.10**) εξακολουθεί να υπάρχει ευμενής αλληλεπίδραση μεταξύ των θεμελίων από άποψη καθιζήσεων, συνοδευόμενη από μικρή συγκλίνουσα στροφή του στενού θεμελίου προς το ευρύ, ακριβώς όπως και για $q=100kPa$ (**Σχήμα 5.2**) ενώ για το φορτίο $q=200kPa$ (**Σχήμα 5.14**) τα θεμέλια αποκτούν την ίδια τιμή καθίζησης η οποία είναι δυσμενής για το στενό και ευμενής για το ευρύ. Σημαντική είναι επίσης η μεγαλύτερου μεγέθους, συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες φορτίσεις, συγκλίνουσα στροφή του στενού θεμελίου και η πλέον ορατή αποκλίνουσα του ευρέος.

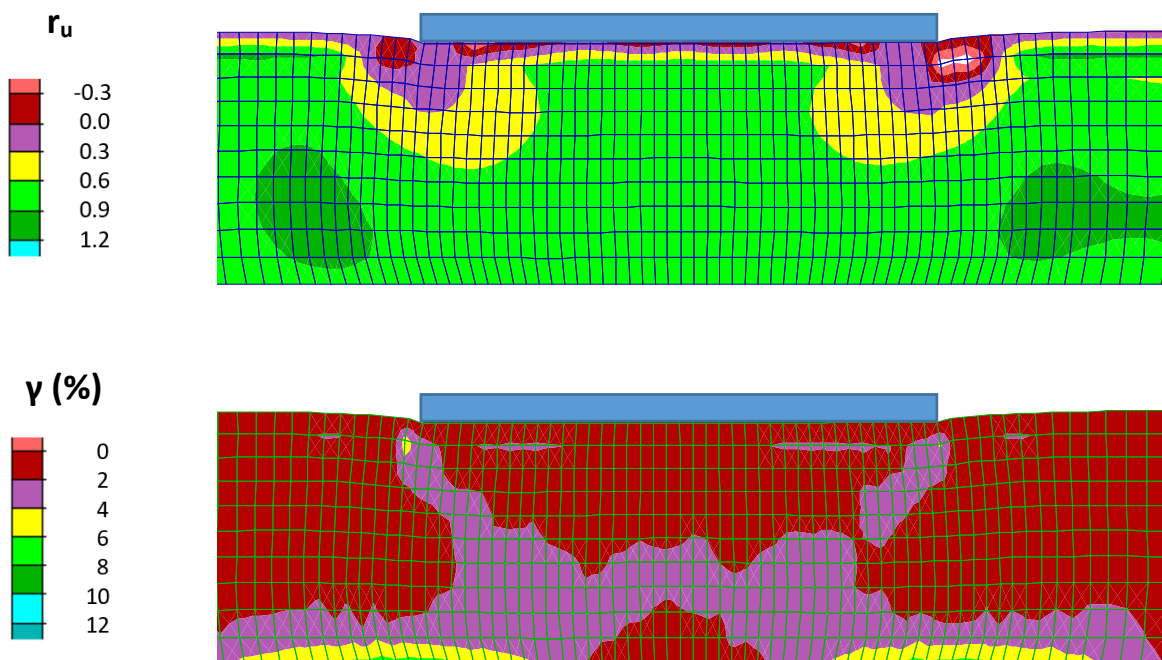


Σχήμα 5.11 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=50kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

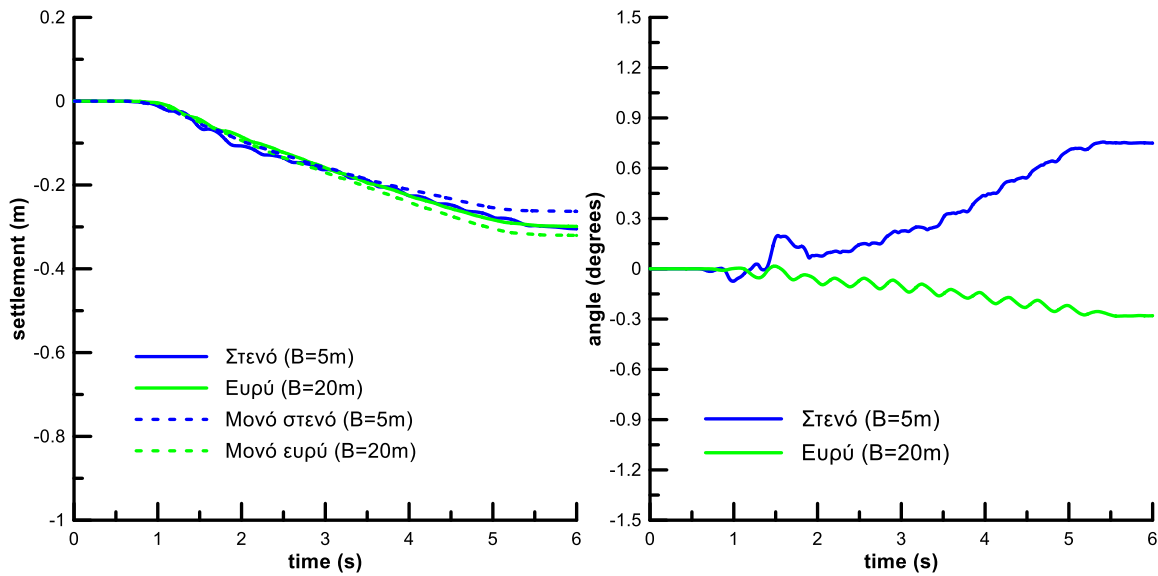
Επιπλέον, στο **Σχήμα 5.11** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ στο έδαφος του ίδιου ζεύγους θεμελίων (ευρών $B_1 = 5.0m$ και $B_2 = 20.0m$) σε απόσταση $D/B_1 = 0.5$ για $q = 50kPa$, ενώ στο **Σχήμα 5.15** οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για $q = 200kPa$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απευθείας συγκρίσιμα με εκείνα για το ίδιο ζεύγος, στην ίδια μικρή απόσταση, αλλά με $q = 100kPa$ στο **Σχήμα 5.3**, αλλά και με τις αντίστοιχες ισοκαμπύλες αναφοράς για μονά θεμέλια με $q = 50kPa$ (**Σχήματα 5.12** και **5.13**) και $q = 200kPa$ (**Σχήματα 5.16** και **5.17**). Συγκεκριμένα, για $q = 50kPa$ η ελαφρώς ευμενής αλληλεπίδραση θα πρέπει να σχετίζεται με την εντονότερη ρευστοποίηση σε μεγάλα βάθη τόσο κάτω από το στενό όσο και το ευρύ θεμέλιο, γεγονός που θα οδήγησε σε απομείωση της επιτάχυνσης των θεμελίων και συνεπώς και της καθίζησής τους. Παρατηρείται επίσης πως οι εικόνες r_u του ζεύγους ομοιάζουν αρκετά εκείνες των αντίστοιχων μονών θεμελίων. Ακόμα, η δημιουργία ουσιώδους συγκλίνουσας στροφής του στενού θεμελίου και η ελαφρώς αποκλίνουσα στροφή του ευρέος είναι αποτέλεσμα του ανομοιόμορφου μηχανισμού αστοχίας που δημιουργήθηκε κάτω από τις παρείες των θεμελίων.



Σχήμα 5.12 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό στενό θεμέλιο (εύρους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

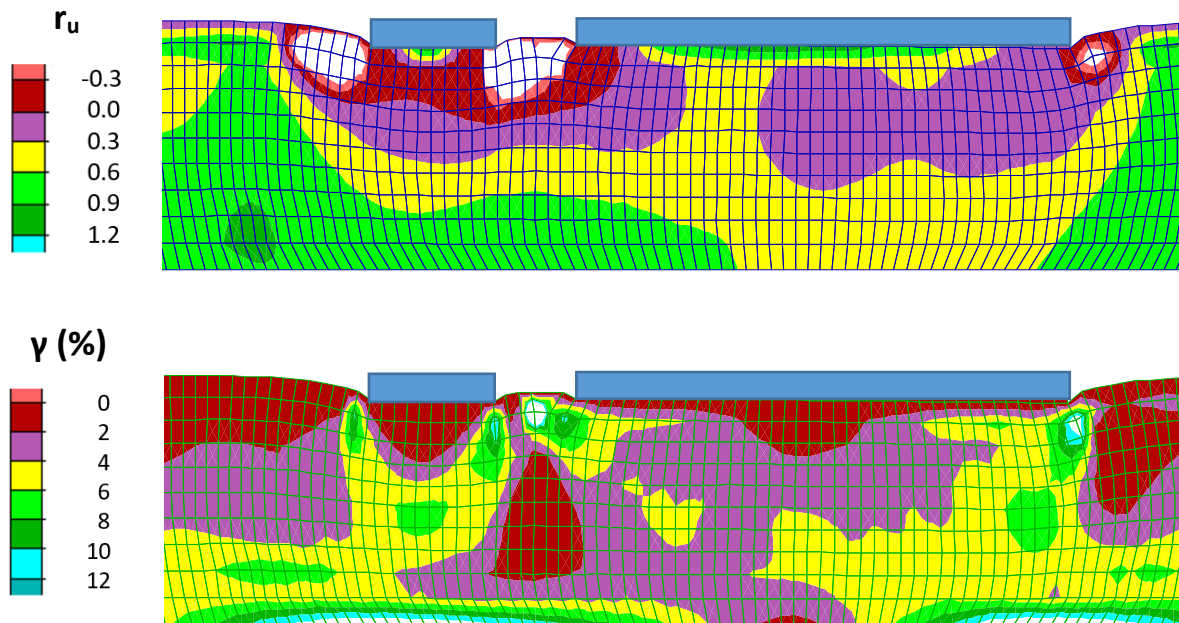


Σχήμα 5.13 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό ευρύ θεμέλιο (εύρους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

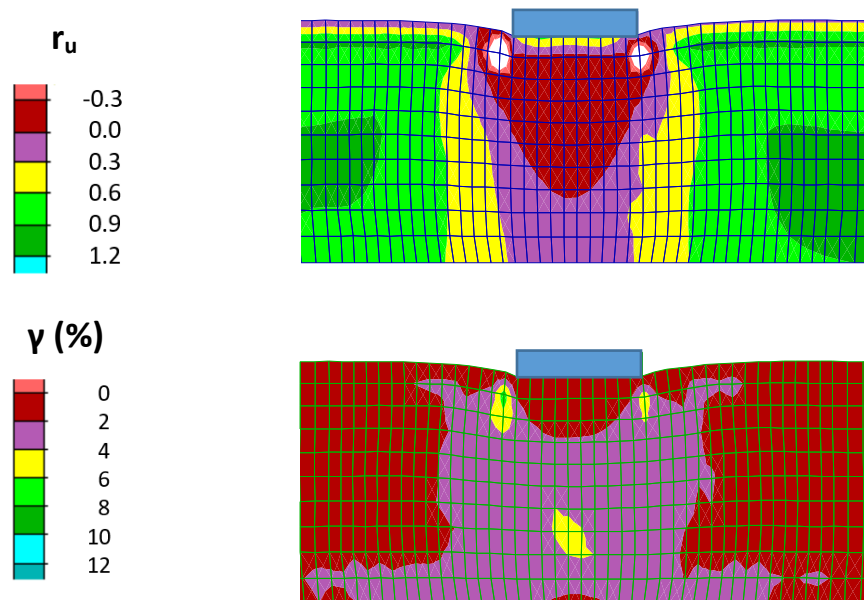


Σχήμα 5.14 Καθιζήσεις και στροφές ζευγούς θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=200kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

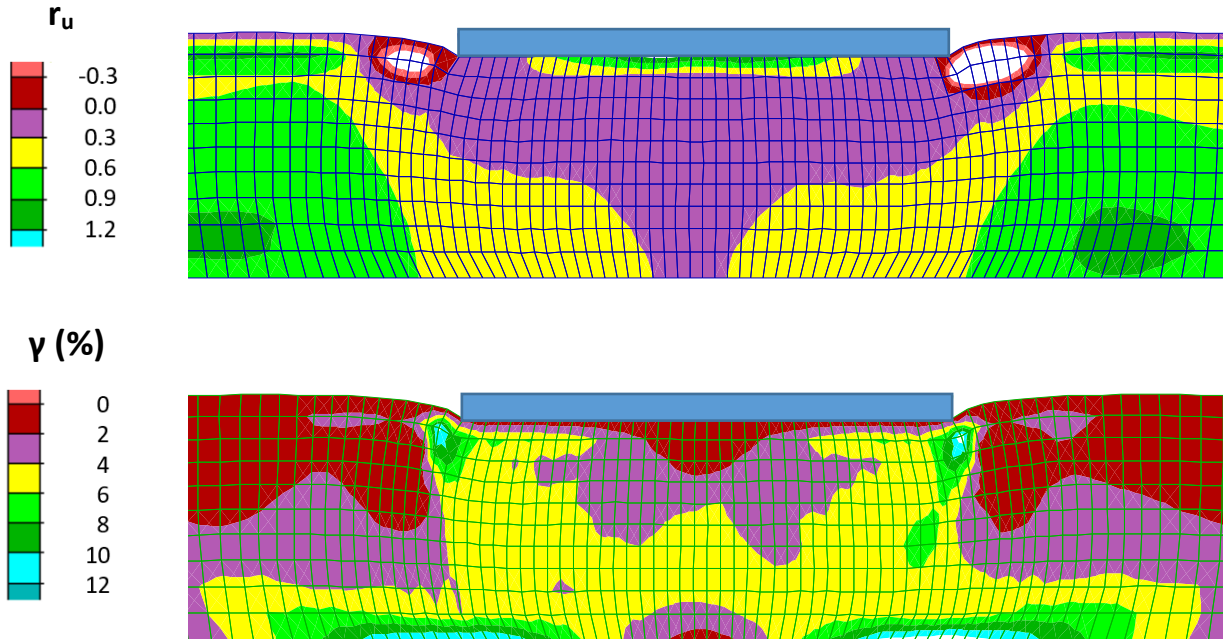
Αντίθετα, για $q = 200kPa$ η δυσμενής αλληλεπίδραση θα πρέπει να σχετίζεται με τις αρκετά αυξημένες υπερπιέσεις πόρων στην περιοχή ακριβώς κάτω από το ζεύγος οι οποίες μάλιστα εκτείνονται μέχρι το βάθος της εδαφικής στρώσης, γεγονός που θα οδήγησε σε μείωση της αντοχής του εδάφους και επακόλουθη αύξηση των καθιζήσεων. Αυτή η αύξηση αποτυπώνεται και με τη δημιουργία κατά πολύ εντονότερων μηχανισμών αστοχίας κάτω από τα θεμέλια. Αξίζει να παρατηρηθεί μέσα από τα **Σχήματα 5.15, 5.16 και 5.17** η υπέρμετρη αύξηση συσσωρευμένων διατμητικών τάσεων κάτω από το στενό θεμέλιο του ζεύγους σε σύγκριση με το αντίστοιχο μονό αλλά και πως ο μηχανισμός αστοχίας του ευρέος του ζεύγους προσεγγίζει πολύ εκείνον του μονού. Από την άλλη, η δημιουργία συγκλίνουσας στροφής του στενού θεμελίου θα πρέπει να αποδοθεί στην δημιουργία μιας ουσιώδους βάθους περιοχής με υποπιέσεις πόρων ($r_u < 0$) στην εξωτερική του παρειά καθώς και στις μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις που συσσωρεύτηκαν στην εσωτερική παρειά. Επίσης, αναπτύχθηκαν υποπιέσεις πόρων και στο χώρο ανάμεσα από το ζεύγος, γεγονός που θα ενίσχυσε την εδαφική δυσκαμψία στην περιοχή αυτή και θα οδήγησε το ευρύ θεμέλιο να στραφεί κατά του γειτονικού του.



Σχήμα 5.15 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



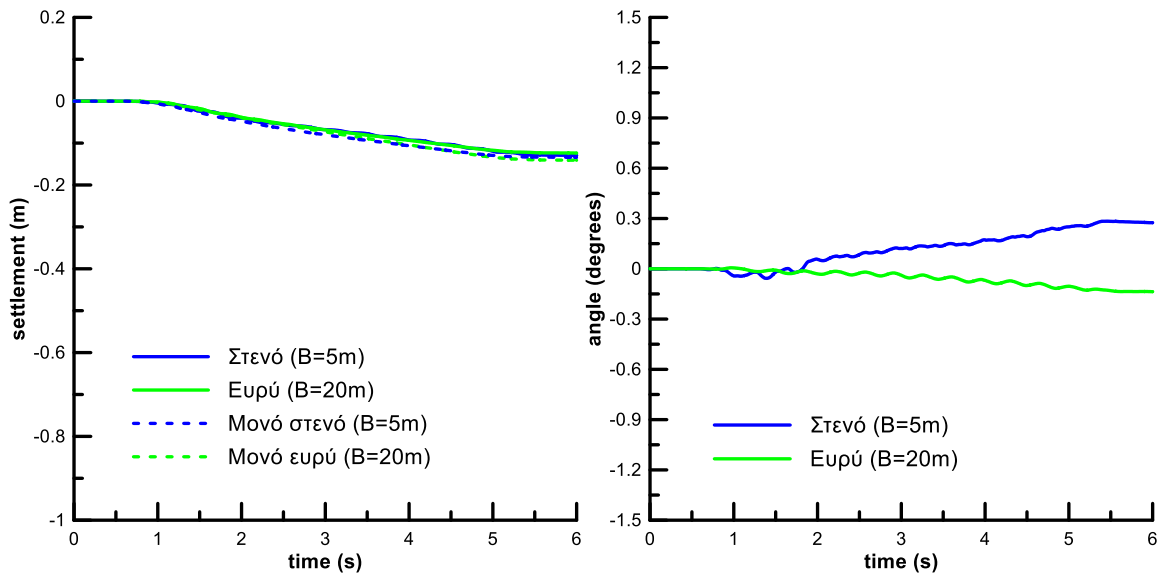
Σχήμα 5.16 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό στενό θεμέλιο (εύρους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα 5.17 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό ευρύ θεμέλιο (εύρους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

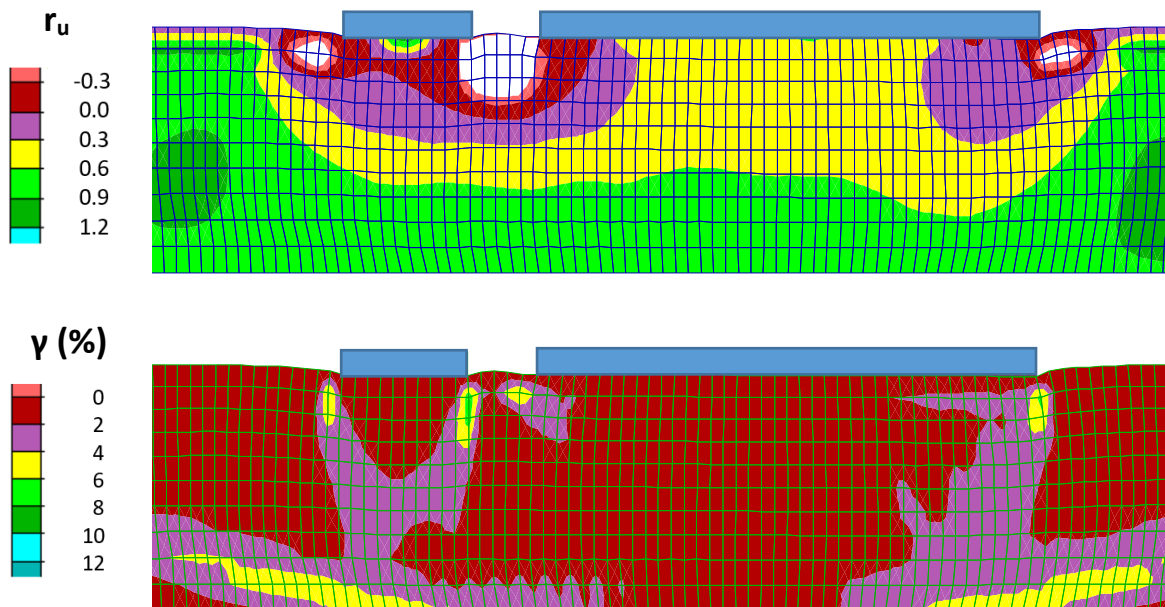
5.2.2 Επίδραση έντασης διέγερσης

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα για ζεύγος θεμελίων τοποθετημένα με ενδιάμεση απόσταση μεταξύ τους ίση με $D=0.5B_1$ για δύο διαφορετικές μέγιστες σεισμικές επιταχύνσεις, 0.1g και 0.4g. Δηλαδή και πάλι διερευνάται εδώ μόνο η μικρή απόσταση μεταξύ θεμελίων, καθώς οι προηγούμενες αναλύσεις υποδεικνύουν ότι γι' αυτή προκύπτει η πιο έντονη αλληλεπίδρασή τους. Οι αναλύσεις έγιναν μόνον για φορτίο έδρασης $q=100kPa$.



Σχήμα 5.18 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$

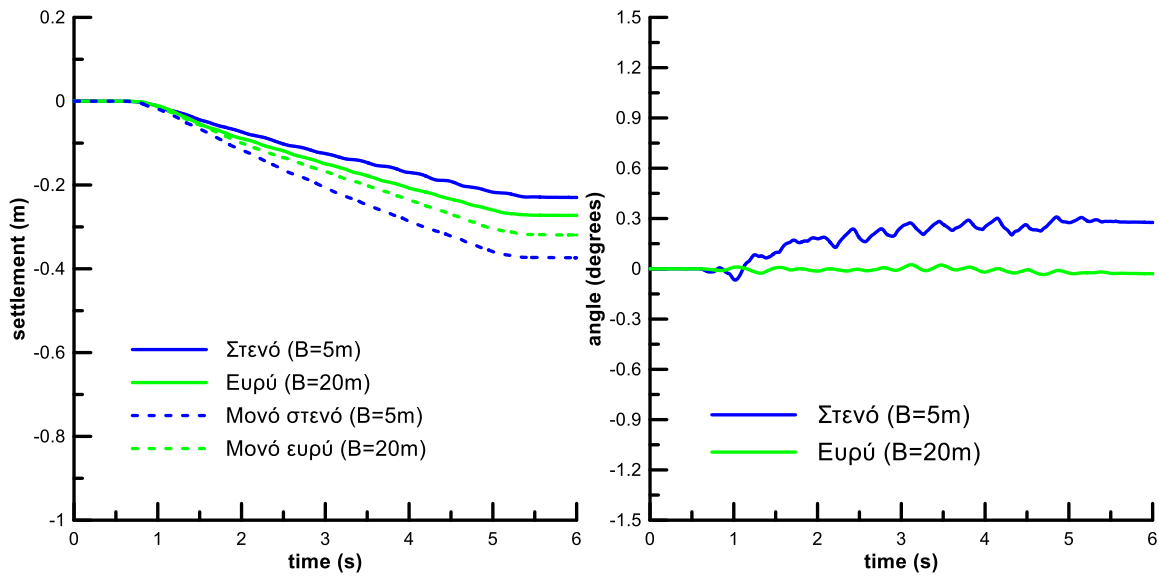
Συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 5.18** και **5.20** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφών για το ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους (ευρών $B_1 = 5.0m$ και $B_2 = 20.0m$) υπό φορτίο $q = 100kPa$ σε απόσταση $D/B_1 = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο **Σχήμα 5.2**, για $a_{max} = 0.2g$. Επιπλέον, στα **Σχήματα 5.19** και **5.21** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους ισοκαμπυλών συντελεστή r_u και παραμόρφωσης γ , για το ίδιο ζεύγος υπό φορτίο $q = 100kPa$ σε απόσταση $D/B_1 = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα, με τα αποτελέσματα αυτά να είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο **Σχήμα 5.3** για $a_{max} = 0.2g$



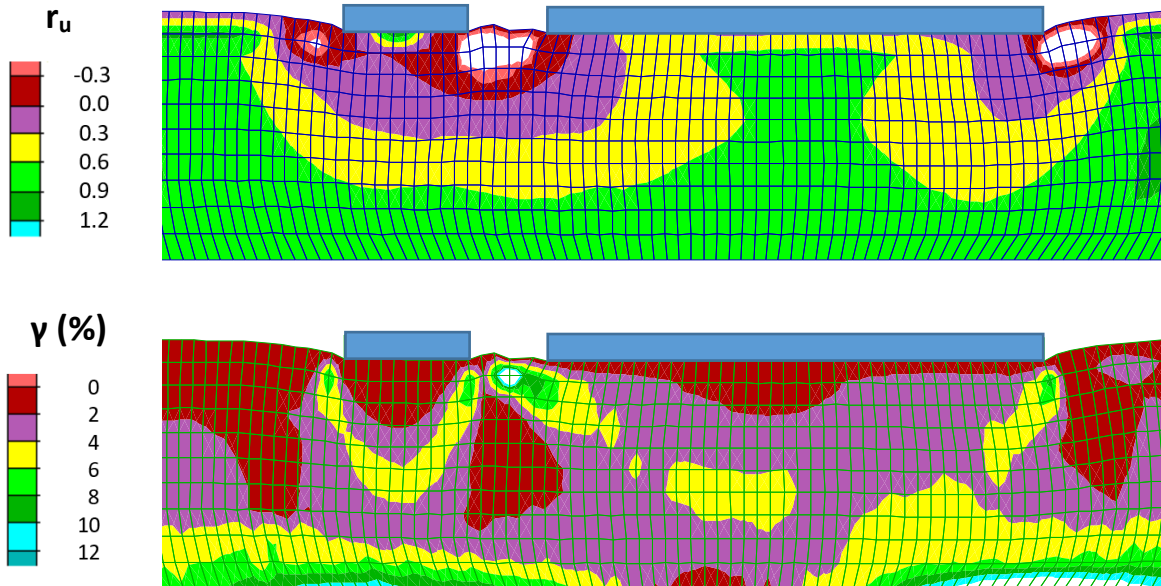
Σχήμα 5.19 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$

Προκύπτει αρχικώς ότι η αύξηση της επιτάχυνσης a_{max} οδηγεί σε αύξηση των καθιζήσεων των μονών θεμελίων, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Από εκεί και πέρα, παρατηρώντας τα Σχήματα 5.18 και 5.20 φαίνεται ότι ο υποδιπλασιασμός της a_{max} πρακτικώς εκμηδένισε την ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ενώ ο διπλασιασμός της a_{max} οδήγησε σε τιμές καθιζήσεων μικρότερες και από τα δύο αντίστοιχα μονά θεμέλια. Από την άλλη, και στις δύο περιπτώσεις σε όρους στροφών το στενό θεμέλιο συγκλίνει ελαφρώς ενώ το ευρύ εμφανίζει μια αμελητέα απόκλιση, χωρίς να διαφέρουν ιδιαίτερα οι τιμές των στροφών του κάθε θεμελίου ανά περίπτωση. Συνεπώς, η επίδραση της a_{max} δε δείχνει συστηματική στην αλληλεπίδραση των θεμελίων, αντίθετα από τη συστηματική αύξηση ή μείωση των καθιζήσεων των μονών θεμελίων.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των Σχημάτων 5.3, 5.19 και 5.21 προκύπτει μεγάλη επίδραση στις ισοκαμπύλες παραμόρφωσης γ λόγω αύξησης της επιτάχυνσης a_{max} ενώ η μείωσή της δεν φαίνεται να φέρει σημαντικές διαφορές. Από την άλλη, μείωση της επιτάχυνσης a_{max} οδηγεί σε μείωση των τιμών r_u ενώ η αύξησή της δεν φέρει καμία σημαντική αλλαγή.



Σχήμα 5.20 Καθιζήσεις και στροφές ζευγούς θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$



Σχήμα 5.21 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και ίδιου φορτίου $q=100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$

5.3 Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού φορτίου

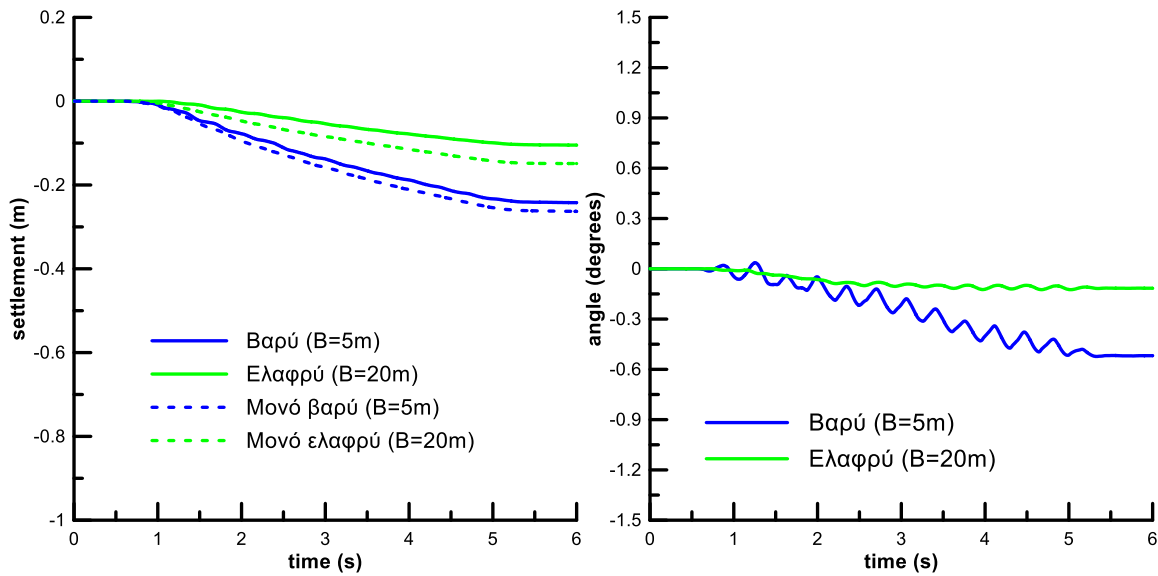
Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η σεισμική απόκριση κυρίως σε όρους καθιζήσεων και στροφών ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους υποβαλλόμενων σε σεισμική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης 0.2g για διαφορετικές τιμές φορτίων έδρασης $q_1 \neq q_2$. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί συνδυασμοί φορτίσεων ($q_1=200\text{kPa}$ για το στενό και $q_2=50\text{kPa}$ για το ευρύ, $q_1=50\text{kPa}$ για το στενό και $q_2=200\text{kPa}$ για το ευρύ) για το γνωστό ζεύγος θεμελίων, ένα στενό εύρους $B_1=5\text{m}$ και ένα ευρύ εύρους $B_2=20\text{m}$. Το θεμέλιο με το φορτίο $q=50\text{kPa}$ αποκαλείται ελαφρύ, ενώ βαρύ θεμέλιο αποκαλείται εκείνο με φορτίο $q=200\text{kPa}$. Στόχος είναι η ποσοτικοποίηση της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης μεταξύ των θεμελίων, όταν αυτά έχουν διαφορετικό φορτίο. Οι παράμετροι ενδιαφέροντος είναι η απόσταση D/B_1 του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους B και τα φορτία αυτών. Πρόκειται για ένα πρόβλημα πιο περίπλοκο από εκείνο της παραγράφου 5.2, όπου το φορτίο q ήταν ίδιο στο ζεύγος θεμελίων.

Για κάθε ζεύγος θεμελίων παρουσιάζονται εδώ μόνο τα αποτελέσματα για τη μικρή ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1$ όπου η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη. Για τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες αποστάσεις D/B_1 θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο **Παράρτημα Β**.

5.3.1 Απόκριση θεμελίων διαφορετικού φορτίου

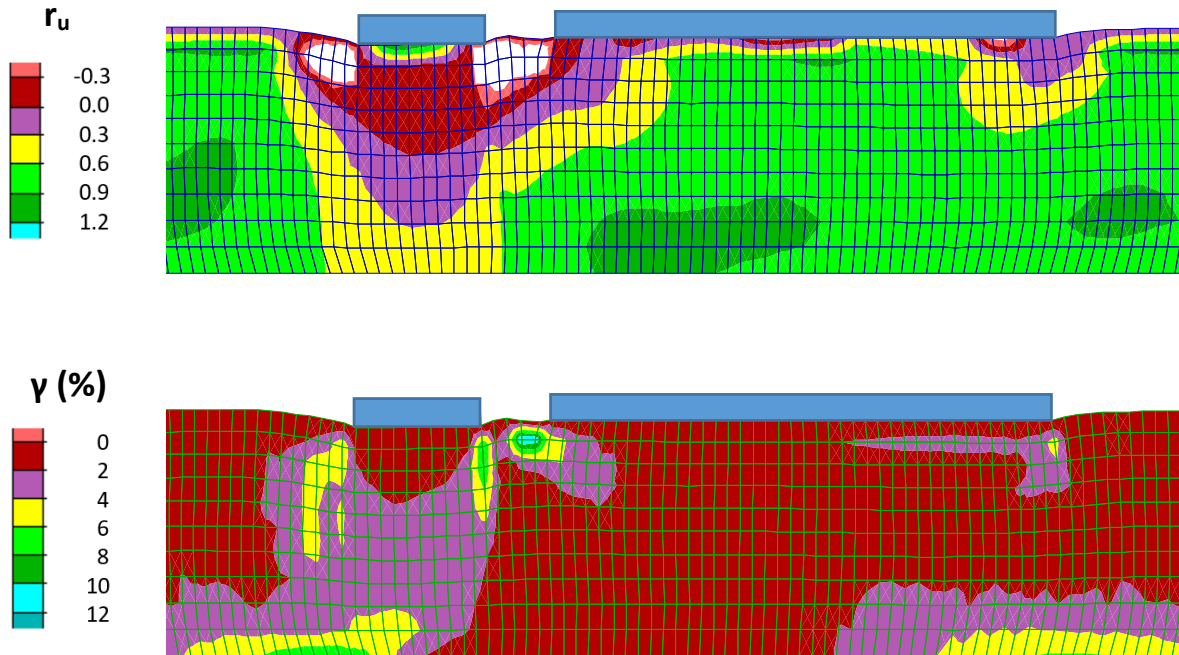
Στο **Σχήμα 5.22** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής του ζεύγους θεμελίων (ευρών $B_1 = 5\text{m}$ και $B_2 = 20\text{m}$), ενός βαρύ ($q = 200\text{kPa}$) κι ενός ελαφρύ ($q = 50\text{kPa}$), με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1 = 2.5\text{m}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.2g$. Χάρην σύγκρισης, με διακεκομμένες καμπύλες ίδιου χρώματος παρουσιάζονται και οι χρονοϊστορίες καθίζησης των αντίστοιχων μονών θεμελίων υπό την ίδια διέγερση, ενώ οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες στροφής μονών θεμελίων είναι πρακτικώς μηδενικές (και δεν παρουσιάζονται). Αυτή είναι η τυπική μορφή παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε όρους χρονοϊστοριών και ακολουθείται σε όλη την παράγραφο 5.3.

Από τη σύγκριση προκύπτει ότι το βαρύ θεμέλιο καθιζάνει περισσότερο από το ελαφρύ, κι ότι η αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης είναι ευμενής και για τα δύο. Η αλληλεπίδραση είναι ορατή και σε όρους στροφής, καθώς και τα δύο θεμέλια φαίνεται να αποκλίνουν το ένα από το άλλο με τη διαφορά πως η στροφή του ευρέος είναι πρακτικώς αμελητέα.



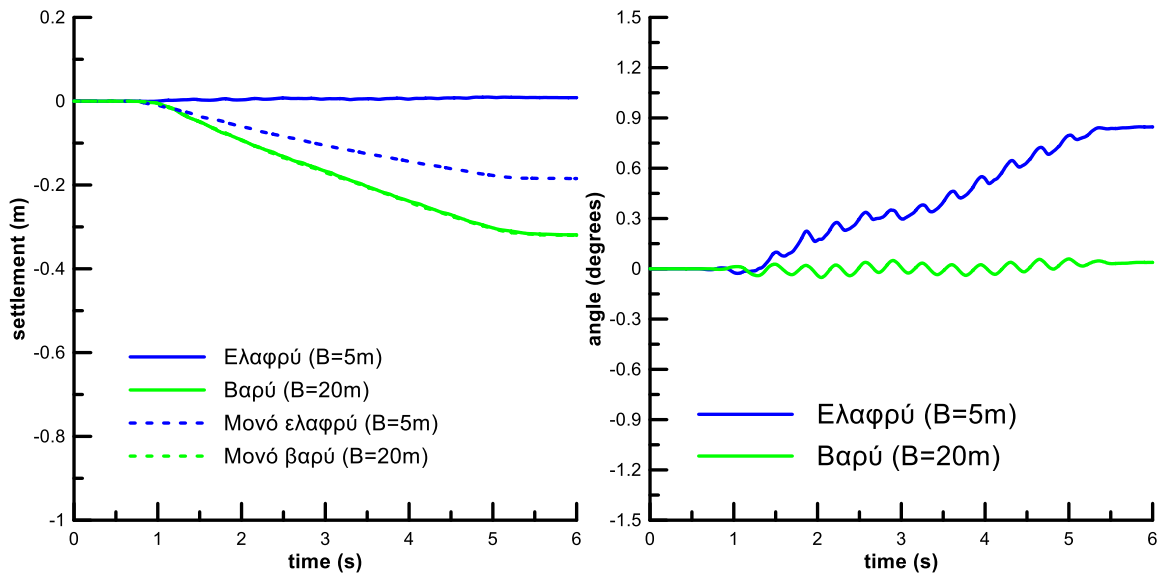
Σχήμα 5.22 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=200kPa$ και $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στο **Σχήμα 5.23** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος του ίδιου ζεύγους θεμελίων με φορτία $q_1 = 200kPa$ και $q_2 = 50kPa$, με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1 = 2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Για να διευκολύνεται η σύγκριση, η χρωματική κλίμακα μεταβολής του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ είναι η ίδια στο σχήμα αυτό, όπως και σε όλο το κεφάλαιο. Προκύπτει ελαφρώς διαφορετικό προφίλ υπερπιέσεων κάτω από τα δύο θεμέλια, με το βαρύ να έχει μικρότερες τιμές r_u που εκτείνονται σε όλο το βάθος της στρώσης όπως συμβαίνει και στο αντίστοιχο μονό (**Σχήμα 5.16**) αλλά και ο χώρος κάτω από το ελαφρύ φαίνεται να έχει ρευστοποιηθεί πλήρως ακριβώς όπως και στο μονό του (**Σχήμα 5.13**). Ακόμα, παρατηρούνται υποπιέσεις πόρων ($r_u < 0$) που καταλαμβάνουν ικανό βάθος στο χώρο ανάμεσα στα δύο θεμέλια, γεγονός που επεξηγεί τις αποκλίνουσες στροφές μεταξύ τους. Αντίστοιχα προκύπτουν και αρκετά διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας σε σύγκριση με τα μονά, με μεγάλες συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις στις εσωτερικές παρειές.



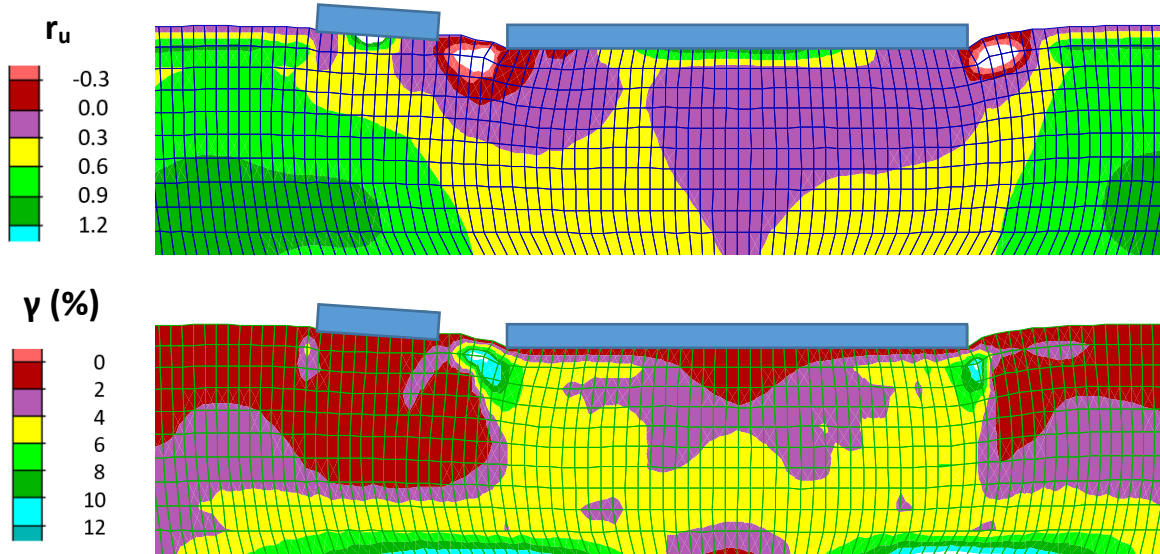
Σχήμα 5.23 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=200kPa$ και $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.24** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής του ίδιου ζεύγους θεμελίων με ανάποδα φορτία αυτή τη φορά, $q_1 = 50kPa$ και $q_2 = 200kPa$, με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1 = 2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Είναι αξιοσημείωτη παρατήρηση πως το ελαφρύ θεμέλιο εμφανίζει (αμελητέα) ανύψωση ενώ το βαρύ καθιζάνει ακριβώς όσο και το αντίστοιχο μονό του. Η αλληλεπίδραση είναι εμφανής μόνο σε όρους στροφής, καθώς το ελαφρύ θεμέλιο στρέφεται έντονα προς την πλευρά του γειτονικού του, ενώ το βαρύ θεμέλιο δεν στρέφεται καθόλου. Φαίνεται πως σε αυτόν τον συνδυασμό το ελαφρύ θεμέλιο ακολουθεί το ίδιο μοτίβο που παρατηρήθηκε στο Κεφάλαιο 4.3, πως το ελαφρύ στρίβει προς το βαρύτερο.



Σχήμα 5.24 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=50kPa$ και $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

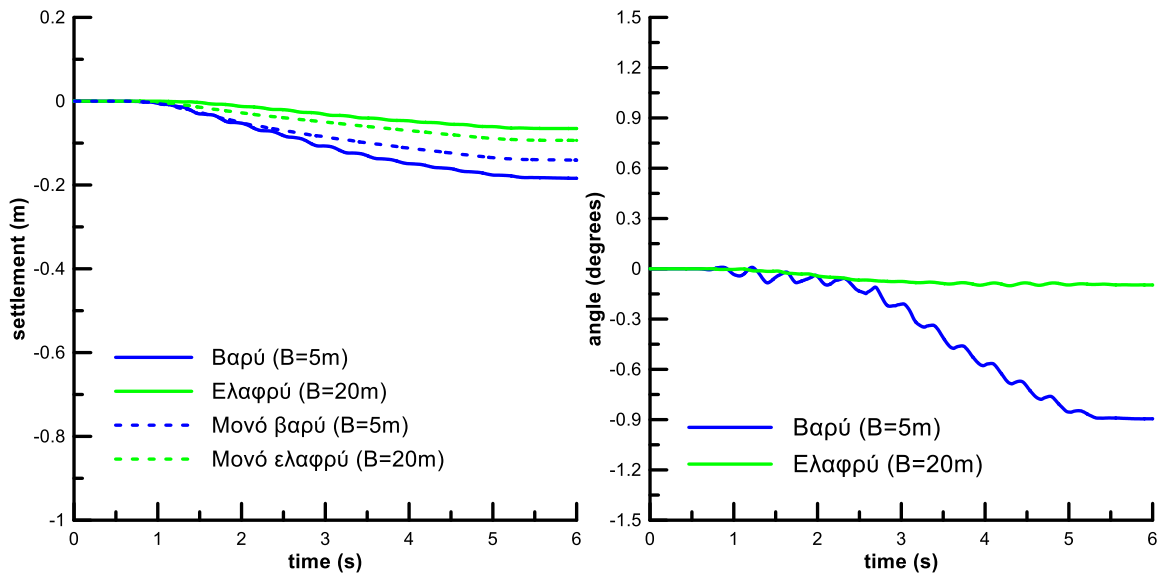
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.25** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος του ζεύγους θεμελίων για φορτία $q_1 = 50kPa$ και $q_2 = 200kPa$, με μικρή ενδιάμεση απόσταση $D = 0.5B_1 = 2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$. Αντίστοιχα και με το **Σχήμα 5.23**, προκύπτει και πάλι σαφώς διαφορετικό προφίλ υπερπιέσεων κάτω από τα δύο θεμέλια, με το ελαφρύ να έχει μεγαλύτερες τιμές, εικόνα αντίθετη από εκείνη του αντίστοιχου μονού (**Σχήμα 5.12**) ενώ στο βαρύ η κατανομή των υπερπιέσεων πόρων ομοιάζει πάρα πολύ με εκείνη του μονού (**Σχήμα 5.17**). Σημαντική παρατήρηση είναι πως πρακτικά δεν υπάρχει μηχανισμός αστοχίας κάτω από το ελαφρύ θεμέλιο ενώ του βαρύ είναι συμμετρικός και πανομοιότυπος με του μονού. Συνολικά, το βαρύ θεμέλιο συμπεριφέρεται σαν απομονωμένο.



Σχήμα 5.25 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=50kPa$ και $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

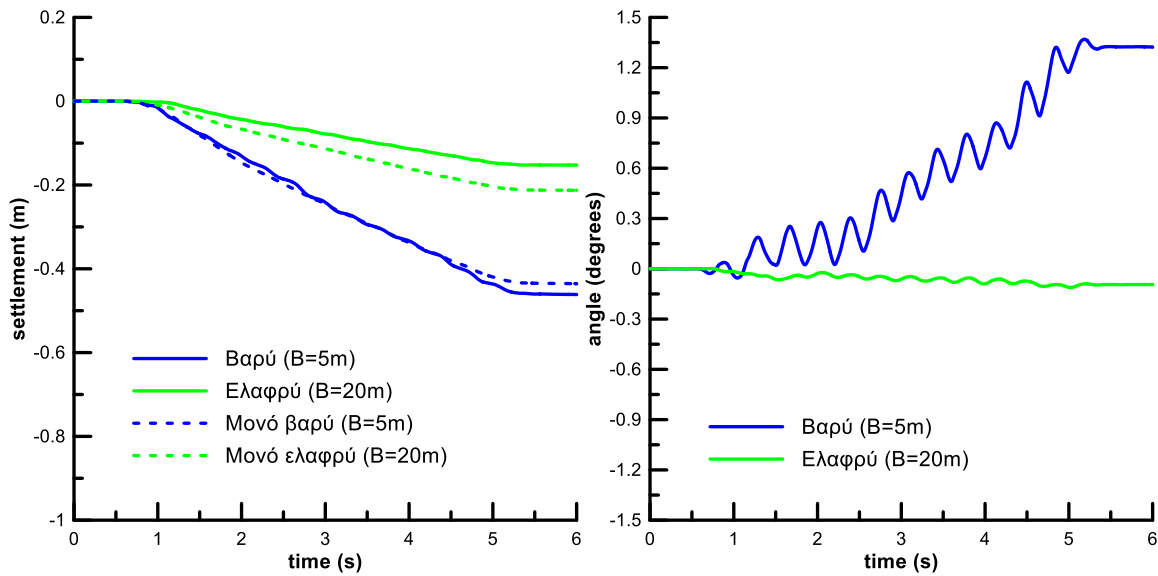
5.3.2 Επίδραση έντασης διέγερσης

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα για το γνωστό ζεύγος θεμελίων (ευρών $B_1 = 5.0m$ και $B_2 = 20.0m$) τοποθετημένα με ενδιάμεση απόσταση μεταξύ τους ίση με $D=0.5B_1$ για δύο διαφορετικές μέγιστες σεισμικές επιταχύνσεις, $0.1g$ και $0.4g$. Δηλαδή και πάλι διερευνάται εδώ μόνο η μικρή απόσταση μεταξύ θεμελίων, καθώς οι προηγούμενες αναλύσεις υποδεικνύουν ότι γι' αυτή προκύπτει η πιο έντονη αλληλεπίδρασή τους. Οι αναλύσεις έγιναν για τους δύο συνδυασμούς φορτίσεων της προηγούμενης υποενότητας, δηλαδή για $q_1 = 200kPa$ και $q_2 = 50kPa$ και για $q_1 = 50kPa$ και $q_2 = 200kPa$. Χάρην συντομίας στην παρούσα παράγραφο εμφανίζονται μόνο τα αποτελέσματα σε όρους χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφών.



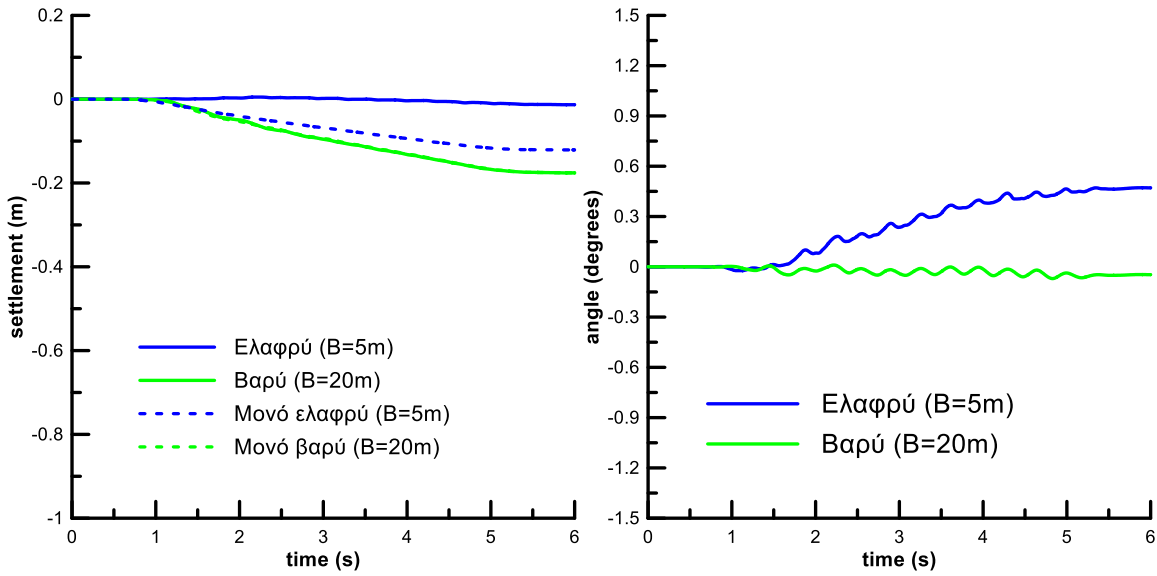
Σχήμα 5.26 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=200kPa$ και $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$

Ειδικότερα, στα Σχήματα 5.26 και 5.27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους χρονοϊστοριών καθιζήσης και στροφών για το ζεύγος θεμελίων υπό φορτία $q_1 = 200kPa$ και $q_2 = 50kPa$ σε απόσταση $D/B_1 = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο Σχήμα 5.22, για $a_{max} = 0.2g$. Προκύπτει αρχικώς ότι η αύξηση της επιτάχυνσης a_{max} οδηγεί σε αύξηση των καθιζήσεων των θεμελίων όπως αντίστοιχα και η μείωσή της σε μείωση των καθιζήσεων, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Από εκεί και πέρα, σε όρους καθιζήσεων, φαίνεται ότι ο υποδιπλασιασμός της a_{max} οδήγησε σε δυσμενή αλληλεπίδραση του βαρύ θεμελίου σε αντίθεση με το ελαφρύ που εξακολουθεί να καθιζάνει λιγότερο από το αντίστοιχο μονό του. Την ίδια ακριβώς συμπεριφορά εμφανίζουν τα θεμέλια με διπλασιασμό της a_{max} . Από την άλλη, σε όρους στροφών, για υποδιπλασιασμό της a_{max} το βαρύ αποκλίνει από το γειτονικό του ενώ για διπλασιασμό συγκλίνει σημαντικά προς το ελαφρύ, σε αντίθεση με το ελαφρύ που δεν στρέφεται σε καμία περίπτωση. Συνεπώς, η επίδραση της a_{max} δε δείχνει συστηματική στην αλληλεπίδραση των θεμελίων.

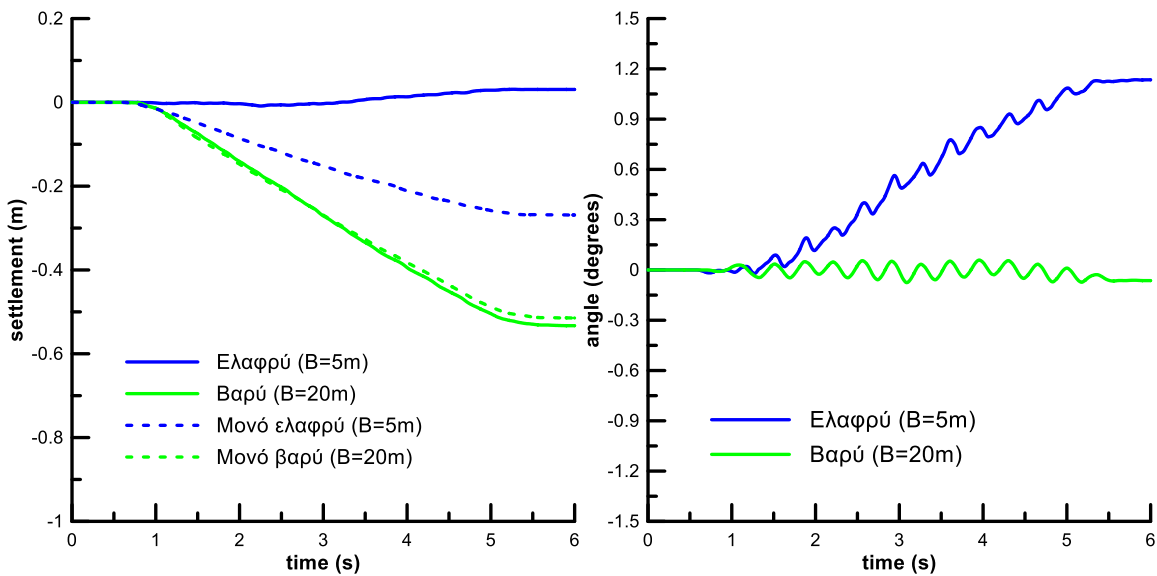


Σχήμα 5.27 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=200kPa$ και $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$

Τέλος, στα **Σχήματα 5.28** και **5.29** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους χρονοϊστοριών καθίζησης και στροφών για το ζεύγος θεμελίων αυτήν τη φορά υπό φορτία $q_1 = 50kPa$ και $q_2 = 200kPa$ σε απόσταση $D/B_1 = 0.5$, υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.1g$ και $0.4g$, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκρίσιμα με εκείνα στο **Σχήμα 5.24** για $a_{max} = 0.2g$. Από τη σύγκριση προκύπτει πως τόσο ο υποδιπλασιασμός αλλά και ο διπλασιασμός της a_{max} οδήγησαν σε πανομοιότυπο προφίλ καθιζήσεων, μηδενική καθίζηση έως και αμελητέα ανύψωση του ελαφρύ και ίδια τιμή καθίζησης του βαρύ με το μονό του. Φαίνεται και εδώ πως στο συνδυασμό $q_1 = 50kPa$ και $q_2 = 200kPa$ το ευρύ θεμέλιο δεν αλληλεπιδρά με το στενό γειτονικό του. Σε όρους στροφών, μέσα από τα **Σχήματα 5.24**, **5.28** και **5.29** παρατηρείται πως το ελαφρύ αποκτά συστηματικά συγκλίνουσα στροφή προς το γειτονικό του και συγκεκριμένα αυτή αυξάνεται με αύξηση της επιτάχυνσης a_{max} , ενώ το βαρύ αποκλίνει ελαφρώς.



Σχήμα 5.28 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=50kPa$ και $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$



Σχήμα 5.29 Καθιζήσεις και στροφές ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικών φορτίων ($q_1=50kPa$ και $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B_1=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$

5.4 Σύνοψη χαρακτηριστικών απόκρισης θεμελίων διαφορετικού εύρους

Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο πως οι τιμές της τελικής καθίζησης z μονών θεμελίων που προέκυψαν από τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας είναι ενδεικτικές και δεν γενικεύονται, καθώς εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, της διέγερσης και των θεμελίων. Ακολουθώντας τη δομή του Κεφαλαίου 4, το ενδιαφέρον εστιάζεται εδώ στις τιμές της τελικής καθίζησης z_{SSSI} του ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους και το πως αυτές συγκρίνονται με τις τιμές z των αντίστοιχων μονών θεμελίων αναφοράς κάθε περίπτωσης. Συνεπώς και εδώ θα μελετηθεί ο λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z , ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί σε πρακτικές εφαρμογές ως διορθωτικός συντελεστής της τιμής z που εκτιμάται από τις υπάρχουσες εμπειρικές μεθοδολογίες για μονά θεμέλια. Στα θεμέλια ίδιου εύρους και ίδιου φορτίου στο Κεφάλαιο 4, για την απαλοιφή διαφοροποιήσεων περισσότερο αριθμητικής φύσης ως τιμή z_{SSSI} λαμβανόταν η μέση τιμή των δύο θεμελίων. Στο ίδιο Κεφάλαιο, όταν το φορτίο ήταν διαφορετικό τότε δε γινόταν καμία προσαρμογή, και ως τιμή z_{SSSI} λαμβανόταν ακριβώς η τιμή της καθίζησης κάθε θεμελίου. Το ίδιο συμβαίνει και στο παρόν Κεφάλαιο, όπου τα δύο θεμέλια έχουν εξ ορισμού διαφορετικό εύρος, οπότε ως τιμή z_{SSSI} λαμβάνεται ακριβώς η τιμή καθίζησης κάθε θεμελίου, ανεξαρτήτως του φορτίου του. Σε κάθε περίπτωση, η τιμή z_{SSSI} κανονικοποιείται με την αρμόζουσα τιμή z του αντίστοιχου μονού θεμελίου. Όπως και στο Κεφάλαιο 4, οι τιμές $z_{SSSI}/z > 1$ και $z_{SSSI}/z < 1$ δείχνουν δυσμενή και ευμενή αλληλεπίδραση, αντίστοιχα.

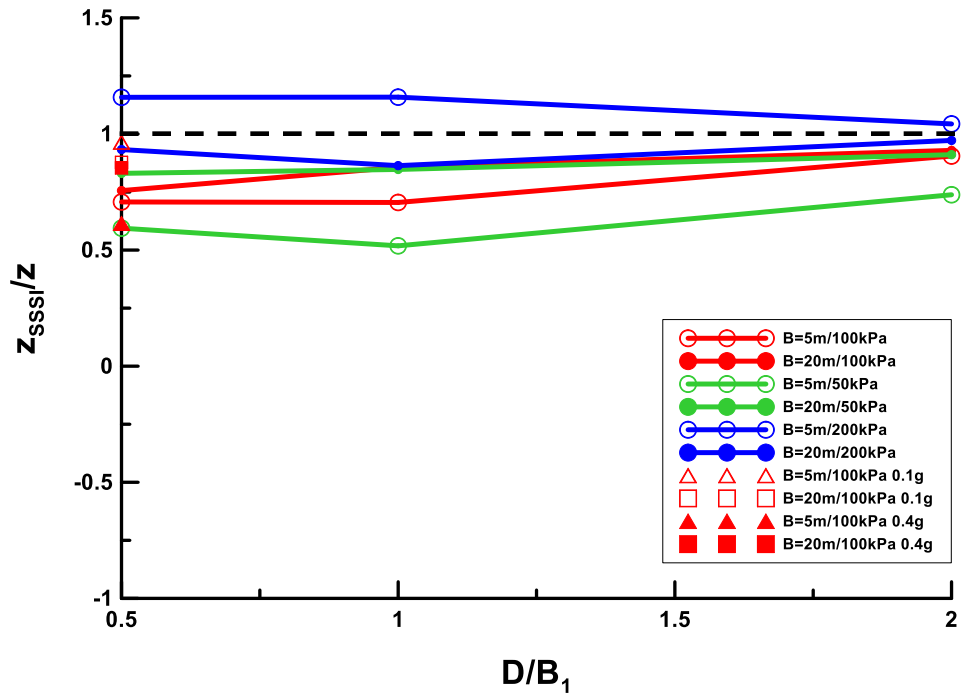
Ενδιαφέρει επίσης η στροφή θ των ζεύγους θεμελίων, η οποία θεωρείται πρακτικώς μηδενική σε περιπτώσεις μονών θεμελίων, υπονοώντας ότι κάποιες από τις αριθμητικές αναλύσεις μονών θεμελίων, ανάλογα με τη διέγερση, πιθανώς να έδειχναν μικρή παραμένουσα στροφή των θεμελίων, η οποία δεν ήταν όμως μεγαλύτερη, κατά μέτρο, από 0.26° , όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4. Αντίστοιχα, τιμές στροφής θ για ζεύγους θεμελίων που είναι μικρότερες, κατ' απόλυτη τιμή, από αυτή την οριακή τιμή 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. Υπενθυμίζεται ότι $\theta > 0$ υπονοεί συγκλίνουσα στροφή (δηλ. το θεμέλιο στρίβει προς το άλλο), ενώ $\theta < 0$ δείχνει αποκλίνουσα στροφή. Δεδομένου ότι στο Κεφάλαιο 5 δεν υπάρχουν συμμετρικές περιπτώσεις θεμελίων, για κάθε θεμέλιο λαμβάνεται ακριβώς η τιμή του θ από την ανάλυση, χωρίς καμία προσαρμογή.

Τα μεγέθη ενδιαφέροντος στην παρούσα διερεύνηση είναι η απόσταση D μεταξύ του στενού θεμελίου εύρους $B_1 = 5\text{m}$ και του ευρέος με $B_2 = 20\text{m}$, η οποία εδώ κανονικοποιείται μόνον ως προς το εύρος του στενού θεμελίου B_1 . Δηλαδή η απόσταση D/B_1 πρακτικώς αντιστοιχεί σε απόσταση D/B_{\min} . Υπενθυμίζεται πως η έννοια του στενού ή ευρέος θεμελίου είναι και πάλι σχετική, και συγκρίσιμη με το πάχος της εδαφικής στρώσης $H = 10\text{m}$. Συνεπώς, τα στενά θεμέλια νοούνται όσα έχουν $B/H = 0.5$ (ή γενικότερα $B/H < 1$) και ως ευρέα θεμέλια νοούνται όσα έχουν $B/H = 2.0$ (ή γενικότερα $B/H \gg 1$). Τέλος, έγινε διερεύνηση και ως προς το ομοιόμορφο φορτίο των θεμελίων, το οποίο πήρε 3 τιμές: $q = 50\text{kPa}$, 100kPa και 200kPa , οι οποίες αντιστοιχούν σε ελαφρύ, σύνηθες και βαρύ θεμέλιο.

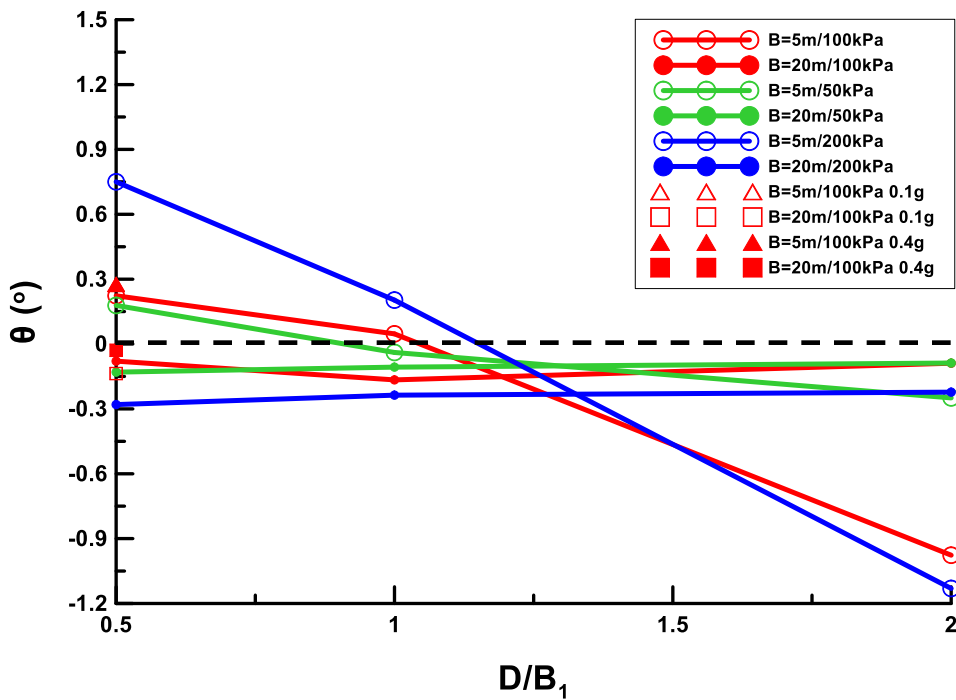
Στο **Σχήμα 5.30** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων του ζεύγους θεμελίων ίδιου φορτίου σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 για φορτία έδρασης $q = 50 - 200\text{kPa}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$, ενώ για $q = 100\text{kPa}$ παρουσιάζονται και οι τιμές για διαφορετικές τιμές $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$. Αρχικά παρατηρείται ότι $z_{\text{SSSI}}/z = 0.52 - 1.16$ για το ζεύγος θεμελίων ίδιου φορτίου, κι ότι γενικά ο λόγος z_{SSSI}/z τείνει αργά στο 1.0 με αύξηση της απόστασης D/B_1 , όπως είναι και το αναμενόμενο καθώς σταδιακά απομειώνεται η αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων. Η αδρή απομείωση της αλληλεπίδρασης οφείλεται στο ότι η μέγιστη απόσταση $D/B_1 = 2$, αντιστοιχεί σε $D/B_2 = 0.5$, οπότε δεν μπορεί να θεωρηθεί τόσο μεγάλη και για το ευρύ θεμέλιο.

Όπως και με τα δίδυμα θεμέλια, και εδώ προκύπτει ότι ο λόγος z_{SSSI}/z αυξάνει με το φορτίο q , δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η φόρτιση, τόσο δυσμενέστερη γίνεται η αλληλεπίδραση. Ειδικά για τις περιπτώσεις του σχήματος, για $q = 50\text{kPa} - 100\text{kPa}$ έχουμε αποκλειστικά ευμενή αλληλεπίδραση τόσο για το στενό όσο και το ευρύ θεμέλιο, ενώ για $q = 200\text{kPa}$ έχουμε δυσμενή αλληλεπίδραση για το στενό και ευμενή για το ευρύ. Με άλλα λόγια, για το ευρύ θεμέλιο προκύπτει αποκλειστικά ευμενής αλληλεπίδραση, όπως ακριβώς προκύπτει και για τα ευρέα δίδυμα θεμέλια. Τέλος, δεν φαίνεται να είναι σημαντική η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} η οποία είναι ίδιας τάξης μεγέθους και για τα δύο θεμέλια (π.χ. ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός μπορεί μεταβάλλει το λόγο z_{SSSI}/z κατά ± 0.1 τόσο στο στενό όσο και στο ευρύ), χωρίς όμως να προκύπτει συστηματική για τις αναλύσεις με $D/B_1 = 0.5$ που εκτελέστηκαν.

Στο **Σχήμα 5.31** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ του ζεύγους θεμελίων ίδιου φορτίου σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 για φορτία έδρασης $q = 50 - 200\text{kPa}$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$, ενώ για $q = 100\text{kPa}$ παρουσιάζονται και οι τιμές για διαφορετικές τιμές $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$. Αρχικώς παρατηρείται ότι $\theta = -1.13^\circ$ έως 0.75° για το ζεύγος θεμελίων ίδιου φορτίου, αν και σχετικά μεγάλες στροφές (π.χ. $|\theta| > 0.3^\circ$) μπορούν να παρουσιάσουν μόνο τα στενά θεμέλια, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα δίδυμα θεμέλια. Δεν προκύπτει κάποια ουσιώδης επίδραση της απόστασης D/B_1 . Και πάλι, η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} δείχνει αμελητέα και για τα δύο θεμέλια, καθώς ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός της μπορεί μεταβάλλει τη στροφή κατά $\pm 0.05^\circ$, χωρίς όμως να προκύπτει συστηματικότητα για τις αναλύσεις με $D/B_1 = 0.5$ που εκτελέστηκαν.



Σχήμα 5.30 Λόγος καθιζήσεων z_{SSI}/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 $0.4g$

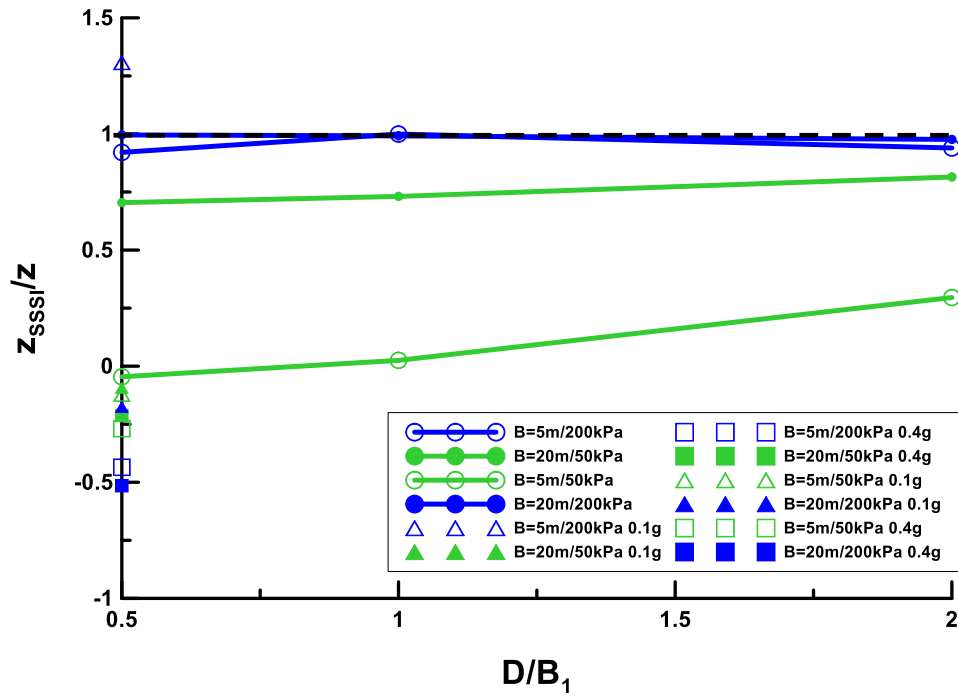


Σχήμα 5.31 Στροφή θεμελίων θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$), ίδιου φορτίου $q = 50-200kPa$ υπό διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max} = 0.1, 0.2$ ή $0.4g$

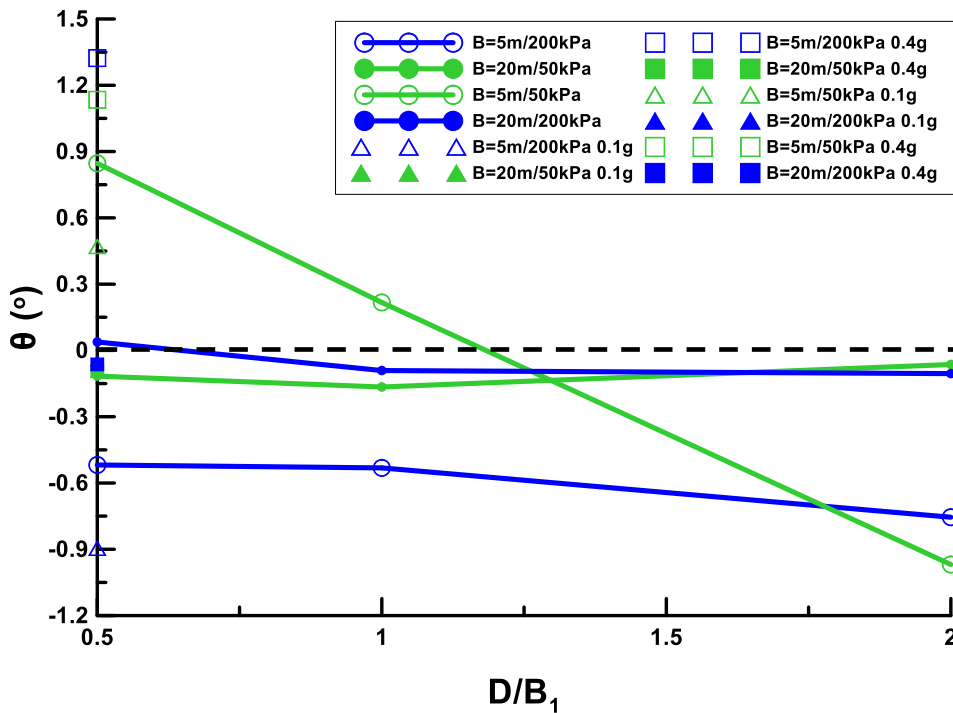
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους δύο ακραίους συνδυασμούς ζεύγους θεμελίων ($q_1=200\text{kPa}$ για το στενό και $q_2=50\text{kPa}$ για το ευρύ, $q_1=50\text{kPa}$ για το στενό και $q_2=200\text{kPa}$ για το ευρύ) για μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$, ενώ για $D/B_1 = 0.5$ υπάρχουν αποτελέσματα και για άλλες τιμές $a_{\max} = 0.1g$ και $0.4g$.

Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.32** απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων z_{SSSI}/z του ζεύγους θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 για τους προαναφερθέντες ακραίους συνδυασμούς ζεύγους θεμελίων: βαρύ/στενό δίπλα σε ελαφρύ/ευρύ και ελαφρύ/στενό δίπλα σε βαρύ/ευρύ. Σημειώνεται ότι οι μπλε καμπύλες αντιστοιχούν σε βαριά θεμέλια (με φορτίο $q = 200\text{kPa}$), ενώ οι πράσινες σε ελαφριά (με φορτίο $q = 50\text{kPa}$), ενώ τα κοίλα σύμβολα αντιστοιχούν σε στενό θεμέλιο ($B=5\text{m}$) και τα συμπαγή σε ευρέα ($B=20\text{m}$). Αρχικώς παρατηρείται και εδώ ότι ο λόγος z_{SSSI}/z αυξάνει με αύξηση του φορτίου q , αλλά επηρεάζεται πολύ λίγο από την αύξηση της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 , λογικά λόγω του μικρού εύρους αυτής τουλάχιστον για το ευρύ θεμέλιο. Τουλάχιστον για $a_{\max} = 0.2g$, η αλληλεπίδραση είναι αποκλειστικά ευμενής ($z_{SSSI}/z \leq 1$). Αυτό που είναι διαφορετικό σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πως για τα βαριά θεμέλια, δεν έχει τόσο σημασία το εύρος (πάντα $0.85 < z_{SSSI}/z \leq 1$), αλλά για τα ελαφριά, το εύρος του θεμελίου είναι κρίσιμο χαρακτηριστικό της αλληλεπίδρασης, καθώς για την ακραία περίπτωση στενού και ελαφρύ θεμελίου δίπλα σε ευρύ και βαρύ μπορεί να υπάρξει ακόμη και ανύψωση. Η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} φαίνεται να είναι σημαντική καθώς ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός της μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά το λόγο καθιζήσεων (κατά ± 0.5) και για τα δύο εύρη θεμελίων, χωρίς να προκύπτει συστηματικότητα.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.33** απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής θ του ζεύγους θεμελίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 για τους ίδιους συνδυασμούς θεμελίων-φορτίσεων. Παρατηρείται πως το ευρύ θεμέλιο διατηρεί σχεδόν την ίδια αμελητέα αποκλίνουσα στροφή ανεξάρτητα της φόρτισης αλλά και της απόστασής του με το γειτονικό, ενώ το στενό θεμέλιο είναι πιο ευαίσθητο σε στροφή, καθώς όταν είναι βαρύ εμφανίζει μεγάλη αποκλίνουσα στροφή, ενώ όταν είναι ελαφρύ μπορεί να εμφανίσει είτε συγκλίνουσα είτε αποκλίνουσα στροφή ανάλογα με την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_1 . Αντίστοιχα με το λόγο καθιζήσεων, και εδώ η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} στο στενό θεμέλιο είναι σημαντική, καθώς ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός της μπορεί να μεταβάλλει την στροφή έως και $\pm 0.9^\circ$ ενώ για το ευρύ δεν παρουσιάζεται κάποια μεταβολή.



Σχήμα 5.32 Λόγος καθιζήσεων z_{sssi}/z συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικού φορτίου $q = 50-200kPa$ υπό διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max} = 0.1, 0.2$ ή $0.4g$



Σχήμα 5.33 Στροφή θεμελίων θ συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης D/B_1 για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$) και διαφορετικού φορτίου $q=50-200kPa$ υπό διαφορετικές μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max} = 0.1, 0.2$ ή $0.4g$

Σε μια προσπάθεια σύνοψης των αποτελεσμάτων όλου του Κεφαλαίου:

Α) Για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους αλλά ίδιου φορτίου προκύπτουν τιμές λόγου καθιζήσεων $z_{SSSI}/z = 0.52 - 1.16$ και στροφές $\theta = -1.13^\circ$ έως 0.75° , δηλαδή τόσο ευμενής όσο και δυσμενής αλληλεπίδραση. Η αλληλεπίδραση αυτή απομειώνεται ανεπαίσθητα με την αύξηση της απόστασης D/B_{min} από 0.5 έως 2.0 που εξετάστηκε. Προκύπτει ότι ο λόγος καθιζήσεων z_{SSSI}/z αυξάνει με το φορτίο q , δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η φόρτιση, τόσο δυσμενέστερη γίνεται η αλληλεπίδραση. Παρόλα αυτά, για τα στενά θεμέλια, μόνο αν είναι βαριά προκύπτει δυσμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις φορτίου η αλληλεπίδραση είναι ευμενής. Επίσης, μόνο στενά θεμέλια μπορούν να εμφανίσουν μεγάλες στροφές (π.χ. $|\theta| > 0.3^\circ$). Αντίθετα, τα ευρέα θεμέλια ανεξαρτήτως φορτίου και ενδιάμεσης απόστασης εμφανίζουν ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και πρακτικώς μηδενικές στροφές. Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης μπορεί να επηρεάσει ελαφρώς την απόκριση για μικρή απόσταση $D/B_{min} = 0.5$ μόνον σε όρους καθιζήσεων, χωρίς η επίδραση αυτή να είναι συστηματική.

Β) Για ζεύγος θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικού φορτίου προκύπτουν τιμές λόγου καθιζήσεων $z_{SSSI}/z = -0.51$ έως 1.31 και στροφές $\theta = -0.89^\circ$ έως 1.32° , δηλαδή τόσο ευμενής όσο και δυσμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και στροφών. Όπως και παραπάνω, η αλληλεπίδραση αυτή απομειώνεται ανεπαίσθητα, και όχι πάντα, με την αύξηση της απόστασης D/B_{min} από 0.5 έως 2.0 που εξετάστηκε. Και πάλι, ο λόγος z_{SSSI}/z αυξάνει με αύξηση του φορτίου q του ίδιου του θεμελίου. Αυτό που είναι σημαντικό στην αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικών χαρακτηριστικών είναι πως για τα βαριά θεμέλια, δεν έχει τόσο σημασία το εύρος (πάντα $0.85 < z_{SSSI}/z \leq 1$), αλλά για τα ελαφριά, το εύρος του θεμελίου είναι κρίσιμο χαρακτηριστικό της αλληλεπίδρασης, καθώς για την ακραία περίπτωση στενού και ελαφρύ θεμελίου δίπλα σε ευρύ και βαρύ μπορεί να υπάρξει ακόμη και ανύψωση (δηλ. $z_{SSSI}/z < 0$). Αντιθέτως, σε όρους στροφής, το εύρος του θεμελίου είναι σημαντικό μέγεθος, καθώς το ευρύ θεμέλιο διατηρεί σχεδόν πάντα την ίδια αμελητέα αποκλίνουσα στροφή ανεξάρτητα της φορτίου του, ενώ το στενό θεμέλιο είναι πιο ευαίσθητο σε στροφή, καθώς όταν είναι βαρύ εμφανίζει μεγάλη αποκλίνουσα στροφή ενώ όταν είναι ελαφρύ μπορεί να εμφανίσει είτε συγκλίνουσα είτε αποκλίνουσα στροφή. Αντίθετα με τα θεμέλια διαφορετικού εύρους αλλά ίδιου φορτίου, η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} μπορεί να είναι σημαντική (τουλάχιστον για $D/B_{min} = 0.5$), καθώς ένας υποδιπλασιασμός ή υπερδιπλασιασμός της μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά το λόγο καθιζήσεων (κατά ± 0.5) και για τα δύο εύρη θεμελίων, χωρίς να προκύπτει συστηματικότητα. Αντίστοιχα, μπορεί να αποδειχτεί σημαντική και στη στροφή (έως και $\pm 0.9^\circ$) αλλά μόνο του στενού θεμελίου.

Γ) Στις αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων διαφορετικού εύρους, η επίδραση της κανονικοποιημένης απόστασης $D/B_{min} = 0.5$ έως 2.0 στην αλληλεπίδρασή τους προκύπτει ανεπαίσθητη. Ο λόγος της ανεπαίσθητης επίδρασης είναι ότι η αλληλεπίδραση πρακτικά εξαρτάται από την κανονικοποιημένη απόσταση D/B_{max} , η οποία κυμαίνεται σε πολύ μικρές τιμές, από 0.125 έως 0.5 στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ενώ δεν εκτελέστηκαν αναλύσεις για τιμές $D/B_{max} > 0.5$ ώστε να διαφανεί η αναμενόμενη απομείωση της αλληλεπίδρασης. Δηλαδή τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο αντιστοιχούν, λίγο έως πολύ, στη μέγιστη αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού εύρους λόγω μικρής μεταξύ τους απόστασης.

Δ) Γενικώς, τα ευρέα θεμέλια δεν επηρεάζονται σημαντικά από γειτονικά στενά, καθώς γενικά έχουν ελαφρώς ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και μικρές στροφές. Αντίθετα, τα στενά θεμέλια επηρεάζονται έντονα από τα γειτονικά ευρέα, και καθοριστικός παράγοντας του τρόπου επηρεασμού είναι τα φορτία των δύο θεμελίων. Δηλαδή όταν το στενό θεμέλιο είναι βαρύτερο ή ίσο εκείνου του ευρέος προκύπτει είτε ελαφρώς ευμενής ή ελαφρώς δυσμενής αλληλεπίδραση, αλλά όταν το στενό θεμέλιο είναι ελαφρύτερο του ευρέος, η αλληλεπίδραση γίνεται πολύ ευμενής και μπορεί να προκύψει ακόμη και ανύψωση του στενού και ελαφρύτερου θεμελίου. Αντίστοιχα, τα στενά θεμέλια, σε γειτονία ευρέων, γίνονται επιρρεπή και σε σημαντικές στροφές, το πρόσημο των οποίων εξαρτάται από το φορτίο τους. Σημασία σε αυτή την αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικών χαρακτηριστικών παίζει και η συνολική καθίζηση των δύο θεμελίων. Για παράδειγμα, ένα βαρύ και ευρύ θεμέλιο έχει πολύ μεγάλες καθιζήσεις, που υλοποιούνται, υπό γενικώς αστράγγιστες συνθήκες, με μετακίνηση του γειτονικού εδάφους. Αν εκεί βρίσκεται θεμελιωμένο το ελαφρύ και στενό θεμέλιο, η φυσική του τάση για καθίζηση υπερνικάται από τη μετακίνηση του εδάφους, με αποτέλεσμα να προκύπτει τελικώς ανύψωση.

6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Βασικά συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ζεύγους επιφανειακών άκαμπτων θεμελιολωρίδων εδραζόμενων σε κορεσμένη εδαφική στρώση υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Αρχικά μελετήθηκαν πρόσφατες δημοσιεύσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφορικά με την αλληλεπίδραση γειτονικών κατασκευών (SSSI, Structure-Soil-Structure Interaction) σε καθεστώς ρευστοποίησης, ώστε να αποσαφηνιστούν οι κύριοι μηχανισμοί που διέπουν το φαινόμενο με απώτερο στόχο την περαιτέρω διερεύνησή τους. Η εν λόγω διερεύνηση έγινε αριθμητικά, με χρήση συζευγμένων δυναμικών μη-γραμμικών αναλύσεων εδαφικής απόκρισης με το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC. 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 καθιζήση z και μηδενική στρόφη ($\theta = 0$ λόγω ομοιόμορφης φόρτισης 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 θ ($^\circ$) με τις τιμές $\theta > 0$ και $\theta < 0$ να δείχνουν στρόφη συγκλίνουσα προς και αποκλίνουσα από το γειτονικό θεμέλιο, αντίστοιχα.

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για δίδυμα (ίδιου εύρους και φορτίου) θεμέλια, στενά και ευρέα με εύρη $B = 5\text{m}$ και $B = 20\text{m}$ αντίστοιχα, μεταβάλλοντας κάθε φορά την ενδιάμεση απόσταση D μεταξύ τους, το κοινό φορτίο ($q = 50, 100$ ή 200kPa) και τη μέγιστη επιτάχυνση της αρμονικής διέγερσης ($a_{\max} = 0.1, 0.2$ ή $0.4g$). Ακολούθησαν αναλύσεις ζεύγους θεμελίων ίδιου εύρους αλλά διαφορετικών επιμέρους φορτίων, διαφορετικών επιμέρους ευρών αλλά ίδιου φορτίου, αλλά και συνδυασμών όπου τόσο το εύρος όσο και το φορτίο των γειτονικών θεμελίων είναι διαφορετικά, ένα πρόβλημα αρκετά πιο περίπλοκο αλλά πιο ρεαλιστικό σε αστικά περιβάλλοντα. Σε όλες τις αναλύσεις για ζεύγη θεμελίων, τα εύρη B και τα φορτία q των θεμελίων κυμάνθηκαν ως ανωτέρω, ενώ και πάλι διερευνήθηκε η επίδραση της απόστασης D και της μέγιστης επιτάχυνσης a_{\max} . Αυτό που ήταν κοινό σε όλες τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας ήταν η ομοιόμορφη εδαφική στρώση θεμελίωσης που αντιστοιχούσε σε κορεσμένη λεπτή άμμο πάχους $H = 10\text{m}$ με σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$.

Συνολικά εκτελέστηκαν 87 αριθμητικές αναλύσεις απόκρισης θεμελίων με τα ως άνω χαρακτηριστικά σε όρους B, q, H και a_{\max} , τα εύρη μεταβολής των οποίων αποτελούν και το εύρος εφαρμογής των συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, τα εν λόγω βασικά και πρακτικά συμπεράσματα είναι τα κάτωθι:

1. Ζεύγος θεμελίων ίδιου εύρους

- Η αλληλεπίδραση χαρακτηρίζεται αδρά από τιμές $z_{SSSI}/z = 0.5 - 1.3$ και στροφές $\theta = -1^\circ$ έως 1° . Όμως, τα ευρέα θεμέλια ($B/H = 2$) εμφανίζουν πρακτικά τιμές $z_{SSSI}/z \leq 1$ και μικρές (κατ' απόλυτη τιμή) στροφές $\theta \leq 0^\circ$, ενώ τα στενά ($B/H = 0.5$) καλύπτουν όλα τα προαναφερθέντα εύρη τιμών, ανάλογα με το φορτίο τους.
- Όσο αυξάνει η κανονικοποιημένη απόσταση D/B , η αλληλεπίδραση φθίνει και προσεγγίζονται σταδιακά οι οριακές τιμές $z_{SSSI}/z = 1$ και $\theta = 0^\circ$, αν και τιμές $D/B = 2.0$ δεν επαρκούν για να εξαλειφθεί η αλληλεπίδραση.
- Στενά θεμέλια, όταν είναι βαριά εμφανίζουν δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων και αποκλίνουσες στροφές, ενώ όταν είναι ελαφριά προκύπτει το αντίστροφο. Γενικώς, έχει μεγαλύτερη σημασία το φορτίο του ίδιου του θεμελίου, παρά το φορτίο του γειτονικού στενού θεμελίου.
- Σε ευρέα θεμέλια, όσο αυξάνει το φορτίο θεμελίου, τόσο απομειώνεται η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, αλλά και τόσο αυξάνει η αποκλίνουσα στροφή. Πάντως έχει συγκρίσιμη σημασία και το φορτίο του γειτονικού ευρέος θεμελίου.
- Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης μπορεί να επηρεάσει την απόκριση των θεμελίων σε όρους καθιζήσεων και στροφών για μικρή ενδιάμεση απόσταση (π.χ. $D/B = 0.5$), όμως η επίδραση δεν είναι συστηματική.

2. Ζεύγος θεμελίων διαφορετικών ευρών

- Η αλληλεπίδραση χαρακτηρίζεται αδρά από τεράστιο εύρος τιμών $z_{SSSI}/z = -0.5$ έως 1.3 και στροφές $\theta = -1.1^\circ$ έως 1.3° . Σημειώνεται ότι αν το φορτίο των δύο θεμελίων είναι ίδιο, τότε το εύρος $z_{SSSI}/z = 0.5 - 1.2$, δηλαδή αντίστοιχο με εκείνο για θεμέλια ίδιου εύρους. Δηλαδή, οι ακραία χαμηλές τιμές z_{SSSI}/z από -0.5 έως 0.5 μπορούν να προκύψουν μόνο για θεμέλια με διαφορετικά φορτία.
- Για θεμέλια με διαφορετικό εύρος, σημασία στην αλληλεπίδραση έχει η κανονικοποιημένη απόσταση D/B_{max} , όπου B_{max} αντιστοιχεί το ευρύτερο από τα δύο θεμέλια.
- Σε ζεύγη θεμελίων με ίδιο φορτίο, τα στενά εμφανίζουν $z_{SSSI}/z > 1$ μόνο αν είναι βαριά, ενώ προκύπτει $z_{SSSI}/z < 1$ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις φορτίου. Αντίστοιχα, μόνο στενά θεμέλια μπορούν να εμφανίσουν μεγάλες στροφές (π.χ. $|\theta| > 0.3^\circ$). Αντίθετα, τα ευρέα θεμέλια ανεξαρτήτως φορτίου εμφανίζουν $z_{SSSI}/z > 1$ και πρακτικώς μηδενικές θ .
- Σε ζεύγη θεμελίων με διαφορετικό φορτίο, για το μεν βαρύ, δεν έχει σημασία το εύρος (πάντα $0.85 < z_{SSSI}/z \leq 1$), αλλά για το ελαφρύ, το εύρος είναι κρίσιμο μέγεθος, καθώς για τον ακραίο συνδυασμό στενού και ελαφρύ θεμελίου δίπλα σε ευρύ και βαρύ μπορεί να υπάρξει ακόμη και ανύψωση του πρώτου (δηλ. $z_{SSSI}/z < 0$). Αντιθέτως, σε όρους στροφής, το ευρύ εμφανίζει πάντα αμελητέα αποκλίνουσα στροφή, ενώ το στενό θεμέλιο, αν είναι βαρύ αποκλίνει, ενώ αν είναι ελαφρύ μπορεί να εμφανίσει είτε συγκλίνουσα είτε αποκλίνουσα στροφή.
- Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση ζεύγους θεμελίων με διαφορετικά επιμέρους φορτία τόσο σε όρους καθιζήσεων όσο και σε όρους στροφών για μικρή ενδιάμεση απόσταση (π.χ. $D/B_{max} = 0.5$), αλλά δεν είναι συστηματική.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία και τα συμπεράσματα της ανέδειξαν ένα πρόβλημα με πρακτικό ενδιαφέρον μηχανικού, που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Πιο συγκεκριμένα, οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα συνίστανται σε:

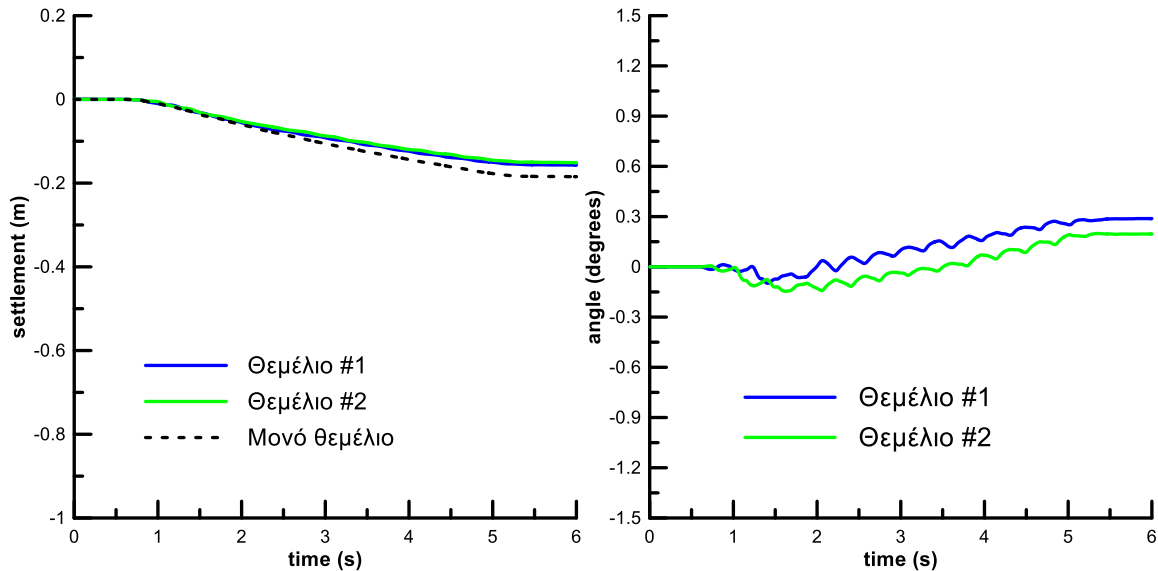
- Στις 2D αναλύσεις της παρούσας εργασίας, οι εντός επιπέδου διατμητικές τάσεις που αναπτύχθηκαν κυρίως στο χώρο ανάμεσα από τα θεμέλια συνέβαλαν σημαντικά στις καθιζήσεις και στις παραμένουσες στροφές αυτών. Προτείνεται η εξέταση του προβλήματος με 3D αναλύσεις με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των εκτός επιπέδου διατμητικών τάσεων στη σεισμική απόκριση του ζεύγους, και πιο γενικά για να διερευνηθεί η αλληλεπίδραση τετραγωνικών θεμελίων, και όχι μόνο θεμελιολωρίδων.
- Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ομοιόμορφη αμμώδης στρώση, δηλαδή απευθείας θεμελίωση επί του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Προτείνεται η διερεύνηση δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού αποτελούμενου από μία επιφανειακή στρώση λεπτόκοκκου εδάφους εδραζόμενη σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, με στόχο την ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης όταν το ρευστοποιήσιμο έδαφος είναι σε κάποιο βάθος.
- Τέλος, χρήσιμη κρίνεται και η εξέταση περιπτώσεων όπου έχει γίνει λήψη μέτρων έναντι της ρευστοποίησης σε μία μόνον από τις γειτονικές κατασκευές. Για παράδειγμα, όταν σε ένα από τα δύο γειτονικά θεμέλια έχει γίνει βελτίωση εδάφους (π.χ. με χρήση στραγγιστηρίων) και το πως η βελτίωση του ενός μπορεί να αλλάξει την αλληλεπίδραση που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία όπου και τα δύο θεμέλια εδράζονται απευθείας σε ρευστοποιήσιμη στρώση.

Βιβλιογραφία

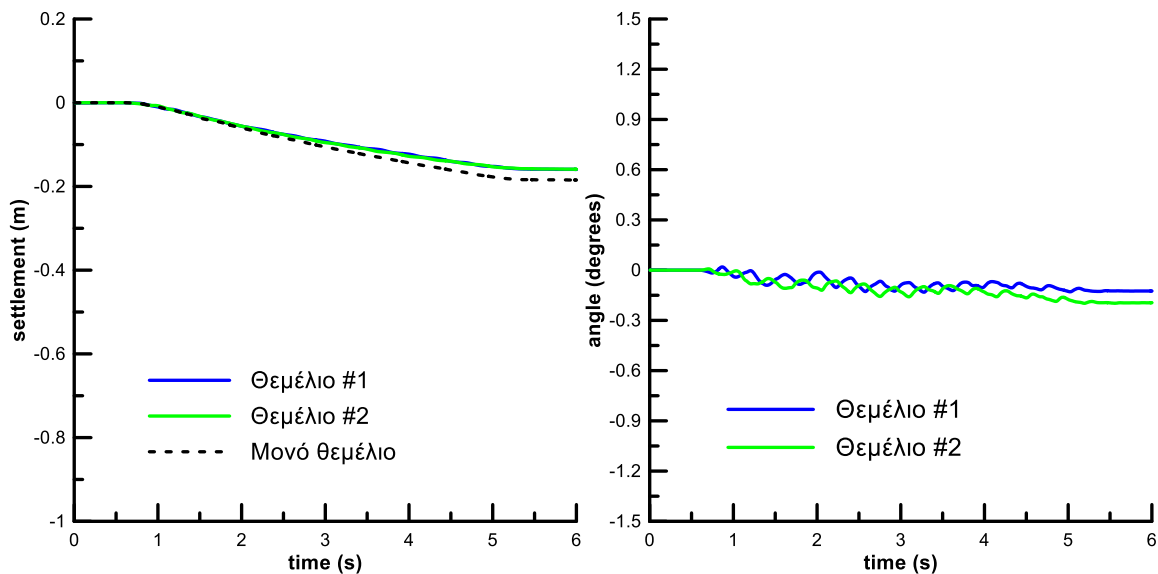
- ❖ Andrianopoulos K.I., Papadimitriou A.G., Bouckovalas G.D. (2010): “Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 10, pp 895-911
- ❖ Andrianopoulos K.I., Bouckovalas G.D., Karamitros D.K., Papadimitriou A.G. (2006): “Effective stress analysis for the seismic response of shallow foundations on liquefiable sand”, *Proceedings of the 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering - Numerical Methods in Geotechnical Engineering*
- ❖ Bouckovalas G.D., Tsiapas Y., Theocharis A., Chaloulos Y. (2016): “Ground Response at Liquefied Sites: Seismic isolation or amplification?”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Special Issue: 6th International Conference on Earthquake Engineering
- ❖ Georgaki E. (2020): “Effectiveness of methods mitigating seismic liquefaction under existing square structures on horizontal ground”, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil engineering, Geotechnical Department
- ❖ Hayden C.P., Zupan J.D., Bray J.D., Allmond J.D., Kutter B.L. (2015): “Centrifuge Tests of Adjacent Mat-Supported Buildings Affected by Liquefaction”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, American Society of Civil Engineers
- ❖ Itasca (2011): “Fast Lagrangian Analysis of Continua”, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota
- ❖ 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, No. 3 pages 1113 – 1134, Earthquake Engineering Research Institute
- ❖ Kirkwood P. and Dashti S. (2019): “Influence of Prefabricated Vertical Drains on the Seismic Performance of Similar Neighbouring Structures Founded on Liquefiable Deposits”, *Geotechnique*, 69(11), 971-985
- ❖ Kramer S.L. (1996): “Geotechnical Earthquake Engineering”, University of Washington, Prentice – Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics
- ❖ Papadimitriou A.G., Bouckovalas G.D. (2002): “Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 22, No. 3, pp 191-204
- ❖ Γκαζέτας Γ. (2007): «Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής», Πρώτη έκδοση 1987, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- ❖ Παπαθανασίου Γ. Β. (2006): «Φαινόμενα Ρευστοποίησης Εδαφών στον Ελλαδικό Χώρο», Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας
- ❖ Πιτιλάκης Κ. Δ. (2010): «Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ Α & Β

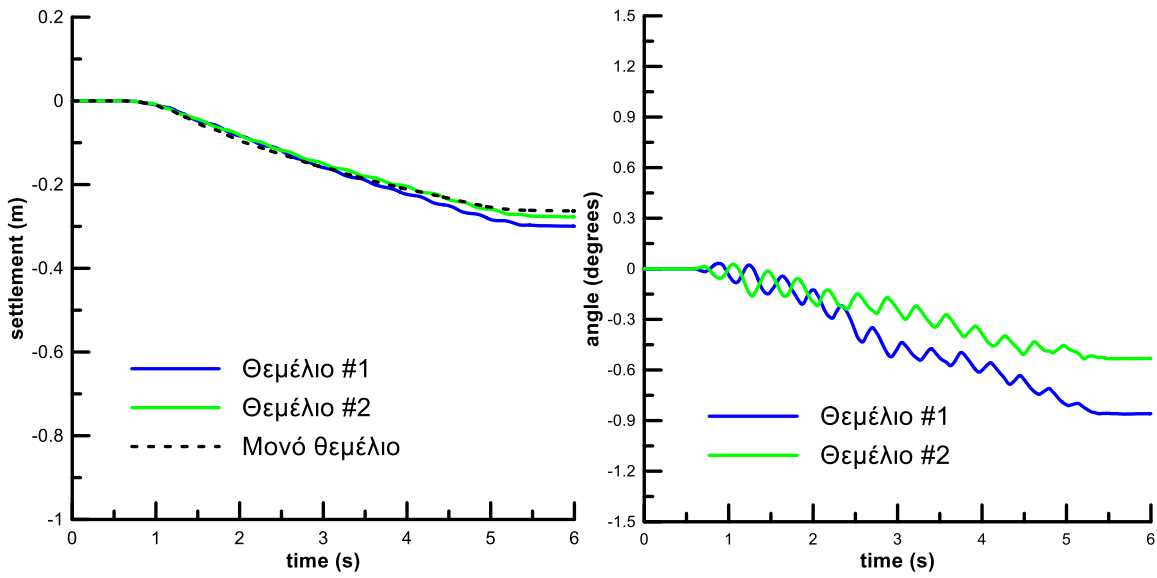
Παράρτημα Α – Συμπληρωματικά αποτελέσματα απόκρισης ζεύγους θεμελίων ίδιου εύρους



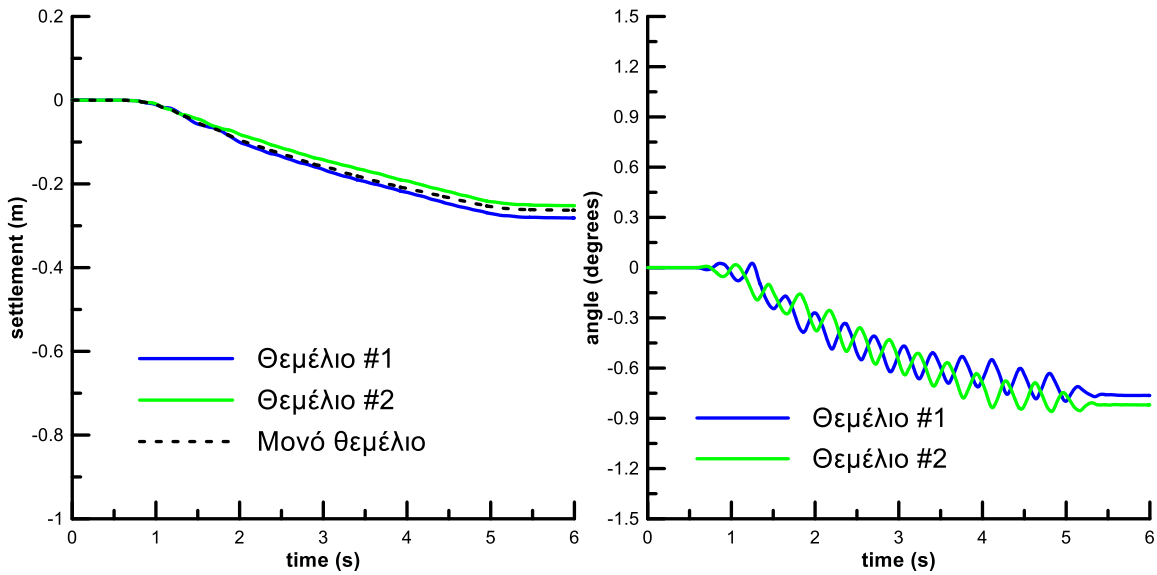
Σχήμα Α.1 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



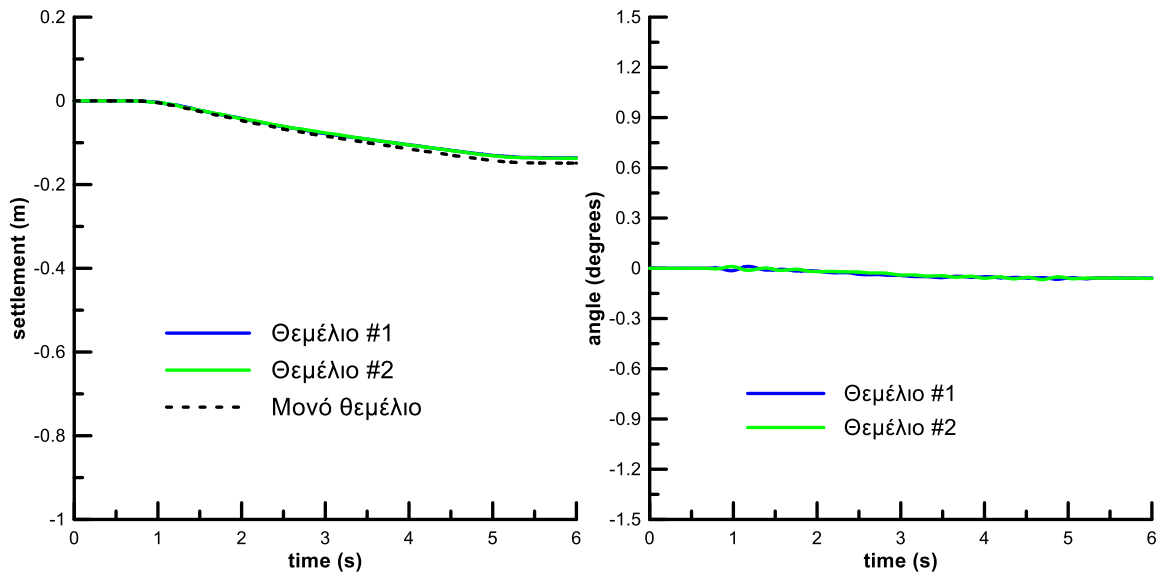
Σχήμα Α.2 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



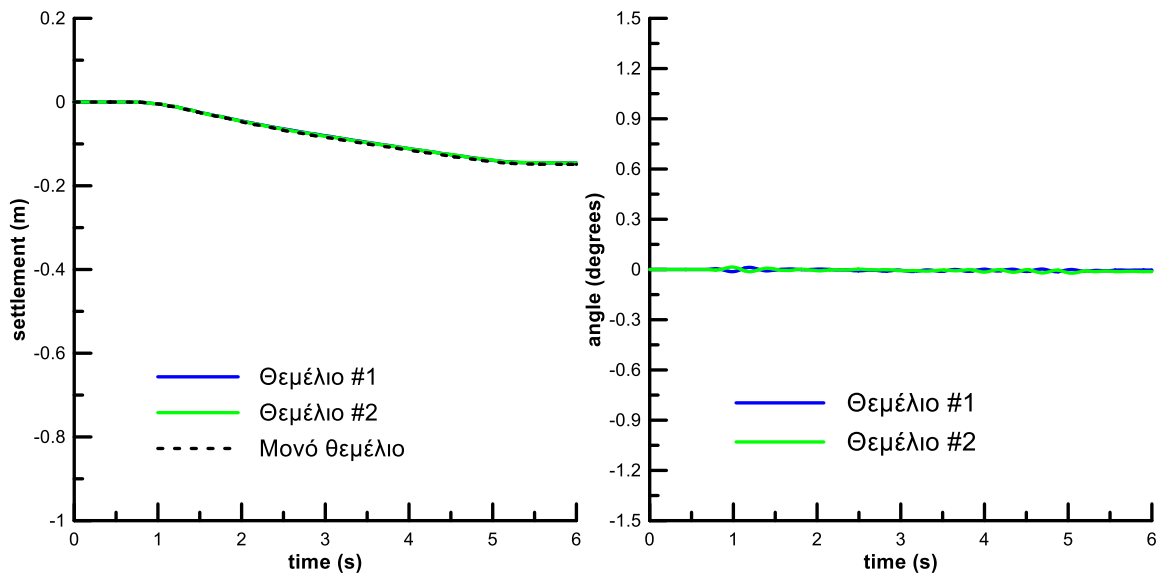
Σχήμα Α.3 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



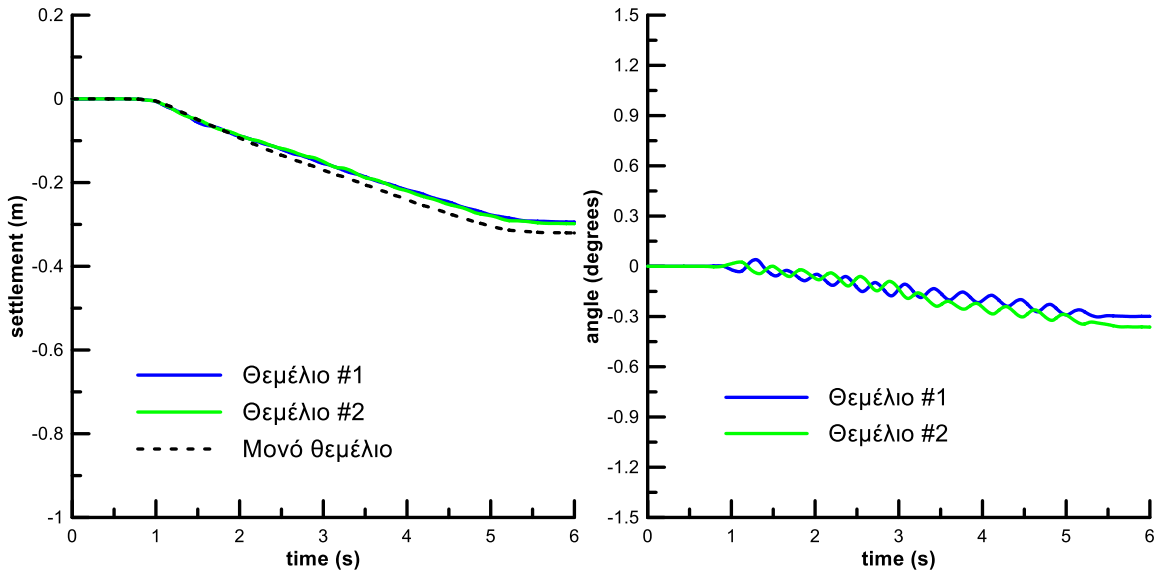
Σχήμα Α.4 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



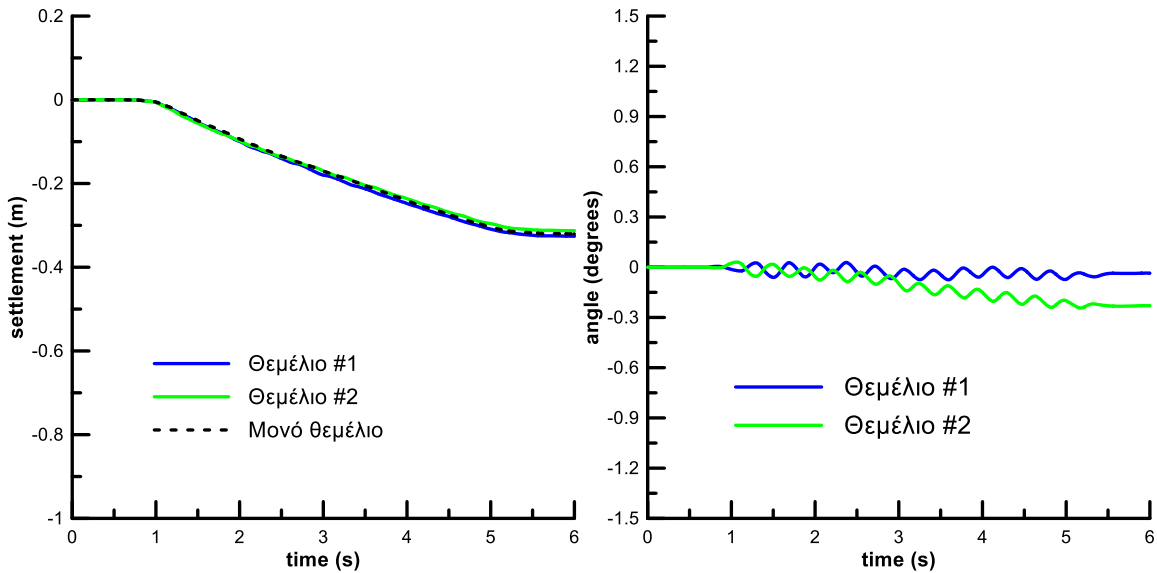
Σχήμα Α.5 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=20m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



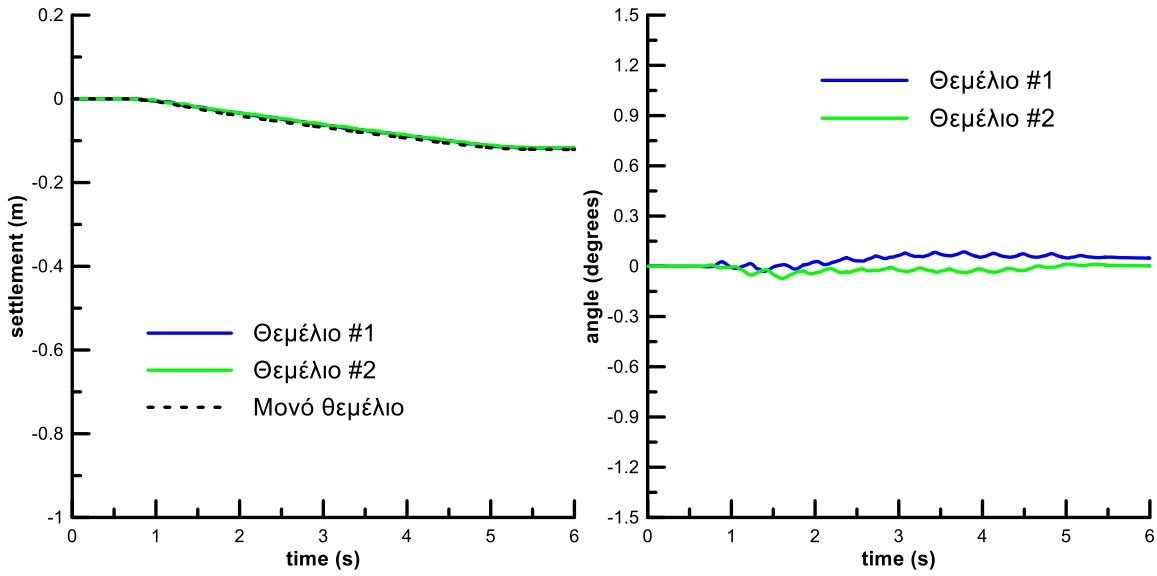
Σχήμα Α.6 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=40m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



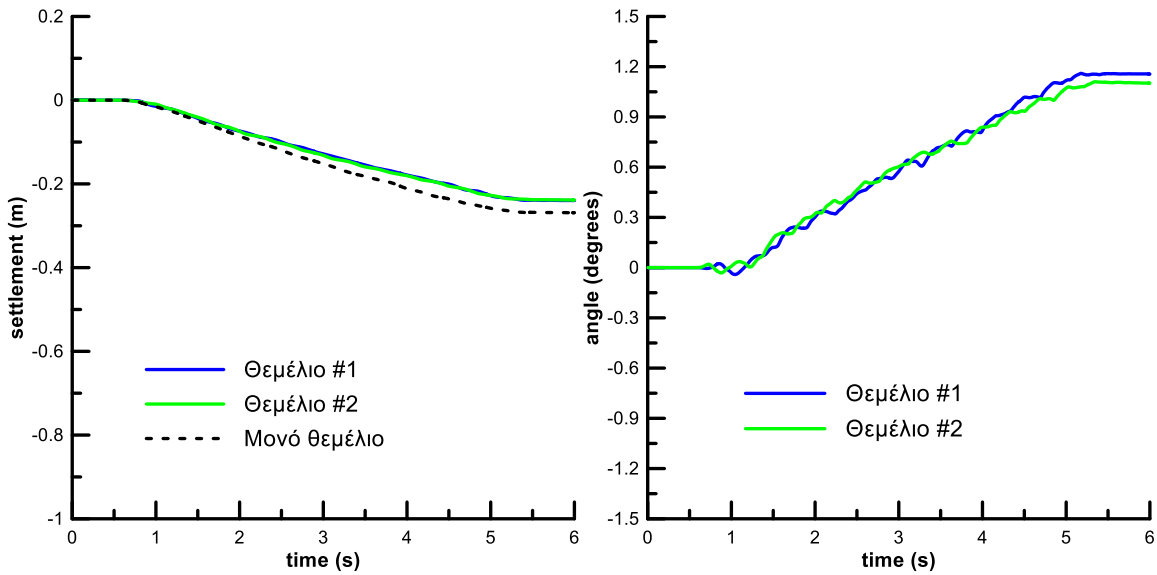
Σχήμα Α.7 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=20m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



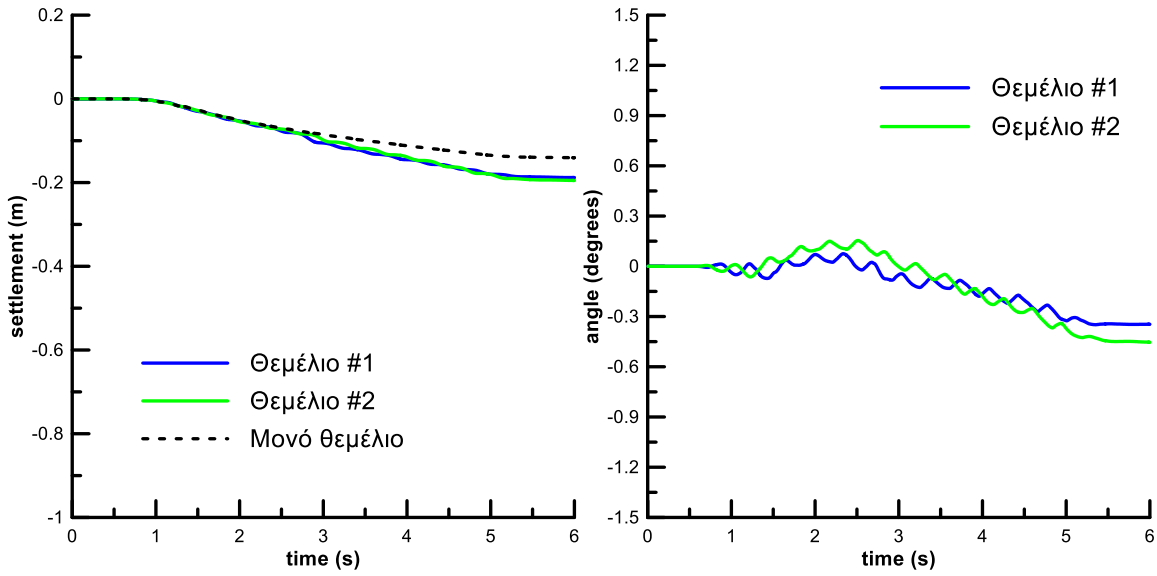
Σχήμα Α.8 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=40m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



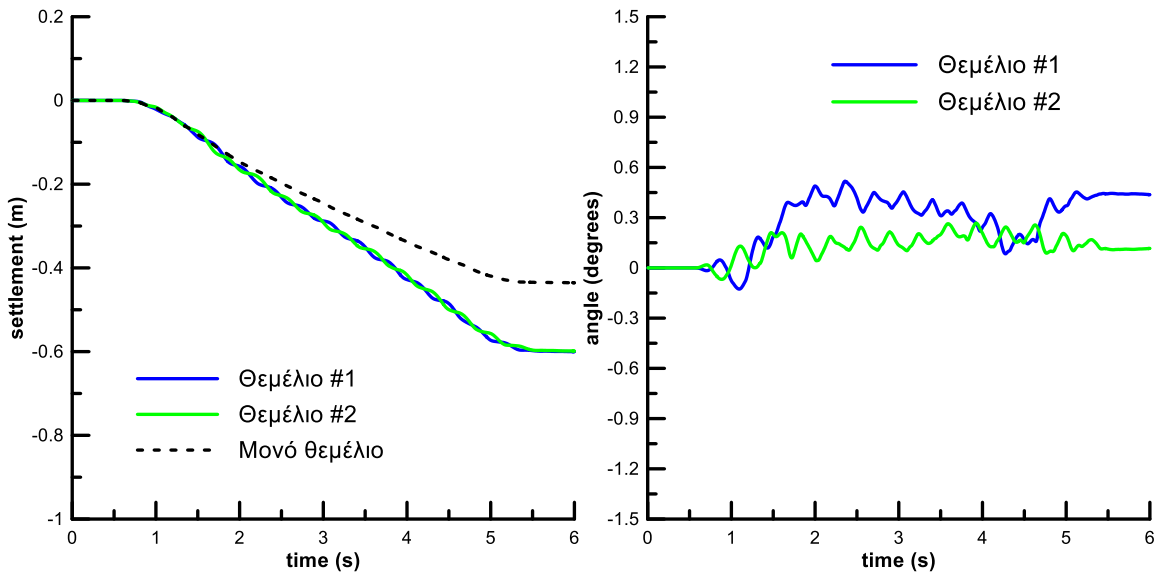
Σχήμα Α.9 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$



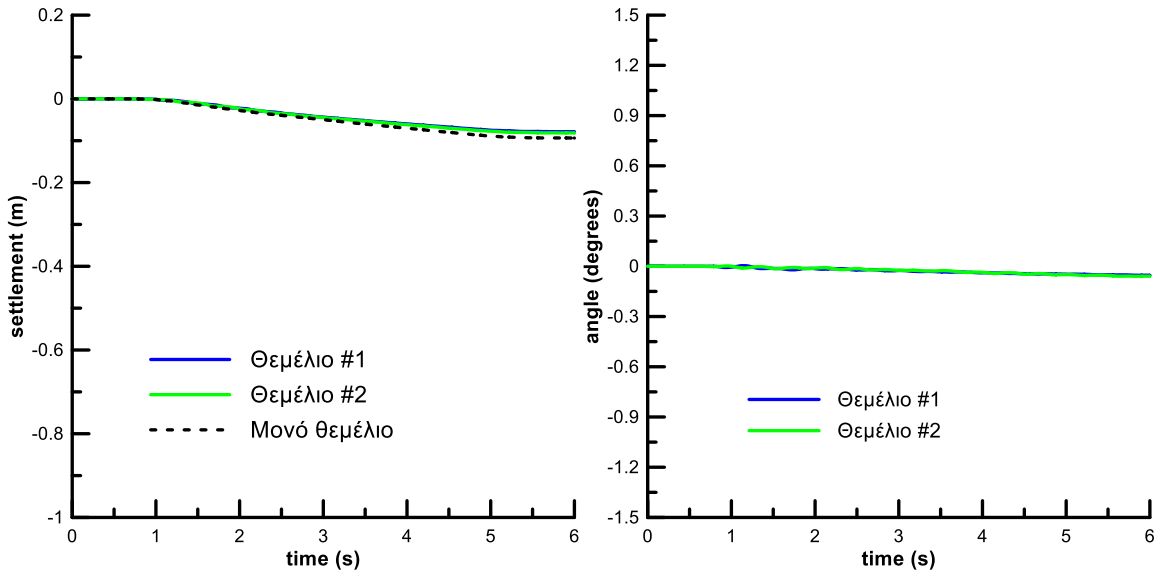
Σχήμα Α.10 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$



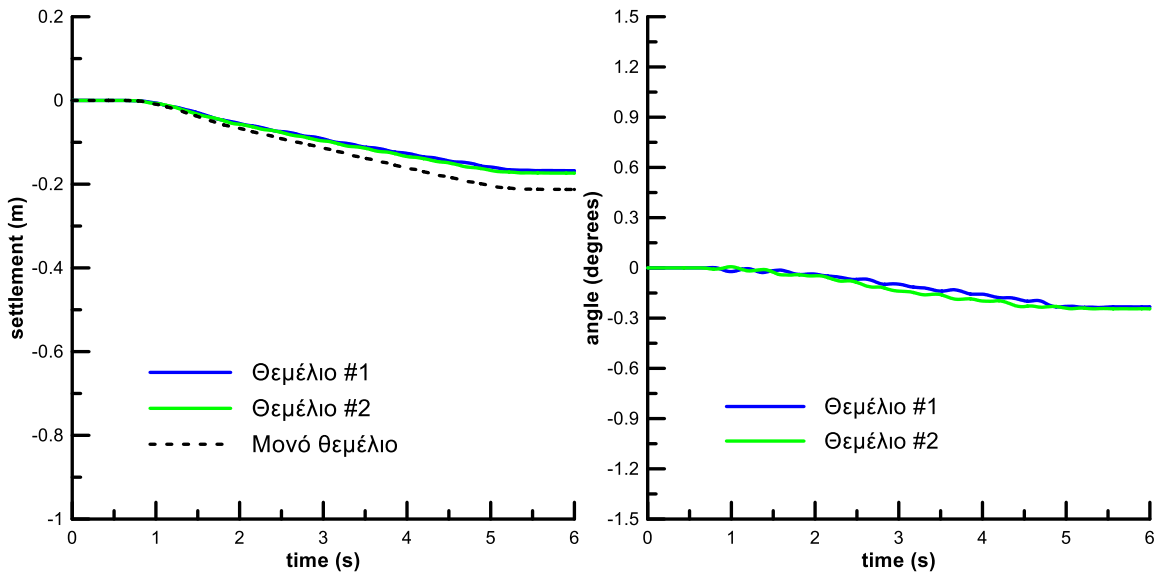
Σχήμα Α.11 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$



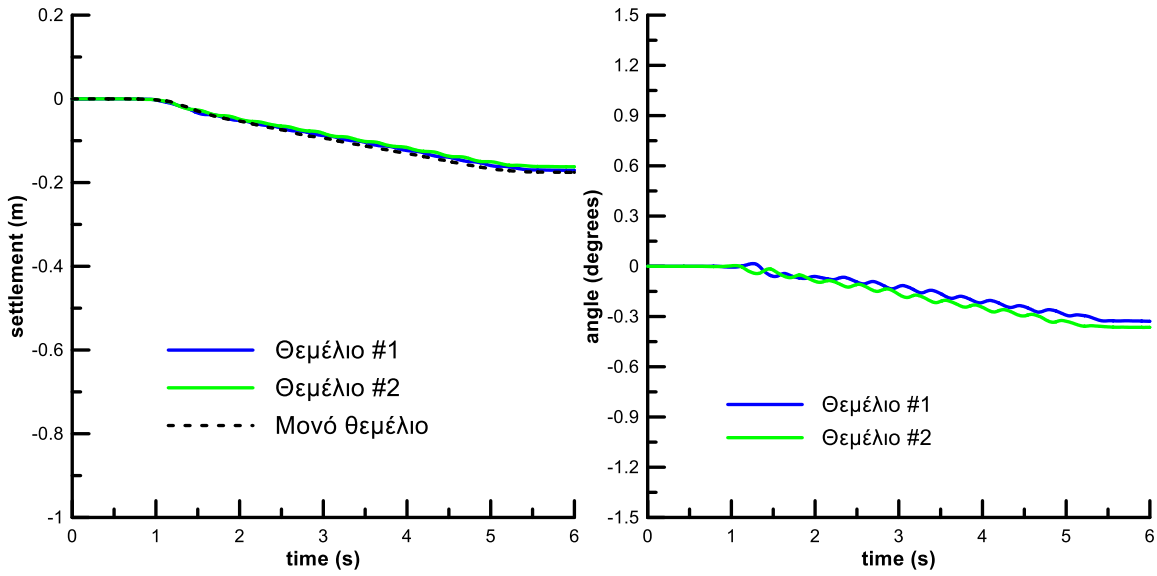
Σχήμα Α.12 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=2.5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$



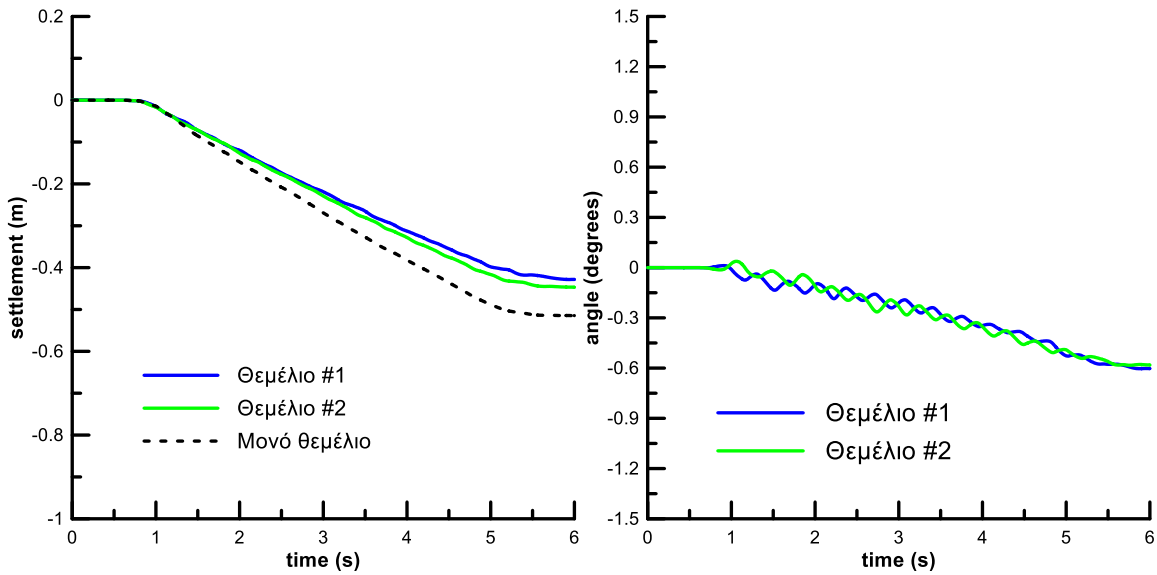
Σχήμα Α.13 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$



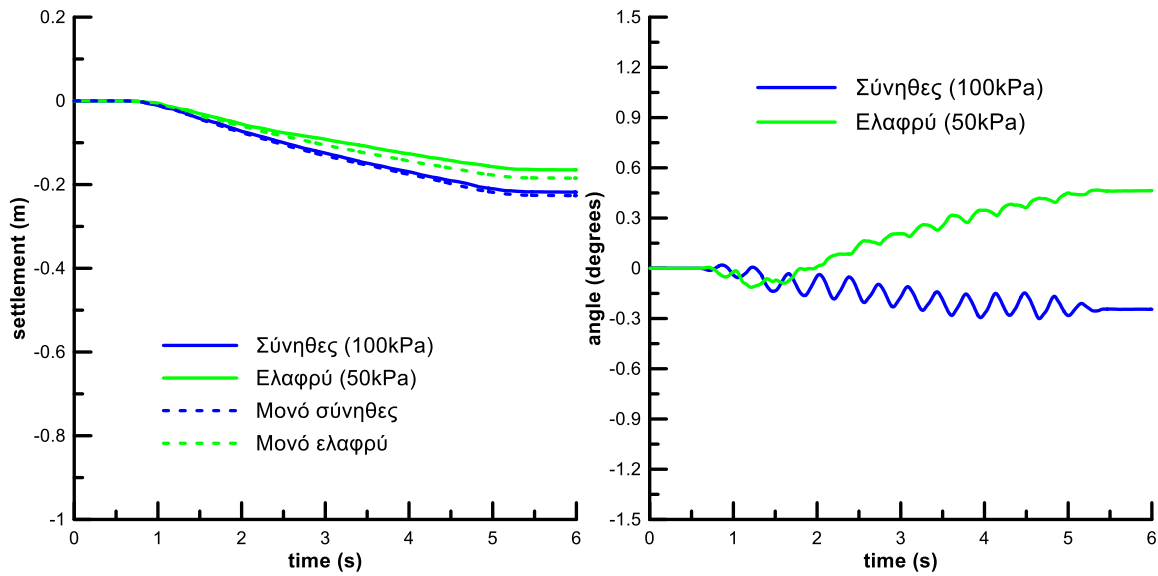
Σχήμα Α.14 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$



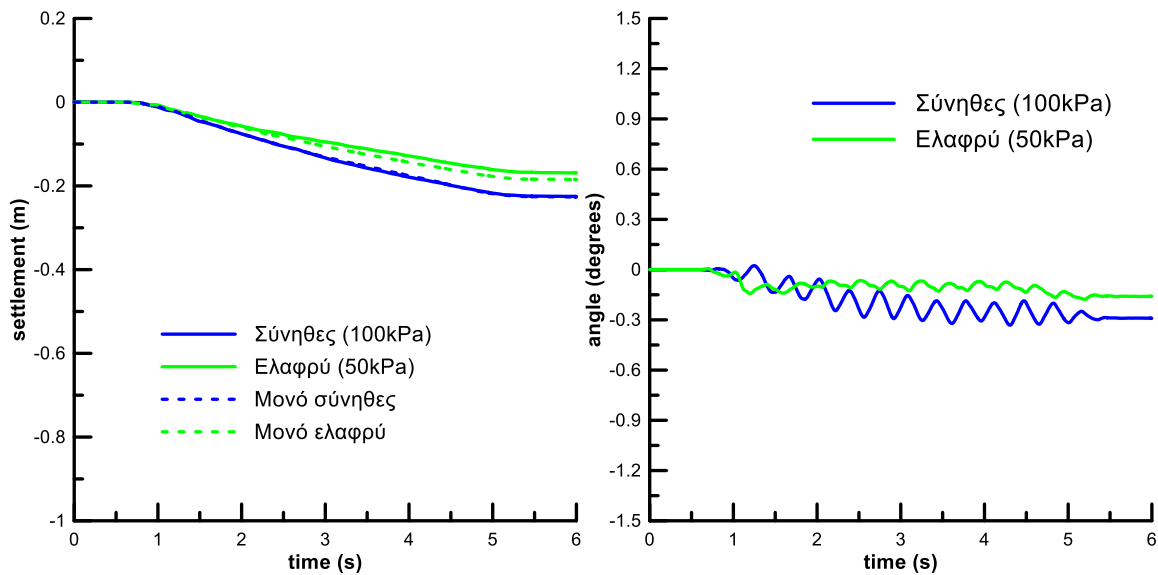
Σχήμα A.15 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.1g$



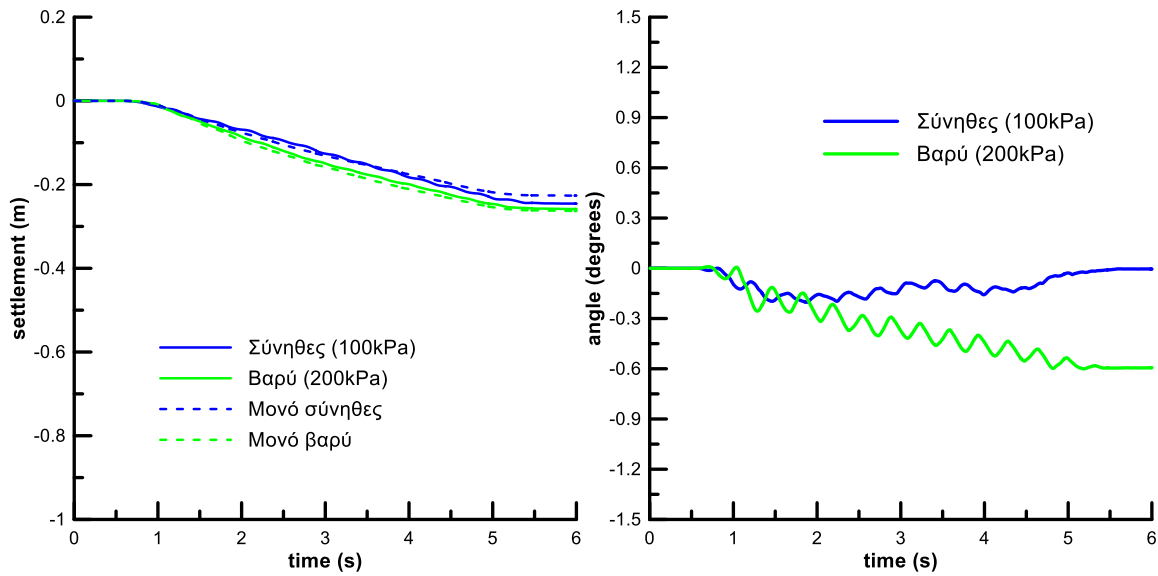
Σχήμα A.16 Καθιζήσεις και στροφές δίδυμων θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=0.5B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.4g$



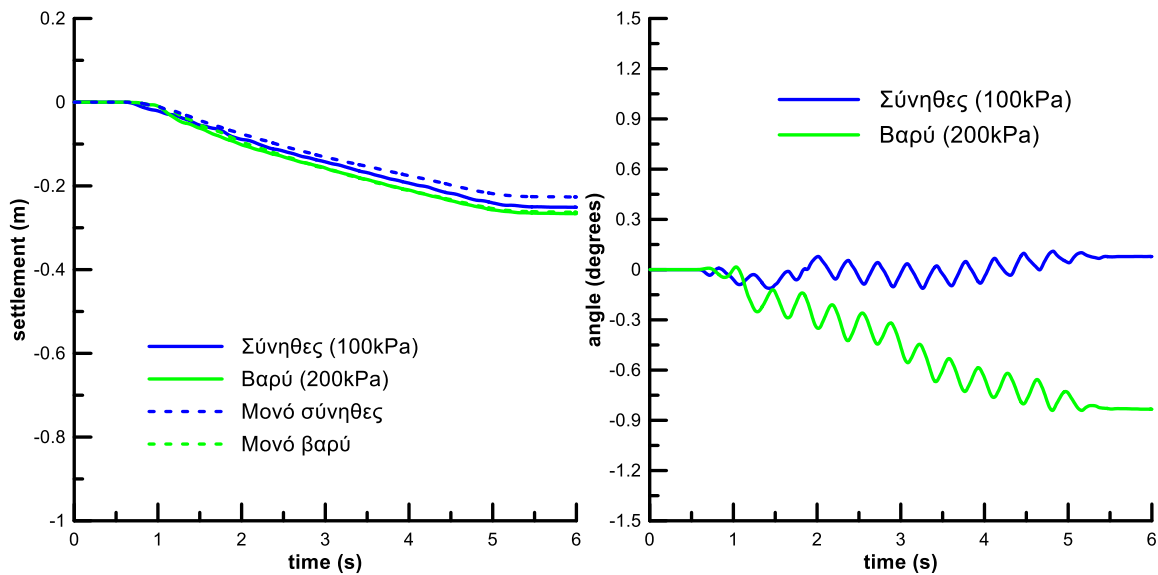
Σχήμα Α.17 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



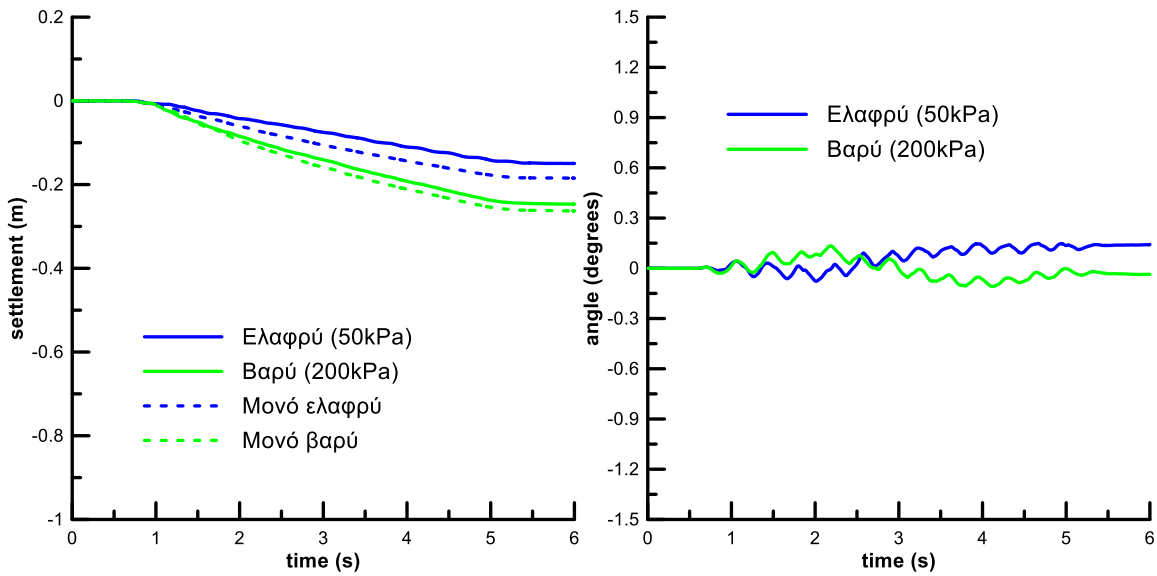
Σχήμα Α.18 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



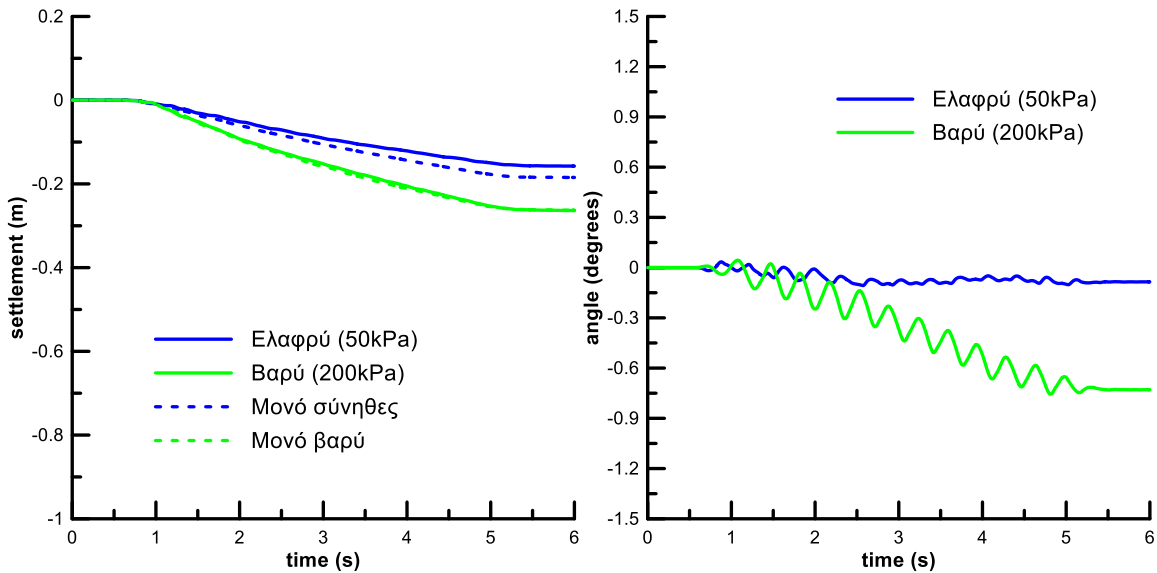
Σχήμα A.19 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



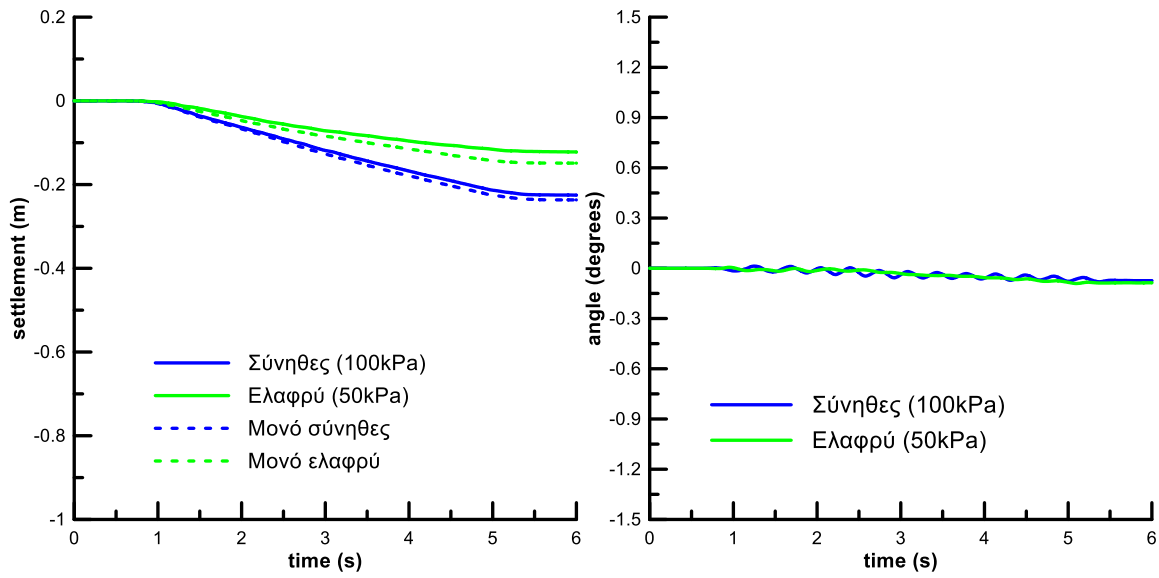
Σχήμα A.20 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



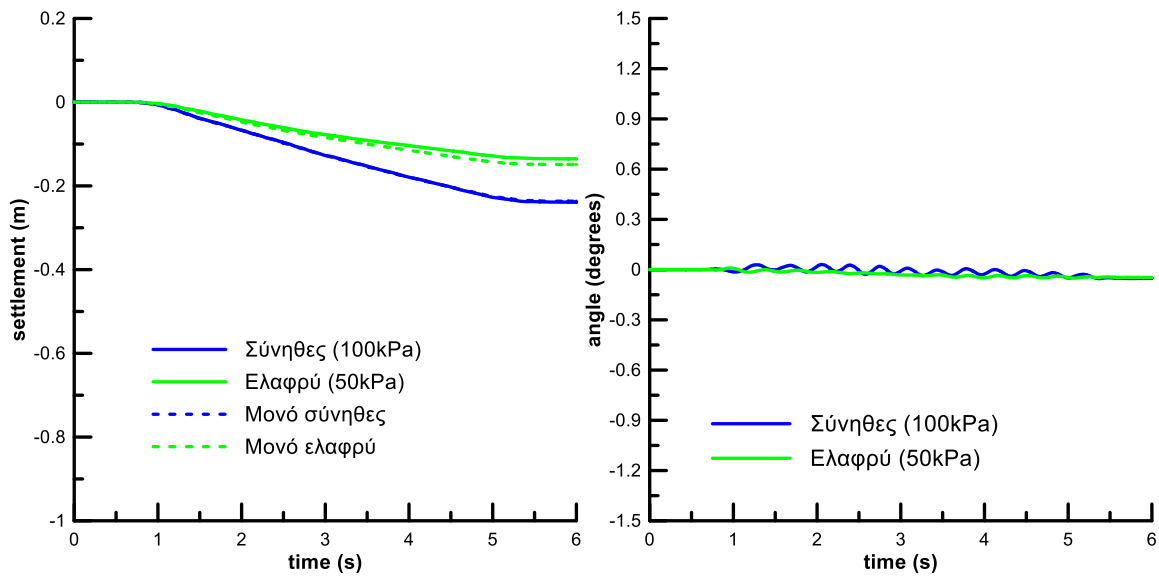
Σχήμα Α.21 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=5m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



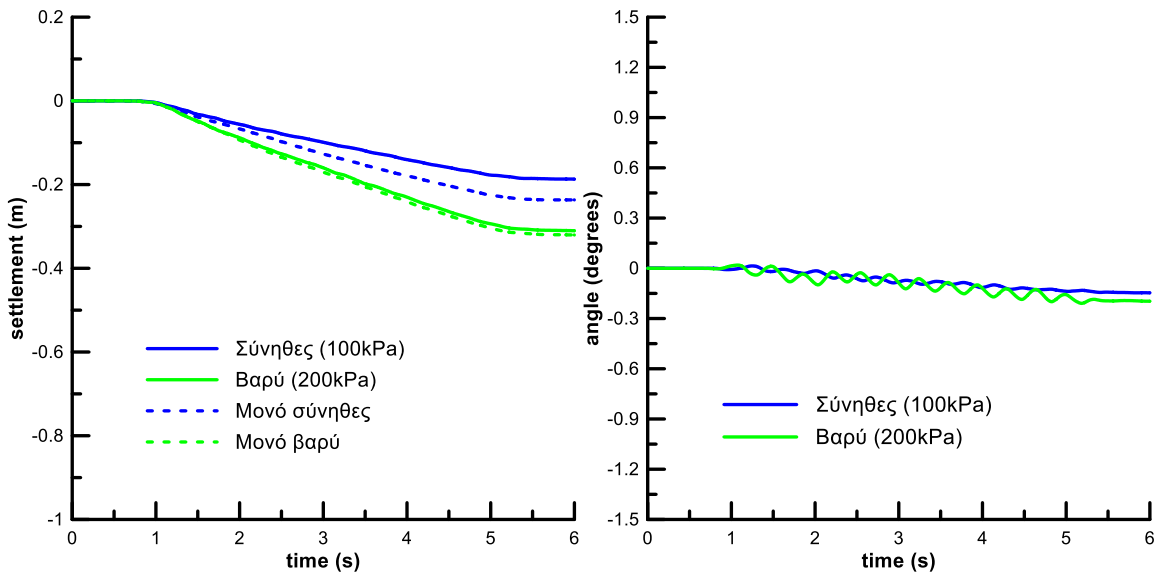
Σχήμα Α.22 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=10m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



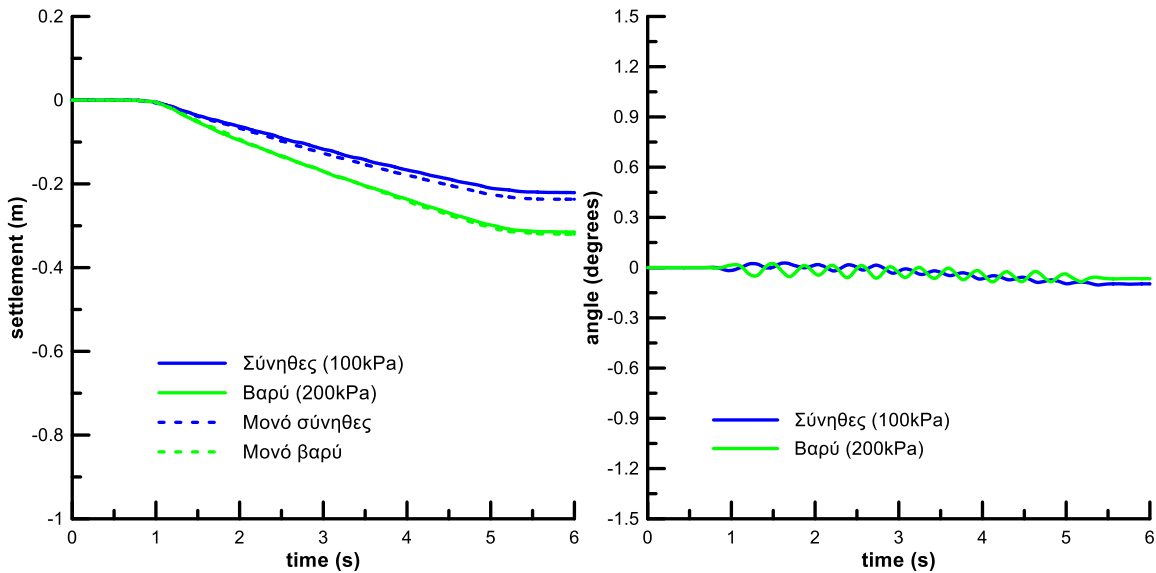
Σχήμα Α.23 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=20m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



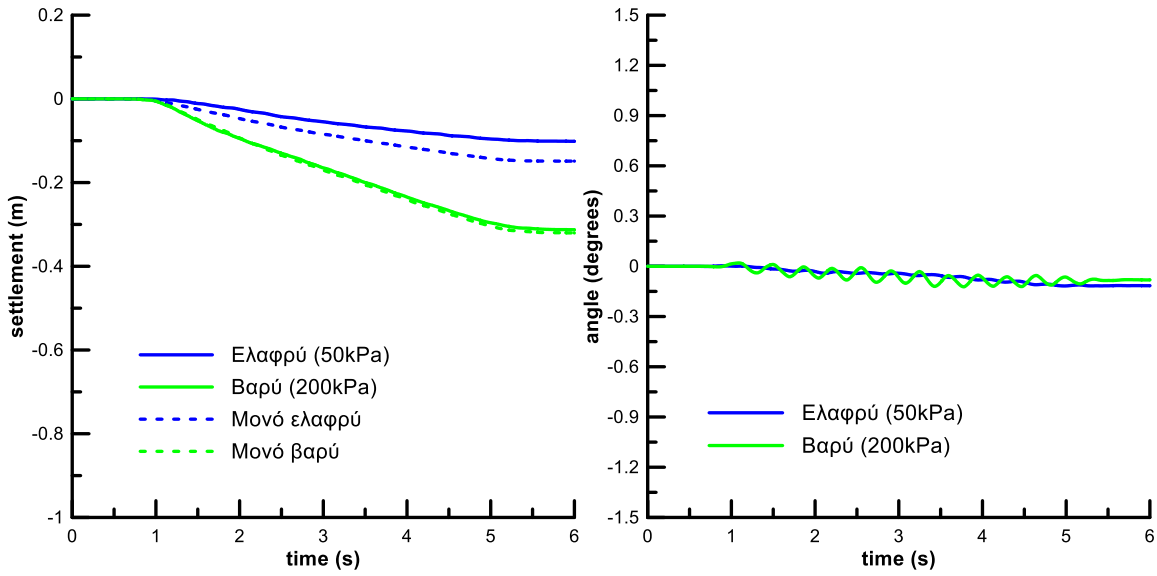
Σχήμα Α.24 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=50kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=40m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



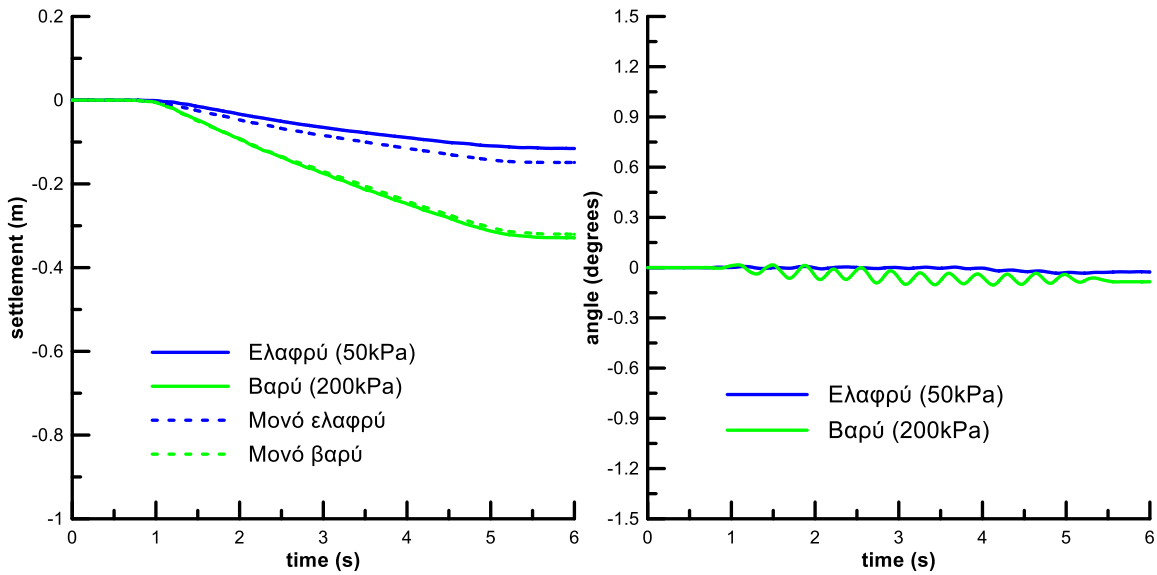
Σχήμα Α.25 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=20m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$



Σχήμα Α.26 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=100kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=40m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

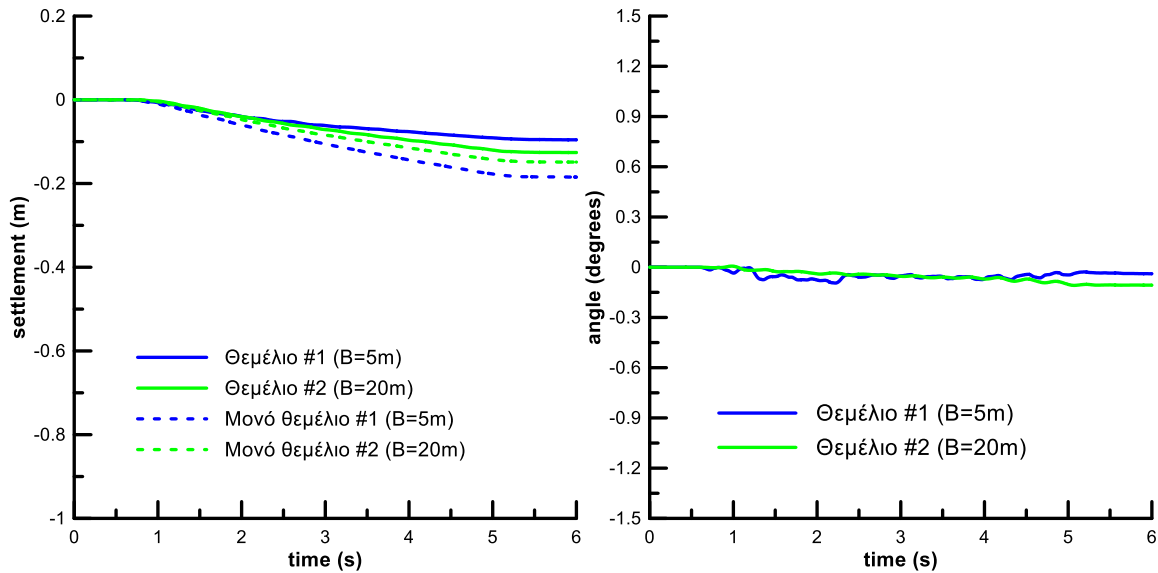


Σχήμα Α.27 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B=20m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

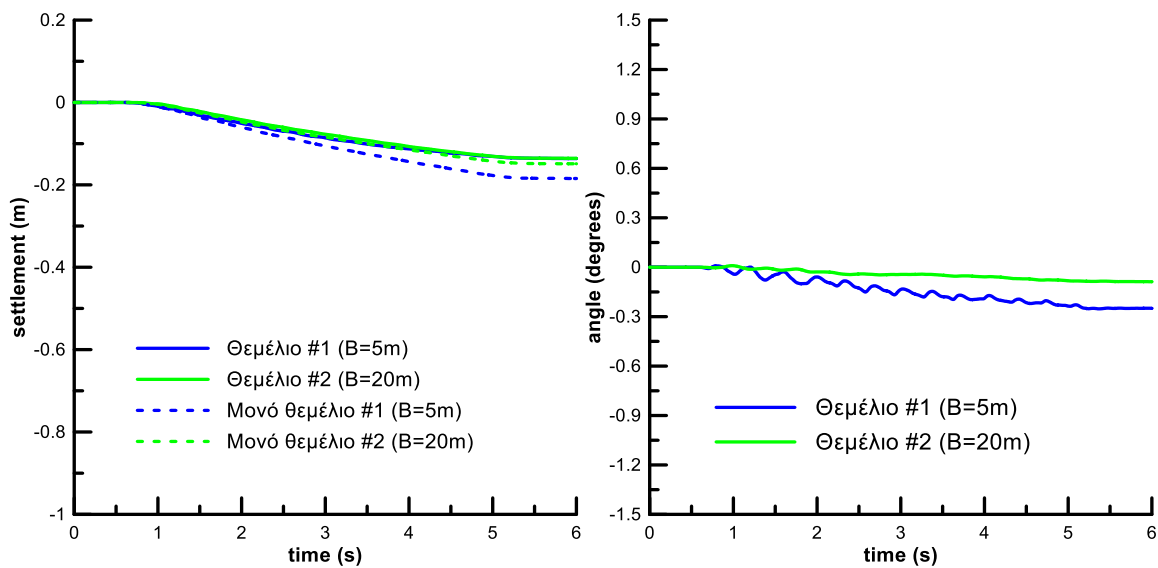


Σχήμα Α.28 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B=40m$ υπό μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$

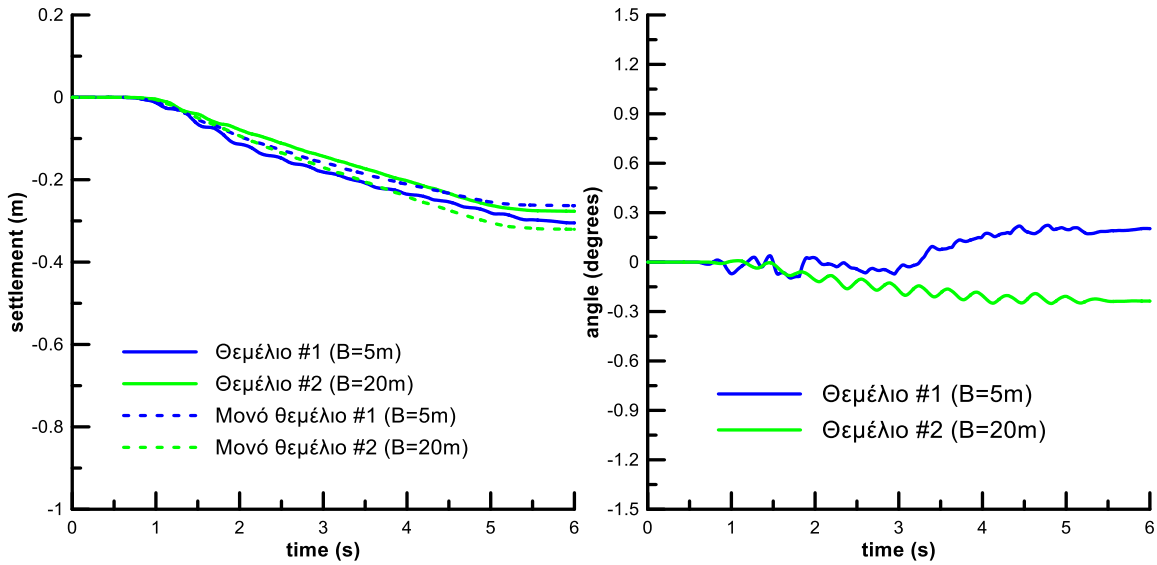
Παράρτημα Β – Συμπληρωματικά αποτελέσματα απόκρισης ζεύγους θεμελίων διαφορετικού εύρους



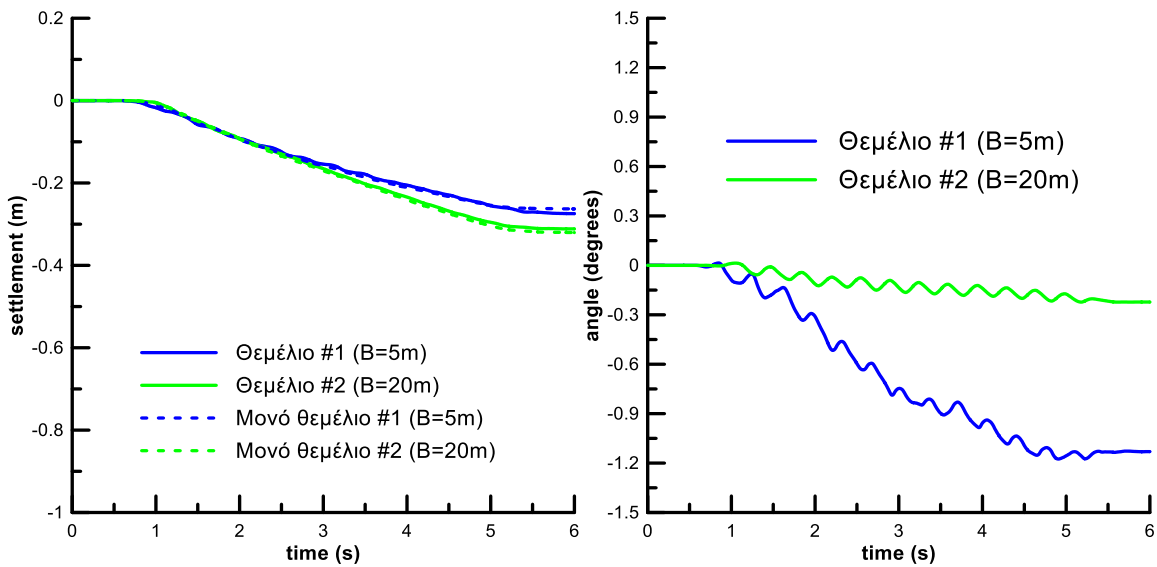
Σχήμα Β.1 Καθιζήσεις και στροφές θεμελίων διαφορετικού πλάτους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B_1=5m$



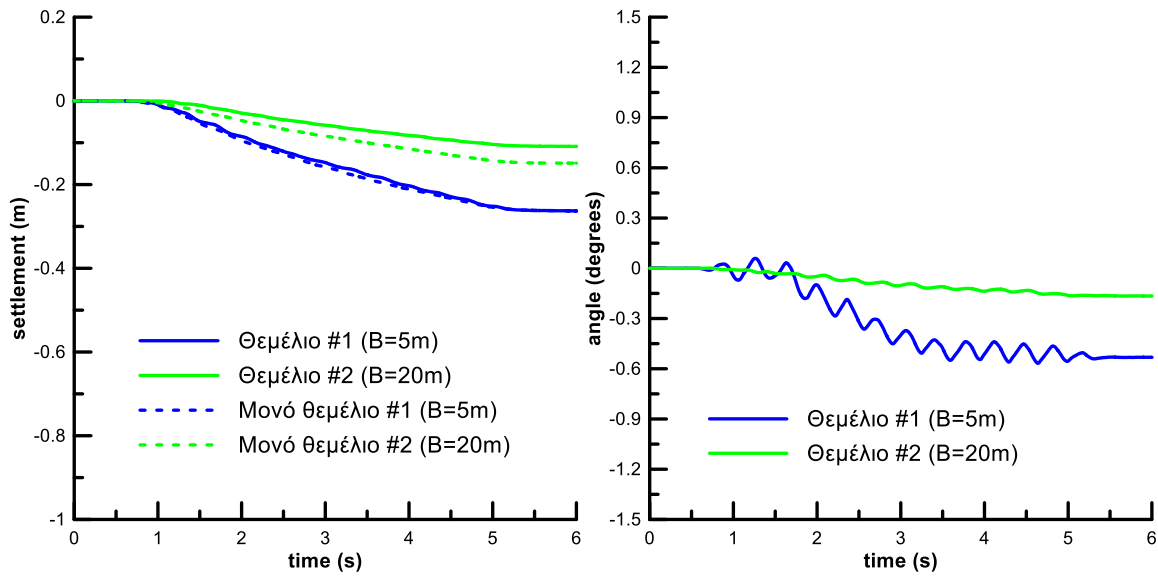
Σχήμα Β.2 Καθιζήσεις και στροφές θεμελίων διαφορετικού πλάτους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B_1=10m$



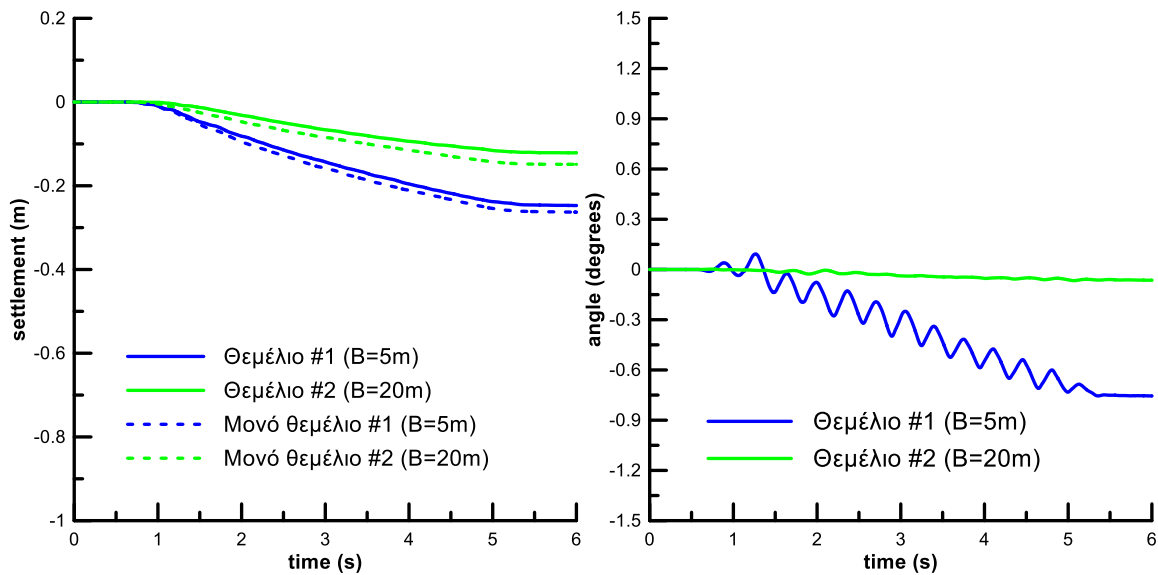
Σχήμα Β.3 Καθιζήσεις και στροφές θεμελίων διαφορετικού πλάτους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B_1=5m$



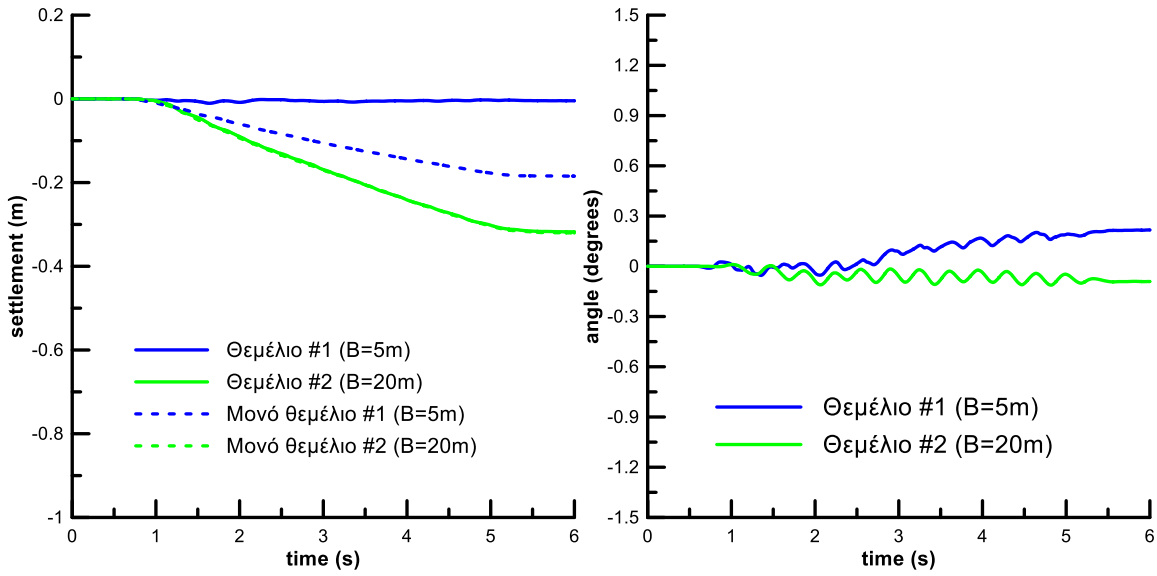
Σχήμα Β.4 Καθιζήσεις και στροφές θεμελίων διαφορετικού πλάτους ($B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B_1=10m$



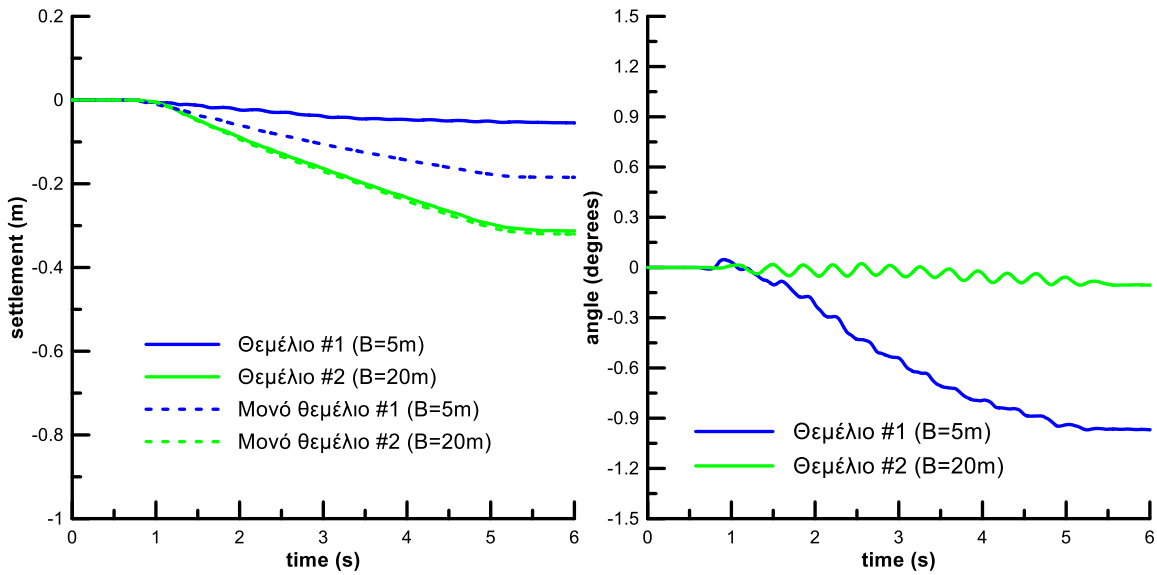
Σχήμα Β.5 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=200kPa$, $q_2=50kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B_1=5m$



Σχήμα Β.6 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=200kPa$, $q_2=50kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B_1=10m$



Σχήμα Β.7 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=B_1=5m$



Σχήμα Β.8 Καθιζήσεις και στροφές συνδυασμών θεμελίων (πλάτους $B_1=5m$ και $B_2=20m$, φορτίων έδρασης $q_1=50kPa$, $q_2=200kPa$, μέγιστης επιτάχυνσης $a_{max}=0.2g$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2B_1=10m$