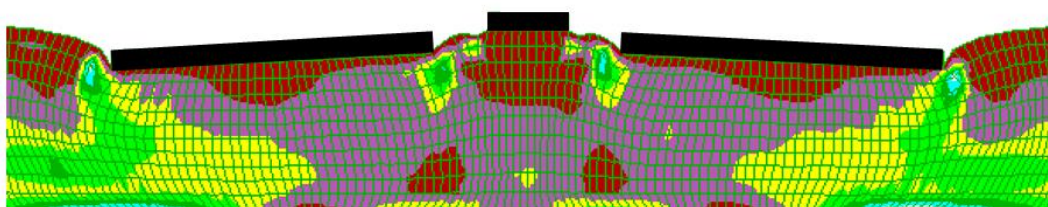




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σεισμική αλληλεπίδραση πολλαπλών κατασκευών
σε οριζόντιο ρευστοποιήσιμο έδαφος



Seismic interaction of multiple structures
on horizontal liquefiable soil

Γκιουλτζούογλου Στέφανος

Επιβλέπων καθηγητής

Παπαδημητρίου Αχιλλέας - Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Ευχαριστίες

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 την άοκνη καθοδήγησή του. Οι αναλυτικές του υποδείξεις και ο συστηματικός του έλεγχος, συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

1. Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Abstract	6
1. Εισαγωγή	8
1.1 Αντικείμενο	8
1.2 Διάρθρωση εργασίας	8
2. Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Γενικά χαρακτηριστικά των πειραματικών δοκιμών.....	11
2.3 Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών στις καθιζήσεις και στις στροφές θεμελίων.....	14
2.4 Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών στη διέγερση της ανωδομής.....	20
3. Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων.....	23
3.1 Εισαγωγή	23
3.2 Αριθμητική μεθοδολογία.....	23
4. Αλληλεπίδραση τριάδας ίδιων θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος	28
4.1 Γενικά	28
4.2 Τυπική απόκριση τριάδας ίδιων θεμελίων	30
4.3 Επίδραση ενδιάμεσων αποστάσεων στην απόκριση τριάδας ίδιων κατασκευών.....	33
4.4 Επίδραση πάχους στρώσης στην απόκριση τριάδας ίδιων θεμελίων	45
4.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων	49
5. Αλληλεπίδραση τριάδας διαφορετικών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.....	50
5.1 Γενικά	50
5.2 Απόκριση τριάδας θεμελίων ίδιου εύρους με διαφορετικά φορτία.....	52
5.3 Απόκριση τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους με ίδιο φορτίο	61
5.4 Απόκριση τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικών φορτίων.....	64
5.5 Επίδραση πάχους στρώσης στην απόκριση τριάδας διαφορετικών θεμελίων.....	71
5.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων	79
6. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	80
6.1 Βασικά συμπεράσματα	80
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	82
Βιβλιογραφία.....	83

Περίληψη

Στα χονδρόκοκκα εδάφη, η ρευστοποίηση είναι ένα από τα πιο καταστροφικά φαινόμενα που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών, προκαλώντας σημαντικά προβλήματα σε υπερκείμενες κατασκευές. Ειδικά για το αστικό περιβάλλον, όπου οι κατασκευές γειτνιάζουν, 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 όταν το έδαφος είναι ρευστοποιήσιμο. Και καθώς τα κτίρια εντός αστικού ιστού που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους είναι συνήθως περισσότερα από δύο, το φαινόμενο καταλήγει να γίνεται έντονα πολυ-παραμετρικό.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των δομικών και σεισμικών παραμέτρων που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση (SSSI₃) σε τριάδα κεντρικά φορτισμένων θεμελίων υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης, καθώς και η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτής. Συγκεκριμένα, αυτή εκτιμάται αρχικά μέσω των καθιζήσεων των θεμελίων της κάθε τριάδας, οι οποίες συγκρίνονται με τις ανάλογες καθιζήσεις μεμονωμένων θεμελίων, αλλά και με καθιζήσεις θεμελίων σε ζεύγη. Η δεύτερη παράμετρος αλληλεπίδρασης είναι η παραμένουσα στροφή θ των θεμελίων, όπου γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση μόνο με περιπτώσεις θεμελίων σε ζεύγη, καθώς στα μεμονωμένα θεμέλια πρακτικώς η στροφή καταλήγει μηδενική. Εκτελέστηκαν συνολικά 37 μη γραμμικές δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις με λογισμικό πεπερασμένων διαφορών (FLAC) για οριζόντια στρώση ομοιόμορφης λεπτής άμμου, σχετικής πυκνότητας $D_r = 45\%$ για αρμονική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.2g$. Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA_SAND. Στην επιφάνεια θεωρήθηκαν αρχικά τριάδες θεμελίων ίδιου εύρους B και στη συνέχεια τριάδες θεμελίων με διαφορετικά εύρη, στενό με $B_1 = 5m$ και ευρύ με $B_2 = 20m$. Η έννοια του στενού ή ευρέος θεμελίου είναι σχετική και συγκρίσιμη με το πάχος της εδαφικής στρώσης. Άλλα μεγέθη ενδιαφέροντος ήταν οι ενδιάμεσες αποστάσεις D μεταξύ των θεμελίων, καθώς και το ομοιόμορφο φορτίο των θεμελίων, το οποίο πήρε 3 τιμές καθ' όλη την έκταση της έρευνας: $q = 50kPa, 100kPa$ και $200kPa$, είτε κοινά είτε διαφορετικά ανά θεμέλιο. Τα άκαμπτα, τραχιά θεμέλια τοποθετήθηκαν απευθείας πάνω στη ρευστοποιήσιμη στρώση, η οποία κυρίως είχε πάχος $H = 10m$, ενώ πραγματοποιήθηκαν και μερικές αναλύσεις για μια στρώση με πάχος $H = 5m$ κάτω από την οποία υπήρχε μη-ρευστοποιήσιμο έδαφος.

Από τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης τριάδας στενών θεμελίων ίδιου εύρους ($B = 5m$) επί ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχους $H = 10m$, αρχικά προκύπτει πως η αλληλεπίδραση καταλήγει να λειτουργεί σχετικά ευεργετικά. Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως τα κεντρικά θεμέλια των τριάδων καθιζάνουν λιγότερο από τα αντίστοιχα μεμονωμένα αλλά και από τα αντίστοιχα θεμέλια σε ζεύγη, ενώ τα θεμέλια στα άκρα καταλήγουν σε τιμές καθιζήσης όμοιες με αυτές των αντίστοιχων μεμονωμένων. Όμως ως προς την στροφή η αλληλεπίδραση μπορεί να χαρακτηριστεί δυσμενής για τα θεμέλια που βρίσκονται στα άκρα της τριάδας (θεμέλια 1 και 3) τα οποία πάντοτε στρέφονται εξωτερικά του κεντρικού θεμελίου. Στο κεντρικό θεμέλιο εμφανίζονται έντονες στροφές σε μεμονωμένες περιπτώσεις. Όσο οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων αυξάνεται, τόσο μειώνεται και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση, και φαίνεται

σχεδόν να παύει καθώς οι τιμή αυτών των αποστάσεων φτάνει τα 20 m. Τέλος, προκύπτει πως με την μείωση της υποκείμενης ρευστοποιήσιμης στρώσης από $H = 10\text{m}$ σε $H = 5\text{m}$, μειώνονται και οι καθιζήσεις των θεμελίων. Η αλληλεπίδραση όμως φαίνεται να εξακολουθεί να λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, καθώς τα θεμέλια στρέφονται και καθιζάνουν σχεδόν με τις ίδιες αναλογίες που παρατηρούνται στις περιπτώσεις για υποκείμενη στρώση $H = 10\text{m}$.

Από τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους και βάρους, γίνεται ξεκάθαρη πλέον και η πολύ –παραμετρική φύση του προβλήματος. Από τις αναλύσεις που διεξάχθηκαν προκύπτει πως, όταν οι μεταξύ τους αποστάσεις και τα φορτία των τριών θεμελίων είναι ίσα (αλλά όχι το εύρος), τότε τα ακραία θεμέλια έχουν όμοια συμπεριφορά, σε αντίθεση με το κεντρικό θεμέλιο. Επίσης σαν γενική παρατήρηση, ισχύει πως καίρια σημασία για την απόκριση μιας συμμετρικής τριάδας θεμελίων δείχνει να έχει η σχέση της συνισταμένης κατακόρυφης δύναμης (πλάτος $B \times$ φορτίο q) που φέρει το κεντρικό θεμέλιο, συγκριτικά με εκείνη του καθενός από τα όμοια ακραία θεμέλια. Όταν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων σε συμμετρική διάταξη είναι μεγαλύτερη εκείνης του κεντρικού θεμελίου, προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης στο κεντρικό θεμέλιο με μηδενική στροφή, ενώ τα ακραία θεμέλια εμφανίζουν ασθενή ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης και στροφή προς τα έξω. Στην αντίστροφη περίπτωση, όταν δηλαδή η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων σε συμμετρική διάταξη είναι μικρότερη εκείνης του κεντρικού θεμελίου προκύπτει συνήθως ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης σε όλα τα θεμέλια, και στροφή μόνο των ακραίων θεμελίων προς τα έξω. Όπως και στις περιπτώσεις ίδιου εύρους και ίδιου βάρους, έτσι και εδώ η μείωση του πάχους της υποκείμενης ρευστοποιήσιμης στρώσης μειώνει τις καθιζήσεις των αντίστοιχων θεμελίων, καθώς μειώνεται το πάχος της «συμπιεστής» στρώσης. Όμως, η ένταση της αλληλεπίδρασης εξακολουθεί να υφίσταται, ακόμα και να αυξάνεται σε όρους στροφής για τα ακραία θεμέλια.

Abstract

Seismic liquefaction of saturated coarse-grained soils is one of the most destructive phenomena that can appear during strong seismic events, as it can induce significant permanent displacements in foundation structures. Especially in urban environments where structures are close to one another, the Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI) influences the mechanisms of permanent displacement accumulation. The extent and nature of this interaction is not yet completely understood, especially when the soil is susceptible to liquefaction. As neighboring buildings in urban environments are usually more than two, the aforementioned interaction (SSSI₃₊) becomes highly multi-parametric.

The objective of this study is to investigate the structural and seismic parameters affecting this interaction for a triplet of centrally loaded foundations in a liquefaction regime (SSSI₃), as well as to quantify this interaction. Specifically, this interaction is quantified via the seismic settlements of each foundation in the triplet, which are compared with the settlements of the same foundations if they were isolated. The second interaction parameter is the rotation of the foundations, which is practically zero for isolated foundations. A total of 37 non-linear dynamic numerical analyses were performed using finite difference software (FLAC) for a uniform horizontal layer of loose sand with a relative density $D_r = 45\%$, subjected to a harmonic excitation with maximum acceleration $a_{max} = 0.2g$. The constitutive model NTUA_SAND was used to simulate the liquefiable soil. Initially, triplets of foundations with the same width B were considered, and then triplets with different widths, i.e., narrow or wide with B values of 5 or 20m, respectively. The concept of narrow or wide foundations is relative to the thickness of the liquefiable layer. Other parameters of interest included the distances D between the foundations (ranging from 2.5 to 20m) and the uniform load on the foundations, which took three values in this study: $q = 50, 100, \text{ and } 200\text{kPa}$, either same or different for each foundation. The rigid, rough and massless foundations were directly founded on the liquefiable layer, which mainly had a thickness of $H = 10\text{m}$, while some analyses were also performed for a layer with thickness $H = 5\text{m}$ under which there was non-liquefiable soil.

From the investigation of the seismic response of a triplet of identical (narrow) foundations on a liquefiable layer with thickness $H = 10\text{m}$, it is deduced that the interaction tends to relatively favorable. Specifically, the central foundations of the triplets settle less than the corresponding isolated ones, while the peripheral foundations end up with settlements similar to those of the isolated foundations. However, regarding rotation, the interaction can be characterized as unfavorable for the peripheral foundations, which always rotate opposite to the central foundation (outward). The central foundation rotates only if the distances from the adjacent identical foundations are not equal. As the distance between the identical foundations increases, their interaction decreases and appears to almost cease when the distance D approaches 20m. Finally, by reducing the underlying liquefiable layer from $H = 10\text{m}$ to $H = 5\text{m}$, the settlements of the foundations decrease as the thickness of the "compressible" layer decreases. However, their interaction appears to operate in the same way, regardless of the layer thickness.

From the investigation of the seismic response of a triplet of foundations with different widths and loads, the multi-parametric nature of the problem becomes clearer. To simplify the problem, emphasis was placed on symmetric arrangements of foundations, i.e., their distances between one another were kept equal, while the peripheral foundations were always identical, while being different from the central one. Analyses show that in symmetric arrangements, the peripheral foundations have similar behavior (just with opposite rotation), which is different from that of the central one (e.g., practically zero rotation). It is also concluded that the relative magnitude of the vertical force resultant (width B x load q) carried by the central foundation in comparison that of each of the identical peripheral foundations is crucial for the response of a symmetric triplet of foundations. Specifically, when the resultant force of the peripheral foundations in a symmetric arrangement is greater than that of the central foundation, a favorable interaction appears in terms of settlements for the central foundation with zero rotation, while the peripheral foundations show only weakly favorable interaction in terms of settlements and outward rotation. In the opposite case, when the resultant force of the peripheral foundations in a symmetric arrangement is smaller than that of the central foundation, favorable interaction in terms of settlements appears for all foundations, with only outward rotation of the peripheral foundations. As in the cases of symmetric triplets of identical foundations, the reduction of the thickness of the underlying liquefiable layer reduces the settlements of the corresponding foundations. However, the intensity of the interaction remains constant, or possibly increases only in terms of rotation for the peripheral foundations.

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 για τα έργα Πολιτικού Μηχανικού. Καθώς στο αστικό περιβάλλον οι κατασκευές γειτνιάζουν, η αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI, Structure – Soil – Structure Interaction) επηρεάζει και τους μηχανισμούς ανάπτυξης μετακινήσεων σε αυτές. Η έκταση και η φύση αυτής της αλληλεπίδρασης παραμένει μη-πλήρως κατανοητή, ιδιαίτερα σε καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Η διεθνής βιβλιογραφία έως τώρα έχει επικεντρωθεί σε μελέτες και πειράματα με σκοπό την ερμηνεία των μηχανισμών που διέπουν την ανάπτυξη μόνιμων μετακινήσεων (στροφές, καθιζήσεις) σε μεμονωμένες κατασκευές ή σε ζεύγη κατασκευών λόγω ρευστοποίησης. Από τις μελέτες προκύπτει πως το πρόβλημα της ρευστοποίησης για κατασκευές εντός αστικού ιστού είναι έντονα πολυ-παραμετρικό. Από την άλλη, είναι σαφές πως μέσα σε μια μεγάλη πόλη, συνήθως παραπάνω από δύο κτίρια τυγχάνει να βρίσκονται σε πολύ μικρή μεταξύ τους απόσταση, και συνεπώς οι ως άνω μελέτες δεν μπορούν να προσεγγίζουν επαρκώς την πραγματικότητα.

Έτσι, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση δομικών και σεισμικών παραμέτρων που επιδρούν στην αλληλεπίδραση τριών γειτονικών θεμελίων υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Η διερεύνηση έγινε υπολογιστικά με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών και περιλαμβάνει 37 μη γραμμικές δισδιάστατες αναλύσεις απόκρισης του εδάφους σε σεισμική διέγερση που προκαλεί ρευστοποίηση.

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 φυγοκεντριστή και κάποιες αριθμητικές αναλύσεις 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 λογισμικού και παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία και οι παραδοχές που έγιναν για την προσομοίωση της απόκρισης των επιφανειακών θεμελιώσεων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε τρία (3) γειτονικά ίδια θεμέλια επί ρευστοποιήσιμης στρώσης, για διαφορετικές τιμές ενδιάμεσης απόστασης και στη συνέχεια για διαφορετικό πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, η έμφαση 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 ακριβώς τη δομή του Κεφαλαίου 4, και εξετάζονται σε αυτό τρία (3) γειτονικά αλλά διαφορετικά θεμέλια. Συγκεκριμένα, θεμέλια ίδιου εύρους και διαφορετικού βάρους, ίδιου βάρους και διαφορετικού εύρους, όπως επίσης και θεμέλια εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους, επί ρευστοποιήσιμης στρώσης. Μάλιστα διερευνάται και η επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης στην εν λόγω αλληλεπίδραση.

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

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Εισαγωγή

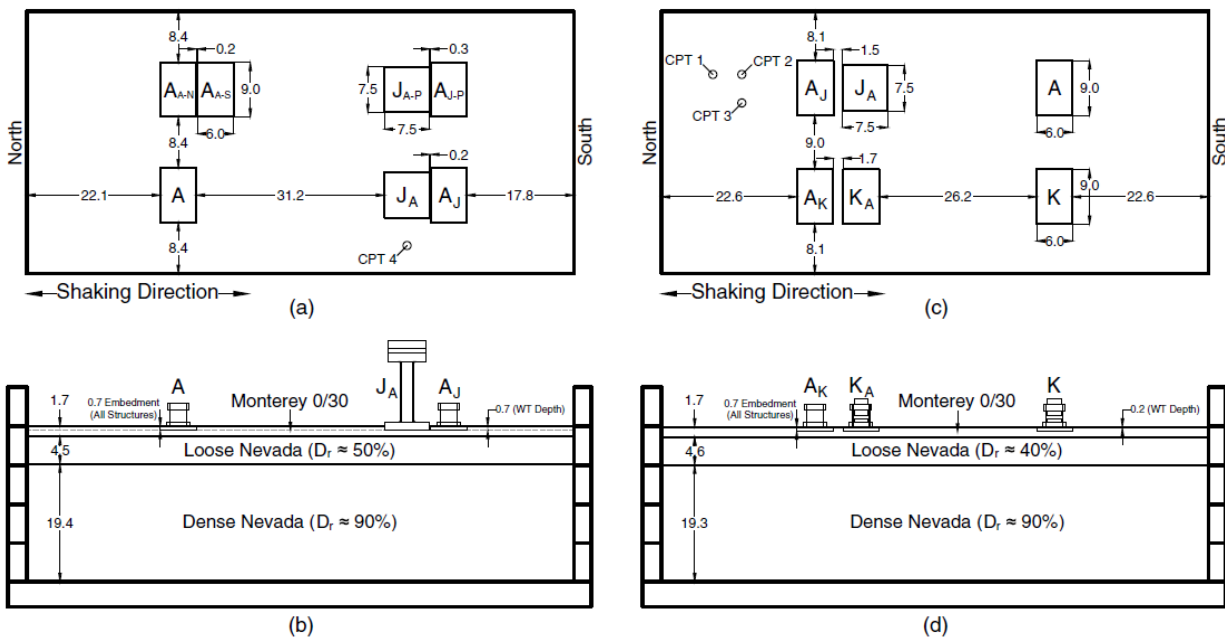
Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια ανασκόπηση πρόσφατων δημοσιεύσεων από τη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την αλληλεπίδραση κατασκευών με το υποκείμενο έδαφος θεμελίωσης υπό καθεστώς ρευστοποίησης. Επιδιώκεται η εμβάθυνση στους μηχανισμούς που διέπουν τη συζευγμένη συμπεριφορά παρακείμενων κατασκευών εδραζόμενων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, όπως προκύπτει συχνά σε αστικό περιβάλλον. Η έρευνα και η μελέτη αυτών των μηχανισμών αποτελεί ένα πρώτο βήμα για τη μελλοντική εφαρμογή συνδυασμένων μεθόδων αποτροπής της ρευστοποίησης, ώστε η βελτίωση σε μία να μην επιδρά δυσμενώς στην απόκριση των γειτονικών της. Η απόκριση διερευνάται κυρίως σε όρους καθιζήσεων και στροφών των θεμελίων κυρίως, και δευτερευόντως ως προς τη σεισμική διέγερση που φτάνει στην ανωδομή.

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 ελεύθερου πεδίου (Free-Field, FF), αλλά δεν ισχύει το ίδιο και για τους μηχανισμούς αποκλίνουσας παραμόρφωσης. Με τον όρο «ελεύθερο πεδίο» 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. Στη βιβλιογραφία η ένδειξη $SSSI_2$ αφορά γειτνίαση δύο κατασκευών (οπότε και μπορεί να παραληφθεί ο δείκτης 2) και η ένδειξη $SSSI_{3+}$ γειτνίαση τριών και άνω. Παρακάτω δίνεται έμφαση σε δυναμικές δοκιμές φυγοκεντριστή και αριθμητικές μελέτες που διερευνούν συστηματικά το πιο σύνθετο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής.

Συγκεκριμένα, προκειμένου να διερευνηθεί και να κατανοηθεί σε βάθος η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και υπερκείμενων κατασκευών σε ένα αστικό περιβάλλον σε καθεστώς ρευστοποίησης, εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία και θα παρατεθούν εδώ: ένα πείραμα με χρήση φυγοκεντριστή των Hayden et al (2015) για περίπτωση $SSSI_2$, μια αριθμητική μελέτη των Hwang & Dashti (2023) για περίπτωση $SSSI_{3+}$, καθώς και η μελέτη των Hwang et al. (2021) η οποία επιχειρεί μια σύγκριση πειραμάτων φυγοκεντριστή με αριθμητικές αναλύσεις για περίπτωση $SSSI_2$. Ειδική αναφορά θα γίνει στην διπλωματική εργασία της Τσεπελίδου (2021) που αφορά αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής ($SSSI_2$) με χρήση αριθμητικών αναλύσεων.

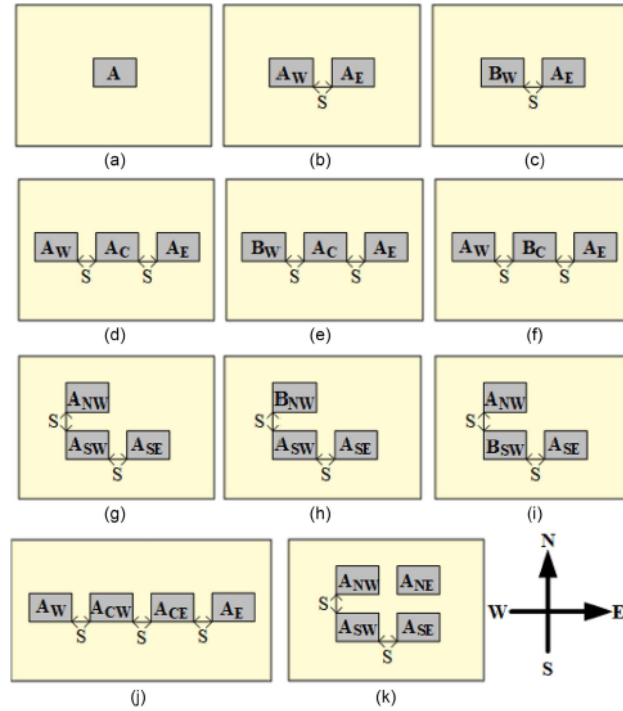
2.2 Γενικά χαρακτηριστικά των πειραματικών δοκιμών

Τα πειράματα που παρατίθενται αφορούν 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. Προσομοίωση ανάλογης γεωμετρίας εδάφους και χαρακτηριστικών, έγινε για τις μελέτες των Hwang and Dashti (2023) και Hwang et al. (2021) στο περιβάλλον του προγράμματος OpenSEES (OpenSEESMP version 3.0.0 rev6692). Για την προσομοίωση της ρευστοποιήσιμης άμμου, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PDMY02 (Elgamal et al. 2002, Yang et al. 2008). Σε ό,τι αφορά στην εργασία της Τσεπελίδου, στο περιβάλλον του FLAC (Itasca Inc. 2011) έγινε χρήση του προσομοιώματος NTUA_SAND (Andrianopoulos et al. 2010). Καθώς τα τελευταία αποτελούν το λογισμικό και την προσομοίωση για την παρούσα εργασία, γίνεται αναλυτική αναφορά σε αυτά στο Κεφάλαιο 3. Ενδεικτικά στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζονται οι διατάξεις από τους Hayden et al (2015) απ' όπου φαίνεται η προαναφερθείσα τυπική διαστρωμάτωση, αλλά και οι διαφορετικές διατάξεις χάριν σύγκρισης. Αφορούν δύο περιπτώσεις όπου υπάρχει μικρή διαφοροποίηση στο ύψος και την σχετική πυκνότητα της ρευστοποιήσιμης στρώσης.

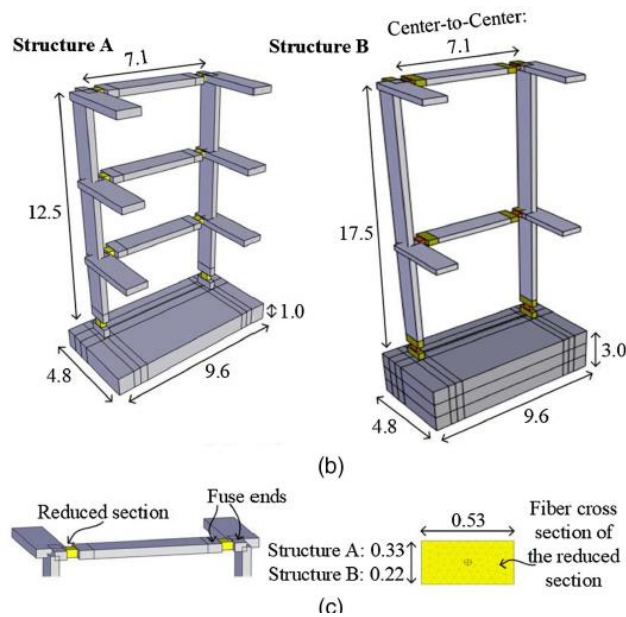


Σχήμα 2.1 Διαμόρφωση εδάφους και διαρρύθμιση απομακρυσμένων και γειτονικών κατασκευών σε διάφορους συνδυασμούς στα πειράματα φυγοκεντριστή των Hayden et al. 2015: (a),(b). Πρώτη διάταξη σε όψη και κάτοψη και (c),(d) δεύτερη διάταξη σε όψη και κάτοψη.

Στο πιο περίπλοκο πρόβλημα με τρεις και παραπάνω κατασκευές των Hwang and Dashti (2023) χρησιμοποιήθηκαν 2 τύποι κατασκευών A, B με διαφορετικά ύψη και διαφορετικά πάχη θεμελίωσης, σε 11 διαφορετικές χωρικές διατάξεις, όπως φαίνονται στα **Σχήματα 2.2, 2.3**.

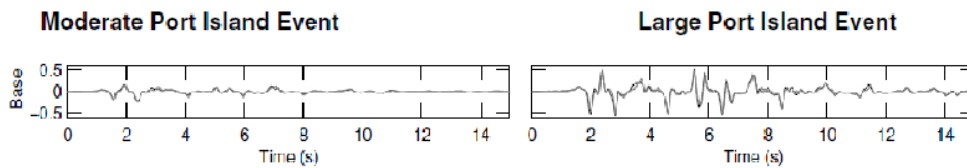


Σχήμα 2.2 Διαρρύθμιση γειτονικών κατασκευών σε 11 συνδυασμούς στις αριθμητικές αναλύσεις των Hwang and Dashti (2023)

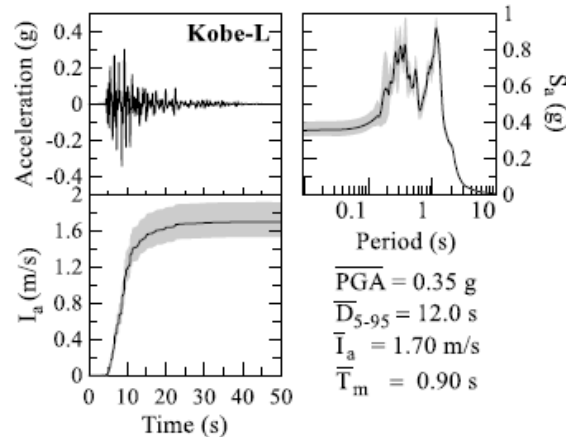


Σχήμα 2.3 Τύποι κατασκευών στις αριθμητικές αναλύσεις των Hwang and Dashti (2023)

Σε όλα τα πειράματα εφαρμόστηκαν δονήσεις αυξανόμενης έντασης με στόχο τη μελέτη της επιρροής των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην απόκριση των ανωδομών. Ακολουθούν στα επόμενα σχήματα οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τις τυπικές δονήσεις. Στα πειράματα με γεωτεχνικό φυγοκεντριστή των Hayden et al (2015) έγινε, μεταξύ άλλων, χρήση των δονήσεων από δύο σεισμούς μικρής και μεγάλης έντασης που συνέβησαν στην περιοχή του Port Island στο Kobe της Ιαπωνίας (**Σχήμα 2.4**). Όσον αφορά τις μελέτες των Hwang and Dashti (2023) και Hwang et al. (2021) έγινε χρήση ενός μέσου όρου από τις δονήσεις του σεισμού στο Kobe. Χαρακτηρίζεται στην βιβλιογραφία ως Kobe-L (**Σχήμα 2.5**).



Σχήμα 2.4 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων από τη βάση έως την επιφάνεια που μετρήθηκαν στα πειράματα των Hayden et al (2015)



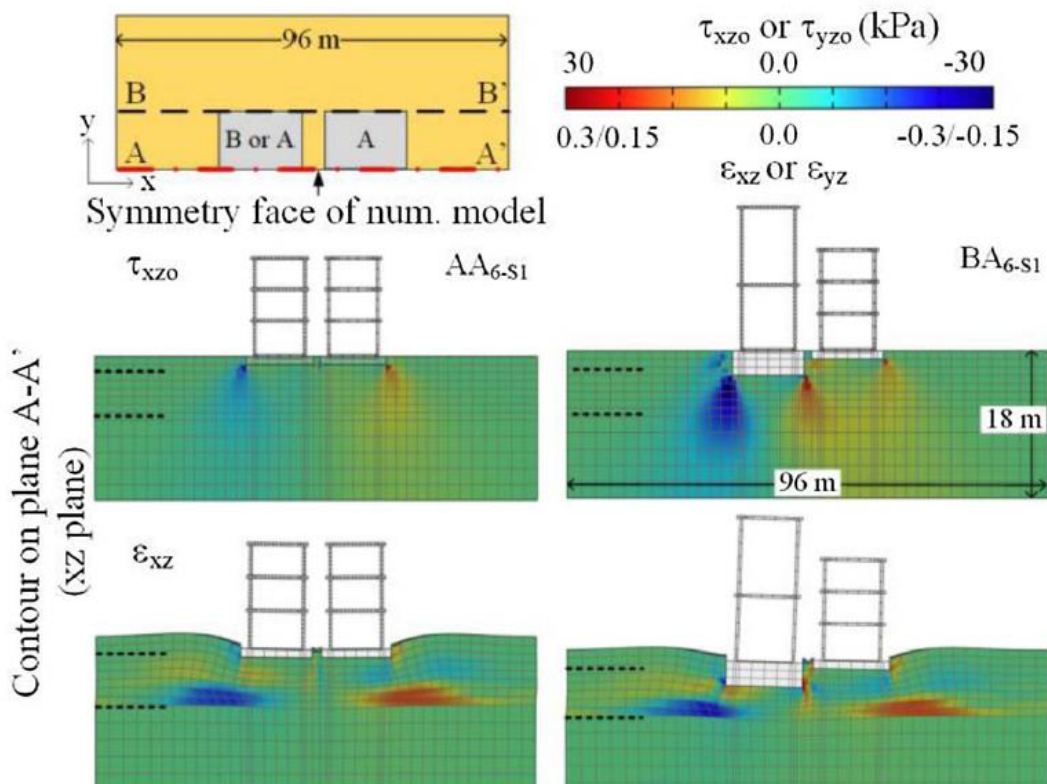
Σχήμα 2.5 Χρονοϊστορία επιτάχυνσης, ελαστικό φάσμα απόκρισης, ένταση Arias της δόνησης που χρησιμοποιήθηκε στις εργασίες των Hwang and Dashti (2023) και Hwang et al. (2021)

2.3 Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών στις καθιζήσεις και στις στροφές θεμελίων

Οι προαναφερθέντες ερευνητές προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν την επιρροή της αλληλεπίδρασης παρακείμενων κατασκευών σε καθεστώς ρευστοποίησης εστίασαν στην ανάπτυξη καθιζήσεων και στροφών (που συνδέονται 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.

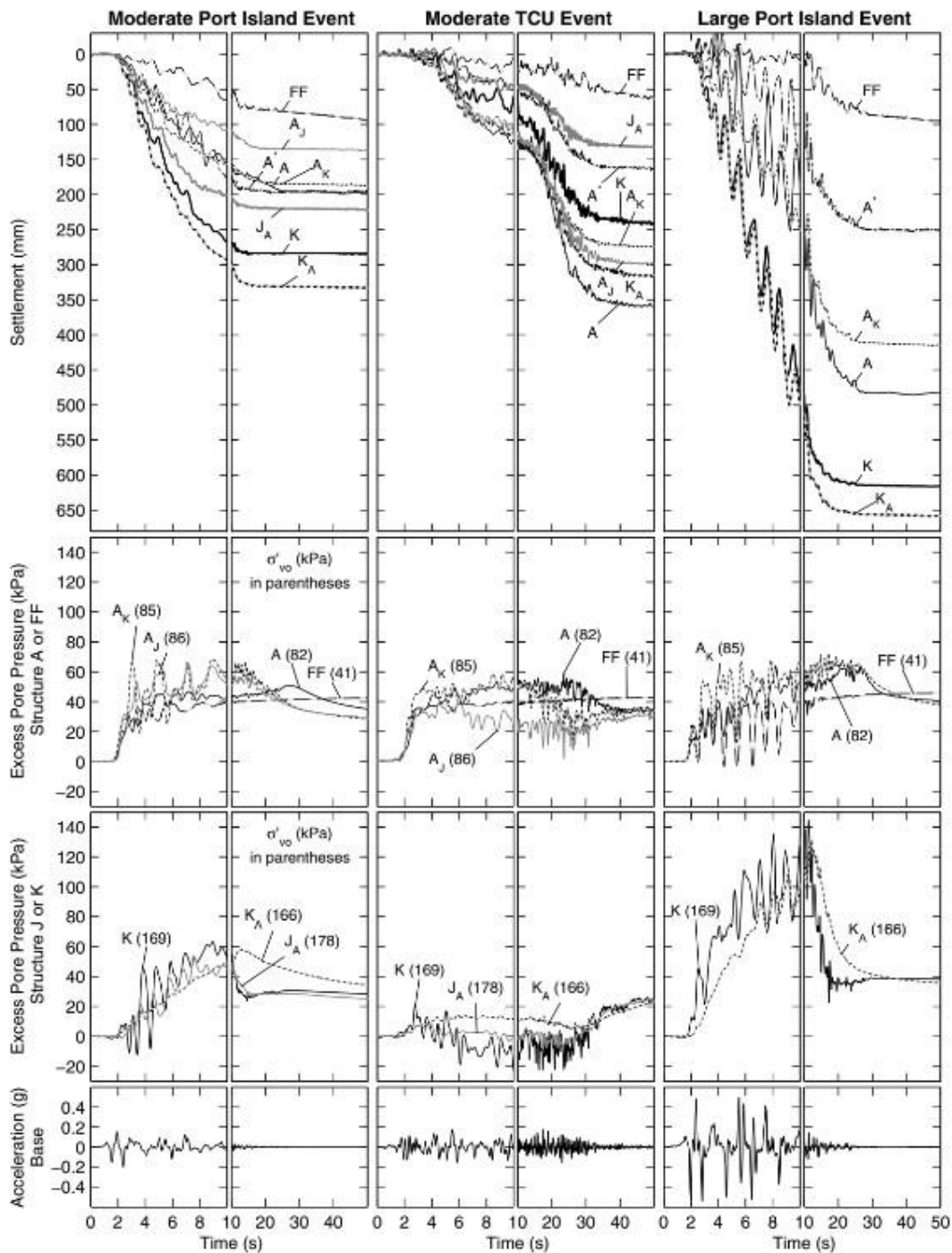
Για να κατανοηθεί αυτή η διαφοροποίηση, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση των κατασκευών μεταξύ τους και με το υποκείμενο έδαφος. Ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο γειτονικών κατασκευών καθορίζεται ουσιαστικά από το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στο υποκείμενο έδαφος. Συγκεκριμένα, η αλληλοεπικάλυψη των βολβών των τάσεων (π.χ., 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 υπερπίεσεις πόρων και κατ' επέκταση μεγαλύτερες καθιζήσεις, απ' ότι προκύπτει για μια απομονωμένη κατασκευή (Hayden et al. 2015). Ακόμα, κάτω από την απομονωμένη κατασκευή τόσο οι ενεργές όσο και οι διατμητικές τάσεις είναι συμμετρικές ως προς άξονα διερχόμενο από το κέντρο της, επομένως υποθέτοντας μία εξίσου συμμετρική ανάπτυξη υπερπίεσεων 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. Ειδικότερα στο **Σχήμα 2.6**, απεικονίζονται οι βολβοί των διατμητικών τάσεων για επίπεδο παράλληλο (επίπεδο xz) στην σεισμική δόνηση, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις των Hwang et al. (2021). Διακρίνουμε πως οι τιμές τους στις εξωτερικές άκρες των κατασκευών είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές στις εσωτερικές άκρες. Ακόμα πιο έντονη γίνεται η ασυμμετρία της κατανομής σε περίπτωση γειτνίασης 2 διαφορετικών κατασκευών.



Σχήμα 2.5 Διατμητικές τάσεις στο υποκείμενο έδαφος (επίπεδο xz) και τελική παραμόρφωση για ζεύγος ίδιων κατασκευών AA και ζεύγος κατασκευών διαφορετικού ύψους AB (Hwang et al.2021)

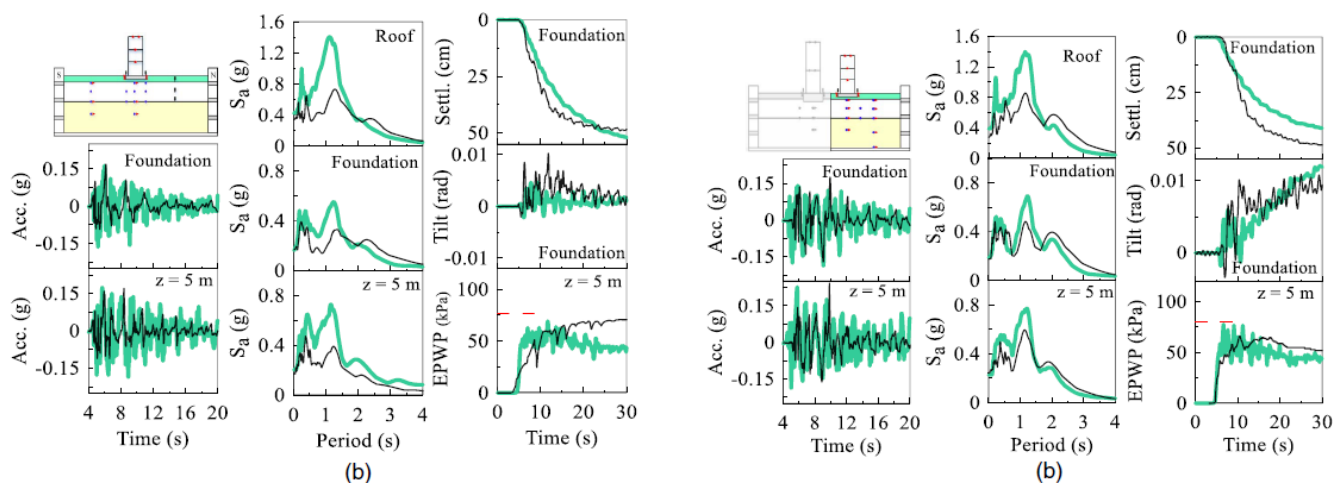
Η ανομοιομορφία των αναπτυσσόμενων τάσεων και οι τοπικές αυξομειώσεις στην ένταση τους, έχουν ως αποτέλεσμα ποικίλες μορφές κατακόρυφων μετακινήσεων και στροφών στις ανωδομές. Ως επόμενο της γεινίασης πολλαπλών κατασκευών, το υποκείμενο τασικό πεδίο περιπλέκεται, συνεπώς υπό το φαινόμενο της ρευστοποίησης δημιουργούνται καθιζήσεις, ανυψώσεις, στροφές των κτιρίων συγκλίνουσες ή αποκλίνουσες. Σημαντικές παράμετροι του προβλήματος είναι η σχετική πυκνότητα της ρευστοποιήσιμης στρώσης, η ένταση και η διάρκεια της σεισμικής δόνησης, τα είδη των εμπλεκόμενων κτιρίων και οι μεταξύ τους θέσεις.

Παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.7** αποτελέσματα των πειραμάτων με γεωτεχνικό φυγοκεντριστή των Hayden et al. (2015). Όπως παρατηρούμε, κατά την επιβολή ισχυρών και ήπιων βραχύχρονων δονήσεων, οι πιο στιβαρές κατασκευές τύπου K,J έλαβαν μεγαλύτερη καθίζηση σε σχέση με την πιο ελαφριά κατασκευή A, ενώ σε μια πιο παρατεταμένη ήπια δόνηση (TCU) συνέβη το ανάποδο, καθώς υπερπιέσεις πόρων υπό τις βαριές κατασκευές ήταν σχεδόν μηδενικές. Σαν γενικό συμπέρασμα, διαπιστώθηκε πως για μικρότερη σχετική πυκνότητα της ρευστοποιήσιμης στρώσης, η καθίζηση είναι μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα οι δύο εδαφικές διατάξεις που εξέτασαν οι Hayden et al (2015) είχαν διαφορά $Dr=10\%$ (1^η περίπτωση $Dr=40\%$, 2^η περίπτωση $Dr=50\%$) για την χαλαρή άμμο, με αποτέλεσμα οι καθιζήσεις να ήταν υποδιπλάσιες στην πιο πυκνή περίπτωση.



Σχήμα 2.7 Καθιζήσεις, υπερπώσεις πόρων στο μέσον της ρευστοποιήσιμης στρώσης ($D_r=40\%$) κάτω από το κέντρο 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}' . Με A^* συμβολίζεται το απομονωμένο κτίριο για ρευστοποιήσιμη στρώση ($D_r=50\%$) (Hayden et al. 2015)

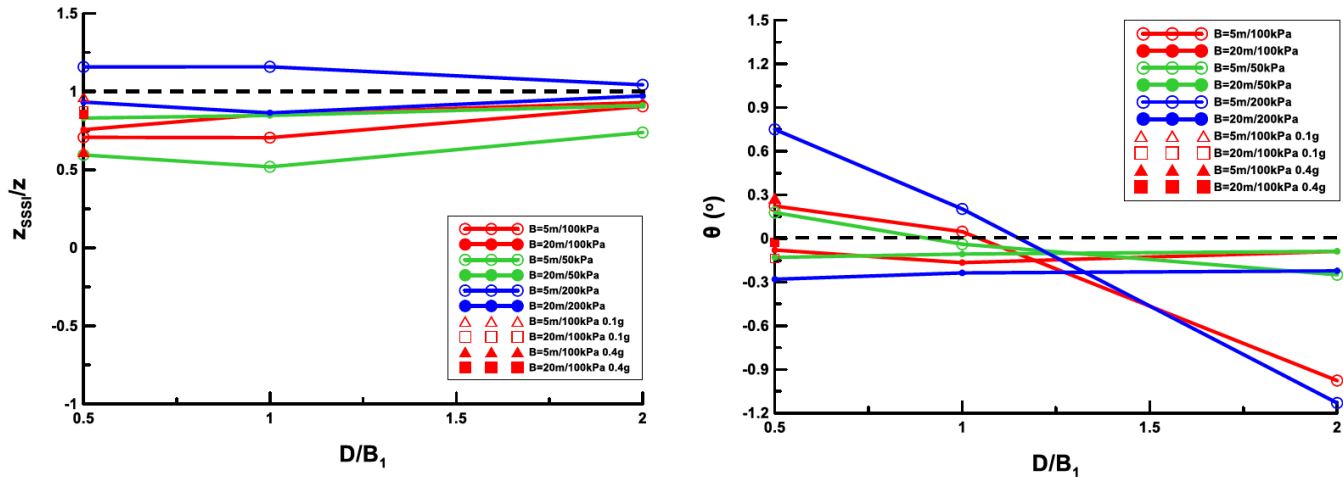
Παρατηρήθηκε επίσης πως για ζευγάρια ανωδομών με ρηχή θεμελίωση και ίδιο ύψος, η καθίζηση τους ήταν μικρότερη σε σχέση με τον ίδιο τύπο ανωδομής απομονωμένο. Όμως σε αυτή τη περίπτωση η σεισμική δόνηση έκανε τις κατασκευές να εμφανίσουν έντονες αποκλίνουσες στροφές. Στο άρθρο των Hwang et al. (2021), γενικό συμπέρασμα αποτελεί πως η στροφή των κτιρίων σε περιπτώσεις SSSI₂ είναι μεγαλύτερης σημασίας απ’ ότι οι καθιζήσεις. Ειδικότερα, μεγαλύτερες ενεργές κατακόρυφες και διατμητικές τάσεις εντός επιπέδου, για ζεύγη με $D > B/3$ (D = απόσταση μεταξύ κτιρίων, B = πλάτος ανωδομής), είχαν ως αποτέλεσμα οι κατασκευές να εμφανίσουν αποκλίνουσες στροφές. Το αντίθετο όμως συνέβη για ζεύγη με $D < B/3$ και για μεγαλύτερες εκτός επιπέδου διατμητικές τάσεις κάτω από τις εσωτερικές ακμές των θεμελίων. Σημαντική διαπίστωση της έρευνάς τους, ήταν πως η αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής είχε επιρροή στις ανωδομές για μεταξύ τους αποστάσεις έως και 2.5B. Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζονται χρονοϊστορίες στροφών, καθιζήσεων, υπερπιέσεων πόρων για μονή ανωδομή και ζεύγος διαφορετικών ανωδομών, που προέκυψαν από πειράματα φυγοκεντρική καθώς και από αριθμητικές αναλύσεις των Hwang et al. (2021), και υποστηρίζουν τα ανωτέρω ευρήματα.



Σχήμα 2.8 Χρονοϊστορίες στροφών, καθιζήσεων, υπερπιέσεων πόρων για μονή ανωδομή και ζεύγος διαφορετικών ανωδομών. Με πράσινο χρώμα - αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, με μαύρο χρώμα αποτελέσματα πειραμάτων φυγοκεντρική. Φάσματα και χρονοϊστορίες επιταχύνσεων. (Hwang et al.2021)

Ενδεδειγμένη έρευνα, με πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς περιπτώσεων $SSSI_2$ έγινε από την Τσεπελίδου στην διπλωματική της εργασία (2021). Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν στις αριθμητικές αναλύσεις της, πέρα από το εύρος των ανωδομών και τη μεταξύ τους απόσταση, ήταν το βάρος των κατασκευών (μέση τάση έδρασης $q = 50-200$ kPa) και η ένταση της δόνησης ($a_{max} = 0.1-0.4g$). Για ζεύγος στενών θεμελίων ίδιου εύρους, προέκυψαν τιμές λόγου καθιζήσεων $z_{SSSI}/z = 0.81 - 1.28$ (z_{SSSI} – ζεύγος θεμελίων, z - μονό θεμέλιο) και στροφές $\theta = -0.83^\circ$ έως 0.98° ($\theta > 0$ – συγκλίνουσα στροφή, $\theta < 0$ – αποκλίνουσα στροφή). Δηλαδή προέκυψε τόσο ευμενής όσο και δυσμενής αλληλεπίδραση, η οποία έφθινε ελαφρώς για μεγαλύτερες τιμές αποστάσεων κατασκευών. Επίσης σημαντικό είναι πως βαριά θεμέλια εμφάνισαν δυσμενή αλληλεπίδραση στις καθιζήσεις και αποκλίνουσες στροφές, ενώ τα ελαφριά θεμέλια το ανάποδο. Γενικώς, συμπεράσματα που συνάδουν με την προαναφερθείσα βιβλιογραφία.

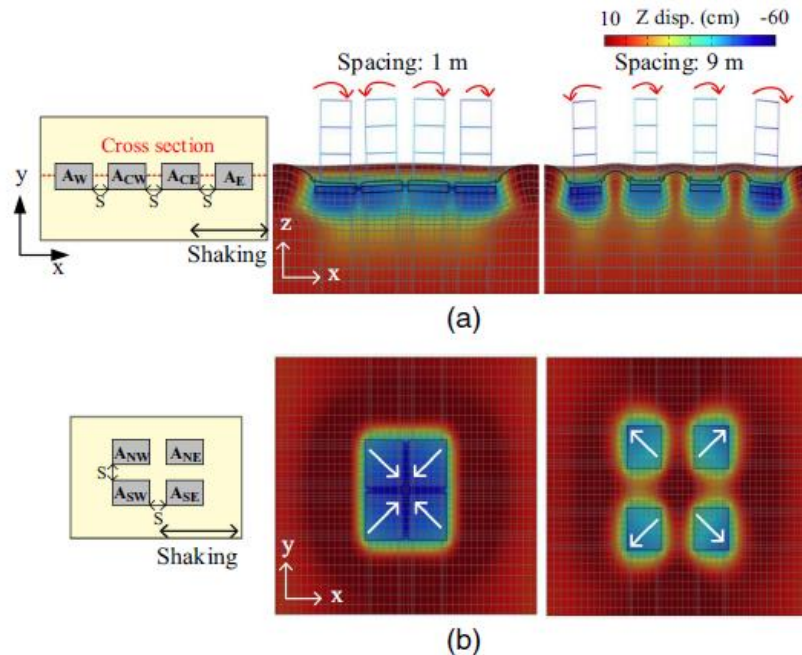
Ιδιαίτερη έμφαση στην εργασία της Τσεπελίδου (2021) δόθηκε και σε συνδυασμούς ζευγών θεμελιώσεων διαφορετικού εύρους, έρευνα η οποία δεν είχε γίνει στα άρθρα που παρουσιάστηκαν ως τώρα στο παρόν κεφάλαιο. Οι εκτιμήσεις καθιζήσεων και στροφών στις οποίες κατέληξαν αυτές οι αναλύσεις είχαν αρκετά μεγαλύτερο εύρος τιμών. Συγκεκριμένα, η αλληλεπίδραση κατασκευών με έντονα διαφορετική γεωμετρία οδήγησε σε τιμές $z_{SSSI}/z = -0.5$ έως 1.3 και στροφές $\theta = -1.1^\circ$ έως 1.3° . Για θεμέλια με διαφορετικό εύρος, σημασία στην αλληλεπίδραση έχει η κανονικοποιημένη απόσταση D/B_{max} , όπου B_{max} αντιστοιχεί στο ευρύτερο από τα δύο θεμέλια. Σε ζεύγη θεμελίων με ίδιο φορτίο, τα στενά εμφάνισαν $z_{SSSI}/z > 1$ όταν έφεραν μεγάλο φορτίο. Αντίστοιχα, μόνο στενά θεμέλια εμφάνισαν μεγάλες στροφές (π.χ. $|\theta| > 0.3^\circ$). Αντίθετα, τα ευρέα θεμέλια ανεξαρτήτως φορτίου εμφάνισαν $z_{SSSI}/z > 1$ και πρακτικώς μηδενικές στροφές. Σε ζεύγη θεμελίων με διαφορετικό φορτίο, για το μεν βαρύ, δεν είχε σημασία το εύρος ($0.85 < z_{SSSI}/z \leq 1$), αλλά για το ελαφρύ, το εύρος υπήρξε κρίσιμο μέγεθος, καθώς για τον ακραίο συνδυασμό στενού και ελαφρύ θεμελίου δίπλα σε ευρύ και βαρύ υπήρξε ακόμη και ανύψωση του πρώτου (δηλ. $z_{SSSI}/z < 0$). Στο **Σχήμα 2.9** παρουσιάζονται ενδεικτικά συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα αναλύσεων της Τσεπελίδου (2021) σε όρους z_{SSSI}/z και θ , για διαφορετικές συνδυασμούς θεμελίων και αποστάσεων μεταξύ τους.



Σχήμα 2.9 Λόγοι καθιζήσεων z_{SSSI}/z και στροφές 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 $0.4g$ (Τσεπελιδου.2021)

Από όλες τις μελέτες και τα πειράματα στα οποία έγινε αναφορά παραπάνω, γίνεται πλέον κατανοητό πως το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης κατασκευής-εδάφους-κατασκευής είναι ήδη αρκετά στρυφνό και περίπλοκο για περιπτώσεις $SSSI_2$. Όμως σε ένα αστικό περιβάλλον, οι ανωδομές που τυγχάνουν να γειτνιάζουν και να δημιουργούν ένα σύνθετο μηχανικό σύστημα με το υποκείμενο έδαφος, είναι σε αριθμό παραπάνω από δύο. Τότε, το φαινόμενο συναρτάται από πολλές περισσότερες, έντονα αλληλεξαρτημένες, μεταβλητές.

Οι Hwang and Dashti (2023) χρησιμοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις για την προσομοίωση καταστάσεων ρευστοποίησης $SSSI_{3+}$. Μετά από αναλύσεις στις διατάξεις κατασκευών που παρουσιάστηκαν στην **παράγραφο 2.2**, οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι οι αποστάσεις, οι θέσεις και τα δυναμικά χαρακτηριστικά των γειτονικών κατασκευών, επηρεάζουν υπό καθεστώς ρευστοποίησης τις στροφές προς το έδαφος σε μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με περιπτώσεις $SSSI_2$ και $SSSI$. Για συγκρότημα κτιρίων τοποθετημένων παράλληλα στη διεύθυνση της σεισμικής δόνησης, ενώ μεν παρατηρήθηκε ελαφρά απομείωση των καθιζήσεων για $SSSI_{3+}$ σε σχέση με διατάξεις $SSSI_2$, οι μόνιμες στροφές υπήρξαν έντονες ειδικά για τις ανωδομές στις άκρες των διατάξεων και για μεταξύ τους αποστάσεις $D < B/3$. Για αυτή την περίπτωση, το έδαφος ανάμεσα των θεμελιώσεων έλαβε μεγαλύτερες κατακόρυφες και εκτός επιπέδου διατμητικές τάσεις (κάθιστα της διεύθυνσης της δόνησης) και μικρότερες διατμητικές τάσεις εντός επιπέδου (παράλληλα της διεύθυνσης της δόνησης). Στο **Σχήμα 2.10** παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος κάναβος τεσσάρων κτιρίων σε σειρά και σε τετραγωνική διάταξη. Όπως παρατηρούμε για πυκνό σχηματισμό με $D=1m$, οι κατακόρυφες και διατμητικές τάσεις που δημιουργήθηκαν κάτω από τις κατασκευές ήταν μικρότερες συγκριτικά με τον σχηματισμό για $D = 9 m$. Αυτή η διαφορά στο υποκείμενο τασικό πεδίο των διατάξεων οδήγησε και σε στροφές των κατασκευών με διαφορετικό μέγεθος και φορά.



Σχήμα 2.10 Παραμορφωμένος κάναθος εδάφους στο τέλος της διέγερσης τεσσάρων ανωδομών (a) σε σειρά, (b) σε τετραγωνική διάταξη, (Hwang & Dashti.2023)

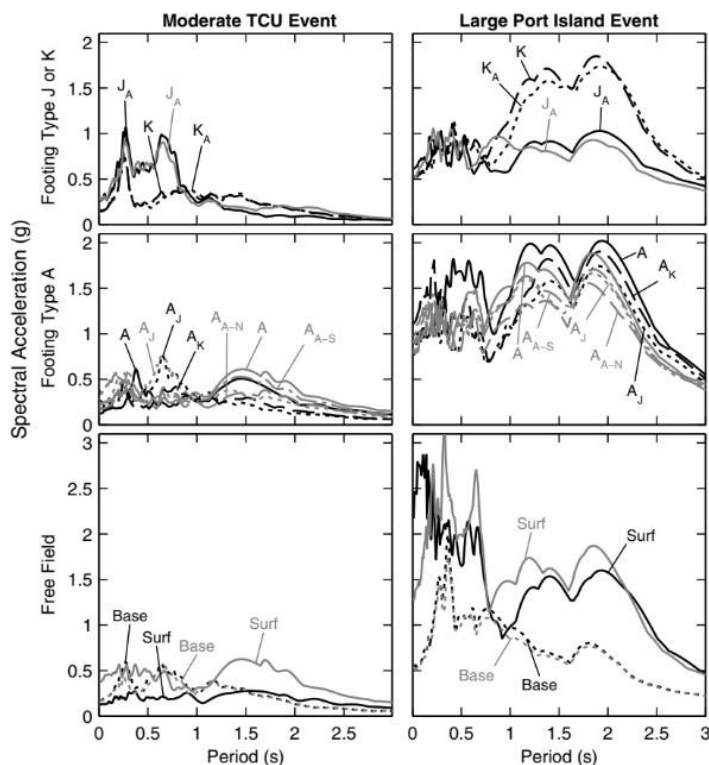
2.4 Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών στη διέγερση της ανωδομής

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να αξιοποιηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ κατασκευών στο σχεδιασμό μεθόδων αποτροπής της ρευστοποίησης, κρίνεται αναγκαίο να εξετασθεί η επίδραση 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.

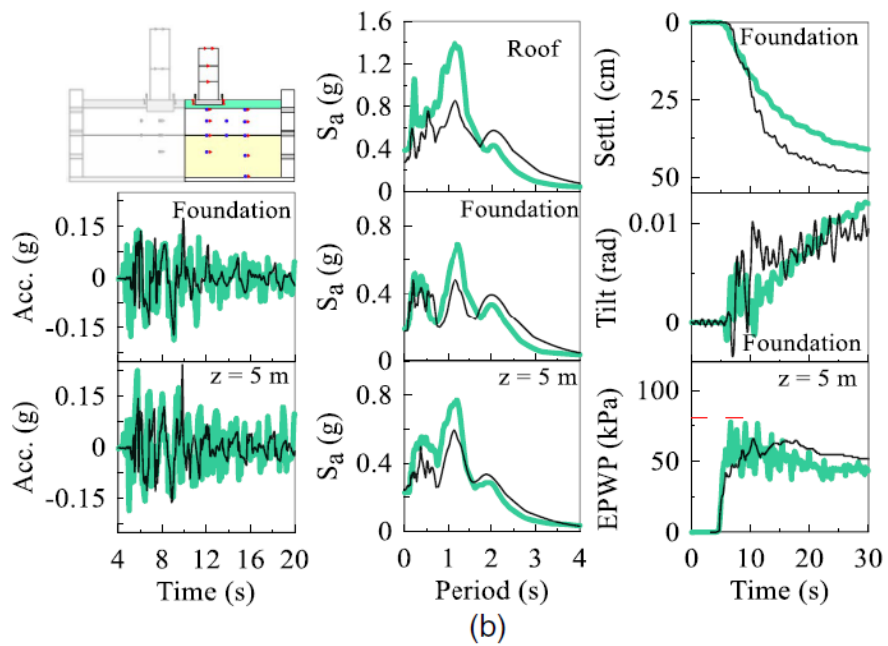
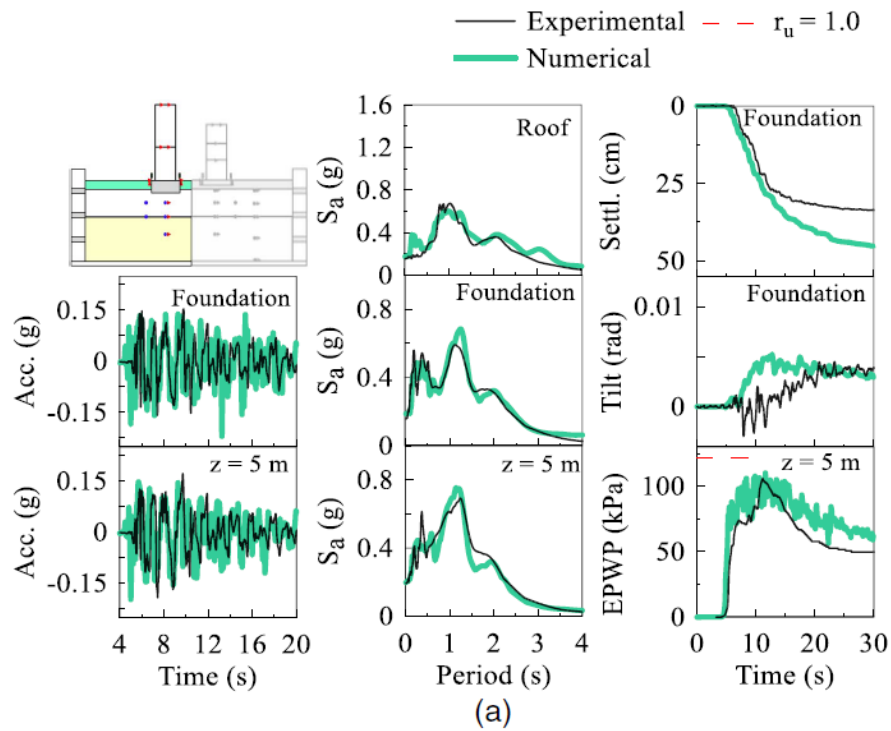
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων (π.χ. Hayden et al. 2015) έδειξαν πως σε μία ήπια σεισμική διέγερση η απομονωμένη κατασκευή ανέπτυξε μεγαλύτερες επιταχύνσεις από ότι η επιφάνεια του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στο ελεύθερο πεδίο οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύχθηκαν ήταν αρκετά μεγαλύτερες από εκείνες κάτω από την απομονωμένη κατασκευή με αποτέλεσμα την πρόκληση ρευστοποίησης και συνακόλουθη την απομείωση των επιταχύνσεων. Όμως για ζεύγη κτιρίων με ρηχή θεμελίωση, η επιτάχυνση ήταν μικρότερη σε σχέση με αυτή των απομονωμένων κατασκευών. Επιπλέον, η επίδραση του βάρους των κατασκευών ήταν σημαντική ως προς τις τιμές της επιτάχυνσης. Στο **Σχήμα 2.11** 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 υψηλότερες 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.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και η επιτάχυνση που καταλήγει να δημιουργείται και στην κορυφή των ανωδομών. Στα συγκριτικά πειράματα τους οι Hwang et al. (2021), προσέγγισαν τις αποκρίσεις ενός ζεύγους 2 ανόμοιων κατασκευών, για την ισχυρή δόνηση Kobe-L. Για μια υψίκορμη και πιο βαθιά θεμελιωμένη κατασκευή (τύπου B), παρατηρήθηκε πως κατά την διέγερση δημιουργήθηκαν μεγαλύτερα καμπτικά βέλη στην ανωδομή και μικρότερες οριζόντιες μετακινήσεις στη θεμελίωση. Όμως, όπως παρατηρούμε στο **Σχήμα 2.12**, οι παραμορφώσεις και η δομική ανομοιομορφία είχαν ως αποτέλεσμα την απομείωση της επιτάχυνσης που έφτασε στη κορυφή του κτιρίου B. Αντιθέτως, η πιο ελαφρά θεμελιωμένη κατασκευή (τύπου A), αντέδρασε στην δόνηση κυρίως με οριζόντιες μετακινήσεις στη βάση της και λιγότερο με καμπτικά βέλη καθ' ύψος. Αναπτύχθηκαν όμως μεγαλύτερες επιταχύνσεις στην κορυφή σε σχέση με την γειτονική της κατασκευή.



Σχήμα 2.11 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)



Σχήμα 2.12 Φασματικές επιταχύνσεις ανωδομών στη βάση και στην κορυφή τους, υπερπίεση πόρων, στρόφιξη και καθίζηση για ζεύγος ανόμοιων κατασκευών, κατά την δόνηση Kobe-L (Hwang et al. 2021)

3. Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων

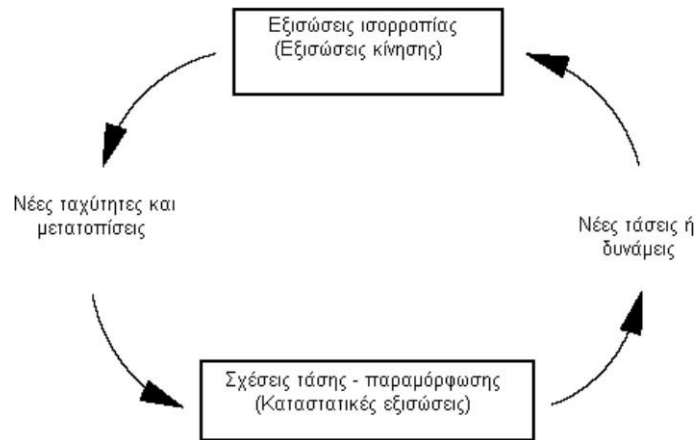
3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία των μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μεταξύ πολλαπλών 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

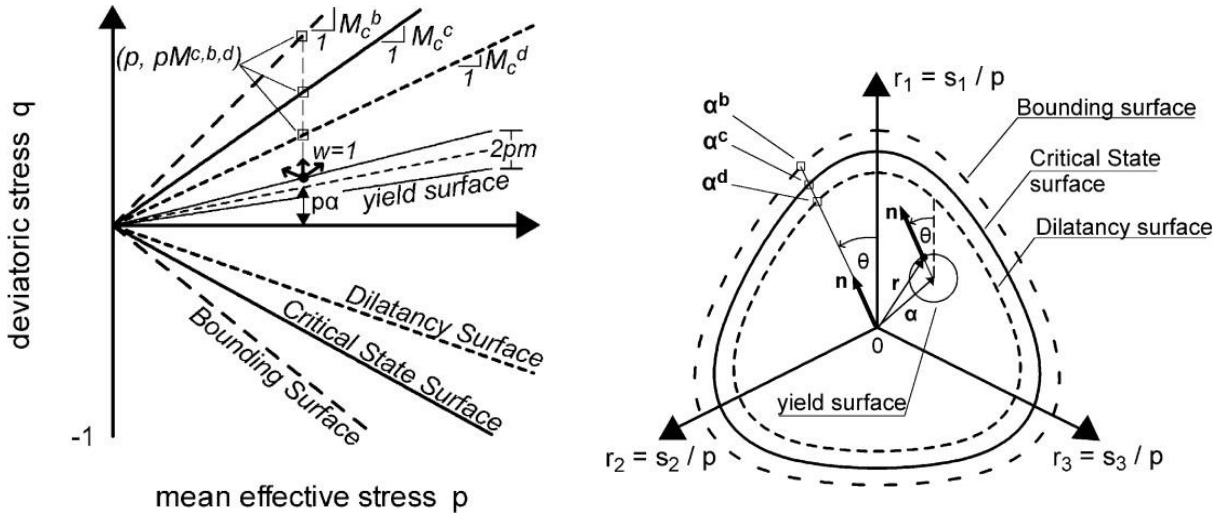
Το FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, 2 Dimensions) είναι ένα πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων σε δύο διαστάσεις που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Έχει τη δυνατότητα να διακριτοποιεί εδαφικούς σχηματισμούς και δομικά στοιχεία σε πεπερασμένες ζώνες (zones) και κόμβους (nodes/gridpoints) τα οποία στο σύνολό τους αποτελούν έναν κάρναβο (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 Andrianoopoulos (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

Αρχικώς, στις 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). Επιπλέον έγιναν αναλύσεις και για επιφανειακή στρώση πάχους 5m με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά, ενώ στη βάση του κανάβου θεωρήθηκε μη-ρευστοποιήσιμη στρώση με ομοιογενή ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 300 \text{ m/s}$ με χρήση του ελαστικού προσομοιώματος.

Θεμέλια

Τα θεμέλια τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους και προσομοιώθηκαν με 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 $B = 5$ και 20 m . Για να μην μικρύνει το υπολογιστικό βήμα θεωρήθηκαν οι ζώνες τους 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 αδιαπέρατα. 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 $B = 20 \text{ m}$.

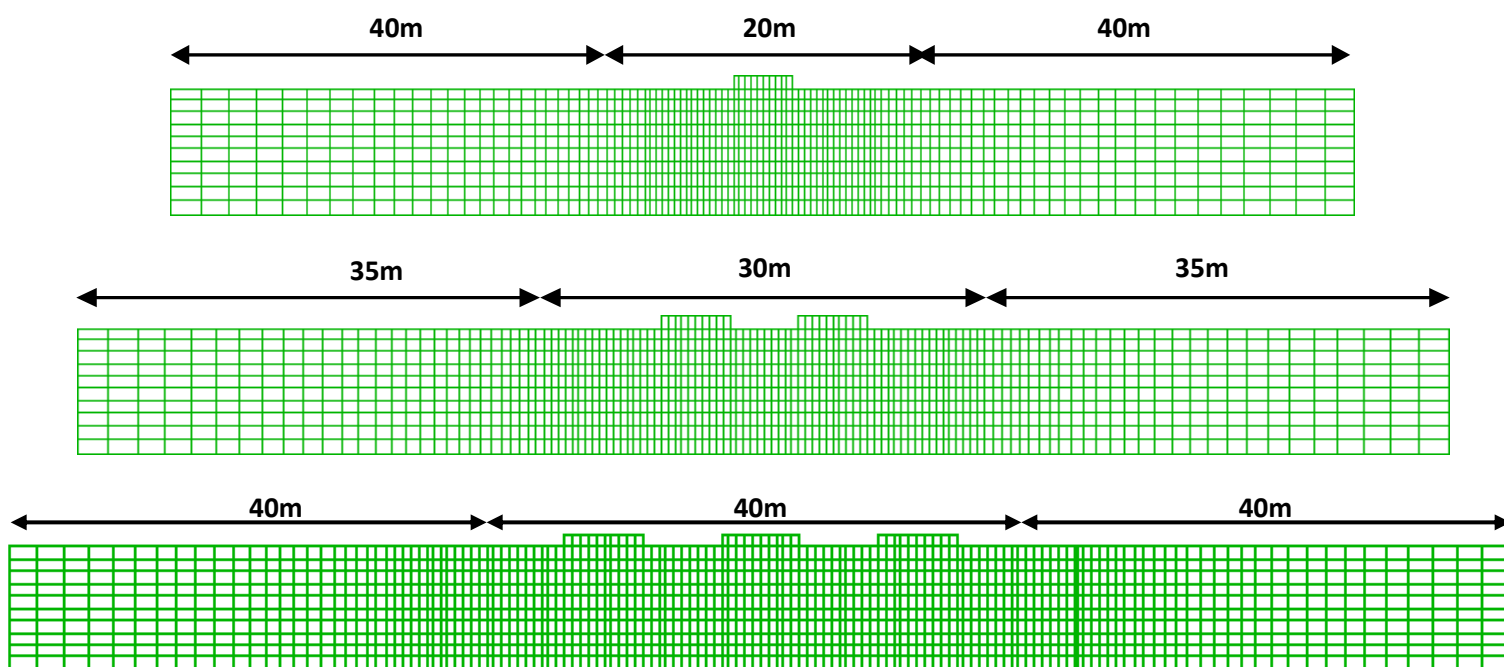
Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν την άκαμπτη φύση των θεμελίων. Οι αναλύσεις είναι 2D, και τα θεμέλια θεωρούνται απείρου μήκους, δηλαδή θεμελιολωρίδες. Χάρην συντομίας θα ονομάζονται απλώς θεμέλια.

Διακριτοποίηση κανάβου

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

Πρόκειται για κανάβους διαστάσεων 100m έως 130m 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 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% αυξανόμενης της απόστασης x . Με ίδιο τρόπο είναι κατασκευασμένος και ο κανάβος 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. Στον κανάβο τριπλών θεμελίων, ο χώρος επιρροής είναι 40 m αποτελούμενα από 80 στοιχεία πλάτους 0.5m για θεμέλια με $B=5\text{m}$ και $D_{12} = D_{23} = 5\text{m}$, με συνολικό μήκος κανάβου 120m. Όμως για αυτή την διάταξη εξετάζονται διαφορετικές περιπτώσεις όπου αλλάζει η απόσταση D_{23} από 2.5m έως 20m, συνεπώς αλλάζουν αντίστοιχα οι διαστάσεις του κανάβου και του εύρους επιρροής.

Έγιναν αναλύσεις ευαισθησίας για την πύκνωση του κανάβου και τα εύρη επιρροής εκατέρωθεν των θεμελίων, με βάση τις οποίες αποφασίστηκαν οι εν λόγω διατάξεις ως βέλτιστες ως προς την ακρίβεια και το υπολογιστικό κόστος. Οι αναλύσεις αυτές δεν παρουσιάζονται εδώ χάριν συντομίας, αλλά αναφέρεται ότι αντίστοιχοι κανάβοι χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν και τη διπλωματική εργασία της Τσεπελίδου (2021).



Σχήμα 3.3 Τυπική διάταξη κανάβων για μονό, ζεύγος και τριάδα 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 $T=0.35s$ 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 κανάβου. Οι αναλύσεις έγιναν για $a_{max} = 0.2g$. Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε επιπλέον απόσβεση 2% ανεξάρτητη της συχνότητας (όχι τύπου Rayleigh), για να συμπληρώσει την υστερητική απόσβεση που προβλέπει το προσομοίωμα NTUA_SAND, η οποία είναι ορθή για ισχυρές δονήσεις αλλά μικρότερη της πραγματικής (με τάξη μεγέθους 2 – 3%) για ασθενείς δονήσεις (ή την αρχή και το τέλος ισχυρών δονήσεων).

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 γαιών και στατικής επιφόρτισης των θεμελίων. Για την επίλυση αυτή, τα πλευρικά όρια του κανάβου 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 ιδίου υψομέτρου στα πλευρικά όρια του κανάβου συνδέθηκαν/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 (π.χ., Andrianopoulos et al. 2010). Όπως προέκυψε από αναλύσεις ευαισθησίας που δεν παρουσιάζονται εδώ χάριν συντομίας, ο συνδυασμός μεγάλου εύρους κανάβων (βλ. **Σχήμα 3.3**) και συνοριακών συνθηκών συνδεδεμένων κόμβων εξασφαλίζει την ορθή προσομοίωση της απόκρισης ελευθέρου πεδίου μακριά από τα θεμέλια.

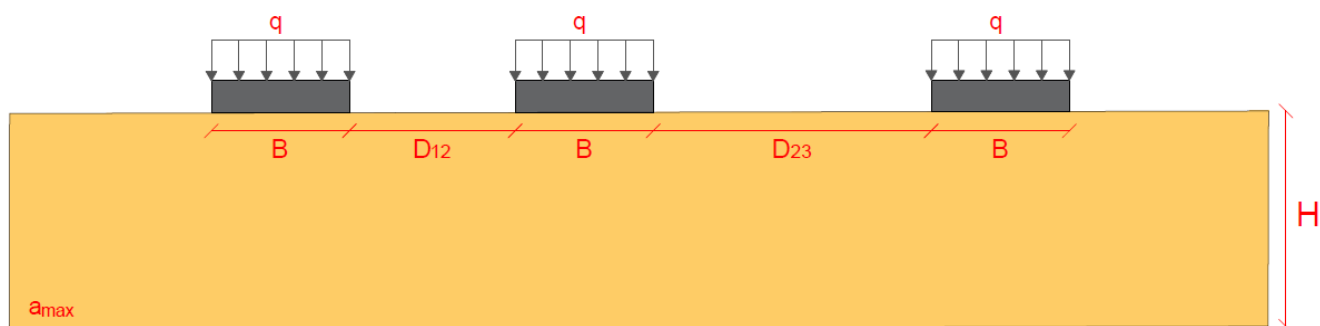
Παραμετρική διερεύνηση

Έγιναν αναλύσεις για θεμέλια μονά, σε ζεύγος ή σε τριάδα, με πλάτη $B = 5$ και 20 m, με φορτία έδρασης $q = 50, 100$ και 200 kPa, σε αποστάσεις D από $2.5m$ έως $20m$. Τα τραχιά και άκαμπτα θεμέλια εδράζονταν πάντα στη ρευστοποιήσιμη στρώση, η οποία είχε πάχος $H = 5$ ή 10 m και σταθερά λοιπά χαρακτηριστικά (π.χ. $D_r = 45\%$). Όλες οι αναλύσεις είχαν την ίδια διέγερση, καθώς η λογική της διερεύνησης ήταν συγκριτική, δηλαδή η απόκριση του ζεύγους ή της τριάδας θεμελίων σε σχέση με το αντίστοιχο μεμονωμένο, στο ίδιο έδαφος υπό την ίδια διέγερση.

4. Αλληλεπίδραση τριάδας ίδιων θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τρεις ίδιες γειτονικές θεμελιολωρίδες εδραζομένες σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση υπό σεισμική διέγερση. Στόχος της παρουσίασης είναι η μελέτη της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης $SSSI_3$ (Structure-Soil-Structure Interaction) μεταξύ τους (με το δείκτη 3 να υπονοεί την τριάδα), 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 τρεις επιφανειακές θεμελιολωρίδες ίσου πλάτους B και φορτίων έδρασης $q = q_1 = q_2 = q_3$, με ενδιάμεσες μεταξύ τους αποστάσεις D_{12} , D_{23} , που υποβάλλεται σε αρμονική διέγερση βάσης (10 σημαντικών κύκλων) με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.2 \text{ g}$ και δεσπόζουσα περίοδο $T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$.



Σχήμα 4.1 Σκαρίφημα διάταξης τριάδας θεμελίων πλάτους B , φορτίων έδρασης q και ενδιάμεσων αποστάσεων D_{12} , D_{23} , εδραζομένων σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους H υπό αρμονική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} για τον υπολογισμό καθιζήσεων z και στρωφών θ

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί **Πίνακες 4.1, 4.2 και 4.3** οι οποίοι παρουσιάζουν τα παραμετρικά χαρακτηριστικά κάθε ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου. Οι πίνακες είναι τρεις, γιατί γίνεται διαχωρισμός των περιπτώσεων με τριάδες θεμελίων (**Πίνακας 4.1**), από τις περιπτώσεις αναφοράς που αφορούν σε ζεύγος θεμελίων (**Πίνακας 4.2**) και σε μεμονωμένο θεμέλιο (**Πίνακας 4.3**), αντίστοιχα. Δηλαδή η απόκριση κάθε τριάδας θεμελίων συγκρίνεται με την αντίστοιχη για ζεύγος θεμελίων ίδιων χαρακτηριστικών, αλλά και με την αντίστοιχη για μεμονωμένο θεμέλιο.

H(m)	B(m)	q ₁ (kPa)	q ₂ (kPa)	q ₃ (kPa)	D ₁₂ /B	D ₂₃ /B
10	5	100	100	100	1	0.5
10	5	100	100	100	1	1
10	5	100	100	100	1	2
10	5	100	100	100	1	4
5	5	100	100	100	1	0.5
5	5	100	100	100	1	1

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση τριάδας ίδιων στενών θεμελίων που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο

B(m)	q ₁ (kPa)	q ₂ (kPa)	D/B
5	100	100	0.5
5	100	100	1
5	100	100	2
5	100	100	4

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση ζεύγους ίδιων στενών θεμελίων που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο

H(m)	B(m)	q(kPa)
10	5	100
5	5	100

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση μεμονωμένου στενού θεμελίου που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο

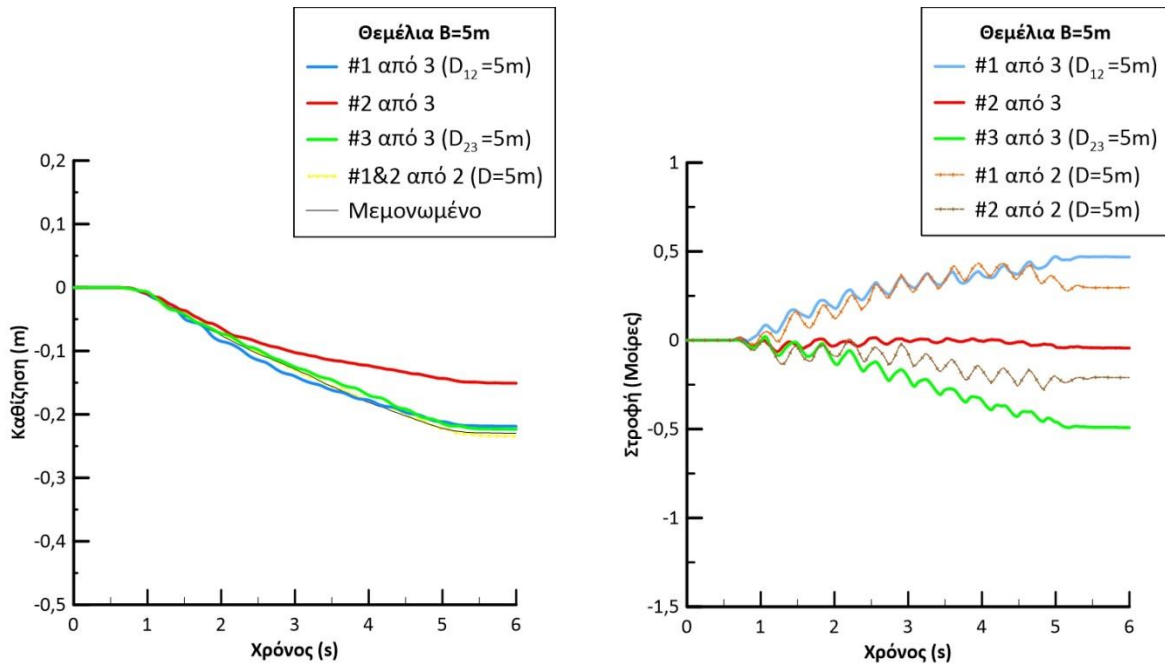
Από όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε ανάλυση, για τις ανάγκες του κεφαλαίου αξιοποιήθηκαν η καθίζηση του κέντρου του (άκαμπτου) θεμελίου στην επιφάνεια του εδάφους, η στροφή του θεμελίου (ως στερεό σώμα) και η χωρική κατανομή (με μορφή ισοκαμπυλών) του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της 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 τα αριστερά, ενώ αρνητική τιμή να αντιστοιχεί σε στροφή προς τα δεξιά. Έτσι, στην παράγραφο 4.2 διερευνάται η τυπική απόκριση τριάδας ίδιων θεμελίων, ενώ στην παράγραφο 4.3 η έμφαση δίνεται στην επίδραση των μεταξύ τους αποστάσεων. Τέλος, στην παράγραφο 4.4 διερευνάται η απόκριση τριάδας θεμελίων εδραζομένων σε εδαφική στρώση μικρότερου πάχους, απ' ό,τι στις προηγούμενες δύο παραγράφους.

4.2 Τυπική απόκριση τριάδας ίδιων θεμελίων

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η σεισμική απόκριση, κυρίως σε όρους καθιζήσεων και στροφών, τριάδας στενών ($B = 5\text{ m}$) θεμελίων για κοινό κατακόρυφο φορτίο $q = 100\text{ kPa}$ σε μεταξύ τους αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{ m}$. Δηλαδή πρόκειται για μια συμμετρική διάταξη (στενών) θεμελίων πάνω στην (παχιά) οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H = 10\text{ m}$.

Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής της προαναφερθείσας τριάδας ίδιων θεμελίων σε συμμετρική διάταξη. Χάριν σύγκρισης, στο σχήμα με τις καθιζήσεις, με διακεκομμένη κίτρινη γραμμή παρουσιάζονται οι κοινές καθιζήσεις για ζεύγος θεμελίων με ενδιάμεση απόσταση $D = D_{12} = D_{23} = B = 5\text{ m}$, πλάτος $B = 5\text{ m}$ και φορτίο έδρασης $q = 100\text{ kPa}$ υπό την ίδια διέγερση. Επίσης, με μαύρη γραμμή παρουσιάζεται η καθίζηση για το αντίστοιχο μεμονωμένο θεμέλιο. Όμως, στο σχήμα με τις στροφές, οι στροφές των δύο θεμελίων στο ζεύγος παρουσιάζονται ξεχωριστά (διακεκομμένη ανοιχτή καφέ γραμμή, για το πρώτο θεμέλιο από τα αριστερά και διακεκομμένη σκούρα καφέ γραμμή για το δεύτερο), ενώ για το μεμονωμένο θεμέλιο η χρονοϊστορία στροφής είναι πρακτικώς μηδενική και δεν παρουσιάζεται. Αυτή η μορφή παρουσίασης και σύγκρισης αποτελεσμάτων σε όρους χρονοϊστοριών ακολουθείται σε όλο το Κεφάλαιο 4.

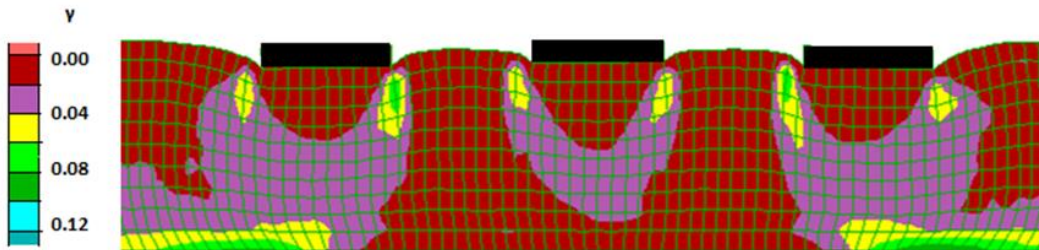
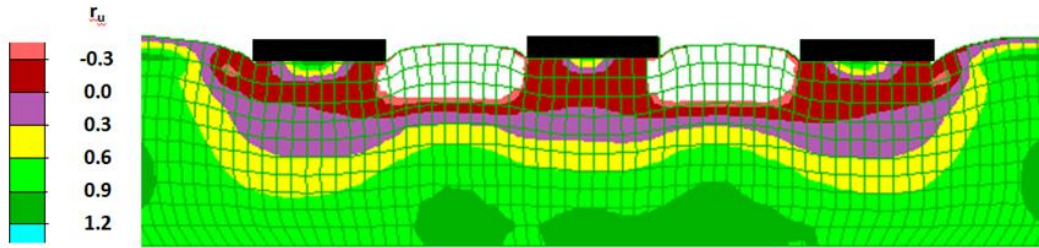
Από τη σύγκριση προκύπτει πως τα δύο ακραία θεμέλια της τριάδας εμφανίζουν την ίδια καθίζηση με εκείνη που έχει το ζεύγος θεμελίων, αλλά και το μεμονωμένο. Αντιθέτως, η καθίζηση του μεσαίου θεμελίου της τριάδας είναι αρκετά μικρότερη των υπολοίπων. Σε όρους στροφών, το κεντρικό θεμέλιο εμφανίζει πρακτικώς μηδενική στροφή, ενώ τα ακραία θεμέλια εμφανίζουν στροφή προς τα έξω, η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζουν τα ίδια θεμέλια σε ζεύγος.



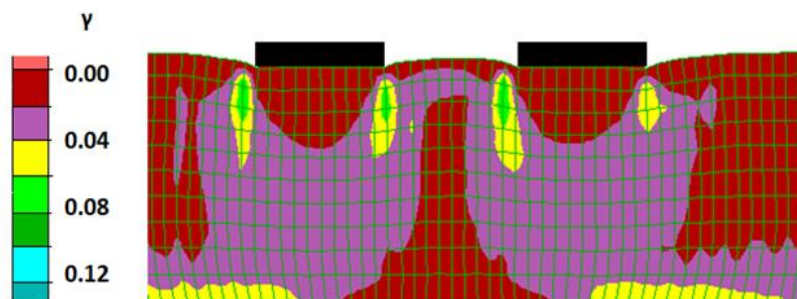
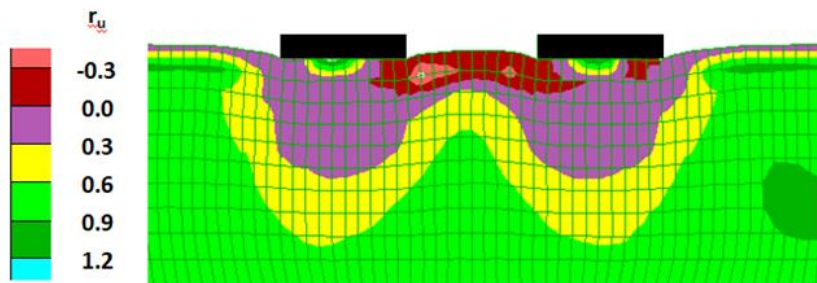
Σχήμα 4.2 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = B = 5m$, και με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q .

Στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u (υποσχήμα α) και παραμόρφωσης γ (υποσχήμα β) στο έδαφος τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5m$. Χάρην σύγκρισης στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες δίδυμου θεμελίου πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D = D_{12} = D_{23} = B = 5m$ και στο **Σχήμα 4.5** οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για το μονό θεμέλιο πλάτους $B = 5m$ 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.

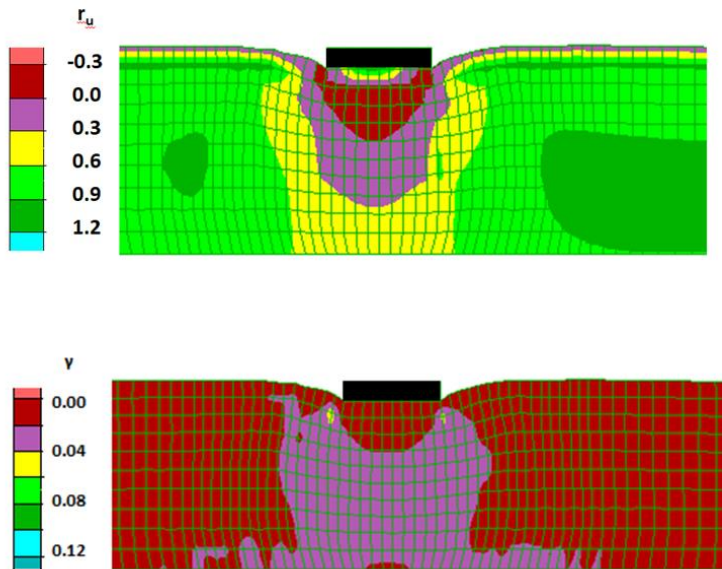
Παρατηρούμε πως ο μηχανισμός αστοχίας για τα θεμέλια 1 και 3 είναι λίγο πιο εμπεδωμένος συγκριτικά με εκείνον για το θεμέλιο 2, γεγονός που αποτυπώνεται και στις καθιζήσεις τους. Προκύπτει επίσης ότι ανάμεσα στα θεμέλια έχουμε $r_u < 0$, γεγονός που δικαιολογεί τις προς τα έξω στροφές των θεμελίων 1 & 3. Εν γένει, προκύπτει ότι η απομειωμένη καθίζηση του μεσαίου θεμελίου οφείλεται στην εδαφική μάζα που μετακινείται πλευρικά από τα δύο ακραία θεμέλια που καθιζάνουν, η οποία μάζα «συγκρατεί» την καθίζηση του κεντρικού θεμελίου.



Σχήμα 4.3 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.



Σχήμα 4.4 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 $D= B=5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.

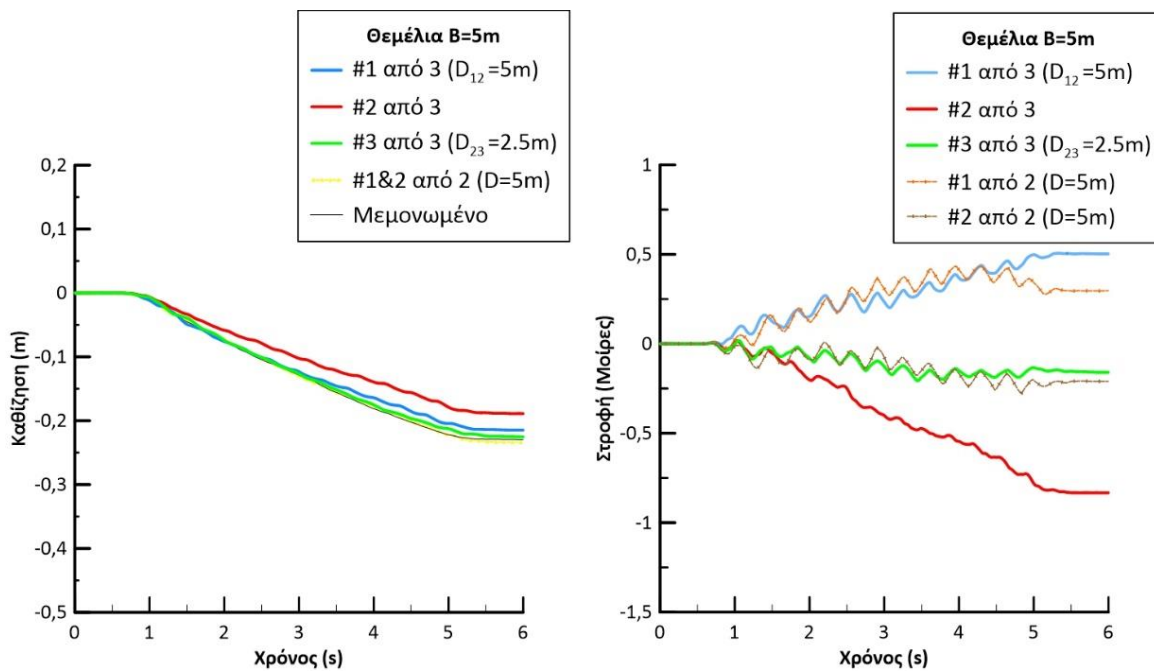


Σχήμα 4.5 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μεμονωμένο θεμέλιο (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{m}$

4.3 Επίδραση ενδιάμεσων αποστάσεων στην απόκριση τριάδας ίδιων κατασκευών

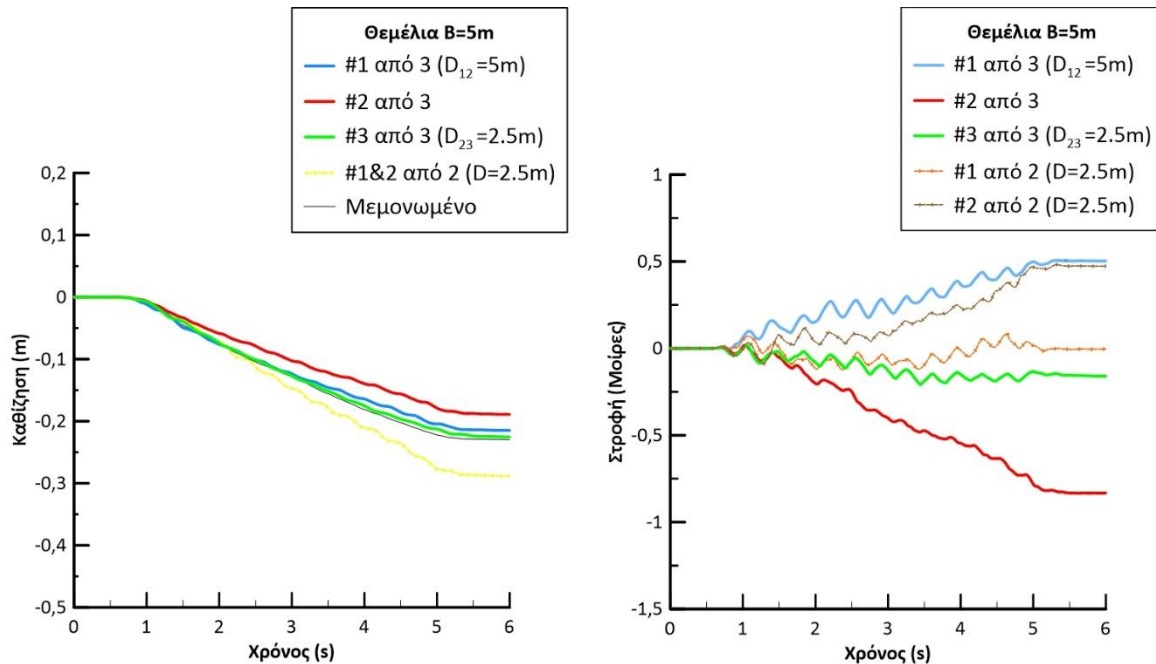
Στην παρούσα παράγραφο γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση σε όρους καθιζήσεων, στροφών, υπερπίεσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων για την επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης D_{23} στην αλληλεπίδραση τριάδας ίδιων θεμελίων με $B = 5\text{m}$ και $q = 100\text{kPa}$. Με άλλα λόγια, η απόσταση $D_{12} = 5\text{m}$ παραμένει, όπως και στην περίπτωση της παραγράφου 4.2. Το ενδιαφέρον εστιάζεται εδώ σε περιπτώσεις αλληλεπίδρασης για αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων 2 και 3 ίσων με $D_{23} = 0.5B = 2.5\text{m}$, $D_{23} = 2B = 10\text{m}$ και $D_{23} = 4B = 20\text{m}$, δηλαδή μικρότερες και μεγαλύτερες εκείνης της παραγράφου 4.2.

Στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται οι ιστορίες καθιζήσεων και στροφής τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5\text{m}$ και $D_{23} = B * 0.5 = 2.5\text{m}$, δηλαδή όταν το 3^ο θεμέλιο είναι πιο κοντά στο ζεύγος των θεμελίων 1 και 2. Η πρώτη σύγκριση γίνεται με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = D_{12} = B = 5\text{m}$, πλάτος $B = 5\text{m}$ και φορτίο έδρασης $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση, και με το αντίστοιχο μεμονωμένο θεμέλιο. Συνεπώς εδώ η έμφαση δίνεται στη σύγκριση της απόκρισης του ζεύγους θεμελίων με εκείνη των θεμελίων 1 και 2 (σε τριάδα) σε απόσταση 5m , λόγω της ύπαρξης του 3^{ου} θεμελίου σε απόσταση 2.5m . Από τη σύγκριση προκύπτει ελαφρά απομείωση των καθιζήσεων της τριάδας σε σχέση με τις άλλες διατάξεις, ειδικά για το μεσαίο θεμέλιο. Ως προς τις στροφές όμως, το μεσαίο θεμέλιο φαίνεται να στρέφεται πολύ περισσότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα, ενώ η στροφή των ακραίων θεμελίων μοιάζει αρκετά με αυτή του ζεύγους παρά τις διαφορετικές ενδιάμεσες αποστάσεις.



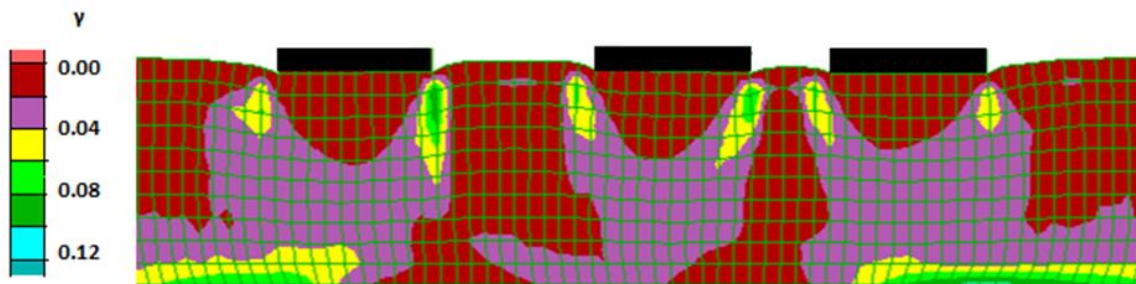
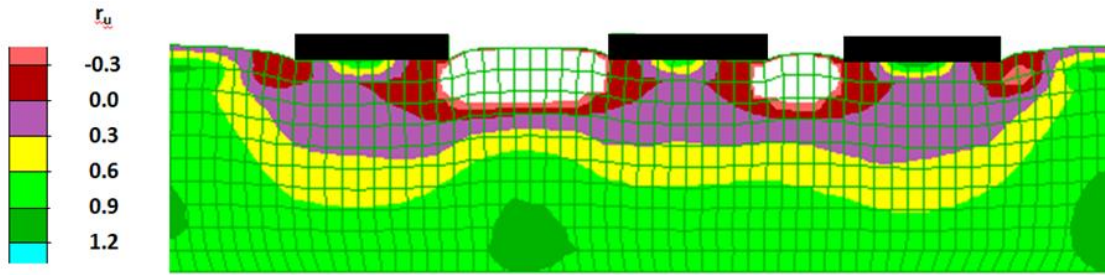
Σχήμα 4.6 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = B = 5m$, και με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται ξανά οι ίδιες χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων και αντίστοιχου μεμονωμένου, όμως αυτή τη φορά σε σύγκριση με 2 θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$, πλάτους $B = 5m$ και φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ υπό την ίδια διέγερση. Συνεπώς εδώ η έμφαση δίνεται στη σύγκριση της απόκρισης του ζεύγους θεμελίων με εκείνη των θεμελίων 2 και 3 (σε τριάδα) σε απόσταση 2.5m, λόγω της ύπαρξης του 1^{ου} θεμελίου σε απόσταση 5m. Παρατηρούμε πως για τα θεμέλια 2 και 3 της τριάδας, η καθίζηση είναι ακόμα πιο ευμενής από αυτή των αντίστοιχων διδύμων θεμελίων, σχετικά και με την προηγούμενη σύγκριση του Σχήματος 4.6. Η στροφή της μεσαίας κατασκευής όμως, ακόμα και σε αυτήν σύγκριση, είναι αρκετά μεγαλύτερη των υπολοίπων.

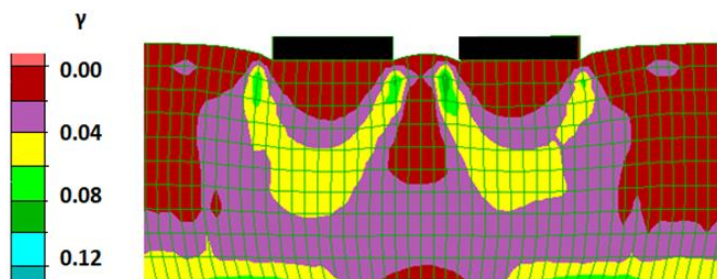
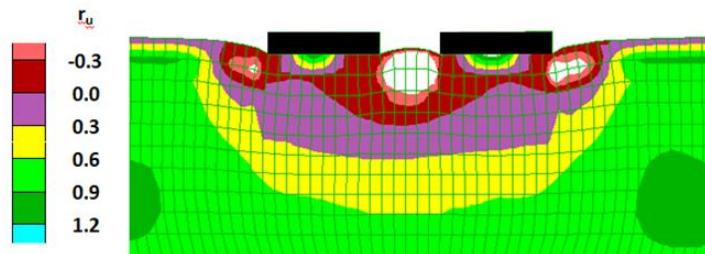


*Σχήμα 4.7 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με δίδυμο θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = B*0.5 = 2.5m$, και με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q .*

Στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$. Χάριν σύγκρισης στο **Σχήμα 4.9** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες δίδυμου θεμελίου πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$ υπό την ίδια διέγερση. Από την σύγκριση προκύπτει πως η τριάδα διέπεται από λιγότερο εμπεδωμένο μηχανισμό αστοχίας (σε όρους γ) σε σχέση με το ζεύγος, συμπέρασμα που επικυρώνεται και από τις χαμηλότερες τιμές των καθιζήσεων των τριών θεμελίων, και ειδικότερα για τα θεμέλια 2 και 3 που έχουν κοινή ενδιάμεση απόσταση με αυτή του ζεύγους. Παρατηρούμε επίσης έντονη ασυμμετρία στις υπερπίεσεις πόρων (που παραμένουν αρνητικές) εκατέρωθεν του κεντρικού θεμελίου, που οδηγούν στην στροφή που βλέπουμε στο **Σχήμα 4.7**

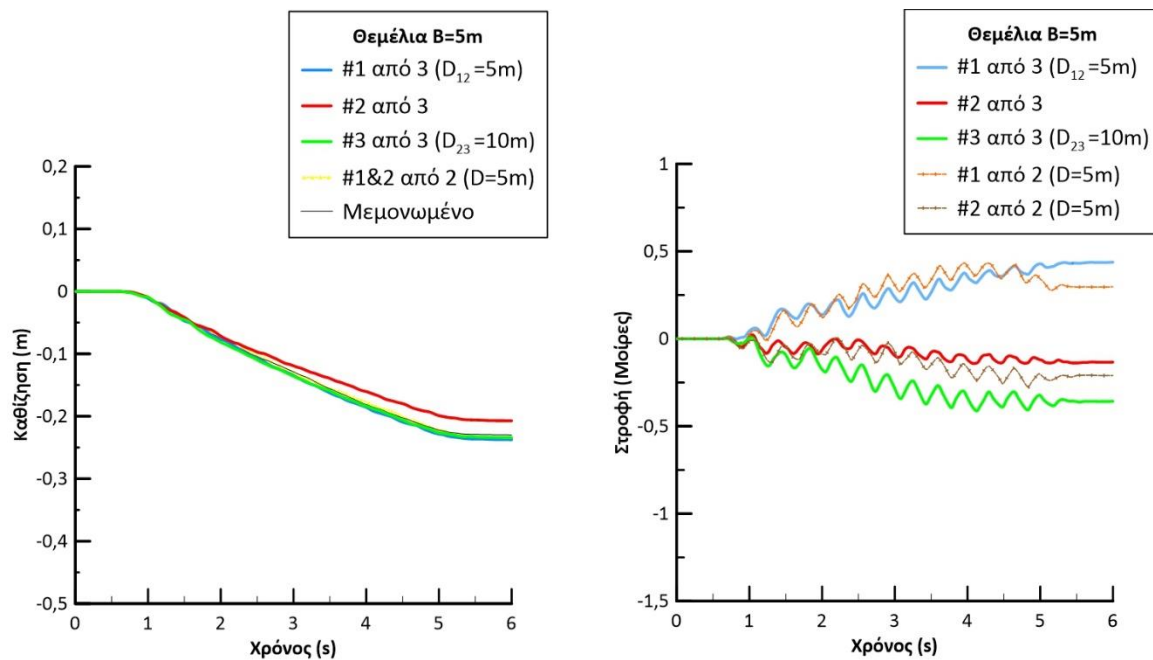


Σχήμα 4.8 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.



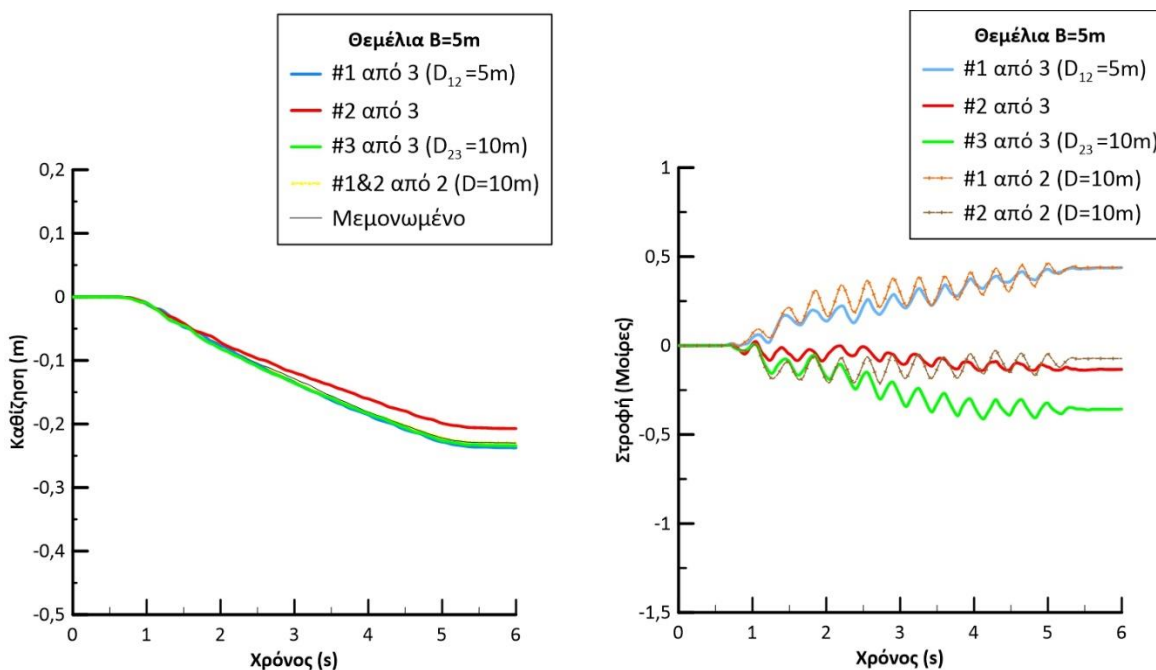
Σχήμα 4.9 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D = B*0.5 = 2.5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.

Συνεχίζοντας, στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5\text{m}$ και $D_{23} = B * 2 = 10\text{m}$. Όπως και στη προηγούμενη διάταξη, η πρώτη σύγκριση γίνεται με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = D_{12} = B = 5\text{m}$, με πλάτος $B = 5\text{m}$ και φορτίο έδρασης $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση, και με το αντίστοιχο μεμονωμένο θεμέλιο. Συνεπώς εδώ η έμφαση δίνεται στη σύγκριση της απόκρισης του ζεύγους με εκείνη των θεμελίων 1 και 2 (σε τριάδα) σε απόσταση 5m, λόγω της ύπαρξης του 3^{ου} θεμελίου σε απόσταση 10m. Παρατηρούμε όσον αφορά στις καθιζήσεις, η συμπεριφορά των θεμελίων μοιάζει πολύ με αυτή που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.6** για τριάδα θεμελίων με $D_{23} = B * 0.5 = 5\text{m}$. Οι τιμές των στροφών για τα ακραία θεμέλια εξακολουθούν να είναι αυξημένες σε σχέση με αυτές του ζεύγους, όμως όχι τόσο όσο στην περίπτωση του **Σχήματος 4.2**, ειδικά για το θεμέλιο 3. Όπως και στο **Σχήμα 4.2**, και σε αντίθεση με το **Σχήμα 4.7**, η κεντρική κατασκευή στρέφεται πολύ λιγότερο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.



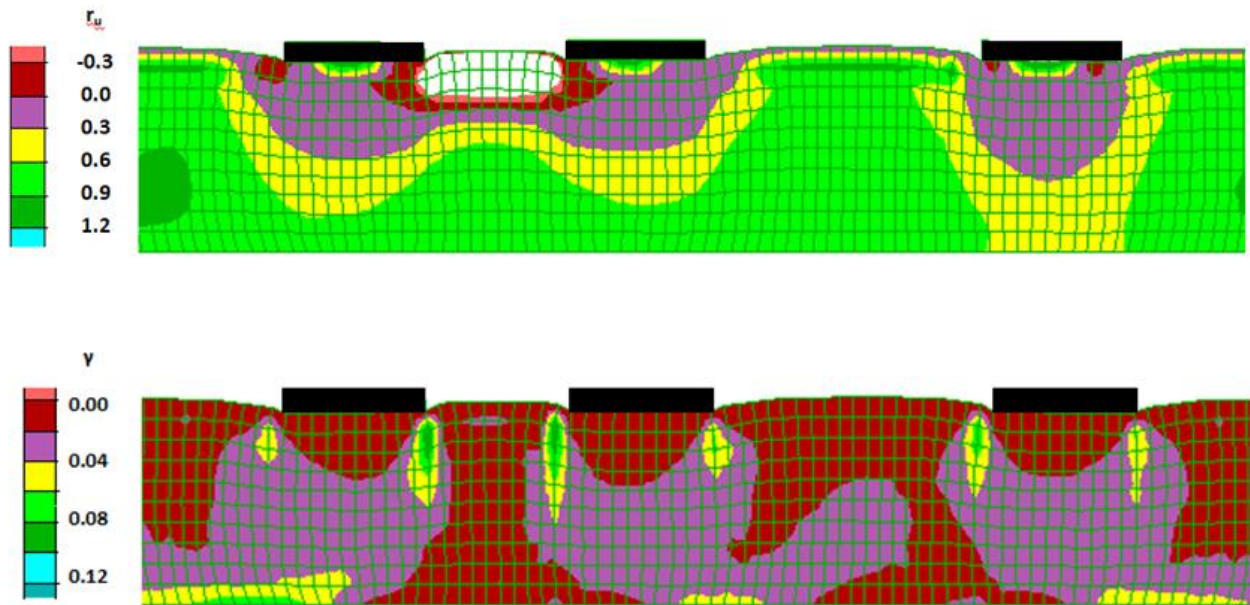
Σχήμα 4.10 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5\text{m}$ και $D_{23} = B * 2 = 10\text{m}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{m}$. Σύγκριση με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D=B=5\text{m}$, και με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q

Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζονται ξανά οι ίδιες χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων και μεμονωμένου, όμως σε σύγκριση με 2 θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = D_{23} = B * 2 = 10m$, πλάτους $B = 5m$ και φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ υπό την ίδια διέγερση. Συνεπώς εδώ η έμφαση δίνεται στη σύγκριση της απόκρισης του ζεύγους θεμελίων με εκείνη των θεμελίων 2 και 3 (σε τριάδα) σε απόσταση 10m λόγω της ύπαρξης του 1^{ου} θεμελίου σε απόσταση 5m. Η σύγκριση ως προς τις καθιζήσεις μοιάζει ίδια με το **Σχήμα 4.10**. Όμως ως προς τις στροφές ειδικά για το θεμέλιο 3 τις τριάδας, φαίνεται αύξηση της τιμής σε σύγκριση με το αντίστοιχο θεμέλιο 2 του ζεύγους. Ενδεχομένως αυτή η σύγκριση να είναι πιο έγκυρη, καθώς σε αυτή την περίπτωση έχουμε συγκριτικά τις ίδιες ενδιάμεσες αποστάσεις ($D = D_{23}$)

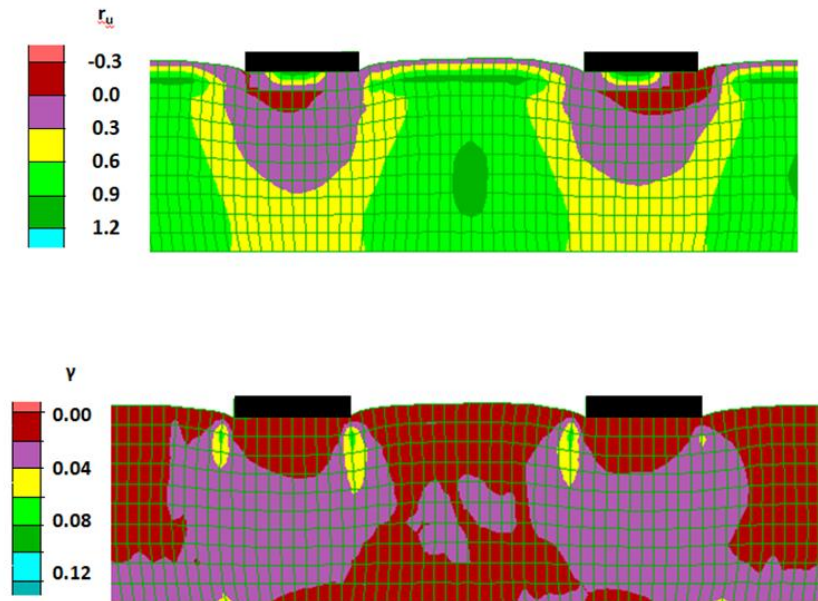


*Σχήμα 4.11 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 2 = 10m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D=B*2=10m$, και με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q*

Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 2 = 10m$. Επίσης στο **Σχήμα 4.13** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες δίδυμου θεμελίου πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D = D_{23} = B * 2 = 10m$ υπό την ίδια διέγερση. Πλέον, με μεγαλύτερη ενδιάμεση απόσταση, φαίνεται πως η αλληλεπίδραση αρχίζει να εξασθενεί. Ο μηχανισμός αστοχίας μοιάζει να παραμένει σχετικά ίδιος για τα 2 πρώτα θεμέλια της τριάδας (και σε σχέση με την αντίστοιχη δυάδα για $D=5m$) ενώ το τρίτο θεμέλιο βλέπουμε πως δεν επηρεάζεται, ειδικά σε όρους r_u , έντονα από τα άλλα δύο. Ακόμα βέβαια η αλληλεπίδραση υπάρχει, συνεπώς εξακολουθούμε να παρατηρούμε έντονες διαφορές ανάμεσα στο θεμέλιο 3 και στο μεμονωμένο.

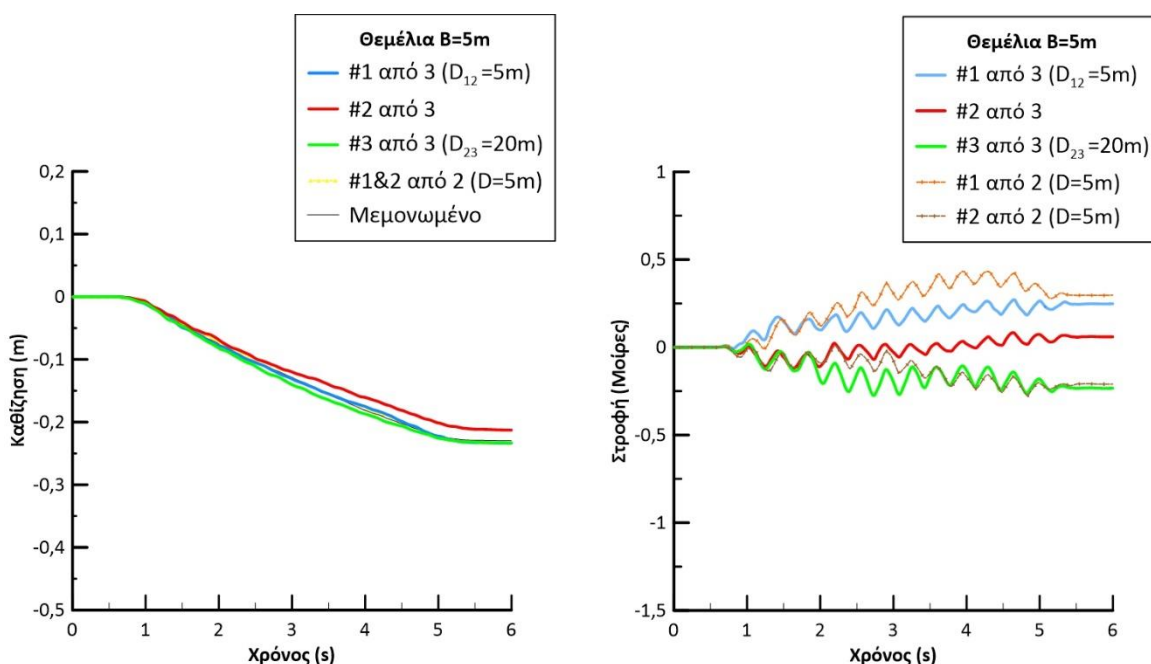


Σχήμα 4.12 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 2 = 10m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.



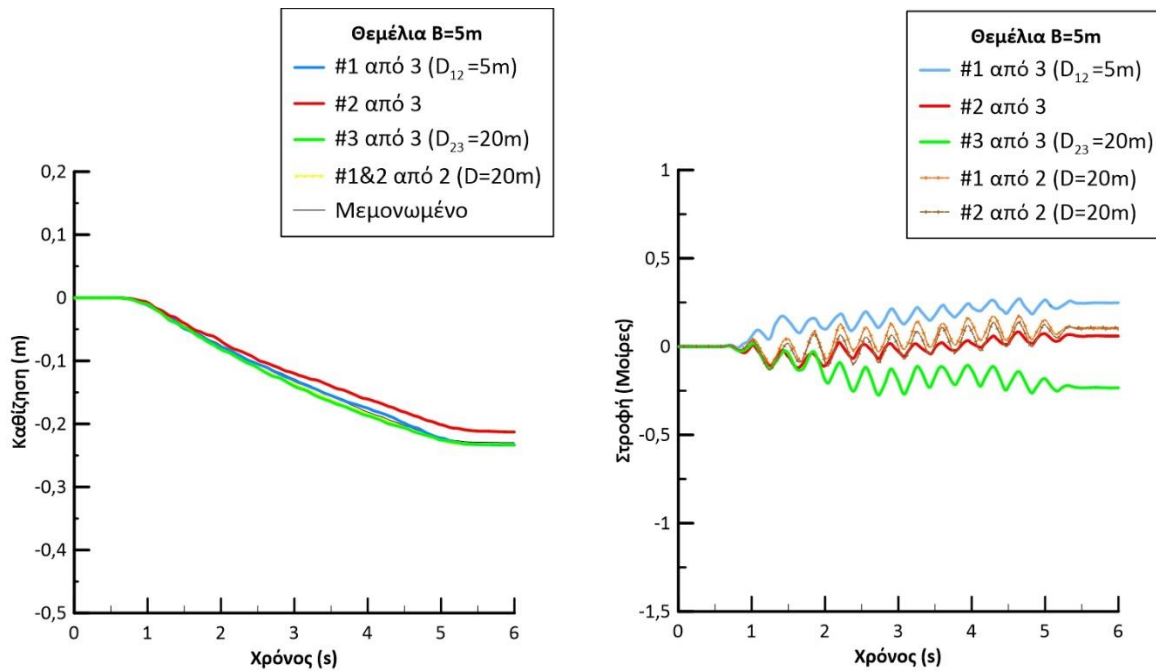
Σχήμα 4.13 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από δίδυμα θεμέλια (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=2*B=10m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.

Τέλος, στο **Σχήμα 4.14** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5\text{m}$ και με μεγάλη ενδιάμεση απόσταση $D_{23} = B * 4 = 20\text{m}$. Η πρώτη σύγκριση γίνεται με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D = D_{12} = B = 5\text{m}$, πλάτους $B = 5\text{m}$ και φορτίο έδρασης $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση, και με το αντίστοιχο μεμονωμένο θεμέλιο. Συνεπώς εδώ η έμφαση δίνεται στη σύγκριση της απόκρισης του ζεύγους θεμελίων με εκείνη των θεμελίων 1 και 2 (σε τριάδα) σε απόσταση 5m λόγω της ύπαρξης του 3^{ου} θεμελίου σε (μεγάλη) απόσταση 20m. Παρατηρούμε ξανά τις ίδιες καθιζήσεις όπως και στην περίπτωση για $D_{23} = 10\text{m}$. Για τις στροφές βλέπουμε πως η επίδραση της συγκεκριμένης διάταξης είναι πιο ευνοϊκή, ειδικά για τα θεμέλια 1 και 2 της τριάδας τα οποία έχουν σε αυτήν την σύγκριση την ίδια ενδιάμεση απόσταση με την δυάδα.



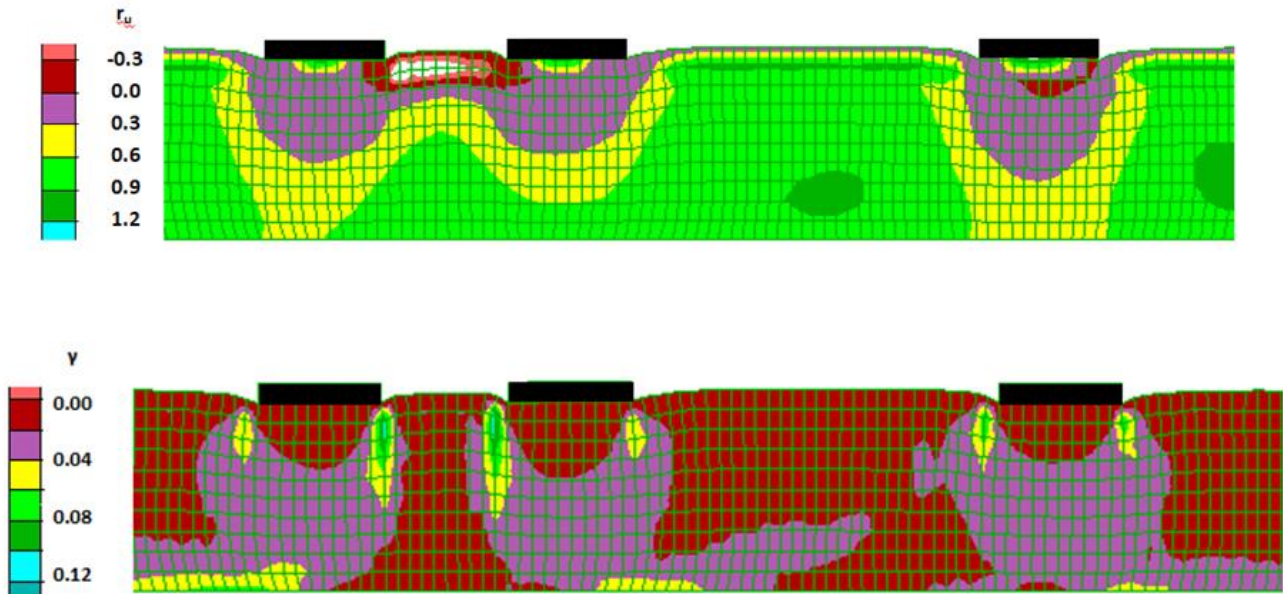
Σχήμα 4.14 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5\text{m}$ και $D_{23} = B * 4 = 20\text{m}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{m}$. Σύγκριση με δίδυμα θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D=B=5\text{m}$, και με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q .

Στο **Σχήμα 4.15** παραθέτονται οι ίδιες χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας κατασκευών και μεμονωμένης, σε σύγκριση με ζεύγος θεμελίων ενδιάμεσης απόστασης $D = D_{23} = B * 4 = 20\text{m}$, πλάτους $B = 5\text{m}$ και φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$ υπό την ίδια διέγερση. Άρα εδώ η έμφαση δίνεται στη σύγκριση της απόκρισης του ζεύγους θεμελίων με εκείνη των θεμελίων 2 και 3 (σε τριάδα) σε απόσταση 20m λόγω της ύπαρξης του 1^{ου} θεμελίου σε απόσταση 5m. Ομοίως και εδώ έχουμε τις ίδιες καθιζήσεις με την περίπτωση για $D_{23} = 10\text{m}$. Για τις στροφές όμως έχουμε μεγαλύτερες τιμές και αντίθετη φορά στην κατασκευή 3 της τριάδας σε σχέση με την κατασκευή 2 της δυάδας. Η συμπεριφορά της μεσαίας κατασκευής ως προς τη στροφή μοιάζει αρκετά με αυτή της πρώτης κατασκευής του ζεύγους.

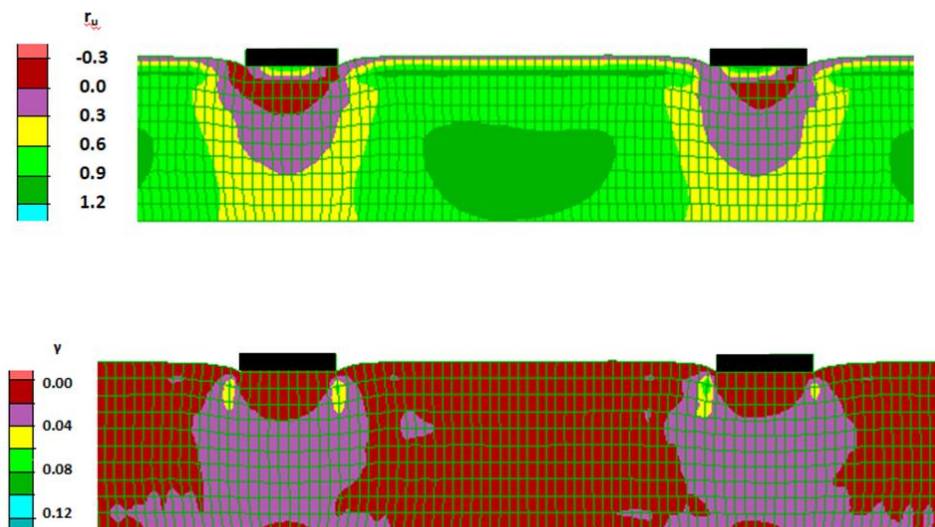


*Σχήμα 4.15 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 4 = 20m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με δίδυμο θεμέλια ενδιάμεσης απόστασης $D=B*4=20m$, και με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q*

Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 4 = 20m$. Στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες δίδυμου θεμελίου πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ με ενδιάμεση απόσταση $D = D_{23} = B * 4 = 20m$ υπό την ίδια διέγερση. Η αλληλεπίδραση εδώ εξασθενεί περαιτέρω. Παρατηρούμε πιο ήπια κατανομή υπερπιέσεων πόρων, τόσο στις κατασκευές 1,2 σε σχέση με της ανάλογες της δυάδας αλλά και των δυο πρώτων τριπλών περιπτώσεων, όσο και στην τρίτη κατασκευή, όπου πια ο δείκτης r_u συμπεριφέρεται σχεδόν όπως στη μεμονωμένη. Σε όρους μηχανισμού αστοχίας οι κατασκευές φαίνεται να διατηρούν τις ίδιες τιμές με την προηγούμενη περίπτωση, χωρίς βέβαια οι καθιζήσεις τους και οι στροφές τους να είναι ίδιες με τις αντίστοιχες περιπτώσεις δυάδων (1,2 δυάδα με $D=5m$, 3 δυάδα με $D=20m$), απλά όλα τα μεγέθη είναι εμφανώς μικρότερα συγκριτικά με τις πρώτες διατάξεις.



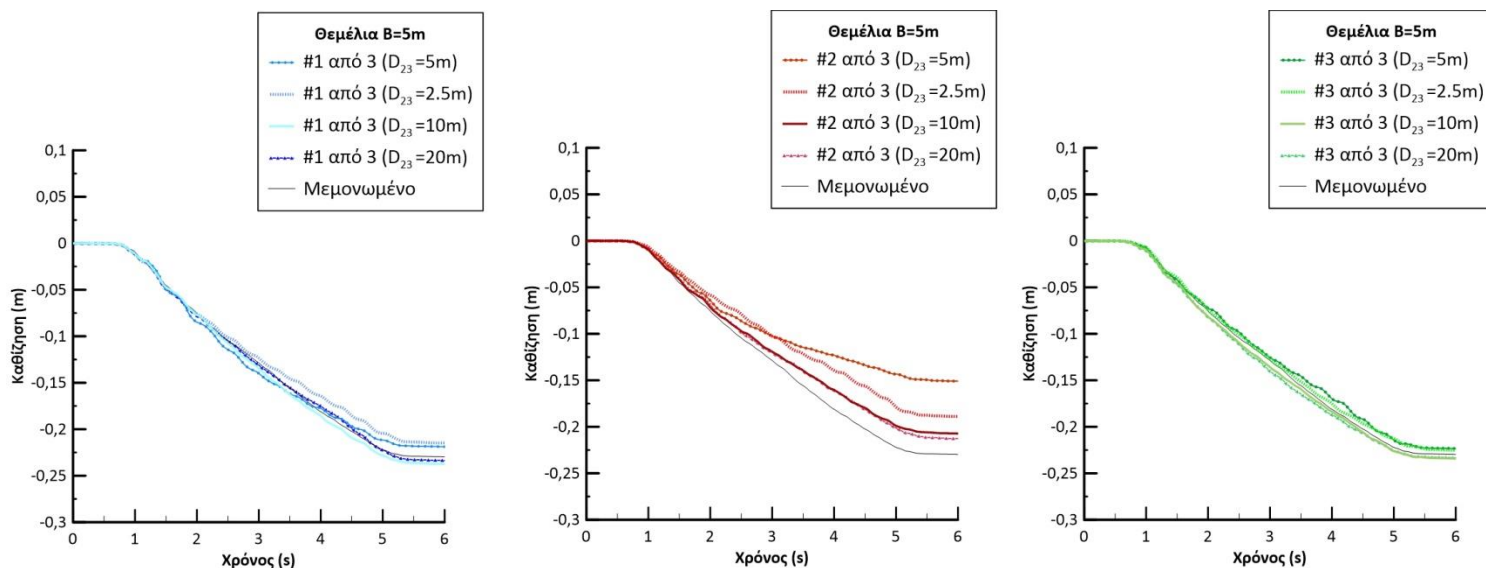
Σχήμα 4.16 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 4 = 20m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.



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 $q=100kPa$) με ενδιάμεση απόσταση $D=4*B=20m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$.

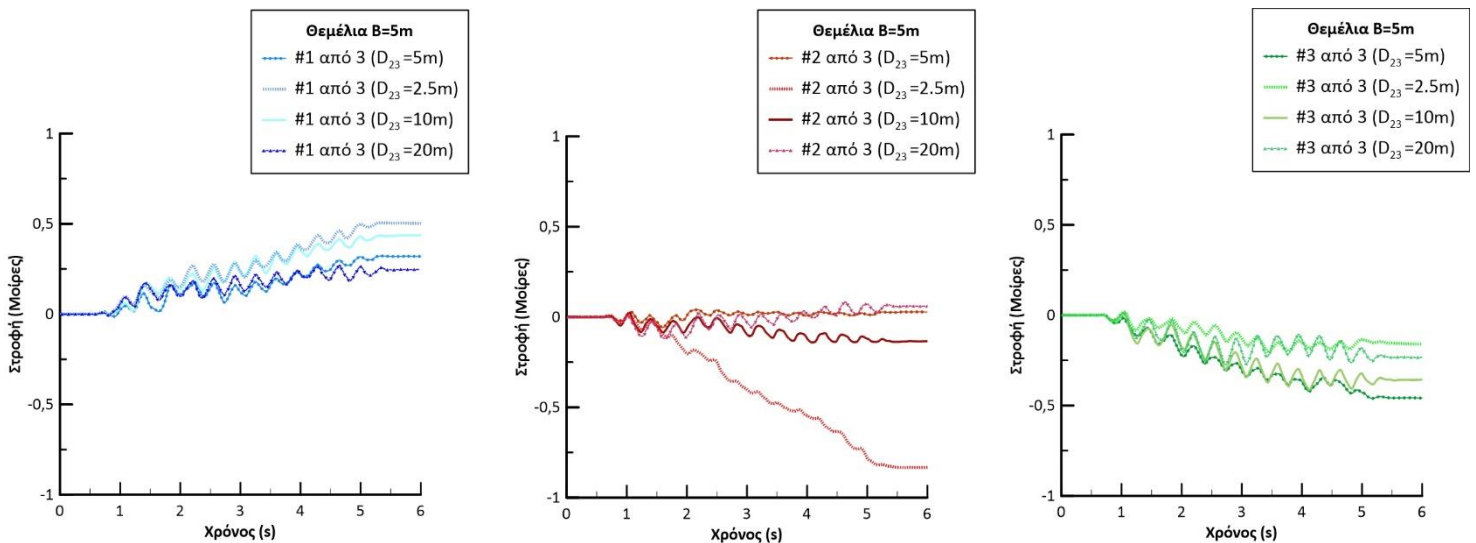
Τέλος, στα επόμενα σχήματα επιχειρείται μια σύμπτυξη των παραπάνω αποτελεσμάτων και παρατηρήσεων, με σκοπό την εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων για την αλληλεπίδραση τριάδας ίδιων θεμελίων.

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.18** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ιστορίες καθιζήσεων για κάθε ένα από τρία θεμέλια στην τριάδα, με βάση όλες τις προηγούμενες αναλύσεις. Έτσι, στο γράφημα (α) παρατίθενται οι καθιζήσεις για το αριστερό θεμέλιο (1^ο από 3) των διατάξεων και για τις τέσσερις περιπτώσεις ενδιάμεσων αποστάσεων D_{23} που εξετάστηκαν στην παρούσα παράγραφο, σε σύγκριση με εκείνη του μεμονωμένου. Ομοίως στα γραφήματα (β) και (γ) γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση για το μεσαίο (2^ο από 3) και το δεξί (3^ο από 3) θεμέλιο, αντίστοιχα. Παρατηρούμε πως στο κεντρικό θεμέλιο η αλληλεπίδραση είναι πάντα ευμενής, καθώς οι καθιζήσεις που εμφανίζει είναι πάντα μικρότερες του μεμονωμένου, με την ελάχιστη τιμή να εμφανίζεται για την απόλυτα συμμετρική τριάδα με $D_{23}=5m$. Για τα ακραία θεμέλια, φαίνεται πως η αλληλεπίδραση είναι ασθενής, τουλάχιστον ως προς την καθίζηση. Δηλαδή από την σύγκριση προκύπτει πως οι τιμές των καθιζήσεων των θεμελίων 1 και 3 συγκλίνουν συνήθως με αυτές του μεμονωμένου, δηλαδή εμφανίζονται συγκριτικά αυξημένες σε σχέση με το μεσαίο θεμέλιο.



Σχήμα 4.18 Σύγκριση καθιζήσεων θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{23}= 2.5m, 5m, 10m$ και $20m$, όταν $D_{12} = 5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Οι μπλε γραμμές αντιστοιχούν στις καθιζήσεις του αριστερού θεμελίου (1^ο από 3), οι κόκκινες στου μεσαίου (2^ο από 3) και οι πράσινες σε αυτές του δεξιού (3^ο από 3). Παρατίθεται και η καθίζηση στο αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q

Στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζονται, ομοίως, συγκεντρωτικά οι ιστορίες στροφών για κάθε ένα από τρία θεμέλια στην τριάδα, με βάση τις προηγούμενες αναλύσεις. Έτσι, στο γράφημα (α) παρατίθενται οι στρόφες για το αριστερό θεμέλιο (1^ο από 3) των διατάξεων και τις τέσσερις περιπτώσεις ενδιάμεσων αποστάσεων D_{23} που εξετάστηκαν στην παρούσα παράγραφο, ενώ δεν παρουσιάζεται η ιστορία για το μεμονωμένο θεμέλιο καθώς η στρόφη είναι πρακτικώς μηδενική. Ομοίως στα γραφήματα (β) και (γ) γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση για το μεσαίο (2^ο από 3) και το δεξί (3^ο από 3) θεμέλιο, αντίστοιχα. Παρατηρούμε πως οι στρόφες του κεντρικού θεμελίου τείνουν να είναι μηδενικές, με εξαίρεση την περίπτωση για την ελάχιστη απόσταση $D_{23} = 2.5\text{m}$ όπου στρίβει έντονα προς το πλησιέστερο του θεμέλιο. Επίσης φαίνεται πως το αριστερό θεμέλιο στρέφεται σε όλες τις περιπτώσεις προς τα αριστερά, ενώ το δεξί θεμέλιο στρέφεται πάντα προς τα δεξιά, δηλαδή και τα δύο ακραία θεμέλια στρίβουν αντίθετα από τα γειτονικά τους. Ως προς τις τιμές των στροφών, προκύπτουν μικρές αυξομειώσεις με την αλλαγή των αποστάσεων D_{23} , οι οποίες δεν φαίνεται να ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο.

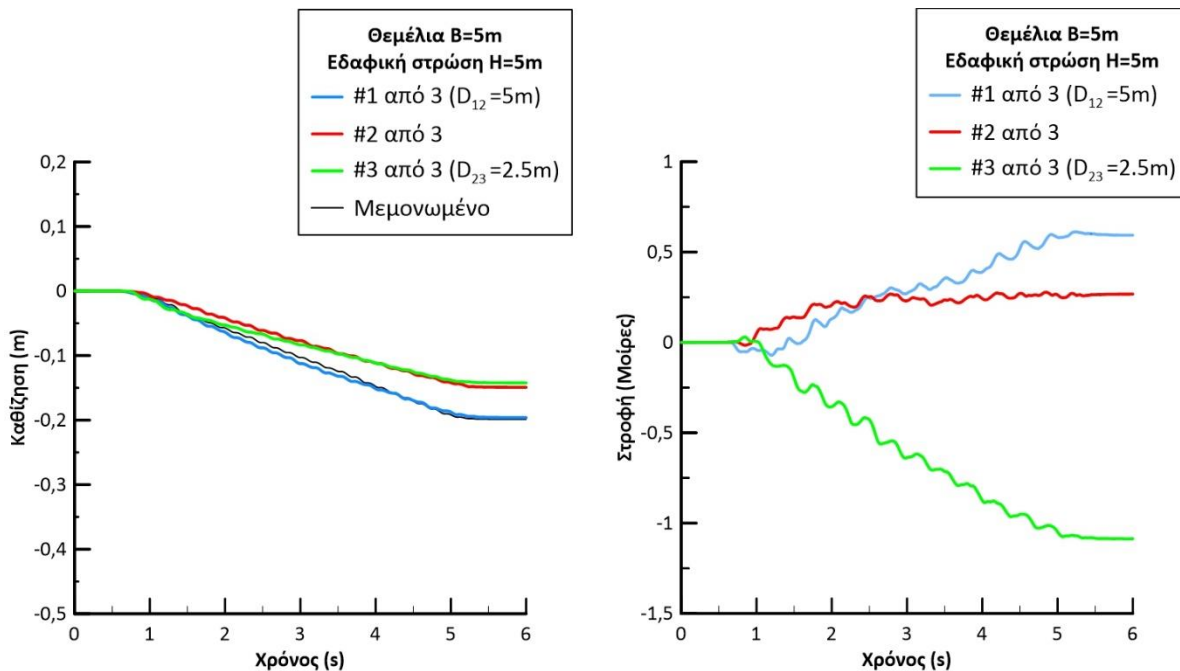


Σχήμα 4.19 Σύγκριση στροφών θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{23}= 2.5\text{m}, 5\text{m}, 10\text{m}$ και 20m , όταν $D_{12} = 5\text{m}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{m}$. Οι μπλε γραμμές αντιστοιχούν στις στρόφες του αριστερού θεμελίου (1^ο από 3), οι κόκκινες στου μεσαίου (2^ο από 3) και οι πράσινες σε αυτές του δεξιού (3^ο από 3). Η στρόφη του αντίστοιχου στενού μεμονωμένου θεμελίου, ίδιου φορτίου q , θεωρείται πρακτικώς μηδενική και δεν παρατίθεται.

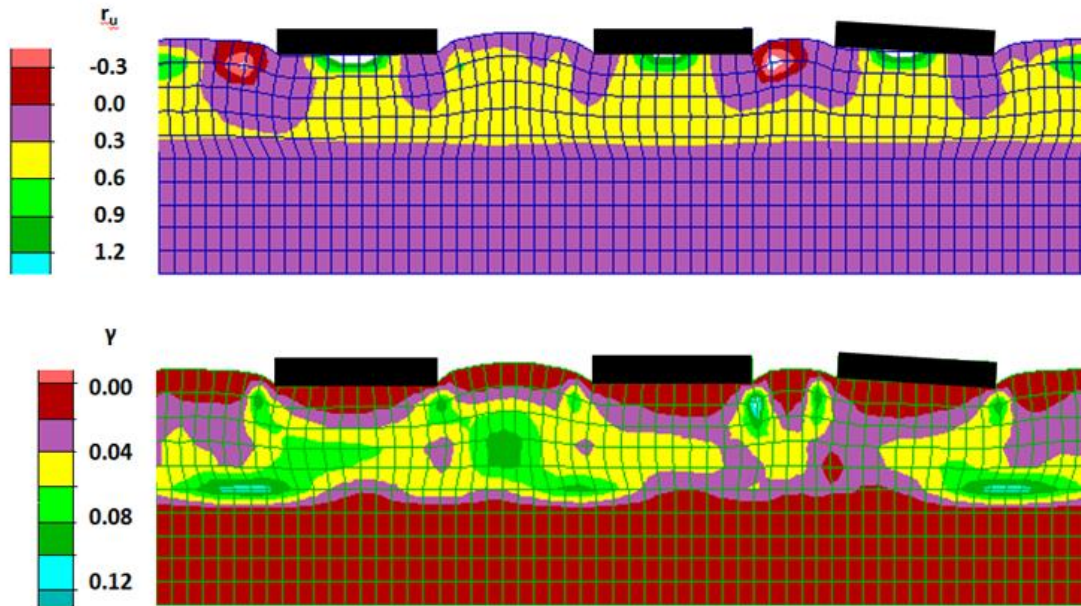
4.4 Επίδραση πάχους στρώσης στην απόκριση τριάδας ίδιων θεμελίων

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η σεισμική απόκριση, τριάδας στενών ($B = 5\text{m}$) θεμελίων, αυτή τη φορά για ρευστοποιήσιμη στρώση μικρότερου πάχους, ήτοι $H = 5\text{m}$ αντί $H = 10\text{m}$ των αναλύσεων στις προηγούμενες παραγράφους. Οι εν λόγω αναλύσεις θεωρούν την λεπτότερη στρώση επιφανειακή, όπως ισχύει και στις αναλύσεις για παχιά στρώση. Επανεξετάζονται εδώ, ενδεικτικά, δύο διατάξεις τριάδων θεμελίων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Σε αυτού του τύπου την διερεύνηση, και σε όλη την παράγραφο 4.4, η σύγκριση θα γίνει μόνο με τα αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια, καθώς η σύγκριση με τα αντίστοιχα ζεύγη θεμελίων θα κάνει την διαδικασία πολύπλοκη και θα δυσχεράνει την εξαγωγή συμπερασμάτων.

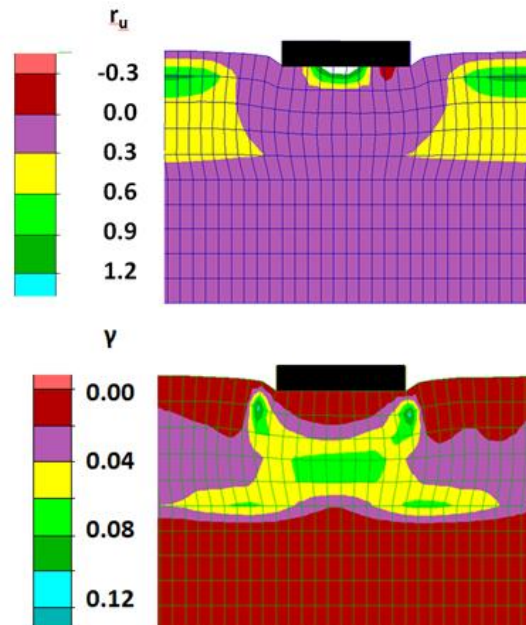
Στο **Σχήμα 4.20** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q = 100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5\text{m}$, $D_{23} = B * 0.5 = 2.5\text{m}$ και υποκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5\text{m}$. Συνολικά, οι καθιζήσεις είναι μικρότερες απ' ό τι για $H = 10\text{m}$, καθώς μειώνεται το πάχος της «συμπιεστής» στρώσης. Παρατηρούμε πως για τα πολύ κοντινά θεμέλια 2 και 3 της τριάδας, η καθίζηση είναι ευμενέστερη σε σύγκριση με αυτή του μεμονωμένου αλλά δε συμβαίνει το ίδιο και με το θεμέλιο 1 που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση και έχει καθίζηση ίση με του μεμονωμένου. Ταυτόχρονα, το δεξί θεμέλιο (3^ο από 3) που βρίσκεται πιο κοντά στο κεντρικό φαίνεται να στρίβει εντονότερα απ' ό τι για $H = 10\text{m}$, ενώ το μεσαίο δείχνει να στρίβει λιγότερο αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 4.20 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5\text{m}$ και $D_{23} = B * 0.5 = 2.5\text{m}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5\text{m}$. Σύγκριση με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q

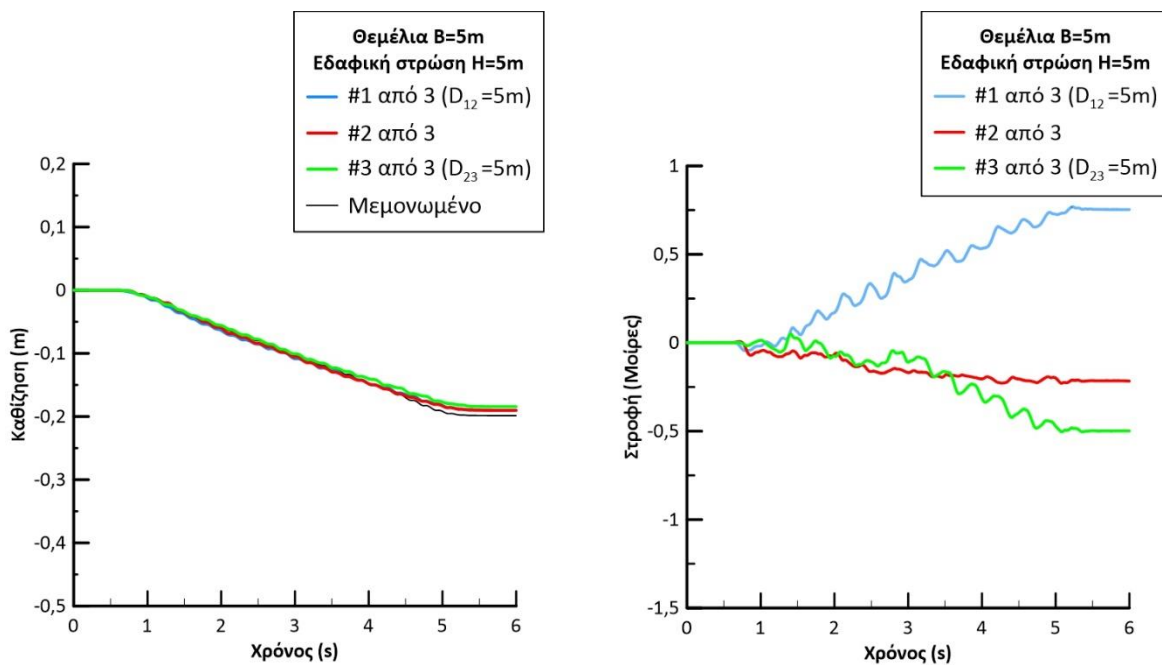


Σχήμα 4.21 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m$ και $D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5m$.



Σχήμα 4.22 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μεμονωμένο θεμέλιο (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5m$).

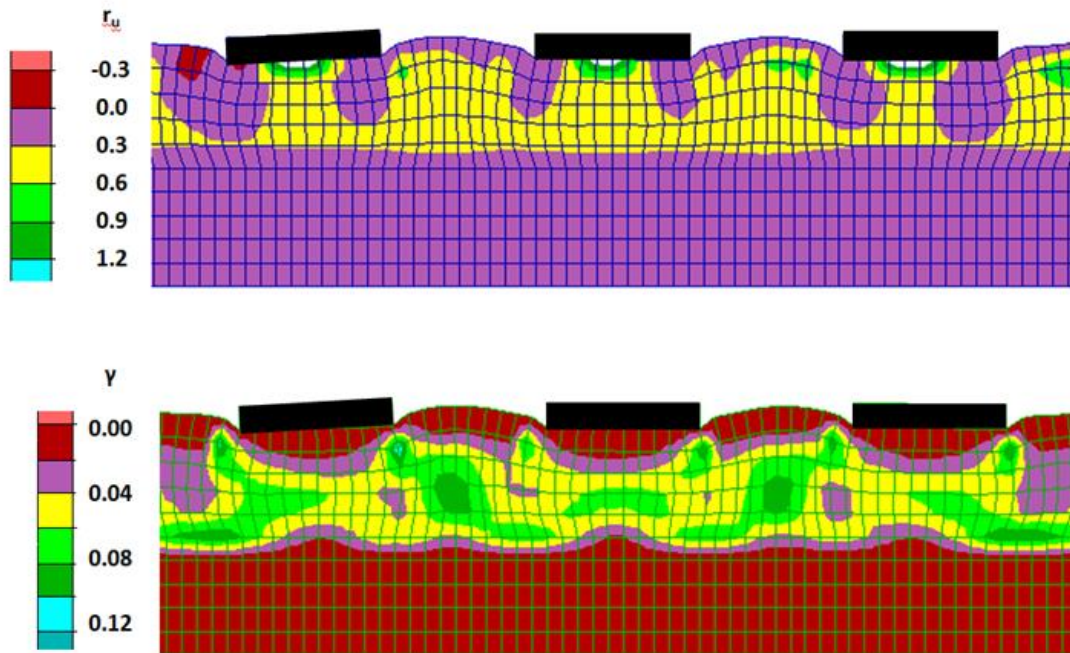
Στο **Σχήμα 4.21** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος, για την παραπάνω τριάδα και την υποκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση μικρού πάχους ($H = 5m$). Χάρην σύγκρισης, στο **Σχήμα 4.22** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για το μόνο θεμέλιο πλάτους $B = 5m$ και φορτίου έδρασης $q = 100kPa$ υπό την ίδια διέγερση στην ίδια στρώση. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι εδαφικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται αποκλειστικά μέσα στην ρευστοποιήσιμη στρώση, ενώ οι υπερπιέσεις πόρων δείχνουν μικρότερες κάτω από το μεμονωμένο θεμέλιο συγκριτικά με την τριάδα θεμελίων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη αρνητικών r_u (< 0) ανάμεσα στα πολύ κοντινά (2° και 3°) θεμέλια, η οποία δημιουργεί και την μεγαλύτερη στροφή του $3^{ου}$ θεμελίου προς τα δεξιά.



Σχήμα 4.23 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m = D_{23}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5m$. Σύγκριση με το αντίστοιχο στενό μεμονωμένο θεμέλιο, ίδιου φορτίου q

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.23** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων (πλάτους $B = 5m$, φορτίου έδρασης $q = 100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m = D_{23}$ και υποκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση μικρού πάχους ($H = 5m$). Εδώ η τριάδα θεμελίων είναι συμμετρική, και η απόσταση $D = 5m$ είναι αρκετά μεγάλη ώστε να απομειωθεί η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, κάτι που δε συνέβαινε στην ανάλυση για παχιά στρώση ($H = 10m$). Αντίθετα, ως προς τις στροφές δεν παρατηρούμε μεγάλες αλλαγές των τιμών σε σύγκριση με την ανάλογη περίπτωση για $H = 10m$, με εξαίρεση τη λίγο μεγαλύτερη στροφή του $1^{ου}$ θεμελίου.

Τέλος, στο **Σχήμα 4.24** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος, για την τριάδα του **Σχήματος 4.23** και την λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση ($H = 5m$). Παρατηρούμε πως και εδώ ο μηχανισμός αστοχίας των θεμελίων παραμένει στην ρευστοποιήσιμη στρώση, ενώ δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές κάτω από τρία θεμέλια. Αντίστοιχη συμμετρία παρατηρείται και στις υπερπίεσεις πόρων r_u κάτω από τα τρία θεμέλια στην περίπτωση αυτή.



Σχήμα 4.24 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων (πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$) με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = B = 5m = D_{23}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5m$.

4.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η αλληλεπίδραση τριάδας ίδιων θεμελίων σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση. Αρχικώς παρουσιάστηκε η τυπική απόκριση μιας συμμετρικής διάταξης στενών θεμελίων σε παχιά ρευστοποιήσιμη στρώση, και στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση της απόστασης μεταξύ των θεμελίων αυτών στην ίδια στρώση. Τέλος, έγινε ενδεικτική διερεύνηση και της επίδρασης του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης στην αλληλεπίδραση της τριάδας ίδιων θεμελίων. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου είναι τα κάτωθι:

(α) Ως προς την καθίζηση, η αλληλεπίδραση των τριών ίδιων θεμελίων λειτουργεί σχετικά ευεργετικά, αλλά είναι μικρής έντασης. Συγκεκριμένα, σε όλες τις περιπτώσεις για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H = 10m$, η καθίζηση του κεντρικού θεμελίου (2° από 3) είναι πάντα μικρότερη από αυτή των αντίστοιχων μεμονωμένων, αλλά και από την καθίζηση που εμφανίζουν τα ίδια θεμέλια σε ζεύγη. Από την άλλη, τα ακριανά θεμέλια (θεμέλια 1 και 3) έχουν πρακτικώς τις ίδιες τελικές καθιζήσεις, τόσο με τα αντίστοιχα μεμονωμένα όσο και με τις καθιζήσεις των αντίστοιχων ζευγών.

(β) Ως προς την στροφή, η αλληλεπίδραση των τριών ίδιων θεμελίων είναι πιο έντονη και μπορεί να γίνει αρκετά δυσμενής. Σε όλες τις περιπτώσεις, για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H = 10m$ προκύπτει σημαντική στροφή των ακραίων θεμελίων, του αριστερού προς τα αριστερά και του δεξιού προς τα δεξιά, με τιμές στροφής που πολλές φορές ξεπερνούσαν αυτές των στροφών των ίδιων θεμελίων σε ζεύγη. Αντιθέτως, στο κεντρικό θεμέλιο η στροφή υπήρξε γενικώς αμελητέα, με εξαίρεση την περίπτωση που ένα από τα ακραία θεμέλια είναι πολύ κοντά (για $D_{23} = 2.5m$), όταν και στρίβει προς αυτό.

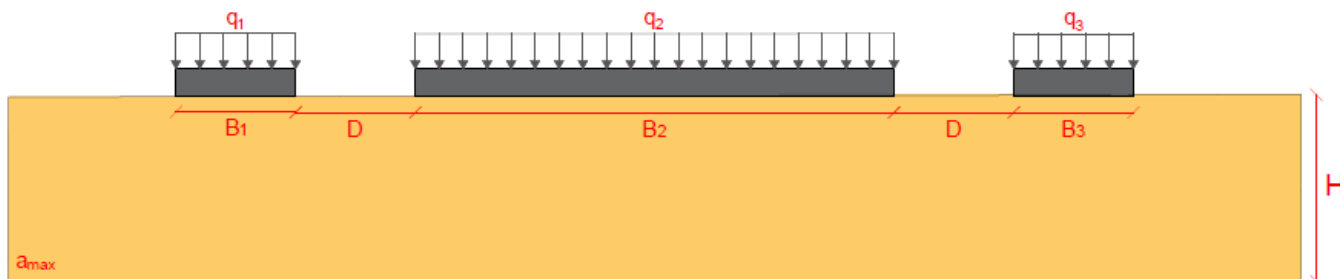
(γ) Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των θεμελίων μειώνει την αλληλεπίδρασή τους. Πρακτικώς, αποστάσεις $20m$ έχουν εξαλείψει την αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης και έχουν απομειώσει έντονα (αλλά όχι εξαλείψει) την αλληλεπίδραση σε όρους στροφής, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά στενά θεμέλια σε πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H=10m$.

(δ) Η μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης, από $H = 10m$ σε $5m$, μειώνει τις καθιζήσεις των ίδιων θεμελίων, καθώς μειώνεται το πάχος της «συμπιεστής» στρώσης. Σε ό,τι αφορά στις στροφές τους, προκύπτουν αντίστοιχες τιμές, κατά μέσο όρο, αν και μπορούν να εμφανιστούν και περιπτώσεις με μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές, χωρίς να αλλάζει η κατεύθυνση της στροφής (τα ακραία θεμέλια στρίβουν πάντα προς τα έξω). Η ένταση της αλληλεπίδρασης δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από τη μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης, αν και χρειάζονται περισσότερες αναλύσεις για να προκύψει ασφαλέστερο συμπέρασμα.

5. Αλληλεπίδραση τριάδας διαφορετικών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τρεις γειτονικές διαφορετικές θεμελιολωρίδες σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση υπό σεισμική διέγερση. Στόχος της παρουσίασης είναι η μελέτη της αναπτυσσόμενης αλληλεπίδρασης $SSSI_3$ (Structure-Soil-Structure Interaction) μεταξύ τους (με το δείκτη 3 να υπονοεί την τριάδα), καθώς και των παραμέτρων που την επηρεάζουν, όπως ακριβώς έγινε στο Κεφάλαιο 4 για τριάδα ίδιων θεμελίων. Στο **Σχήμα 5.1** απεικονίζεται η τυπική διάταξη του προβλήματος, δηλαδή μιας ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης πάχους H επί της οποίας βρίσκονται οι τρεις επιφανειακές θεμελιολωρίδες διαφορετικού πλάτους B_1 , B_2 και B_3 και διαφορετικών φορτίων έδρασης q_1 , q_2 και q_3 , με ενδιάμεσες μεταξύ τους αποστάσεις D_{12} , D_{23} , που υποβάλλεται σε αρμονική διέγερση βάσης (10 σημαντικών κύκλων) με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.2 \text{ g}$ και δεσπόζουσα περίοδο $T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$.



Σχήμα 5.1 Σκαρίφημα διάταξης τριάδας θεμελίων πλάτους B_1 , B_2 και B_3 , φορτίων έδρασης q_1 , q_2 , q_3 και ενδιάμεσων αποστάσεων D_{12} , D_{23} , εδραζομένων σε ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους H υπό αρμονική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} για τον υπολογισμό καθιζήσεων z και στροφών θ

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί **Πίνακες 5.1**, **5.2** οι οποίοι παρουσιάζουν τα παραμετρικά χαρακτηριστικά κάθε ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου. Οι πίνακες είναι δύο, γιατί γίνεται διαχωρισμός των περιπτώσεων με τριάδες θεμελίων (**Πίνακας 5.1**), από τις περιπτώσεις αναφοράς που αφορούν σε μεμονωμένο θεμέλιο (**Πίνακας 5.2**). Δηλαδή η απόκριση κάθε τριάδας θεμελίων συγκρίνεται με την αντίστοιχη για μεμονωμένο θεμέλιο.

H(m)	B ₁ (m)	B ₂ (m)	B ₃ (m)	q ₁ (kPa)	q ₂ (kPa)	q ₃ (kPa)	D ₁₂ (m)	D ₂₃ (m)
10	5	5	5	50	200	50	2.5	2.5
10	5	5	5	200	50	200	2.5	2.5
10	5	5	5	50	200	50	5	5
10	5	5	5	200	50	200	5	5
10	5	20	5	100	100	100	2.5	2.5
10	20	5	20	100	100	100	2.5	2.5
10	5	20	5	50	200	50	2.5	2.5
10	5	20	5	200	50	200	2.5	2.5
10	20	5	20	50	200	50	2.5	2.5
10	20	5	20	200	50	200	2.5	2.5
5	5	20	5	50	200	50	2.5	2.5
5	5	20	5	200	50	200	2.5	2.5
5	20	5	20	50	200	50	2.5	2.5
5	20	5	20	200	50	200	2.5	2.5

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση τριάδας διαφορετικών (στενών και ευρέων) θεμελίων που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο

H(m)	B(m)	q(kPa)
10	5	200
10	5	50
10	20	100
10	20	200
10	20	50
5	5	200

5	5	50
5	20	200
5	20	50

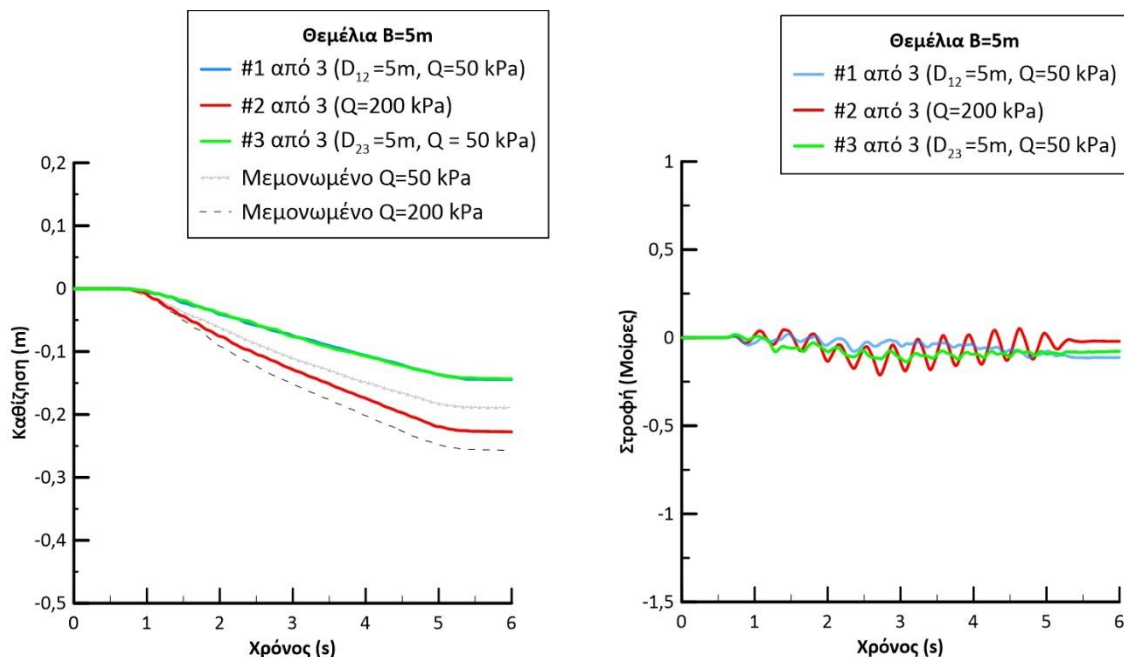
Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση μεμονωμένου θεμελίου που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο

Όπως και στο Κεφάλαιο 4, 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 σε μορφή ισοκαμπυλών μόνο στο τέλος της διέγερσης. Τιμές καθίζησης αρνητικές υποδηλώνουν ταπεινώση του θεμελίου και θετικές υποδηλώνουν ανύψωση. Αντίστοιχα, για τη στροφή έχει υιοθετηθεί η σύμβαση των θετικά προσημασμένων τιμών να υποδηλώνει στροφή θεμελίου προς τα αριστερά, ενώ αρνητική τιμή να αντιστοιχεί σε στροφή προς τα δεξιά. Δεδομένου ότι στο παρόν Κεφάλαιο δεν υπάρχει η έννοια της τυπικής απόκρισης τριάδας διαφορετικών θεμελίων, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται πρώτα για τριάδα θεμελίων ίδιου εύρους αλλά διαφορετικών φορτίων (παράγραφος 5.2), μετά για τριάδα θεμελίων διαφορετικού εύρους αλλά ίδιων φορτίων (παράγραφος 5.3) και έπειτα για τριάδα τελείως διαφορετικών θεμελίων (παράγραφος 5.4). Τέλος διερευνάται η απόκριση τριάδας διαφορετικών θεμελίων εδραζομένων σε ρευστοποιήσιμη στρώση μικρότερου πάχους (παράγραφος 5.5).

5.2 Απόκριση τριάδας θεμελίων ίδιου εύρους με διαφορετικά φορτία

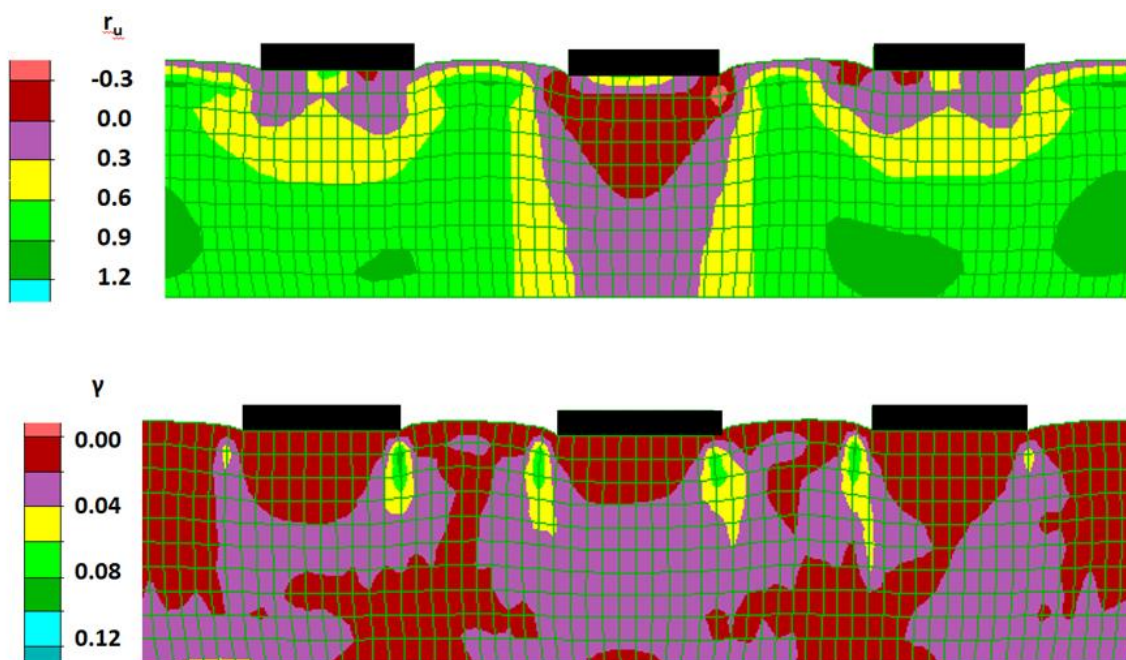
Στην παρούσα παράγραφο διερευνάται η αλληλεπίδραση τριάδας θεμελίων ίδιου εύρους B με διαφορετικού φορτίου q , πάντα υπό την ίδια διέγερση. Σε αυτού του τύπου την διερεύνηση, και σε όλη την παράγραφο 5.2, η σύγκριση θα γίνει μόνο με τα αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια, καθώς η σύγκριση με τα αντίστοιχα ζεύγη θεμελίων θα κάνει την διαδικασία πολύπλοκη και θα δυσχεράνει την εξαγωγή συμπερασμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις, η οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση έχει πάχος $H = 10m$.

Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5\text{ m}$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{ m}$, και με διαφορετικά φορτία ανά θεμέλιο. Συγκεκριμένα, το πρώτο θεμέλιο (από τα αριστερά) έχει φορτίο $q_1 = 50\text{ kPa}$, το δεύτερο $q_2 = 200\text{ kPa}$ και το τρίτο $q_3 = 50\text{ kPa}$. Συνεπώς στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται ως θεμέλια αναφοράς, ένα μεμονωμένο θεμέλιο πλάτους $B = 5\text{ m}$ με $q = 50\text{ kPa}$ και ένα ίδιου πλάτους με $q = 200\text{ kPa}$. Προφανώς τα πιο βαριά θεμέλια έχουν μεγαλύτερη καθίζηση από τα ελαφριά, είτε ως μεμονωμένα ή στην τριάδα. Από τη σύγκριση παρατηρούμε πως ως προς τις καθιζήσεις, η τριάδα των θεμελίων έχει ευμενέστερη συμπεριφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα μεμονωμένα. Δηλαδή, βλέπουμε μικρότερες καθιζήσεις στο κεντρικό θεμέλιο φορτίου $q_2 = 200\text{ kPa}$, συγκριτικά με το μεμονωμένο φορτίου 200 kPa . Ομοίως και τα ακραία θεμέλια φορτίου 50 kPa καθιζάνουν λιγότερο από το μεμονωμένο με $q = 50\text{ kPa}$, γεγονός που δείχνει πως η αλληλεπίδραση λειτουργεί ευμενώς στην συγκεκριμένη διάταξη. Πάντως η αλληλεπίδραση δείχνει εντονότερη απ' ό,τι στο Κεφάλαιο 4. Παραδόξως όμως, η αλληλεπίδραση ως προς τις στροφές των θεμελίων δείχνει σαφώς ευμενής, καθώς παρατηρούμε πως οι τελικές τιμές των στροφών τείνουν στο μηδέν, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις που θα διερευνηθούν στη παρούσα παράγραφο. Διαφαίνεται ότι η φυσική διάθεση των ακραίων θεμελίων να στρίψουν προς τα έξω (όταν είναι ίδιου φορτίου στο Κεφ. 4) εξισορροπείται από την επίδραση του βαρύ κεντρικού θεμελίου.

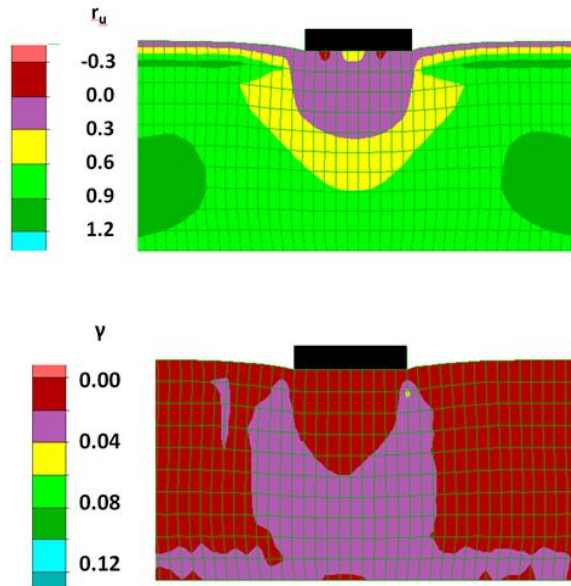


Σχήμα 5.2 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων πλάτους $B=5\text{ m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{ m}$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{ m}$. Σύγκριση με δύο μεμονωμένα θεμέλια ίδιου πλάτους και φορτίων $q = 50\text{ kPa}$ και $q = 200\text{ kPa}$

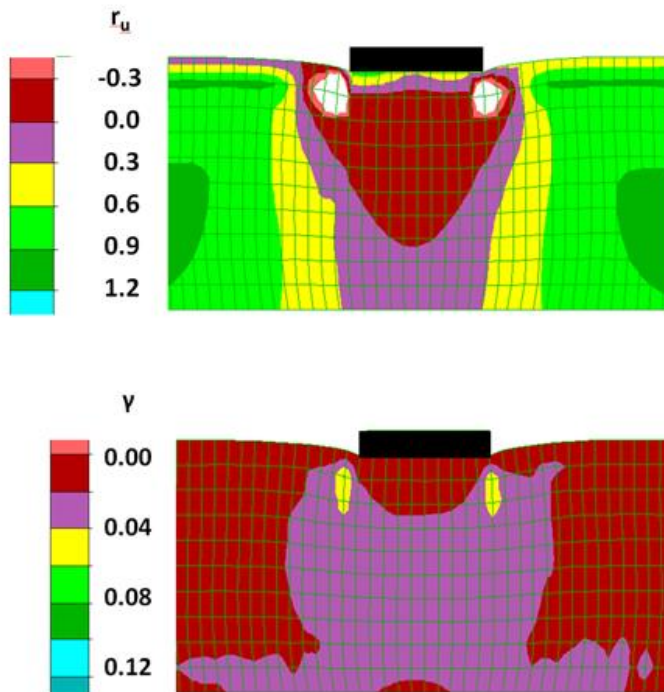
Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5\text{m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{m}$. Τα φορτία έδρασης ανά θεμέλιο είναι $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$. Σύμφωνα με τον τρόπο σύγκρισης που προαναφέρθηκε, στο **Σχήμα 5.4** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες μεμονωμένου θεμελίου ίδιου πλάτους για $q = 50\text{ kPa}$, και στο **Σχήμα 5.5** το ίδιο για $q = 200\text{ kPa}$. Ο μηχανισμός αστοχίας που διαμορφώνεται κάτω από το κεντρικό θεμέλιο είναι εμφανώς εντονότερος σε σύγκριση με το μεμονωμένο αντίστοιχου φορτίου. Επίσης η μεγάλη φόρτιση στο κέντρο της διάταξης φαίνεται να επηρεάζει τα γειτονικά θεμέλια σε όρους διατμητικής παραμόρφωσης γ . Η κατανομή των υπερπίεσεων πόρων παρουσιάζεται ήπια, ειδικά ανάμεσα στα θεμέλια και στις εξωτερικές τους παρειές, σε αντίθεση με το μεμονωμένο για $q = 200\text{ kPa}$. Επίσης δεν εμφανίζεται σημαντική αλληλεπίδραση σε όρους r_u με συνέπεια να μην υπάρξουν έντονες στροφές.



Σχήμα 5.3 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{m}$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{m}$



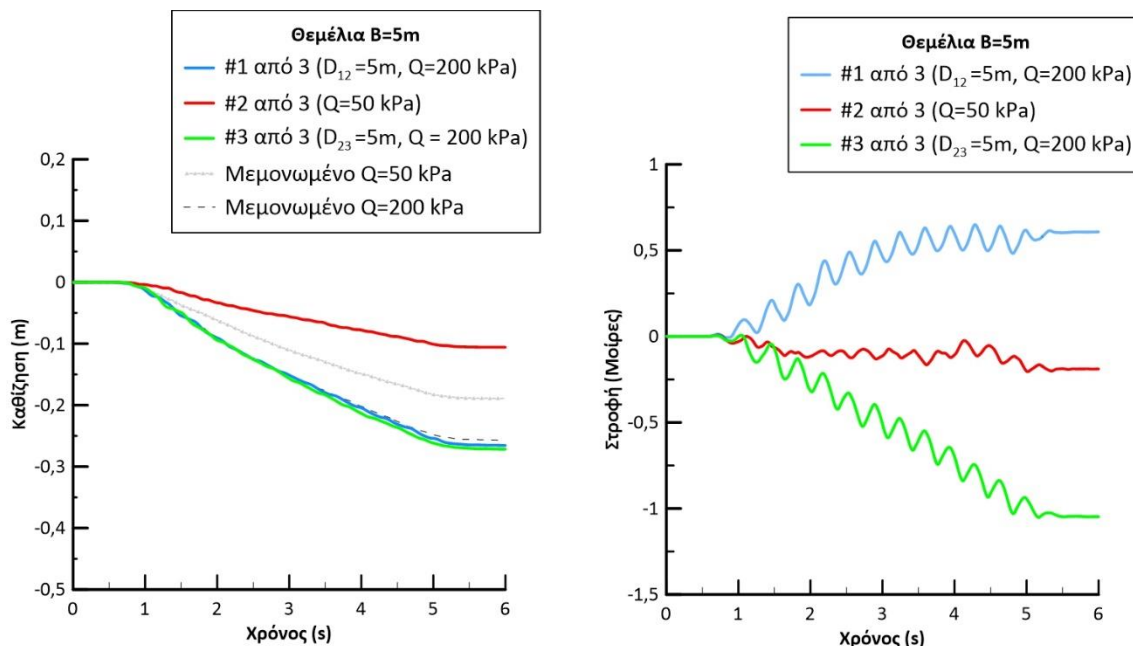
Σχήμα 5.4 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μεμονωμένο θεμέλιο πλάτους $B=5m$ και φορτίου έδρασης $q=50kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$



Σχήμα 5.5 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μεμονωμένο θεμέλιο πλάτους $B=5m$ και φορτίου έδρασης $q=200kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

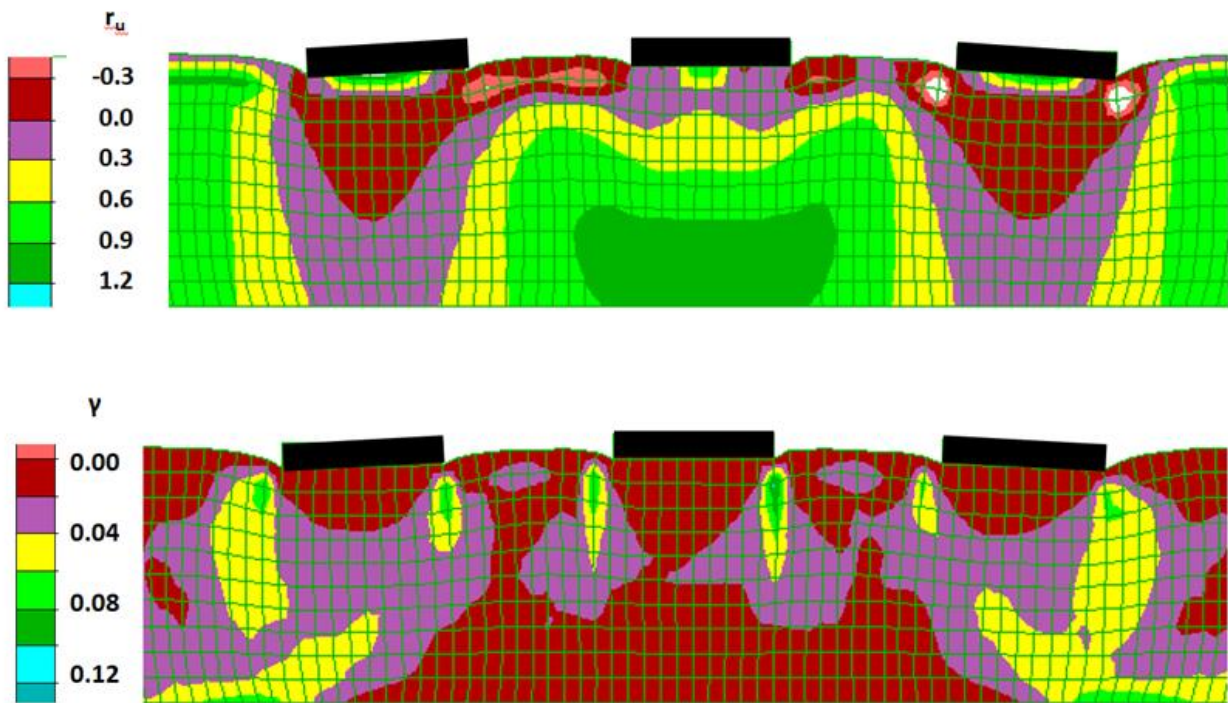
Συνεχίζοντας με την ίδια γεωμετρική διάταξη, στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5\text{ m}$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 5\text{ m}$, και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$, δηλαδή την περίπτωση που τα βαριά θεμέλια είναι στις άκρες. Οι χρονοϊστορίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες για τα μεμονωμένα θεμέλια με $q = 50\text{ kPa}$ και με $q = 200\text{ kPa}$. Παρατηρούμε πως τα δύο ακραία θεμέλια εμφανίζουν την ίδια καθίζηση με το μεμονωμένο θεμέλιο αναφοράς τους ($q = 200\text{ kPa}$), ενώ η καθίζηση στο κεντρικό θεμέλιο είναι εμφανώς μικρότερη του αντίστοιχου μεμονωμένου ($q = 50\text{ kPa}$). Δηλαδή τα βαριά θεμέλια δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη του ελαφρύ, αλλά το ελαφρύ επηρεάζεται πολύ έντονα ευμενώς από την ύπαρξη των βαριών θεμελίων εκατέρωθεν. Ακόμα, φαίνεται πως τα μεγαλύτερα φορτία έδρασης στα ακραία θεμέλια επιφέρουν έντονες στροφές προς τα έξω, αντίθετα με την περίπτωση του **Σχήματος 5.2**, δηλαδή επιτείνεται η προς τα έξω στροφή τους λόγω του μεγαλύτερου φορτίου.

Στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5\text{ m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{ m}$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο είναι $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$. Εδώ οι μετακινήσεις των θεμελίων είναι πολύ περισσότερο επηρεασμένες από την μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Οι υπερπιέσεις πόρων καταλήγουν έντονα μη συμμετρικές εκατέρωθεν των ακραίων θεμελίων, με αποτέλεσμα τις μεγάλες τιμές των στροφών τους και η παραμόρφωση γ του εδάφους γίνεται πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά και με τα δύο μεμονωμένα θεμέλια αναφοράς.

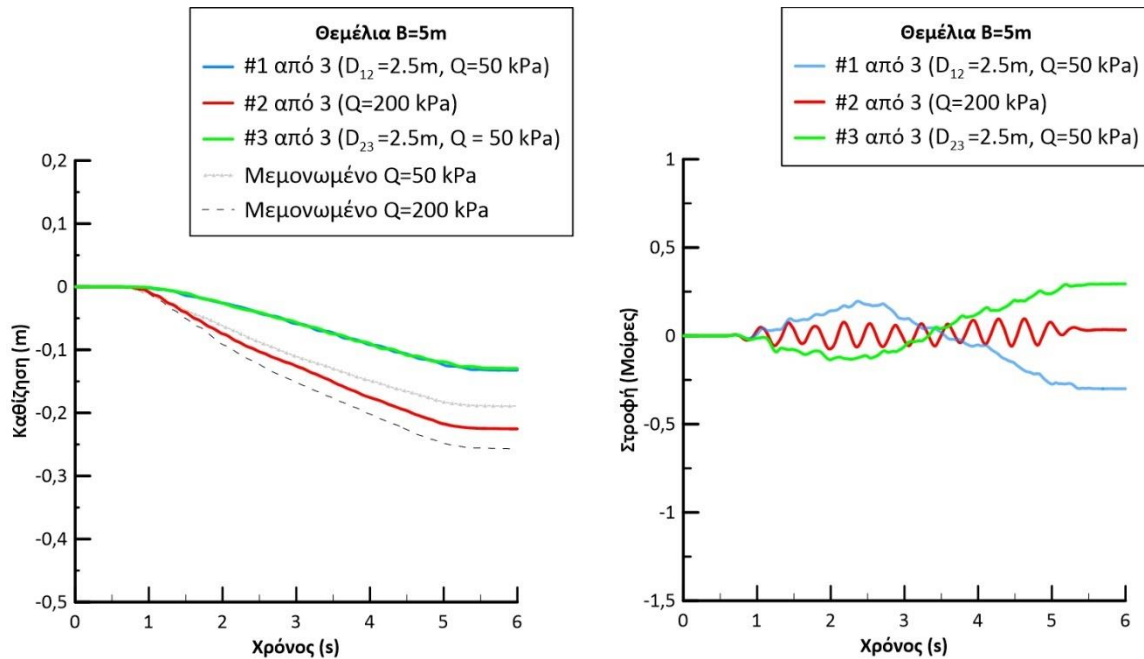


Σχήμα 5.6 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων πλάτους $B=5\text{ m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{ m}$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{ m}$. Σύγκριση με δυο μεμονωμένα θεμέλια ($q = 50\text{ kPa}$, $q = 200\text{ kPa}$)

Η διερεύνηση συνεχίζεται για διατάξεις τριών θεμελίων με μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις. Στο **Σχήμα 5.8** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5\text{m}$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5\text{m}$ και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$. Οι χρονοϊστορίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες για τα μεμονωμένα θεμέλια με $q = 50\text{ kPa}$ και με $q = 200\text{ kPa}$. Παρατηρούμε η αλληλεπίδραση είναι ευμενής για τις καθιζήσεις όλων των θεμελίων, αλλά το γεγονός ότι το κεντρικό θεμέλιο είναι πολύ βαρύτερο, όχι μόνο εξισορροπεί την τάση των ακραίων ελαφριών θεμελίων για στροφή προς τα έξω (όπως συμβαίνει για αποστάσεις 5.0m), αλλά την αντιστρέφει.

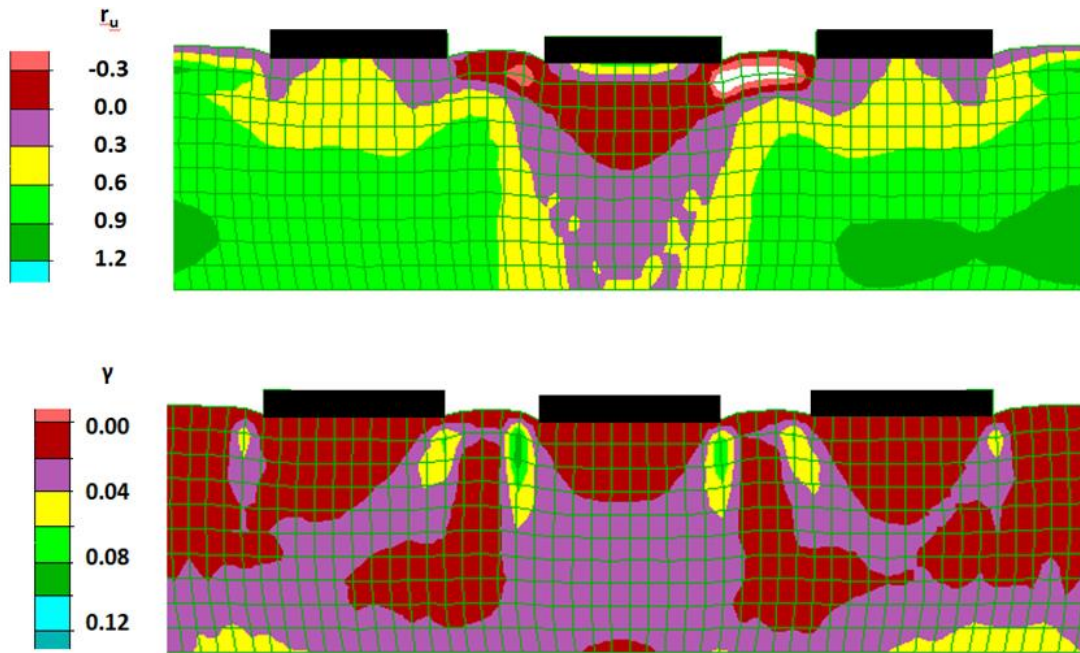


Σχήμα 5.7 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων πλάτους $B=5\text{m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B = 5\text{m}$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{m}$



*Σχήμα 5.8 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων πλάτους $B=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια*

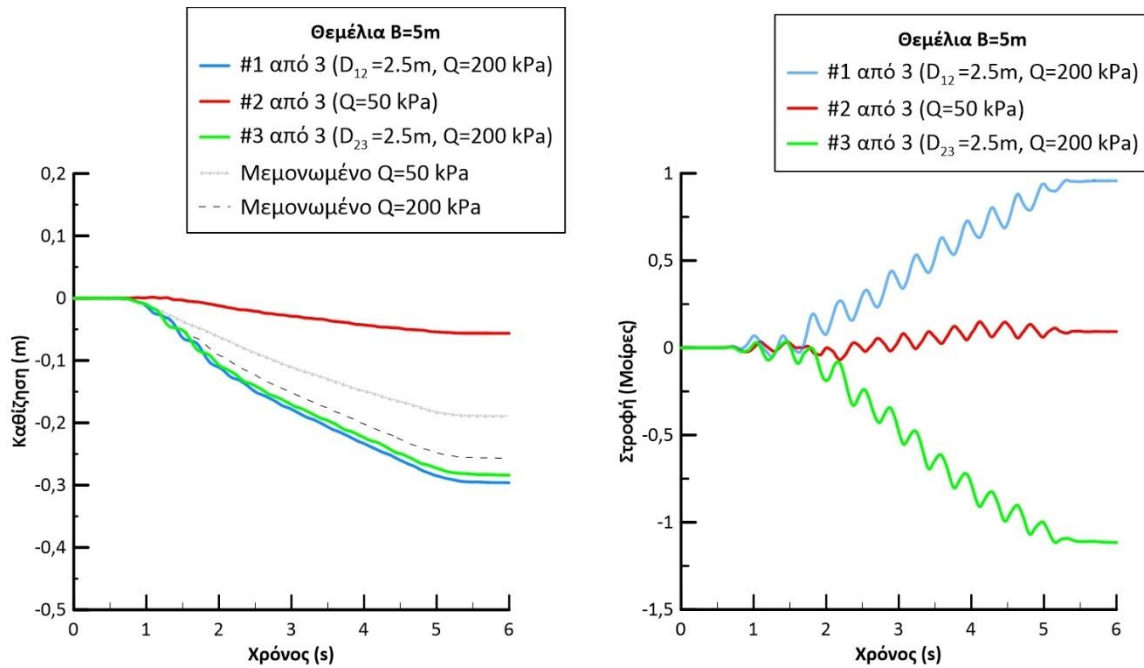
Στο **Σχήμα 5.9** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$. Τα φορτία έδρασης ανά θεμέλιο είναι $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$. Ως προς τις υπερπιέσεις πόρων για το κεντρικό βαρύ θεμέλιο, το εύρος στο οποίο καταλήγουν σε χαμηλές τιμές φαίνεται μικρότερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο μεμονωμένο. Όμως η διατμητική παραμόρφωση σε όρους γ κάτω από το κεντρικό θεμέλιο της τριάδας παρουσιάζεται μεγαλύτερη από αυτή του μεμονωμένου.



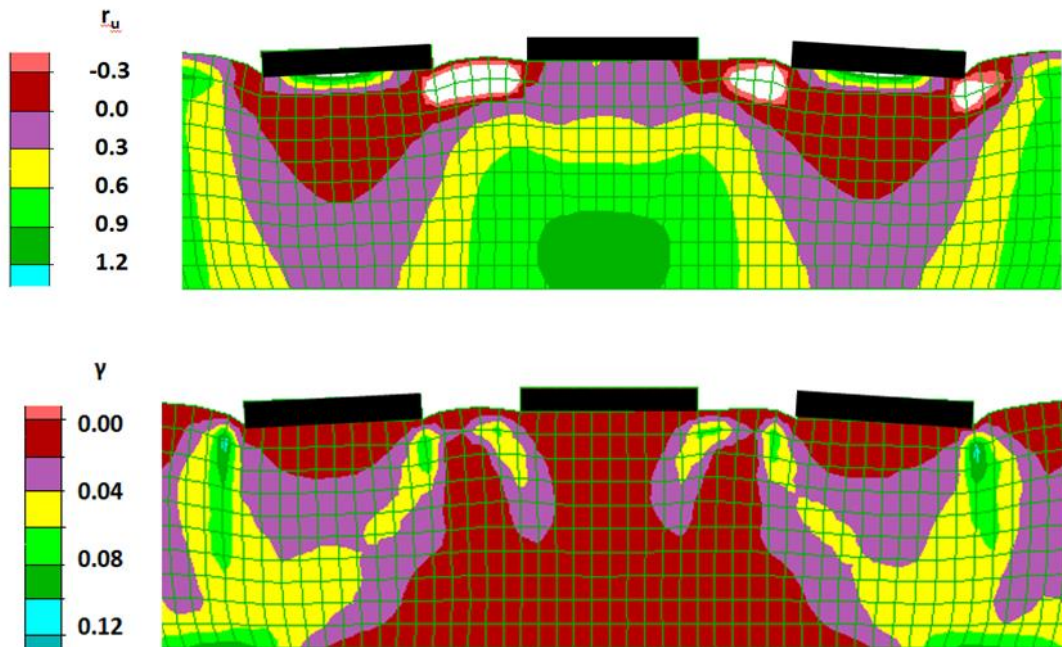
Σχήμα 5.9 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων πλάτους $B=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

Στο **Σχήμα 5.10** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5m$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$ και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 \text{ kPa}$, $q_2 = 50 \text{ kPa}$, $q_3 = 200 \text{ kPa}$. Οι χρονοϊστορίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες για τα μεμονωμένα θεμέλια με $q = 50 \text{ kPa}$ και με $q = 200 \text{ kPa}$. Ως προς τις καθιζήσεις, βλέπουμε πως αυτή του μεσαίου ελαφρύ θεμελίου είναι αρκετά ευμενέστερη σε σχέση με αυτή του αντίστοιχου μεμονωμένου ($q = 50 \text{ kPa}$), ενώ τα (ακριανά) θεμέλια 1 και 3 εμφανίζουν εμφανώς πιο δυσμενείς τιμές καθιζήσεων τόσο ως προς τα αντίστοιχα μεμονωμένα, όσο και ως προς τις τιμές για αποστάσεις $5m$ που παρουσιάστηκαν άνωθεν. Επίσης, τα βαριά ακριανά θεμέλια εμφανίζουν πολύ μεγάλες στροφές λόγω έντονης αλληλεπίδρασης, ακόμη μεγαλύτερες από εκείνες για αποστάσεις $5m$.

Τέλος στο **Σχήμα 5.11** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου r_u και της παραμόρφωσης γ στο έδαφος τριάδας θεμελίων πλάτους $B = 5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο ίσα με $q_1 = 200 \text{ kPa}$, $q_2 = 50 \text{ kPa}$, $q_3 = 200 \text{ kPa}$. Παρατηρούμε αρνητικές υπερπίεσεις πόρων εκατέρωθεν του κεντρικού θεμελίου, που έχουν σαν αποτέλεσμα τις έντονες στροφές των ακριανών θεμελίων. Μηχανισμός αστοχίας δημιουργείται κυρίως κάτω από τα βαριά θεμέλια, τα ακριανά της τριάδας.



Σχήμα 5.10 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων πλάτους $B=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια

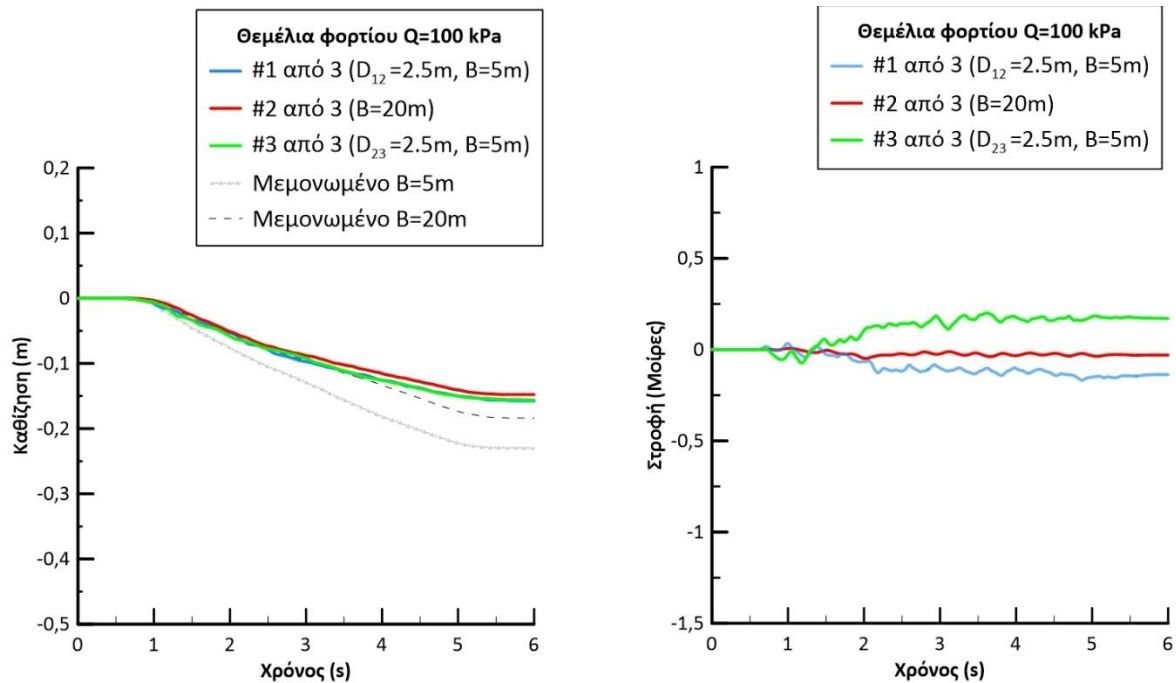


Σχήμα 5.11 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων πλάτους $B=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = B * 0.5 = 2.5m$, με φορτία ανά θεμέλιο $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

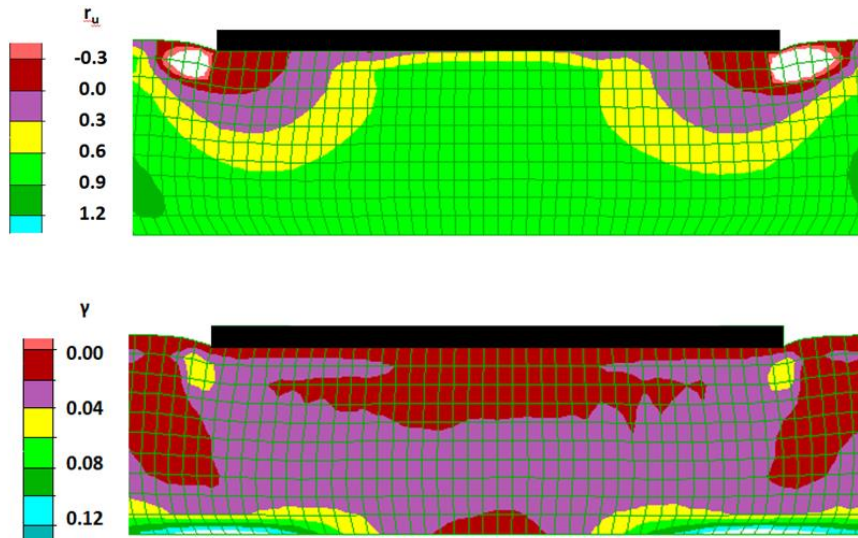
5.3 Απόκριση τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους με ίδιο φορτίο

Στη παρούσα παράγραφο γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση σε όρους καθιζήσεων, στροφών, υπερπιέσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων για την αλληλεπίδραση τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους, αλλά με ίδιο φορτίο. Συγκεκριμένα μελετώνται διατάξεις θεμελίων εύρους $B = 20\text{m}$ (ευρέα) και $B = 5\text{m}$ (στενά) με μικρές κοινές ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5\text{m}$, κοινό φορτίο έδρασης $q = 100\text{ kPa}$. Η σύγκριση γίνεται με τα αποτελέσματα αναλύσεων μεμονωμένων θεμελίων αντίστοιχου εύρους και φορτίου, πάντα για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H = 10\text{m}$. Οι συνδυασμοί που εξετάζονται εδώ είναι να έχουμε στενά ακραία θεμέλια και ευρύ κεντρικό θεμέλιο (Σχήματα 5.12 και 5.14), και το αντίστροφο, δηλαδή ευρέα ακραία θεμέλια και στενό κεντρικό θεμέλιο (Σχήματα 5.15 και 5.16). Επιπλέον, χάριν πληρότητας, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για το ευρύ μεμονωμένο θεμέλιο (Σχήμα 5.13) που δεν είχε έως τώρα μελετηθεί στην εργασία.

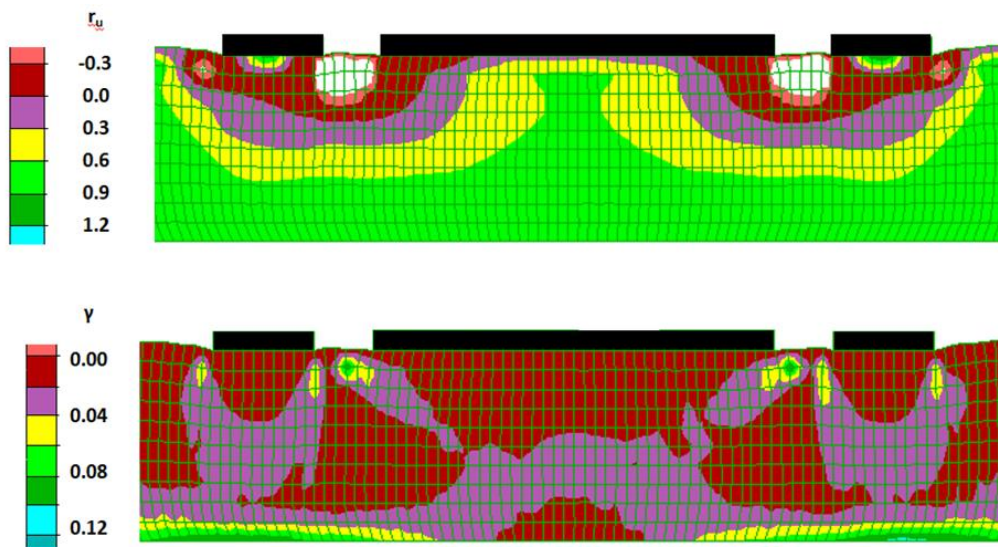
Ως προς τις καθιζήσεις, τόσο στο Σχήμα 5.12 όσο και στο Σχήμα 5.15 παρατηρούμε πως σε αυτές τις τριπλές διατάξεις η ύπαρξη ευρέων θεμελίων προκαλεί ευμενή αλληλεπίδραση, καθώς όλα τα θεμέλια των τριάδων καθιζάνουν λιγότερο σε σύγκριση με τα μεμονωμένα. Ειδικά στο Σχήμα 5.15 η μείωση στις τιμές της καθίζησης του κεντρικού θεμελίου των $B = 5\text{m}$ σε σχέση με το αντίστοιχο μεμονωμένο είναι πολύ έντονη. Σε όρους στροφής δεν υπάρχουν σημαντικές παρατηρήσεις, καθώς φαίνεται πως η ύπαρξη ευρέος κεντρικού θεμελίου αντιστρέφει τη διάθεση για προς τα έξω στρόφη των ακραίων στενών θεμελίων ίδιου φορτίου. Αντιθέτως, όταν τα ευρέα θεμέλια είναι στις άκρες αυτά στρίβουν λίγο και προς έξω.



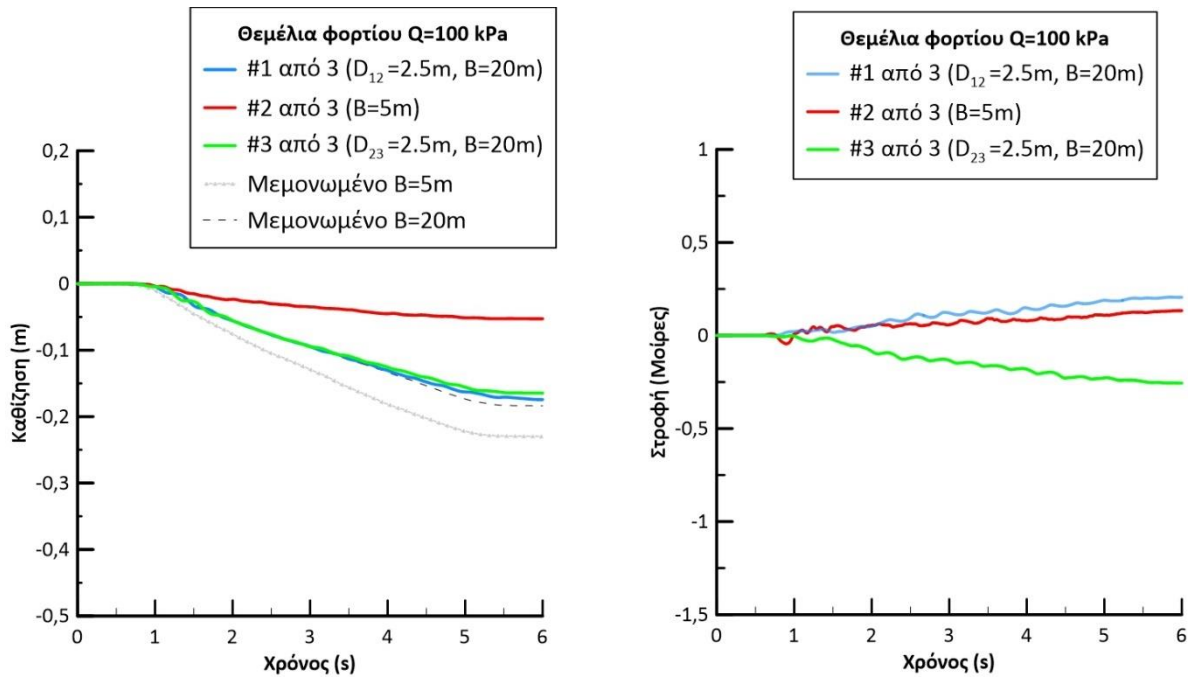
Σχήμα 5.12 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=5\text{m}$, $B_2=20\text{m}$, $B_3=5\text{m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5\text{m}$, φορτίου έδρασης $q=100\text{kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10\text{m}$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια



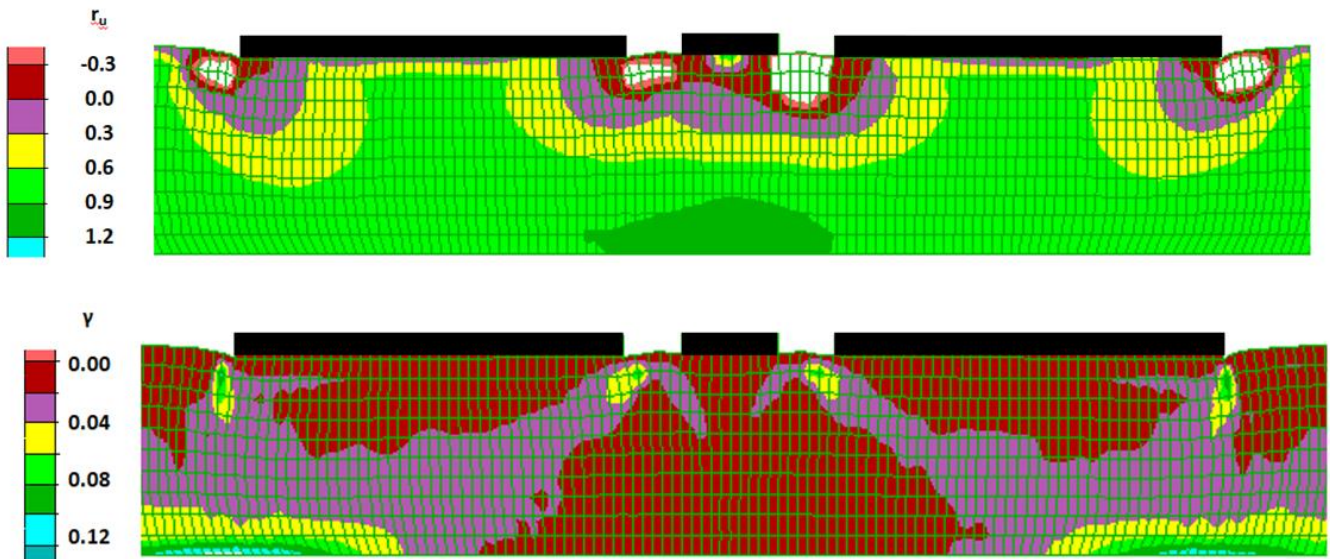
Σχήμα 5.13 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$



Σχήμα 5.14 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=5m$, $B_2=20m$, $B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$



Σχήμα 5.15 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια



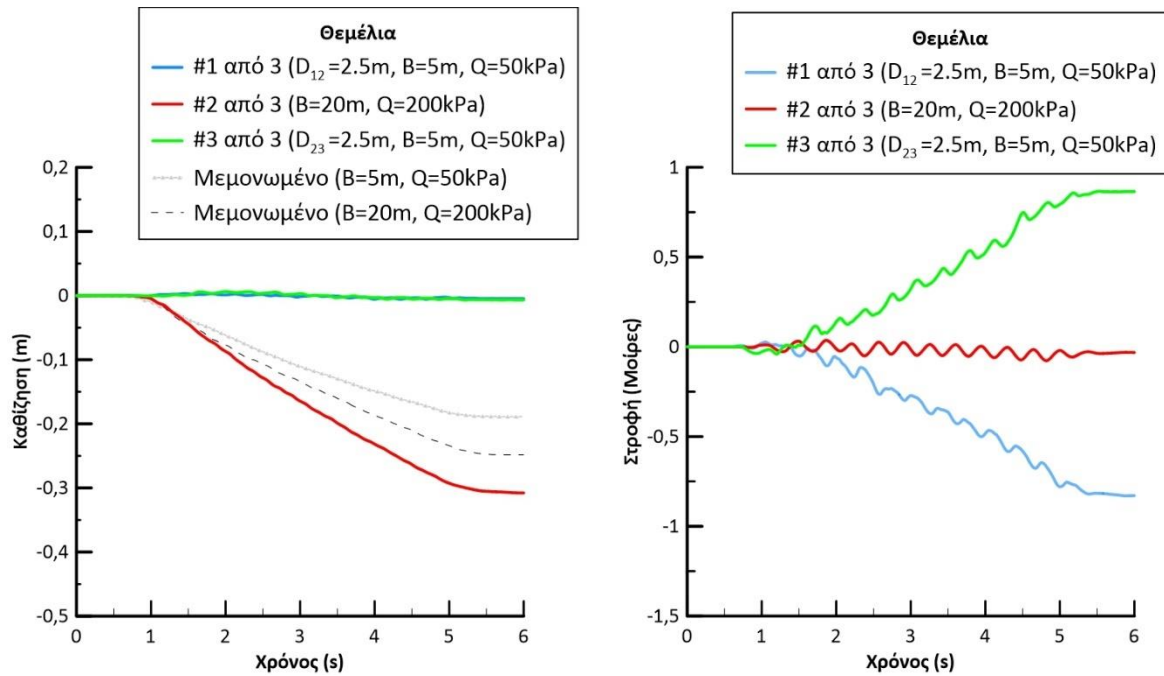
Σχήμα 5.16 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$, φορτίου έδρασης $q=100kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

Στα **Σχήματα 5.13, 5.14, 5.16** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ , για μεμονωμένο θεμέλιο πλάτους $B = 20$ m και για τις τριάδες θεμελίων με $B_1 = 5$ m, $B_2 = 20$ m, $B_3 = 5$ m και με $B_1 = 20$ m, $B_2 = 5$ m, $B_3 = 20$ m αντίστοιχα. Φαίνεται πως για τα ευρέα θεμέλια, ο μηχανισμός αστοχίας κάτω από το μεμονωμένο θεμέλιο μοιάζει αρκετά με τον μηχανισμό αστοχίας κάτω από τα ευρέα θεμέλια στις τριπλές διατάξεις, ειδικά στο **Σχήμα 5.16**. Δηλαδή σε κάθε περίπτωση, τα ευρέα θεμέλια δεν δείχνουν να επηρεάζονται σημαντικά από την ύπαρξη των στενών. Παρατηρούμε επίσης πως οι υπερπιέσεις πόρων καταλήγουν να είναι μηδενικές ανάμεσα στα θεμέλια και στις ακμές τους, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερες καθιζήσεις.

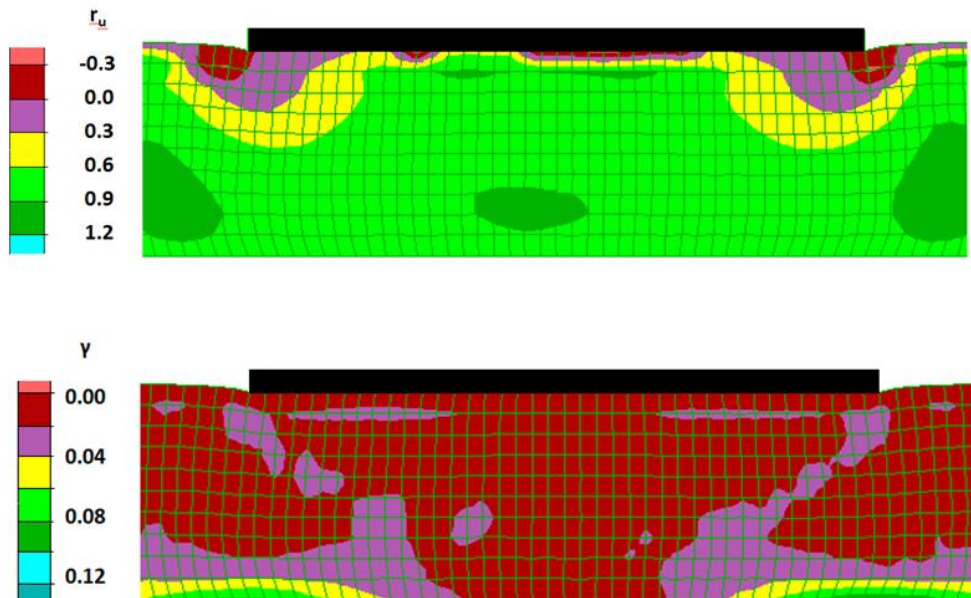
5.4 Απόκριση τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικών φορτίων

Στη παρούσα παράγραφο γίνεται μελέτη της αλληλεπίδρασης τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους με διαφορετικά φορτία έδρασης ανά θεμέλιο, σε όρους καθιζήσεων, στροφών, υπερπιέσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα μελετώνται διατάξεις θεμελίων εύρους $B = 20$ m και $B = 5$ m με μικρές κοινές ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5$ m. Τα φορτία έδρασης τους είναι είτε $q = 50$ kPa είτε $q = 200$ kPa. Η σύγκριση γίνεται ξανά με τα αποτελέσματα αναλύσεων μεμονωμένων θεμελίων αντίστοιχου εύρους και φορτίου.

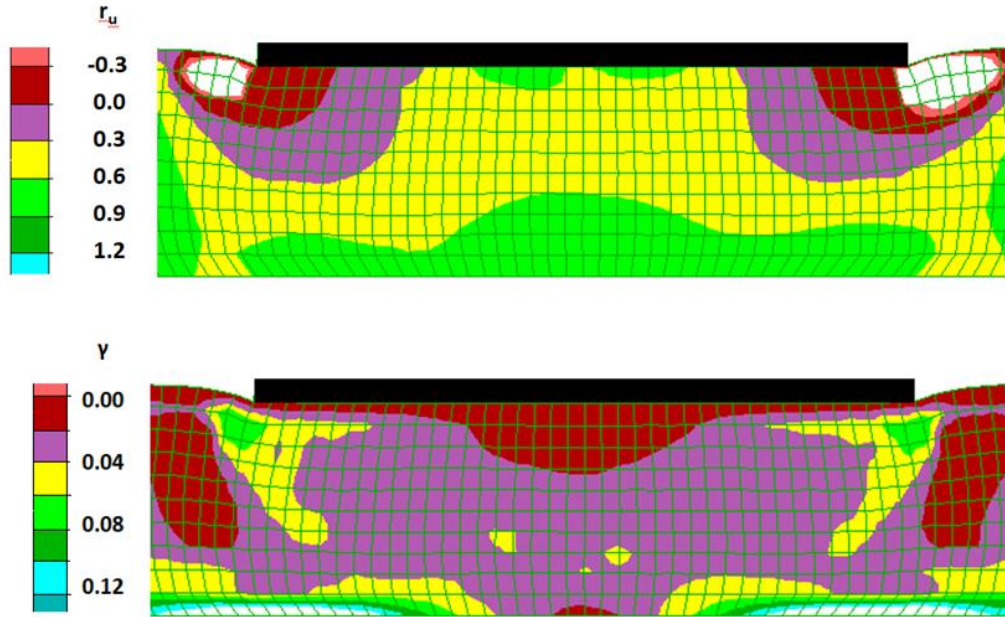
Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.17** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 5$ m, $B_2 = 20$ m, $B_3 = 5$ m με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5$ m και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50$ kPa, $q_2 = 200$ kPa, $q_3 = 50$ kPa. Δηλαδή τα ακραία θεμέλια είναι στενά/ελαφριά, ενώ το κεντρικό είναι ευρύ/βαρύ. Παρατηρούμε πως η αλληλεπίδραση καθοδηγείται από το κεντρικό ευρύ/βαρύ θεμέλιο, που μάλιστα καθιζάνει εντονότερα απ' ότι αν ήταν μεμονωμένο παραμένοντας οριζόντιο. Έτσι, τα ακραία στενά/ελαφριά θεμέλια σχεδόν ανυψώνονται λόγω της έντονης καθίζησης του κεντρικού ευρύ/βαρύ θεμελίου που μετατοπίζει εδαφική μάζα πλευρικά. Επιπλέον, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ακραία στενά/ελαφριά θεμέλια να στρίψουν προς το κεντρικό θεμέλιο (προς τα μέσα), και μάλιστα έντονα.



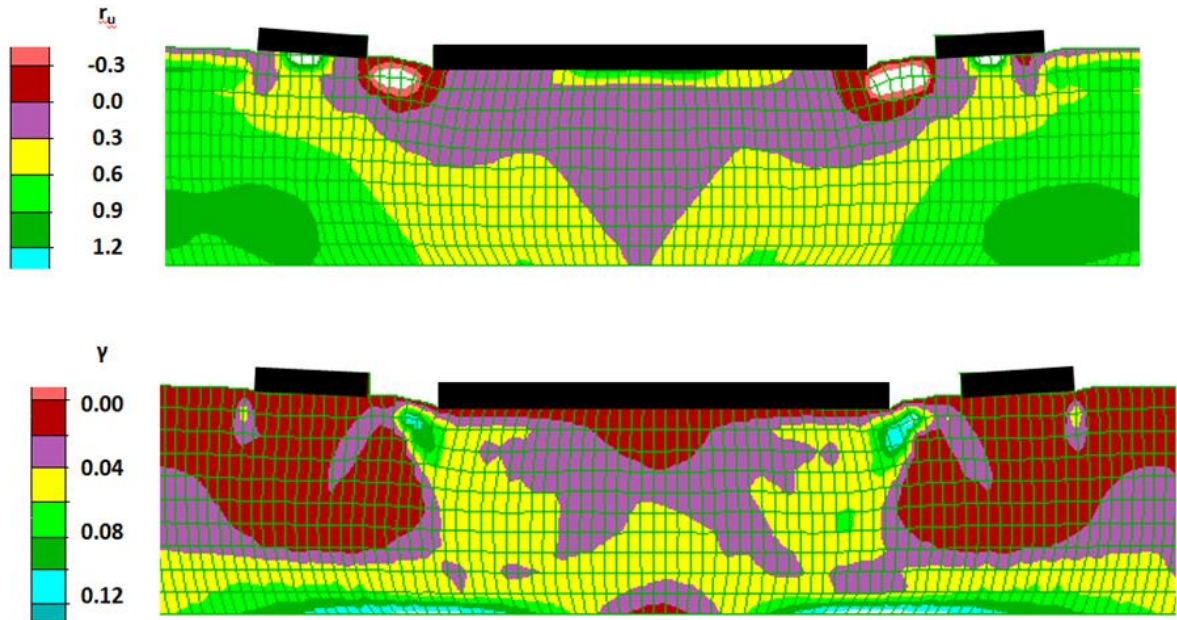
Σχήμα 5.17 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=5m, B_2=20m, B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 kPa, q_2 = 200 kPa, q_3 = 50 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια



Σχήμα 5.18 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$



Σχήμα 5.19 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μόνο θεμέλιο πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

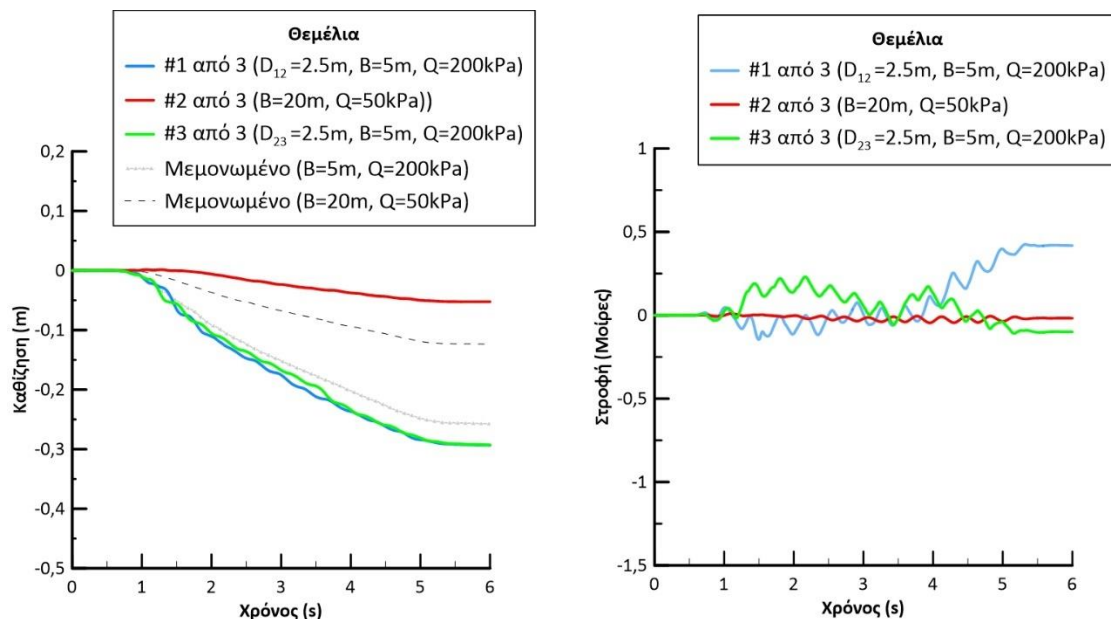


Σχήμα 5.20 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=5m$, $B_2=20m$, $B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$. Φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 kPa$, $q_2 = 200 kPa$, $q_3 = 50 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

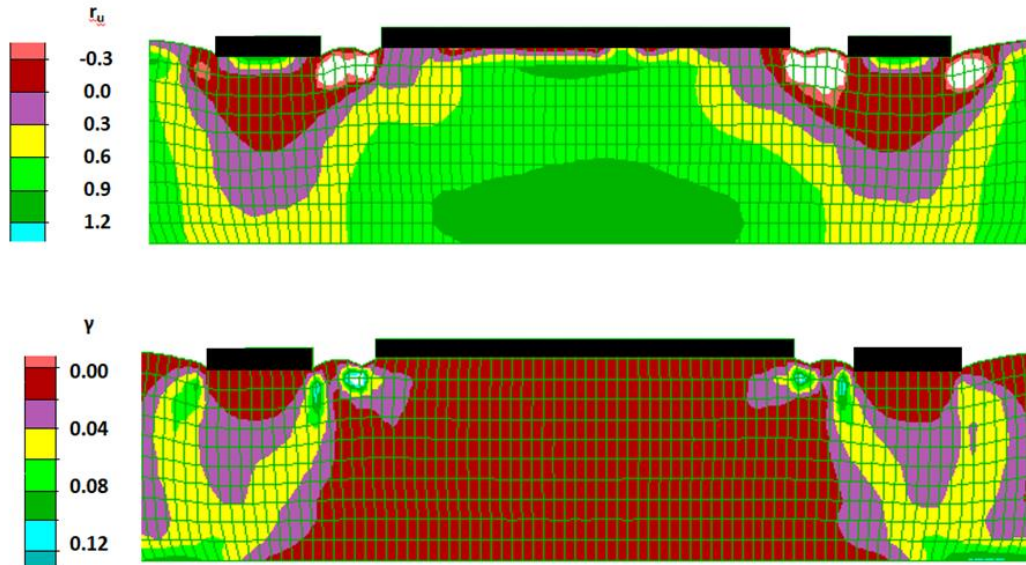
Στα **Σχήματα 5.18, 5.19** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ , για μεμονωμένα θεμέλια πλάτους $B = 20$ m με $q=50$ kPa, $q=200$ kPa αντίστοιχα. Επίσης, στο **Σχήμα 5.20** παρουσιάζονται οι ίδιες ισοκαμπύλες για την τριπλή διάταξη του **Σχήματος 5.17**. Κάτω από το κεντρικό ευρύ/βαρύ θεμέλιο της τριάδας φαίνεται πως ο μηχανισμός αστοχίας εξαπλώνεται έντονα μέχρι και τη βάση της στρώσης, γεγονός που εξηγεί την αύξηση της καθίζησης του.

Στη συνέχεια διερευνάται ο ανάποδος συνδυασμός σε όρους φορτίου, δηλαδή το κεντρικό θεμέλιο είναι ευρύ/ελαφρύ και τα ακραία είναι στενά/βαριά. Έτσι, στο **Σχήμα 5.21** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 5$ m, $B_2 = 20$ m, $B_3 = 5$ m με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5$ m και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200$ kPa, $q_2 = 50$ kPa, $q_3 = 200$ kPa. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, εδώ τα ακραία στενά/βαριά θεμέλια παρουσιάζουν σημαντική καθίζηση και μάλιστα μεγαλύτερη από το αντίστοιχο μεμονωμένο θεμέλιο, ενώ το ευρύ/ελαφρύ κεντρικό θεμέλιο καθιζάνει εμφανώς λιγότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο μεμονωμένο. Οι στροφές φαίνονται γενικώς αμελητέες, και προς τα έξω, τελικώς, για τα ακραία θεμέλια.

Στο **Σχήμα 5.22**, παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ για την εν λόγω τριάδα θεμελίων. Δε παρουσιάζεται σαφής μηχανισμός αστοχίας, παρά μόνο κάτω από τα ακριανά θεμέλια που εμφανίζουν τις μεγάλες καθιζήσεις.

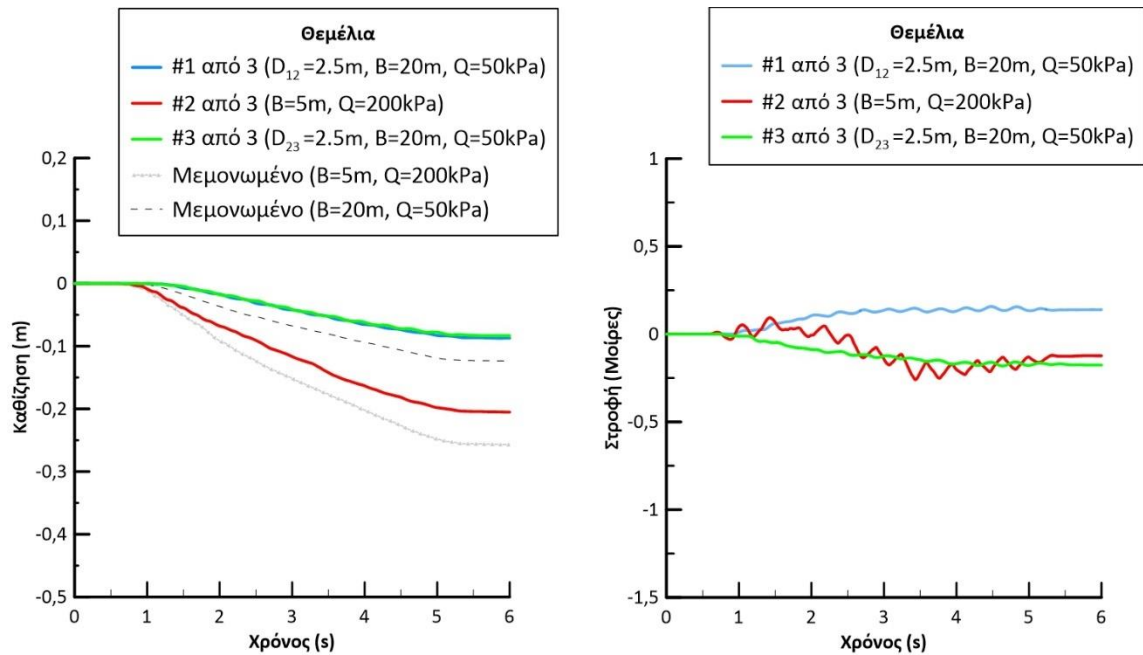


Σχήμα 5.21 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=5$ m, $B_2=20$ m, $B_3=5$ m, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5$ m και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200$ kPa, $q_2 = 50$ kPa, $q_3 = 200$ kPa σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10$ m. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια

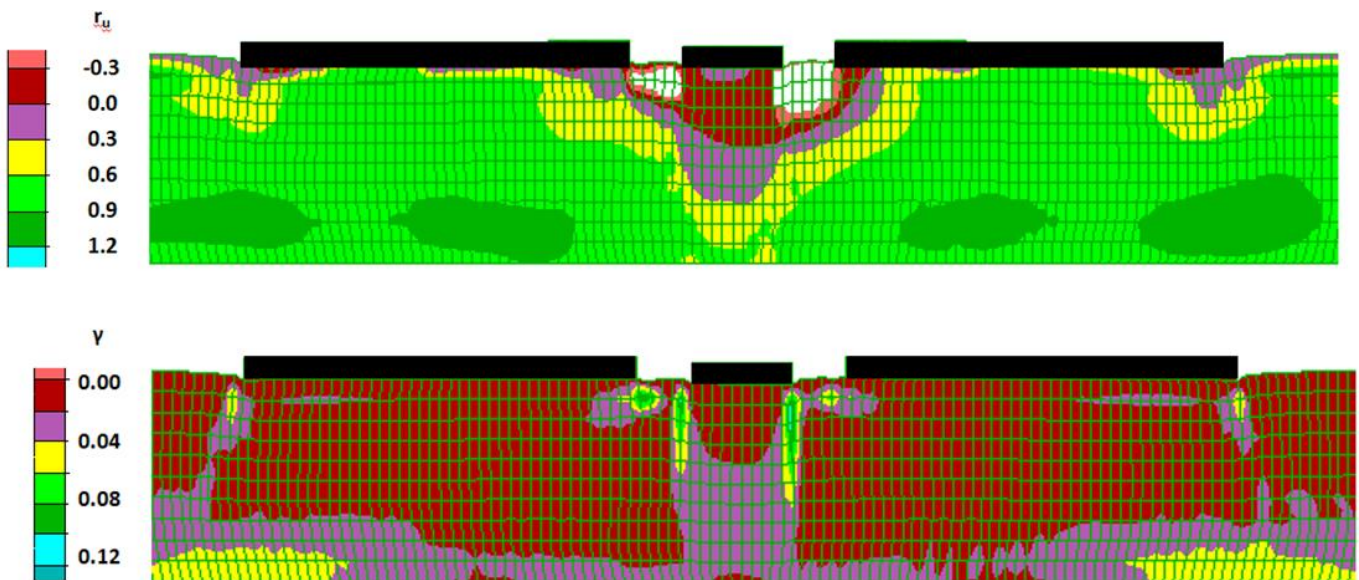


Σχήμα 5.22 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=5m$, $B_2=20m$, $B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$. Φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 \text{ kPa}$, $q_2 = 50 \text{ kPa}$, $q_3 = 200 \text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

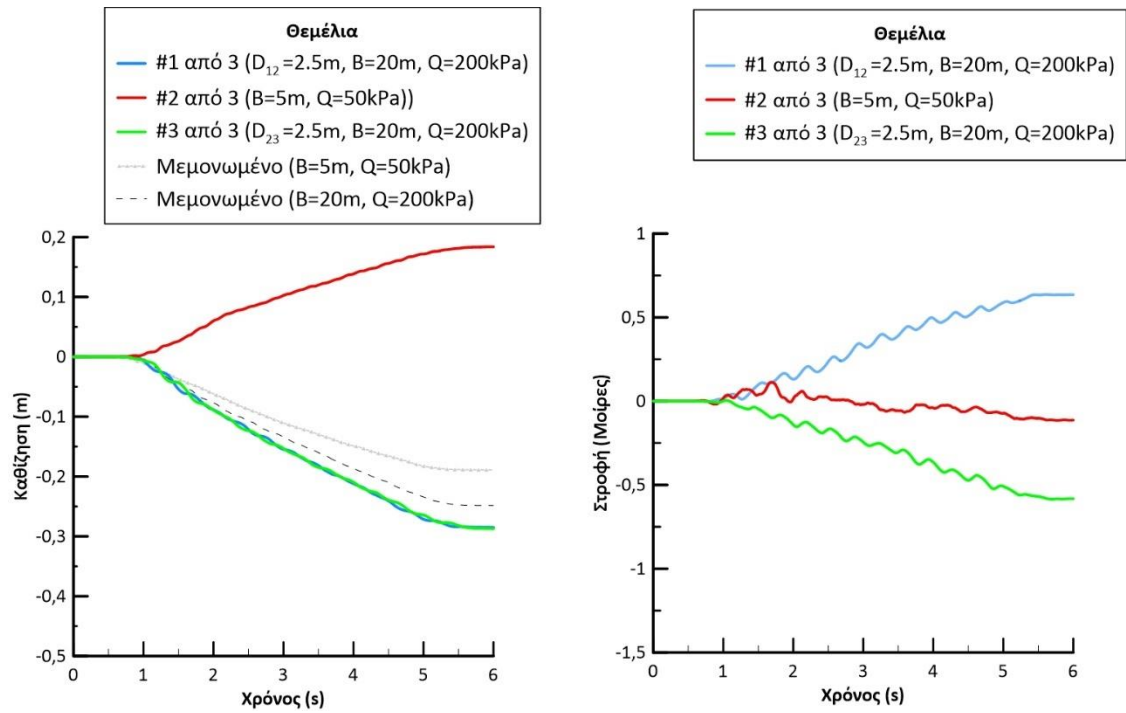
Στη συνέχεια, διερευνάται η περίπτωση που τα ακραία θεμέλια είναι ευρέα, και το κεντρικό είναι στενό. Έτσι, στα **Σχήματα 5.23 και 5.25** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 20m$, $B_2 = 5m$, $B_3 = 20m$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$, αλλά διαφορετικών συνδυασμών φορτίων έδρασης. Στο **Σχήμα 5.23** τα φορτία έδρασης ανά θεμέλιο είναι $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$ (το βαρύ στο κέντρο), ενώ στο **Σχήμα 5.25** τα φορτία είναι $q_1 = 200 \text{ kPa}$, $q_2 = 50 \text{ kPa}$, $q_3 = 200 \text{ kPa}$ αντίστοιχα, δηλαδή το ελαφρύ θεμέλιο είναι στο κέντρο. Η εικόνα που προκύπτει είναι εξόχως διαφορετική. Συγκεκριμένα, όταν το κεντρικό στενό θεμέλιο είναι βαρύ (**Σχήμα 5.23**), τότε η αλληλεπίδραση είναι αναμενόμενα ευμενής σε όρους καθιζήσεων, με τα ακραία ευρέα/ελαφριά θεμέλια να στρίβουν ελάχιστα και προς τα έξω. Αντιθέτως, όταν το κεντρικό στενό θεμέλιο είναι ελαφρύ (**Σχήμα 5.25**), τότε προκύπτει έως και ανύψωση του λόγω της εδαφικής μάζας που μετακινείται πλευρικά λόγω των ακραίων ευρέων/βαριών θεμελίων, των οποίων η καθίζηση αυξάνει ελαφρώς σε σχέση με το αντίστοιχο μεμονωμένο. Μάλιστα, στην περίπτωση αυτή τα ακραία ευρέα/βαριά θεμέλια στρίβουν προς τα έξω, και μάλιστα σημαντικά για ευρέα θεμέλια (που συνήθως εμφανίζουν αμελητέες στροφές). Γενικώς, η περίπτωση του **Σχήματος 5.25** κρίνεται ως έχουσα πολύ σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των θεμελίων.



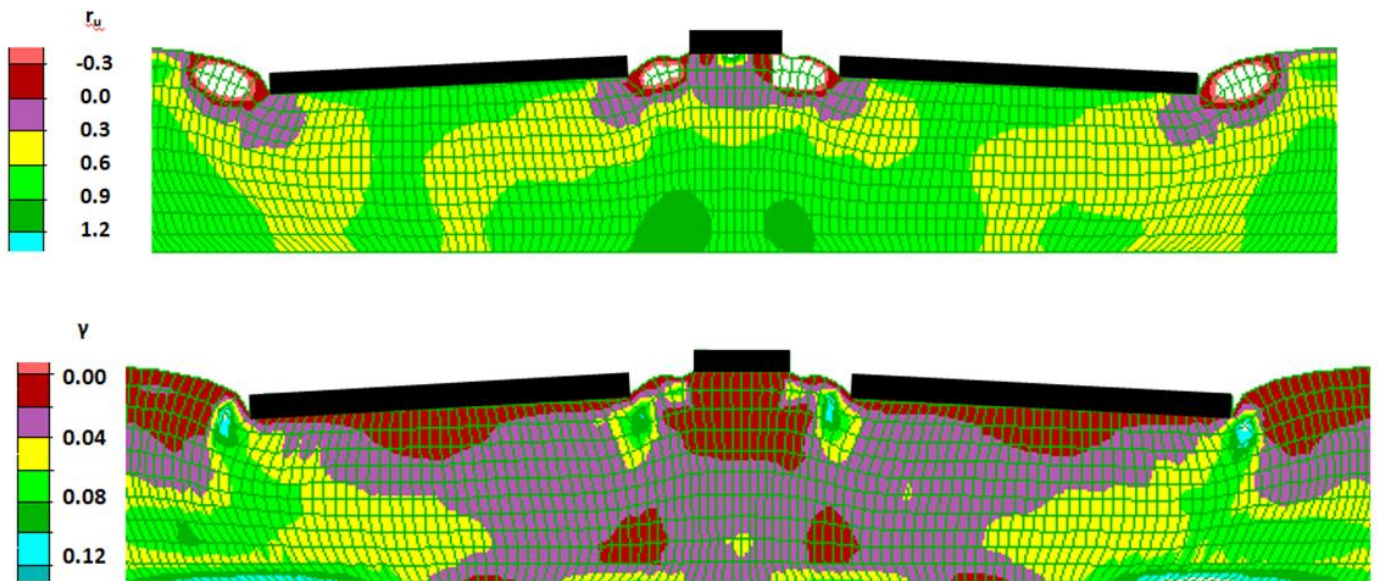
Σχήμα 5.23 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 kPa, q_2 = 200 kPa, q_3 = 50 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια



Σχήμα 5.24 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$. Φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 kPa, q_2 = 200 kPa, q_3 = 50 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$



Σχήμα 5.25 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$. Φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 kPa, q_2 = 50 kPa, q_3 = 200 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια



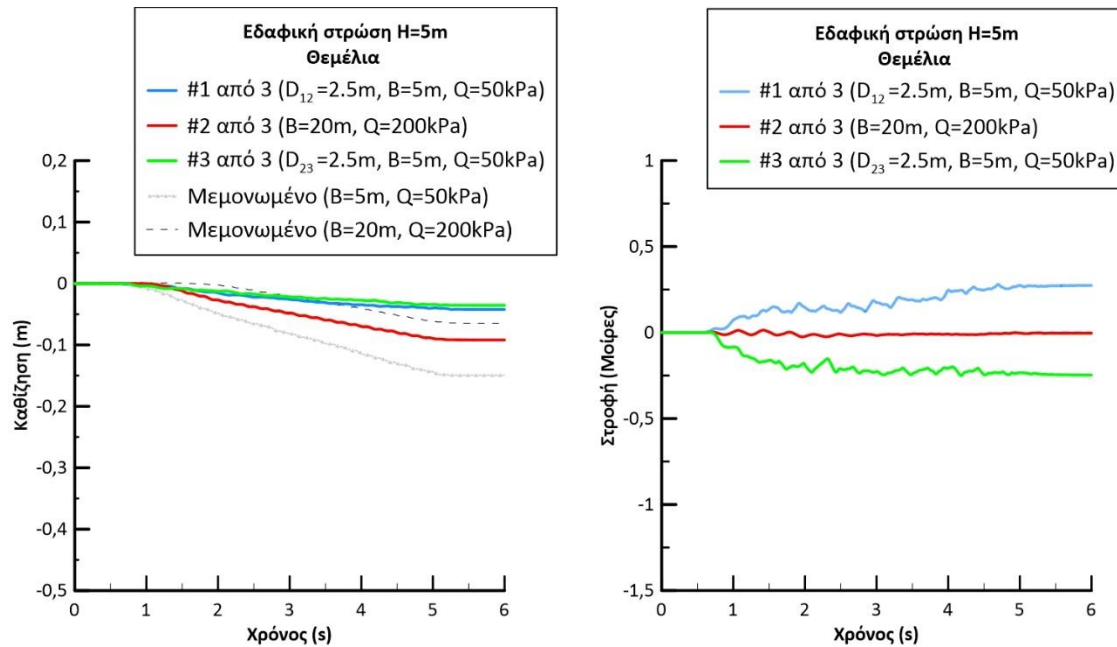
Σχήμα 5.26 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$. Φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 kPa, q_2 = 50 kPa, q_3 = 200 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=10m$

Στα **Σχήματα 5.24 και 5.26** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 20\text{m}$, $B_2 = 5\text{m}$, $B_3 = 20\text{m}$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5\text{m}$, με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$ και $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$, αντίστοιχα. Δηλαδή τα σχήματα αυτά αντιστοιχούν στις χρονοϊστορίες που παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.23 και 5.25**, αντίστοιχα. Στη πρώτη περίπτωση παρατηρούμε αμελητέα διατμητική παραμόρφωση, και υπερπιέσεις πόρων που δεν έχουν μεγάλες επιπτώσεις στην απόκριση της τριάδας. Όμως στο **Σχήμα 5.26** φαίνεται πως ο μηχανισμός αστοχίας εξαπλώνεται σε όλη την έκταση της εδαφικής στρώσης και εντονότερα στις εξωτερικές ακμές των ακραίων θεμελίων, γεγονός που συνδέεται με τις μεγάλες (προς τα έξω) στροφές τους. Παρατηρούμε ξανά αρνητικές υπερπιέσεις πόρων στα άκρα και στις ενδιάμεσες τους αποστάσεις μεταξύ των θεμελίων.

5.5 Επίδραση πάχους στρώσης στην απόκριση τριάδας διαφορετικών θεμελίων

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η σεισμική απόκριση, τριάδας θεμελίων διαφορετικού εύρους και διαφορετικών φορτίων, για ρευστοποιήσιμη στρώση μικρότερου πάχους, ήτοι $H = 5\text{m}$ αντί $H = 10\text{m}$ των προηγούμενων αναλύσεων. Η παρούσα παράγραφος είναι ανάλογη της παραγράφου 4.4 του **Κεφαλαίου 4**. Επανεξετάζονται, με τέτοιες πλέον υποκείμενες στρώσεις, οι τέσσερις περιπτώσεις τριάδων που παρουσιάστηκαν στη παράγραφο 5.4, καθώς αυτές εμφάνισαν τις πιο σημαντικές μορφές αλληλεπίδρασης. Σε αυτού του τύπου την διερεύνηση, όπως και στην αντίστοιχη παράγραφο 4.4, η σύγκριση θα γίνει μόνο με τα αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια, καθώς η σύγκριση με τα αντίστοιχα ζεύγη θεμελίων θα κάνει την διαδικασία πολύπλοκη και θα δυσχεράνει την εξαγωγή συμπερασμάτων.

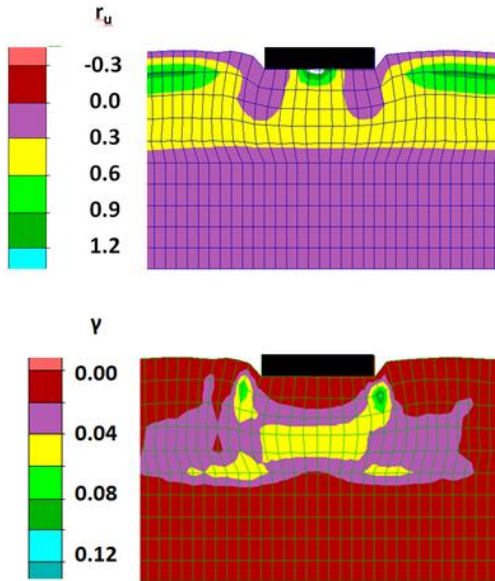
Έτσι, στο **Σχήμα 5.27** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 5\text{m}$, $B_2 = 20\text{m}$, $B_3 = 5\text{m}$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5\text{m}$ και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$. Η σύγκριση γίνεται με τα αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια. Η υποκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση έχει πάχος $H = 5\text{m}$, και αυτό οδηγεί σε μικρότερες καθιζήσεις σε σχέση με ό,τι παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.4, καθώς μειώνεται το πάχος της «συμπιεστής» στρώσης. Αντίστοιχα προκύπτει και σαφής μείωση της αλληλεπίδρασης των τριών θεμελίων, σε σχέση με την περίπτωση όπου $H = 10\text{m}$ (**Σχήμα 5.17**). Δηλαδή το κεντρικό ευρύ/βαρύ θεμέλιο καθιζάνοντας λιγότερο σε μια λεπτότερη «συμπιεστή» στρώση, μετατοπίζει λιγότερη εδαφική μάζα πλευρικά, οπότε επηρεάζονται λιγότερο τα ακραία στενά/ελαφριά θεμέλια, που εν τέλει στρίβουν προς τα έξω.



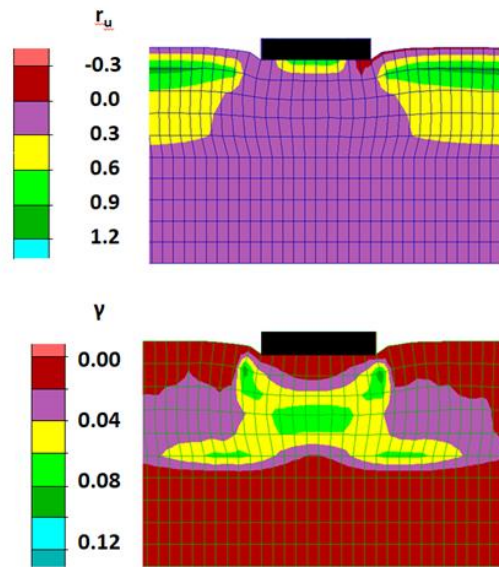
Σχήμα 5.27 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=5m$, $B_2=20m$, $B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια

Χάριν σύγκρισης, στα Σχήματα 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ , για μεμονωμένα θεμέλια πλάτους $B = 5m$ με $q=50 \text{ kPa}$, πλάτους $B = 5m$ με $q=200 \text{ kPa}$, πλάτους $B = 20m$ με $q=50 \text{ kPa}$, πλάτους $B = 20m$ με $q=200 \text{ kPa}$ αντίστοιχα. Είναι εμφανές πως οι μηχανισμοί αστοχίας κάτω από τα θεμέλια είναι συμμετρικοί και περιορίζονται στην επιφανειακή στρώση, όπως και οι μη-μηδενικές τιμές του λόγου r_u .

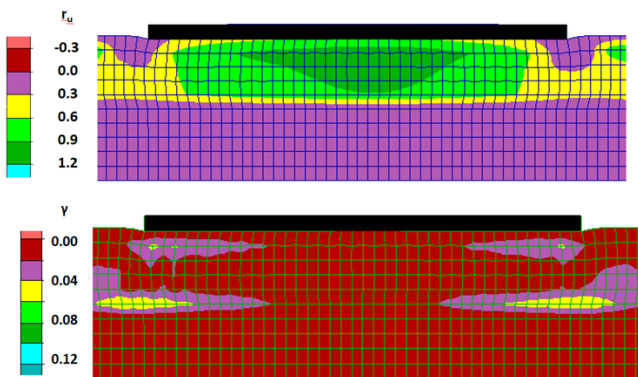
Επίσης στο Σχήμα 5.32 παρουσιάζονται οι ίδιες ισοκαμπύλες για την τριάδα θεμελίων πλάτους $B_1 = 5m$, $B_2 = 20m$, $B_3 = 5m$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$, με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$ και υποκείμενης ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχους $H = 5m$. Προκύπτει αλληλεμπλοκή των μηχανισμών αστοχίας υπό τα τρία θεμέλια, που περιορίζονται και πάλι στα πρώτα 5m του εδάφους.



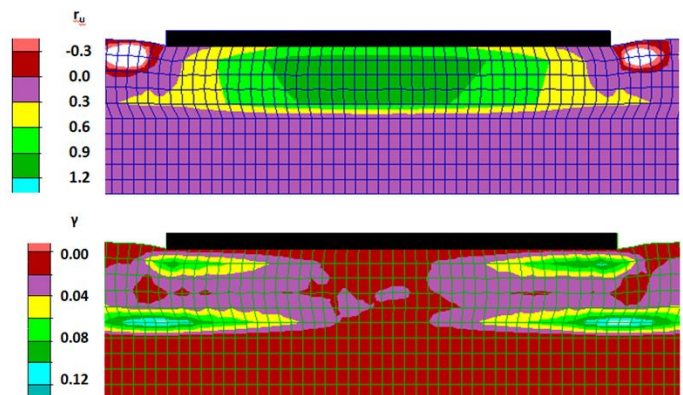
Σχήμα 5.28 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$



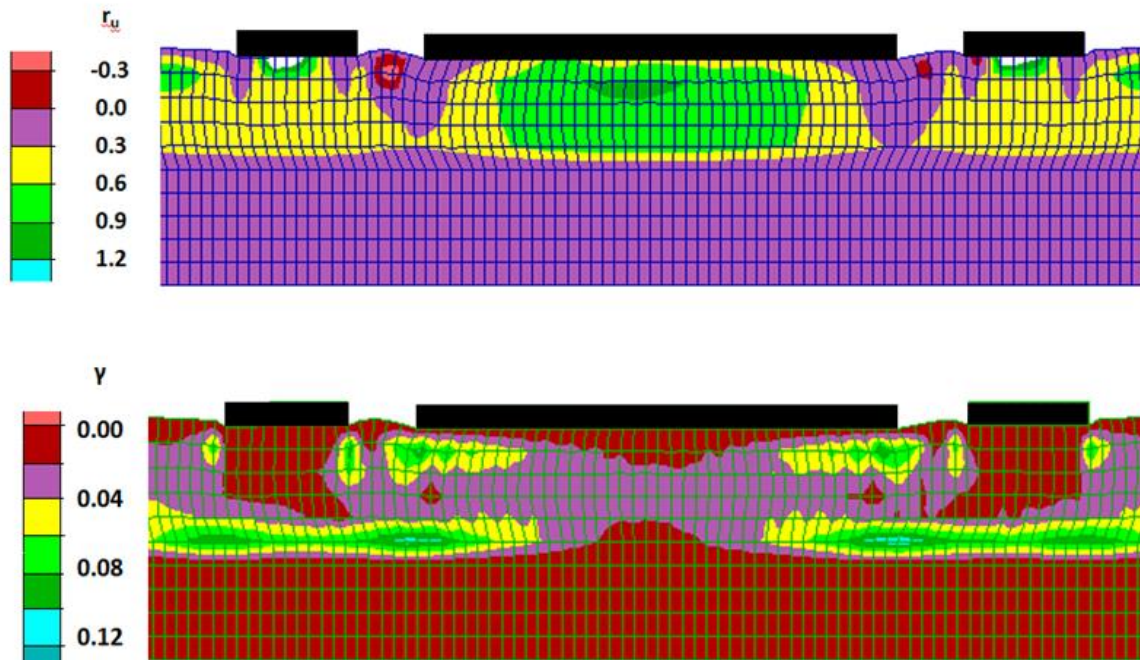
Σχήμα 5.29 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους $B=5m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$



Σχήμα 5.30 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=50kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$



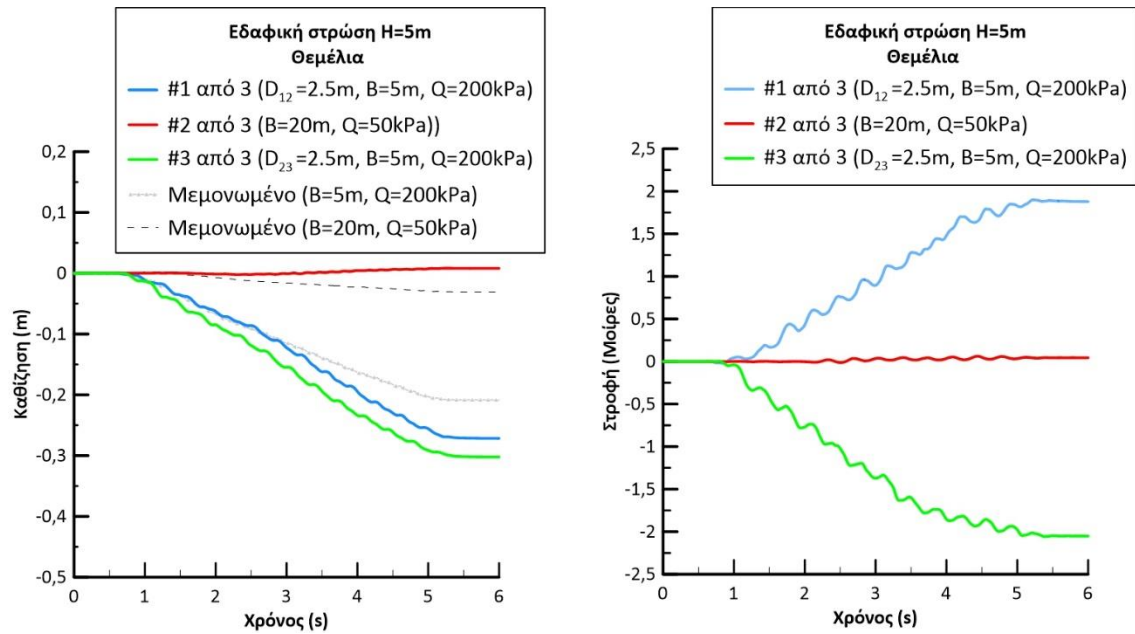
Σχήμα 5.31 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους $B=20m$, φορτίου έδρασης $q=200kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$



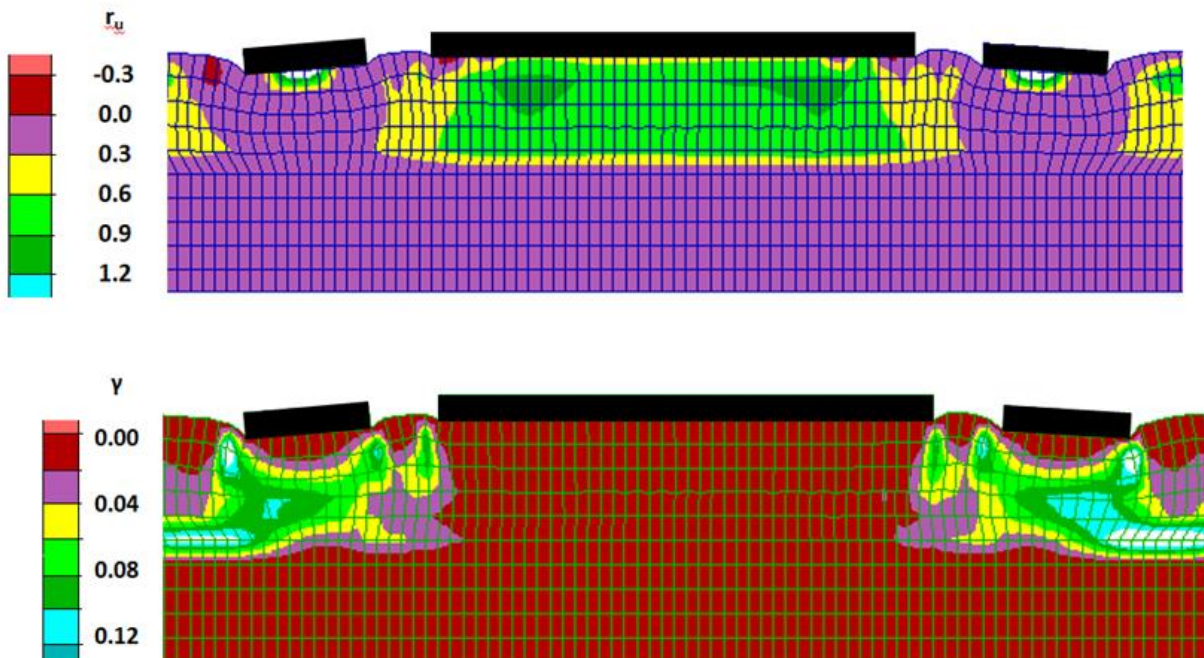
Σχήμα 5.32 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=5m$, $B_2=20m$, $B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$, σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$

Στο **Σχήμα 5.33** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 5m$, $B_2 = 20m$, $B_3 = 5m$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 \text{ kPa}$, $q_2 = 50 \text{ kPa}$, $q_3 = 200 \text{ kPa}$. Η σύγκριση γίνεται με τα αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια. Ποιοτικά δεν υπάρχει σημαντική διαφορά λόγω πάχους H στην αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, δηλαδή και πάλι το ελαφρύτερο κεντρικό θεμέλιο έχει απομείωση της καθίζησης του, έως και οριακή ανύψωση στην περίπτωση $H = 5m$, ενώ τα βαρύτερα ακραία θεμέλια εμφανίζουν δυσμενή αλληλεπίδραση. Εκεί που προκύπτει σημαντική διαφορά είναι στις στροφές των ακραίων θεμελίων, οι οποίες είναι προς τα έξω αλλά πολύ μεγαλύτερου μέτρου απ' ό,τι συμβαίνει για $H = 10m$ (**Σχήμα 5.21**).

Στο **Σχήμα 5.34** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ για την τριάδα θεμελίων του **Σχήματος 5.33**. Κάτω από όλη την έκταση του κεντρικού ευρέος/ελαφρύ θεμελίου δεν δημιουργείται σημαντική εδαφική διατμητική παραμόρφωση σε αντίθεση με τον χώρο υπό τα στενά/βαριά θεμέλια όπου παρατηρούμε υψηλές τιμές διατμητικής παραμόρφωσης γ . Σημαντικές διαφορές ανάμεσα στο κεντρικό και τα ακραία θεμέλια παρατηρούνται και σε όρους r_u .

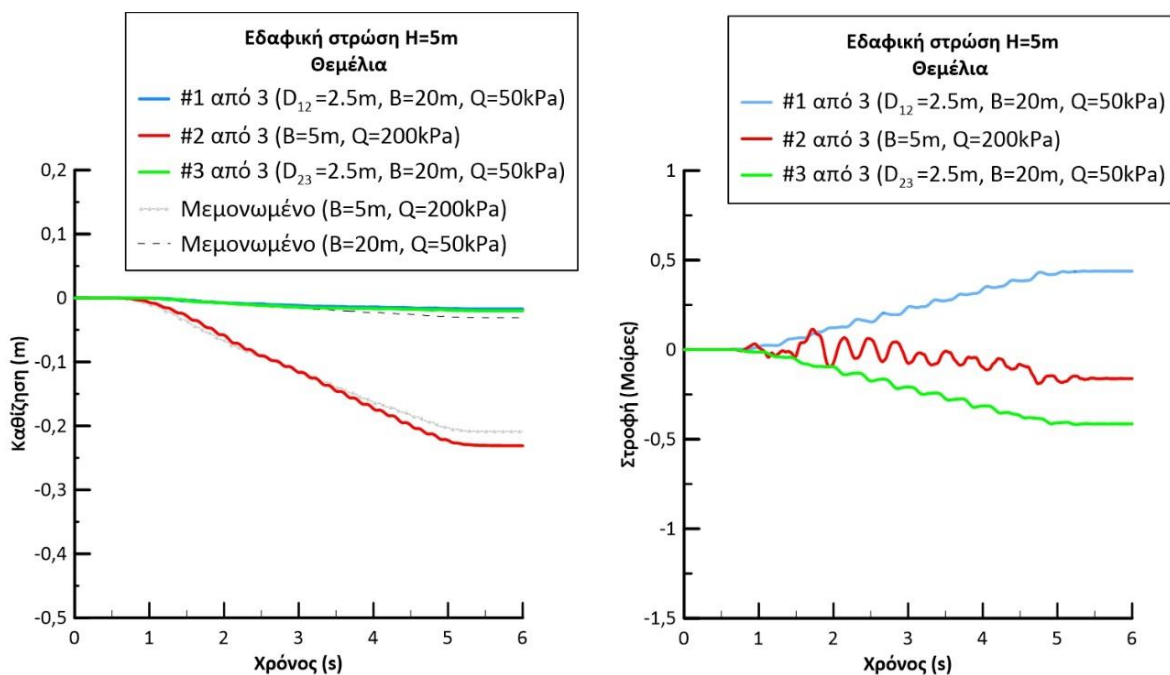


Σχήμα 5.33 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=5m, B_2=20m, B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 kPa, q_2 = 50 kPa, q_3 = 200 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια



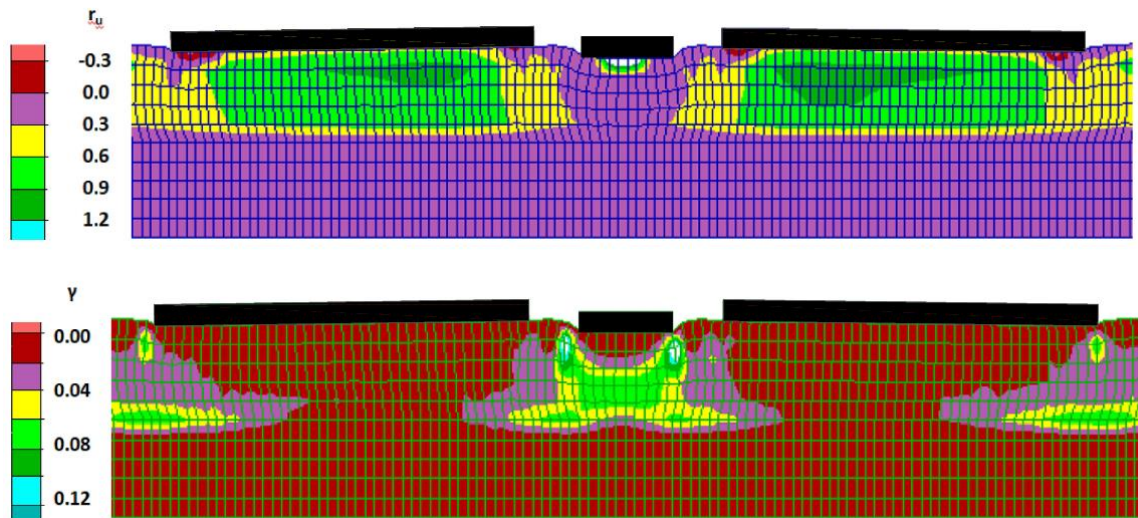
Σχήμα 5.34 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=5m, B_2=20m, B_3=5m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 kPa, q_2 = 50 kPa, q_3 = 200 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$

Στο **Σχήμα 5.35** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 20\text{m}$, $B_2 = 5\text{m}$, $B_3 = 20\text{m}$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5\text{m}$ και με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$. Η σύγκριση γίνεται με τα αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια. Η υποκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση έχει πάχος $H = 5\text{m}$ στο σχήμα αυτό, ενώ η αντίστοιχη περίπτωση για $H = 10\text{m}$ παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.23**. Προφανώς το κεντρικό στενό/βαρύ θεμέλιο καθιζάνει πολύ περισσότερο από τα ακραία ευρέα/ελαφριά, αλλά η ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης που παρατηρήθηκε για $H = 10\text{m}$ δεν προκύπτει για $H = 5\text{m}$. Αυτό που προκύπτει όμως είναι σαφώς μεγαλύτερες στροφές προς τα έξω των ακραίων θεμελίων, συγκριτικά με ό,τι παρατηρήθηκε για $H = 10\text{m}$.



Σχήμα 5.35 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=5\text{m}$, $B_2=20\text{m}$, $B_3=5\text{m}$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5\text{m}$ με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200\text{ kPa}$, $q_2 = 50\text{ kPa}$, $q_3 = 200\text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5\text{m}$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια

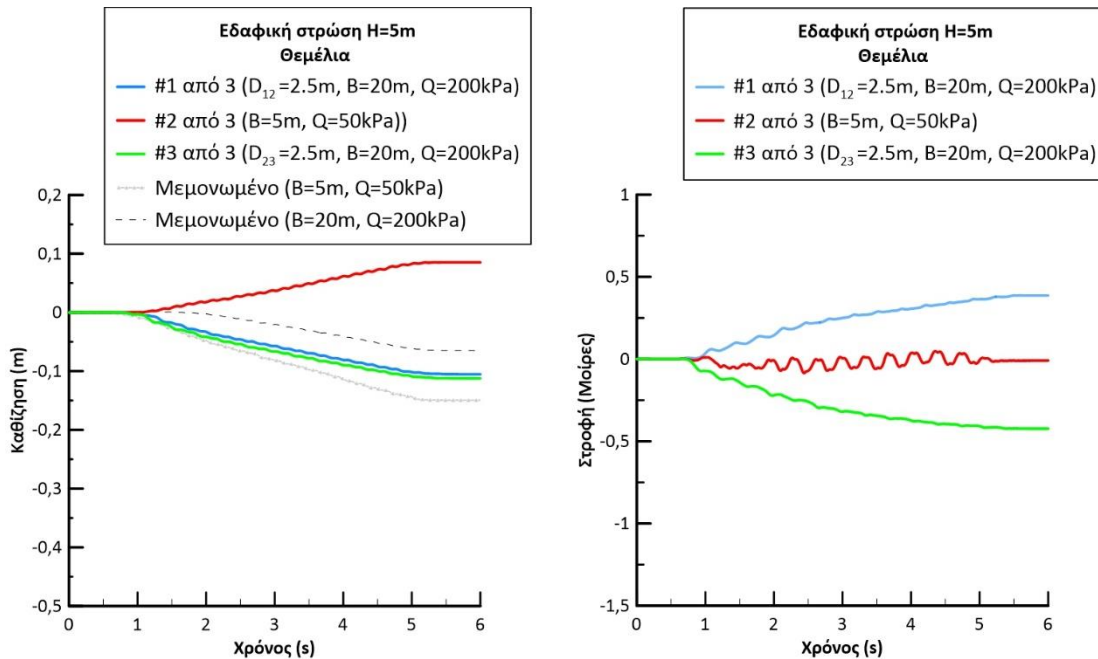
Στο **Σχήμα 5.36** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ για την τριάδα θεμελίων πλάτους $B_1 = 20\text{m}$, $B_2 = 5\text{m}$, $B_3 = 20\text{m}$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5\text{m}$, με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50\text{ kPa}$, $q_2 = 200\text{ kPa}$, $q_3 = 50\text{ kPa}$ και υποκείμενης ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχος $H = 5\text{m}$. Ο μηχανισμός αστοχίας καταλήγει εμπεδωμένος μόνο κάτω από το κεντρικό στενό/βαρύ θεμέλιο, καθώς και κάτω από τις έξω ακμές των ακραίων ευρέων θεμελίων λόγω της προς τα έξω στροφής τους.



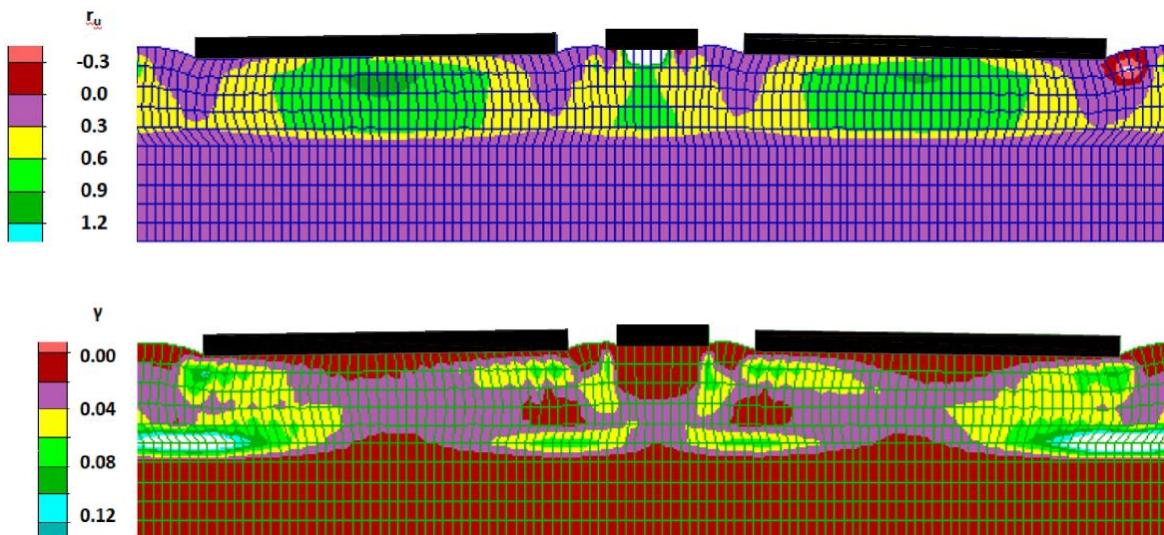
Σχήμα 5.36 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=20m$, $B_2=5m$, $B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 50 \text{ kPa}$, $q_2 = 200 \text{ kPa}$, $q_3 = 50 \text{ kPa}$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$

Στο **Σχήμα 5.37** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής τριάδας θεμελίων πλάτους $B_1 = 20m$, $B_2 = 5m$, $B_3 = 20m$ με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 \text{ kPa}$, $q_2 = 50 \text{ kPa}$, $q_3 = 200 \text{ kPa}$, όταν η ρευστοποιήσιμη στρώση έχει πάχος $H = 5m$. Η σύγκριση γίνεται με τα αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια, και πάλι, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση με την απόκριση της ίδιας τριάδας θεμελίων για $H = 10m$ (**Σχήμα 5.25**). Εδώ η αλληλεπίδραση δείχνει λιγότερο έντονη, απ' ό,τι για $H = 10m$, καθώς το κεντρικό στενό/ελαφρύ θεμέλιο ανυψώνεται μεν, αλλά λιγότερο, ενώ αντίστοιχα και τα ακραία ευρέα/βαριά θεμέλια στρίβουν προς τα έξω, αλλά λιγότερο.

Τέλος στο **Σχήμα 5.38** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή r_u και της διατμητικής παραμόρφωσης γ για την τριάδα θεμελίων του **Σχήματος 37**. Η κατανομή της διατμητικής παραμόρφωσης σε όρους γ , είναι εμφανώς πιο ομοιόμορφη σε όλη την έκταση της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Το ίδιο μπορούμε να συμπεράνουμε και για τις υπερπίεσεις πόρων που δημιουργούνται υπό από τα θεμέλια, καθώς κάτω από τα δύο ακραία ευρέα/βαριά θεμέλια η κατανομή των r_u είναι όμοια με αυτή του αντίστοιχου μεμονωμένου, επηρεάζοντας εμφανώς και το κεντρικό στενό/ελαφρύ θεμέλιο.



Σχήμα 5.37 Καθιζήσεις και στροφές τριάδας θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ και φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 kPa, q_2 = 50 kPa, q_3 = 200 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H=5m$. Σύγκριση με αντίστοιχα μεμονωμένα θεμέλια



Σχήμα 5.38 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος κάτω από τριάδα θεμελίων ευρών $B_1=20m, B_2=5m, B_3=20m$, με ενδιάμεσες αποστάσεις $D_{12} = D_{23} = 2.5m$ με φορτία έδρασης ανά θεμέλιο $q_1 = 200 kPa, q_2 = 50 kPa, q_3 = 200 kPa$ σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5m$

5.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η αλληλεπίδραση τριάδας διαφορετικών θεμελίων σε οριζόντια ρευστοποιήσιμη στρώση. Αρχικά παρουσιάστηκε η αλληλεπίδραση θεμελίων ίδιου εύρους μα διαφορετικού φορτίου, στη συνέχεια εκείνη για θεμέλια ίδιου φορτίου μα διαφορετικού εύρους και μετά η έμφαση δόθηκε στην αλληλεπίδραση θεμελίων που έχουν διαφορετικές τιμές και εύρους και φορτίου. Τέλος, έγινε ενδεικτική διερεύνηση και της επίδρασης του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης στην αλληλεπίδραση της τριάδας διαφορετικών θεμελίων. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου είναι τα κάτωθι:

(α) Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν υπήρχε συμμετρία στη διάταξη και ίδια (μικρή) απόσταση μεταξύ των τριών θεμελίων, απλά διαφορετικοί συνδυασμοί στο εύρος και το φορτίο του κεντρικού έναντι των ακραίων θεμελίων. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα ακραία θεμέλια συμπεριφέρονται όμοια (ίδια καθίζηση και κατά μέτρο στροφή), και το κεντρικό θεμέλιο διαφορετικά (άλλη καθίζηση και μηδενική στροφή). Γενικώς, η αλληλεπίδραση διαφορετικών θεμελίων είναι έντονη, και μπορεί να δημιουργήσει ακόμη και ανυψώσεις θεμελίων (π.χ., του κεντρικού), ή και πολύ μεγάλες στροφές (π.χ., των ακραίων). Η αλληλεπίδραση διαφορετικών θεμελίων χωρίς συμμετρία στη διάταξη είναι δύσκολο να προσεγγιστεί συστηματικά, και μάλλον κρίνεται ως αντικείμενο εξειδικευμένης κάθε φορά μελέτης.

(β) Σημασία για την απόκριση της συμμετρικής τριάδας θεμελίων δείχνει να έχει η σχέση της συνισταμένης κατακόρυφης δύναμης (πλάτος \times φορτίο) που φέρει το κεντρικό θεμέλιο, συγκριτικά με εκείνη του καθενός από τα όμοια ακραία θεμέλια. Όταν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων είναι μεγαλύτερη εκείνης του κεντρικού θεμελίου προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης στο κεντρικό θεμέλιο με μηδενική στροφή, ενώ τα ακραία θεμέλια εμφανίζουν ασθενή ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης και στροφή προς τα έξω. Όμως όταν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων είναι πολύ μεγαλύτερη του κεντρικού θεμελίου (π.χ., τουλάχιστον 4 φορές), τότε μπορεί να προκύψει έως και ανύψωση του κεντρικού θεμελίου που συνοδεύεται από ασθενή δυσμενή αλληλεπίδραση στις καθιζήσεις των ακραίων θεμελίων.

(γ) Όταν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων είναι μικρότερη (ή οριακά ίση) εκείνης του κεντρικού θεμελίου προκύπτει συνήθως ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης σε όλα τα θεμέλια, και στροφή μόνο των ακραίων θεμελίων προς τα έξω. Όμως, αν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων είναι πολύ μικρότερη του κεντρικού θεμελίου (π.χ., πάνω από 4 φορές) τότε η προς τα έξω στροφή των ακραίων θεμελίων εκμηδενίζεται ή και αντιστρέφεται, με κόστος τη δυσμενή αλληλεπίδραση στην καθίζηση του κεντρικού θεμελίου.

(δ) Όπως παρατηρήθηκε και στην απόκριση των ίδιων θεμελίων, η μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης, από $H = 10\text{m}$ σε 5m , μειώνει τις καθιζήσεις των αντίστοιχων θεμελίων, καθώς μειώνεται το πάχος της «συμπιεστής» στρώσης. Η ένταση της αλληλεπίδρασης σε όρους καθίζησης δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από τη μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Σε ό,τι αφορά στις στροφές τους, υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση του πάχους H στις τιμές, και μάλιστα οδηγεί σε στροφή των ακραίων θεμελίων πάντα προς τα έξω, αν και χρειάζονται περισσότερες αναλύσεις για να προκύψει ασφαλέστερο συμπέρασμα.

6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Βασικά συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης τριάδας επιφανειακών άκαμπτων θεμελίων επί κορεσμένης οριζόντιας εδαφικής στρώσης υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Η εν λόγω διερεύνηση έγινε αριθμητικά, επί τη βάση 37 συζευγμένων δυναμικών μη-γραμμικών αναλύσεων εδαφικής απόκρισης με το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC, κάνοντας χρήση του σοφιστευμένου καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND. Διερευνήθηκε η απόκριση θεμελίων πλάτους $B = 5$ και 20m , με φορτίο έδρασης $q = 50$ έως 200 kPa , σε αποστάσεις $D = 2.5$ έως 20m , πάνω σε ρευστοποιήσιμη στρώση $H = 5$ και 10m , σε διάφορους συνδυασμούς. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα κάτωθι:

(α) Όταν υπάρχει συμμετρία στη διάταξη και το φορτίο των τριών θεμελίων (δηλαδή ίδια τα δύο ακραία και πιθανώς διαφορετικό σε εύρος ή φορτίο το κεντρικό), τα ακραία θεμέλια συμπεριφέρονται όμοια (ίδια καθίζηση και κατά μέτρο στροφή), και το κεντρικό θεμέλιο διαφορετικά (άλλη καθίζηση και μηδενική στροφή). Η αλληλεπίδραση διαφορετικών θεμελίων χωρίς συμμετρία στη διάταξη είναι δύσκολο να προσεγγιστεί συστηματικά, και μάλλον κρίνεται ως αντικείμενο εξειδικευμένης κάθε φορά μελέτης.

(β) Σημασία για την απόκριση μιας συμμετρικής τριάδας θεμελίων δείχνει να έχει η σχέση της συνισταμένης κατακόρυφης δύναμης (πλάτος \times φορτίο) που φέρει το κεντρικό θεμέλιο, συγκριτικά με εκείνη του καθενός από τα όμοια ακραία θεμέλια.

(γ) Όταν τα τρία θεμέλια σε συμμετρική διάταξη είναι ίδια, η αλληλεπίδραση τους λειτουργεί σχετικά ευεργετικά, αλλά είναι μικρής έντασης. Συγκεκριμένα, η καθίζηση του κεντρικού θεμελίου είναι πάντα μικρότερη από αυτή που θα είχε αν ήταν μεμονωμένο, ενώ τα ακριανά θεμέλια έχουν πρακτικώς τις ίδιες τελικές καθιζήσεις που θα είχαν αν ήταν μεμονωμένα. Ως προς την στροφή, η αλληλεπίδραση τους είναι πιο έντονη και μπορεί να γίνει αρκετά δυσμενής. Γενικώς προκύπτει σημαντική στροφή των ακραίων θεμελίων προς τα έξω (του αριστερού προς τα αριστερά και του δεξιού προς τα δεξιά). Αντιθέτως, στο κεντρικό θεμέλιο η στροφή προκύπτει αμελητέα, με εξαίρεση την περίπτωση που ένα από τα ακραία θεμέλια είναι πολύ κοντά, όταν και στρίβει προς αυτό. Σε κάθε περίπτωση, η αύξηση της απόστασης μεταξύ των θεμελίων μειώνει την αλληλεπίδρασή τους. Για παράδειγμα, αποστάσεις 20m έχουν εξαλείψει την αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης και έχουν απομειώσει έντονα (αλλά όχι εξαλείψει) την αλληλεπίδραση σε όρους στροφής.

(δ) Όταν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων σε συμμετρική διάταξη είναι μεγαλύτερη εκείνης του κεντρικού θεμελίου, προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης στο κεντρικό θεμέλιο με μηδενική στροφή, ενώ τα ακραία θεμέλια εμφανίζουν ασθενή αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης και στροφή προς τα έξω. Βέβαια αν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων είναι πολύ μεγαλύτερη του κεντρικού θεμελίου (π.χ., τουλάχιστον 4 φορές), τότε μπορεί να προκύψει έως και ανύψωση του κεντρικού θεμελίου που συνοδεύεται από ασθενή δυσμενή αλληλεπίδραση στις καθιζήσεις των ακραίων θεμελίων.

(ε) Όταν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων σε συμμετρική διάταξη είναι μικρότερη (ή οριακά ίση) εκείνης του κεντρικού θεμελίου προκύπτει συνήθως ευμενής αλληλεπίδραση σε όρους καθίζησης σε όλα τα θεμέλια, και στροφή μόνο των ακραίων θεμελίων προς τα έξω. Όμως, αν η συνισταμένη δύναμη των ακραίων θεμελίων είναι πολύ μικρότερη του κεντρικού θεμελίου (π.χ., πάνω από 4 φορές) τότε η προς τα έξω στροφή των ακραίων θεμελίων εκμηδενίζεται ή και αντιστρέφεται, με κόστος τη δυσμενή αλληλεπίδραση στην καθίζηση του κεντρικού θεμελίου.

(στ) Σε κάθε περίπτωση, η μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης μειώνει τις καθιζήσεις των αντίστοιχων θεμελίων, καθώς μειώνεται το πάχος της «συμπιεστής» στρώσης. Όμως, η ένταση της αλληλεπίδρασης σε όρους καθίζησης δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από τη μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Ταυτόχρονα, υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση του πάχους της στρώσης στις τιμές των στροφών, και ένα μειωμένο πάχος μπορεί να οδηγήσει σε στροφή των ακραίων θεμελίων πάντα προς τα έξω, αν και χρειάζονται περισσότερες αναλύσεις για να προκύψει ασφαλές συμπέρασμα.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία και τα συμπεράσματα της ανέδειξαν ένα πρόβλημα πολυ-παραμετρικό, 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 τις θεμελιολωρίδες 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 πολλαπλών θεμελίων, και ειδικά τετραγωνικών θεμελίων.
- Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ομοιόμορφη αμμώδης στρώση, δηλαδή απευθείας θεμελίωση επί του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Προτείνεται να γίνουν διερευνήσεις και για άλλες γεωτεχνικές συνθήκες. Για παράδειγμα, μπορούν να γίνουν αναλύσεις για δίστρωτο εδαφικό σχηματισμό αποτελούμενο από μία επιφανειακή στρώση λεπτόκοκκου εδάφους (άργιλος) εδρασμένη σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, με στόχο την ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης όταν η ρευστοποιήσιμη στρώση είναι σε κάποιο βάθος.
- Τέλος, χρήσιμη κρίνεται και η εξέταση περιπτώσεων όπου η διέγερση δεν είναι αρμονική, αλλά προκύπτει από πραγματικές σεισμικές καταγραφές. Τέτοιου τύπου αναλύσεις είναι σαφώς πιο ρεαλιστικές, ώστε να γίνει πιο εμπεριστατωμένη η μελέτη του φαινομένου SSSI₃₊.

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*
- ❖ Been, K. and Jefferies, M.G. (1985): “A State Parameter for Sands”, *Géotechnique*, 35, 99-112.
- ❖ 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
- ❖ Elgamal A., Yang Z. and Parra E. (2002): “Computational modeling of cyclic mobility and post – liquefaction site response”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 22, No. 4, pp 259-271
- ❖ 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
- ❖ Hwang Y., Ramirez J., Dashti S., Kirkwood P., Liel A., Camata G. and Petracca M. (2021): “Seismic Interaction of Adjacent Structures on Liquefiable Soils: Insight from Centrifuge and Numerical Modeling”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, American Society of Civil Engineers
- ❖ Hwang Y., Dashti S. (2023): “Seismic Interactions among Multiple Structures Founded on Liquefiable Soils in a City Block”
- ❖ Itasca (2011): “Fast Lagrangian Analysis of Continua”, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minesota
- ❖ Karamitros D. (2010): “Development of a numerical algorithm for the dynamic elastoplastic analysis of geotechnical structures in two (2) and three (3) dimensions”, PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil engineering, Geotechnical Department
- ❖ 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
- ❖ 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

- ❖ Tsepelidou N. (2021): “Structure-soil-structure interaction in a seismic liquefaction regime”, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil engineering, Geotechnical Department
- ❖ Yang Z. and Elgamal A. (2008): “Multi – surface cyclic plasticity sand model with lode angle effect”, Geotechnical and Geological Engineering Vol. 26, No. 3, pp 335-348