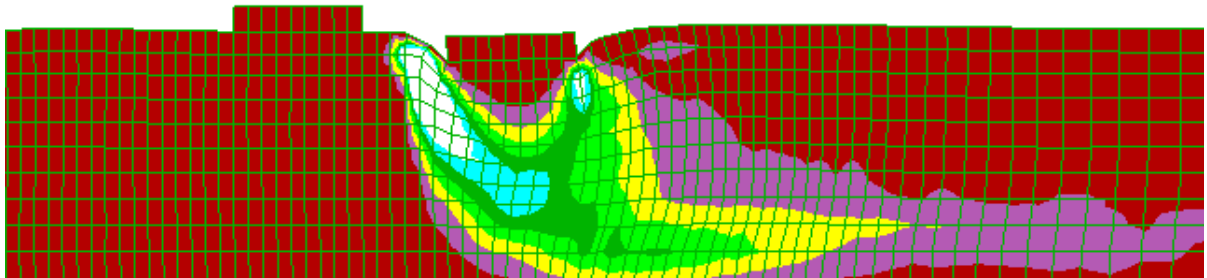




Διπλωματική Εργασία  
**Ξυπολιά Κωνσταντίνα**

Επιβλέπων  
**Παπαδημητρίου Αχιλλέας**  
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

**ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – ΕΔΑΦΟΥΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΟ  
ΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΕ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ**



**STRUCTURE – SOIL – STRUCTURE INTERACTION IN LIQUEFIABLE SOIL WITH AND  
WITHOUT IMPROVEMENT WITH GRAVEL PILES**

Diploma Thesis  
**Χυπολιά Konstantina**

Supervised by  
**Papadimitriou Achilleas**  
Associate Professor NTUA

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

## **Ευχαριστίες**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Παπαδημητρίου Αχιλλέα για την συνεχή καθοδήγησή του και την άμεση απόκρισή του σε προβλήματα ή απορίες που προέκυπταν κατά την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξη που έδειξαν μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

# Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
1.1 Αντικείμενο.....	9
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	9
<b>2. Βιβλιογραφική επισκόπηση .....</b>	<b>11</b>
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Λειτουργία χαλικοπασσάλων.....	11
2.3 Αλληλεπίδραση κατασκευών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.....	19
<b>3. Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων .....</b>	<b>28</b>
3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Λογισμικό και καταστατικό προσομοίωμα.....	28
3.3 Λεπτομέρειες προσομοίωσης.....	30
3.3.1 Έδαφος.....	30
3.3.2 Θεμέλια.....	30
3.3.3 Κάνναβος.....	31
3.3.4 Χαλικοπάσσαλοι.....	32
3.3.5 Σεισμική διέγερση.....	34
3.3.6 Συνοριακές συνθήκες.....	34
3.4 Παραμετρική διερεύνηση.....	35
<b>4. Αλληλεπίδραση θεμελίων ιδίου φορτίου, με και χωρίς βελτίωση έναντι ρευστοποίησης .....</b>	<b>36</b>
4.1 Εισαγωγή.....	36
4.2 Απόκριση μεμονωμένου θεμελίου, βελτιωμένου ή μη.....	38
4.2.1 Απόκριση μεμονωμένου μη βελτιωμένου θεμελίου.....	38
4.2.2 Απόκριση μεμονωμένου βελτιωμένου θεμελίου.....	39
4.3 Απόκριση δίδυμων θεμελίων, κοινά βελτιωμένων και μη.....	41
4.3.1 Απόκριση δίδυμων μη βελτιωμένων θεμελίων.....	42
4.3.2 Απόκριση δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων.....	46
4.4 Απόκριση δίδυμων θεμελίων χωρίς κοινή βελτίωση.....	51
4.5 Σύνοψη χαρακτηριστικών δίδυμων θεμελίων.....	59

<b>5. Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού φορτίου, με και χωρίς βελτίωση έναντι ρευστοποίησης.....</b>	<b>61</b>
5.1 Εισαγωγή .....	61
5.2 Απόκριση μεμονωμένων θεμελίων, βελτιωμένων ή μη .....	63
5.2.1 Απόκριση μεμονωμένων μη βελτιωμένων θεμελίων .....	63
5.2 Απόκριση μεμονωμένων βελτιωμένων θεμελίων .....	66
5.3 Απόκριση ζεύγους θεμελίων, κοινά βελτιωμένων και μη .....	69
5.3.1 Απόκριση ζεύγους μη βελτιωμένων θεμελίων .....	69
5.3.2 Απόκριση ζεύγους βελτιωμένων θεμελίων .....	76
5.4 Απόκριση ζεύγους θεμελίων μη κοινά βελτιωμένων .....	82
5.5 Σύνοψη απόκρισης ζεύγους θεμελίων διαφορετικού φορτίου .....	98
<b>6. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....</b>	<b>102</b>
6.1 Βασικά Συμπεράσματα .....	103
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	105
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>106</b>

## Περίληψη

Η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται κατά την επιβολή ισχυρής σεισμικής δόνησης σε κορεσμένα χαλαρά χονδρόκοκκα εδάφη και έχει ως αποτέλεσμα τη δραματική μείωση της αντοχής και της στιβαρότητάς τους. Αν υπάρχουν κατασκευές επί ρευστοποιήσιμου εδάφους, τότε αυτές υπόκεινται σε σεισμικές καθιζήσεις ή/και στροφές που μπορούν να αποδειχτούν καταστροφικές. Σε αστικό περιβάλλον, οι κατασκευές σπάνια είναι μεμονωμένες, οπότε προκύπτει αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI, Structure - Soil – Structure Interaction), η οποία γίνεται πιο περίπλοκη αν το έδαφος θεμελίωσης μίας ή και των δύο γειτονικών κατασκευών έχει βελτιωθεί (π.χ., με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων) έναντι ρευστοποίησης.

Μέσω του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC, πραγματοποιήθηκαν 2D μη γραμμικές δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις για τη διερεύνηση της απόκρισης γειτονικών θεμελιολωρίδων επί ρευστοποιήσιμου εδάφους όπου ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια έχουν βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων. Το έδαφος ήταν οριζόντια στρώση ομοιόμορφης λεπτής άμμου σχετικής πυκνότητας  $D_r = 45\%$  και πάχους  $H = 10\text{ m}$ , ενώ ο κάρναβος χαλικοπασσάλων ήταν πυκνός και προσέφερε ενίσχυση και στράγγιση στο φυσικό έδαφος. Το φυσικό έδαφος και οι χαλικοπάσσαλοι προσομοιώθηκαν με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA\_SAND. Η διέγερση ήταν αρμονική με μέγιστη επιτάχυνση βάσης  $a_{\max} = 0.2\text{ g}$ . Στην επιφάνεια του εδάφους θεωρήθηκαν άκαμπτα γειτονικά δίδυμα θεμέλια, δηλαδή ίδιου πλάτους ( $B = 5\text{ m}$ ) και ίδιου κεντρικού ομοιόμορφου φορτίου έδρασης ( $q = 100\text{ kPa}$ ), σε διάφορες τιμές της μεταξύ τους απόστασης  $D$  ( $= 2.8\text{ m}, 5\text{ m}, 10\text{ m}$ ), για περιπτώσεις όπου ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια έχουν βελτίωση με χαλικοπασσάλους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η προσομοιωμένη βελτίωση με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων απομειώνει τις καθιζήσεις μεμονωμένου θεμελίου κατά 90% περίπου. Έπειτα, έγιναν οι ίδιες αναλύσεις, αλλά για ζεύγος θεμελίων ίδιου πλάτους  $B$ , αλλά διαφορετικών φορτίων,  $q_1 = 50\text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200\text{ kPa}$  (βαρύ), ώστε να διερευνηθεί και η επιρροή της διαφορετικότητας του φορτίου έδρασης στην αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων.

Τα κύρια μεγέθη ενδιαφέροντος είναι οι σεισμικές καθιζήσεις και στροφές των θεμελίων στο τέλος της διέγερσης. Για την ποσοτικοποίηση και ευκολότερη σύγκριση των καθιζήσεων, χρησιμοποιήθηκε ο λόγος καθιζήσεων  $z_{\text{SSSI}}/z$ , όπου  $z_{\text{SSSI}}$  είναι η καθίζηση του κάθε θεμελίου ενός ζεύγους, ενώ  $z$  είναι η καθίζηση του αντίστοιχου μεμονωμένου θεμελίου. Ως προς τις παραμένουσες στροφές  $\theta$ , καθώς από πλευράς μηχανικού δεν έχει σημασία το πρόσημο τους (συγκλίνουσες ή αποκλίνουσες) στα ζεύγη θεμελίων λήφθηκαν υπόψη οι απόλυτες τιμές τους  $|\theta|$ . Επισημαίνεται ότι για μεμονωμένα θεμέλια οι στροφές είναι πρακτικά μηδενικές, ενώ γενικότερα αξιοσημείωτες στροφές θεωρούνται μόνο όσες είναι  $|\theta| \geq 0.3^\circ$ .

Από τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης γειτονικών δίδυμων θεμελίων (ίδιου φορτίου και πλάτους), προκύπτει εύρος λόγου καθιζήσεων  $z_{\text{SSSI}}/z = 0.69 - 1.95$  και στροφές  $|\theta|$  έως 2.4. Αξιοσημείωτες στροφές αναμένονται μόνο στο μη βελτιωμένο θεμέλιο του ζεύγους, ενώ η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων είναι σε όλες τις περιπτώσεις δυσμενής ( $z_{\text{SSSI}}/z > 1$ ),

εκτός από την περίπτωση του βελτιωμένου θεμελίου του ζεύγους διδύμων θεμελίων όταν το γειτονικό του δίδυμο θεμέλιο είναι μη-βελτιωμένο. Μια απόσταση  $D = 10$  m δείχνει να οδηγεί σε  $z_{sssi}/z \rightarrow 1$  και  $|\theta^0| < 0.3^\circ$  συστηματικά, ανεξάρτητα από το αν τα θεμέλια έχουν βελτιωθεί ή όχι.

Από τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης γειτονικών θεμελίων ίδιου πλάτους αλλά διαφορετικών φορτίων, προκύπτει εύρος λόγου καθιζήσεων  $z_{sssi}/z = 0.36 - 2.47$  και στροφές  $|\theta|$  έως  $1.2^\circ$ , δηλαδή σαφώς εντονότερη αλληλεπίδραση σε σχέση με ό,τι προκύπτει για δίδυμα θεμέλια. Γενικά, το βελτιωμένο θεμέλιο ενός ζεύγους έχει αμελητέα στρόφη, σε αντίθεση με το γειτονικό μη-βελτιωμένο θεμέλιο. Πιο ειδικά, το μη-βελτιωμένο θεμέλιο έχει δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων αν είναι δίπλα σε βελτιωμένο. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις έχει ασήμαντη ή ελαφρά ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων. Οι στροφές του μη-βελτιωμένου θεμελίου γιγαντώνονται αν βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων όπου μόνο το ένα θεμέλιο βελτιώνεται, ενώ είναι μικρές μόνο αν το θεμέλιο είναι ελαφρύ και σε μεγάλη απόσταση από βαρύ μη-βελτιωμένο. Αντίστοιχα, το βελτιωμένο θεμέλιο εμφανίζει έντονα ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων αν βρίσκεται δίπλα σε άλλο μη-βελτιωμένο, και ειδικά αν είναι το ελαφρύτερο του ζεύγους. Τέλος, απόσταση  $D = 10$  m δεν επαρκεί για απαλοιφή της αλληλεπίδρασης σε ζεύγος θεμελίων διαφορετικού φορτίου, αντίθετα με ό,τι προκύπτει για δίδυμα θεμέλια.

## **Abstract**

Liquefaction is a phenomenon that occurs during the application of a strong seismic excitation to saturated loose coarse-grained soils and results in a dramatic reduction of their strength and stiffness. If there are structures founded on liquefied soil, then they are subject to seismic settlements and/or rotations which can prove catastrophic. In an urban environment, structures are rarely isolated, so Structure - Soil - Structure Interaction (SSSI) arises, which becomes more complicated if the foundation soil of one or both neighboring structures has been improved (e.g., with a dense grid of gravel piles) against liquefaction.

By employing the finite difference code FLAC, 2D nonlinear dynamic numerical analyses were performed to investigate the response of adjacent footings on liquefiable soil where one, neither or both footings have been improved with the construction of a dense grid of gravel piles. The soil was a horizontal layer of uniform fine sand of a relative density  $Dr = 45\%$  and thickness  $H = 10$  m, while the gravel piles grid was dense and provided reinforcement and drainage to the natural soil. The natural soil and the gravel piles were simulated with the NTUA\_SAND constitutive model. The excitation was harmonic with a maximum base acceleration  $a_{max} = 0.2$  g. Rigid neighboring twin footings, i.e., of the same width ( $B = 5$  m) and bearing the same uniform load ( $q = 100$  kPa), at different values of the distance  $D$  between them ( $= 2.8$  m,  $5$  m,  $10$  m) were considered at the ground surface for cases where one, none or both footings were improved with gravel piles. Indicatively, it is mentioned that the simulated improvement with a dense grid of gravel piles reduces the isolated footing settlements by about 90%. Then, the same analyses were performed, but for a pair of neighboring footings of the same width  $B$ , but with different loads,  $q_1 = 50$  kPa (light) and  $q_2 = 200$  kPa (heavy), to investigate the influence of the difference in bearing load on the interaction of the two footings.

The main parameters of interest are seismic settlements and earthquake-induced footing rotations at the end of shaking. To quantify and facilitate comparison of the settlements, the settlement ratio  $z_{sssi}/z$  was used, where  $z_{sssi}$  is the settlement of each footing of a pair, while  $z$  is the settlement of the respective footing if it was isolated. With respect to the residual rotations  $\theta$ , since their sign (convergent or divergent) is not important from an engineering point of view for pairs of footings, their absolute values  $|\theta|$  were studied. It is also mentioned here that  $|\theta|$  for isolated footings are practically zero and rotations are considered noteworthy only if  $|\theta| \geq 0.3^\circ$ .

From the seismic response analyses for neighboring twin footings (of the same load and width), a range of settlement ratio  $z_{sssi}/z = 0.69 - 1.95$  and rotations  $|\theta|$  up to  $2.4^\circ$  is obtained. Remarkable rotations are expected only in the unimproved footing of the pair, while the interaction in terms of settlement is unfavorable in all cases ( $z_{sssi}/z > 1$ ), except in the case of the improved footing of the twin foundation pair when its neighboring twin

footing is unimproved. A distance  $D = 10$  m seems to lead to  $z_{sssi}/z \rightarrow 1$  and  $|\theta| < 0.3^\circ$  systematically, regardless of whether the footings are improved or not.

The seismic response analyses for neighbouring footings of the same width but with different loads show a range of settlement ratio  $z_{sssi}/z = 0.36 - 2.47$  and rotations  $|\theta|$  up to  $1.2^\circ$ , i.e., a much stronger interaction than what appears in twin footings. In general, the improved footing of a pair has negligible rotations in contrast to its neighboring unimproved footing. Specifically, the unimproved footing of a pair has an unfavorable interaction in terms of settlement only if it is adjacent to an improved one. In all other cases, it has insignificant or slightly favorable interaction in terms of settlement. Its rotations become huge if it is located in a pair of footings where only one of them is improved, and are small only if the footing is light and far from a heavy unimproved one. Similarly, the improved footing of a pair exhibits a strongly favorable interaction in terms of settlement if it is adjacent to an unimproved footing, and especially if it is the lighter footing of the pair. Finally, a distance  $D = 10$  m is not sufficient to eliminate the interaction of a pair of differently loaded footings, contrary to what is obtained for twin footings.



# **1. Εισαγωγή**

## **1.1 Αντικείμενο**

Η επιβολή ισχυρού σεισμού σε κορεσμένα χαλαρά χονδρόκοκκα εδάφη δημιουργεί έντονες υπερπιέσεις πόρων που μειώνουν δραματικά την αντοχή και την στιβαρότητα τους, προκαλώντας έτσι μη επιτρεπτές καθιζήσεις ή/και στροφές στις κατασκευές που εδράζονται σε αυτά. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ρευστοποίηση, και παρότι μπορεί να οδηγήσει μέχρι και στην καταστροφή των κατασκευών, η μελέτη του έχει ξεκινήσει μόλις τις τελευταίες δεκαετίες. Ένας από τους πιο συνήθεις τρόπους αντιμετώπισής της είναι η κατασκευή χαλικοπασσάλων (π.χ., με βαθιά δονητική αντικατάσταση). Η οριζόντια στράγγιση λόγω της μεγάλης διαπερατότητας των χαλίκων, η συμπύκνωση του χονδρόκοκκου εδάφους λόγω της δόνησης που προκαλείται κατά την κατασκευή τους και η ενίσχυση του εδάφους λόγω της αυξημένης στιβαρότητας (και αντοχής) των χαλίκων αποτρέπουν τελικώς την ρευστοποίηση. Όμως, η απόκριση μιας κατασκευής δεν εξαρτάται μόνο από το αν έχει βελτιωθεί με χαλικοπασσάλους ή όχι. Σε περίπτωση όπου υπάρχουν γειτονικές κατασκευές αναπτύσσεται αλληλεπίδραση κατασκευής – εδάφους – κατασκευής (SSSI, Structure – Soil – Structure Interaction) διαφοροποιώντας τον μηχανισμό ανάπτυξης καθιζήσεων και στροφών. Τέτοιες περιπτώσεις είναι πολύ συχνές σε αστικό περιβάλλον, όπου η ύπαρξη μεμονωμένων κατασκευών είναι μάλλον η εξαίρεση παρά ο κανόνας. Η διαφοροποίηση του μηχανισμού ανάπτυξης καθιζήσεων και στροφών γίνεται ακόμη πιο περίπλοκη στην περίπτωση που μόνο μία, δύο ή όλες οι κατασκευές βελτιώνονται με την κατασκευή καννάβου χαλικοπασσάλων στο έδαφος θεμελίωσής τους.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη διερεύνηση της επιρροής (πυκνού) καννάβου χαλικοπασσάλων έναντι ρευστοποίησης σε μία, καμία ή και τις δύο γειτονικές θεμελιολωρίδες, ανάλογα με την μεταξύ τους απόσταση και το φορτίο έδρασής τους. Η διερεύνηση έγινε υπολογιστικά με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και με μη-γραμμικές δισδιάστατες αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδάφους.

## **1.2 Διάρθρωση εργασίας**

Συνολικά η παρούσα εργασία αποτελείται από τα εξής 6 Κεφάλαια :

- Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Περιγράφεται το αντικείμενο της εργασίας και παρουσιάζεται η δομή της.
- Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Παρουσιάζονται τα ευρήματα της επισκόπησης στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία σε θέματα που αφορούν στη λειτουργία των χαλικοπασσάλων ως τρόπου βελτίωσης εδάφους έναντι ρευστοποίησης και στην αλληλεπίδραση γειτονικών κατασκευών υπό καθεστώς ρευστοποίησης.

- Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Συνοψίζεται η μεθοδολογία δισδιάστατων αναλύσεων για την προσομοίωση και μελέτη απόκρισης των επιφανειακών θεμελίων, των χαλικοπασσάλων και του ρευστοποιήσιμου εδάφους.
- Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων για μεμονωμένο θεμέλιο με ή χωρίς χαλικοπασσάλους και για ζεύγος δίδυμων θεμελίων σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις, όπου και τα δύο, ένα ή κανένα δεν είναι βελτιωμένο με χαλικοπασσάλους.
- Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων για μεμονωμένο θεμέλιο υπό διαφορετικά φορτία με ή χωρίς χαλικοπασσάλους, αλλά και για ζεύγος θεμελίων ίδιου πλάτους αλλά διαφορετικού φορτίου σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις, όπου και τα δύο, ένα ή κανένα δεν είναι βελτιωμένο με χαλικοπασσάλους.
- Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

## 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

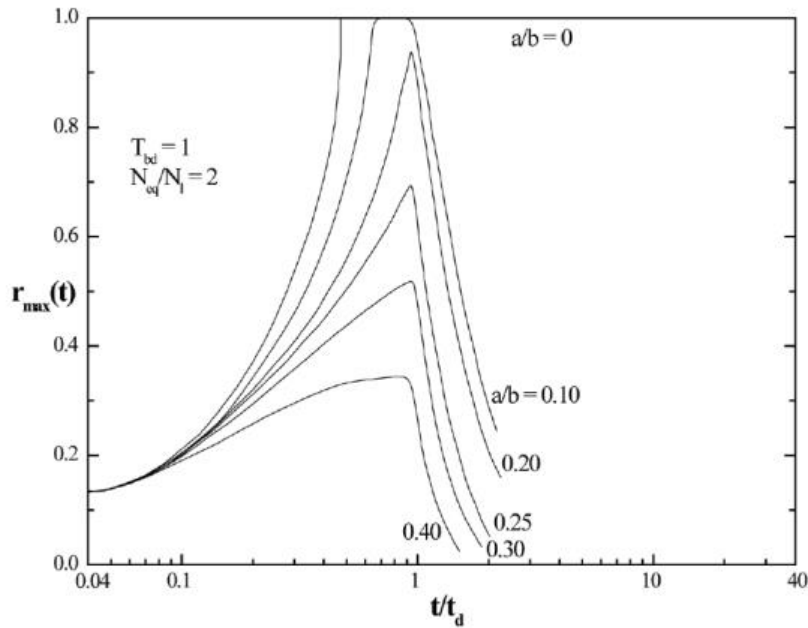
Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η διεθνής βιβλιογραφία με στόχο την κατανόηση των λειτουργιών των χαλικοπασσάλων για αποτροπή ρευστοποίησης, καθώς και των μηχανισμών αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Οι έρευνες που παρουσιάζονται επικεντρώνονται σε σημαντικά θέματα ενδιαφέροντος όπως οι υπερπιέσεις πόρων και οι καθιζήσεις θεμελίων, ενώ αναφορά γίνεται και σε σχετικές ερευνητικές εργασίες εντός ΕΜΠ.

### 2.2 Λειτουργία χαλικοπασσάλων

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος αποτροπής της ρευστοποίησης είναι η χρήση χαλικοπασσάλων. Όπως έχει μελετηθεί στο παρελθόν, η αυξημένη τους διαπερατότητα ενισχύει την λειτουργία της στράγγισης με αποτέλεσμα την αποφυγή της ρευστοποίησης. Σύμφωνα όμως με πρόσφατες δημοσιεύσεις, σημαντικό ρόλο για την αποτροπή της ρευστοποίησης έχει πέραν της στράγγισης, η λειτουργία της συμπύκνωσης του περιβάλλοντος εδάφους λόγω της δόνησης που προκαλείται κατά την κατασκευή τους και ιδίως η ενίσχυση του υπάρχοντος εδάφους λόγω της αυξημένης στιβαρότητας των χαλίκων.

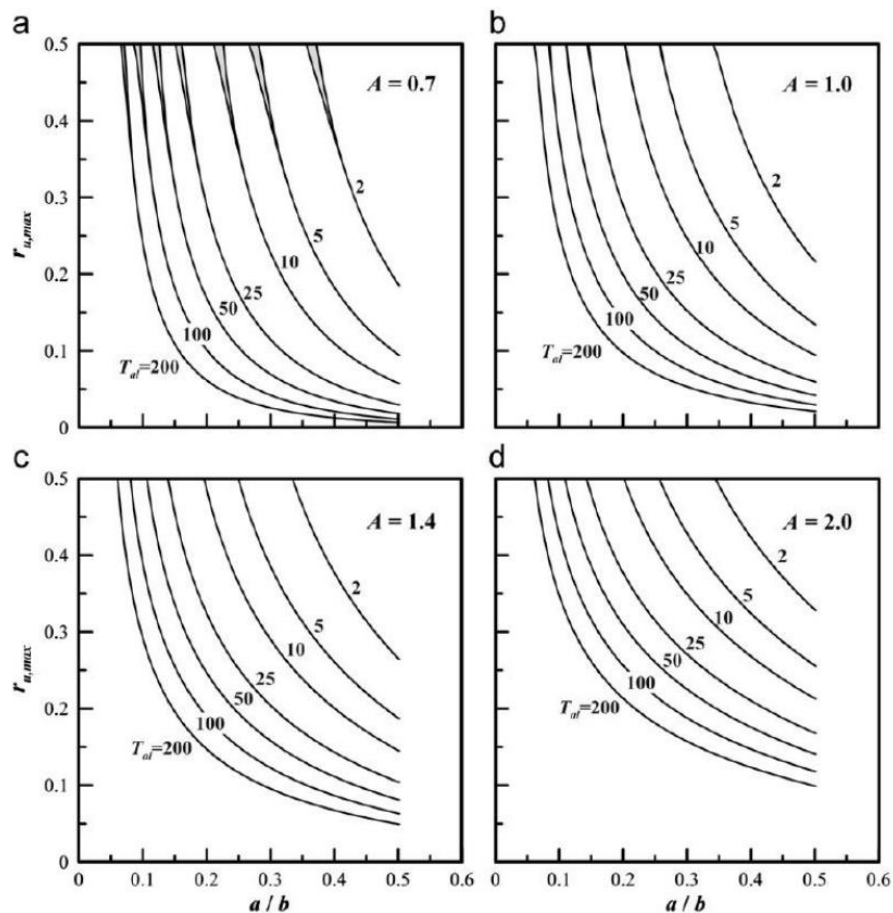
Η στράγγιση είναι η πιο μελετημένη λειτουργία των χαλικοπασσάλων, με τις πρώτες έρευνες να γίνονται το 1977 από τους Seed & Booker. Πραγματοποίησαν αναλύσεις κατακόρυφων χαλικοστραγγιστηρίων υπό πλήθος σεισμικών διεγέρσεων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, βασιζόμενες στην θεωρία μονοδιάστατης ανάπτυξης και αποτόνωσης των πιέσεων πόρων. Βασική παραδοχή της μελέτης των Seed & Booker(1977) είναι πως τα χαλικοστραγγιστήρια έχουν άπειρη διαπερατότητα και πέραν της στράγγισης, δεν επηρεάζουν με οποιοδήποτε άλλο τρόπο το έδαφος. Προκειμένου να καταλήξουν σε ένα σύνολο διαγραμμάτων σχεδιασμού χαλικοστραγγιστηρίων ώστε να περιοριστούν οι μέγιστες υπερπιέσεις πόρων, θεώρησαν σταθερούς συντελεστές διαπερατότητας ( $K_h$ ) και ογκομετρικής παραμόρφωσης ( $m_v$  : ίσο με το αντίστροφο του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης) για το υφιστάμενο έδαφος και ότι απλουστευτικά το έδαφος στραγγίζει αποκλειστικά ακτινικά.

Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.1** και συγκρίνουν τις χρονοϊστορίες της μέγιστης υπερπίεσης πόρων ( $r_{max}=\Delta u/\sigma'_{v0}$ ) σε κάρναβο χαλικοστραγγιστηρίων διαμέτρου  $a$  και ακτίνας επιρροής  $b$ , πριν και μετά την δόνηση (που τελειώνει σε χρόνο  $t_d$ ). Συμπερασματικά, ο επαρκής αριθμός χαλικοστραγγιστηρίων (αύξηση του λόγου  $a/b$ ) εξασφαλίζει αποτροπή της ρευστοποίησης, καθώς μειώνεται η μέγιστη τιμή του λόγου  $r_{max}$  στο τέλος της δόνησης.



Σχήμα 2.1 : Επίδραση των  $a, b$  στην ιστορία του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων ανάμεσα στα στραγγιστήρια (Seed & Booker, 1977).

Σε συνέχεια των Seed & Booker (1977), προτάθηκαν κάποιες αλλαγές στα παραπάνω διαγράμματα από τους Bouckovalas et al. (2011), καθώς θεωρήθηκε πως η υπάρχουσα μέθοδος υπερεκτιμά τις μέγιστες τιμές των πιέσεων πόρων με αποτέλεσμα τον σχεδιασμό πυκνότερων καννάβων απ' ότι χρειάζεται. Αυτό συμβαίνει διότι η δομή της άμμου διαφοροποιείται μέσα στη διάρκεια της δόνησης και άρα αλλάζει ο ρυθμός ανάπτυξης υπερπίεσεων στις αστράγγιστες συνθήκες. Για να το αποδώσουν, τροποποίησαν την αναλυτική έκφραση που σχετίζεται με τον ρυθμό ανάπτυξης υπερπίεσεων και έδωσαν έμφαση στην ορθή επιλογή του εκθέτη  $A$  ο οποίος εξαρτάται από τις επιτόπου τάσεις, τις εδαφικές συνθήκες και σχετίζεται με τον ρυθμό ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων. Ύστερα από επιβεβαίωση των αναλυτικών προβλέψεων από συζευγμένες μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις κατέληξαν πως οι υπερπίεσεις πόρων μεγιστοποιούνται στα αρχικά στάδια και όχι στο τέλος της δόνησης, και συνεπώς οι μέγιστες τιμές  $r_{u,max}$  είναι μικρότερες απ' ότι στους Seed & Booker (1977). Στα διαγράμματα που προτάθηκαν, **Σχήμα 2.2**, φαίνεται η διακύμανση της μέγιστης υπερπίεσης πόρων ως προς τον λόγο  $a/b$  σε σχέση με το  $A$  και τον αδιάστατο χρονικό παράγοντα  $T_{ai}$  ο οποίος εξαρτάται από τον χρόνο που απαιτείται για την ρευστοποίηση  $t_L$ , την διαπερατότητα του εδάφους και τα χαρακτηριστικά των χαλικοστραγγιστηρίων.

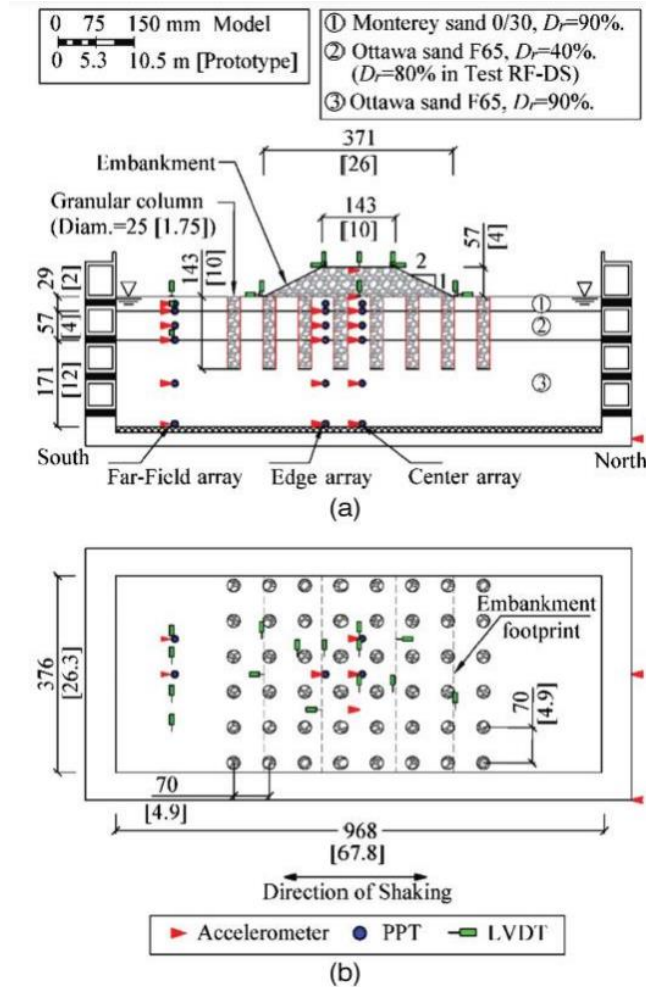


**Σχήμα 2.2:** Προτεινόμενα αναθεωρημένα διαγράμματα σχεδιασμού χαλικοστραγγιστηρίων (Bouckovalas et al. , 2011).

Η σημασία της ενίσχυσης του εδάφους για την αποτροπή της ρευστοποίησης αναδεικνύεται μέσω της δημοσίευσης των Tiznado et al. (2020) οι οποίοι πραγματοποίησαν 4 πειράματα φυγοκεντριστή, ώστε να μελετήσουν την σεισμική απόκριση ενός επιχώματος θεμελιωμένου με χαλικοπασσάλους σε πλήρως κορεσμένη ρευστοποιήσιμη άμμο. Κύριως στόχος των πειραμάτων ήταν η σύγκριση των λειτουργιών της στράγγισης, συμπίκνωσης και ενίσχυσης ως προς την αποδοτικότητα τους έναντι ρευστοποίησης.

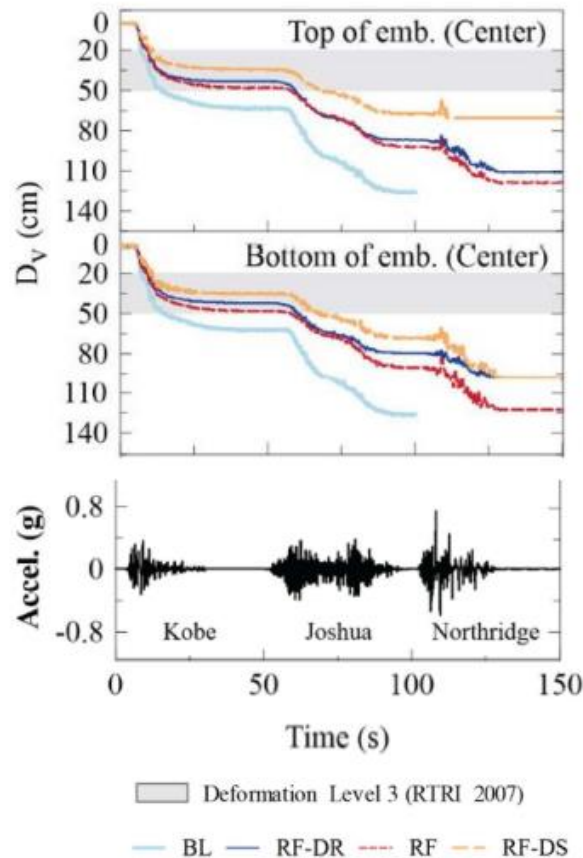
Το πρώτο πείραμα (BL) ήταν σε φυσικό έδαφος χωρίς βελτίωση, ενώ τα υπόλοιπα 3 ήταν με τετραγωνικό κάναβο χαλικοπασσάλων, η οποία διάταξη παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.3**. Το πρώτο από τα 3 πειράματα εξετάζει μεμονωμένα την λειτουργία της ενίσχυσης (RF), ενώ τα άλλα δυο την συνδυασμένη λειτουργία ενίσχυσης-στράγγισης (RF-DR) και ενίσχυσης-συμπύκνωσης (RF-DS) αντίστοιχα. Μελετώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναδείχθηκε η σημαντικότητα της λειτουργίας της ενίσχυσης του εδάφους λόγω της στιβαρότητας των χαλικοπασσάλων. Το βελτιωμένο έδαφος παρουσιάζει μια πιο στιβαρή απόκριση, με μικρότερη απόσβεση και μεγαλύτερες καταγραφόμενες επιταχύνσεις. Αυτά είναι αποτέλεσμα της ενίσχυσης του εδάφους και άρα του περιορισμού των διατμητικών παραμορφώσεων μετά την κατασκευή των χαλικοπασσάλων. Ενδιαφέρον σημείο της μελέτης αποτελεί το γεγονός ότι οι καθιζήσεις λόγω ενίσχυσης μειώθηκαν κατά 20-25% σε

σχέση με αυτές του φυσικού εδάφους, ενώ η στράγγιση δεν συνέβαλε αισθητά στην μείωσή τους.



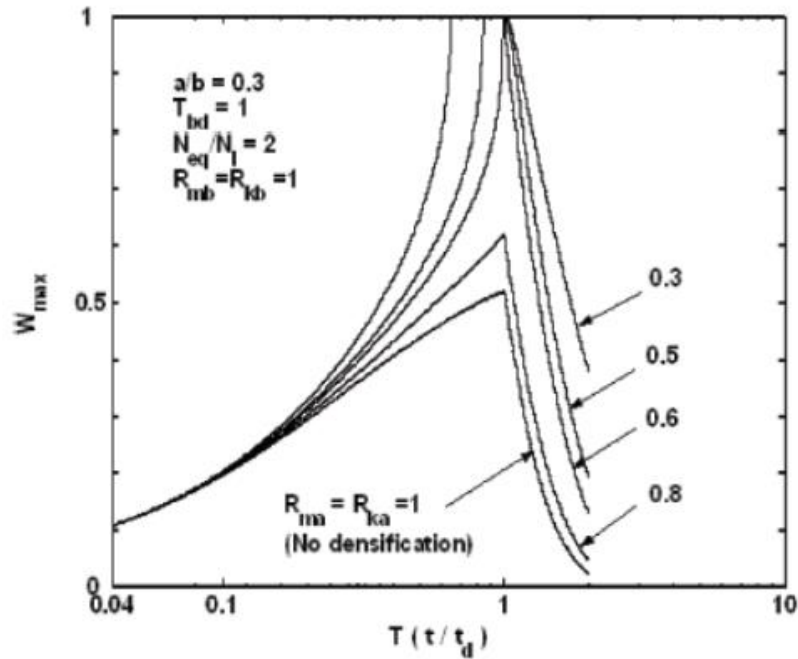
Σχήμα 2.3: Η διάταξη των πειραμάτων φυγοκεντριστή σε τομή (α) και κάτοψη (β) (Tiznado et. al., 2020)

Το **Σχήμα 2.4** είναι επίσης από τη δημοσίευση των Tiznado et al. (2020) και αποτυπώνει τα παραπάνω συμπεράσματα, παρουσιάζοντας την αθροιστική κατακόρυφη μετατόπιση του επιχώματος στην κορυφή και στην βάση του κατά την διάρκεια 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων. Η σκιαγραφημένη περιοχή των διαγραμμάτων αντιστοιχεί σύμφωνα με τις Ιαπωνικές προδιαγραφές RTRI (Design Standard for Railway Earth Structures, 2007) σε ένα επίπεδο παραμορφώσεων όπου ενώ η κατασκευή υπόκειται μεγάλες παραμορφώσεις, οι ζημιές μπορούν να αποκατασταθούν με μερική ανακατασκευή.



*Σχήμα 2.4* : Σύγκριση αθροιστικής κατακόρυφης μετατόπισης στην κορυφή και τη βάση επιχώματος στη διάρκεια 3 διεγέρσεων για 3 διαφορετικές λειτουργίες χαλικοπασσάλων σε σχέση με αυτή του φυσικού εδάφους (BL) (Tiznado et al. ,2020).

Βασική δημοσίευση που εξετάζει τον συνδυασμό στράγγισης και συμπύκνωσης είναι των Krishna et al. (2006). Συγκεκριμένα, στηριζόμενοι στους Seed & Booker (1977) θεώρησαν μεταβλητές τις παραμέτρους  $K_h(r)$  και  $m_v(r)$ , όπου  $r$  η απόσταση από το κέντρο του χαλικοπασσάλου, καθώς η μέγιστη δυνατή συμπύκνωση είναι στη κοντά στον χαλικοπάσσαλο. Εξετάζοντας ξεχωριστά τις δύο αυτές μεταβλητές, παρατηρήθηκε πως η συμβολή της συμπύκνωσης όταν λαμβάνεται υπόψη στον συντελεστή διαπερατότητας είναι αρνητική ως προς τις υπερπιέσεις πόρων, ενώ όταν λαμβάνεται υπόψη στον συντελεστή ογκομετρικής παραμόρφωσης είναι θετική. Τελικά, η επίδραση εξαρτάται από τον βαθμό συμπύκνωσης που έχει δεχθεί το έδαφος όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.5** .



Σχήμα 2.5: Επίδραση του βαθμού της συμπίκνωσης στο λόγο μέγιστων υπερπείσεων πόρων, στη στενή περιοχή του χαλικοπασσάλου (Krishna et al., 2006).

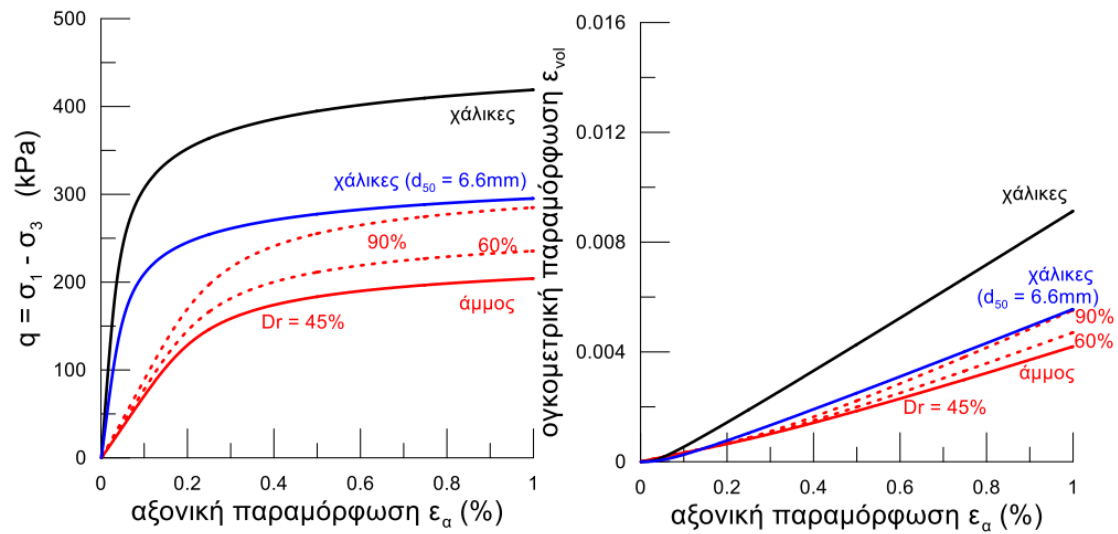
Η διπλωματική εργασία του Βάιου Κατσουλάρη (2021) έρχεται να επιβεβαιώσει τα παραπάνω συμπεράσματα, ότι δηλαδή η λειτουργία της ενίσχυσης-συμπύκνωσης είναι η πλέον καθοριστική και όχι η λειτουργία της στράγγισης. Πραγματοποιώντας αριθμητικές αναλύσεις με την χρήση του λογισμικού FLAC<sup>3D</sup> (Itasca, 2019), μελετήθηκε η σεισμική απόκριση τετραγωνικού θεμελίου σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με διέγερση βάσης  $a_{max}=0.2g$  χωρίς και με βελτίωση με χαλικοπασσάλους. Όλες οι αναλύσεις έγιναν για σταθερές διαστάσεις τετραγωνικού θεμελίου πλάτους 5m και πάχους στρώσης 10m.

Η διερεύνηση έγινε ως προς τη φόρτιση του θεμελίου,  $q=50kPa$  και  $q=100 kPa$ , την πύκνωση του καννάβου, ποσοστά αντικατάστασης  $A_r=24.4\%$  (πυκνή διάταξη) και  $A_r=10.9\%$  (αραιή διάταξη) και την έκταση της βελτίωσης με χαλικοπασσάλους, καθολική και τοπική βελτίωση (κάτω από το θεμέλιο). Το υλικό των χαλικοπασσάλων και του εδάφους προσομοιώθηκαν με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-sand (Andrianoopoulos et al. 2010), ενώ οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για το ρευστοποιήσιμο έδαφος αντιστοιχούν σε λεπτή άμμο Nevada.

Το βασικό ερωτηματικό στις αναλύσεις του Κατσουλάρη (2021) είναι η απόκριση των χαλίκων από τους οποίους κατασκευάζονται οι χαλικοπάσσαλοι. Οι συνήθεις διαμέτροι των υλικών των χαλικοπασσάλων είναι 3-6cm, όμως πρακτικώς δεν υπάρχουν δεδομένα για τη βαθμονόμηση προσομοιωμάτων. Στη βιβλιογραφία βρέθηκαν αποτελέσματα (Χου et al. 2020, Choi 1977) για χάλικες με  $D_{50}=6.6mm$ , τιμή πολύ μικρότερη από την πραγματική, και επ' αυτών μόνο γίνεται βαθμονόμηση. Στις αναλύσεις για χαλικοπασσάλους, τελικώς γίνεται χρήση των εν λόγω παραμέτρων με μικρή (μη-ρεαλιστική) τιμή του δείκτη πόρων  $e=0.01$  και  $A_o=0.2$  (αντί για 0.4), ώστε στο NTUA-Sand να αυξηθεί μεν η αντοχή των χαλίκων



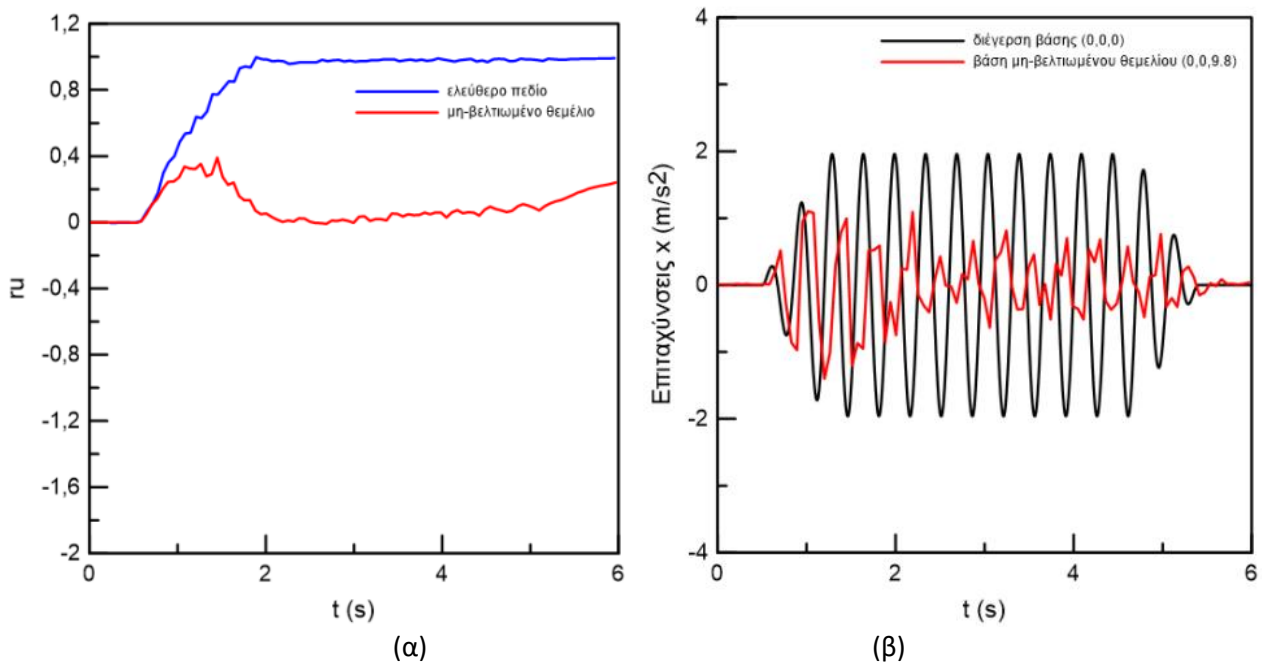
(προσεγγίζοντας αυτήν σε χαλικοπασσάλους) αλλά χωρίς να υπερεκτιμηθεί η διαστολικότητα.



**Σχήμα 2.6:** Σύγκριση της συμπεριφοράς της άμμου Nevada (για  $Dr = 45\%$ ,  $60\%$  και  $90\%$ ), των χαλίκων της βιβλιογραφίας και των χαλικοπασσάλων σε δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες με χρήση του NTUA\_Sand (Κατσουλάρης 2021)

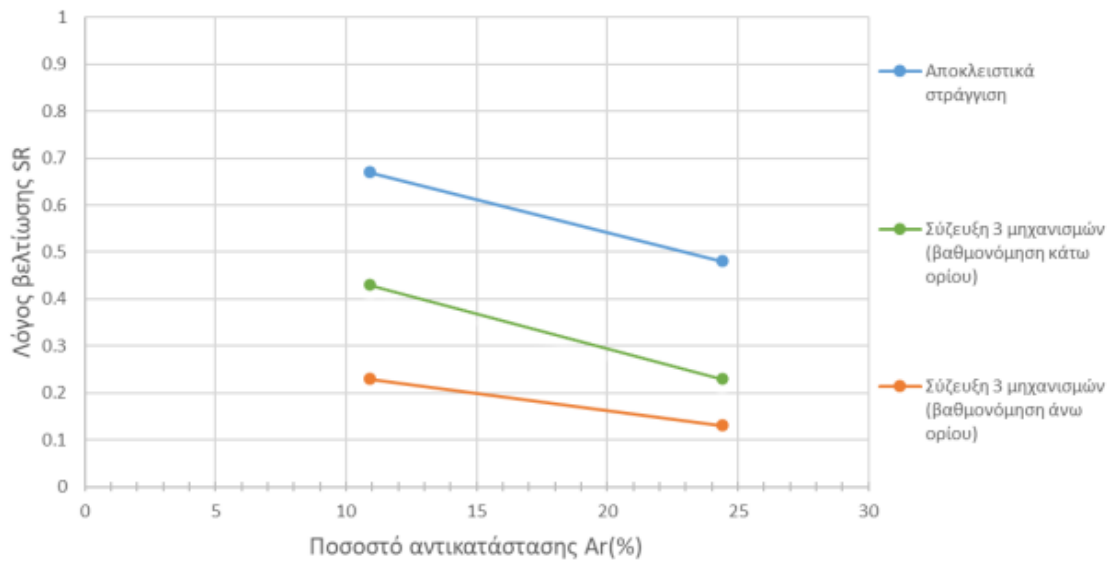
Στο **Σχήμα 2.6** φαίνεται η σύγκριση της συμπεριφοράς της φυσικής άμμου ( $Dr = 45\%$ ), της συμπυκνωμένης άμμου λόγω της δόνησης κατά την κατασκευή τους σε αραιό και πυκνό κάρναβο με  $Dr=60\%$  και  $Dr=90\%$  αντίστοιχα, των χαλίκων της βιβλιογραφίας ( $D_{50} = 6.6\text{mm}$ ) με  $Dr=90\%$  και των χαλίκων των χαλικοπασσάλων όπως τελικώς επιλέχθηκαν να προσομοιωθούν από τον Κατσουλάρης (2021). Οι αναλύσεις έγιναν με έμφαση στην βελτίωση του SR (Settlement Ratio), που ορίζεται ως ο λόγος της καθίζησης του βελτιωμένου θεμελίου προς την καθίζηση του μη βελτιωμένου θεμελίου και του λόγου υπερπιέσεων πόρων  $r_u$  που ορίζεται ως ο λόγος υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  προς την αρχική ενεργό κατακόρυφο τάση  $\sigma_{vo}'$ . Βάση των παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως για τιμές  $r_u = 0$  επικρατούν υδροστατικές πιέσεις πόρων, ενώ για  $r_u = 1$  υπάρχει ρευστοποίηση, καθώς επίσης ότι για να θεωρηθεί επιτυχημένη η βελτίωση θα πρέπει  $SR \ll 1$ .

Αρχικά για λόγους σύγκρισης έγιναν αναλύσεις για την απόκριση του θεμελίου χωρίς χαλικοπασσάλους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ενώ παρατηρείται ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο (μακριά από το θεμέλιο), κάτω από αυτό η ρευστοποίηση αποτρέπεται, καθώς λόγω της ανωδομής αυξάνονται τοπικά οι αρχικές ενεργές τάσεις και άρα μειώνεται ο λόγος  $r_u$ . Ενδεικτικά παρουσιάζονται αυτά στο **Σχήμα 2.7α**. Παρόλα αυτά, το θεμέλιο υπόκειται σε μεγάλες καθιζήσεις που υπαγορεύουν βελτίωση του εδάφους. Όσον αναφορά την επιτάχυνση που εν τέλει φτάνει στο θεμέλιο, παρατηρήθηκε ότι μειώθηκε σε σχέση με εκείνη της βάσης, ακριβώς λόγω της μείωσης της στιβαρότητας του εδάφους από την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων, παρά το γεγονός ότι δεν προέκυψε ρευστοποίηση (βλ. **Σχήμα 2.7β**).



**Σχήμα 2.7:** (α) Σύγκριση χρονοϊστοριών  $w$  στο μέσο του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης κάτω από το θεμέλιο και στο ελεύθερο πεδίο, (β) σύγκριση χρονοϊστορίας επιτάχυνσης στο κέντρο του θεμελίου σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με τη διέγερση βάσης (Κατσουλάρης 2021)

Έπειτα έγιναν αναλύσεις για την λειτουργία της αποκλειστικής στράγγισης θεωρώντας πως το υλικό των χαλικοπασσάλων είναι το ίδιο με το περιβάλλον έδαφος, αλλά με μεγάλη διαπερατότητα  $K_{\text{χαλ}}$  συγκριτικά με το περιβάλλον έδαφος  $K_s$ . Η απόδοση της στράγγισης εξετάστηκε μέσω του λόγου  $K^* = K_{\text{χαλ}}/K_s$  όπου διερευνήθηκαν οι τιμές  $K^*=100$  και  $K^*=500$ . Επιπλέον έγιναν αναλύσεις για την λειτουργία της αποκλειστικής ενίσχυσης θεωρώντας τους χαλικοπασσάλους στιβαρά στοιχεία με διαπερατότητα ίση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους και άρα  $K^*=1$ . Σε αυτό το σημείο θεωρήθηκε ως κάτω όριο αντοχής η βαθμονόμηση χαλίκων της βιβλιογραφίας και ως άνω όριο αυτό που παρουσιάστηκε και στο **Σχήμα 2.6**. Επιπλέον, κατά τους συνήθεις τρόπους κατασκευής των χαλικοπασσάλων το κοκκώδες έδαφος δονείται και άρα αναγκαστικά συμπυκνώνεται. Αυτή η λειτουργία δεν μπορεί να είναι ανεξάρτητη της ενίσχυσης και έτσι διερευνήθηκε σε συνδυασμό με την ενίσχυση. Συγκεκριμένα, για έναν αραιό κάνναβο χαλικοπασσάλων (ποσοστό αντικατάστασης  $A_r = 11\%$ ) η συμπύκνωση του περιβάλλοντος εδάφους αύξησε τη σχετική πυκνότητα σε  $D_{rs}=60\%$  (αντί για  $D_{rs}=45\%$ ) και στον πυκνό κάνναβο ( $A_r = 24\%$ ) η αντίστοιχη αύξηση έφτασε σε  $D_{rs}=90\%$  (από αρχικώς  $D_{rs}=45\%$ ). Στο **Σχήμα 2.8** συνοψίζονται κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα σε όρους SR με το ποσοστό αντικατάστασης από την εργασία του Κατσουλάρη (2021), απ' όπου προκύπτει η αύξηση της αποδοτικότητας της βελτίωσης με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης.



**Σχήμα 2.8:** Σχέση μεταξύ λόγου βελτίωσης SR του θεμελίου και ποσοστού αντικατάστασης του εδάφους Ar(%) για συνθήκες αποκλειστικά στράγγισης και συνθήκες σύζευξης των 3 μηχανισμών (βαθμονόμηση κάτω και άνω ορίου), θεωρώντας πάντα  $K^*=500$  και τοπική βελτίωση (Κατσουλάρης 2021)

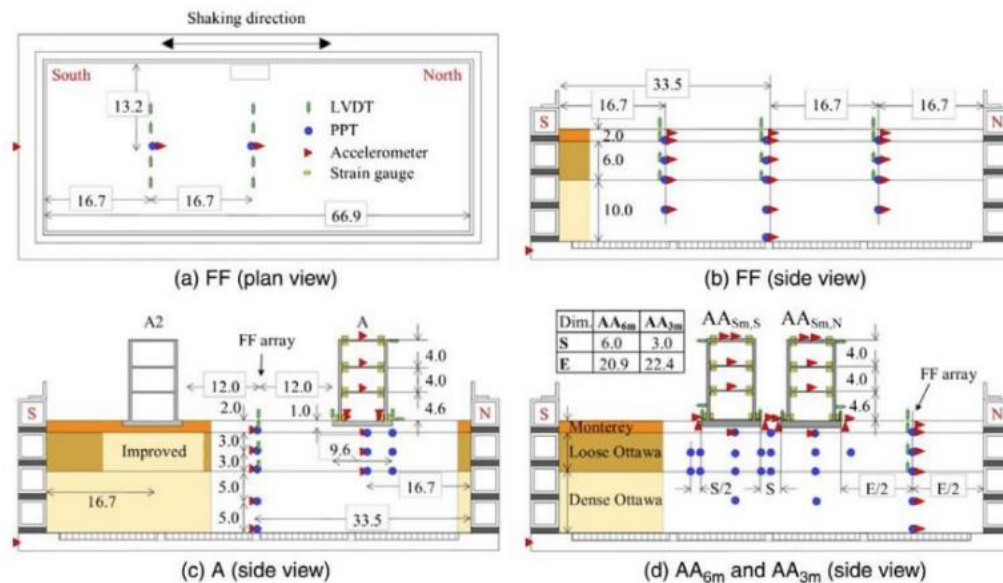
Πιο σημαντικά, από το **Σχήμα 2.8** φαίνεται τόσο η σημαντικότητα της βαθμονόμησης των χαλίκων (ανοικτό θέμα στη βιβλιογραφία) όσο και της συζευγμένης λειτουργίας των χαλικοπασσάλων. Είναι σαφές ότι η συζευγμένη λειτουργία αυξάνει σημαντικά την απόδοση σε σχέση με την αποκλειστική στράγγιση, γεγονός που υποδεικνύει τη συντηρητικότητα και αντικοικονομικότητα των μέχρι τώρα μεθόδων σχεδιασμού χαλικοπασσάλων που λαμβάνουν υπόψη μόνο αυτή την λειτουργία.

Λόγω των παραπάνω συμπερασμάτων και του ότι οι μελέτες πάνω στην πολύ-λειτουργική δράση των χαλικοπασσάλων είναι περιορισμένες, η εξέταση της αλληλεπίδρασης κατασκευών σε βελτιωμένο και μη έδαφος, κρίνεται χρήσιμη.

### 2.3 Αλληλεπίδραση κατασκευών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

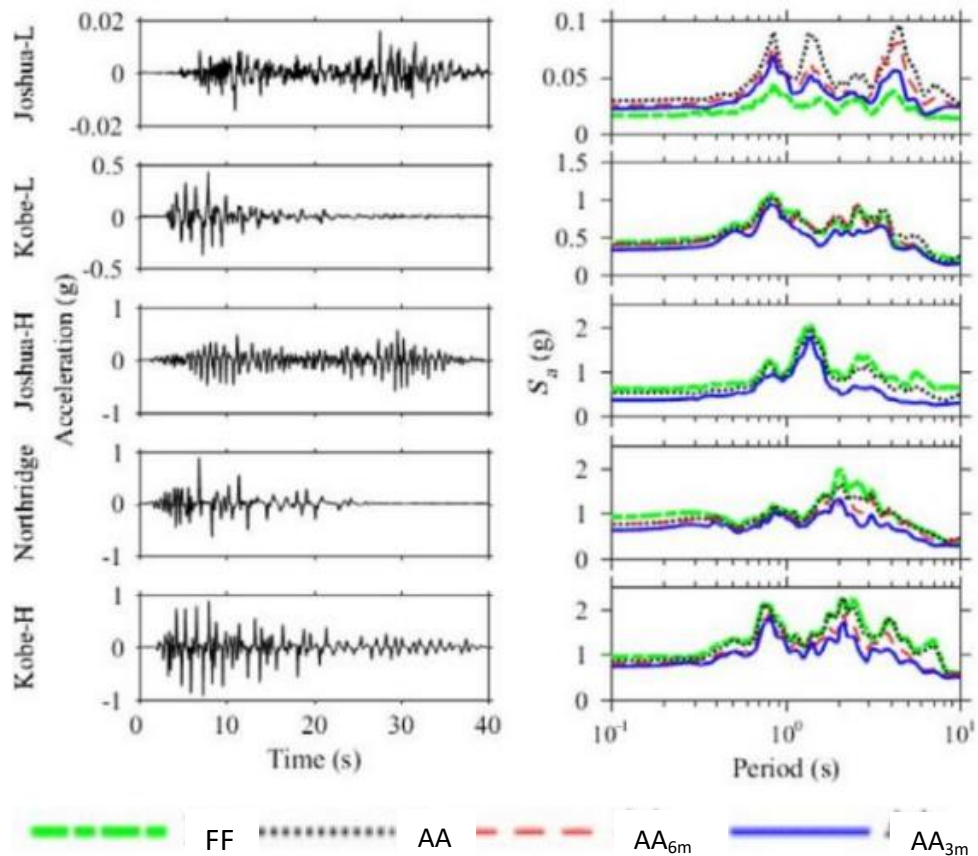
Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά πειράματα και έρευνες για την μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ κατασκευών και κατασκευών-εδάφους. Σημαντικότερες αυτών είναι πιθανώς εκείνες των Hayden et al. (2015) και Kirkwood et al. (2018,2019) που θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους. Να σημειωθεί πως σε όλες αυτές τις περιπτώσεις για την ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη καθιζήσεων και στροφών που είναι μεγέθη εξαρτημένα από τις υπερπιέσεις πόρων όπως επίσης και στην ταλάντωση που δέχεται η ανωδομή.

Οι Kirkwood et al. (2018) πραγματοποίησαν σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή με τις πειραματικές διατάξεις που φαίνονται στο **Σχήμα 2.9**, δονήσεις με αυξανόμενη ένταση ώστε να μελετηθεί η απόκριση της ανωδομής. Το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο και αποτελείται αρχικά από μία στρώση 10-20m πυκνής άμμου Nevada (Dense Ottawa) με  $D_r \approx 90\%$ , που υπόκειται μίας στρώσης υποδιπλάσιου πάχους ρευστοποιήσιμης άμμου (loose Ottawa) με  $D_r = 40\%$  και τελικώς από μία στρώση 2 m από πυκνή άμμο Monterey.



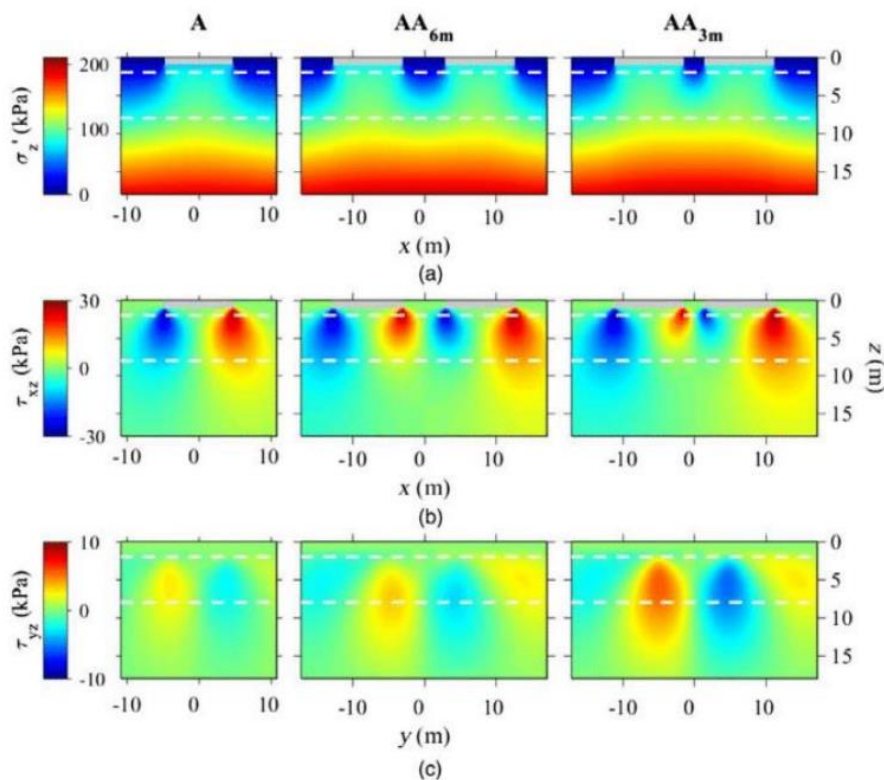
**Σχήμα 2.9:** Διατάξη: α) ελεύθερου πεδίου (FF) σε κάτοψη, β) ελεύθερου πεδίου σε όψη, γ) απομονωμένη κατασκευή A σε όψη, δ) γειτονικές κατασκευές αποστάσεων 3m (AA<sub>3m</sub>) και 6m (AA<sub>6m</sub>) σε όψη (Kirkwood et al. 2018).

Στο **Σχήμα 2.10** φαίνονται οι ιστορίες επιταχύνσεων και τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα για απόσβεση  $\xi=5\%$  στις διάφορες διατάξεις, με τα γράμματα L και H να συμβολίζουν την ένταση της επιβαλλόμενης δόνησης (Low και High αντίστοιχα). Η ύπαρξη γειτονικών κατασκευών προκαλεί επιπλέον αλληλεπίδραση, πέραν από αυτή εδάφους-κατασκευής, την αλληλεπίδραση μεταξύ των κατασκευών. Αυτό συμβαίνει λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος όπου σύμφωνα με την θεωρία του Boussinesq για ελαστικό ημίσφαιρο, η αλληλοεπικάλυψη των βολβών των τάσεων αυξάνει τις ενεργές τάσεις του εδάφους ειδικά στην περιοχή ανάμεσα στις κατασκευές. Ως αποτέλεσμα αναπτύσσονται μεγαλύτερες υπερπίεσεις πόρων, άρα και καθιζήσεις, σε σχέση με αυτές των μεμονωμένων κατασκευών. Στο **Σχήμα 2.11** παρατίθενται οι τάσεις που δημιουργήθηκαν κατά τα πειράματα των Kirkwood et al. (2018) για τις προαναφερθείσες διατάξεις.



Σχήμα 2.10: Χρονοϊστορίες επιβαλλόμενης επιτάχυνσης στη βάση και ελαστικά φάσματα για τις αντίστοιχες διατάξεις (Kirkwood et al. 2018)

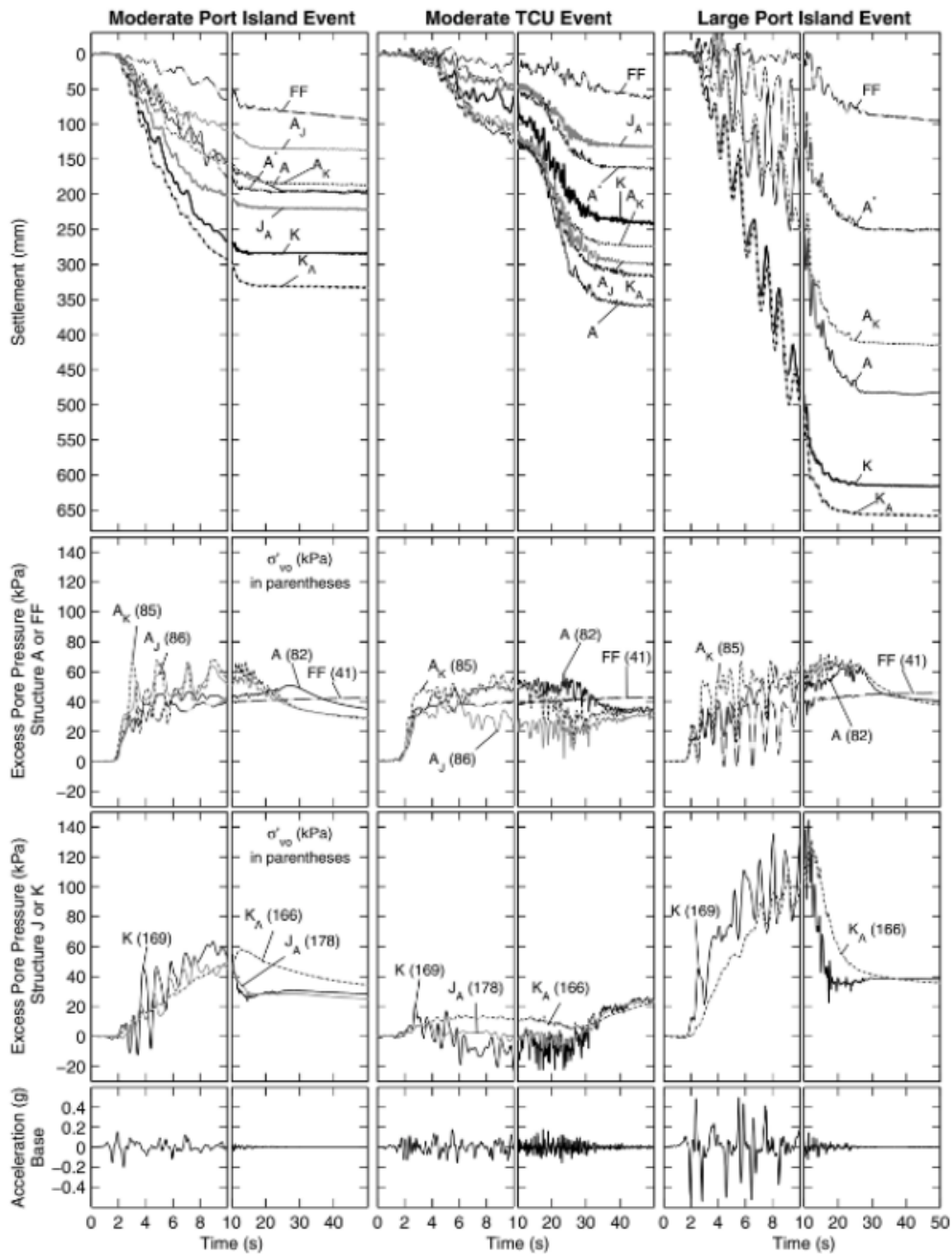
Συγκεκριμένα, το **Σχήμα 2.11α** επιβεβαιώνει την θεωρία του Boussinesq με αύξηση των ενεργών τάσεων όσο πλησιάζουν οι κατασκευές. Επίσης φαίνεται πως στην μεμονωμένη κατασκευή οι τάσεις είναι συμμετρικές ως προς άξονα διερχόμενο από το κέντρο της, ενώ στις γειτονικές κατασκευές όσο αυτές πλησιάζουν, εμφανίζεται μεγαλύτερη ασυμμετρία. Οι διατμητικές τάσεις στο επίπεδο του σεισμού ( $xz$ ) διαφέρουν στις γωνίες των κατασκευών, με αυτές των εξωτερικών άκρων να είναι αρκετά μεγαλύτερες. Η ανομοιομορφία στις τάσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι ευθύνεται και σε αντίστοιχες διαφορές στην στιβαρότητα του εδάφους.



**Σχήμα 2.11:** Τάσεις για μεμονωμένη κατασκευή A, γειτονικές κατασκευές σε απόσταση 6m (AA<sub>6m</sub>) και 3m (AA<sub>3m</sub>) (a) κατακόρυφες ενεργές, (b) εντός επιπέδου διατμητικές τάσεις (c) εκτός επιπέδου διατμητικές τάσεις (Kirkwood et al. 2018).

Οι στροφές των κατασκευών μπορεί να είναι ομόρροπες ή αντίρροπες. Σύμφωνα με Hayden et al. (2015) η στροφή των κατασκευών θα είναι αντίρροπη λόγω των διαφορετικών τάσεων στις άκρες των κατασκευών και της διαφορετικής στιβαρότητας που έχει το έδαφος. Από τα πειράματα όμως των Kirkwood et al. (2018) προέκυψε ότι όσο πιο μικρή είναι η απόσταση των κατασκευών τόσο αυξάνεται ο κίνδυνος να στραφούν η μια προς την άλλη. Το φαινόμενο αυτό οι ίδιοι ερμήνευσαν πως συμβαίνει λόγω των μεγαλύτερων διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται σε επίπεδο κάθετο του σεισμού ( $yz$ ), συγκριτικά με αυτές του παράλληλου στον σεισμό επίπεδο, προκαλώντας διόγκωση του εδάφους πλευρικά και άρα λόγω της μείωσης του όγκου να στραφούν αντίρροπα. Παρόλα αυτά ο τρόπος της περιστροφής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δε γίνεται να βγει κάποιο ενιαίο συμπέρασμα.

Οι Hayden et al. (2015) πραγματοποίησαν πειράματα αλλάζοντας την ιδιοπερίοδο, τα φορτία έδρασης (A για ελαφριές και J,K για βαρύτερες κατασκευές), τις αποστάσεις των κατασκευών και τις πυκνότητες της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Μελετώντας το **Σχήμα 2.12** (από Hayden et al. 2015) γίνεται αντιληπτό πως στις πιο δυνατές δονήσεις οι κατασκευές τύπου J, K ανέπτυξαν πολύ μεγαλύτερες υπερπιέσεις και καθιζήσεις συγκριτικά με τις κατασκευές τύπου A, FF. Από την άλλη, για ήπιες δονήσεις ισχύει το αντίστροφο ενώ παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση οι γειτονικές κατασκευές που είναι βαριές έχουν σχεδόν μηδενικές υπερπιέσεις πόρων και άρα αισθητά μικρότερες καθιζήσεις.



*Σχήμα 2.12:* Μετρήσεις καθιζήσεων, υπερπιέσεων πόρων (στη μέση της εδαφικής στρώσης υπό την κατασκευή) και επιταχύνσεων. Τα κεφαλαία γράμματα συμβολίζουν την κατηγορία κατασκευής, ενώ ο δείκτης την κατηγορία της γειτονικής (Hayden et al.2015).

Επιπλέον προκύπτει ότι όσο μικραίνει η απόσταση μεταξύ των κατασκευών, μειώνονται οι επιταχύνσεις της ανωδομής. Αυτό συμβαίνει διότι αναπτύσσονται μεγαλύτερες ενεργές τάσεις και υπερπιέσεις πόρων μειώνοντας την στιβαρότητα του εδάφους, αυξάνοντας την υστερητική απόσβεση, οδηγώντας τελικά στη μείωση των επιταχύνσεων στη βάση των κατασκευών.

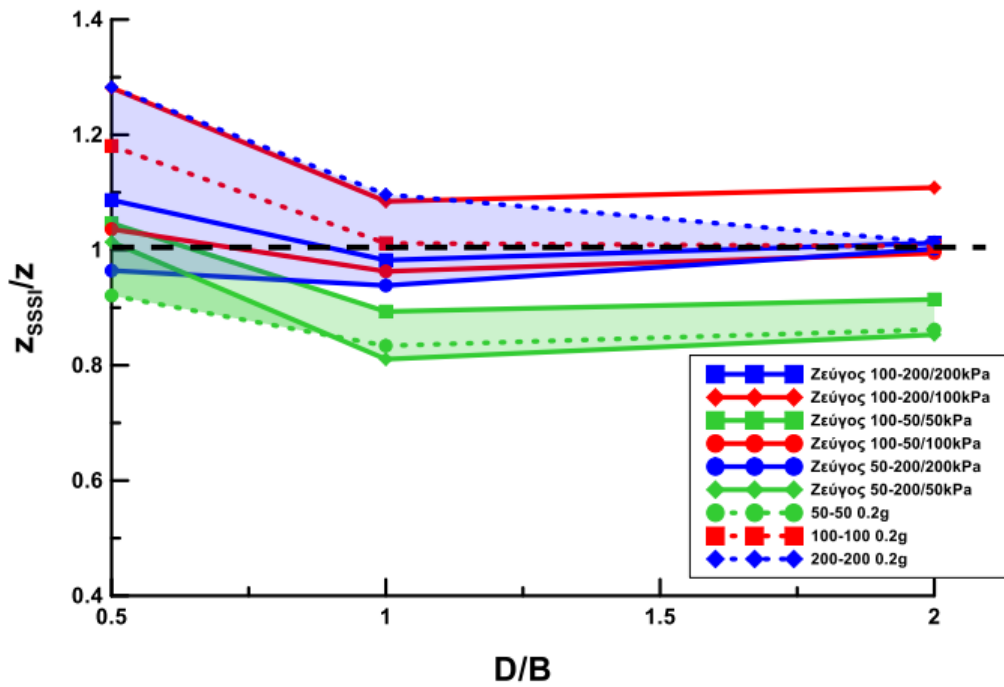
Σε επέκταση των πειραμάτων αυτών, οι Kirkwood et al. (2019) μελέτησαν την αλληλεπίδραση κατασκευών, στην περίπτωση που η μια έχει επιπλέον βελτίωση έναντι ρευστοποίησης με κατακόρυφα στραγγιστήρια. Με την μέθοδο αυτή γίνεται εκτόνωση των υπερπιέσεων διατηρώντας την στιβαρότητα του εδάφους με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρότερων υπερπιέσεων στο έδαφος και άρα μεγαλύτερων επιταχύνσεων. Έτσι ενώ αποτρέπεται η ρευστοποίηση και αναπτύσσονται μικρότερες καθιζήσεις, η κατασκευή καταπονείται περισσότερο και θα πρέπει να υπάρξει καλύτερος αντισεισμικός σχεδιασμός. Από την άλλη, η γειτονική μη-βελτιωμένη κατασκευή, αναπτύσσει μεγάλες υπερπιέσεις πόρων ενώ παράλληλα στραγγίζει προς την άλλη κατασκευή, δημιουργώντας μια ανομοιομορφία στις επιταχύνσεις που εν τέλη φτάνουν στην βάση της και τελικώς μεγάλες καθιζήσεις και στροφές σε μη επιτρεπτά όρια.

Πέρα από πειράματα, ενδιαφέρον έχουν τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας της Νικολέττας Τσεπελίδου (2021) όπου εξετάστηκε η αλληλεπίδραση γειτονικών επιφανειακών θεμελίων διαφόρων διαστάσεων ( $B=5\text{m}$ ,  $B=20\text{m}$ ) και φορτίων έδρασης ( $q=50\text{-}200\text{kPa}$ ) σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Με την υποβολή σεισμού  $a_{\max}=0.1\text{g-}0.4\text{g}$ , μελετήθηκαν οι στροφές των θεμελίων, οι καθιζήσεις των κέντρων τους, καθώς και οι ισοκαμπύλες του  $r_u$  και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο έδαφος θεμελίωσης. Για την ποσοτικοποίηση και την ευκολία σύγκρισης μελετήθηκε ο λόγος  $z_{\text{SSI}}/z$ , όπου  $z_{\text{SSI}}$  είναι η τελική καθίζηση γειτονικών θεμελίων ενώ  $z$  είναι η καθίζηση αντίστοιχου μονού θεμελίου. Συνεπώς για  $z_{\text{SSI}}/z > 1$  υπάρχει δυσμενής αλληλεπίδραση, ενώ για  $z_{\text{SSI}}/z < 1$  ευμενής. Καθώς τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση της επιτάχυνσης δεν είναι συστηματική, παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα για  $a_{\max}=0.2\text{g}$  (από Τσεπελίδου 2021).

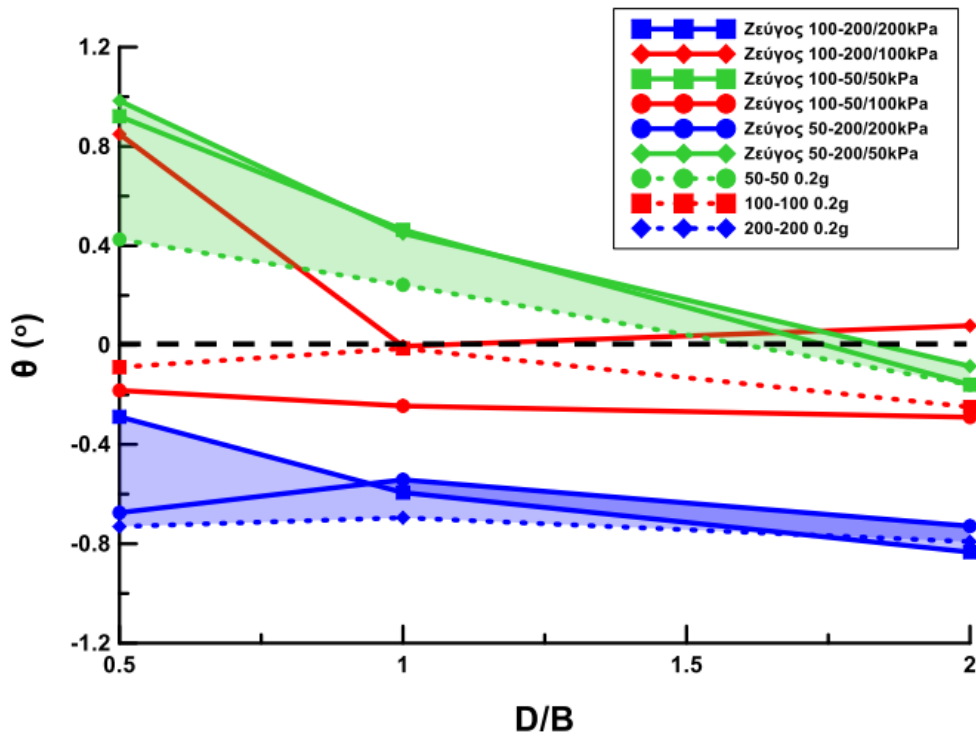
Στο **Σχήμα 2.13** φαίνεται η μεταβολή του λόγου  $z_{\text{SSI}}/z$  ανάλογα με την αδιάστατη απόσταση των θεμελίων ( $D/B$ ) στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων με  $B=5\text{m}$  για τους συνδυασμούς διαφόρων ιδίων φορτίων. Φαίνεται πως στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων (ίδια  $B, q$ ) όσο η απόσταση  $D$  αυξάνεται, ο λόγος καθιζήσεων για συνήθη ( $q=100\text{kPa}$ ) και βαριά ( $q=200\text{kPa}$ ) θεμέλια πλησιάζει την μονάδα, δηλαδή μειώνεται η αλληλεπίδραση τους. Επίσης σε κάθε συνδυασμό θεμελίων, όταν αυξάνεται το  $q$ , αυξάνεται και ο λόγος καθιζήσεων λόγω των αυξημένων πιέσεων πόρων άρα γίνεται πιο δυσμενής αλληλεπίδραση.

Αντίστοιχα στο **Σχήμα 2.14** παρουσιάζονται οι στροφές των θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , με  $\theta > 0$  να υπονοεί συγκλίνουσα στροφή ενώ  $\theta < 0$  αποκλίνουσα στροφή του ενός θεμελίου προς το γειτονικό του. Οι αποκλίνουσες στροφές συνδέονται με την ανάπτυξη υποπιέσεων πόρων ( $r_u < 0$ ) ανάμεσα στα θεμέλια που έχουν ως επόμενο την αύξηση της διατμητικής αντοχής. Έτσι και σε όρους στροφής φαίνεται πως η αύξηση του φορτίου  $q$  οδηγεί σε αλλαγή του προσήμου της.



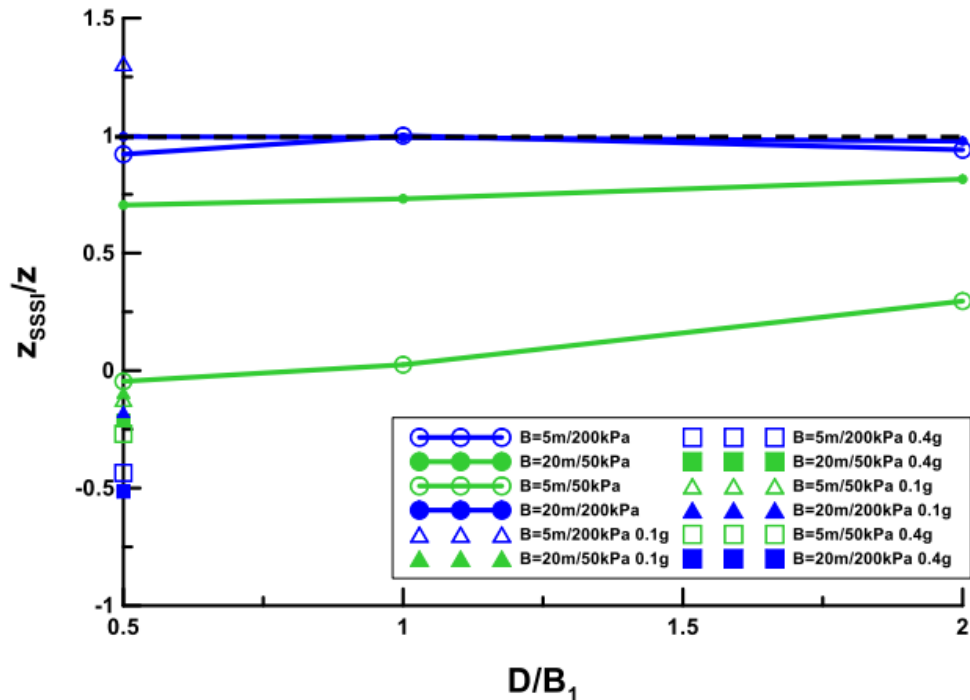


Σχήμα 2.13: Μεταβολή του  $z_{ssi}/z$  για θεμέλια  $B=5m$ , με  $q=50-200kPa$  και  $a_{max}=0.2g$ . Η γραμμοσκίαση δείχνει το εύρος των αποτελεσμάτων για ελαφριά ( $q=50 kPa$ ) και βαριά ( $q=200 kPa$ ) θεμέλια (Τσεπελίδου 2021)



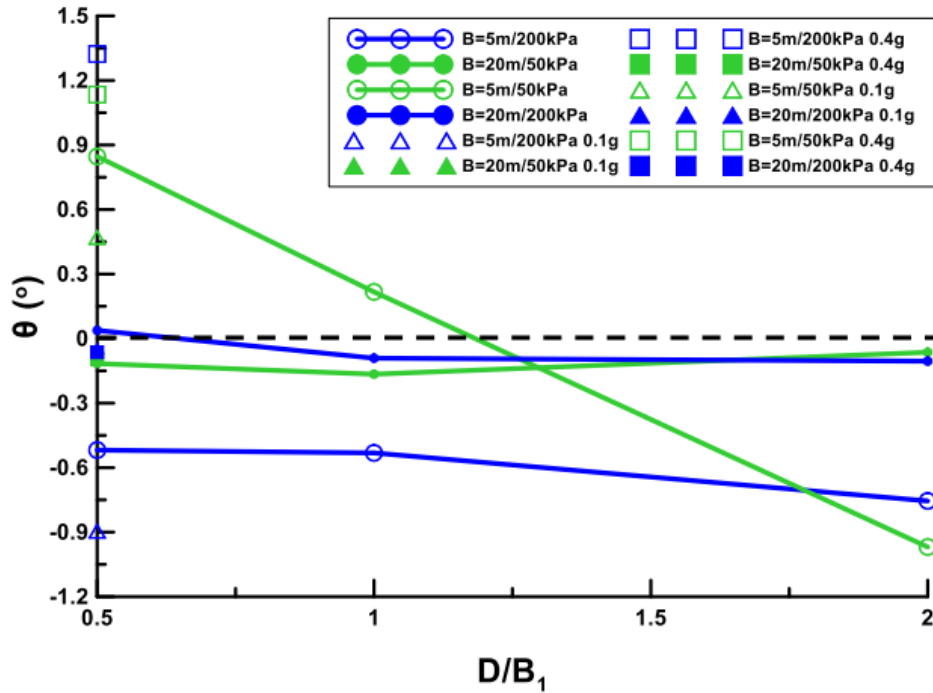
Σχήμα 2.14: Μεταβολή της στροφής για θεμέλια  $B=5m$ , με  $q=50-200kPa$  και  $a_{max}=0.2g$ . Η γραμμοσκίαση δείχνει το εύρος των αποτελεσμάτων για ελαφριά ( $q=50 kPa$ ) και βαριά ( $q=200 kPa$ ) θεμέλια (Τσεπελίδου 2021)

Στην περίπτωση όπου  $B=20\text{m}$ , τόσο ο λόγος  $z_{\text{sssi}}/z$  όσο και η στροφή  $\theta$ , παρατηρήθηκε από αναλύσεις να έχουν τιμές κάτω των 1.0 και 0.0 αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα για ζεύγος θεμελίων οι τιμές κυμαίνονται  $z_{\text{sssi}}/z = 0.52-1.03$  και  $\theta = -0.39^\circ$  έως  $-0.03^\circ$ . Άρα συμπεραίνεται πως στην περίπτωση των ευρέων θεμελίων η αλληλεπίδραση είναι ευμενής και οι στροφές είναι κατά βάση αποκλίνουσες και μικρές. Με την αύξηση του  $q$  σημειώνεται μείωση του λόγου καθίζησης και αύξηση της αποκλίνουσας στροφής.



**Σχήμα 2.15:** Μεταβολή του λόγου  $z_{\text{sssi}}/z$  για θεμέλιο  $B=5\text{m}$  δίπλα σε θεμέλιο με  $B=20\text{m}$  με διαφορετικά φορτία  $q=50-200\text{kPa}$  και  $a_{\text{max}}=0.1\text{g}-0.4\text{g}$  (Τσεπελίδου 2021)

Κατόπιν έγιναν αναλύσεις για περιπτώσεις όπου τα θεμέλια έχουν διαφορετικές διαστάσεις ( $B_1=5\text{m}$  και  $B_2=20\text{m}$ ), διαφορετικά φορτία και βρίσκονται σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις. Πλέον η κανονικοποίηση της απόστασης  $D$  γίνεται μόνο ως προς το  $B_1$ . Στο **Σχήμα 2.15** φαίνονται τα αποτελέσματα για σεισμό  $a_{\text{max}}=0.2\text{g}$  και ακραίους συνδυασμούς συνθηκών:  $q=200\text{kPa}$  για στενό και  $q=50\text{kPa}$  για ευρύ,  $q=50\text{kPa}$  για στενό και  $q=200\text{kPa}$  για ευρύ. Επιπλέον παρουσιάζονται αποτελέσματα για  $D/B_1=0.5$  και για σεισμό με  $a_{\text{max}}=0.1-0.4\text{g}$ , χάριν πληρότητας. Αντίστοιχα, από το **Σχήμα 2.16** όπου φαίνεται η μεταβολή της στροφής των ζευγών θεμελίων, προκύπτει πως το ευρύ θεμέλιο έχει σχεδόν σταθερή στροφή ανεξαρτήτως απόστασης ή φορτίου, ενώ αντίθετα το στενό θεμέλιο έχει πολύ μεγάλη διαφοροποίηση ανάλογα με την απόσταση, ειδικά για  $q=50\text{kPa}$ .



Σχήμα 2.16: Μεταβολή στροφής  $\theta$  για για θεμέλιο  $B=5m$  δίπλα σε θεμέλιο με  $B=20m$  με διαφορετικά φορτία  $q=50-200kPa$  και  $a_{max}=0.1g-0.4g$  (Τσεπελίδου 2021)

Για διαφορετικό φορτίο σε ζεύγος διαφορετικών διαστάσεων θεμελίων, τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι  $z_{sssi}/z=-0.51$  έως  $1.31$  και  $\theta=-0.89^\circ$  έως  $1.32^\circ$ . Πάλι, με την αύξηση του φορτίου του ίδιου θεμελίου, αυξάνεται η αλληλεπίδραση ευνοϊκά. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται πως για μεγάλο  $q$  (δηλαδή βαρύ θεμέλιο) ο λόγος καθιζήσεων είναι αρκετά παρόμοιος για τα στενά και ευρέα θεμέλια. Από την άλλη, για τα ελαφριά θεμέλια η επιρροή του πλάτους είναι σημαντική με έντονες διακυμάνσεις στην περίπτωση του ελαφριού στενού θεμελίου με γειτονικό πλατύ βαρύ όπου μπορεί να προκληθεί μέχρι και ανύψωση ( $z_{sssi}/z < 0$ ).

Συμπερασματικά, μεγαλύτερη σημασία για την αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων βρέθηκε ότι έχει η διάσταση του θεμελίου. Τα στενά θεμέλια αναπτύσσουν μεγάλες στροφές όταν βρίσκονται κοντά σε ευρέα, ενώ όταν το γειτονικό ευρύ είναι πιο βαρύ τότε η αλληλεπίδραση είναι πολύ ευμενής προκαλώντας έως και ανύψωση. Βάση των παραπάνω, η αλληλεπίδραση θεμελίων μπορεί να είναι είτε ευνοϊκή είτε δυσμενής ανάλογα με παράγοντες σχεδιασμού ή συνθήκες φόρτισης. Επιπλέον ενώ τα στραγγιστήρια λειτουργούν ευνοϊκά αποτρέποντας την ρευστοποίηση για την κατασκευή που θεμελιώνουν, μπορούν να προβούν καταστροφικά για τις γύρω μη βελτιωμένες κατασκευές. Έτσι, για μεγαλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που αναπτύσσονται κατά την ρευστοποίηση και το πώς αυτοί επηρεάζουν την συμπεριφορά των κατασκευών, κρίνεται χρήσιμη η περαιτέρω διερεύνηση στην περίπτωση βελτιωμένων και μη-βελτιωμένων κατασκευών, όταν η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται με χαλικοπασσάλους.

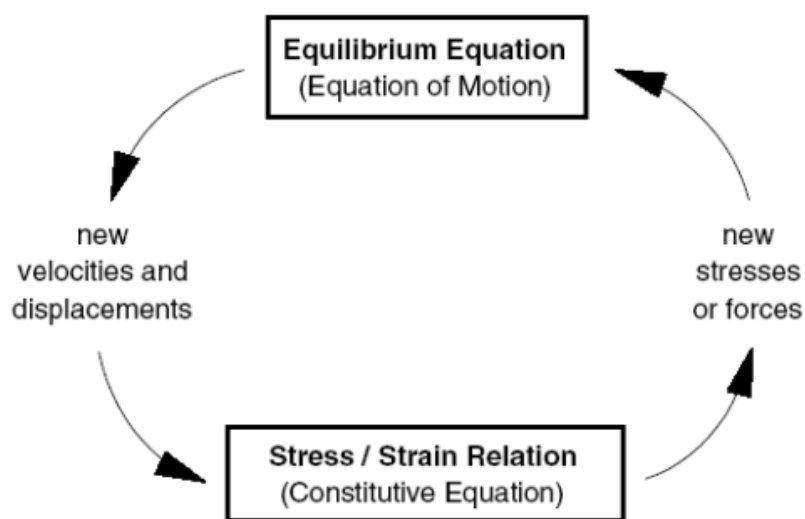
### 3. Μεθοδολογία αριθμητικών αναλύσεων

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε να εξεταστεί η αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελιώσεων επί ρευστοποιήσιμου εδάφους με ή χωρίς βελτίωση με χαλικοπασσάλους έναντι ρευστοποίησης. Μέσω του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca Inc. 2011) το οποίο εκτελεί μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις, προσομοιώθηκαν οι περιπτώσεις ενδιαφέροντος, με το ρευστοποιήσιμο έδαφος και τους χαλικοπασσάλους να προσομοιώνονται με το καταστατικό μοντέλο NTUA\_SAND (Paradimitriou and Bouckovalas 2002, Andrianopoulos et al. 2010). Λεπτομέρειες για τις εν λόγω πλήρως συζευγμένες, μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

#### 3.2 Λογισμικό και καταστατικό προσομοίωμα

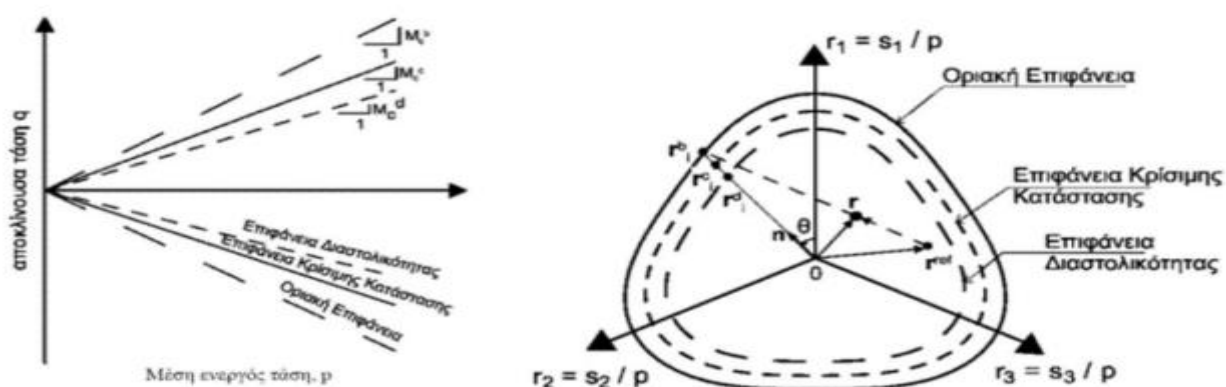
Το γεωτεχνικό λογισμικό FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, 2 Dimensions) πραγματοποιεί αναλύσεις με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών σε κάρναβο (grid) αποτελούμενο από ζώνες (zones) και κόμβους (nodes/gridpoints). Συγκεκριμένα, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία όπου ανάλογα με το καταστατικό προσομοίωμα και τα φορτία/μετατοπίσεις κάθε ζώνης, υπολογίζονται τάσεις και παραμορφώσεις στους κόμβους ώσπου να υπάρξει ισορροπία. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**.



Σχήμα 3.1: Σειρά υπολογισμών στο λογισμικό FLAC.

Αναλυτικότερα, με γνωστές τις αρχικές τάσεις, υπολογίζονται οι ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους του καννάβου και προσδιορίζεται η μη ισορροπούσα δύναμη τους. Για να επιτευχθεί ισορροπία προσαυξάνεται η ταχύτητα κάθε κόμβου και έτσι από την παραγωγή της νέας ταχύτητας, εκτιμάται η επιτάχυνση και έπειτα ο ρυθμός μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης κάθε ζώνης. Τελικώς, μέσω των παραμορφώσεων υπολογίζεται η προσαύξηση των τάσεων, ανάλογα με το καταστατικό προσομοίωμα. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η συνισταμένη μη ισορροπούσα δύναμη να είναι σε όλους τους κόμβους μηδέν, ή πιο ρεαλιστικά κάτω από ένα επιλεγμένο όριο σφάλματος της αριθμητικής σύγκλισης. Αρνητικό της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι οι υπολογισμοί γίνονται με επαναληπτικές διαδικασίες ώσπου να επέλθει ισορροπία το οποίο υποδηλώνει μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους.

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA\_SAND που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε αρχικά από τους Paradimitriou & Bouckovalas (2002) με στόχο την προσομοίωση ρευστοποιήσιμων εδαφών, ενώ η τελική του μορφή είναι από τους Andrianopoulos (2006) και Karamitros (2010). Σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις θεωρίες πλαστικότητας και Κρίσιμης Κατάστασης και εκτιμά τις πλαστικές παραμορφώσεις με βάση την απόσταση της τρέχουσας κατάστασης από τρεις μη κυκλικές επιφάνειες (Οριακή επιφάνεια, Επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης, Επιφάνεια Διαστολικότητας) με κοινή κορυφή στην αρχή των αξόνων. Στο **Σχήμα 3.2** φαίνεται η απεικόνιση των επιφανειών σε τριαξονική εντατική κατάσταση και οι προβολές τους στο αποκλίνον επίπεδο π.



**Σχήμα 3.2:** Επιφάνειες προσομοιώματος NTUA\_SAND στο χώρο p-q και η προβολή τους στο επίπεδο π (p:μέση ενεργός τάση, q:αποκλίνουσα τάση).

Στις παρακάτω περιπτώσεις το NTUA\_SAND μπορεί να πετύχει επαρκή ακρίβεια προσομοίωσης για κοκκώδη εδάφη χωρίς αναβαθμονόμηση των 13 παραμέτρων του:

- Στραγγιζόμενες και αστραγγιστες συνθήκες φόρτισης
- Μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις
- Διαφορετικές τιμές δείκτη πόρων (και σχετικής πυκνότητας)
- Διαφορετικές ενεργές τάσεις στερεοποίησης

### 3.3 Λεπτομέρειες προσομοίωσης

#### 3.3.1 Έδαφος

Σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, θεωρήθηκε ρευστοποιήσιμη άμμος τύπου Nevada πάχους  $H=10m$  με τα εδαφικά χαρακτηριστικά του **Πίνακα 3.1**, και προσομοιώθηκε με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA\_SAND. Για τον πλήρη προσδιορισμό του προσομοιώματος απαιτούνται 13 αδιάστατες θετικές παράμετροι, 2 από τις οποίες αλλάζουν από μονοτονική σε ανακυκλική φόρτιση. Για το έδαφος, οι τιμές τους παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.2**. Επισημαίνεται πως το έδαφος θεωρήθηκε πλήρως κορεσμένο, με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται στην επιφάνεια.

*Πίνακας 3.1:* Χαρακτηριστικά του εδάφους αναλύσεων: άμμος τύπου Nevada.

Σχετική πυκνότητα $D_r$ (%)	45
Δείκτης πόρων $e$	0.718
Ξηρή πυκνότητα $\rho_k$ ( $Mgr/m^3$ )	1.554
Διαπερατότητα $K$ (m/s)	$6.6 \cdot 10^{-6}$

*Πίνακας 3.2:* Τιμές παραμέτρων του καταστατικού προσομοιώματος NTUA\_SAND για το υλικό του εδάφους.

<b>B</b>	180 (μονοτονική) / 600 (ανακυκλική)
<b>v</b>	0.33
<b>ecr</b>	0.809
<b>λ</b>	0.022
<b>Mc</b>	1.25
<b>c</b>	0.72
<b>kb</b>	1.45
<b>kd</b>	0.3
<b>γ</b>	0.00025
<b>α</b>	1 (μονοτονική) / 0.6 (ανακυκλική)
<b>Ao</b>	0.8
<b>ho</b>	15000
<b>No</b>	40000

#### 3.3.2 Θεμέλια

Για την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των κατασκευών πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις 2D για μονά θεμέλια πλάτους  $B=5m$  και για θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5m$ , σε συνδυασμούς αποστάσεων  $D=2.8m$ ,  $D=5m$ ,  $D=10m$  και φορτίων  $q=50kPa$ ,  $q=100kPa$  και  $q=200kPa$ . Καθώς η ρευστοποίηση σε μια παχιά στρώση άμμου μειώνει την ταλάντωση που φτάνει στην

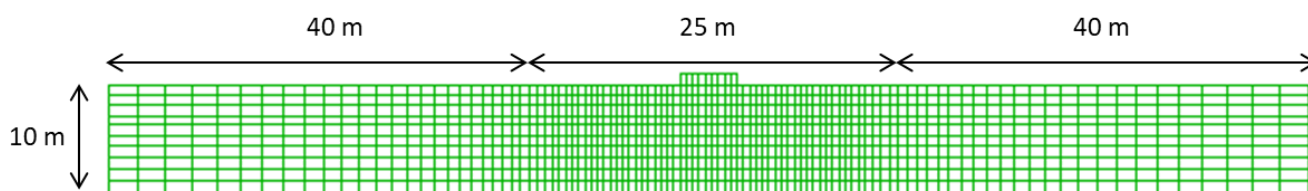
επιφάνεια, η κινηματική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής καθίσταται η κύρια μορφή αλληλεπίδρασης. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις η μάζα των θεμελίων είναι σχεδόν μηδενική ώστε να μην αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις κατά την επιβολή της δόνησης. Θεωρήθηκε διαπερατότητα  $10^4$  φορές μικρότερη από αυτή του εδάφους ώστε το θεμέλιο να λειτουργεί ως αδιαπέρατο, καθώς και μεγάλες τιμές στα μέτρα διάτμησης και ισότροπης συμπίεσης ώστε να λειτουργεί ως άκαμπτο. Επίσης θεωρήθηκε τραχύ, καθώς δεν επιτρέπεται η ολίσθηση του επί του εδάφους, ούτε το ανασήκωμα. Στον **Πίνακα 3.3** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του θεμελίου.

*Πίνακας 3.3:* Χαρακτηριστικά θεμελίου

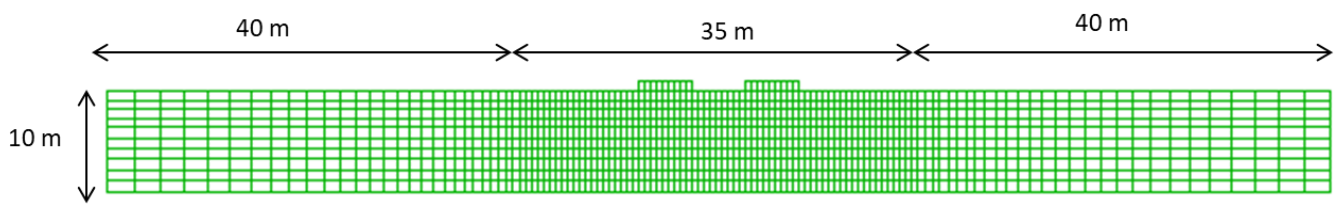
Μέτρο διάτμησης $G$ ( $kN/m^2$ )	1.000.000
Μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K$ ( $kN/m^2$ )	2.000.000
Πυκνότητα $\rho$ ( $Mgr/m^3$ )	0.1
Πορώδες $n$	0.1
Ύψος $H$ (m)	1

### 3.3.3 Κάνναβος

Σε όλες τις αναλύσεις το ύψος του καννάβου είναι σταθερό και ίσο με  $H=10m$ , ενώ το πλάτος αλλάζει έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση να εκτείνεται αρκετά από τα θεμέλια και τα πλευρικά όρια να μην επηρεάζουν την συμπεριφορά τους. Καθώς η περιοχή των θεμελίων είναι το βασικό σημείο ενδιαφέροντος, πραγματοποιήθηκε τοπική πύκνωση του καννάβου. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του μονού θεμελίου πλάτους  $B=5m$ , το πλάτος επιρροής είναι  $25m$  και αποτελείται από 45 στοιχεία πλάτους  $0.55m$ , ενώ τα υπόλοιπα  $40m$  προς τα πλευρικά όρια, αποτελούνται από 30 στοιχεία που στον οριζόντιο άξονα πυκνώνουν κατά 5% από στοιχείο σε στοιχείο με την απόσταση από τα θεμέλια και στον κατακόρυφο άξονα κατά 2%, αντίστοιχα. Ενδεικτικά στο **Σχήμα 3.3** παρουσιάζεται ο κάνναβος για μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5m$  και στο **Σχήμα 3.4** ο αντίστοιχος κάνναβος στην περίπτωση των δίδυμων θεμελίων πλάτους  $B=5m$  και απόστασης  $D=5m$ . Για τις υπόλοιπες αποστάσεις  $D$  ( $D=2.78m$ ,  $D=10m$ ) το πλάτος του καννάβου μειώθηκε κατά  $2.22m$  και αυξήθηκε κατά  $5m$  αντίστοιχα. Τα θεμέλια σε όλες τις περιπτώσεις έχουν πλάτος  $B=5m$  και αποτελούνται από 9 στοιχεία πλάτους  $0.55m$ .



*Σχήμα 3.3:* Τυπική διάταξη καννάβου για μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5m$  χωρίς βελτίωση.

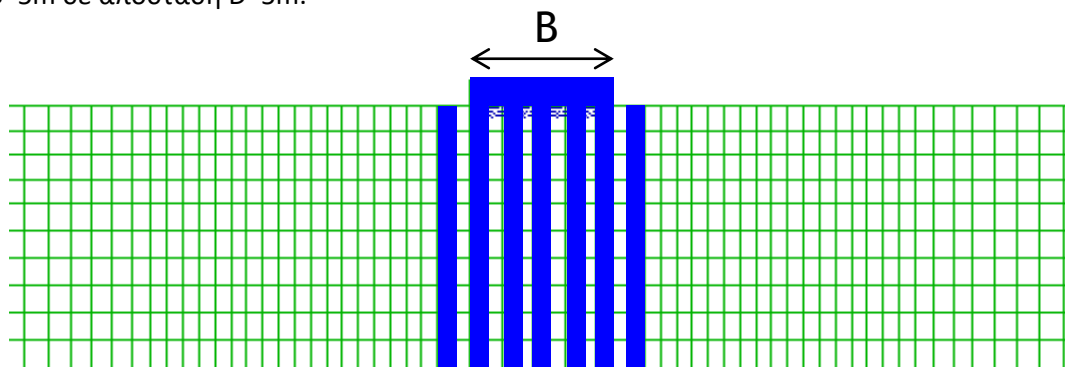


Σχήμα 3.4: Τυπική διάταξη καννάβου για δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=5\text{m}$  χωρίς βελτίωση.

### 3.3.4 Χαλικοπάσσαλοι

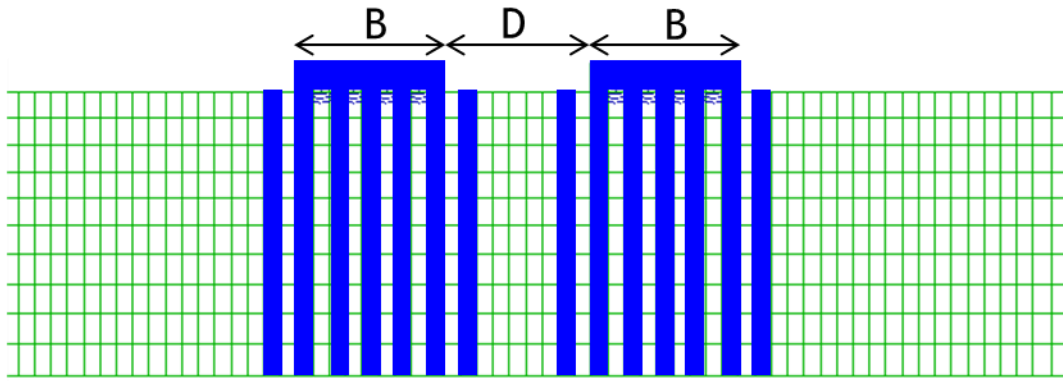
Για την αποτροπή της ρευστοποίησης επιλέχθηκε βελτίωση με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων ποσοστού αντικατάστασης. Η προσομοίωση ενός 3D καννάβου με 2D αναλύσεις είναι προφανώς μη ρεαλιστική, αλλά καθώς οι αναλύσεις αυτές έχουν περισσότερο ποιοτικό χαρακτήρα, δηλαδή να αποτυπώσουν την αλληλεπίδραση σε συγκρίσεις με και χωρίς χαλικοπασσάλους, κρίνεται επαρκής. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μια πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, όπου στήλη παρά στήλη εδάφους θεωρείται ότι αντικαθίσταται από χάλικες. Δεδομένης της διακριτοποίησης, αυτή η προσομοίωση αντιστοιχεί αδρά σε ποσοστό αντικατάστασης  $A_r=50\%$ , με πασσάλους πλάτους  $D=0.55\text{m}$  και μήκους  $H=10\text{m}$ . Στο **Σχήμα 3.5** παρουσιάζεται η τυπική διάταξη μονού θεμελίου πλάτους  $B=5\text{m}$  βελτιωμένου με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων και στο **Σχήμα 3.6** ο αντίστοιχος κάνναβος για δίδυμα θεμέλια πλάτους  $B=5\text{m}$  σε απόσταση  $D=5\text{m}$ . Τοποθετήθηκαν συνολικά 7 σειρές χαλικοπασσάλων, 5 κάτω από το θεμέλιο ανά  $0.55\text{m}$  και από 1 εκατέρωθεν του θεμελίου, δηλαδή η βελτίωση εκτείνεται ελάχιστα εκτός της κάτοψης του θεμελίου.

Διερεύνηση έγινε ως προς την αλληλεπίδραση κατασκευών ίδιου και διαφορετικού φορτίου, όπου και οι δύο είναι με ή χωρίς βελτίωση, αλλά και στις περιπτώσεις όπου μόνο η μια έχει χαλικοπασσάλους, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.7** για δίδυμα θεμέλια πλάτους  $B=5\text{m}$  σε απόσταση  $D=5\text{m}$ .

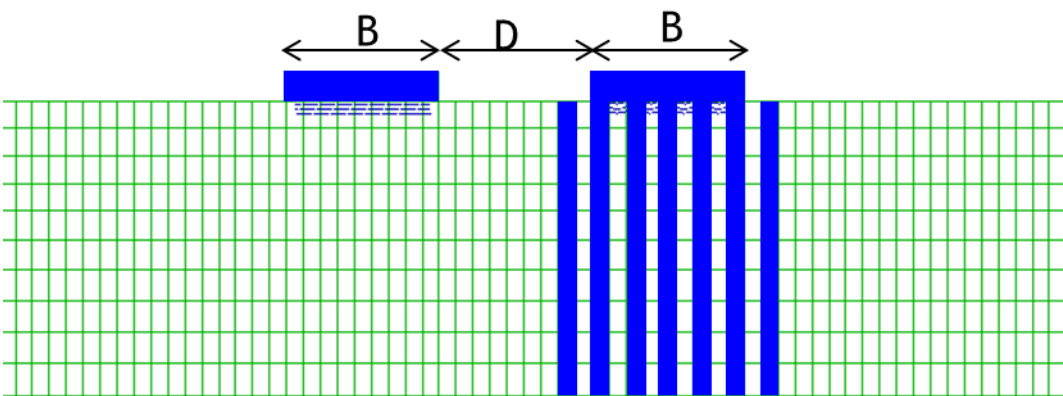


Σχήμα 3.5: Τυπική διάταξη καννάβου για μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$  με βελτίωση.





Σχήμα 3.6: Τυπική διάταξη καννάβου για δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=5\text{m}$  με βελτίωση.



Σχήμα 3.7: Τυπική διάταξη καννάβου για δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=5\text{m}$  με βελτίωση μόνο στο ένα.

Η προσομοίωση των χαλικοπασσάλων είναι μια πολύ δυσχερής διαδικασία. Με βάση τη διπλωματική εργασία του Βάιου Κατσουλάρη (2021), η συμπύκνωση που προκαλείται στο έδαφος ανάμεσα στους χαλικοπασσάλους λόγω των δονήσεων κατά την κατασκευή τους φάνηκε να επηρεάζει ελάχιστα την απόδοση αυτών. Έτσι, στην παρούσα εργασία, χάρη στην απλούστευση, η συμπύκνωση της άμμου θεωρήθηκε αμελητέα. Επιπλέον, με βάση την ίδια εργασία, η στράγγιση είναι δευτερεύουσας σημασίας, οπότε εδώ θεωρείται μία τιμή διαπερατότητας για τους χαλικοπασσάλους 200 φορές μεγαλύτερη από του εδάφους, χωρίς περαιτέρω διερεύνηση. Ως σύνολο, τα χαρακτηριστικά του υλικού των χαλικοπασσάλων φαίνονται στον **Πίνακα 3.4**. Τέλος, σύμφωνα με τον Κατσουλάρη (2021), το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό των χαλικοπασσάλων είναι η ενίσχυση που προκαλούν. Στην παρούσα εργασία, οι χαλικοπασσάλοι προσομοιώθηκαν με το NTUA\_Sand με τιμές παραμέτρων που φαίνονται στον **Πίνακα 3.5**. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τη βαθμονόμηση του Κατσουλάρη (2021), θεωρώντας μια μέση απόκριση μεταξύ του άνω και κάτω ορίου ενίσχυσης που όρισε εκείνος.

*Πίνακας 3.5:* Χαρακτηριστικά υλικού χαλικοπασσάλων.

Σχετική πυκνότητα $D_r$ (%)	90
Πορώδες $n$	0.347
Διαπερατότητα $K$ (m/s)	$1.32 \cdot 10^{-3}$
Δείκτης πόρων $e$	0.531

*Πίνακας 3.5:* Τιμές παραμέτρων του καταστατικού προσομοιώματος NTUA\_SAND για το υλικό των χαλικοπασσάλων.

<b>B</b>	1000 (μονοτονική) / 1830 (ανακυκλική)
<b><math>\nu</math></b>	0.005
<b>ecr</b>	0.695
<b><math>\lambda</math></b>	0.018
<b>Mc</b>	1.58
<b>c</b>	0.9
<b>kb</b>	0.5
<b>kd</b>	2.5
<b><math>\gamma</math></b>	0.00025
<b><math>\alpha</math></b>	1 (μονοτονική) / 0.6 (ανακυκλική)
<b>Ao</b>	0.2
<b>ho</b>	25000
<b>No</b>	55000

### 3.3.5 Σεισμική διέγερση

Στη βάση του προσομοιώματος εφαρμόστηκε οιονεί αρμονική διέγερση μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης  $a_{\max}=0.2g$ , περιόδου  $T_e=0.35s$  με αριθμό σημαντικών κύκλων  $N=10$ . Εφαρμόστηκαν επιπλέον 2 κύκλοι στην αρχή και στο τέλος της διέγερσης, για σταδιακή αύξηση και μείωση της επιτάχυνσης ώστε να αποφευχθούν ενισχύσεις λόγω της παροδικής ταλάντωσης.

### 3.3.6 Συνοριακές συνθήκες

Αρχικά για τον υπολογισμό των τάσεων του γεωστατικού πεδίου και των θεμελίων, δεσμεύτηκαν τα πλευρικά όρια του καννάβου κατά τον οριζόντιο άξονα  $x$  και η βάση του κατά τον κατακόρυφο άξονα  $y$ . Έτσι επιτράπηκαν οι όποιες στατικές καθιζήσεις μέχρι το φορτίο λειτουργίας  $q$ , που είναι μακριά από τη φέρουσα ικανότητα υπό στατικές συνθήκες.

Κατά την επιβολή της διέγερσης αποδεσμεύτηκε η μετακίνηση στον οριζόντιο άξονα, ενώ ταυτόχρονα επιβλήθηκε οι αντικριστοί πλευρικοί κόμβοι του καννάβου στο ίδιο κάθε φορά

ύψος να έχουν την ίδια οριζόντια μετακίνηση και ταχύτητα ώστε να προσομοιώνονται επαρκώς οι συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Δεδομένου και του μεγάλου εύρους των καννάβων που χρησιμοποιήθηκαν, αυτές οι συντοιακές συνθήκες έχουν αποδειχτεί επαρκείς.

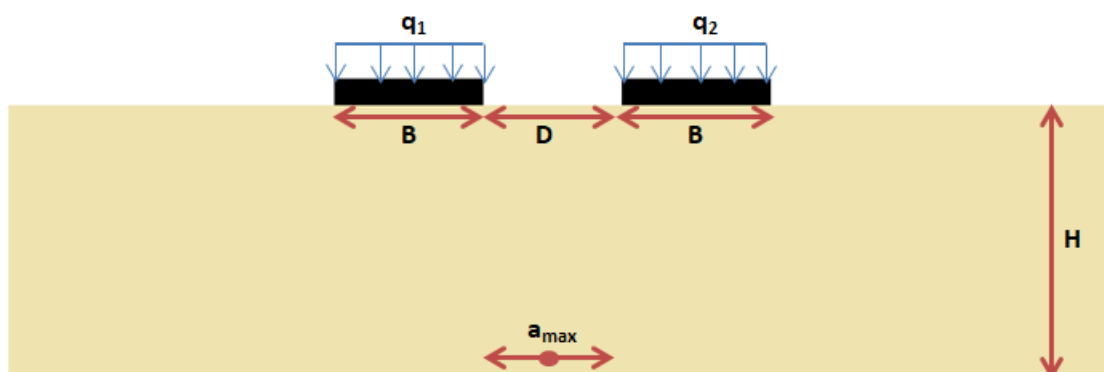
### 3.4 Παραμετρική διερεύνηση

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης των θεμελίων, ίδιου και διαφορετικού φορτίου, με και χωρίς τη βελτίωση με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων. Σε κάθε περίπτωση, ως περιπτώσεις αναφοράς θεωρούνται εκείνες για μεμονωμένο θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$ , με φορτία θεμελίου  $q=50\text{kPa}$  (ελαφρύ),  $q=100\text{kPa}$  (σύνηθες),  $q=200\text{kPa}$  (βαρύ), με και χωρίς τη βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\text{max}}=0.2g$ . Από εκεί και πέρα θεωρήθηκε και δεύτερο θεμέλιο ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , αλλά όχι αναγκαστικά ίδιου φορτίου, σε αποστάσεις  $D=2.8\text{m}$ ,  $D=5\text{m}$ ,  $D=10\text{m}$ , με περιπτώσεις βελτίωσης όπου είτε το ένα, είτε και τα δύο ή κανένα από τα θεμέλια δεν βελτιώθηκε με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται στα επόμενα δύο (2) κεφάλαια, πρώτα στο Κεφάλαιο 4 για περιπτώσεις όπου τα θεμέλια είναι δίδυμα (ίδιο σύνηθες φορτίο  $q = 100\text{kPa}$ ), και μετά στο Κεφάλαιο 5 για περιπτώσεις όπου τα θεμέλια δεν είναι δίδυμα, καθώς το ένα θεμέλιο είναι ελαφρύ ( $q = 50\text{kPa}$ ) και το άλλο είναι βαρύ ( $q = 200\text{kPa}$ ).

## 4. Αλληλεπίδραση θεμελίων ιδίου φορτίου, με και χωρίς βελτίωση έναντι ρευστοποίησης

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν ώστε να μελετηθεί η αλληλεπίδραση δύο γειτονικών θεμελιολωρίδων ιδίου πλάτους και ιδίου φορτίου, με ή χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος υπό σεισμική διέγερση. Βάση της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, αρχικά εξετάστηκε για λόγους σύγκρισης η περίπτωση μονού θεμελίου πλάτους  $B = 5$  m, φορτίου  $q = 100$  kPa με και χωρίς βελτίωση έναντι ρευστοποίησης υπό σεισμική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max} = 0.2$  g. Ύστερα, έγινε διερεύνηση ως προς τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση δίδυμων θεμελίων (δηλαδή θεμελίων ιδίου πλάτους και φορτίου) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά των μονών θεμελίων κάτω από τις ίδιες κάθε φορά συνθήκες ώστε να φανεί αν η αλληλεπίδραση είναι ευμενής ή όχι. Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζεται η τυπική διάταξη του προβλήματος και στον **Πίνακα 4.1(α, β)** φαίνονται τα παραμετρικά χαρακτηριστικά των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου.



**Σχήμα 4.1:** Τυπική διάταξη θεμελίων πλάτους  $B$ , σε απόσταση  $D$ , υπό φορτία  $q_1, q_2$  και σεισμική διέγερση  $a_{max}$  σε ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους  $H$ .

**Πίνακας 4.1.α:** Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση μονού θεμελίου, με και χωρίς κάνναβο χαλικοπασσάλων.

$B$ (m)	$a_{max}$ (g)	$q$ (kPa)	Βελτίωση με χαλικοπασσάλους
5	0.2	100	-
5	0.2	100	✓

Πίνακας 4.1.β: Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση ζεύγους δίδυμων θεμελίων, πλάτους B και φορτίου  $q_1=q_2=q$ , με και χωρίς κάναβο χαλικοπασσάλων υπό αυτά.

B (m)	D (m)	$a_{max}$ (g)	q (kPa)	Βελτίωση με χαλικοπασσάλους	
				θεμέλιο 1	θεμέλιο 2
5	2.8	0.2	100	-	-
5	2.8	0.2	100	✓	✓
5	2.8	0.2	100	-	✓
5	5	0.2	100	-	-
5	5	0.2	100	✓	✓
5	5	0.2	100	-	✓
5	10	0.2	100	-	-
5	10	0.2	100	✓	✓
5	10	0.2	100	-	✓

Τα μεγέθη που τελικά εξετάστηκαν για την συμπεριφορά των θεμελίων κατά την ρευστοποίηση είναι η καθίζηση του κέντρου των άκαμπτων θεμελίων, η στροφή τους στην περίπτωση ζεύγους θεμελίων (καθώς μονό θεμέλιο θεωρείται πως έχει μηδενική στροφή), η χωρική κατανομή του συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και η χωρική κατανομή της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο έδαφος θεμελίωσης. Η καθίζηση και η στροφή μελετήθηκαν σε όρους χρονοϊστορίας, ενώ ο συντελεστής  $r_u$  και η παραμόρφωση  $\gamma$  σε όρους ισοκαμπύλων στο τέλος της διέγερσης.

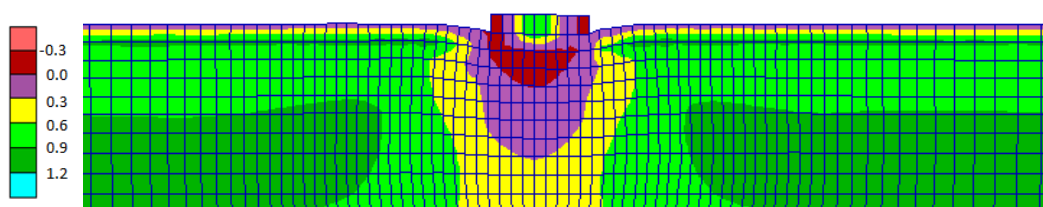
Σημειώνεται πως αρνητική καθίζηση υποδηλώνει ανύψωση θεμελίου ενώ θετική καθίζηση υποδηλώνει ταπείνωση της μέσης στάθμης του θεμελίου σε σχέση με εκείνη πριν τη σεισμική διέγερση. Στις στροφές, το θετικό πρόσημο υποδηλώνει περιστροφή προς το γειτονικό θεμέλιο (συγκλίνουσα) ενώ το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει περιστροφή κατά του γειτονικού θεμελίου (αποκλίνουσα). Αναλύσεις για άλλες τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης του σεισμού δεν πραγματοποιήθηκαν καθώς από τις εργασίες των Κατσουλάρη (2021) και Τσεπελίδου (2021) η επίδραση της  $a_{max}$  δεν είναι πάντα συστηματική.

## 4.2 Απόκριση μεμονωμένου θεμελίου, βελτιωμένου ή μη

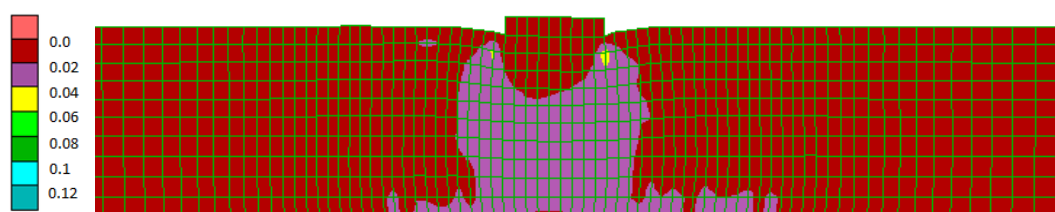
Για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς θεμελίων επί ρευστοποιήσιμου εδάφους και της αποδοτικότητας της βελτίωσης με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, αρχικά έγιναν αναλύσεις για μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$  με και χωρίς βελτίωση ( βλ. Πίνακα 4.1.α ). Οι δύο αναλύσεις αυτές αποτέλεσαν τα σημεία αναφοράς για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των λοιπών αναλύσεων αυτού του κεφαλαίου. Υπογραμμίζεται ότι το έδαφος είναι ομοιόμορφο και οριζόντιο, ενώ το θεμέλιο είναι κεντρικά φορτισμένο. Συνεπώς, η σεισμική διέγερση δεν προκαλεί ουσιώδη στροφή στο θεμέλιο, παρά μόνο τιμές στροφής αριθμητικής προέλευσης που θεωρούνται πρακτικώς μηδενικές.

### 4.2.1 Απόκριση μεμονωμένου μη βελτιωμένου θεμελίου

Στο Σχήμα 4.2(α,β) φαίνονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  για την περίπτωση μονού μη βελτιωμένου θεμελίου. Υπενθυμίζεται πως ο συντελεστής  $r_u$  ισούται με τον λόγο υπερπίεσεων πόρων ( $\Delta u$ ) προς την αρχική ενεργό κατακόρυφη τάση ( $\sigma'_{vo}$ ) και άρα όταν  $r_u=0$  επικρατούν υδροστατικές πιέσεις πόρων ενώ όταν  $r_u=1$  γίνεται ρευστοποίηση. Από την άλλη, όταν  $r_u < 0$  προκύπτει έντονη διαστολικότητα.



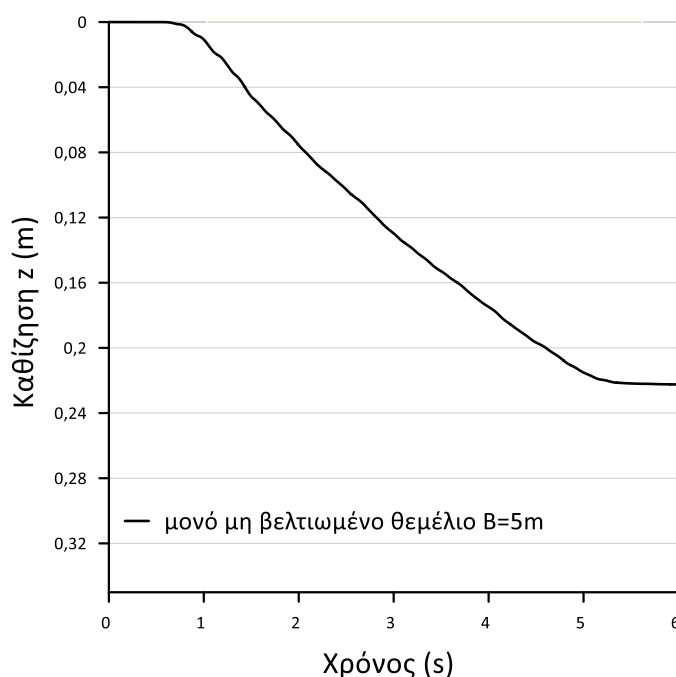
**Σχήμα 4.2.α:** : Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{ m}$ , χωρίς βελτίωση, υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .



**Σχήμα 4.2.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{ m}$ , χωρίς βελτίωση, υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.2.α** μακριά από το θεμέλιο ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων έχει τιμές  $r_u \geq 0.9$ , δηλαδή έχει ρευστοποιηθεί το έδαφος στο τέλος της διέγερσης. Αντιθέτως κάτω από το θεμέλιο οι τιμές  $r_u$  είναι μικρότερες του 1.0, δηλαδή δεν έχει ρευστοποιηθεί το έδαφος. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο της ανωδομής αυξάνει τοπικά τις αρχικές ενεργές τάσεις  $\sigma'_{vo}$ , οπότε αντίστοιχες τιμές του  $\Delta u$  οδηγούν σε τιμές του λόγου  $r_u = \Delta u / \sigma'_{vo}$  μικρότερες. Το **Σχήμα 4.2.β** αποδίδει τον μηχανισμό αστοχίας του εδάφους και γίνεται αντιληπτό πως τείνει να δημιουργηθεί κατακόρυφος μηχανισμός αστοχίας κάτω από τα άκρα του θεμελίου.

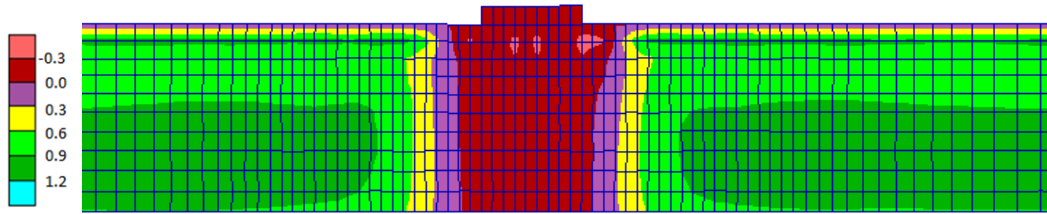
Στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζεται η ιστορία καθίζησης του μονού μη βελτιωμένου θεμελίου. Η μέγιστη τιμή της καθίζησης είναι  $z = 22.2$  cm, τιμή μη αποδεκτή για επιφανειακές θεμελιώσεις. Έτσι, ενώ το έδαφος δεν ρευστοποιείται κάτω από το θεμέλιο, η βελτίωση του κρίνεται απαραίτητη λόγω της μεγάλης καθίζησης που προκαλείται.



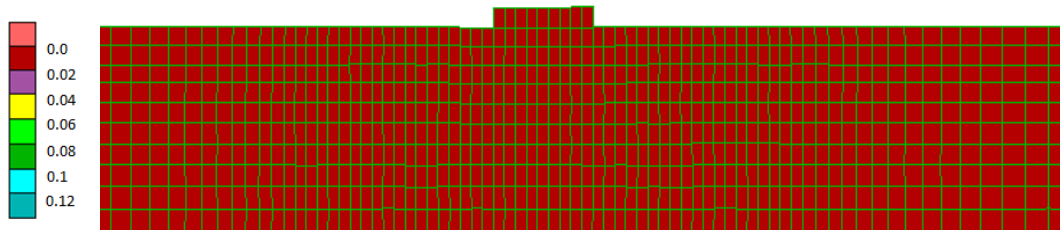
**Σχήμα 4.3:** Καθίζηση μονού μη βελτιωμένου θεμελίου πλάτους  $B=5$ m, υπό φορτίο  $q=100$ Kra και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{max}=0.2g$ .

#### 4.2.2 Απόκριση μεμονωμένου βελτιωμένου θεμελίου

Ως τρόπος βελτίωσης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης, επιλέχθηκε η κατασκευή πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, κάτω και ελάχιστα εκτός του θεμελίου (βλ. **Κεφάλαιο 3** για λεπτομέρειες). Στο **Σχήμα 4.4 (α, β)** φαίνονται οι χωρικές κατανομές του λόγου  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης.



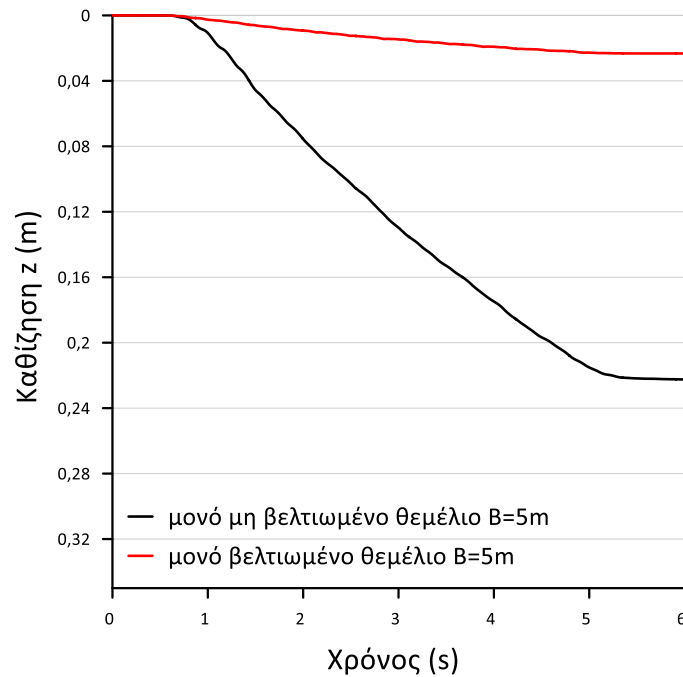
**Σχήμα 4.4.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{ m}$ , βελτιωμένου με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων υπό φορτίο  $q=100\text{kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .



**Σχήμα 4.4.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{ m}$ , βελτιωμένου με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων υπό φορτίο  $q=100\text{kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

Συγκρίνοντας τα **Σχήματα 4.3** και **4.4**, φαίνεται πως ο πυκνός κώνος χαλικοπασσάλων έχει βελτιώσει σημαντικά την συμπεριφορά του εδάφους, μειώνοντας σημαντικά τις υπερπίεσεις πόρων και τις παραμορφώσεις κάτω από το θεμέλιο. Μάλιστα σε σημεία κάτω από το θεμέλιο προκύπτει και συστηματική ανάπτυξη υποπίεσεων ( $r_u < 0$ ) λόγω διαστολικότητας. Αυτό συνεπάγεται αύξηση των ενεργών τάσεων σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες και συνεπώς αύξηση της αντοχής και της στιβαρότητας του εδάφους. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ο πρακτικός μηδενισμός των καθιζήσεων (πλέον  $z=2.3\text{cm}$ ) σε σχέση με το μονό μη βελτιωμένο θεμέλιο ( $z=22.2\text{ cm}$ ) όπως αυτό επιβεβαιώνεται από το **Σχήμα 4.5** όπου συγκρίνονται οι δύο χρονοϊστορίες.





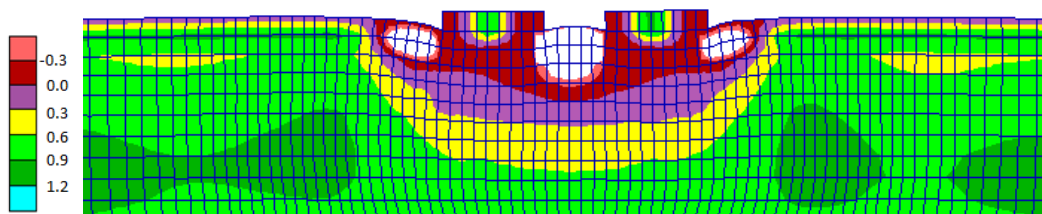
Σχήμα 4.5: Σύγκριση καθίζησης μονού θεμελίου βελτιωμένου με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων και μη βελτιωμένου θεμελίου, πλάτους  $B=5\text{ m}$  υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$

### 4.3 Απόκριση δίδυμων θεμελίων, κοινά βελτιωμένων και μη

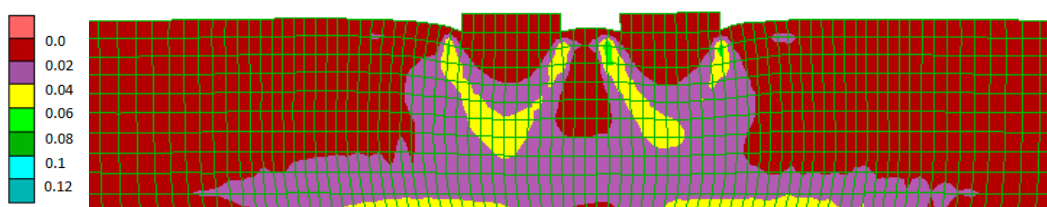
Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η απόκριση δίδυμων θεμελίων πλάτους  $B=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q_1=q_2=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ , για διαφορετικές τιμές της μεταξύ τους απόστασης ( $D= 2.8\text{ m}, 5\text{ m}, 10\text{ m}$ ) και για περιπτώσεις όπου κανένα ή και τα δύο είναι βελτιωμένα με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων. Στόχος των αναλύσεων αυτών είναι η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης των δύο θεμελίων, η μελέτη των παραγόντων που την επηρεάζει και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα του μεμονωμένου θεμελίου ώστε να γίνει αξιολόγηση για το αν η αλληλεπίδραση είναι ευμενής ή όχι. Σημειώνεται πως λόγω της συμμετρίας του προβλήματος ως χρονοϊστορία καθίζησης σε ζεύγος δίδυμων θεμελίων θεωρείται η μέση χρονοϊστορία των δύο θεμελίων, αλλά σε ό,τι αφορά στις στροφές παρουσιάζονται και οι δύο χρονοϊστορίες παρότι τα θεμέλια είναι δίδυμα.

### 4.3.1 Απόκριση δίδυμων μη βελτιωμένων θεμελίων

Στο **Σχήμα 4.6(α, β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  για την περίπτωση δίδυμων θεμελίων πλάτους  $B= 5$  m χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D= 2.8$  m υπό φορτίο  $q= 100$  kPa και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}= 0.2$  g.

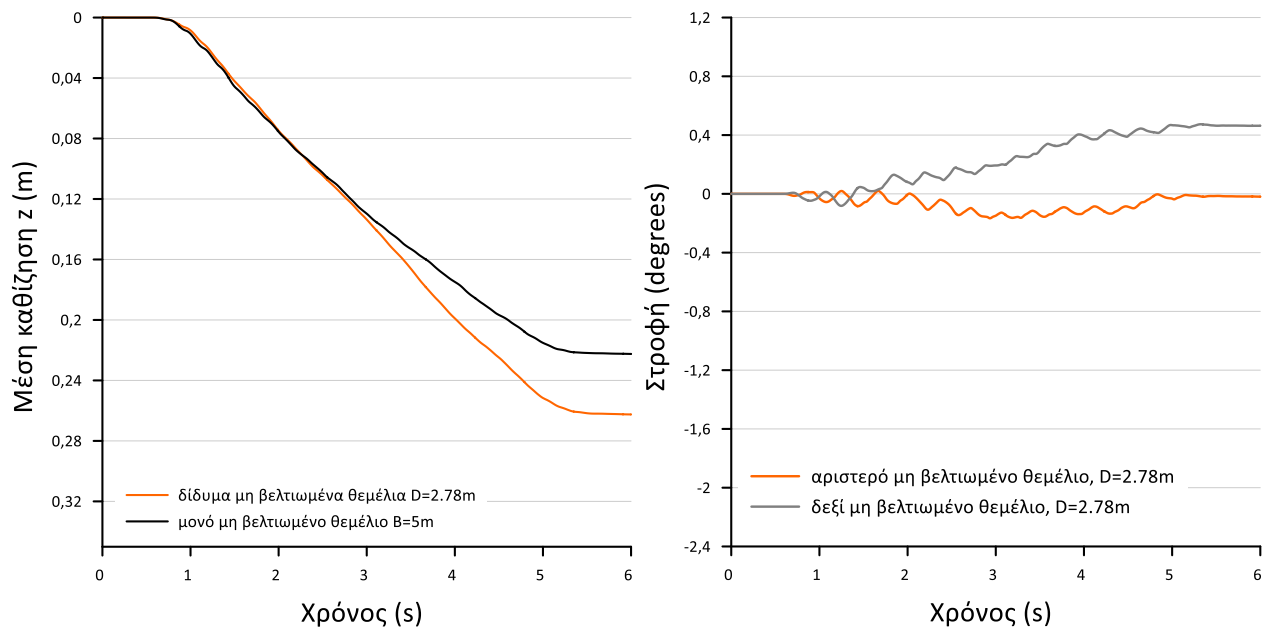


**Σχήμα 4.6.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B= 5$  m χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D= 2.8$  m, υπό φορτίο  $q= 100$  kPa και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}= 0.2$  g.



**Σχήμα 4.6.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B= 5$  m χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D= 2.8$  m, υπό φορτίο  $q= 100$  kPa και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}= 0.2$  g.

Συγκρίνοντας το **Σχήμα 4.6** με το **Σχήμα 4.2** (το αντίστοιχο του μεμονωμένου μη βελτιωμένου θεμελίου), φαίνεται πως στην περίπτωση των δίδυμων μη βελτιωμένων θεμελίων απόστασης  $D= 2.8$  m, υπάρχει πιο έντονη ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων κάτω από το θεμέλιο και μέχρι το τέλος της στρώσης, λόγω επαλληλίας της διάτμησης του εδάφους υπό τα δύο θεμέλια που οφείλεται στη (σχετικά) μικρή τους απόσταση. Αυτό συνεπάγεται πιο εμπεδωμένο μηχανισμό αστοχίας υπό τα δύο θεμέλια, ο οποίος μάλιστα παύει να είναι συμμετρικός κάτω από κάθε θεμέλιο. Συνολικά, η αλληλεπίδραση των θεμελίων είναι δυσμενής καθώς αναπτύσσονται μεγαλύτερες καθιζήσεις  $z=26.2$ cm, σε σχέση με το μεμονωμένο θεμέλιο,  $z=22.2$ cm αλλά και ανάπτυξη κάποιων μικρών στροφών σύμφωνα με το **Σχήμα 4.7**.

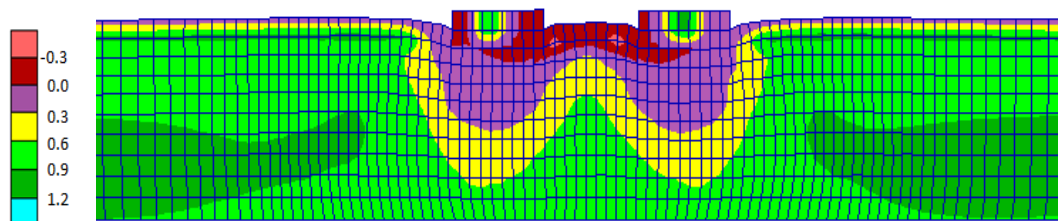


(α)

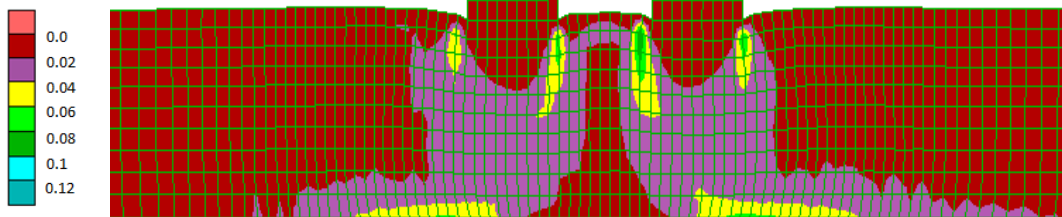
(β)

**Σχήμα 4.7:** [α] Σύγκριση μέσης καθίζησης μονού μη βελτιωμένου θεμελίου και δίδυμων μη βελτιωμένων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$ , σε απόσταση  $D=2.8\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ , [β] Στροφή δίδυμων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=2.8\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$

Στη συνέχεια, για να διερευνηθεί η επίδραση της απόστασης μεταξύ των θεμελίων στην απόκρισή τους, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για δίδυμα θεμέλια πλάτους  $B=5\text{m}$ , χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ . Στο **Σχήμα 4.8(α, β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης.

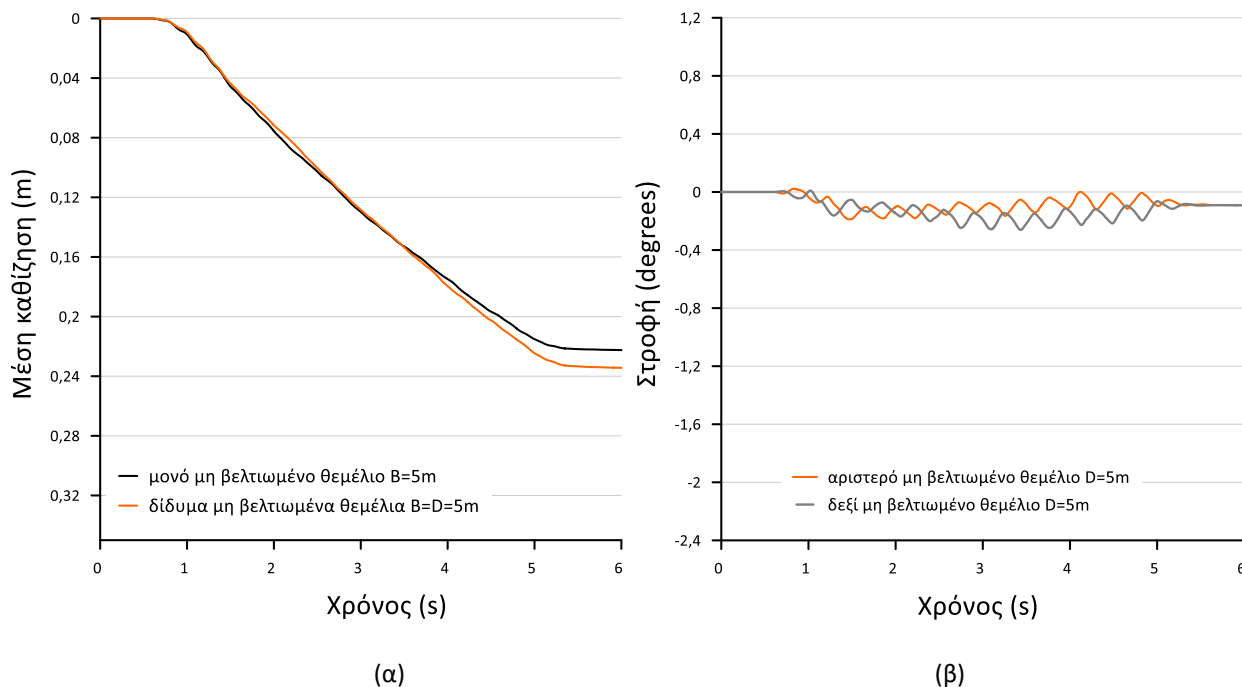


**Σχήμα 4.8.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .



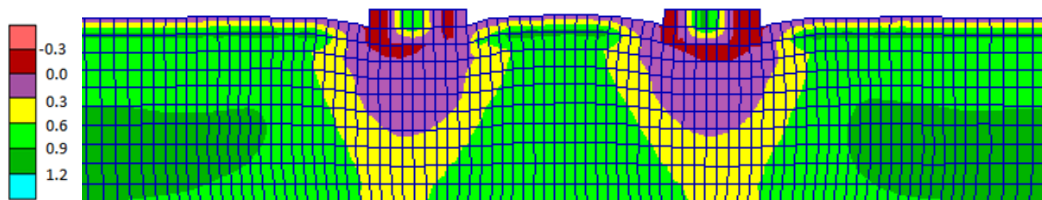
**Σχήμα 4.8.6:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διαμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D=5\text{m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα με τα αντίστοιχα του μονού θεμελίου, γίνεται αντιληπτό πως με την αύξηση της απόστασης, η αλληλεπίδραση των θεμελίων μειώθηκε (π.χ., λιγότερο αυξημένες υπερπιέσεις πόρων, λιγότερο εμπεδωμένος μηχανισμός αστοχίας). Συνεπώς τα δύο θεμέλια αρχίζουν να ομοιάζουν με μεμονωμένα, αν και οι ελαφρώς αυξημένες υπερπιέσεις (σε βάθος) πρέπει να οδηγούν σε ελαφρώς μόνο αυξημένες καθιζήσεις. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις χρονοϊστορίες στο **Σχήμα 4.9** από όπου προκύπτει ότι η μέση καθίζηση των δίδυμων μη βελτιωμένων θεμελίων είναι  $z=23.4\text{ cm}$  δηλαδή ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή του μεμονωμένου  $z=22.2\text{ cm}$ , καθιστώντας την αλληλεπίδραση ελάχιστα δυσμενή. Αντίστοιχα, και οι μικρές (ούτως ή άλλως) στροφές, μειώνονται περαιτέρω για απόσταση  $D=5\text{ m}$  και μπορούν να θεωρηθούν ελάχιστα αμελητέες.

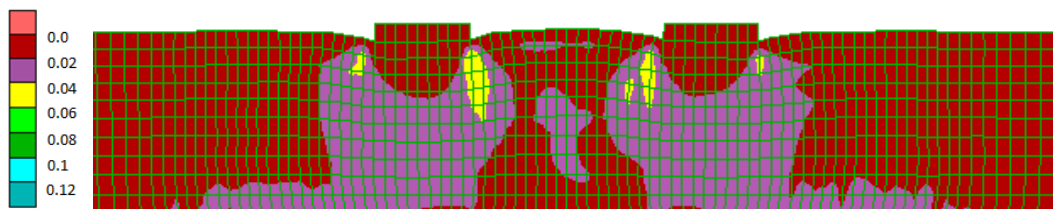


**Σχήμα 4.9:** [α] Σύγκριση μέσης καθίζησης μονού μη βελτιωμένου θεμελίου και δίδυμων μη βελτιωμένων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ , [β] Στροφή δίδυμων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$ , σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Τέλος, έγιναν αναλύσεις και για δίδυμα θεμέλια πλάτους  $B=5\text{m}$  χωρίς βελτίωση σε απόσταση  $D=10\text{ m}$  υπό φορτίο  $q=100\text{kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ . Στο **Σχήμα 4.10(α, β)** φαίνονται οι χωρικές κατανομές των  $r_u$  και  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης.



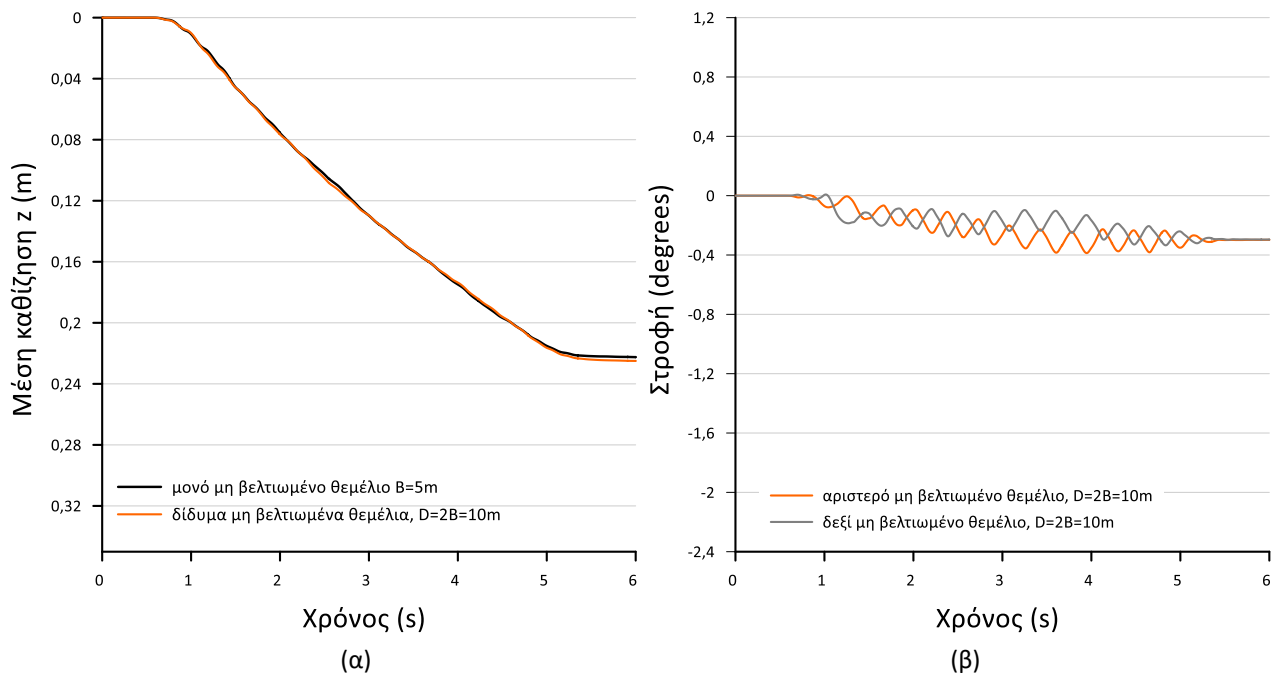
**Σχήμα 4.10.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D=10\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .



**Σχήμα 4.10.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D=10\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Συγκρίνοντας τις ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης με τις αντίστοιχες του μονού θεμελίου, προκύπτει πρακτικώς ταύτιση για κάθε θεμέλιο. Δηλαδή, η απόσταση  $D=10\text{ m}$ , προκύπτει ότι είναι υπερ-αρκετή για να μην υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο μη-βελτιωμένων θεμελίων.

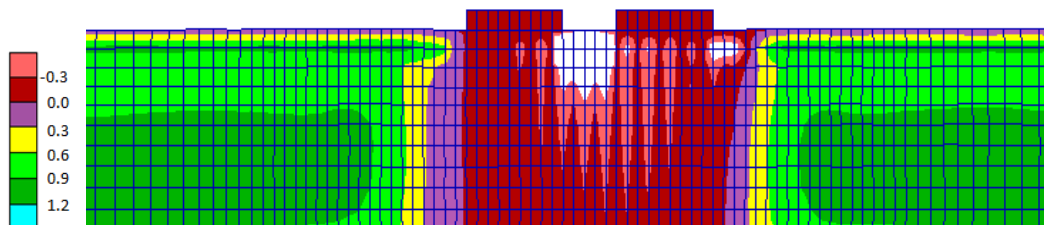
Αυτό επιβεβαιώνεται και στο **Σχήμα 4.11** καθώς προκύπτει ότι στις καθιζήσεις υπάρχει ταύτιση με εκείνες του μεμονωμένου θεμελίου. Η μέση καθίζηση του ζεύγους είναι  $z=22.5\text{ cm}$ , σχεδόν ίση με αυτή του μονού  $z=22.2\text{ cm}$ . Από άποψη στροφών υπάρχει μια παραμένουσα (αποκλίνουσα) στροφή άνευ σημασίας.



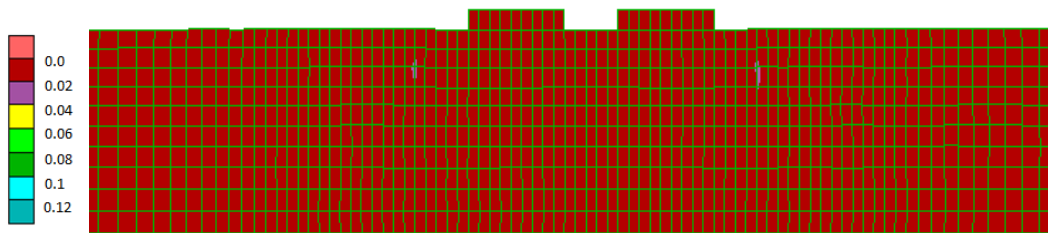
**Σχήμα 4.11:** [α] Σύγκριση μέσης καθίζησης μονού μη βελτιωμένου θεμελίου και δίδυμων μη βελτιωμένων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=10\text{m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{Kra}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{g}$ , [β] Στροφή δίδυμων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=10\text{m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{Kra}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{g}$ .

### 4.3.2 Απόκριση δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων

Οι αναλύσεις έγιναν για δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε αποστάσεις  $D=2.8\text{m}$ ,  $D=5\text{m}$ ,  $D=10\text{m}$ , υπό ίδιο φορτίο  $q=100\text{kPa}$ , μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{g}$  και με κοινή βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων. Στο Σχήμα **4.12(α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για απόσταση δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων  $D=2.8\text{m}$ .

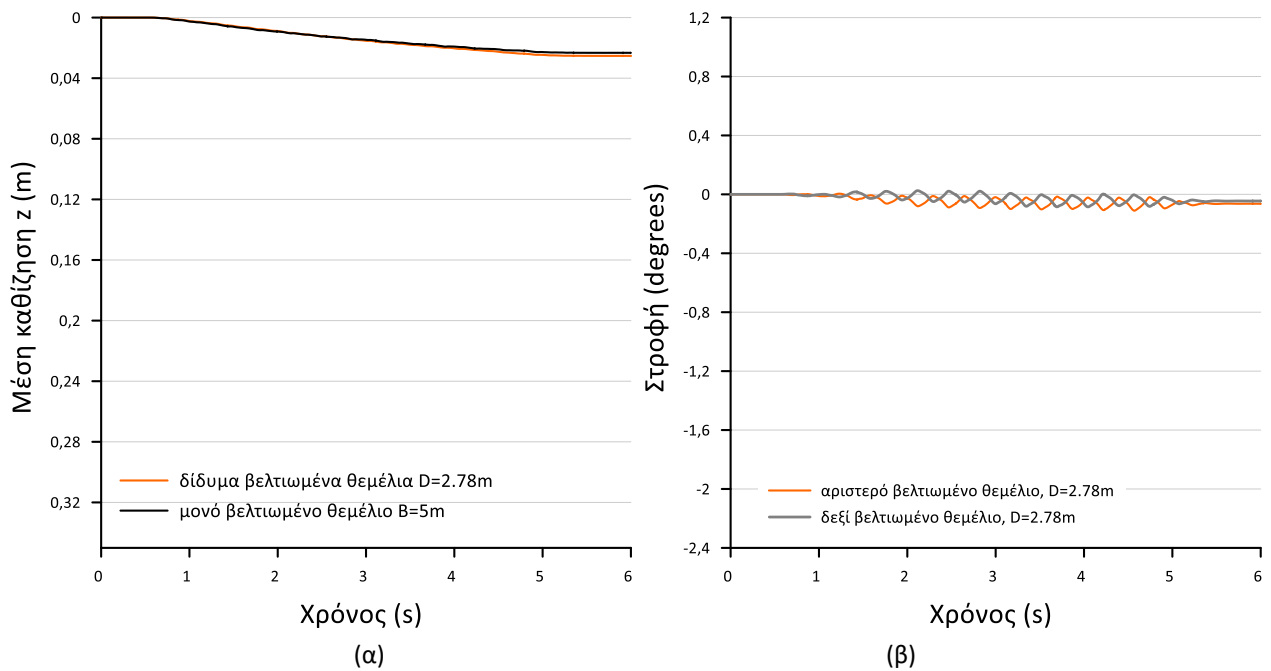


**Σχήμα 4.12.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, απόστασης  $D=2.8\text{m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{g}$ .



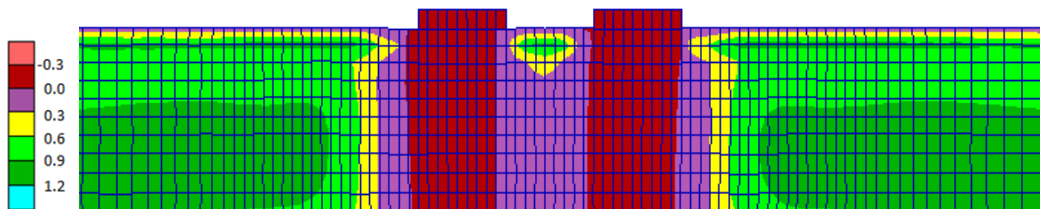
**Σχήμα 4.12.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διαμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοपाσσάλων, απόστασης  $D=2.8\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Με βάση το **Σχήμα 4.12** προκύπτει ότι η κατασκευή πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, μείωσε πολύ τις υπερπιέσεις σε όλη την περιοχή κάτω από τα κοντινά θεμέλια ( $D=2.78\text{m}$ ) αποτρέποντας την ρευστοποίηση, οδηγώντας μάλιστα και σε υποπιέσεις πόρων ( $r_u < 0$ ) λόγω διαστολικότητας. Από την άλλη, όλη η περιοχή κάτω και από τα δύο θεμέλια, εμφανίζει πολύ μικρές παραμορφώσεις. Το ενδιαφέρον εδώ είναι ότι ανάμεσα στους δύο καννάβους χαλικοπασσάλων υπάρχει μη βελτιωμένου έδαφος πάχους  $1.65\text{ m}$ , το οποίο όμως συμπεριφέρεται ως βελτιωμένο (υπάρχει σειρά χαλικοπασσάλων και εξωτερικά των 2 θεμελίων). Συνεπώς όλη η περιοχή κάτω από τα 2 θεμέλια είναι σαν να είναι ολόκληρη βελτιωμένη. Η «κοινή» αυτή απόκριση του εδάφους κάτω και από τα 2 θεμέλια επιβεβαιώνεται και στο **Σχήμα 4.13**. Συγκεκριμένα, προκύπτει ελάχιστα δυσμενής αλληλεπίδραση των 2 θεμελίων, καθώς η μέγιστη μέση καθίζηση των δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων απόστασης  $D=2.8\text{ m}$  είναι  $z=2.5\text{ cm}$ , ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή του μονού βελτιωμένου θεμελίου  $z=2.3\text{ cm}$ . Από την άλλη, οι στροφές που αναπτύχθηκαν είναι αμελητέες. Οπότε παρά τη μικρή τους απόσταση η βελτίωση με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων πρακτικώς εξαλείφει τη (δυσμενή) αλληλεπίδραση των 2 θεμελίων.

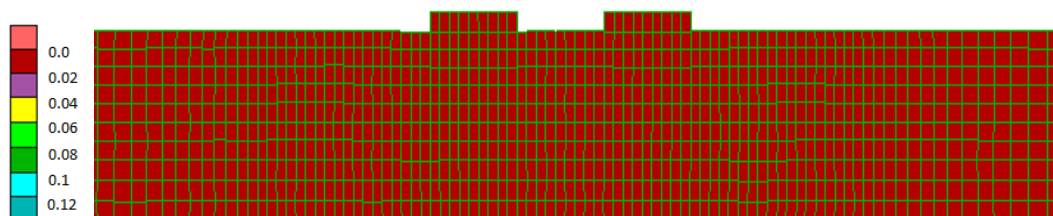


**Σχήμα 4.13:** [α] Σύγκριση μέσης καθίζησης μονού βελτιωμένου και δίδυμων θεμελίων κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, ιδίου πλάτους  $B=5\text{ m}$ , σε απόσταση  $D=2.8\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ , [β] Στροφή δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων, πλάτους  $B=5\text{ m}$ , απόστασης  $D=2.8\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Στο Σχήμα 4.14(α, β) παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  για δίδυμα βελτιωμένα θεμέλια απόστασης  $D=5\text{ m}$  στο τέλος της διέγερσης.



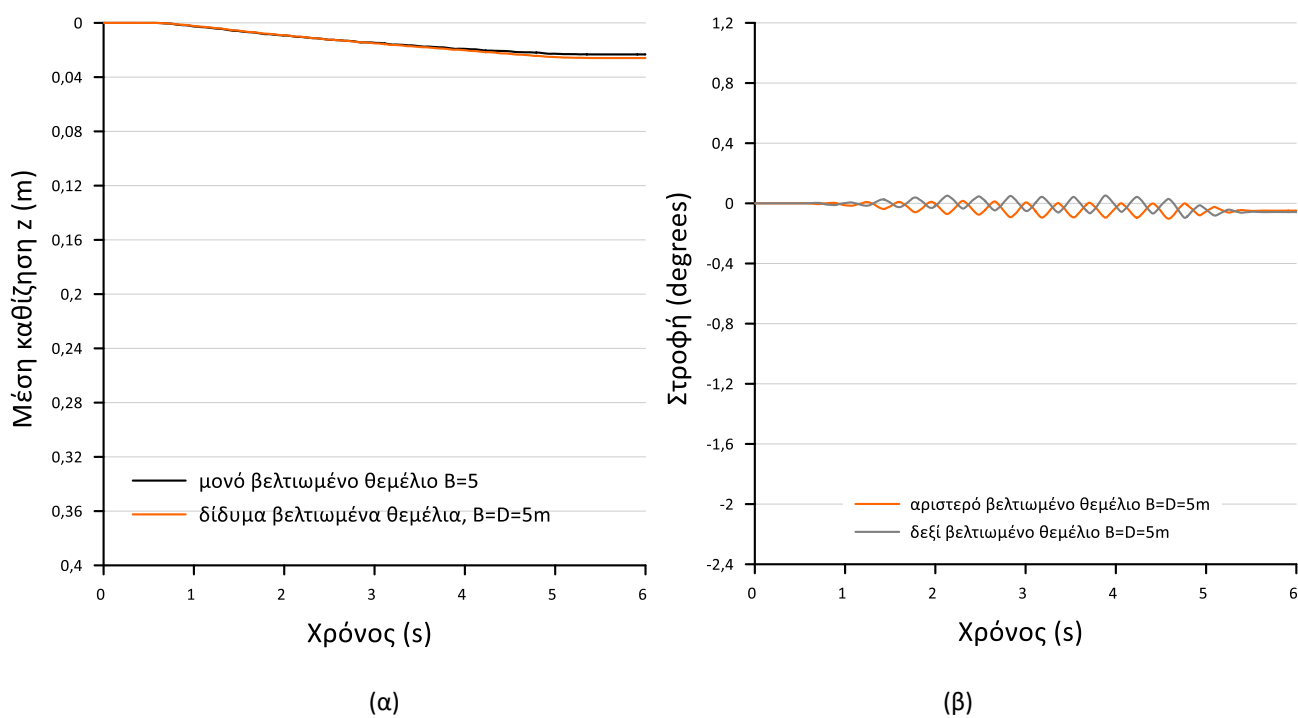
**Σχήμα 4.14.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ιδίου πλάτους  $B=5\text{ m}$  κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, απόστασης  $D=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .



**Σχήμα 4.14.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ιδίου πλάτους  $B=5\text{ m}$  κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, απόστασης  $D=5\text{ m}$  υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

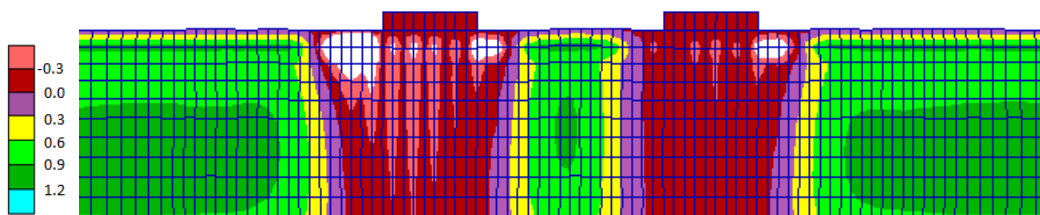


Όπως προκύπτει από το **Σχήμα 4.14** η παρουσία των χαλικοπασσάλων εκμηδενίζει τις υπερπιέσεις πόρων κάτω από τα δύο θεμέλια, ακριβώς όπως και στο μεμονωμένο βελτιωμένο θεμέλιο, ενώ απομειώνει ομοίως και τις διατμητικές παραμορφώσεις. Αξιοσημείωτη διαφορά είναι ότι ανάμεσα στους 2 καννάβους χαλικοπασσάλων, το μη βελτιωμένο έδαφος πλάτους 3.9 m εμφανίζει υπερπιέσεις πόρων, απλά μειωμένες σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο που ρευστοποιείται αλλά πιο μεγάλες από εκείνες του πολύ στενού βελτιωμένου εδάφους (πλάτους 1.65m) όταν η απόσταση είναι  $D= 2.8 \text{ m}$  . Στο **Σχήμα 4.15** παρουσιάζονται οι καθιζήσεις και οι στροφές που αναπτύχθηκαν. Φαίνεται πως η καθίζηση του ζεύγους των δίδυμων θεμελίων,  $z=2.6 \text{ cm}$ , και σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν ίδια με αυτή του μονού βελτιωμένου θεμελίου  $z=2.3\text{cm}$  (ελάχιστη δυσμενής αλληλεπίδραση) ενώ οι στροφές είναι μικρές και αμελητέες. Συνεπώς η ούτως ή άλλως ελάχιστη δυσμενής αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων για απόσταση  $D= 5 \text{ m}$ , παραμένει αντίστοιχα ελάχιστη δυσμενής και αν βελτιωθούν και τα 2 θεμέλια από κοινού.

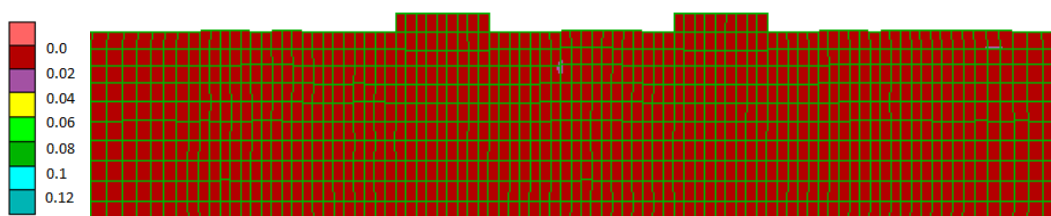


**Σχήμα 4.15:** [α] Σύγκριση μέσης καθίζησης μονού βελτιωμένου θεμελίου και δίδυμων θεμελίων κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, πλάτους  $B= 5 \text{ m}$  σε απόσταση  $D=5 \text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100 \text{ Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2 \text{ g}$ . [β] Στροφή δίδυμων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5 \text{ m}$  βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D= 5 \text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{Kpa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{g}$ .

Στο Σχήμα 4.16(α, β) παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για απόσταση δίδυμων θεμελίων  $D=10m$  βελτιωμένων από κοινού με κάρναβο χαλικοπασσάλων.

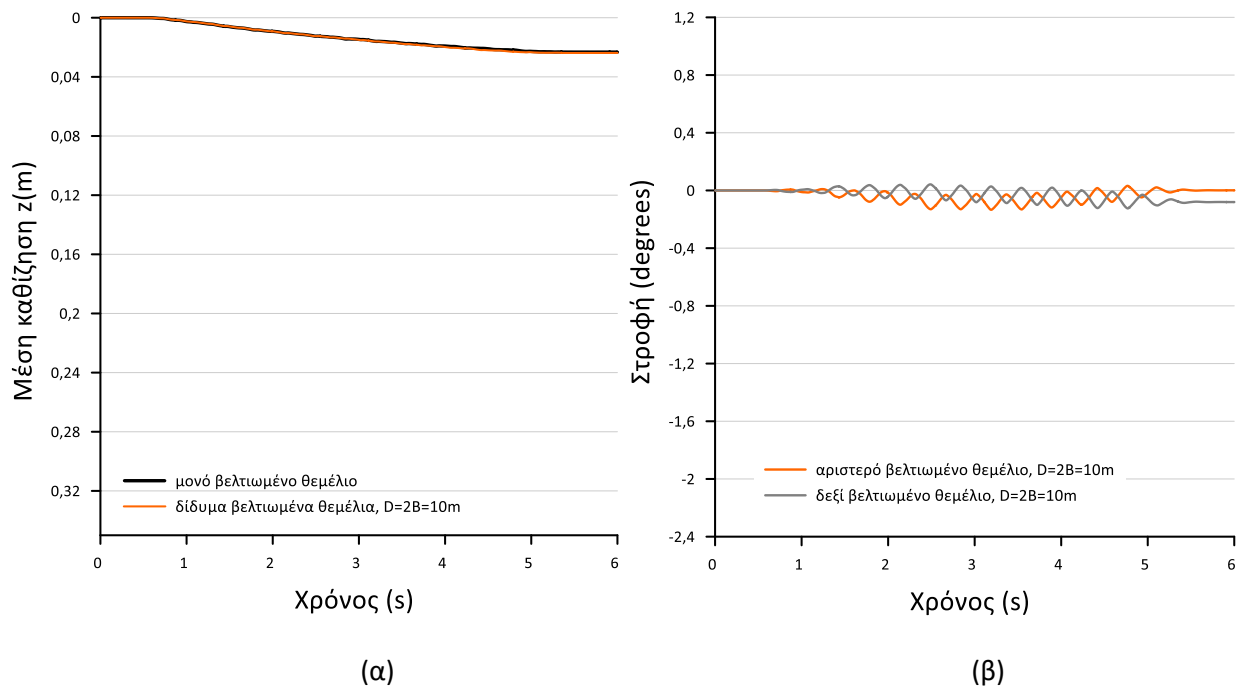


**Σχήμα 4.16.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D=10\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .



**Σχήμα 4.16.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  κοινά βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D=10\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Παρατηρείται σημαντική μείωση των υπερπιέσεων σε ζώνη επιρροής παρόμοιας αυτής του μονού βελτιωμένου θεμελίου καθώς και έντονη ανάπτυξη υποπιέσεων λόγω διαστολικότητας, κυρίως στο αριστερό θεμέλιο. Η ανάπτυξη υποπιέσεων ιδιαίτερα στην περιοχή των πασσάλων δικαιολογείται από την αυξημένη τους στιβαρότητα και την τάση για διαστολή που έχουν κατά την διάτμηση. Στο **Σχήμα 4.17** φαίνεται πως τα δίδυμα βελτιωμένα θεμέλια συμπεριφέρονται σαν δύο ξεχωριστά μεμονωμένα βελτιωμένα, αφού έχουν αμελητέες στροφές και μέση καθίζηση  $z=2.38\text{cm}$  ενώ το μονό βελτιωμένο έχει  $z=2.32\text{cm}$ . Έτσι, όταν η απόσταση δίδυμων θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , υπό-φορτίο  $q=100\text{kPa}$ , είναι  $D=10\text{m}$ , είτε είναι βελτιωμένα και τα δύο είτε κανένα, έχουν ανύπαρκτη αλληλεπίδραση.

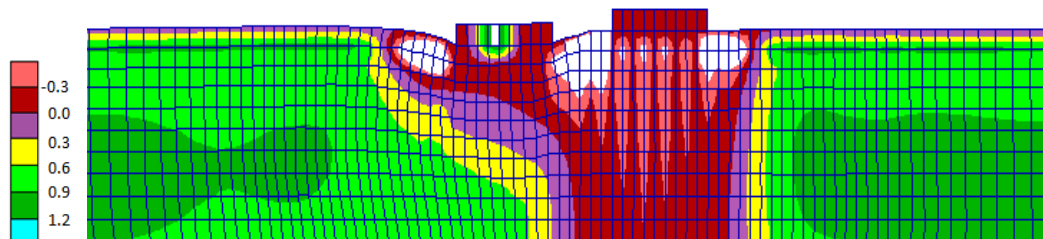


**Σχήμα 4.17:** [α] Σύγκριση μέσης καθίζησης μονού βελτιωμένου θεμελίου και δίδυμων θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5$  m, βελτιωμένων με πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D=10$  m, υπό φορτίο  $q=100$  Kpa και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{max}=0.2$  g, [β] Στροφή δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων, ίδιου πλάτους  $B=5$  m, σε απόσταση  $D=10$  m, υπό φορτίο  $q=100$  Kpa και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{max}=0.2$  g.

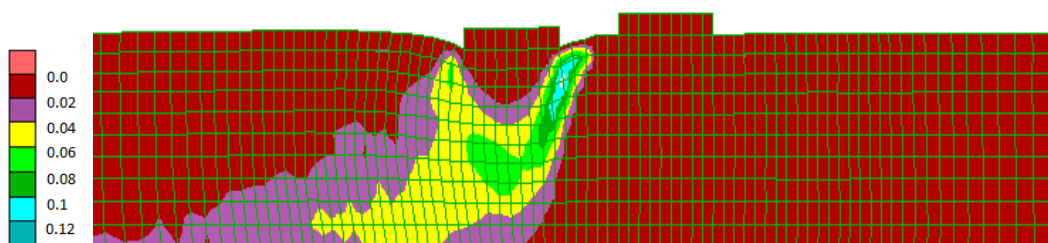
#### 4.4 Απόκριση δίδυμων θεμελίων χωρίς κοινή βελτίωση

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η απόκριση δίδυμων θεμελίων πλάτους  $B_1=B_2=5$  m, υπό φορτίο  $q_1=q_2=100$  kPa και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{max}=0.2$  g, για διαφορετικές τιμές της μεταξύ τους απόστασης ( $D=2.8$  m,  $D=5$  m,  $D=10$  m) και για περιπτώσεις όπου μόνο το ένα θεμέλιο (δεξί) είναι βελτιωμένο με πυκνό κάναβο χαλικοπασσάλων, ενώ το δεύτερο (αριστερό) παραμένει μη-βελτιωμένο. Στόχος είναι η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης των δύο δίδυμων θεμελίων όταν το έδαφος θεμελίωσής τους είναι διαφορετικό λόγω βελτίωσης, και ο εντοπισμός των παραγόντων που την επηρεάζει. Μέτρο σύγκρισης αποτελεί η απόκριση των μεμονωμένων θεμελίων, βελτιωμένων ή μη, αλλά και η απόκριση των δίδυμων θεμελίων είτε είναι από κοινού βελτιωμένων ή μη. Στα διαγράμματα χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών που ακολουθούν συμπεριλαμβάνονται και χρονοϊστορίες από την προηγούμενη παράγραφο ως οι μέσες καμπύλες απόκρισης για τα δίδυμα θεμέλια από κοινού βελτιωμένα ή μη.

Στο Σχήμα 4.18(α, β) παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για απόσταση δίδυμων θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , απόστασης  $D=2.8\text{m}$  υπό  $q=100\text{kPa}$ , όπου το ένα μόνο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων.



**Σχήμα 4.18.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από ζεύγος θεμελίων πλάτους  $B=5\text{ m}$ , απόστασης  $D= 2.8\text{ m}$  υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\text{max}}=0.2\text{ g}$ , στην περίπτωση όπου μόνο το δεξί θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων.

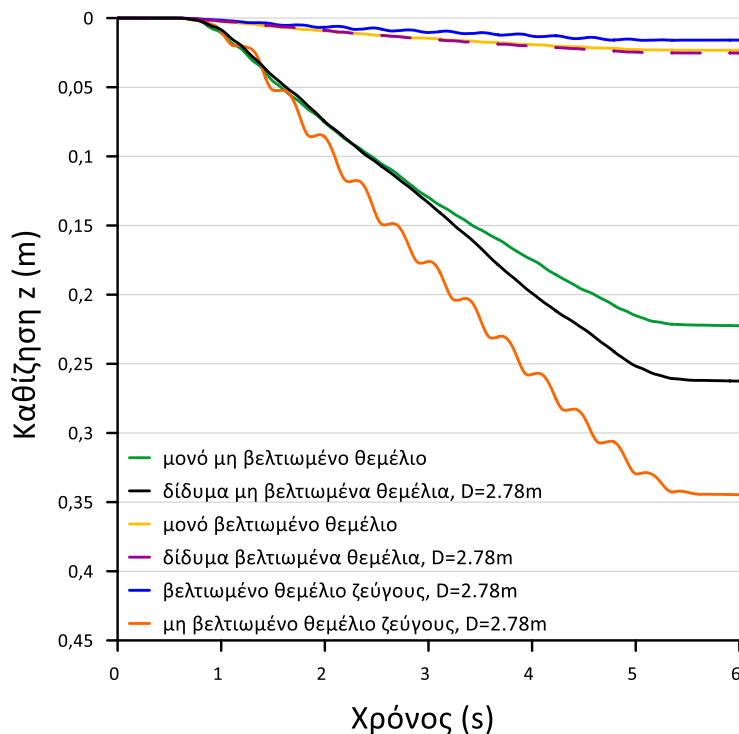


**Σχήμα 4.18.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διαμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από ζεύγος θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D= 2.8\text{ m}$  υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\text{max}}=0.2\text{ g}$ , στην περίπτωση όπου μόνο το δεξί θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων.

Από την έντονη ασυμμετρία στις ισοκαμπύλες φαίνεται η μεγάλη επιρροή που έχει το δεξί βελτιωμένο θεμέλιο στο αριστερό μη βελτιωμένο θεμέλιο όταν η απόστασή τους είναι  $D=2.8\text{m}$  (μικρή). Το βελτιωμένο θεμέλιο δε δείχνει να επηρεάζεται ιδιαίτερα συγκριτικά με την περίπτωση που είναι μεμονωμένο ή δίπλα σε άλλο ίδια βελτιωμένο, καθώς αναπτύσσει μικρές υπερπίεσεις πόρων έως και έντονες υποπίεσεις. Αντίθετα, το μη βελτιωμένο θεμέλιο διαφαίνεται να επηρεάζεται έντονα από την ύπαρξη του γειτονικού βελτιωμένου. Για παράδειγμα, προκύπτει μη συμμετρικός μηχανισμός αστοχίας του μη βελτιωμένου θεμελίου, πολύ πιο εμπεδωμένος σε σχέση με την περίπτωση που το θεμέλιο ήταν μη βελτιωμένο είτε μεμονωμένο ή σε ζεύγος. Επιπλέον η παρουσία των χαλικοπασσάλων βελτιώνει το έδαφος ανάμεσα από τα θεμέλια και κάτω από το μη βελτιωμένο θεμέλιο, προκαλώντας ασυμμετρία στις υπερπίεσεις πόρων κάτω από το μη βελτιωμένο θεμέλιο.

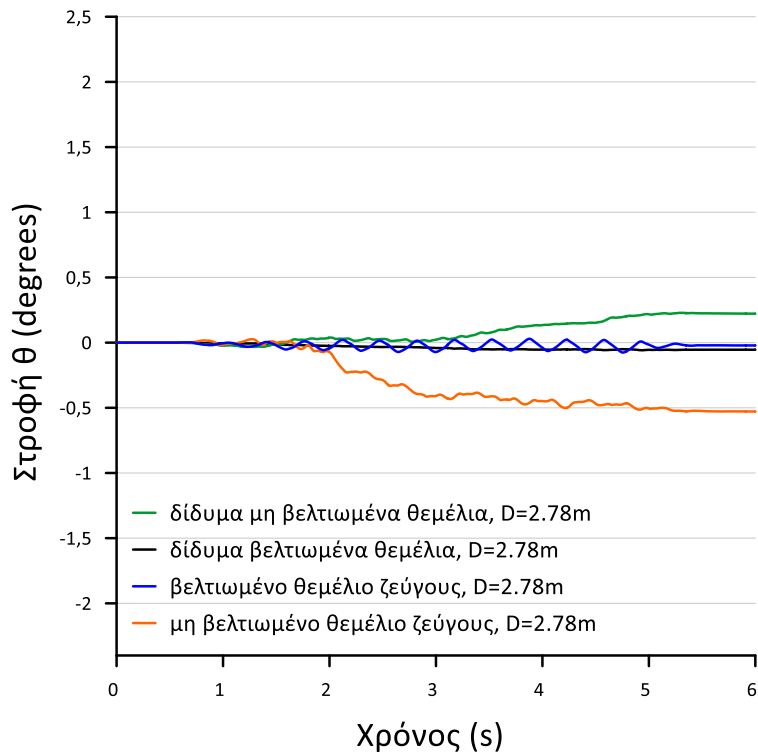
Για καλύτερη αποτύπωση της αλληλεπίδρασης σε όρους χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφής παρουσιάζονται τα Σχήματα 4.19 και 4.20 αντίστοιχα. Από το Σχήμα 4.19 προκύπτει μια τάξη μεγέθους διαφορά στις καθιζήσεις μεταξύ του βελτιωμένου και του μη βελτιωμένου θεμελίου, ανεξάρτητα από το αν υπάρχει ή μη δίπλα του θεμέλιο βελτιωμένο ή μη. Από εκεί και πέρα, λόγω της μικρής απόστασης  $D= 2.8\text{ m}$ , στο μη βελτιωμένο θεμέλιο η αλληλεπίδραση είναι δυσμενής ( $z= 26.2\text{ cm}$  έναντι  $z= 22.2\text{ cm}$ ) και γίνεται δυσμενέστερη

όταν το γειτονικό θεμέλιο βελτιώνεται ( $z=34.4$  cm). Αντίθετα, στο βελτιωμένο θεμέλιο η αλληλεπίδραση είναι μικρή κατά απόλυτη τιμή αλλά ποσοστιαία μπορεί να θεωρηθεί σημαντική. Για παράδειγμα διαφαίνεται ότι είναι καλύτερο να παραμείνει το διπλανό θεμέλιο μη βελτιωμένο, καθώς η καθίζηση του βελτιωμένου απομειώνεται ακόμη περισσότερο (μειώνεται σε  $z= 1.6$ cm από 2.2cm).



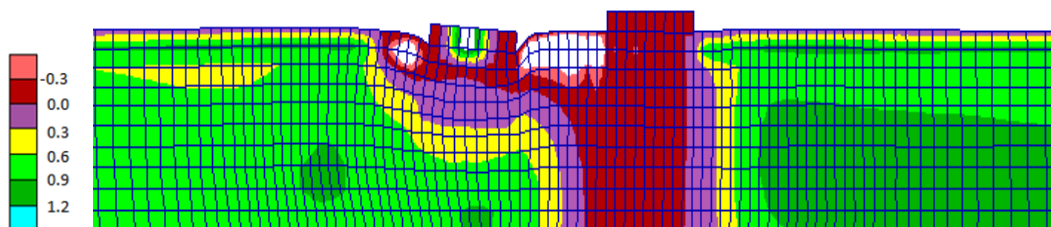
**Σχήμα 4.19:** Σύγκριση χρονοϊστοριών μέσης καθίζησης μονού θεμελίου πλάτους  $B=5$  m με και χωρίς βελτίωση, ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5$  m σε απόσταση  $D= 2.8$  m με και χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, και ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5$  m σε απόσταση  $D= 2.8$  m με το ένα μόνο θεμέλιο βελτιωμένο, όλα υπό φορτίο  $q=100$  kPa, μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2g$

Πέραν αυτού, με βάση το **Σχήμα 4.20** προκύπτει εν δυνάμει ουσιώδης στροφή μόνο σε μη βελτιωμένο θεμέλιο, αποκλίνουσα αν το γειτονικό θεμέλιο (σε απόσταση  $D=2.8$  m) είναι βελτιωμένο και συγκλίνουσα αν το γειτονικό θεμέλιο είναι και αυτό μη βελτιωμένο.

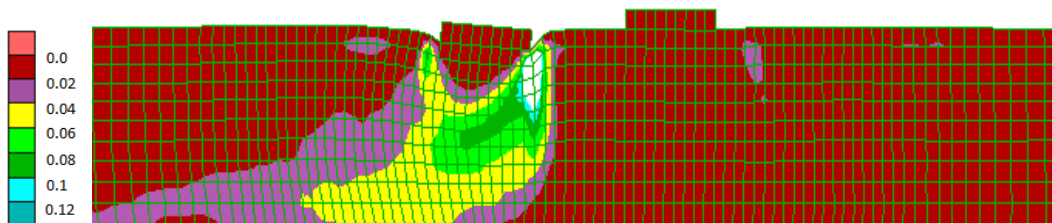


Σχήμα 4.20: Σύγκριση μέσων στροφών ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  με και χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων και ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  σε απόσταση  $D=2.8\text{m}$ , όπου το ένα είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων, όλα υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Στο Σχήμα **4.21(α, β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για απόσταση δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων  $D=5\text{ m}$  υπό  $q=100\text{kPa}$ , όπου το μόνο το δεξί θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων.



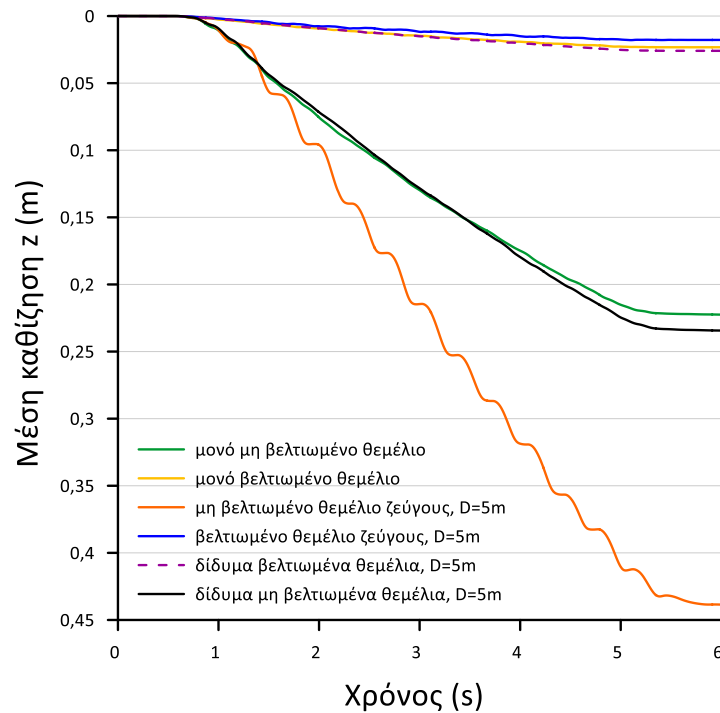
Σχήμα 4.21.α: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$ , σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ , στην περίπτωση όπου το ένα θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων .



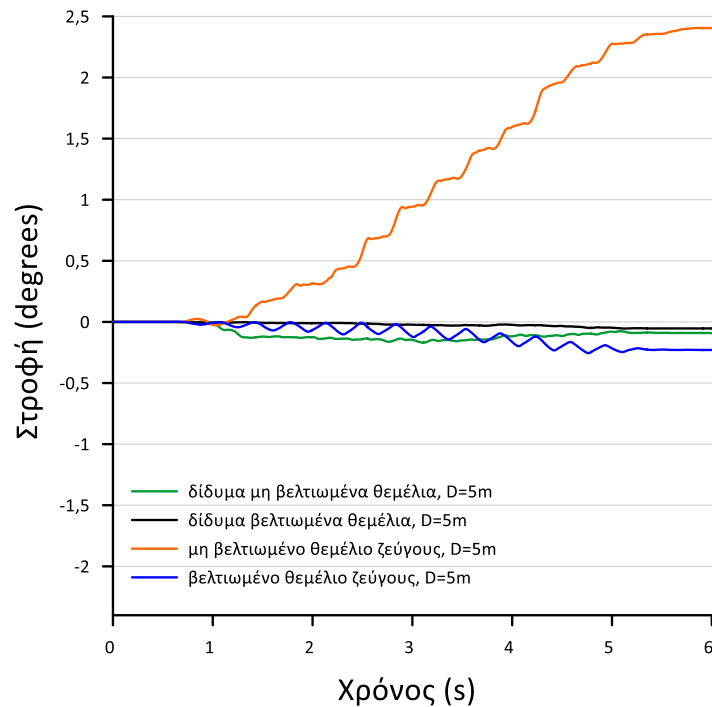
**Σχήμα 4.21.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από δίδυμα θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5$  m σε απόσταση  $D=5$  m, υπό φορτίο  $q=100$  kPa και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2$  g, στην περίπτωση όπου το ένα θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων.

Όπως και για  $D=2.8$  m, προκύπτει έντονη ασυμμετρία στις ισοκαμπύλες, που υποδηλώνει και τη σημαντική επιρροή που έχει το δεξί βελτιωμένο θεμέλιο στο αριστερό μη βελτιωμένο θεμέλιο όταν η απόστασή τους είναι  $D=5$  m. Συγκεκριμένα, το βελτιωμένο θεμέλιο δε δείχνει να επηρεάζεται καθόλου συγκριτικά με την περίπτωση όπου είναι μεμονωμένο ή δίπλα σε άλλο ίδια βελτιωμένο, και αναπτύσσει τις ίδιες μικρές υπερπιέσεις πόρων. Αντίθετα, το μη βελτιωμένο θεμέλιο διαφαίνεται να επηρεάζεται από την ύπαρξη του γειτονικού βελτιωμένου. Επιπλέον, οι υπερπιέσεις πόρων κάτω από το μη βελτιωμένο θεμέλιο είναι μη σταθερές με το βάθος και παρόμοιες με αυτές που αναπτύσσει όταν είναι μεμονωμένο, αλλά η βελτίωση που έχει προκληθεί λόγω των χαλικοπασσάλων στην περιοχή ανάμεσα στα δυο θεμέλια φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την απόκριση του θεμελίου.

Στη συνέχεια, στα **Σχήματα 4.22** και **4.23** συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής, αντίστοιχα. Και πάλι, από το **Σχήμα 4.22** προκύπτει μια τάξη μεγέθους διαφορά στις καθιζήσεις μεταξύ του βελτιωμένου και του μη βελτιωμένου θεμελίου, ανεξάρτητα από το αν υπάρχει ή μη δίπλα του θεμέλιο, βελτιωμένο ή μη. Φαίνεται πως παρά την αύξηση της απόστασης, το μη βελτιωμένο θεμέλιο επηρεάζεται πιο έντονα από το γειτονικό του βελτιωμένο από ότι στην περίπτωση για  $D=2.8$  m. Αντίθετα, στο βελτιωμένο θεμέλιο η αλληλεπίδραση είναι σχεδόν ανύπαρκτη, ανεξάρτητα από το αν το γειτονικό θεμέλιο υπάρχει ή αν είναι βελτιωμένο ή μη. Τέλος, από το **Σχήμα 4.23** προκύπτει ότι μόνο το μη βελτιωμένο θεμέλιο μπορεί να περιστραφεί ουσιαδώς για  $D=5$  m, αλλά μόνο αν το γειτονικό βελτιωθεί.



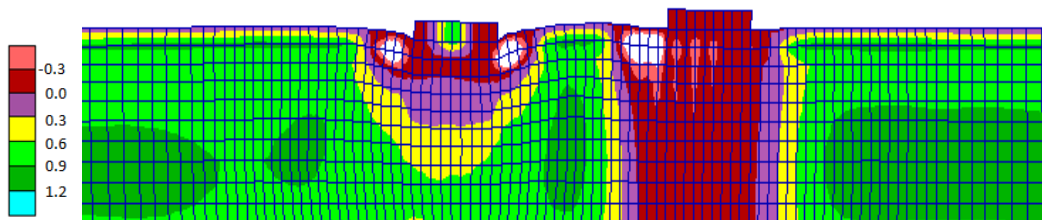
**Σχήμα 4.22:** Σύγκριση χρονοϊστοριών μέσης καθίζησης μονού θεμελίου πλάτους  $B=5\text{ m}$  με και χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  σε απόσταση  $D=5\text{ m}$  με και χωρίς βελτίωση, και ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  σε απόσταση  $D=5\text{ m}$  με το ένα μόνο θεμέλιο βελτιωμένο, όλα υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$ , μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .



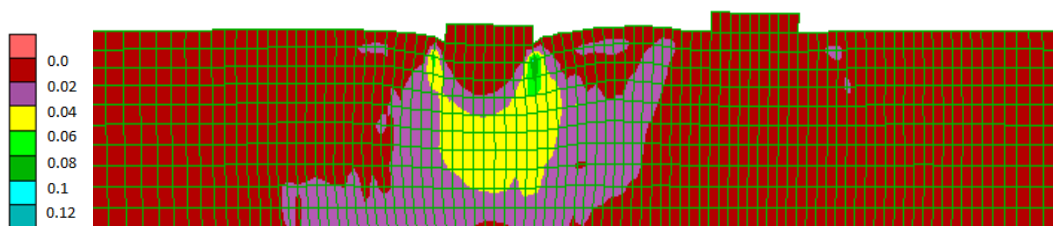
**Σχήμα 4.23:** Σύγκριση μέσων στροφών ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  με και χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων και ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{ m}$  σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , όπου το ένα είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, όλα υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .



Στο Σχήμα 4.24(α, β) παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για απόσταση δίδυμων βελτιωμένων θεμελίων πλάτους  $B=5\text{ m}$ , απόστασης  $D=10\text{ m}$  υπό  $q=100\text{ kPa}$ , όπου μόνο το δεξί θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων.

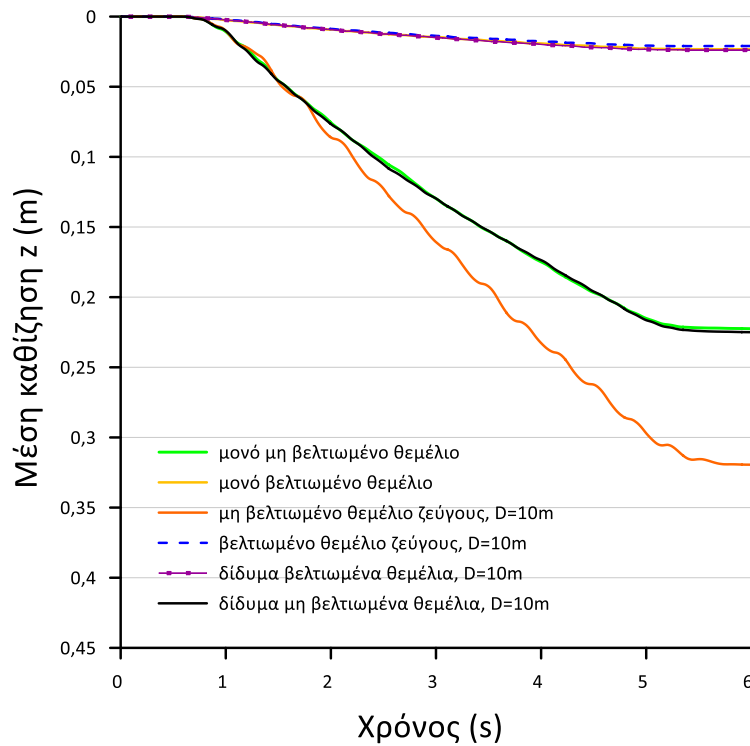


Σχήμα 4.24.α: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από ζεύγος θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , απόστασης  $D=10\text{m}$  υπό φορτίο  $q=100\text{kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ , στην περίπτωση όπου μόνο το δεξί θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων.

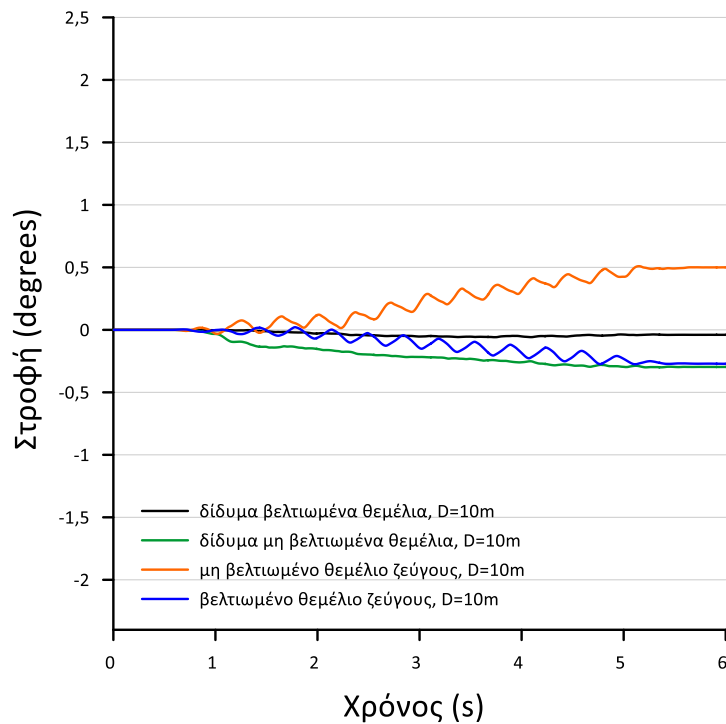


Σχήμα 4.24.β: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από ζεύγος θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , απόστασης  $D=10\text{m}$  υπό φορτίο  $q=100\text{kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ , στην περίπτωση όπου μόνο το δεξί θεμέλιο είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων.

Από τις ισοκαμπύλες στο **Σχήμα 4.24** προκύπτει ελάχιστη αλληλεπίδραση μεταξύ των 2 θεμελίων, χωρίς όμως αυτή να εξαφανίζεται για το μη βελτιωμένο θεμέλιο. Επιπλέον προκύπτει ότι για απόσταση  $D = 10\text{ m}$  το έδαφος ανάμεσα στο βελτιωμένο και το μη βελτιωμένο θεμέλιο ρευστοποιείται όπως και στο ελεύθερο πεδίο, κάτι που δεν ισχύει για αποστάσεις  $D=5\text{ m}$  ή  $D = 2.8\text{ m}$ . Πιο πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζουν όμως οι ιστορίες καθιζήσεων και στροφών στα **Σχήματα 4.25** και **4.26**, αντίστοιχα. Από αυτά προκύπτει ότι το βελτιωμένο θεμέλιο δεν επηρεάζεται καθόλου από το μη-βελτιωμένο σε όρους καθίζησης, ενώ το μη βελτιωμένο δείχνει να έχει μια μικρή δυσμενή αλληλεπίδραση (παρά τη μεγάλη απόσταση  $D=10\text{ m}$ ) αλλά μόνο αν το γειτονικό θεμέλιο είναι βελτιωμένο. Σε όρους στροφής, και πάλι προκύπτει ότι μόνο το μη βελτιωμένο θεμέλιο μπορεί να περιστραφεί ουσιωδώς για  $D=10\text{ m}$ , αλλά κυρίως αν το γειτονικό βελτιωθεί.



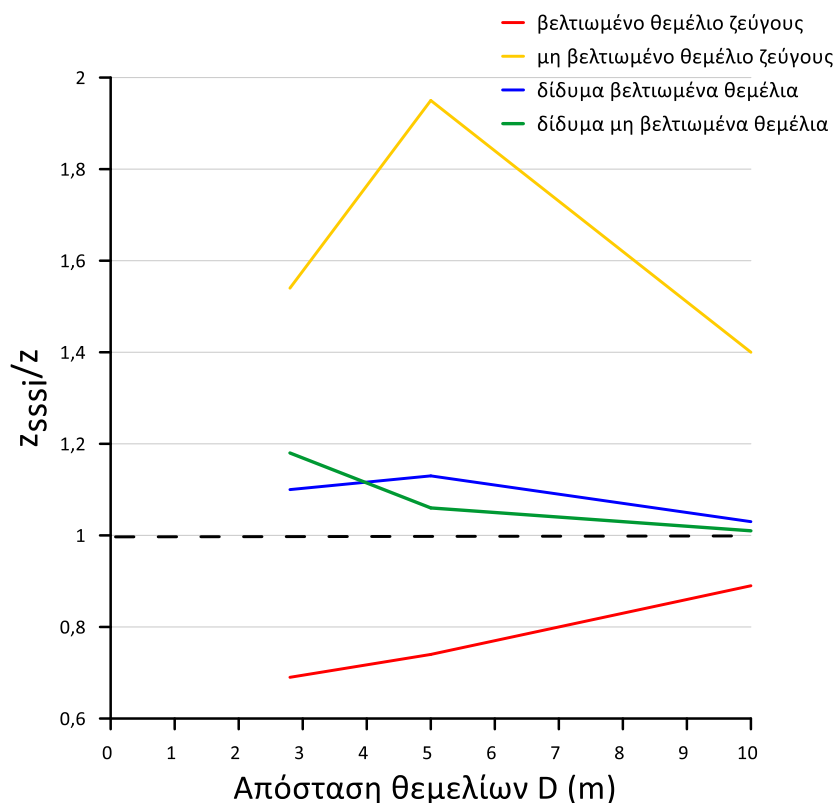
**Σχήμα 4.25:** Σύγκριση χρονοϊστοριών μέσης καθίζησης μονού θεμελίου πλάτους  $B=5\text{m}$  με και χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  σε απόσταση  $D=10\text{m}$  με και χωρίς βελτίωση, και ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  σε απόσταση  $D=10\text{m}$  με το ένα μόνο θεμέλιο βελτιωμένο, όλα υπό φορτίο  $q=100\text{ kPa}$ , μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$



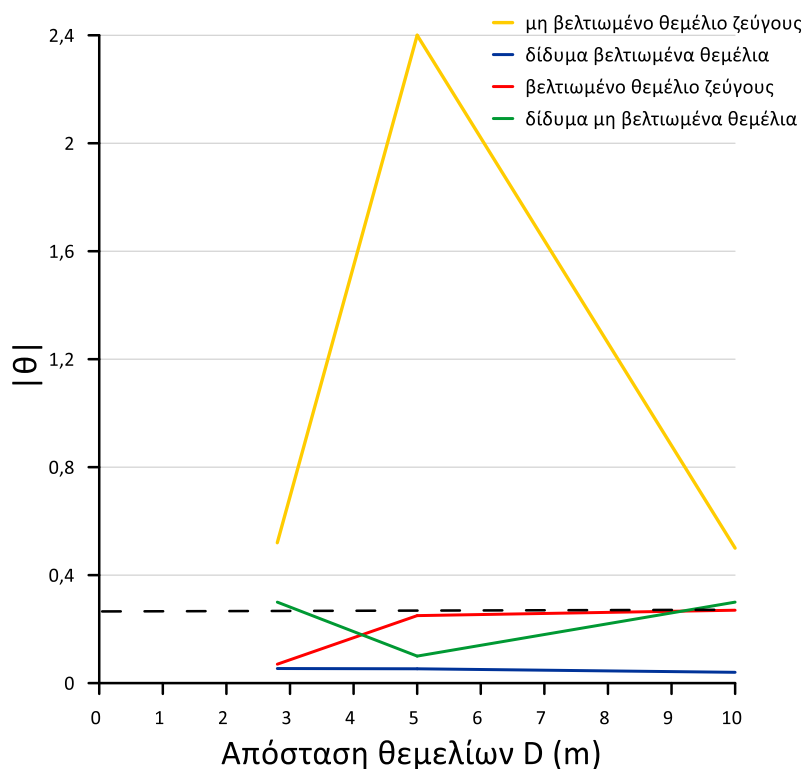
**Σχήμα 4.26:** Σύγκριση μέσων στροφών ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  με και χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων και ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  σε απόσταση  $D=10\text{m}$ , όπου το ένα είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, όλα υπό φορτίο  $q=100\text{kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$

## 4.5 Σύνοψη χαρακτηριστικών δίδυμων θεμελίων

Στόχος των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους δεν είναι η ποσοτική ακρίβεια αλλά η ερμηνεία μηχανισμών και η κατά το δυνατόν ποιοτική γενίκευσή τους για όλες τις περιπτώσεις γειτονικών θεμελιολωρίδων, με και χωρίς χαλικοπασσάλους. Για την διευκόλυνση αυτής της διαδικασίας, χρησιμοποιείται ο λόγος καθιζήσεων  $z_{sssi}/z$ , όπου  $z_{sssi}$  είναι, ανάλογα με την περίπτωση, η μέση τελική καθίζηση ζεύγους δίδυμων θεμελίων ή η τελική καθίζηση θεμελίου ζεύγους όταν αφορά ζεύγος διαφορετικής βελτίωσης, και  $z$  είναι η τελική καθίζηση του αντίστοιχου μονού θεμελίου. Όπως γίνεται αντιληπτό τιμές του  $z_{sssi}/z > 1$  δείχνουν δυσμενή αλληλεπίδραση ενώ τιμές  $z_{sssi}/z < 1$  δείχνουν ευμενή αλληλεπίδραση. Στο **Σχήμα 4.27** παρουσιάζεται διάγραμμα που δείχνει την μεταβολή της αλληλεπίδρασης των θεμελίων σε όρους λόγου καθιζήσεων με την μεταξύ τους απόσταση και ανάλογα με το αν έχουν βελτίωση ή όχι, πάντα για δίδυμα θεμέλια πλάτους  $B=5\text{m}$ , με φορτίο  $q=100\text{kPa}$  (βαριές κατασκευές) υπό αρμονική διέγερση με  $a_{\max} = 0.2g$ .



**Σχήμα 4.27:** Λόγος καθιζήσεων  $z_{sssi}/z$  θεμελίων συναρτήσει της απόστασης  $D$ , για δίδυμα θεμέλια πλάτους  $B=5\text{m}$ , φορτίου  $q=100\text{ kPa}$ , μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης  $a_{\max}=0.2\text{ g}$  για διαφορετικούς συνδυασμούς βελτίωσης με χαλικοπασσάλους.



**Σχήμα 4.28:** Στροφή θεμελίων συναρτήσει της απόστασης D, για δίδυμα θεμέλια πλάτους B=5 m, φορτίου q=100 kPa, μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}=0.2$  g για διαφορετικούς συνδυασμούς βελτίωσης με χαλικοπασσάλους.

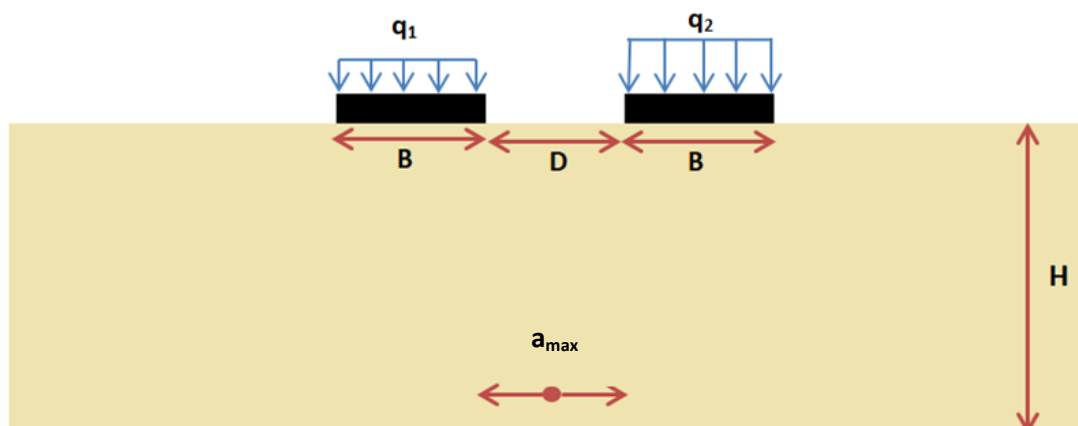
Στο **Σχήμα 4.28** παρουσιάζεται διάγραμμα που δείχνει την μεταβολή της τελικής στροφής των θεμελίων με την μεταξύ τους απόσταση και ανάλογα με το αν έχουν βελτίωση ή όχι, πάντα για δίδυμα θεμέλια πλάτους B=5m, με φορτίο q=100kPa (βαριές κατασκευές) υπό αρμονική διέγερση με  $a_{max} = 0.2g$ . Υπενθυμίζεται ότι για μεμονωμένα θεμέλια οι στροφές θεωρούνται αμελητέες, και η όποια στροφή θεωρείται ότι προκύπτει εδώ λόγω αλληλεπίδρασης. Σε κάθε περίπτωση, για τον εν λόγω συνδυασμό (B, q,  $a_{max}$ ), οι στροφές δεν είναι σημαντικές, με εξαίρεση την περίπτωση μη βελτιωμένου θεμελίου πλησίον βελτιωμένου, όπου η στροφή μπορεί να υπερβεί τις  $0.3^\circ$ . Επιπλέον, συνήθως, οι στροφές είναι μικρότερες όταν το θεμέλιο βελτιώνεται, ανεξάρτητα με το αν το γειτονικό του είναι βελτιωμένο ή μη. Πάντως,, η επίδραση της απόστασης D δεν είναι τόσο συστηματική ούτε για τις καθιζήσεις ούτε για τις στροφές.

Κλείνοντας υπογραμμίζεται ότι τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται από τον συνδυασμό (B, q,  $a_{max}$ ), οπότε η γενίκευσή τους δεν είναι ευχερής. Για παράδειγμα, αν η αλληλεπίδραση για ζεύγος διδύμων μη βελτιωμένων θεμελίων είναι ευμενής, μπορεί η κατασκευή βελτίωσης σε γειτονικό θεμέλιο να αντιστρέψει την εικόνα, και όχι μόνο να κάνει δυσμενέστερη την ήδη δυσμενή αλληλεπίδραση. Αλλά αυτό χρειάζεται επιπλέον αναλύσεις που εκφεύγουν της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, καθώς στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, ακόμη και για τον πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων η αλληλεπίδραση δεν προκύπτει δραματική, δεν θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνουν αναλύσεις αλληλεπίδρασης και για αραιό κάρναβο.

## 5. Αλληλεπίδραση θεμελίων διαφορετικού φορτίου, με και χωρίς βελτίωση έναντι ρευστοποίησης

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν ώστε να μελετηθεί η αλληλεπίδραση δύο γειτονικών θεμελιολωρίδων ίδιου πλάτους και διαφορετικού φορτίου, με ή χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος υπό σεισμική διέγερση. Βάση της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, αρχικά εξετάστηκε για λόγους σύγκρισης μονό θεμέλιο πλάτους  $B = 5$  m, φορτίου  $q = 50$  kPa (ελαφρύ) και  $q = 200$  kPa (βαρύ), με και χωρίς βελτίωση υπό σεισμική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max} = 0.2$  g. Ύστερα έγινε διερεύνηση ως προς τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους αλλά διαφορετικού φορτίου και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά των μονών και των δίδυμων θεμελίων, κάτω από τις ίδιες κάθε φορά συνθήκες ώστε να φανεί αν η αλληλεπίδραση είναι ευμενής ή όχι. Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζεται η τυπική διάταξη του προβλήματος και στον **Πίνακα 5.1 (α,β)** φαίνονται τα χαρακτηριστικά των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου.



Σχήμα 5.1: Τυπική διάταξη θεμελίων πλάτους  $B$ , σε απόσταση  $D$ , υπό φορτία  $q_1$ ,  $q_2$  και σεισμική διέγερση  $a_{max}$  σε ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους  $H$ .

Πίνακας 5.1.α: Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση μονού θεμελίου, με και χωρίς κάρναβο χαλικοπασσάλων.

B (m)	$a_{max}$ (g)	q (kPa)	Βελτίωση με χαλικοπασσάλους
5	0.2	50	-
5	0.2	50	✓
5	0.2	200	-
5	0.2	200	✓

Πίνακας 5.1.β: Χαρακτηριστικά αναλύσεων για σεισμική απόκριση ζεύγους θεμελίων πλάτους B, διαφορετικού φορτίου  $q_1$ ,  $q_2$  με και χωρίς κάρναβο χαλικοπασσάλων υπό αυτά.

B (m)	$a_{max}$ (g)	D(m)	$q_1$ (kPa)	$q_2$ (kPa)	Βελτίωση με χαλικοπασσάλους	
					ελαφρύ	βαρύ
5	0.2	2.8	50	200	-	-
5	0.2	2.8	50	200	✓	✓
5	0.2	2.8	50	200	✓	-
5	0.2	2.8	50	200	-	✓
5	0.2	5	50	200	-	-
5	0.2	5	50	200	✓	✓
5	0.2	5	50	200	✓	-
5	0.2	5	50	200	-	✓
5	0.2	10	50	200	-	-
5	0.2	10	50	200	✓	✓
5	0.2	10	50	200	✓	-
5	0.2	10	50	200	-	✓

Όπως και στο **Κεφάλαιο 4**, τα μεγέθη που τελικά εξετάστηκαν για την συμπεριφορά των θεμελίων κατά την ρευστοποίηση είναι η καθίζηση του κέντρου των άκαμπτων θεμελίων, η στροφή τους στην περίπτωση του ζεύγους θεμελίων (καθώς μονό θεμέλιο θεωρείται πως έχει μηδενική στροφή), η χωρική κατανομή του συντελεστή (λόγου) υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και η χωρική κατανομή της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο έδαφος θεμελίωσης. Η καθίζηση και η στροφή μελετήθηκαν σε όρους χρονοϊστορίας, ενώ ο συντελεστής  $r_u$  και η παραμόρφωση  $\gamma$  σε όρους ισοκαμπύλων στο τέλος της διέγερσης.

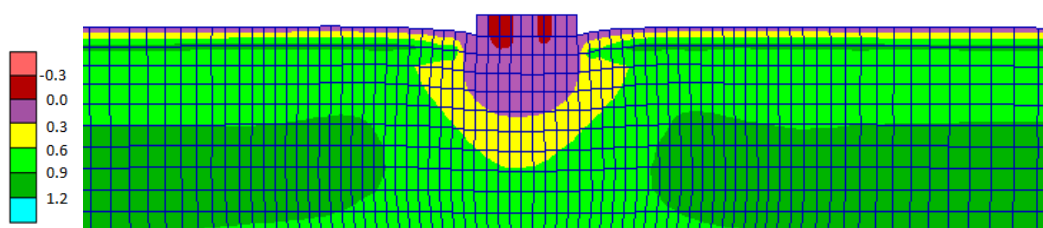
Σημειώνεται πως αρνητική καθίζηση υποδηλώνει ανύψωση θεμελίου ενώ θετική καθίζηση υποδηλώνει ταπείνωση της μέσης στάθμης του θεμελίου σε σχέση με εκείνη πριν την σεισμική διέγερση. Στις στροφές, το θετικό πρόσημο υποδηλώνει περιστροφή προς το γειτονικό θεμέλιο (συγκλίνουσα στροφή), ενώ το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει περιστροφή κατά του γειτονικού θεμελίου (αποκλίνουσα στροφή).

## 5.2 Απόκριση μεμονωμένων θεμελίων, βελτιωμένων ή μη

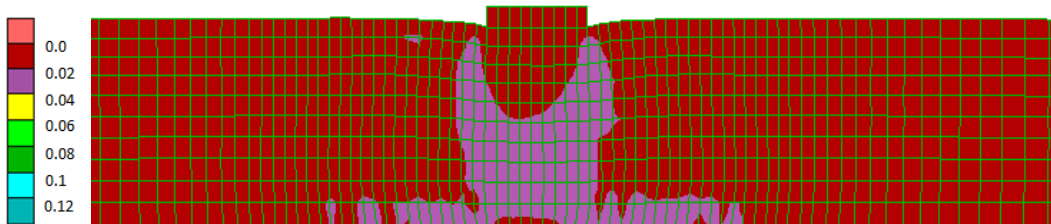
Για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς θεμελίων διαφορετικού φορτίου επί ρευστοποιήσιμου εδάφους και της αποδοτικότητας της βελτίωσης με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, έγιναν αναλύσεις για μονό θεμέλιο πλάτους  $B = 5$  m, μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης  $a_{\max} = 0.2$  g, με και χωρίς βελτίωση, υπό φορτίο  $q_1 = 50$  kPa και υπό  $q_2 = 200$  kPa (βλ. **Πίνακα 5.1.α**). Οι αναλύσεις αυτές αποτέλεσαν σημεία αναφοράς για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των λοιπών αναλύσεων αυτού του κεφαλαίου. Σε όλες τις περιπτώσεις το έδαφος είναι ομοιόμορφο και οριζόντιο, ενώ το θεμέλιο είναι κεντρικά φορτισμένο. Συνεπώς, η σεισμική διέγερση δεν προκαλεί ουσιώδη στροφή στο θεμέλιο, παρά μόνο (μικρές) τιμές στροφής αριθμητικής προέλευσης που θεωρούνται εδώ πρακτικά μηδενικές.

### 5.2.1 Απόκριση μεμονωμένων μη βελτιωμένων θεμελίων

Στο **Σχήμα 5.2(α,β)** φαίνονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της δόνησης για την περίπτωση μονού μη βελτιωμένου ελαφρού θεμελίου,  $q=50$ kPa.

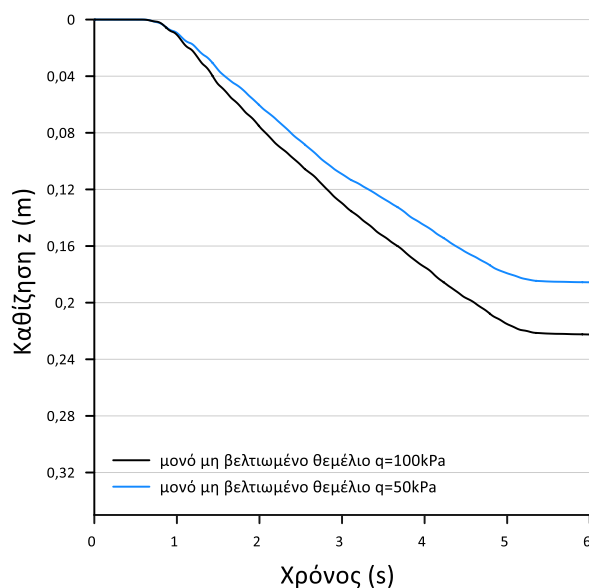


**Σχήμα 5.2.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5$ m χωρίς βελτίωση, υπό φορτίο  $q=50$ kPa και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2$ g.



Σχήμα 5.2.β: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$  χωρίς βελτίωση, υπό φορτίο  $q=50\text{kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

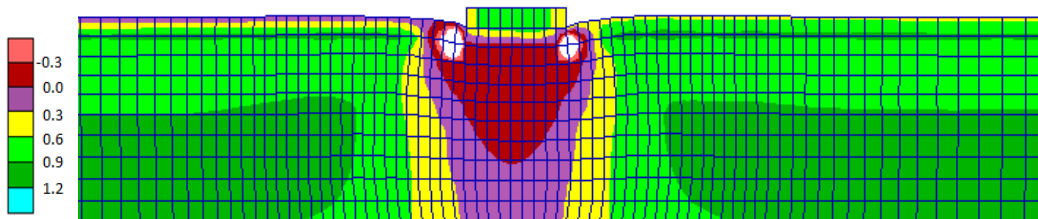
Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.2.α** κάτω από το θεμέλιο μέχρι περίπου την μέση της στρώσης, οι τιμές  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης είναι μικρότερες του 1, δηλαδή το έδαφος δεν έχει ρευστοποιηθεί. Αντιθέτως σε μεγαλύτερο βάθος και μακριά από το θεμέλιο ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων είναι  $r_u \geq 0.9$ , άρα το έδαφος έχει ρευστοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο ανωδομής αυξάνει τοπικά τις αρχικές ενεργές τάσεις  $\sigma'_{vo}$  οπότε αντίστοιχες τιμές του  $\Delta u$  οδηγούν σε τιμές του λόγου  $r_u = \Delta u / \sigma'_{vo}$  μικρότερες. Σε σύγκριση με την χρονοϊστορία  $r_u$  του μονού μη βελτιωμένου θεμελίου φορτίου  $q = 100 \text{ kPa}$  (βλ. Σχήμα 4.2.α) φαίνεται πως στην περίπτωση του ελαφρύ θεμελίου η ρευστοποίηση συμβαίνει σε μεγαλύτερη στρώση εδάφους κάτω από το θεμέλιο, αφού σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει μικρότερη αύξηση των  $\sigma'_{vo}$ . Παρότι δεν έχει ρευστοποιηθεί το έδαφος κοντά στο θεμέλιο, προκαλείται καθίζηση  $z = 18.6 \text{ cm}$  που είναι μη αποδεκτή για επιφανειακά θεμέλια, καθιστώντας την βελτίωση απαραίτητη. Το **Σχήμα 5.2.β** αποδίδει τον μηχανισμό αστοχίας του εδάφους και γίνεται αντιληπτό πως τείνει να δημιουργηθεί κατακόρυφος μηχανισμός αστοχίας κάτω από τα άκρα του θεμελίου, εικόνα παρόμοια με αυτή θεμελίου υπό φορτίο  $q = 100 \text{ kPa}$ . Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζεται η σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων μη βελτιωμένου θεμελίου φορτίου  $q = 50 \text{ kPa}$  και φορτίου  $q = 100 \text{ kPa}$ , όπου φαίνεται η δυσμενής επίδραση της αύξησης φορτίου.



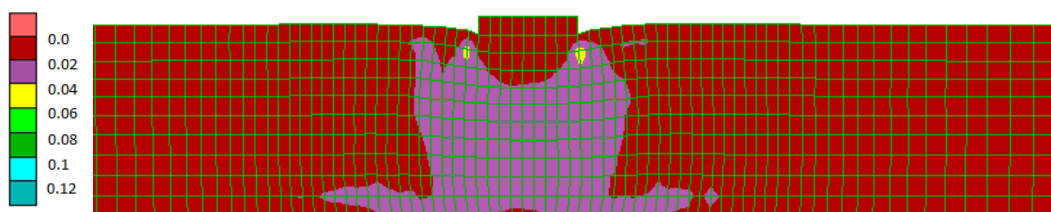
Σχήμα 5.3: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων μεμονωμένων θεμελίων φορτίου  $q = 50 \text{ kPa}$  και φορτίου  $q = 100 \text{ kPa}$ , πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 g$ .



Στο **Σχήμα 5.4 (α,β)** φαίνονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για την περίπτωση μονού μη βελτιωμένου βαρύ θεμελίου  $q=200$  kPa.

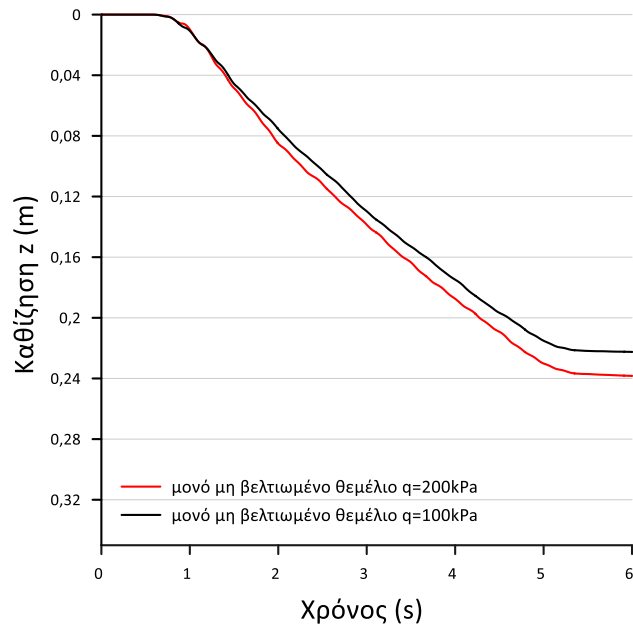


**Σχήμα 5.4.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5$ m χωρίς βελτίωση, υπό φορτίο  $q=200$  kPa και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2g$



**Σχήμα 5.4.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5$ m χωρίς βελτίωση, υπό φορτίο  $q=200$ kPa και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2g$ .

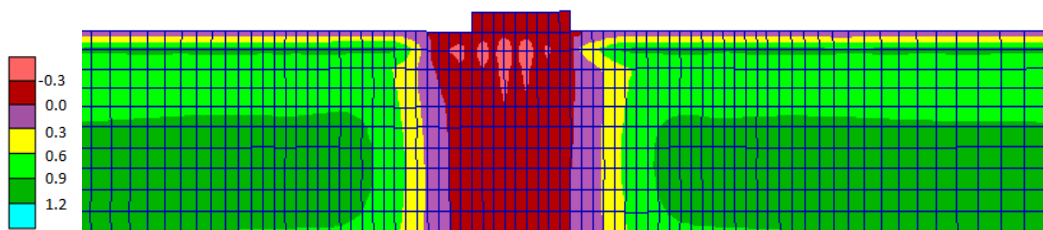
Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 5.4.α** μακριά από το θεμέλιο το έδαφος έχει ρευστοποιηθεί αφού  $r_u \geq 0.9$ , ενώ κάτω από το θεμέλιο μέχρι το τέλος της στρώσης δεν έχει ρευστοποιηθεί. Στα άκρα του θεμελίου μάλιστα παρατηρείται περιορισμένη ανάπτυξη υποπίεσεων λόγω διαστολικότητας. Η μέγιστη τιμή καθίζησης είναι  $z = 23.8$  cm, άρα η βελτίωση πάλι κρίνεται απαραίτητη. Σε σύγκριση με την χρονοϊστορία  $r_u$  του μονού μη βελτιωμένου θεμελίου φορτίου  $q = 100$  kPa (βλ.Σχήμα **4.2.α**) φαίνεται πως στο βαρύ θεμέλιο οι υπερπίεσεις είναι μικρότερες κάτω από το θεμέλιο στο τέλος της διέγερσης. Η παραμόρφωση  $\gamma$ , **Σχήμα 5.4.β**, και σε αυτή την περίπτωση δείχνει ανάπτυξη κατακόρυφου συμμετρικού μηχανισμού αστοχίας. Στο **Σχήμα 5.5** φαίνεται η σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσεων μη βελτιωμένου θεμελίου φορτίου  $q = 100$  kPa και φορτίου  $q = 200$  kPa όπου επιβεβαιώνεται η δυσμενής επιρροή της αύξησης του φορτίου.



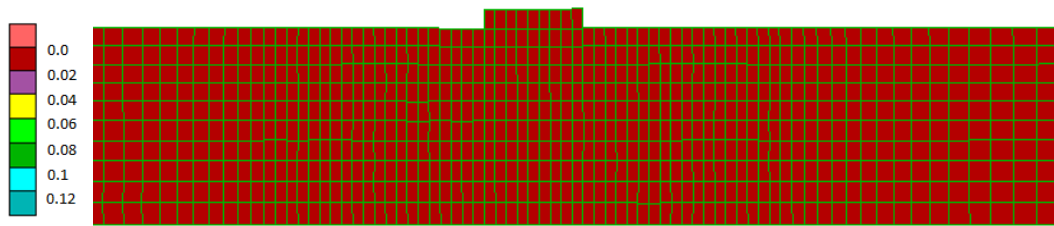
**Σχήμα 5.5:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μεμονωμένων θεμελίων φορτίου  $q = 100 \text{ kPa}$  και φορτίου  $q = 200 \text{ kPa}$ , πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

## 5.2 Απόκριση μεμονωμένων βελτιωμένων θεμελίων

Ως τρόπος βελτίωσης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης, εξετάστηκε όπως και στο **Κεφάλαιο 4**, η κατασκευή πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων (βλ. **Κεφάλαιο 3** για λεπτομέρειες). Στο **Σχήμα 5.6(α,β)** φαίνονται οι χωρικές κατανομές του λόγου  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης στην περίπτωση βελτιωμένου μονού ελαφρύ θεμελίου  $q = 50 \text{ kPa}$ .

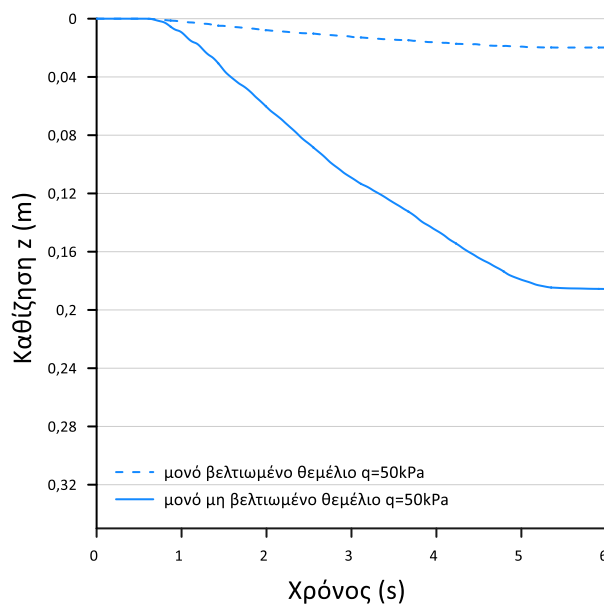


**Σχήμα 5.6.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, υπό φορτίο  $q=50\text{kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{g}$ .



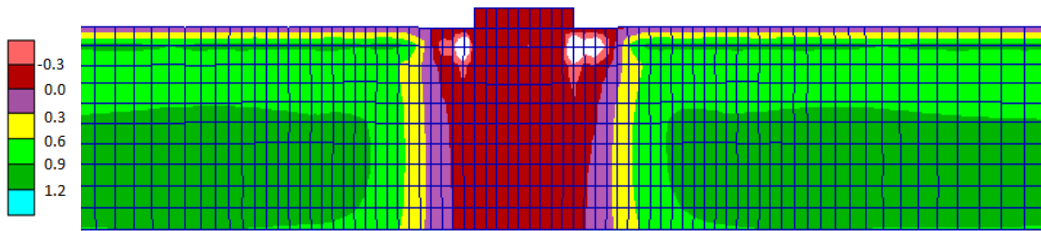
**Σχήμα 5.6.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, υπό φορτίο  $q=50\text{kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

Συγκρίνοντας τα **Σχήματα 5.2** και **5.6**, φαίνεται πως ο πυκνός κάνναβος χαλικοπασσάλων μέσω της ενίσχυσης και της στράγγισης που προσφέρει, έχει βελτιώσει σημαντικά την συμπεριφορά του εδάφους, μειώνοντας τις υπερπιέσεις πόρων και μηδενίζοντας τις παραμορφώσεις κάτω από το θεμέλιο μέχρι το τέλος της εδαφικής στρώσης. Η μέγιστη καθίζηση μειώθηκε από  $z = 18.6\text{ cm}$  σε  $z = 2.1\text{ cm}$ . Στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των καθιζήσεων του μη βελτιωμένου και βελτιωμένου ελαφρύ θεμελίου, όπου φαίνεται η θετική επιρροή των χαλικοπασσάλων.

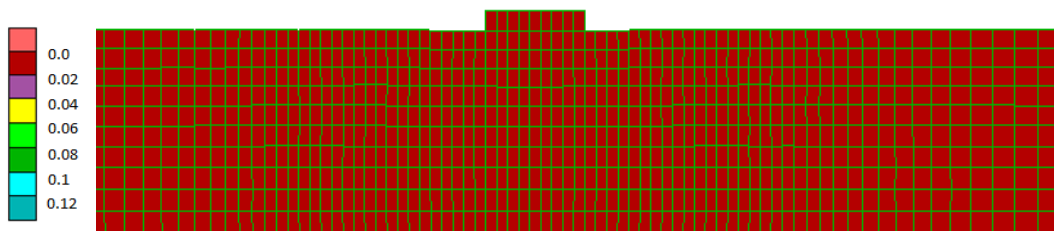


**Σχήμα 5.7:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης ελαφρύ θεμελίων  $q = 50\text{ kPa}$ , πλάτους  $B = 5\text{ m}$ , με και χωρίς βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, υπό μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2\text{ g}$ .

Αντίστοιχα παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.8(α,β)** οι χρονοϊστορίες του λόγου  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης, για την περίπτωση βαρύ βελτιωμένου θεμελίου  $q=200\text{kPa}$ .

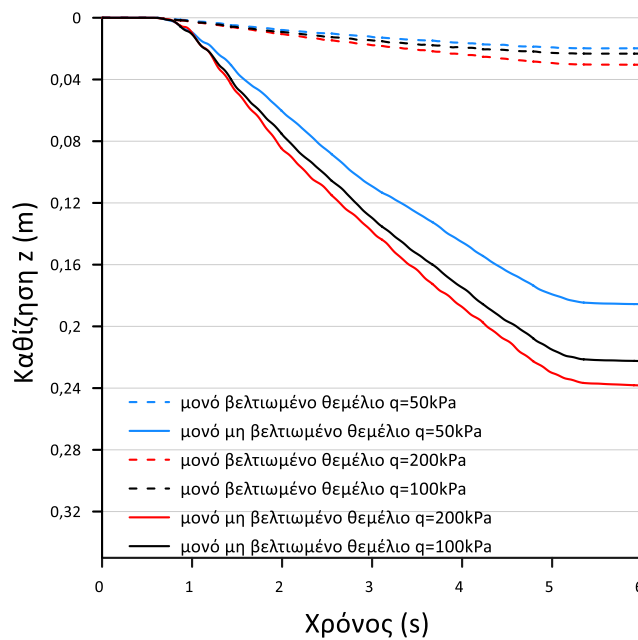


**Σχήμα 5.8.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, υπό φορτίο  $q=200\text{ kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\text{max}}=0.2g$



**Σχήμα 5.8.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από μονό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, υπό φορτίο  $q=200\text{ kPa}$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\text{max}}=0.2g$ .

Παρομοίως, παρατηρείται σημαντική μείωση των υπερπιέσεων πόρων και μηδενισμός των παραμορφώσεων. Μάλιστα οι αρνητικές υπερπιέσεις ( $r_u < 0$ ) που αναπτύσσεται στις γωνίες του θεμελίου λόγω τάσης για διαστολή του εδάφους, υποδηλώνει αύξηση των ενεργών τάσεων σε σχέση με τις αρχικές και τελικώς αύξηση της αντοχής και στιβαρότητας του εδάφους. Αποτέλεσμα αυτών είναι η σημαντική μείωση της καθίζησης από  $z = 23.8\text{ cm}$  σε  $z = 3\text{ cm}$ . Στο **Σχήμα 5.9** φαίνεται η σύγκριση της ιστορίας της μέσης καθίζησης μεμονωμένων βελτιωμένων και μη θεμελίων πλάτους  $B = 5\text{ m}$ , υπό φορτία  $q = 50, 100$  και  $200\text{ kPa}$ . Παρατηρείται πως είτε το θεμέλιο είναι βελτιωμένο είτε όχι, η αύξηση του φορτίου επιδρά δυσμενώς ως προς τις καθιζήσεις, ενώ σε κάθε περίπτωση οι χαλικοπάσσαλοι μειώνουν δραματικά τις καθιζήσεις.



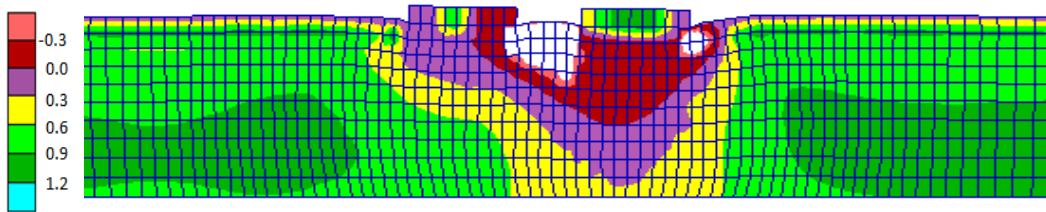
**Σχήμα 5.9:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μονού θεμελίου χωρίς και με βελτίωση πυκνής διάταξης χαλικοπασσάλων, πλάτους  $B=5\text{m}$  υπό φορτία  $q = 50, 100$  και  $200\text{kPa}$  με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

### 5.3 Απόκριση ζεύγους θεμελίων, κοινά βελτιωμένων και μη

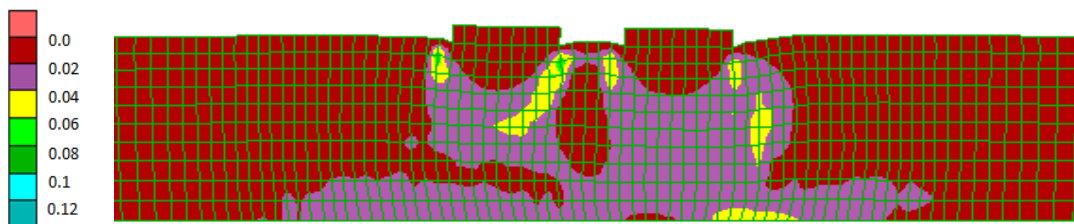
Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η απόκριση ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B = 5\text{ m}$ , υπό διαφορετικά φορτία μεταξύ τους  $q_1 = 50\text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200\text{ kPa}$  (βαρύ), για διαφορετικές τιμές της μεταξύ τους απόστασης ( $D = 2.8\text{ m}, 5\text{ m}, 10\text{ m}$ ) με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2\text{ g}$  και για περιπτώσεις όπου κανένα ή και τα δύο είναι βελτιωμένα με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων. Στόχος των αναλύσεων αυτών είναι η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης των δύο θεμελίων, η μελέτη των παραγόντων που την επηρεάζουν και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα του μεμονωμένου θεμελίου ώστε να γίνει αξιολόγηση για το αν η αλληλεπίδραση είναι ευμενής ή όχι. Αρχικά παρουσιάζονται οι χωρικές κατανομές των  $r_u$  και  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης, συγκρίνοντας τις καθιζήσεις των θεμελίων με τα μεμονωμένα ίδιων συνθηκών. Καθώς πλέον το πρόβλημα δεν είναι συμμετρικό, ως χρονοϊστορία καθιζήσης σε ζεύγος θεμελίων λαμβάνεται κάθε θεμέλιο ξεχωριστά όπως και στις στροφές.

#### 5.3.1 Απόκριση ζεύγους μη βελτιωμένων θεμελίων

Στο **Σχήμα 5.10 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και της παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για την περίπτωση ζεύγους θεμελίων ίδιου πλάτους  $B = 5\text{ m}$ , χωρίς βελτίωση, σε απόσταση  $D = 2.8\text{ m}$ , υπό φορτία  $q_1=50\text{ kPa}$  (αριστερό) και  $q_2 = 200\text{ kPa}$  (δεξί), και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2\text{ g}$ .

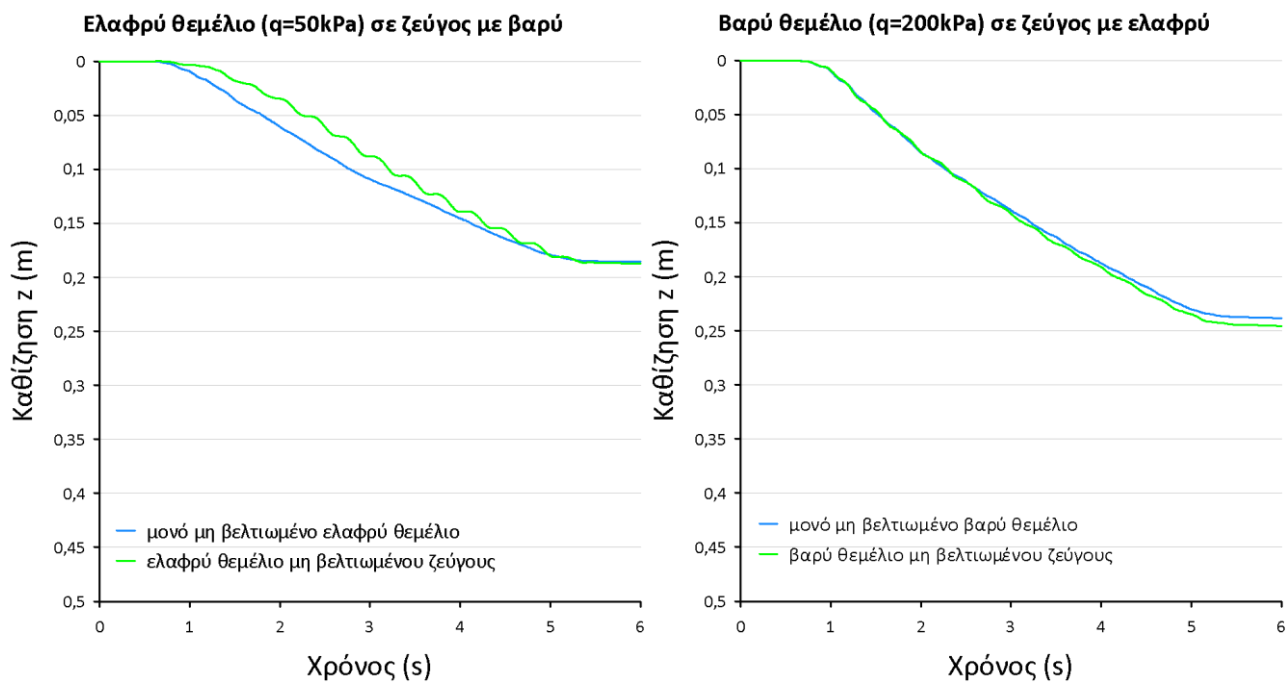


**Σχήμα 5.10.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

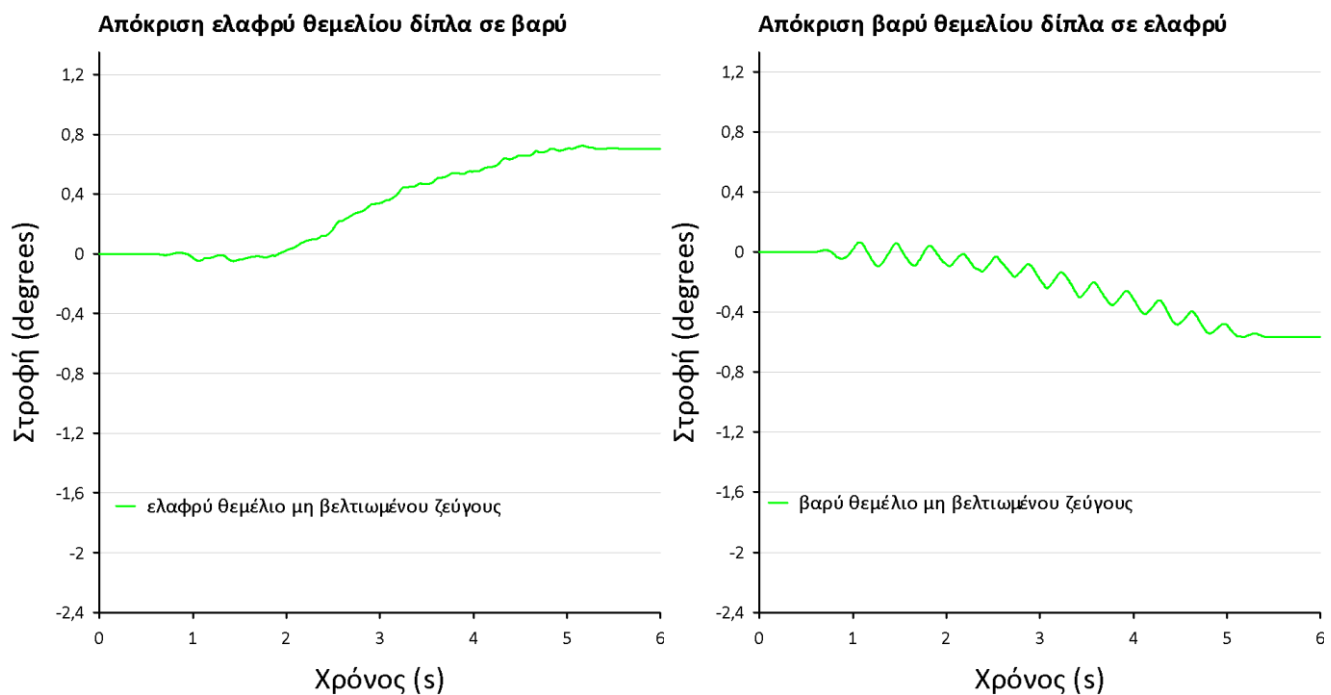


**Σχήμα 5.10.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Συγκρίνοντας το **Σχήμα 5.10** με τα **Σχήματα 5.2, 5.4** φαίνεται πως στην περίπτωση του ζεύγους μη βελτιωμένων θεμελίων διαφορετικού φορτίου σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$ , υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση καθώς αναπτύσσονται ασύμμετρες υπερπίεσεις πόρων και παραμορφώσεις του εδάφους. Η εικόνα κάτω από κάθε θεμέλιο φαίνεται να μοιάζει με την αντίστοιχη του μεμονωμένου, όπου δηλαδή κάτω από το ελαφρύ υπάρχει περιορισμένη μείωση των υπερπίεσεων μέχρι το μέσο της στρώσης, ενώ κάτω από το βαρύ όλο το πάχος του εδάφους παρουσιάζει μικρές υπερπίεσεις. Οι έντονες υπερπίεσεις στα θεμέλια αναπτύσσονται λόγω της επαλληλίας της διάτμησης του εδάφους που οφείλεται στην (σχετικά) μικρή τους απόσταση. Αυτό συνεπάγεται πιο εμπεδωμένο μηχανισμό αστοχίας υπό τα δύο θεμέλια, ο οποίος παύει να είναι συμμετρικός κάτω από κάθε θεμέλιο. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.10.β** με την πιο έντονη παραμόρφωση στο δεξί άκρο του ελαφρού θεμελίου, το ελαφρύ θεμέλιο αναπτύσσει συγκλίνουσα στροφή, ενώ το βαρύ αποκλίνουσα. Συνολικά, όπως φαίνεται από το **Σχήμα 5.11** η αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων σε όρους καθίζησης είναι αμελητέα καθώς τα μη βελτιωμένα θεμέλια έχουν ίδια σχεδόν μέση καθίζηση είτε είναι μεμονωμένα είτε σε ζεύγος. Η μέγιστη καθίζηση του ελαφρού θεμελίου είναι  $z = 18.7 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 18.6 \text{ m}$  που έχει το μεμονωμένο μη βελτιωμένο ελαφρύ) και του βαρύ θεμελίου είναι  $z = 24.6 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 23.8 \text{ cm}$  που έχει το μεμονωμένο μη βελτιωμένο βαρύ).



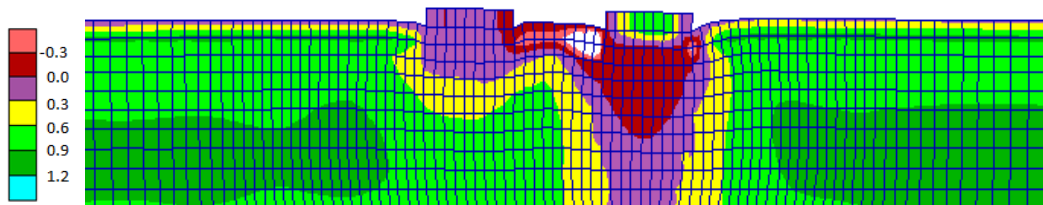
**Σχήμα 5.11:** Σύγκριση ιστοριών καθίζησης μεμονωμένων μη βελτιωμένων ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .



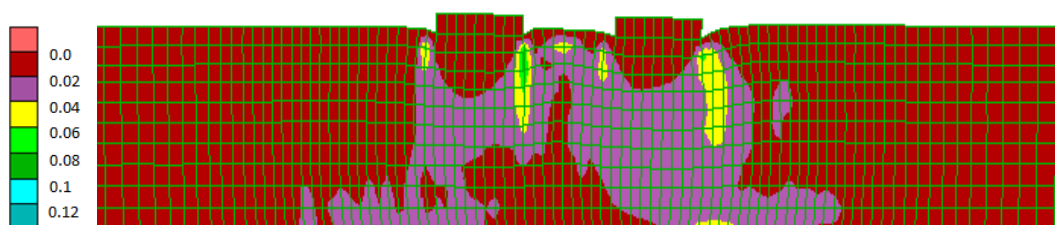
**Σχήμα 5.12:** Σύγκριση ιστοριών στροφής μη βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Από την άλλη, σε όρους στροφής (**Σχήμα 5.12**), η αλληλεπίδραση είναι δυσμενής, καθώς δημιουργούνται ουσιώδεις στροφές, με το ελαφρύ να αναπτύσσει συγκλίνουσα στροφή ενώ το βαρύ αποκλίνουσα.

Στη συνέχεια, για να διερευνηθεί η επίδραση της απόστασης μεταξύ των θεμελίων στην απόκριση τους, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για την παραπάνω διάταξη μη βελτιωμένων θεμελίων αλλά σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$ . Στο **Σχήμα 5.13(α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης.



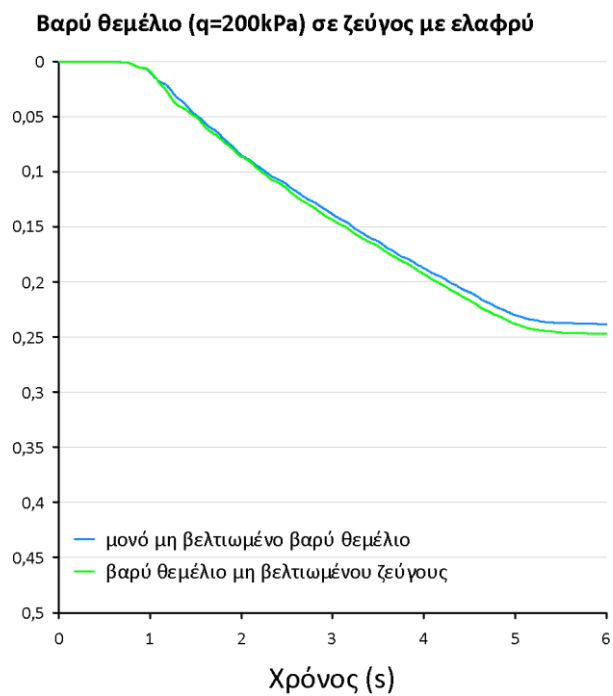
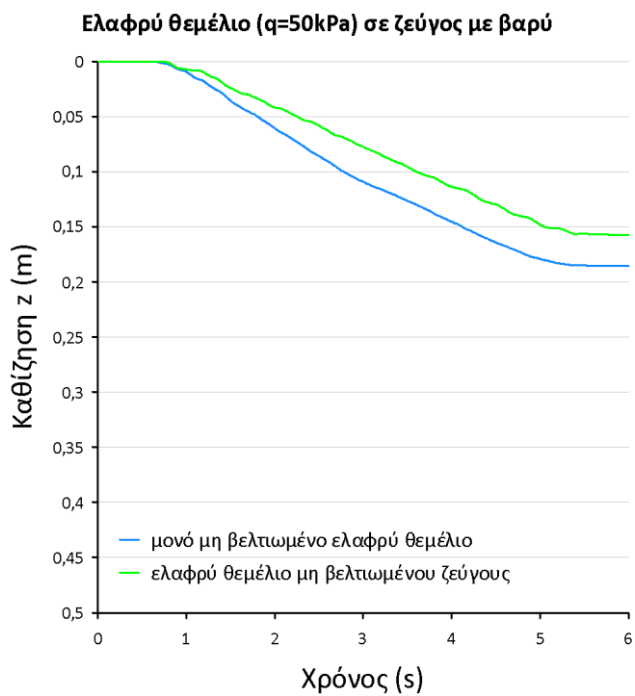
**Σχήμα 5.13.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2g$ .



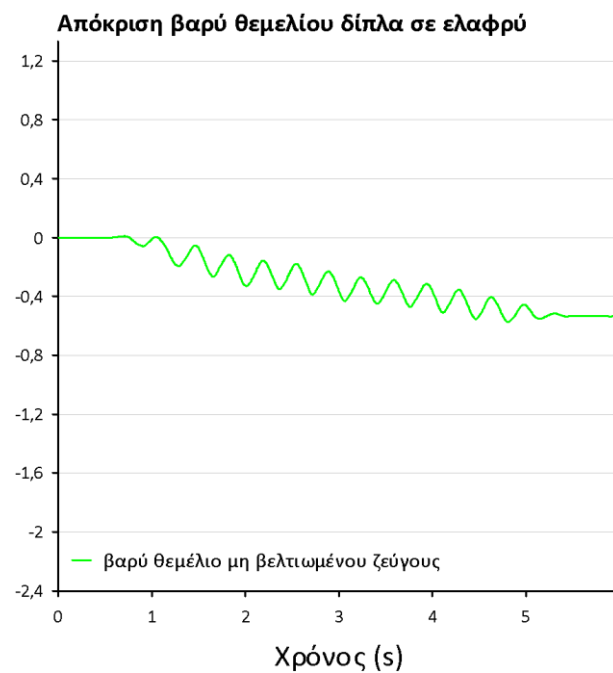
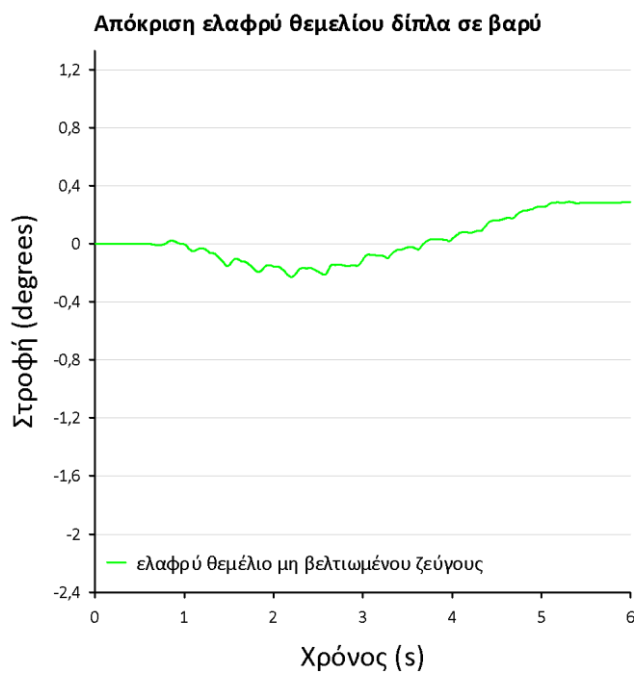
**Σχήμα 5.13.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2g$ .

Συγκρίνοντας το **Σχήμα 5.13.α** με το **Σχήμα 5.2.α** και **5.4.α** φαίνεται πως με την αύξηση της απόστασης, κάτω από τα θεμέλια η απόκριση των θεμελίων μοιάζει με αυτή που έχουν όταν είναι μεμονωμένα. Το πάχος της στρώσης κάτω από το ελαφρύ θεμέλιο που ρευστοποιείται είναι πλέον μεγαλύτερο (άρα υπάρχει απομείωση των επιταχύνσεων), γεγονός που εξηγεί γιατί οι καθιζήσεις έχουν μειωθεί λόγω της παρουσίας του βαρύ θεμελίου. Πράγματι, η μέγιστη καθίζηση του ελαφρύ θεμελίου είναι  $z = 15.7 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 18.6 \text{ cm}$ ) και του βαρύ είναι  $z = 24.7 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 23.8 \text{ cm}$ ). Άρα για το ελαφρύ θεμέλιο η αλληλεπίδραση είναι ευμενής ενώ για το βαρύ ελαφρώς δυσμενής. Η στροφή του ελαφρύ θεμελίου παραμένει συγκλίνουσα και του βαρύ αποκλίνουσα, αλλά παίρνουν μικρότερες τιμές από ότι για  $D = 2.8 \text{ m}$ . Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από τις ιστορίες στα **Σχήματα 5.14 και 5.15**, όπου διαπιστώνεται πως ειδικά το βαρύ μη βελτιωμένο θεμέλιο σε όρους καθίζησης δεν επηρεάζεται καθόλου από το μη βελτιωμένο ελαφρύ. Αντίθετα, το μη βελτιωμένο ελαφρύ έχει μειωμένες καθιζήσεις λόγω του γειτονικού μη βελτιωμένου βαρύ θεμελίου.



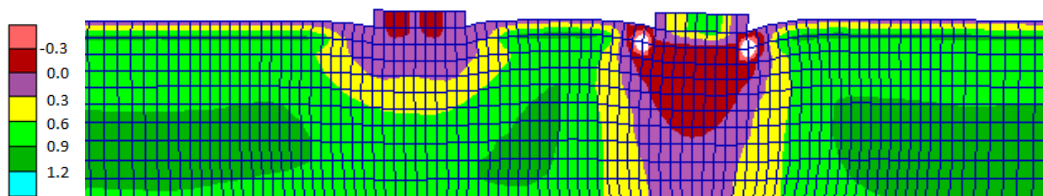


**Σχήμα 5.14:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μεμονωμένου μη βελτιωμένου ελαφρού και βαρού θεμελίου, με τις αντίστοιχες ζεύγους ελαφρού-βαρού θεμελίου, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

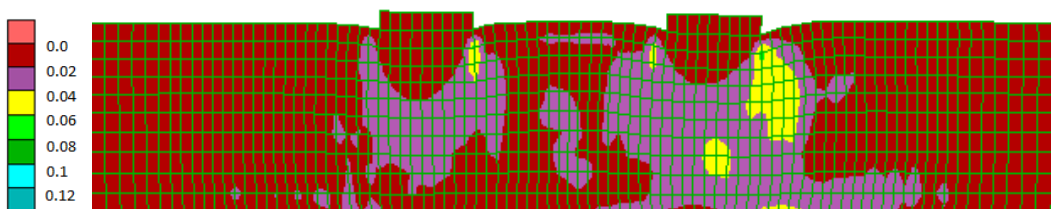


**Σχήμα 5.15:** Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφής μη βελτιωμένου ζεύγους ελαφρού-βαρού θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$

Τέλος, έγιναν αναλύσεις και για ζεύγος μη βελτιωμένων θεμελίων διαφορετικού φορτίου ( $q_1 = 50 \text{ kPa}$ ,  $q_2 = 200 \text{ kPa}$ ) σε απόσταση  $D = 10 \text{ m}$ . Στο **Σχήμα 5.16 (α,β)** φαίνονται οι χωρικές κατανομές των  $r_u$  και  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης.

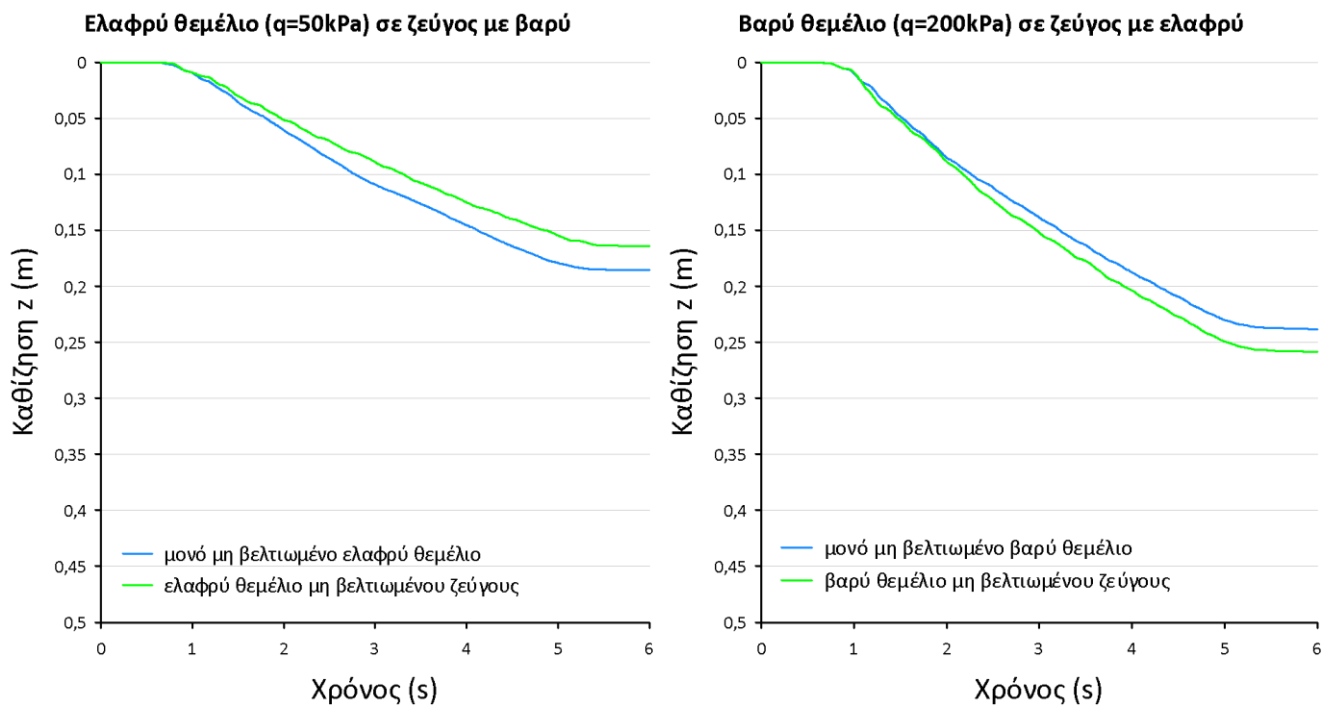


**Σχήμα 5.16.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D=10 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

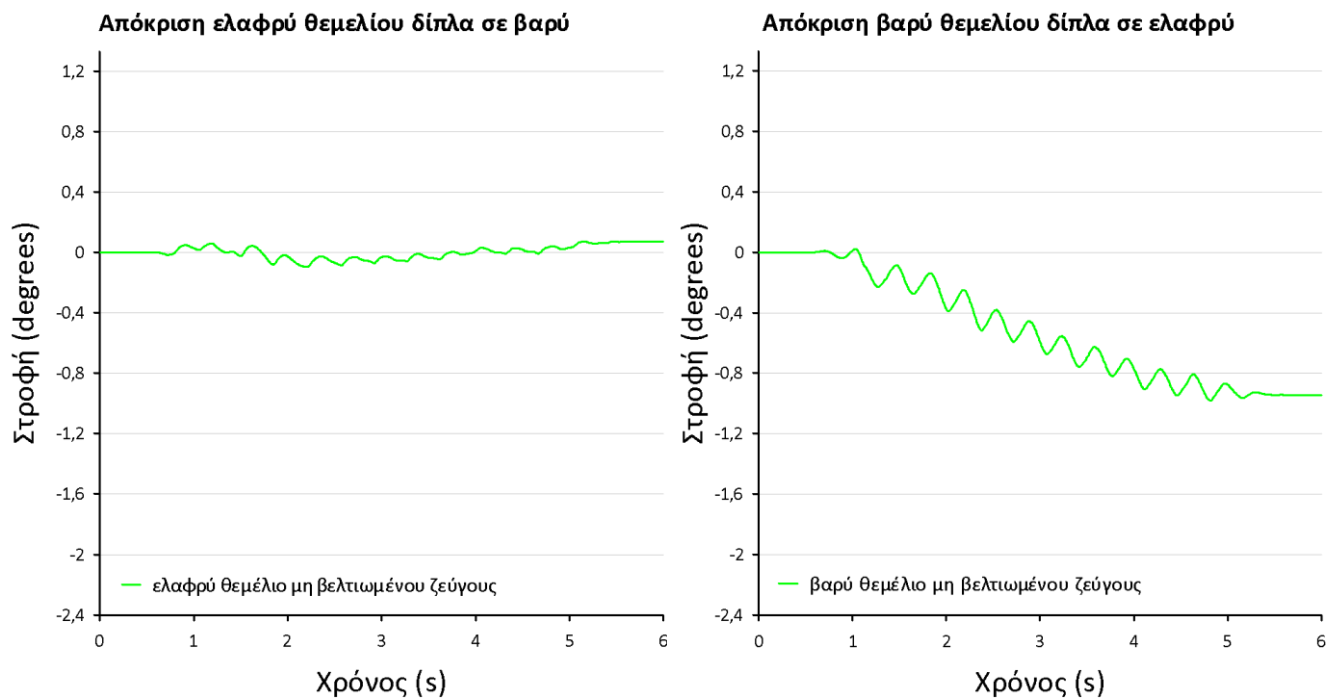


**Σχήμα 5.16.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D=10 \text{ m}$  διαφορετικού φορτίου με  $q=50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) χωρίς βελτίωση, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

Από το **Σχήμα 5.16.α** φαίνεται πως η κατανομή του λόγου υπερπίεσεων πόρων δείχνει σχετικά συμμετρική κάτω από κάθε θεμέλιο και μοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη του μεμονωμένου. Όμως, παρά την μεγάλη απόσταση, υπάρχει αλληλεπίδραση των θεμελίων καθώς οι ισοκαμπύλες της διατμητικής παραμόρφωσης δεν είναι πλέον συμμετρικές (**Σχήμα 5.16.β**), αποτυπώνοντας τη σημαντική αποκλίνουσα στροφή στο βαρύ θεμέλιο. Η καθίζηση του ελαφρύ θεμελίου είναι  $z=16.4 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 18.6 \text{ cm}$ ) και του βαρύ είναι  $z = 25.8 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 23.8 \text{ cm}$ ). Συνεπώς, η απόσταση  $D = 10 \text{ m}$  προκαλεί ευμενή αλληλεπίδραση για το ελαφρύ θεμέλιο, και το αντίθετο ισχύει για το βαρύ, όπως κίολας φαίνεται στο **Σχήμα 5.17**. Από την άλλη, με βάση το **Σχήμα 5.18**, η στροφή του ελαφρύ μη βελτιωμένου θεμελίου είναι αμελητέα, όπως και όταν είναι μεμονωμένο, ενώ το βαρύ μη βελτιωμένο θεμέλιο σε όρους στροφών επηρεάζεται αρκετά από την παρουσία του μη βελτιωμένου ελαφρύ γειτονικού θεμελίου αναπτύσσοντας αποκλίνουσα στροφή.



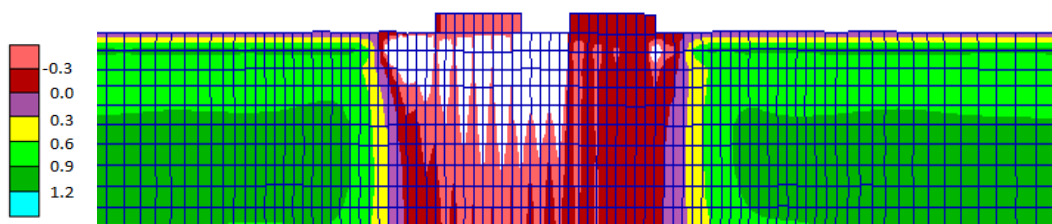
**Σχήμα 5.17:** Σύγκριση ιστοριών καθίζησης μεμονωμένων μη βελτιωμένων ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 10 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .



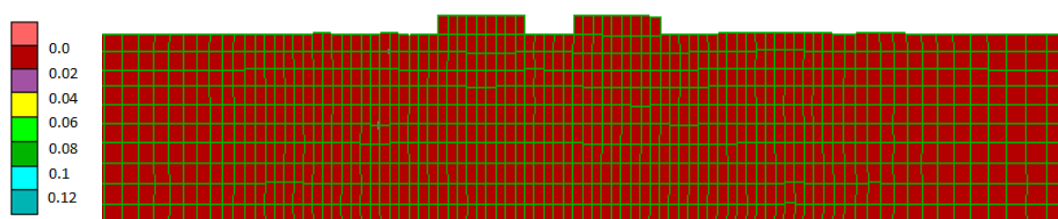
**Σχήμα 5.18:** Σύγκριση ιστοριών στροφής μη βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 10 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

### 5.3.2 Απόκριση ζεύγους βελτιωμένων θεμελίων

Σε αυτή τη παράγραφο εξετάζονται ζεύγη θεμελίων ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε αποστάσεις  $D = 2.8 \text{ m}$ ,  $5 \text{ m}$  και  $10 \text{ m}$ , υπό μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ , με κοινή βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, αλλά διαφορετικά φορτία  $q_1 = 50 \text{ kPa}$  και  $q_2 = 200 \text{ kPa}$ . Στο **Σχήμα 5.19 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης για απόσταση θεμελίων  $D = 2.8 \text{ m}$ .

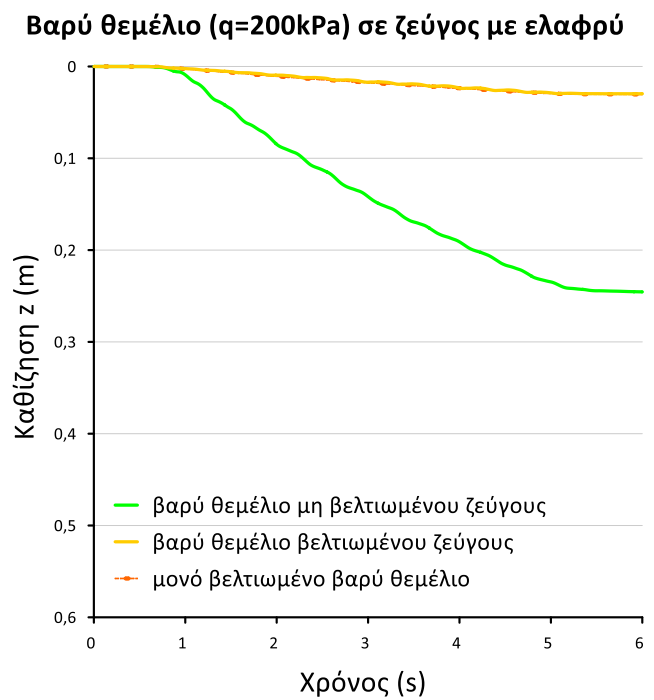
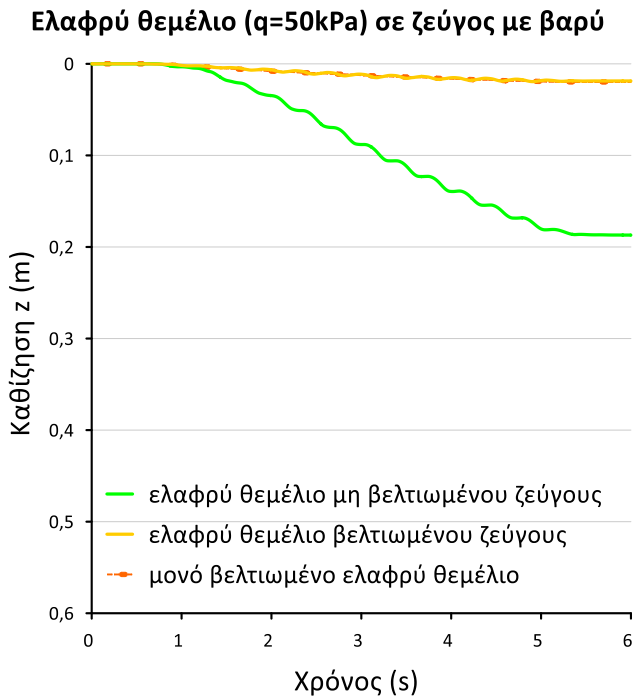


**Σχήμα 5.19.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ), υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

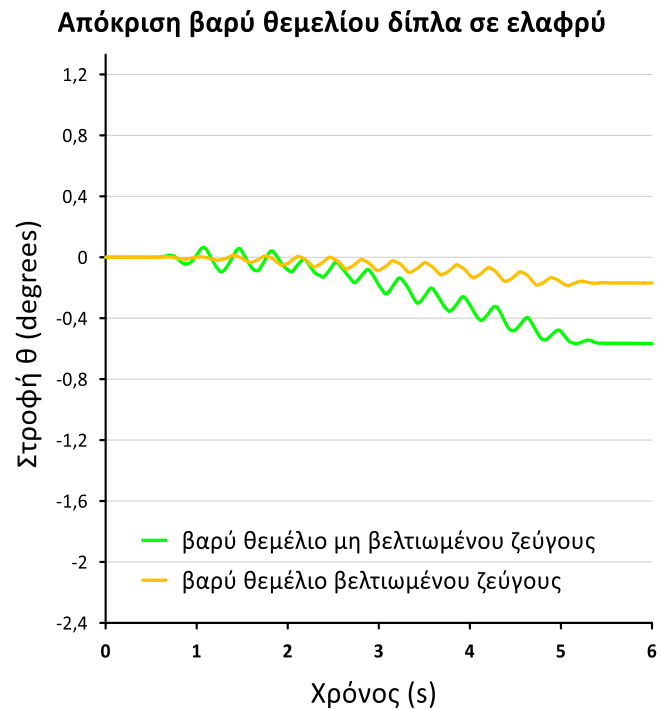
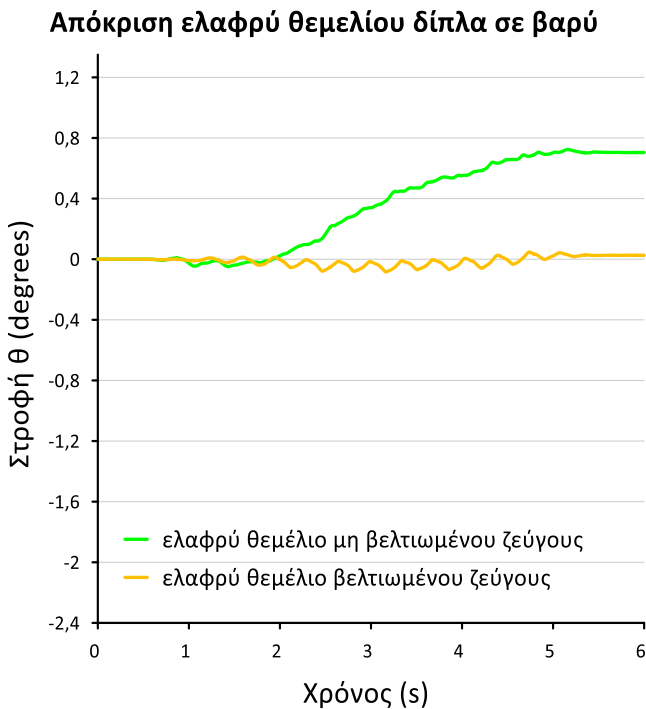


**Σχήμα 5.19.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ), υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 5.19.α** η προσθήκη των χαλικοπασσάλων και στα τα δύο θεμέλια, μείωσε δραματικά τις υπερπιέσεις πόρων ακόμα και στο μη βελτιωμένο έδαφος ανάμεσά τους. Μάλιστα, ειδικά κάτω από το ελαφρύ θεμέλιο αναπτύχθηκαν έντονες υποπίεσεις πόρων λόγω διαστολικότητας. Από το **Σχήμα 5.19.β** προκύπτει ότι οι παραμορφώσεις του εδάφους είναι πολύ μικρές, λόγω της βελτίωσης. Πιο πρακτικά, από τα **Σχήματα 5.20** και **5.21** προκύπτει ότι οι καθιζήσεις είναι για το ελαφρύ  $z = 1.9 \text{ cm}$  (αντί  $z = 2.1 \text{ cm}$ , που έχει το μεμονωμένο βελτιωμένο ελαφρύ) και για το βαρύ  $z = 3 \text{ cm}$  (όπως έχει όταν είναι μεμονωμένο βελτιωμένο βαρύ), καθιστώντας την αλληλεπίδραση βελτιωμένων θεμελίων ευμενή. Από την άλλη, οι στροφές που αναπτύχθηκαν είναι και πάλι αμελητέες.

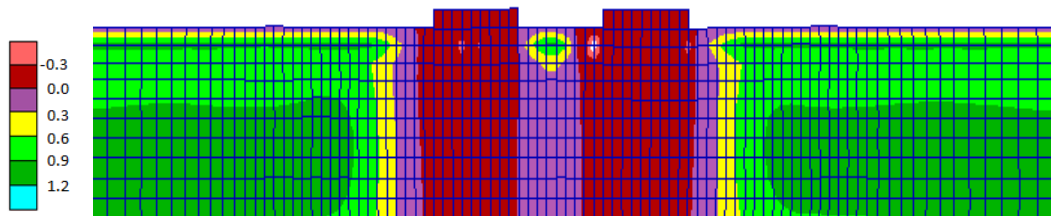


**Σχήμα 5.20:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μεμονωμένων βελτιωμένων ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες βελτιωμένου ή μη ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

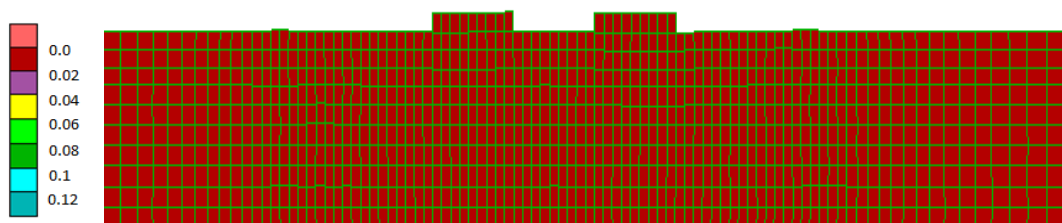


**Σχήμα 5.21:** Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφής βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες μη-βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$

Στο **Σχήμα 5.22 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και της διατμητικής παραμόρφωσης για βελτιωμένα θεμέλια απόστασης  $D = 5 \text{ m}$  στο τέλος της διέγερσης.

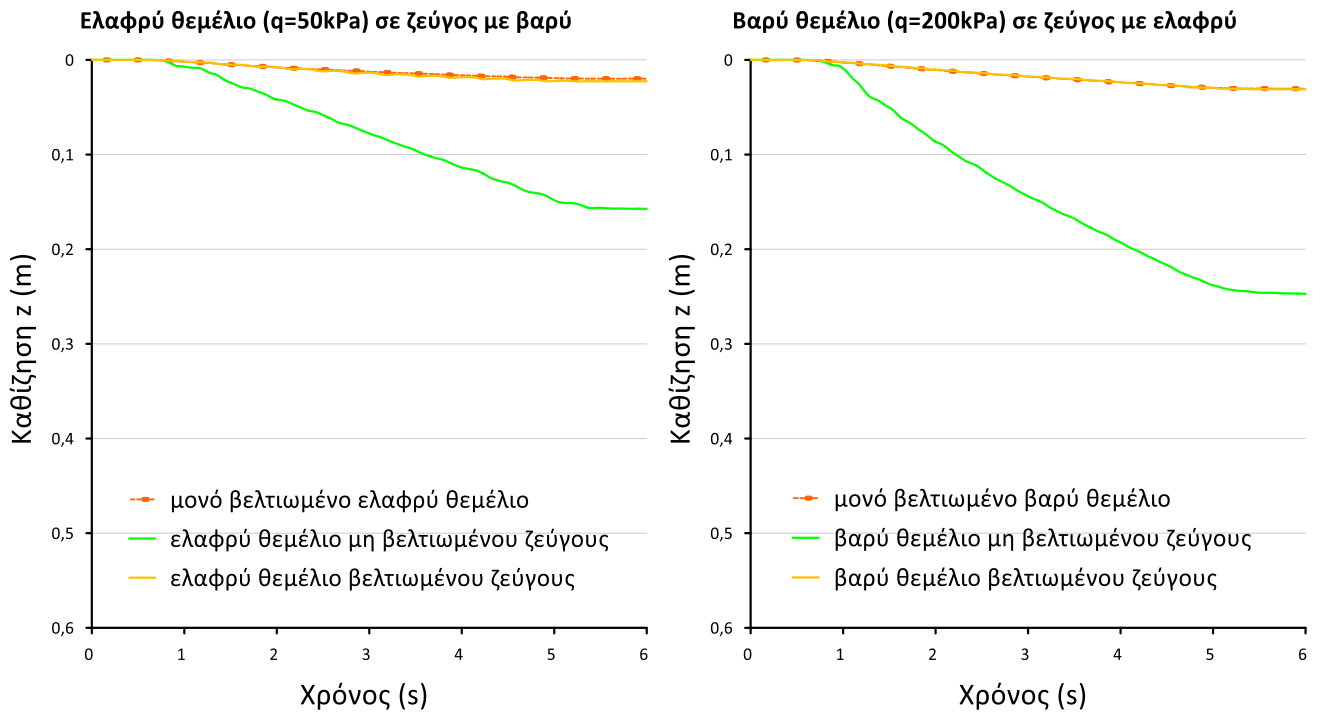


**Σχήμα 5.22.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ), υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

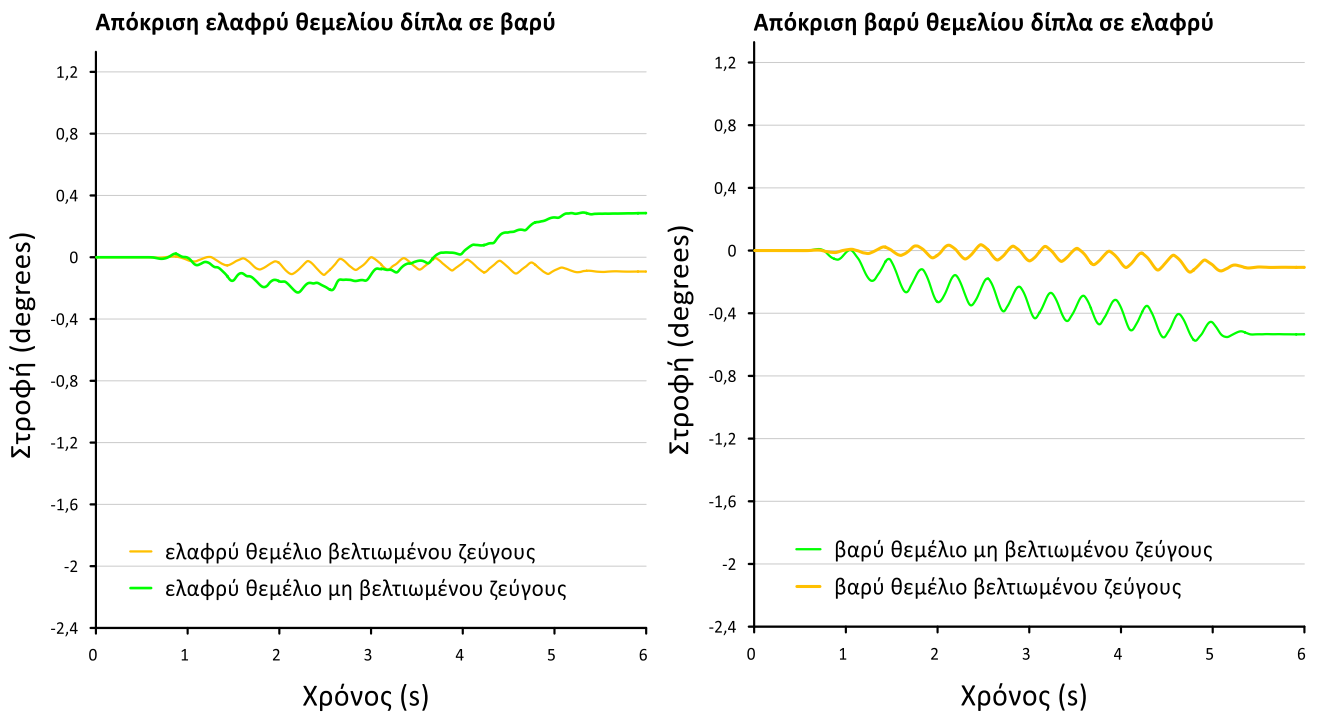


**Σχήμα 5.22.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$  με βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ), υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.22.α**, σε αντίθεση με την περίπτωση όπου η απόσταση των θεμελίων είναι  $D = 2.8 \text{ m}$ , όταν αυξάνεται η απόσταση σε  $D = 5 \text{ m}$ , το μη βελτιωμένο έδαφος ανάμεσά τους πλάτους  $3.9 \text{ m}$  δεν βελτιώνεται πλήρως από την παρουσία των χαλικοπασσάλων και ρευστοποιείται σε βάθος κοντά στην επιφάνεια. Η εικόνα των υπερπίεσεων μοιάζει έντονα με αυτή των δίδυμων θεμελίων. Παράλληλα, οι παραμορφώσεις σε όλη τη στρώση εδάφους είναι σχεδόν μηδενικές. Οι καθιζήσεις για τα δύο θεμέλια πλέον είναι  $z = 2.2 \text{ cm}$  (αντί  $z = 2.1 \text{ cm}$ ) για το ελαφρύ και  $z = 3.1 \text{ cm}$  (αντί  $z = 3 \text{ cm}$ ) για το βαρύ, δηλαδή η αλληλεπίδραση είναι ευμενής. Οι στροφές που αναπτύχθηκαν και για τα δύο θεμέλια είναι αμελητέες. Στο **Σχήμα 5.23** και **5.24** παρουσιάζεται η σύγκριση των χρονοϊστοριών καθιζήσης και στροφών για μεμονωμένα θεμέλια και για βελτιωμένο ή μη ζεύγος θεμελίων.

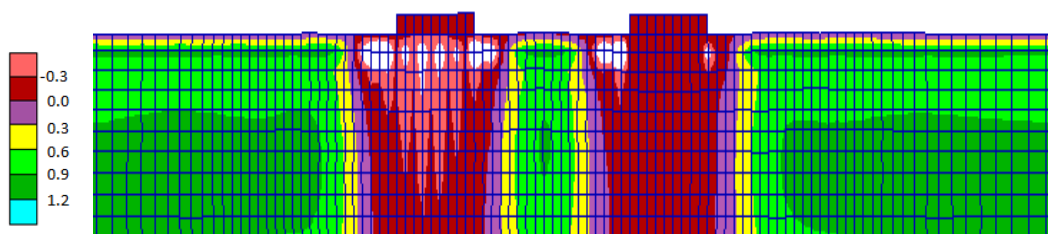


**Σχήμα 5.23:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μεμονωμένων βελτιωμένων ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες βελτιωμένου ή μη ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

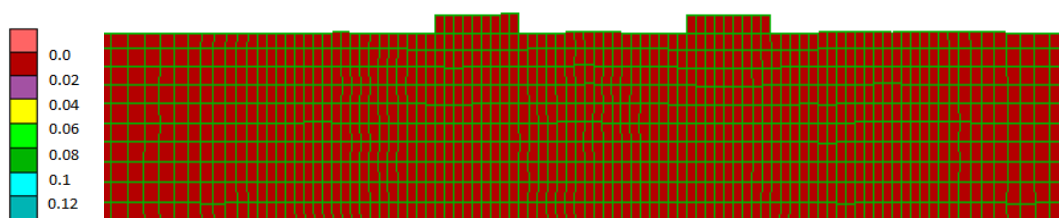


**Σχήμα 5.24:** Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφής βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες μη-βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.25 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της διέγερσης, για θεμέλια διαφορετικού φορτίου  $q_1= 50$  kPa και  $q_2= 200$  kPa, απόστασης  $D=10$ m βελτιωμένων από κοινού με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων.



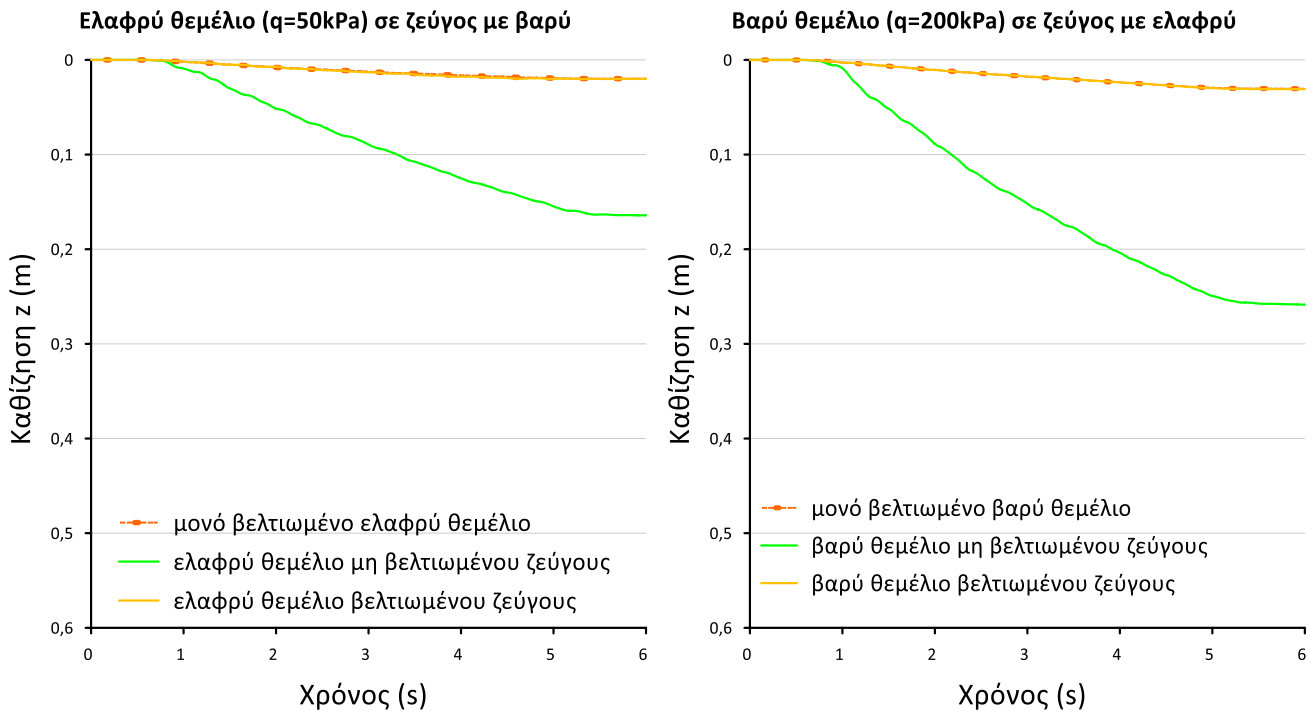
**Σχήμα 5.25.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5$  m με βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D= 10$  m, διαφορετικού φορτίου με  $q= 50$  kPa αριστερά (ελαφρύ) και  $q= 200$  kPa δεξιά (βαρύ), υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2g$



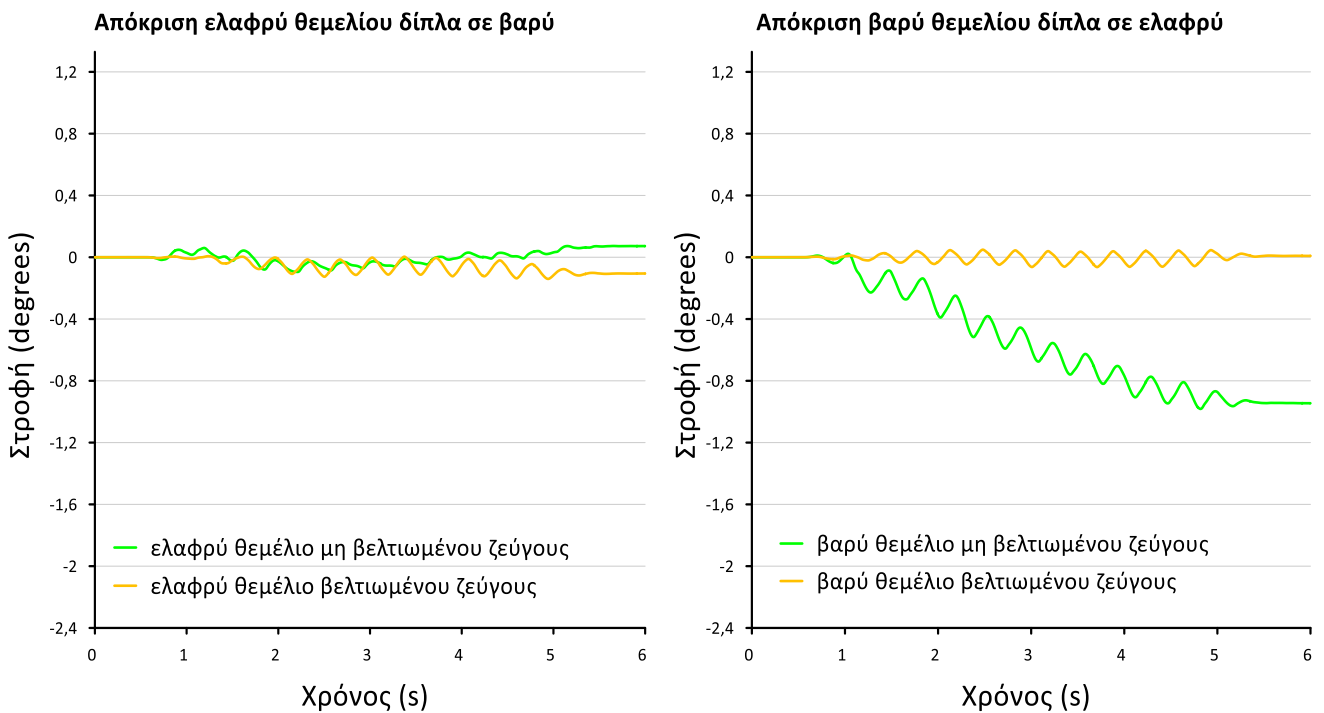
**Σχήμα 5.25.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5$  m με βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων, σε απόσταση  $D = 10$  m, διαφορετικού φορτίου με  $q= 50$  kPa αριστερά (ελαφρύ) και  $q= 200$  kPa δεξιά (βαρύ) , υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2 g$

Παρά την μεγάλη απόσταση που υπάρχει ανάμεσα στα θεμέλια, η αλληλεπίδραση των θεμελίων συνεχίζει να υπάρχει αμιδρά, ενώ η κατανομή των υπερπιέσεων είναι παρόμοια με τις αντίστοιχες για μεμονωμένα βελτιωμένα θεμέλια, αν και στο **Σχήμα 5.25** φαίνεται να αναπτύσσονται πιο έντονες υποπίεσεις κάτω από το ελαφρύ από όταν είναι μεμονωμένο . Η καθίζηση του ελαφρύ θεμελίου είναι  $z = 2$  cm (αντί για  $z=2.1$  cm) και του βαρύ  $z = 3$  cm (αντί για  $z = 3$  cm), ενώ οι στροφές είναι αμελητέες. Αξίζει να τονισθεί πως για  $D = 10$  m τα θεμέλια βελτιωμένου ζεύγους έχουν απόκριση σχεδόν ταυτόσημη με τα αντίστοιχα μεμονωμένα, δηλαδή η αλληλεπίδραση τους έχει πρακτικά εξαληφθεί. Στο **Σχήμα 5.26** φαίνονται οι ιστοροίστες των μεμονωμένων θεμελίων σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ζεύγους βελτιωμένων ή όχι θεμελίων.





**Σχήμα 5.26:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μεμονωμένων βελτιωμένων ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες βελτιωμένου ή μη ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίου, πλάτους  $B = 5$  m, σε απόσταση  $D = 10$  m και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2$  g

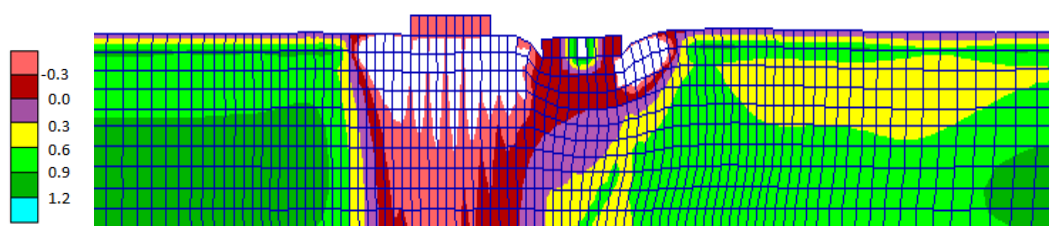


**Σχήμα 5.27:** Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφής βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις αντίστοιχες μη-βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ-βαρύ θεμελίων, πλάτους  $B = 5$  m, σε απόσταση  $D = 10$  m και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2$  g.

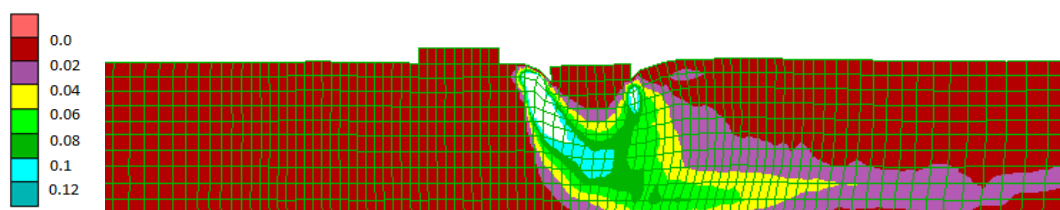
## 5.4 Απόκριση ζεύγους θεμελίων μη κοινά βελτιωμένων

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η απόκριση θεμελίων ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , υπό διαφορετικό φορτίο  $q_1 = 50 \text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200 \text{ kPa}$  (βαρύ), μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ , για διαφορετικές τιμές της μεταξύ τους απόστασης ( $D = 2.8 \text{ m}, 5 \text{ m}, 10 \text{ m}$ ) και για περιπτώσεις όπου είναι βελτιωμένο μόνο το ελαφρύ ή μόνο το βαρύ θεμέλιο. Στόχος είναι η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης του ζεύγους θεμελίων όταν το έδαφος τους είναι διαφορετικό λόγω βελτίωσης, και ο εντοπισμός των παραγόντων που την επηρεάζουν. Μέτρο σύγκρισης είναι η απόκριση των κοινά βελτιωμένων ή μη ζευγών θεμελίων ώστε να εξεταστεί αν εξαρτάται η αποδοτικότητα της βελτίωσης από τη μη-βελτίωση του γειτονικού θεμελίου. Στα διαγράμματα χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης ξεχωριστά των ελαφρών και βαρών θεμελίων από όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις.

Στο **Σχήμα 5.28 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της δόνησης για απόσταση ζεύγους θεμελίων  $D = 2.8 \text{ m}$ , υπό φορτία  $q_1 = 50 \text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200 \text{ kPa}$  (βαρύ), όπου είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων μόνο το ελαφρύ (αριστερό) θεμέλιο.

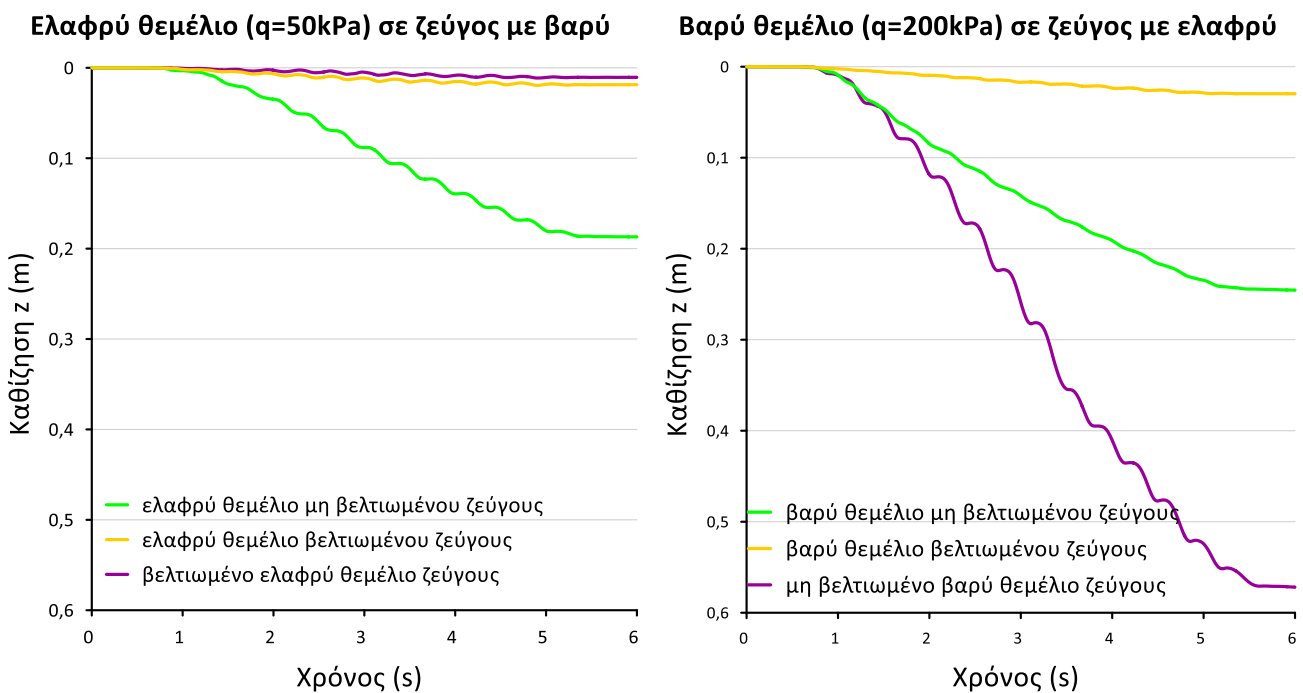


**Σχήμα 5.28.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5 \text{ m}$  σε απόσταση  $D=2.8 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων μόνο στο ελαφρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2 \text{ g}$ .

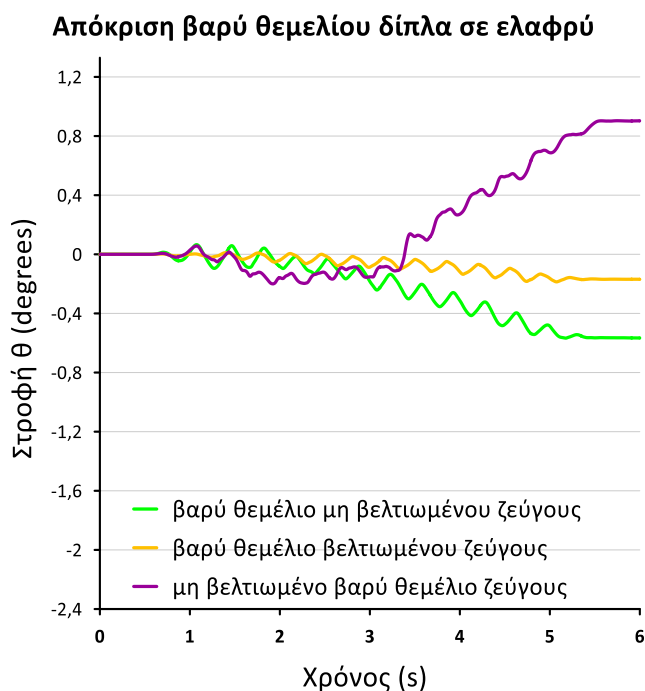
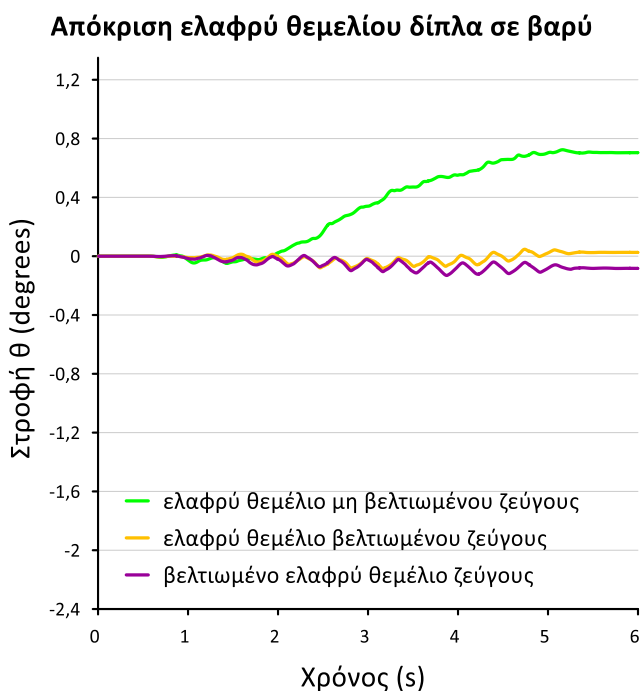


**Σχήμα 5.28.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5 \text{ m}$  σε απόσταση  $D=2.8 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση μόνο στο ελαφρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2 \text{ g}$ .

Από την έντονη ασυμμετρία στις ισοκαμπύλες φαίνεται η μεγάλη επιρροή που έχει η βελτίωση του ελαφρύ αριστερού θεμελίου στο μη βελτιωμένο βαρύ δεξί θεμέλιο όταν η απόστασή τους είναι  $D = 2.8 \text{ m}$  (μικρή). Το βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο αναπτύσσει πολύ μικρές υπερπιέσεις σε όλο το πάχος της στρώσης όπως όταν είναι σε βελτιωμένο ζεύγος. Μάλιστα αναπτύσσει έντονες αρνητικές υπερπιέσεις λόγω της διαστολικότητας των χαλίκων, ενισχύοντας την στιβαρότητα του εδάφους αρκετά εκτός της έκτασης των χαλικοπασσάλων. Η μείωση των υπερπιέσεων που προκαλούν οι χαλικοπάσσαλοι φαίνεται να επηρεάζουν και μέρος του βαρύ θεμελίου, προκαλώντας όμως πολύ έντονη ασυμμετρία στον μηχανισμό αστοχίας. Επίσης οι υπερπιέσεις πόρων στο μη βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο, αυξάνονται με το βάθος, ενώ μάλιστα μέρος της εδαφικής στρώσης έχει ρευστοποιηθεί όπως στην περίπτωση του μη βελτιωμένου ζεύγους. Για το βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο η αλληλεπίδραση είναι ευμενής, καθώς η καθίζηση είναι  $z = 0.1 \text{ cm}$ , αντί για  $z = 1.9 \text{ cm}$  που είχε στο βελτιωμένο ζεύγος και  $z = 18.7 \text{ cm}$  που είχε στο μη-βελτιωμένο ζεύγος. Αντίθετα, για το βαρύ μη βελτιωμένο η αλληλεπίδραση είναι έντονα δυσμενής, καθώς η καθίζηση γίνεται  $z = 57 \text{ cm}$ , αντί για  $z = 24.6 \text{ cm}$  που είχε στο μη βελτιωμένο ζεύγος ή και  $z = 3 \text{ cm}$  που είχε όταν και τα δύο θεμέλια βελτιωθούν. Άρα, σε κάθε περίπτωση, το βελτιωμένο ελαφρύ έχει ευμενή αλληλεπίδραση ανεξάρτητα από την βελτίωση ή όχι του βαρύ θεμελίου. Ως προς τις στροφές, το βελτιωμένο ελαφρύ φαίνεται να παρουσιάζει σχεδόν μηδενικές στροφές ενώ το μη βελτιωμένο βαρύ αναπτύσσει συγκλίνουσα στροφή, αν βελτιωθεί το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στις χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής των **Σχημάτων 5.29** και **5.30**.

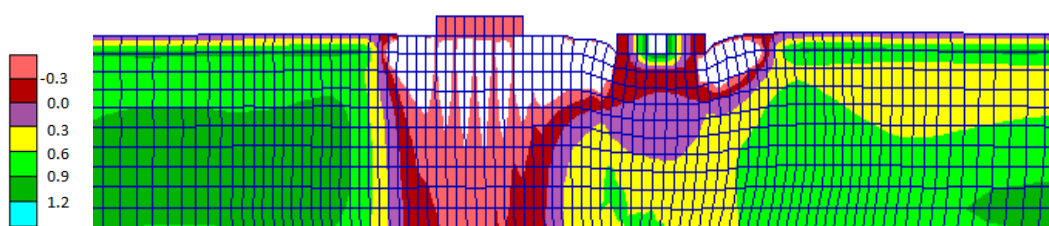


**Σχήμα 5.29:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μη βελτιωμένου και βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις καθιζήσεις ζεύγους βελτιωμένου ελαφρύ θεμελίου και μη βελτιωμένου βαρύ θεμελίου, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

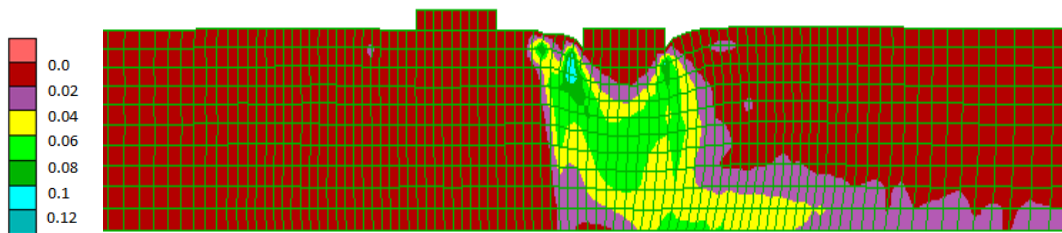


**Σχήμα 5.30:** Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφής μη βελτιωμένου και βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις στροφές ζεύγους βελτιωμένου ελαφρύ θεμελίου και μη βελτιωμένου βαρύ θεμελίου, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Στο **Σχήμα 5.31 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της δόνησης για απόσταση ζεύγους θεμελίων  $D = 5 \text{ m}$ , υπό φορτία  $q_1 = 50 \text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200 \text{ kPa}$  (βαρύ), όπου είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων μόνο το ελαφρύ (αριστερό) θεμέλιο.



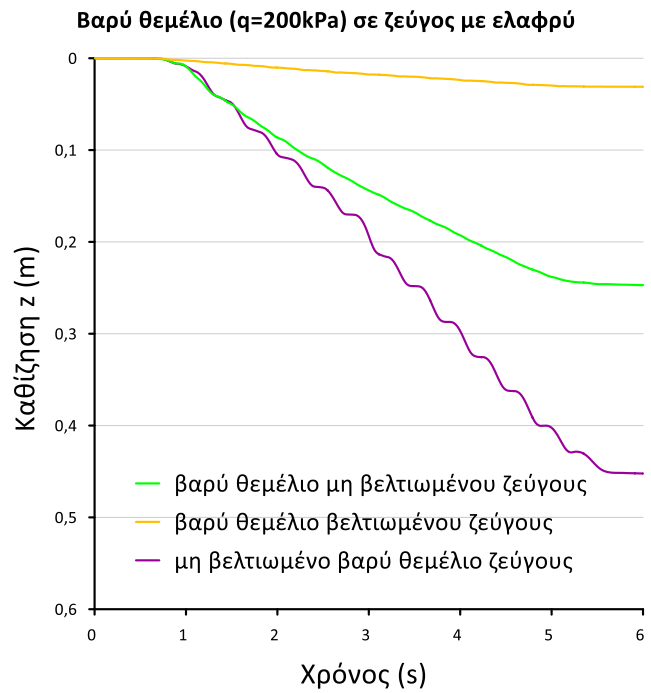
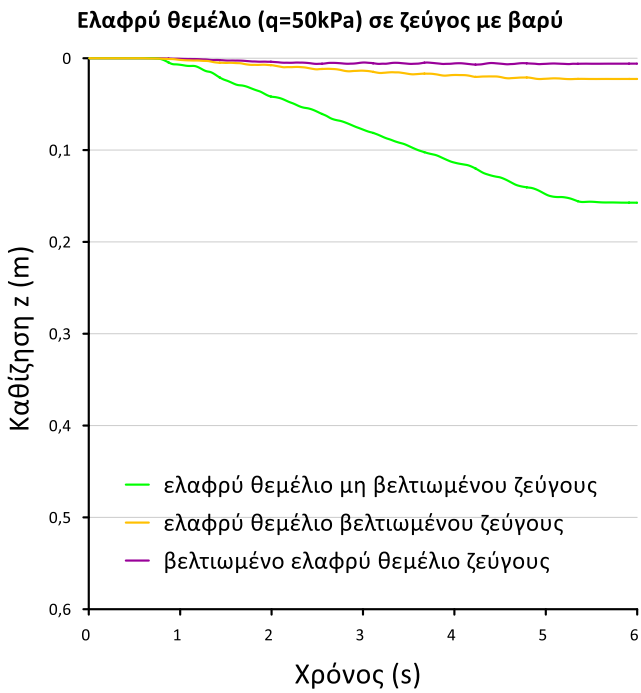
**Σχήμα 5.31.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D = 5\text{m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200\text{kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων μόνο στο ελαφρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2 \text{ g}$ .



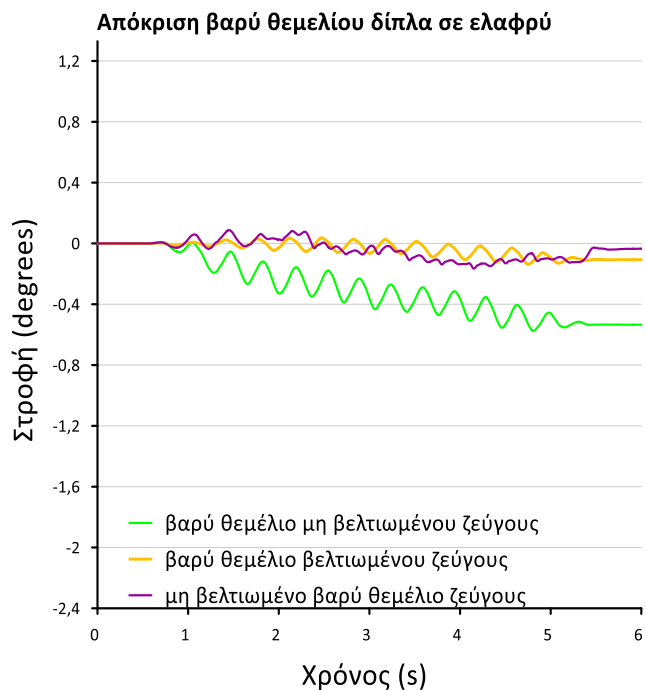
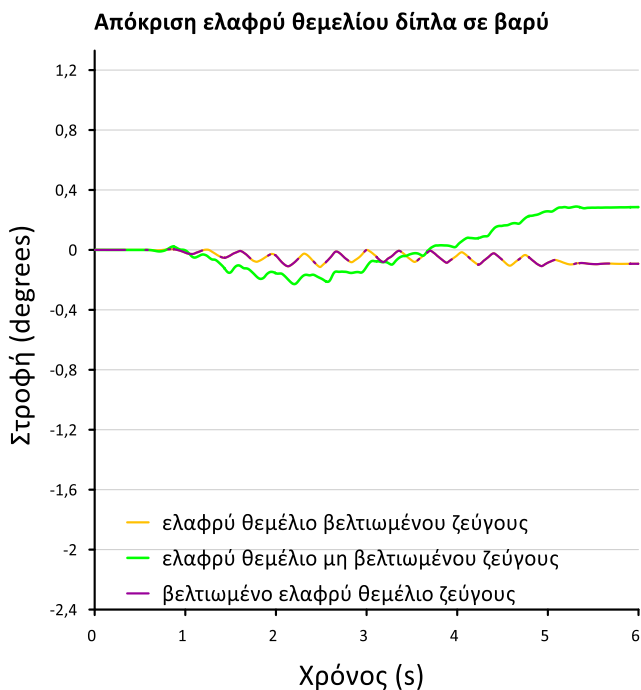
**Σχήμα 5.31.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διαμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από θεμέλια ιδίου πλάτους  $B=5\text{ m}$  σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50\text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200\text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση μόνο στο ελαφρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

Όπως και για  $D=2.78\text{ m}$  προκύπτει έντονη ασυμμετρία στις ισοκαμπύλες, που υποδηλώνει και τη σημαντική επιρροή που έχει το αριστερό βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο στο δεξί μη βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο όταν η απόστασή τους είναι  $D=5\text{ m}$ . Συγκεκριμένα, το βελτιωμένο θεμέλιο δείχνει να μην επηρεάζεται καθόλου αναπτύσσοντας μικρές υπερπιέσεις πόρων σε όλο το βάθος σαν να ήταν μεμονωμένο. Ακόμα, το μη βελτιωμένο έδαφος ανάμεσα και γύρω από τα θεμέλια, δεν ρευστοποιείται λειτουργώντας σχεδόν σαν βελτιωμένο. Αντίθετα, το μη βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη του γειτονικού βελτιωμένου ελαφρύ, αλλά λιγότερο απ' ό,τι για  $D=2.8\text{ m}$ . Για παράδειγμα, προκύπτει και πάλι μη συμμετρικός μηχανισμός αστοχίας του μη βελτιωμένου βαρύ θεμελίου, αλλά όχι τόσο εμπεδωμένος σε σχέση με ό,τι προκύπτει για  $D=2.8\text{ m}$ .

Με βάση το **Σχήμα 5.32**, η μέγιστη καθίζηση του βελτιωμένου ελαφρύ θεμελίου είναι μόλις  $z=0.7\text{ cm}$ , αντί για  $z=2.2\text{ cm}$  που είχε στο βελτιωμένο ζεύγος ή  $z=15.7\text{ cm}$  που θα είχε αν έμενε μη-βελτιωμένο. Αντίθετα, για το μη βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο η καθίζηση είναι  $z=24.7\text{ cm}$  όπως είχε και στο μη βελτιωμένο ζεύγος ή τη μόλις  $z=3.1\text{ cm}$  που θα είχε αν είχε βελτιωθεί. Συνεπώς, προκύπτει ευμενής αλληλεπίδραση για το βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο ενώ το μη βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο φαίνεται να μην επηρεάζεται από την βελτίωση του γειτονικού ελαφρύ. Πάντως, λόγω της αυξημένης πλέον απόστασης ( $D=5\text{ m}$ ), φαίνεται πως στο η αλληλεπίδραση δεν είναι πολύ έντονη, και η απόκριση τους ομοιάζει προς εκείνη αν ήταν μεμονωμένα βελτιωμένα ή όχι αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση, η παρουσία του ελαφρύ θεμελίου όταν είναι βελτιωμένο φαίνεται πως δυσχεραίνει το βαρύ μη βελτιωμένο γειτονικό θεμέλιο.

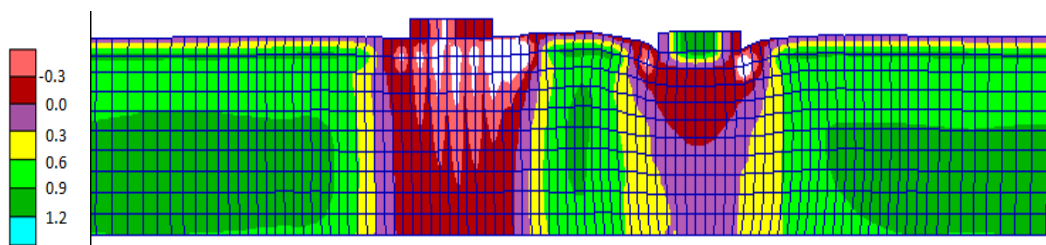


**Σχήμα 5.32:** Σύγκριση ιστοριών καθίζησης μη βελτιωμένου και βελτιωμένου ζεύγους ελαφρού και βαρού θεμελίου, με τις καθιζήσεις ζεύγους βελτιωμένου ελαφρού θεμελίου και μη βελτιωμένου βαρού θεμελίου, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$

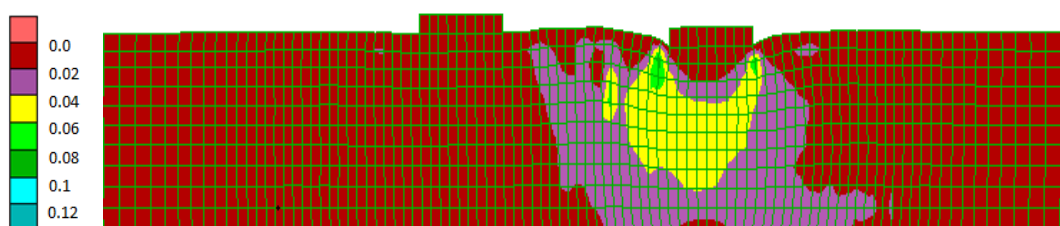


**Σχήμα 5.33:** Σύγκριση ιστοριών στροφής μη βελτιωμένου και βελτιωμένου ζεύγους ελαφρού και βαρού θεμελίου, με τις στροφές ζεύγους βελτιωμένου ελαφρού θεμελίου και μη βελτιωμένου βαρού θεμελίου, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Στο **Σχήμα 5.34 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της δόνησης για απόσταση ζεύγους θεμελίων  $D = 10$  m, υπό φορτία  $q_1 = 50$  kPa (ελαφρύ) και  $q_2 = 200$  kPa (βαρύ), όπου είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων μόνο το ελαφρύ (αριστερό) θεμέλιο.

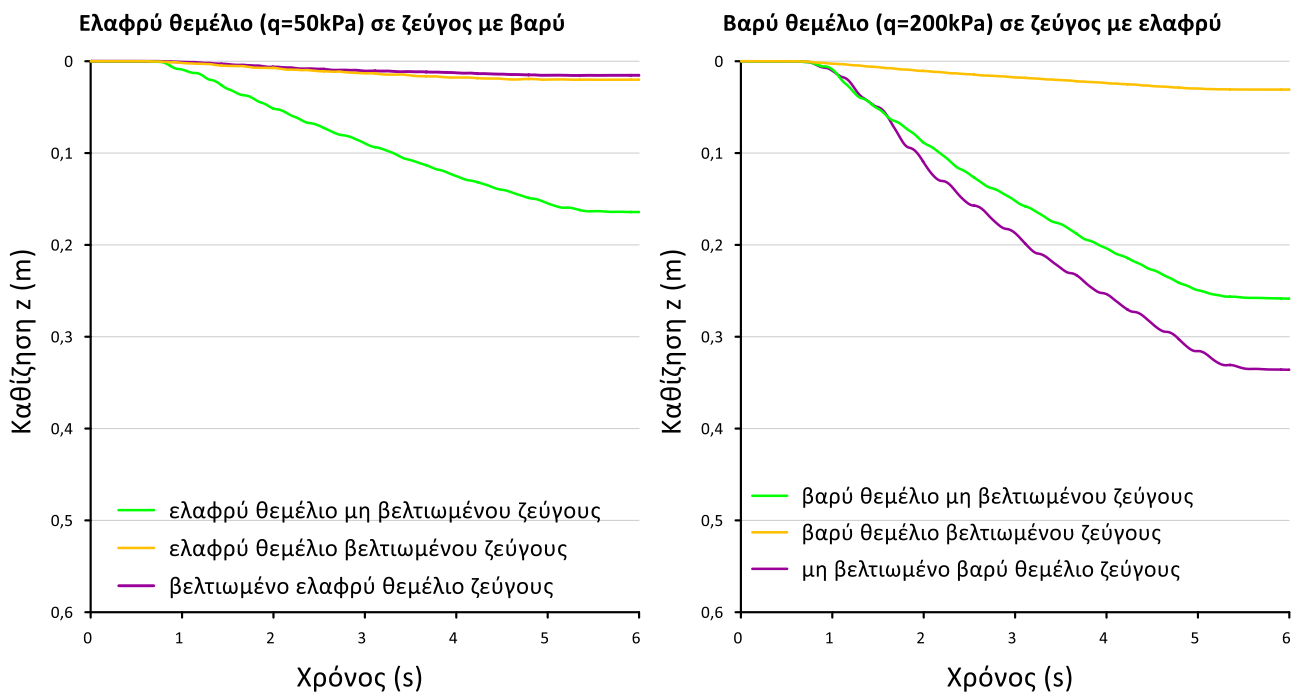


**Σχήμα 5.34.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5$  m σε απόσταση  $D=10$  m, διαφορετικού φορτίου με  $q=50$  kPa αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200$  kPa δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων μόνο στο ελαφρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2$  g.

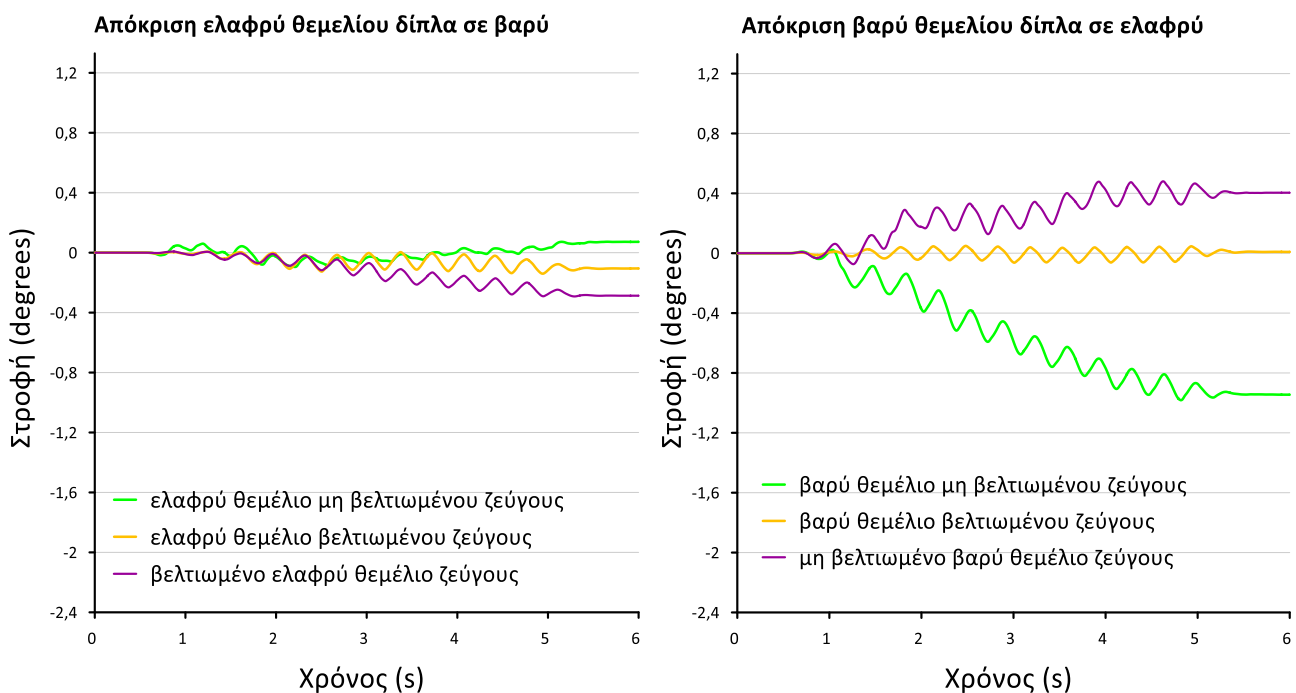


**Σχήμα 5.34.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5$  m σε απόσταση  $D=10$  m, διαφορετικού φορτίου με  $q=50$  kPa αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200$  kPa δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων μόνο στο ελαφρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2$  g.

Σε μεγάλη απόσταση  $D = 10$  m, προκύπτει πως το έδαφος ανάμεσα στα θεμέλια ρευστοποιείται όπως και στο ελεύθερο πεδίο σε αντίθεση με τις περιπτώσεις αποστάσεων  $D = 2.8$  m ή  $D = 5$  m. Παρόλα αυτά, ακόμα υπάρχει αλληλεπίδραση και φαίνεται πως για το μη βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο, οι υπερπιέσεις πόρων κάτω από το θεμέλιο είναι σχετικά ομοιόμορφες με το βάθος (σε αντίθεση με το ζεύγος βελτιωμένων θεμελίων), αλλά και για περίπου 3 μέτρα εκατέρωθεν αυτού, αποτρέποντας την ρευστοποίηση. Ο μηχανισμός αστοχίας είναι σχετικά συμμετρικός αλλά λιγότερο εμπεδωμένος σε σχέση με την περίπτωση  $D = 5$  m. Το βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο δεν επηρεάζεται από το γειτονικό του, αναπτύσσοντας έντονες αρνητικές υπερπιέσεις λόγω διαστολικότητας κοντά στην επιφάνεια και προς το βαρύ μη βελτιωμένο θεμέλιο. Με βάση το **Σχήμα 5.35**, η μέγιστη καθίζηση του ελαφρύ βελτιωμένου θεμελίου είναι μόλις  $z = 1.5$  cm, αντί για  $z = 2$  cm σε περίπτωση κοινής βελτίωσης και  $z = 16.4$  cm αν το ζεύγος θεμελίων έμενε μη-βελτιωμένο. Αντίθετα, για το βαρύ μη βελτιωμένο θεμέλιο η καθίζηση είναι  $z = 25$  cm, αντί για  $z = 25.8$  cm που θα είχε αν έμεναν και τα δύο θεμέλια μη-βελτιωμένα ή  $z = 3$  cm αν βελτιώνονταν και τα δύο.



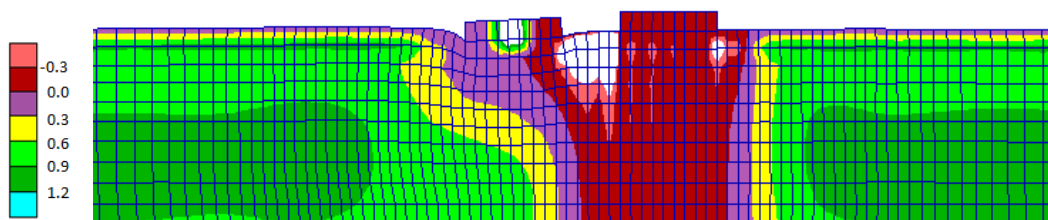
**Σχήμα 5.35:** Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης μη βελτιωμένου και βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις καθιζήσεις ζεύγους βελτιωμένου ελαφρύ θεμελίου και μη βελτιωμένου βαρύ θεμελίου, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 10 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$



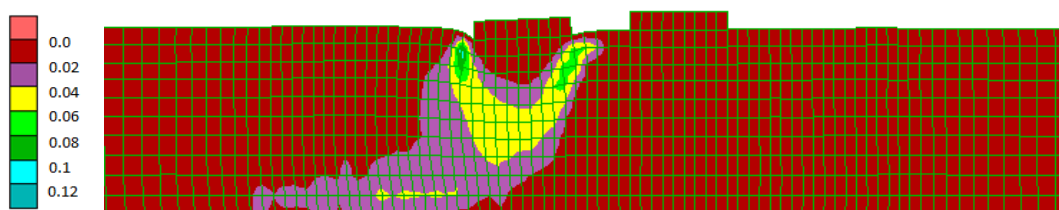
**Σχήμα 5.36:** Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφής μη βελτιωμένου και βελτιωμένου ζεύγους ελαφρύ και βαρύ θεμελίων, με τις στροφές ζεύγους βελτιωμένου ελαφρύ θεμελίου και μη βελτιωμένου βαρύ θεμελίου, πλάτους  $B = 5 \text{ m}$ , σε απόσταση  $D = 10 \text{ m}$  και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$



Στη συνέχεια διερευνάται το αντίστροφο σενάριο, δηλαδή να έχει βελτιωθεί μόνο το βαρύ θεμέλιο του ζεύγους. Έτσι, στο **Σχήμα 5.37 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της δόνησης για απόσταση ζεύγους θεμελίων  $D = 2.8 \text{ m}$ , υπό φορτία  $q_1 = 50 \text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200 \text{ kPa}$  (βαρύ), όπου είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων μόνο το βαρύ (δεξί) θεμέλιο.



**Σχήμα 5.37.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$  σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων μόνο στο βαρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

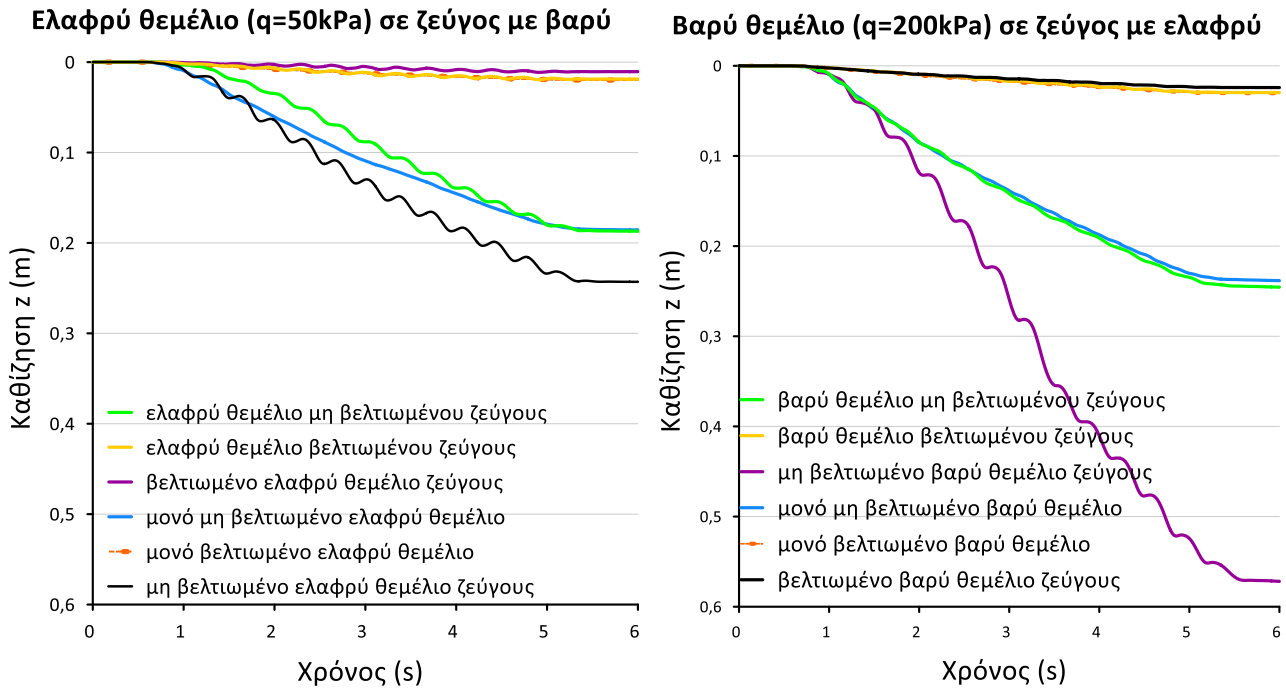


**Σχήμα 5.37.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B = 5 \text{ m}$  σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q = 50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q = 200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων μόνο στο βαρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Προκύπτει και πάλι έντονη ασυμμετρία στις ισοκαμπύλες  $r_u$  και  $\gamma$  που υποδηλώνει σημαντική επιρροή του δεξί βαρύ βελτιωμένου θεμελίου στο αριστερό ελαφρύ μη βελτιωμένο θεμέλιο, όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι  $D = 2.8 \text{ m}$ . Οι υπερπίεσεις πόρων του ελαφρύ μη βελτιωμένου θεμελίου είναι σχετικά σταθερές με το βάθος σε αντίθεση με την περίπτωση του ελαφρύ θεμελίου είτε σε ζεύγος (βελτιωμένο και μη) ή μεμονωμένο. Το βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο δείχνει να μην επηρεάζεται από το μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο παρά την μικρή απόσταση, καθώς έχει μηδενικές παραμορφώσεις και οι υπερπίεσεις που αναπτύσσονται κάτω από αυτό είναι όπως και στην περίπτωση που είναι μεμονωμένο βελτιωμένο. Αντίθετα, το μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο, επηρεάζεται από την παρουσία των χαλικοπασσάλων στο γειτονικό βαρύ θεμέλιο αναπτύσσοντας μη συμμετρικό μηχανισμό αστοχίας.

Αυτές οι επιδράσεις ποσοτικοποιούνται στο **Σχήμα 5.38**, όπου παρουσιάζονται μαζί όλες οι χρονοϊστορίες καθίζησης των θεμελίων σε απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$  σε συνδυασμό ελαφρύ-βαρύ, για όλους τους συνδυασμούς βελτίωσης ή μη που εξετάστηκαν. Αρχικώς προκύπτει ότι το μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο έχει καθίζηση  $z = 20.9 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 18.7 \text{ cm}$  που έχει σε μη βελτιωμένο ζεύγος) και το βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο έχει καθίζηση  $z = 2.5 \text{ cm}$

(αντί για  $z = 5.8$  cm που έχει σε βελτιωμένο ζεύγος), καθιστώντας την αλληλεπίδραση ευμενής για το βαρύ βελτιωμένο και ελαφρώς δυσμενής για το ελαφρύ μη βελτιωμένο.



**Σχήμα 5.38:** Σύγκριση καθιζήσεων ελαφρύ  $q = 50$  kPa (α) και βαρύ  $q = 200$  kPa (β) θεμελίου πλάτους  $B = 5$  m, όταν είναι μεμονωμένα ή σε ζεύγος με ανισοβαρές θεμέλιο σε απόσταση  $D = 2.8$  m, όταν το ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένα με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων, όλα υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max} = 0.2$  g.

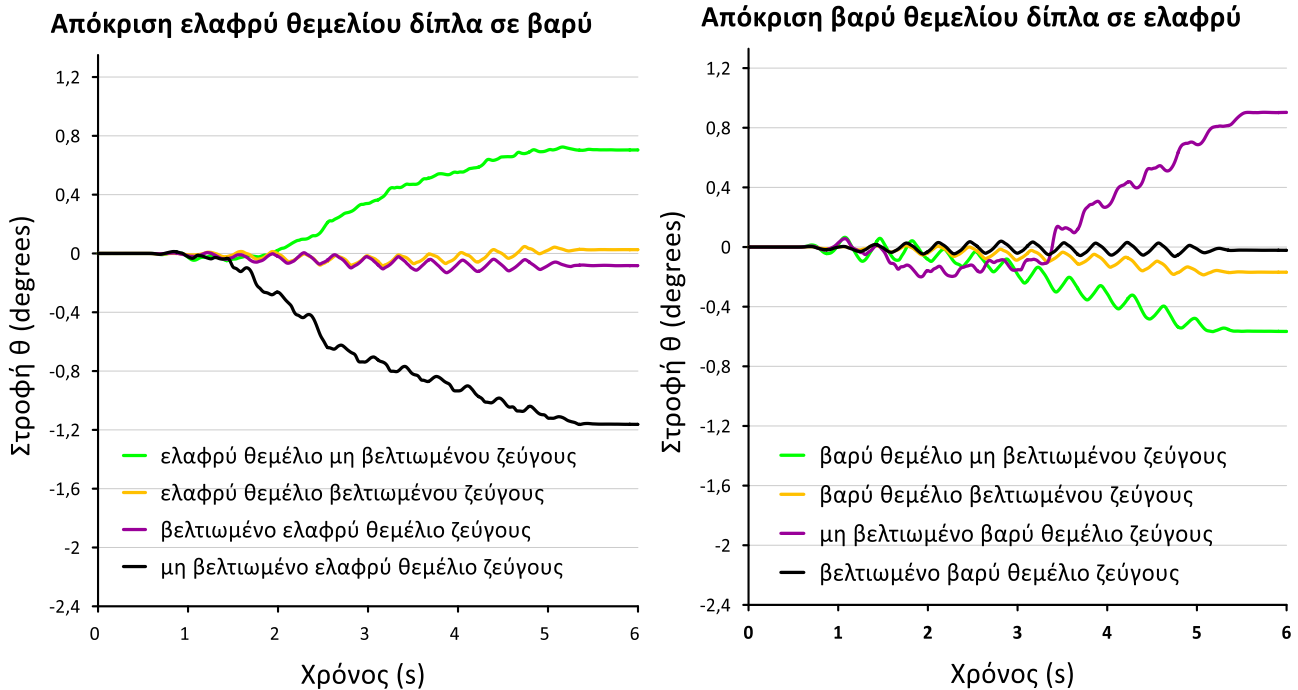
Πιο γενικά, για την καθίζηση του ελαφρύ θεμελίου σε απόσταση  $D = 2.8$  m από ένα βαρύ, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- αν το ελαφρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο, έχει ίδια καθίζηση είτε είναι μεμονωμένο είτε υπάρχει γειτονικό μη βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο, ενώ αν βελτιωθεί το γειτονικό βαρύ θεμέλιο η καθίζησή του αυξάνει (κατά 25%).
- αν βελτιωθεί το ελαφρύ θεμέλιο, μειώνεται σημαντικά η καθίζησή του (κατά 90% περίπου) είτε το γειτονικό βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί είτε όχι, αλλά η καθίζηση ελαχιστοποιείται όταν το βαρύ θεμέλιο μείνει μη βελτιωμένο.

Αντίστοιχα, για την καθίζηση του βαρύ θεμελίου σε απόσταση  $D = 2.8$  m από ένα ελαφρύ, προκύπτει:

- αν το βαρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο, έχει ίδια καθίζηση είτε είναι μεμονωμένο είτε υπάρχει γειτονικό μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο, ενώ αν βελτιωθεί το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο η καθίζησή του αυξάνει σημαντικά (90%)

- αν το βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί, μειώνεται σημαντικά η καθίζησή του είτε το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο βελτιωθεί είτε όχι (κατά 90% περίπου)



**Σχήμα 5.39:** Σύγκριση στροφών ελαφρύ  $q=50$  kPa (α) και βαρύ  $q=200$  kPa (β) θεμελίων πλάτους  $B=5$  m, όταν είναι σε ζεύγος με ανισοβαρές θεμέλιο σε απόσταση  $D=2.8$  m, όταν το ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένα με πυκνό κάναβο χαλικοपाσσάλων, όλα υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2g$ .

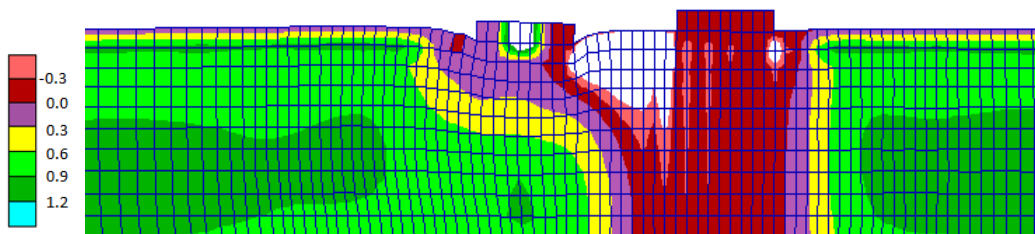
Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.39** παρουσιάζονται μαζί όλες οι χρονοϊστορίες στροφής των θεμελίων σε απόσταση  $D = 2.8$  m σε συνδυασμό ελαφρύ-βαρύ, για όλους τους συνδυασμούς βελτίωσης ή μη που εξετάστηκαν. Σε ό,τι αφορά στη στροφή του ελαφρύ θεμελίου συμπεραίνεται πως για απόσταση  $D = 2.8$  m από το γειτονικό βαρύ θεμέλιο, προκύπτει ότι:

- αν το ελαφρύ θεμέλιο βελτιωθεί έχει πρακτικώς μηδενικές στροφές, ανεξάρτητα από το αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο είναι βελτιωμένο ή όχι
- αν το ελαφρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο έχει συγκλίνουσα στροφή αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο δεν έχει βελτιωθεί, ενώ γίνεται αποκλίνουσα αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί.

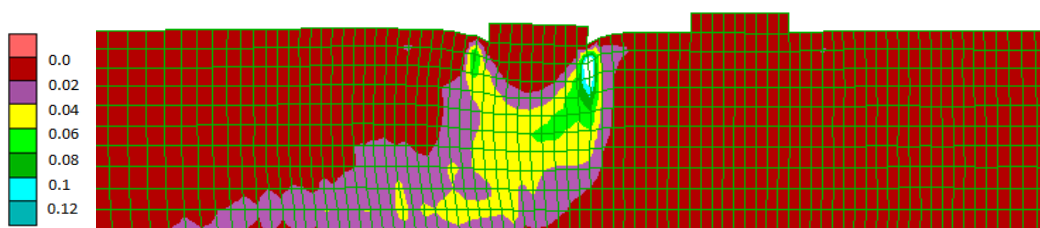
Ομοίως, σε ό,τι αφορά στη στροφή του βαρύ θεμελίου συμπεραίνεται πως για απόσταση  $D = 2.8$  m από το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο, προκύπτει ότι:

- αν το βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί έχει πρακτικώς μηδενικές στροφές, ανεξάρτητα από το αν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο είναι βελτιωμένο ή όχι
- αν το βαρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο έχει αποκλίνουσα στροφή αν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο δεν έχει βελτιωθεί, ενώ γίνεται συγκλίνουσα αν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο βελτιωθεί

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.40 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της δόνησης για απόσταση ζεύγους θεμελίων  $D = 5 \text{ m}$ , υπό φορτία  $q_1 = 50 \text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200 \text{ kPa}$  (βαρύ), όπου είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων μόνο το βαρύ (δεξί) θεμέλιο.



**Σχήμα 5.40.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5 \text{ m}$  σε απόσταση  $D=5 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων μόνο στο βαρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2 \text{ g}$ .

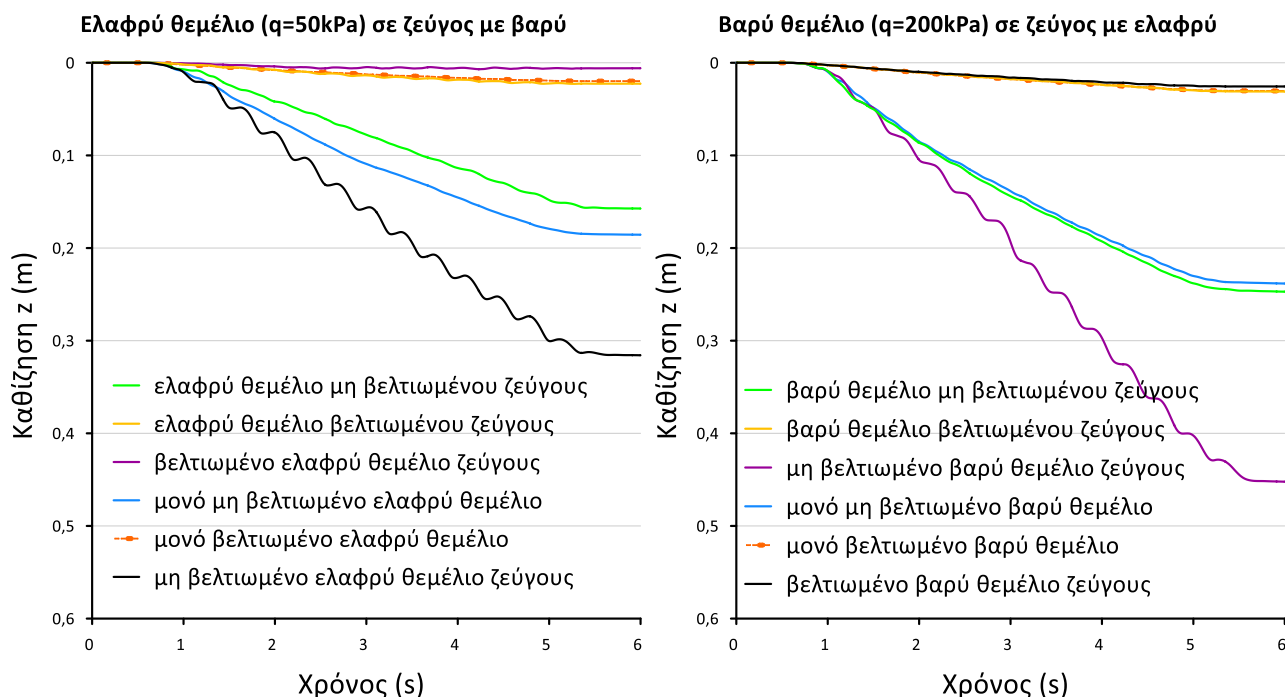


**Σχήμα 5.40.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5 \text{ m}$  σε απόσταση  $D=5 \text{ m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50 \text{ kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200 \text{ kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού καννάβου χαλικοπασσάλων μόνο στο βαρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2 \text{ g}$ .

Αντίστοιχα με ό,τι παρατηρείται για απόσταση  $D = 2.8 \text{ m}$ , και για  $D = 5 \text{ m}$  όταν το βαρύ θεμέλιο είναι βελτιωμένο, ενώ το ελαφρύ όχι, προκύπτει έντονη ασυμμετρία στις ισοκαμπύλες  $r_u$  και  $\gamma$  επιβεβαιώνοντας την επιρροή της βελτίωσης του ενός θεμελίου του ζεύγους στη συνολική απόκριση. Και πάλι, το βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο δεν επηρεάζεται από το μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο, αναπτύσσοντας σταθερές με το βάθος υπερπίεσεις πόρων, ανάλογες με το όταν είναι μεμονωμένο. Βέβαια, ο μηχανισμός αστοχίας του ελαφρύ μη βελτιωμένου είναι έντονα μη συμμετρικός, και περισσότερο έντονος από ότι για  $D = 2.8 \text{ m}$ , ενώ το βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο έχει πρακτικώς μηδενικές παραμορφώσεις στο έδαφος του. Επίσης από το **Σχήμα 5.40.α** προκύπτει πως ακόμα και το μη βελτιωμένο έδαφος ανάμεσα στα θεμέλια δεν ρευστοποιείται, όπως ακριβώς συμβαίνει και για  $D = 2.8 \text{ m}$ .

Αυτές οι επιδράσεις ποσοτικοποιούνται στο **Σχήμα 5.41**, όπου παρουσιάζονται μαζί όλες οι χρονοϊστορίες καθίζησης των θεμελίων σε απόσταση  $D = 5 \text{ m}$  σε συνδυασμό ελαφρύ-βαρύ, για όλους τους συνδυασμούς βελτίωσης ή μη που εξετάστηκαν. Αρχικώς προκύπτει ότι το μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο έχει καθίζηση  $z = 31.5 \text{ cm}$  (αντί για  $z = 15.7 \text{ cm}$  που έχει σε μη βελτιωμένο ζεύγος) και το βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο έχει καθίζηση  $z = 2.5 \text{ cm}$  (αντί για  $z =$

3.1 cm που έχει σε βελτιωμένο ζεύγος), καθιστώντας την αλληλεπίδραση ευμενή για το βαρύ βελτιωμένο και δυσμενή για το ελαφρύ μη βελτιωμένο.



**Σχήμα 5.41:** Σύγκριση καθιζήσεων ελαφρύ  $q=50\text{ kPa}$  (α) και βαρύ  $q=200\text{ kPa}$  (β) θεμελίων πλάτους  $B=5\text{ m}$ , όταν είναι μεμονωμένα ή σε ζεύγος με ανισοβαρές θεμέλιο σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , όταν το ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένα με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων, όλα υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

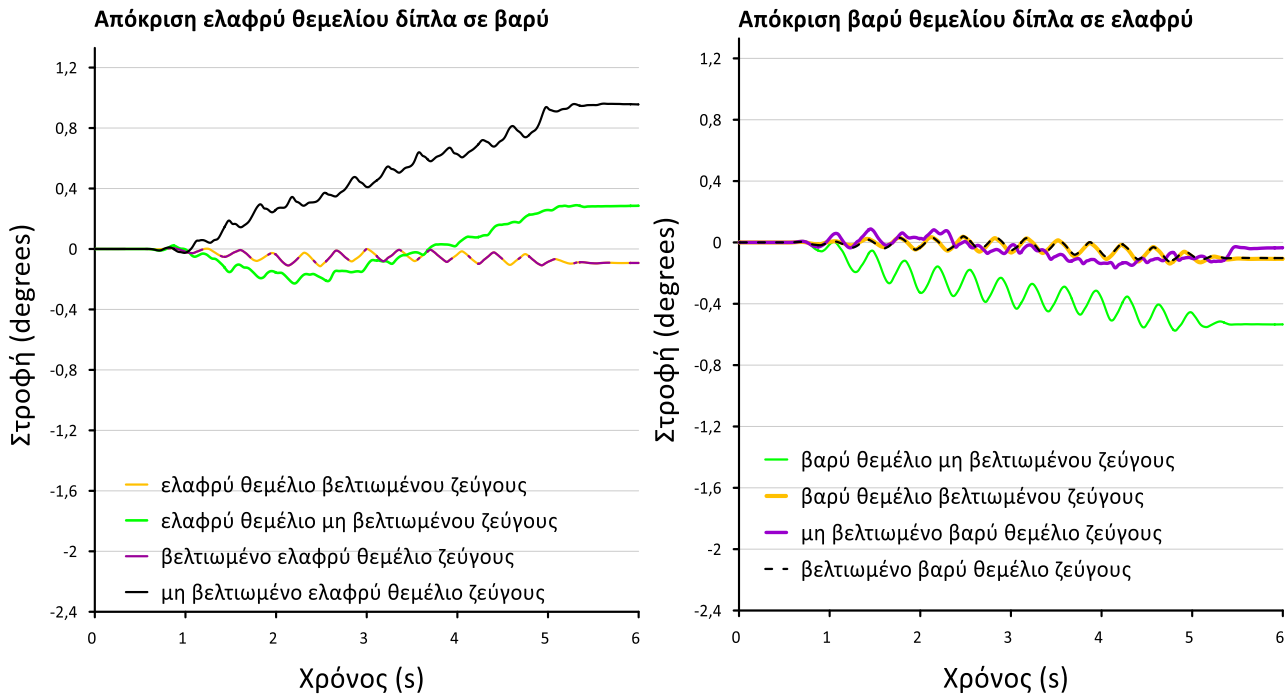
Πιο γενικά, για την καθίζηση του ελαφρύ θεμελίου σε απόσταση  $D=5\text{ m}$  από ένα βαρύ, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- για μη βελτιωμένο έδαφος, η αλληλεπίδραση είναι ευμενής για το ελαφρύ θεμέλιο (κατά 15%), αλλά αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί τότε η ως άνω ευμένεια εξαφανίζεται καθώς η καθίζησή του αυξάνει ελαφρώς (κατά 50%).
- αν βελτιωθεί το ελαφρύ θεμέλιο, μειώνεται σημαντικά η καθίζησή του, με την τιμή αυτής να είναι συγκριτικά μεγαλύτερη αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί και συγκριτικά μικρότερη όταν το βαρύ θεμέλιο μείνει μη βελτιωμένο.

Αντίστοιχα, για την καθίζηση του βαρύ θεμελίου σε απόσταση  $D=5\text{ m}$  συμπεραίνεται πως:

- αν το βαρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο, έχει ίδια καθίζηση είτε είναι μεμονωμένο είτε υπάρχει γειτονικό μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο, ενώ αν βελτιωθεί το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο η καθίζησή του αυξάνει αρκετά (κατά 80% περίπου)

- αν το βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί, μειώνεται σημαντικά η καθίζησή του είτε το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο βελτιωθεί είτε όχι, αλλά η καθίζηση ελαχιστοποιείται όταν το ελαφρύ θεμέλιο μείνει μη βελτιωμένο.



**Σχήμα 5.42:** Σύγκριση στροφών ελαφρύ  $q=50\text{ kPa}$  ( $\alpha$ ) και βαρύ  $q=200\text{ kPa}$  ( $\beta$ ) θεμελίων πλάτους  $B=5\text{ m}$ , όταν είναι σε ζεύγος με ανισοβαρές θεμέλιο σε απόσταση  $D=5\text{ m}$ , όταν το ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένα με πυκνό κάναβο χαλικοपाσσάλων, όλα υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2\text{ g}$ .

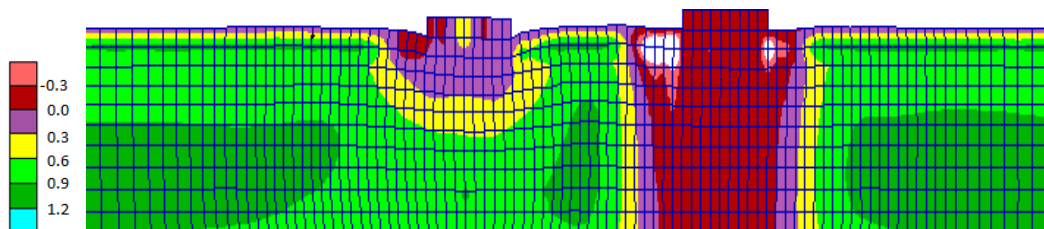
Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.42** παρουσιάζονται μαζί όλες οι χρονοϊστορίες στροφής των θεμελίων σε απόσταση  $D=5\text{ m}$  σε συνδυασμό ελαφρύ-βαρύ, για όλους τους συνδυασμούς βελτίωσης ή μη που εξετάστηκαν. Σε ό,τι αφορά στη στροφή του ελαφρύ θεμελίου συμπεραίνεται πως:

- αν το ελαφρύ θεμέλιο βελτιωθεί έχει πρακτικώς μηδενικές στροφές, ανεξάρτητα από το αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο είναι βελτιωμένο ή όχι
- αν το ελαφρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο έχει συγκλίνουσα στροφή αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί, ενώ έχει ελαφρώς αποκλίνουσα στροφή αν το γειτονικό βαρύ δεν έχει βελτιωθεί

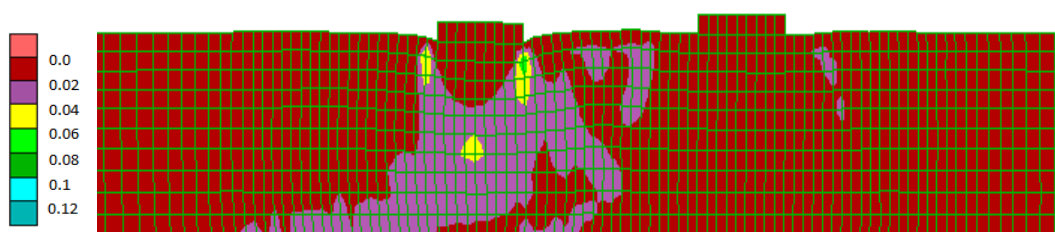
Ομοίως, σε ό,τι αφορά στη στροφή του βαρύ θεμελίου συμπεραίνεται πως για απόσταση  $D=5\text{ m}$  από το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο, προκύπτει ότι:

- αν το βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί έχει πρακτικώς μηδενικές στροφές, ανεξάρτητα από το αν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο είναι βελτιωμένο ή όχι
- αν το βαρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο έχει αποκλίνουσα στροφή αν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο παραμείνει μη βελτιωμένο

Στο **Σχήμα 5.43 (α,β)** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσης πόρων  $r_u$  και των παραμορφώσεων  $\gamma$  στο τέλος της δόνησης για απόσταση ζεύγους θεμελίων  $D = 10\text{ m}$ , υπό φορτία  $q_1 = 50\text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200\text{ kPa}$  (βαρύ), όπου είναι βελτιωμένο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων μόνο το βαρύ (δεξί) θεμέλιο.



**Σχήμα 5.43.α:** Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων  $r_u$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , σε απόσταση  $D=10\text{m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50\text{kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200\text{kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων μόνο στο βαρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

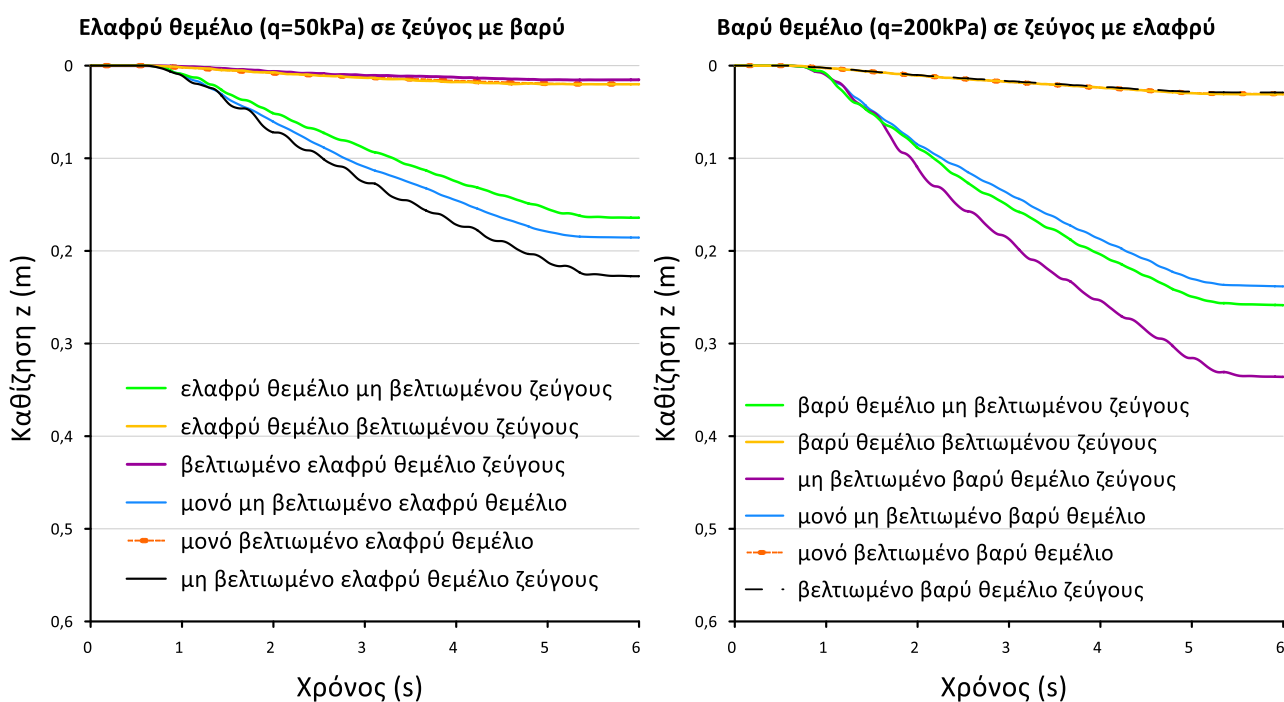


**Σχήμα 5.43.β:** Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  κάτω από θεμέλια ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$  σε απόσταση  $D=10\text{m}$ , διαφορετικού φορτίου με  $q=50\text{kPa}$  αριστερά (ελαφρύ) και  $q=200\text{kPa}$  δεξιά (βαρύ) και βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων μόνο στο βαρύ θεμέλιο, υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max}=0.2g$ .

Από τις ισοκαμπύλες του **Σχήματος 5.43** προκύπτει μικρή αλληλεπίδραση μεταξύ των θεμελίων, λόγω της αυξημένης απόστασης  $D = 10\text{m}$ . Επιπλέον, το έδαφος ανάμεσα στα θεμέλια ρευστοποιείται όπως στο ελεύθερο πεδίο, ενώ οι υπερπίεσεις πόρων κάτω από το μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο είναι σχεδόν όμοιες με αυτές του μεμονωμένου. Από την άλλη, το βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο έχει συμπεριφορά με αυτή του μεμονωμένου βελτιωμένου θεμελίου, με πρακτικώς μηδενικές παραμορφώσεις στο έδαφος θεμελίωσης.

Όπως και για τις άλλες διερευνηθείσες αποστάσεις θεμελίων  $D$ , αυτές οι επιδράσεις ποσοτικοποιούνται στο **Σχήμα 5.44**, όπου παρουσιάζονται μαζί όλες οι χρονοϊστορίες καθίζησης των θεμελίων σε απόσταση  $D = 10\text{ m}$  σε συνδυασμό ελαφρύ-βαρύ, για όλους τους συνδυασμούς βελτίωσης ή μη που εξετάστηκαν. Αρχικώς προκύπτει ότι το μη βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο έχει καθίζηση  $z = 22\text{ cm}$  (αντί για  $z = 16.4\text{ cm}$  που έχει σε μη βελτιωμένο ζεύγος) και το βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο έχει καθίζηση  $z = 2.8\text{ cm}$  (αντί για  $z = 3\text{ cm}$  που έχει σε βελτιωμένο ζεύγος), καθιστώντας την αλληλεπίδραση ευμενή για το βαρύ βελτιωμένο και ελαφρώς δυσμενή για το ελαφρύ μη βελτιωμένο. Οι ανωτέρω τιμές

καθιζήσεων είναι αντίστοιχες με εκείνες για απόσταση  $D = 5 \text{ m}$ , από όπου φαίνεται η ελάχιστη πλέον αλληλεπίδραση των θεμελίων.



**Σχήμα 5.44:** Σύγκριση καθιζήσεων ελαφρύ  $q= 50 \text{ kPa}$  (α) και βαρύ  $q= 200 \text{ kPa}$  (β) θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , όταν είναι μεμονωμένα ή σε ζεύγος με ανισοβαρές θεμέλιο σε απόσταση  $D = 10 \text{ m}$ , όταν το ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένα με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, όλα υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2 \text{ g}$ .

Γενικότερα, για την καθίζηση του ελαφρύ θεμελίου σε απόσταση  $D = 10 \text{ m}$  από ένα βαρύ, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- για μη βελτιωμένο έδαφος, η αλληλεπίδραση είναι ελαφρώς ευμενής για το ελαφρύ θεμέλιο (κατά 10%), αλλά αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί τότε η ως άνω ευμένεια εξαλείφεται καθώς η καθίζησή του αυξάνει ελαφρώς (κατά 25%).
- αν βελτιωθεί το ελαφρύ θεμέλιο, μειώνεται σημαντικά η καθίζησή του, ανεξάρτητα από την βελτίωση ή όχι του γειτονικού βαρύ

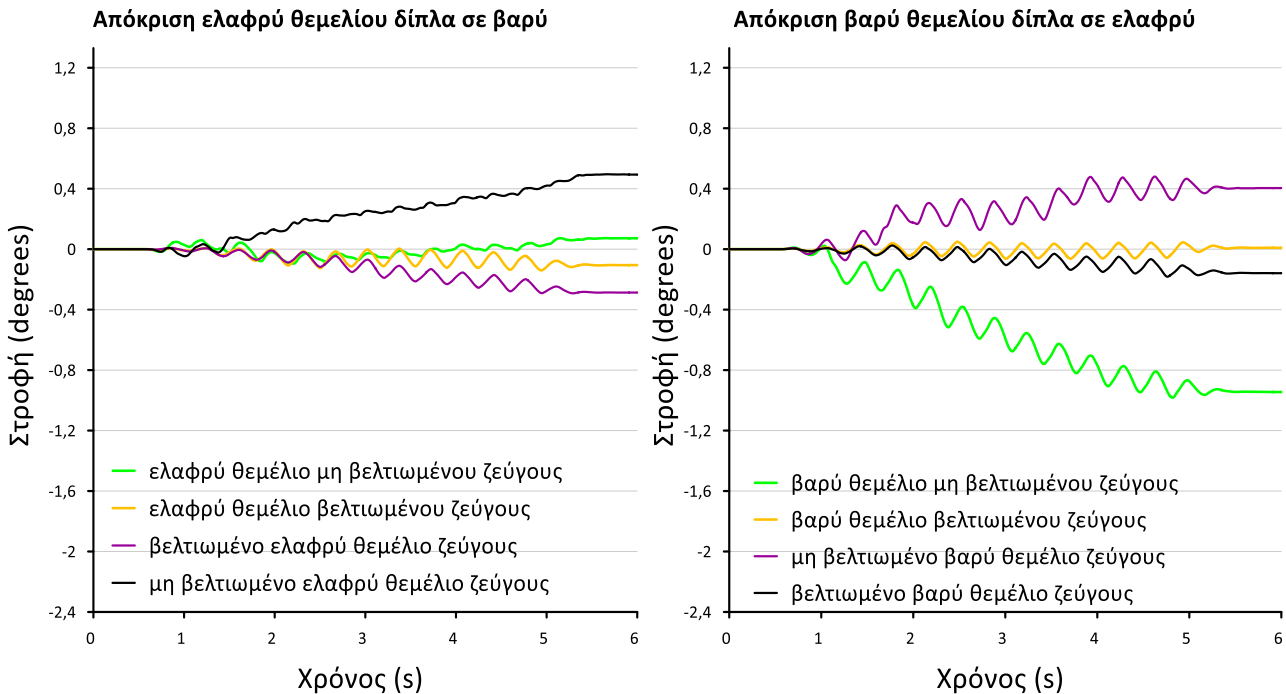
Αντίστοιχα, για την καθίζηση του βαρύ θεμελίου σε απόσταση  $D= 10 \text{ m}$  συμπεραίνεται πως:

- για μη βελτιωμένο έδαφος, η αλληλεπίδραση είναι ελαφρώς δυσμενής για το ελαφρύ θεμέλιο (κατά λιγότερο από 10%), αλλά αν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο



βελτιωθεί τότε η ως άνω δυσμένεια μεγαλώνει και η καθίζησή του αυξάνει περαιτέρω (κατά 40%).

- αν το βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί, μειώνεται σημαντικά η καθίζησή του είτε το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο βελτιωθεί είτε όχι



**Σχήμα 5.45:** Σύγκριση στροφών ελαφρύ  $q=50\text{kPa}$  (α) και βαρύ  $q=200\text{kPa}$  (β) θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , όταν είναι σε ζεύγος με ανισοβαρές θεμέλιο σε απόσταση  $D=10\text{m}$ , όταν το ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένα με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, όλα υπό μέγιστη επιτάχυνση  $a_{\text{max}} = 0.2g$ .

Τέλος, στο **Σχήμα 5.45** παρουσιάζονται μαζί όλες οι χρονοϊστορίες στροφής των θεμελίων σε απόσταση  $D = 10\text{m}$  σε συνδυασμό ελαφρύ-βαρύ, για όλους τους συνδυασμούς βελτίωσης ή μη που εξετάστηκαν. Σε ό,τι αφορά στη στροφή του ελαφρύ θεμελίου συμπεραίνεται πως:

- αν το ελαφρύ θεμέλιο βελτιωθεί έχει πρακτικώς μηδενικές στροφές, ανεξάρτητα από το αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο είναι βελτιωμένο ή όχι
- αν το ελαφρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο έχει ασήμαντη συγκλίνουσα στροφή μόνο αν το γειτονικό βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί

Ομοίως, σε ό,τι αφορά στη στροφή του βαρύ θεμελίου συμπεραίνεται πως για απόσταση  $D = 10\text{m}$  από το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο, προκύπτει ότι:

- αν το βαρύ θεμέλιο βελτιωθεί έχει πρακτικώς μηδενικές στροφές, ανεξάρτητα από το αν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο είναι βελτιωμένο ή όχι

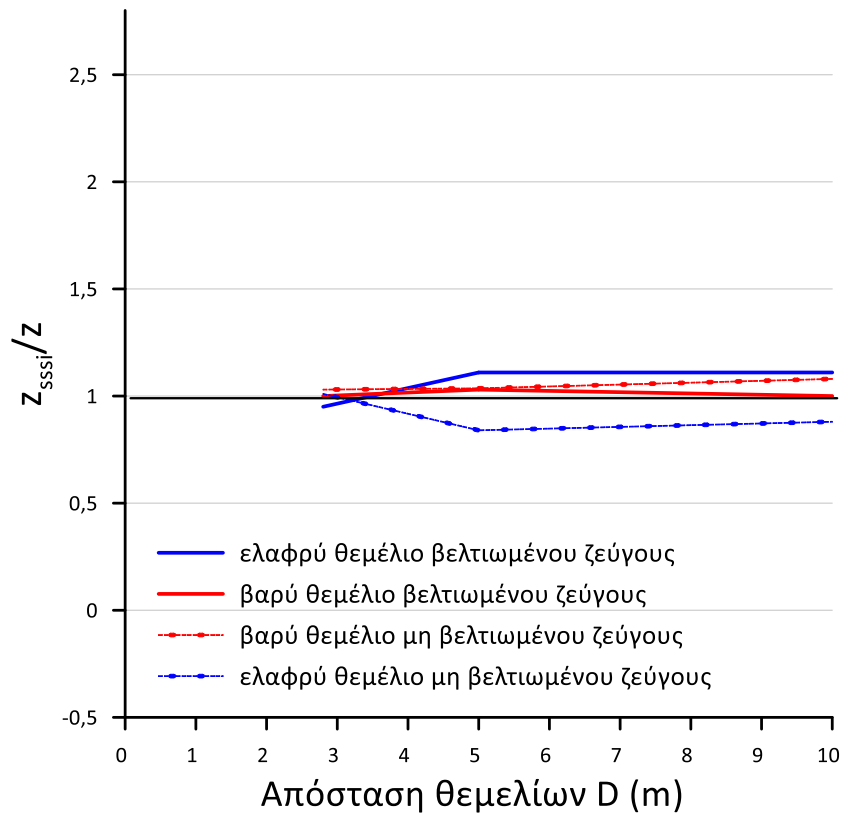
- αν το βαρύ θεμέλιο είναι μη βελτιωμένο έχει αποκλίνουσα στροφή όταν το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο παραμένει μη βελτιωμένο, αλλά συγκλίνουσα στην αντίθετη περίπτωση.

## 5.5 Σύνοψη απόκρισης ζεύγους θεμελίων διαφορετικού φορτίου

Στόχος των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους δεν είναι η ποσοτική ακρίβεια, αλλά η ερμηνεία μηχανισμών και η κατά το δυνατόν ποιοτική γενίκευσή τους για όλες τις περιπτώσεις γειτονικών θεμελιολωρίδων, με και χωρίς κάρναβο χαλικοπασσάλων. Για την διευκόλυνση αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιείται ο λόγος καθιζήσεων  $z_{\text{sssi}}/z$ , όπου  $z_{\text{sssi}}$  είναι η καθίζηση θεμελίου ζεύγους ελαφρύ-βαρύ και  $z$  είναι η καθίζηση του αντίστοιχου μεμονωμένου θεμελίου. Όπως γίνεται αντιληπτό τιμές του  $z_{\text{sssi}}/z > 1$  δείχνουν δυσμενή αλληλεπίδραση, ενώ τιμές  $z_{\text{sssi}}/z < 1$  δείχνουν ευμενή αλληλεπίδραση. Όλες οι περιπτώσεις αφορούν ζεύγος θεμελίων ίδιου πλάτους  $B=5\text{m}$ , με φορτία  $q_1 = 50 \text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2 = 200 \text{ kPa}$  (βαρύ) υπό αρμονική διέγερση με  $a_{\text{max}} = 0.2g$ .

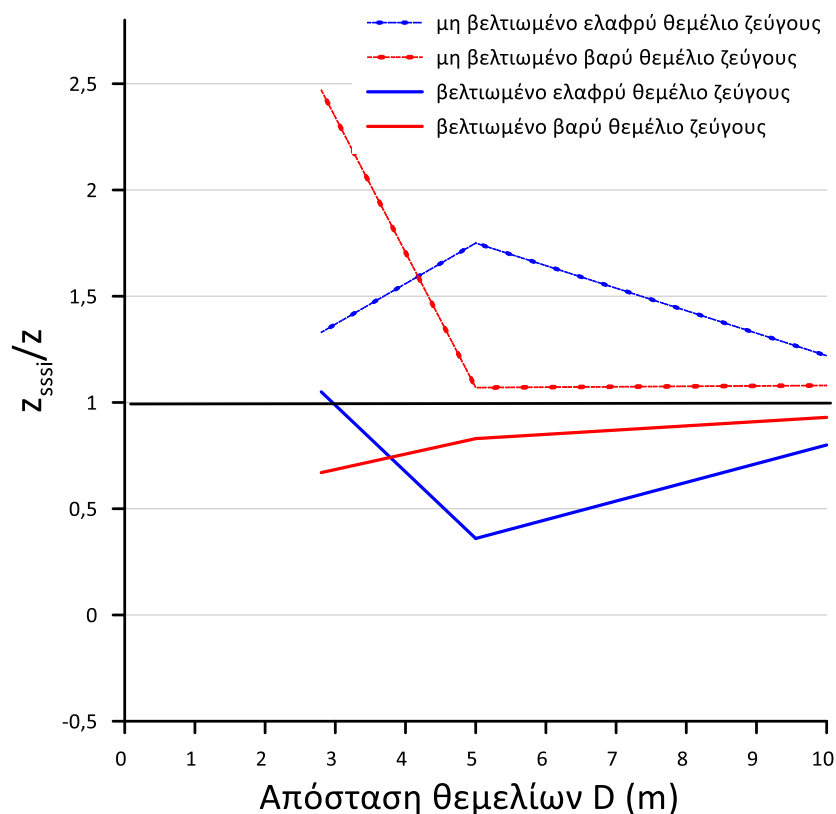
Αρχικώς η έμφαση δίνεται στις καθιζήσεις για περιπτώσεις όπου και τα 2 θεμέλια του ζεύγους είναι είτε μη βελτιωμένα, ή βελτιωμένα και τα δύο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων. Έτσι, στο **Σχήμα 5.46** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων  $z_{\text{sssi}}/z$  με την αύξηση της απόστασης  $D$  των θεμελίων. Γίνεται διαχωρισμός ανάλογα με το αν έχουν κοινή βελτίωση (συνεχής γραμμή) ή δεν έχουν καθόλου (διακεκομμένη γραμμή), ενώ με μπλε χρώμα συμβολίζεται το ελαφρύ θεμέλιο και με κόκκινο το βαρύ. Πριν τη μελέτη του γραφήματος υπενθυμίζεται ότι για τον συνδυασμό  $B$ ,  $a_{\text{max}}$  και για τις δυο τιμές φορτίων  $q_1$  και  $q_2$  που εξετάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο, η παρουσία κάρναβου χαλικοπασσάλων σε μεμονωμένα θεμέλια μειώνει την τιμή καθιζήσης κατά 5 έως 10 φορές, περίπου. Συνεπώς οι τιμές  $z$  (παρονομαστές) των λόγων  $z_{\text{sssi}}/z$  για περίπτωση όπου το θεμέλιο είναι βελτιωμένο είναι περίπου 5 – 10 φορές μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές  $z$  για τις περιπτώσεις που το θεμέλιο είναι μη-βελτιωμένο.

Προκύπτει ότι για το βαρύ θεμέλιο ζεύγους, η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσης είναι πάντα ελαφρώς δυσμενής, ελάχιστα όταν το ζεύγος είναι βελτιωμένο, και λίγο περισσότερο όταν το ζεύγος θεμελίων δεν έχει βελτιωθεί. Από την άλλη, για το ελαφρύ θεμέλιο ζεύγους, η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσης είναι ελαφρά ευμενής όταν το ζεύγος είναι μη βελτιωμένο, αλλά αυτό αντιστρέφεται ελαφρώς όταν το ζεύγος θεμελίων βελτιωθεί. Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η ένταση της αλληλεπίδρασης δε δείχνει να επηρεάζεται ιδιαίτερα από την απόσταση  $D$  των θεμελίων, τουλάχιστον για έως  $D = 10\text{m}$  που εξετάστηκε εδώ.



**Σχήμα 5.46:** Λόγος καθιζήσεων  $z_{sssi}/z$  θεμελίων συναρτήσει της απόστασης  $D$ , για ζεύγος θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , διαφορετικού φορτίου  $q_1=50\text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2=200\text{ kPa}$  (βαρύ), μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{\max}=0.2g$  για περιπτώσεις όπου και τα δύο ή κανένα θεμέλιο δεν έχουν βελτιωθεί.

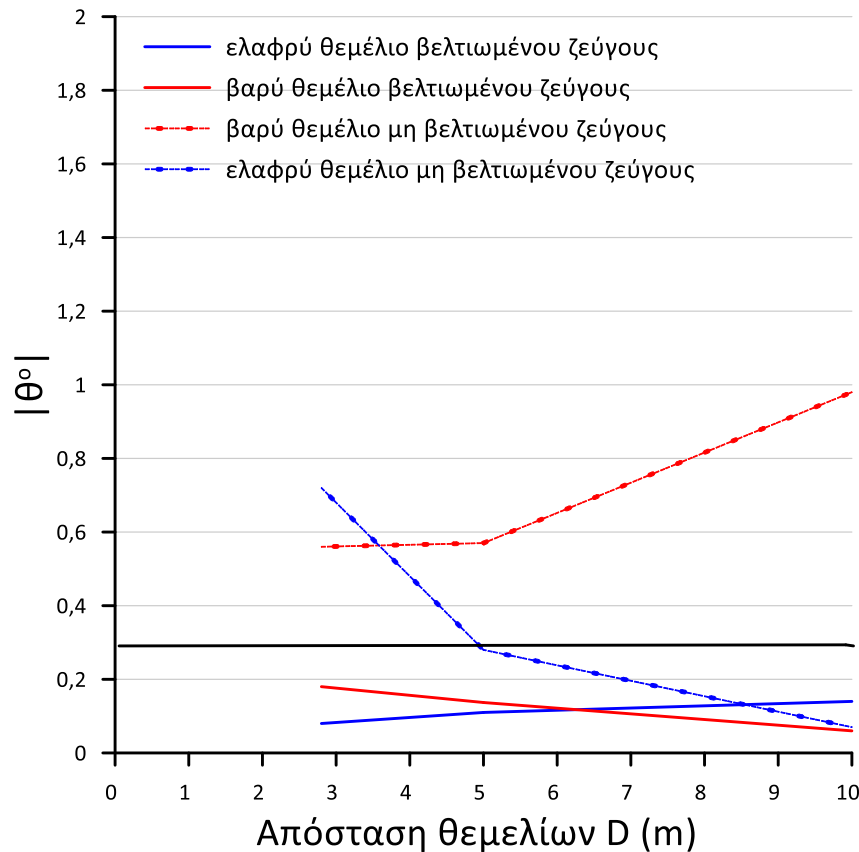
Στη συνέχεια, η έμφαση δίνεται στις καθιζήσεις για περιπτώσεις όπου μόνο το ένα από τα δύο θεμέλια του ζεύγους είναι βελτιωμένο με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων, ενώ το γειτονικό του μένει μη-βελτιωμένο. Έτσι, στο **Σχήμα 5.47** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων  $z_{sssi}/z$  με την αύξηση της απόστασης  $D$  των θεμελίων. Και πάλι γίνεται διαχωρισμός ανάλογα με το αν το θεμέλιο έχει βελτιωθεί (συνεχής γραμμή) ή όχι (διακεκομμένη γραμμή), ενώ με μπλε χρώμα συμβολίζεται το ελαφρύ θεμέλιο και με κόκκινο το βαρύ.



**Σχήμα 5.47:** Λόγος καθιζήσεων  $z_{sssi}/z$  θεμελίων συναρτήσει της απόστασης  $D$ , για ζεύγους θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$ , διαφορετικού φορτίου  $q_1=50\text{ kPa}$  (ελαφρύ) και  $q_2=200\text{ kPa}$  (βαρύ), μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{\max}=0.2g$  για περιπτώσεις όπου μόνο ένα από τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένο.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται πως όταν το θεμέλιο βελτιώνεται, η αλληλεπίδρασή του με το γειτονικό μη βελτιωμένο είναι ευμενής, και αυτή η ευμενής αλληλεπίδραση είναι ιδιαίτερα έντονη όταν το βελτιωμένο θεμέλιο είναι το ελαφρύ του ζεύγους. Αντιθέτως, από το ίδιο σχήμα προκύπτει πως όταν το βαρύ θεμέλιο δεν βελτιώνεται, η αλληλεπίδρασή του με το γειτονικό βελτιωμένο ελαφρύ θεμέλιο είναι έντονα δυσμενής για μικρή απόσταση θεμελίων, ενώ όταν το ελαφρύ θεμέλιο δεν βελτιώνεται φαίνεται να επηρεάζεται από την παρουσία του γειτονικού βελτιωμένου βαρύ θεμελίου πιο έντονα για  $D = 5\text{ m}$ . Η ένταση της αλληλεπίδρασης μπορεί να γίνει πιο έντονη για  $D \leq 5\text{ m}$ , και φθίνει ελαφρά με την απόσταση.

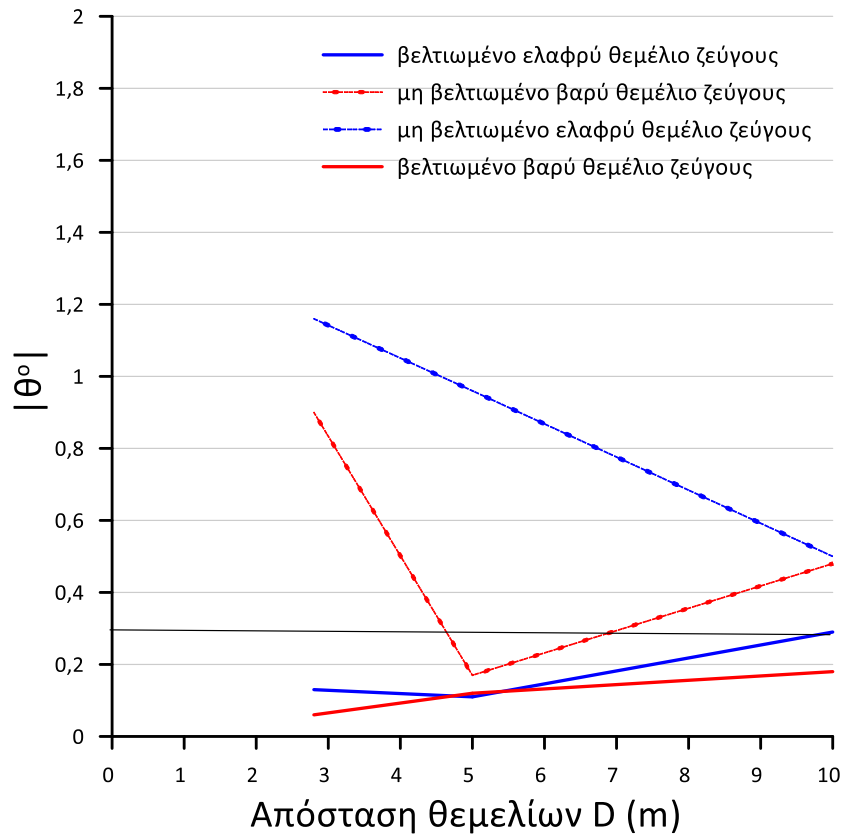
Στη συνέχεια, η έμφαση δίνεται στη στροφή των θεμελίων, πρώτα για περιπτώσεις όπου και τα 2 θεμέλια του ζεύγους είναι είτε μη βελτιωμένα, ή βελτιωμένα και τα δύο με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, δηλαδή για τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν και στο **Σχήμα 5.46** σε όρους καθιζήσεων. Έτσι, στο **Σχήμα 5.48** παρουσιάζεται η επίδραση της απόστασης  $D$  μεταξύ των θεμελίων στην απόλυτη τιμή της στροφής τους  $|\theta|$ , καθώς το πρόσημο της στροφής έχει μικρή σημασία από πλευράς μηχανικού. Υπενθυμίζεται ότι για μεμονωμένα θεμέλια οι στροφές θεωρούνται αμελητέες και η όποια στροφή εδώ θεωρείται ότι προκύπτει λόγω αλληλεπίδρασης. Στην πράξη, μόνο στροφές  $|\theta| > 0.3^\circ$  θεωρούνται ουσιώδεις, αλλά παρόλα αυτά στο διάγραμμα παρουσιάζονται όλες χάριν πληρότητας.



**Σχήμα 5.48:** (Απόλυτη τιμή) στροφής θεμελίων συναρτήσει της απόστασης D, για ζεύγος θεμελίων πλάτους B=5m, φορτίου  $q_1=50$  kPa και  $q_2=200$  kPa, μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}=0.2g$  για περιπτώσεις όπου και τα δύο ή κανένα θεμέλιο δεν έχουν βελτίωση.

Προκύπτει ότι στην περίπτωση βελτιωμένου ζεύγους θεμελίων οι στροφές που αναπτύσσονται είναι αμελητέες και μάλιστα για το βαρύ βελτιωμένο θεμέλιο μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των θεμελίων. Για το μη βελτιωμένο ζεύγος θεμελίων αναπτύσσονται μεγάλες στροφές, και ειδικά στο βαρύ εκ των δύο θεμελίων. Από την άλλη, στο ελαφρύ θεμέλιο εκ των δύο μη-βελτιωμένων θεμελίων, οι στροφές είναι μεγάλες μόνο για απόσταση  $D < 5m$ . Μάλιστα η απόσταση  $D = 10m$  δεν κρίνεται επαρκής για να μηδενίσει τις στροφές του βαρύ θεμελίου του μη-βελτιωμένου ζεύγους.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.49** παρουσιάζεται η επίδραση της απόστασης D μεταξύ των θεμελίων στην απόλυτη τιμή της στροφής τους  $|\theta|$ , όταν ένα μόνο εκ των δύο θεμελίων έχει βελτιωθεί με πυκνό κάνναβο χαλικοπασσάλων, δηλαδή για τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν και στο **Σχήμα 5.47** σε όρους καθιζήσεων. Και για το διάγραμμα αυτό, μόνο στροφές  $|\theta| > 0.3^\circ$  θεωρούνται ουσιώδεις, αλλά παρόλα αυτά παρουσιάζονται όλες οι τιμές χάριν πληρότητας.



**Σχήμα 5.49:** (Απόλυτη τιμή) στροφής θεμελίων συναρτήσει της απόστασης D, για ζεύγος θεμελίων πλάτους B=5m, φορτίου  $q_1=50$  kPa και  $q_2=200$  kPa, μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}=0.2g$  για περιπτώσεις όπου μόνο ένα από τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένο.

Προκύπτει και πάλι ότι για το βελτιωμένο θεμέλιο ενός ζεύγους (είτε είναι βαρύ ή είναι ελαφρύ) προκύπτουν αμελητέες στροφές, δηλαδή ακριβώς όπως συμβαίνει και όταν βελτιώνονται και τα δύο θεμέλια του ζεύγους. Αντιθέτως, για το μη βελτιωμένο θεμέλιο του ζεύγους αναπτύσσονται σημαντικές στροφές, οι οποίες για το ελαφρύ θεμέλιο φθίνουν με την αύξηση της απόστασης. Γενικότερα πάντως, τα μη βελτιωμένα θεμέλια εμφανίζουν σημαντικές στροφές ανεξαρτήτως της απόστασης D (έως 10m) που βρίσκονται από το βελτιωμένα θεμέλια.

Άρα, σε κάθε περίπτωση, τα βελτιωμένα θεμέλια σε ζεύγος, ανεξάρτητα από το φορτίο τους και το αν βελτιώνονται ή όχι τα γειτονικά τους, αναπτύσσουν αμελητέες στροφές. Από την άλλη, τα μη βελτιωμένα θεμέλια σε ζεύγος αναπτύσσουν σημαντικές στροφές, ειδικά όταν η απόσταση D είναι μικρή (< 5m). Οι στροφές αυτές μπορεί να αποδειχτούν σημαντικές και σε μεγαλύτερες αποστάσεις D, αλλά υπό ειδικές συνθήκες (π.χ., αν το γειτονικό θεμέλιο είναι βαρύ και βελτιωμένο).

## 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

### 6.1 Βασικά Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ζεύγους επιφανειακών θεμελιολωρίδων ίδιου πλάτους υπό σεισμική διέγερση σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, όταν ένα, κανένα ή και τα δύο θεμέλια είναι βελτιωμένα με πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων. Η ερμηνεία και η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων σεισμικών καθιζήσεων έγινε με την χρήση του λόγου  $z_{sssi}/z$ , όπου  $z_{sssi}$  είναι η μέση καθίζηση του ζεύγους στην περίπτωση δίδυμων θεμελίων, ή η καθίζηση του κάθε θεμελίου του ζεύγους στην περίπτωση θεμελίων διαφορετικού φορτίου. Αντίστοιχα,  $z$  είναι η καθίζηση του αντίστοιχου μεμονωμένου θεμελίου. Όπως γίνεται αντιληπτό τιμές του  $z_{sssi}/z > 1$  δείχνουν δυσμενή αλληλεπίδραση, ενώ τιμές  $z_{sssi}/z < 1$  δείχνουν ευμενή αλληλεπίδραση, σε σχέση με την καθίζηση του ίδιου θεμελίου αν ήταν μεμονωμένο. Για τις στροφές στα ζεύγη θεμελίων, μελετήθηκε η απόλυτη τιμή στροφής  $|\theta|$  του κάθε θεμελίου, ενώ τιμές  $|\theta| < 0.3^\circ$  θεωρήθηκαν αμελητέες. Στην πράξη, τα μεμονωμένα θεμέλια θεωρούνται ότι έχουν  $\theta = 0^\circ$ , καθώς είναι κεντρικά φορτισμένα και το έδαφος είναι ομοιόμορφο και οριζόντιο.

Όλες οι αναλύσεις που εκτελέστηκαν ήταν για ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου σχετικής πυκνότητας  $D_r = 45\%$  και πάχους  $H = 10$  m, για θεμέλια με πλάτος  $B = 5$  m και ομοιόμορφο φορτίο  $q$ , και αρμονική διέγερση βάσης με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{max} = 0.2$  g. Όταν προσομοιώνεται βελτίωση, αυτή αφορά πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων, που για μεμονωμένο θεμέλιο απομειώνει τις καθιζήσεις κατά 90% περίπου. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για δίδυμα θεμέλια (ίδιο πλάτος  $B$ , ίδιο φορτίο έδρασης  $q = 100$  kPa) όπου το ένα, κανένα ή και τα δύο είχαν βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων, μεταβάλλοντας τη μεταξύ τους απόσταση  $D = 2.8$  έως 10 m ( βλ. **Κεφάλαιο 4**). Στη συνέχεια, για διερεύνηση της επιρροής του φορτίου έδρασης στην απόκριση των θεμελίων, έγιναν αναλύσεις για ζεύγος θεμελίων ίδιου πλάτους, αλλά διαφορετικού φορτίου έδρασης  $q_1 = 50$  kPa (ελαφρύ) και  $q_2 = 200$  kPa (βαρύ), όπου το ένα, κανένα ή και τα δύο είχαν βελτίωση πυκνού κάρναβου χαλικοπασσάλων, μεταβάλλοντας πάλι τη μεταξύ τους απόσταση  $D = 2.8$  έως 10 m (βλ. **Κεφάλαιο 5**). Οι όποιες ποσοτικές αναφορές στα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του εδάφους και των θεμελίων που θεωρήθηκαν. Όμως, τα ποιοτικά συμπεράσματα θεωρούνται ότι έχουν γενικότερη εφαρμογή. Έτσι, παρακάτω γίνεται σύνοψη των βασικών συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας:

### [A] Ζεύγος δίδυμων θεμελίων

- Η αλληλεπίδραση χαρακτηρίζεται από τιμές λόγου καθιζήσεων  $z_{sssi}/z = 0.69 - 1.95$  και στροφές  $|\theta|$  έως  $2.4^\circ$ . Πρακτικά, οι μόνες αξιοσημείωτες στροφές ( $|\theta| > 0.30^\circ$ ) αναμένονται στο μη βελτιωμένο θεμέλιο του ζεύγους δίδυμων θεμελίων, ενώ η αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων είναι σε όλες τις περιπτώσεις δυσμενής ( $z_{sssi}/z > 1$ ), εκτός από την περίπτωση του βελτιωμένου θεμελίου του ζεύγους δίδυμων θεμελίων.
- Η μεγάλη αύξηση της απόστασης ( $D = 10$  m) μεταξύ των θεμελίων μειώνει την αλληλεπίδραση των θεμελίων ώστε  $z_{sssi}/z \rightarrow 1$  και  $|\theta^0| < 0.3^\circ$ , ανεξάρτητα από το αν έχουν βελτιωθεί ή όχι. Για  $D = 5$  m φαίνεται να υπάρχει η πιο έντονη αλληλεπίδραση σε ζεύγος μη κοινά βελτιωμένο.
- Μη βελτιωμένο θεμέλιο έχει πάντα δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ανεξάρτητα από τη βελτίωση ή μη του γειτονικού του δίδυμου θεμελίου. Το ίδιο θεμέλιο εμφανίζει σημαντικές στροφές μόνο αν και το δίδυμό του είναι βελτιωμένο.
- Βελτιωμένο θεμέλιο έχει ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων όταν το γειτονικό του δίδυμο θεμέλιο είναι μη-βελτιωμένο, αλλά μπορεί να εμφανίσει ελαφρώς δυσμενή αλληλεπίδραση αν το γειτονικό του θεμέλιο βελτιωθεί. Σε όρους στροφών, ένα βελτιωμένο θεμέλιο έχει πάντα αμελητέες στροφές.

### [B] Ζεύγος θεμελίων διαφορετικού φορτίου

- Η αλληλεπίδραση χαρακτηρίζεται από τιμές λόγου καθιζήσεων  $z_{sssi}/z = 0.36 - 2.47$  και στροφές  $|\theta|$  έως  $1.2^\circ$ , δηλαδή είναι σαφώς εντονότερη (ευμενώς και δυσμενώς) σε σχέση με ό,τι προκύπτει για δίδυμα θεμέλια. Γενικώς, ανεξάρτητα από το αν το ζεύγος θεμελίων έχει κοινή ή όχι βελτίωση, τα βελτιωμένα θεμέλια έχουν αμελητέες στροφές σε αντίθεση με τα γειτονικά μη βελτιωμένα.
- Η αλληλεπίδραση είναι εντονότερη για  $D < 5$  m, αλλά από εκεί και πέρα η αύξηση της απόστασης μεταξύ των θεμελίων δεν απομειώνει έντονα την αλληλεπίδραση (τουλάχιστον για αποστάσεις έως 10m που εξετάστηκαν εδώ) σε όρους στροφών. Από την άλλη σε όρους καθιζήσεων, η αλληλεπίδραση μειώνεται με την αύξηση της απόστασης.
- Το ελαφρύ θεμέλιο, όταν είναι μη βελτιωμένο έχει ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων με το βαρύ όταν και αυτό είναι μη βελτιωμένο. Αν είναι γειτονικό με βελτιωμένο βαρύ θεμέλιο, αναπτύσσει μεγάλες στροφές ενώ αν είναι γειτονικό με μη βελτιωμένο βαρύ, για μεγάλα D έχει αμελητέες στροφές. Όταν είναι βελτιωμένο έχει πάντα αμελητέες στροφές ενώ σε όρους καθιζήσεων έχει ελαφρώς δυσμενή αλληλεπίδραση με το γειτονικό βαρύ όταν είναι βελτιωμένο και ευμενή αλληλεπίδραση όταν δεν είναι βελτιωμένο.
- Το βαρύ θεμέλιο, όταν δεν είναι βελτιωμένο έχει πάντα δυσμενή αλληλεπίδραση και σε όρους στροφών και σε όρους καθιζήσεων, ανεξάρτητα από το γειτονικό ελαφρύ θεμέλιο, με πιο έντονη δυσμενεία όταν το γειτονικό ελαφρύ είναι



βελτιωμένο. Όταν είναι βελτιωμένο, έχει ευμενή αλληλεπίδραση με το γειτονικό ελαφρύ, ειδικά όταν το ελαφρύ είναι μη βελτιωμένο.

- Με άλλα λόγια, το μη-βελτιωμένο θεμέλιο έχει δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων μόνο αν είναι δίπλα σε βελτιωμένο. Κατά τα άλλα έχει ασήμαντη αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων, ενώ αν είναι ελαφρύ μπορεί να έχει ελαφρά ευμενή αλληλεπίδραση μόνο αν είναι ελαφρύ και δίπλα σε βαρύ επίσης μη-βελτιωμένο. Επίσης αναπτύσσει σημαντικές στροφές, οι οποίες γιγαντώνονται αν βρίσκεται σε ζεύγος θεμελίων όπου μόνο το ένα θεμέλιο βελτιώνεται, ενώ μπορεί να γίνουν μικρές μόνο αν το θεμέλιο είναι ελαφρύ και σε μεγάλη απόσταση από βαρύ μη-βελτιωμένο.
- Ομοίως, το βελτιωμένο θεμέλιο εμφανίζει ελαφρώς δυσμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων αν βρίσκεται δίπλα σε άλλο επίσης βελτιωμένο. Αντίθετα, το βελτιωμένο θεμέλιο εμφανίζει ευμενή αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων αν βρίσκεται δίπλα σε άλλο μη-βελτιωμένο, και ειδικά αν είναι το ελαφρύτερο του ζεύγους. Σε όρους στροφών, ένα βελτιωμένο θεμέλιο έχει πάντα αμελητέες στροφές.

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για την περαιτέρω διερεύνηση του αντικειμένου της παρούσας εργασίας προτείνονται τα κάτωθι:

- Καθώς οι 2D αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν θεμελιολωρίδες, προτείνεται μελέτη με αντίστοιχες 3D αναλύσεις της αλληλεπίδρασης τετραγωνικών θεμελίων σε οριζόντιο έδαφος ώστε να εξεταστεί και η τυχόν επίδραση του σχήματος του θεμελίου στην αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους-κατασκευής. Οι 3D αναλύσεις μπορούν να συμπεριλαμβάνουν και συνδυασμούς θεμελιολωρίδας με γειτονικό τετραγωνικό θεμέλιο.
- Σε όλες τις αναλύσεις που έγιναν το έδαφος θεωρήθηκε οριζόντιο και έτσι προκλήθηκαν μόνο καθιζήσεις και στροφές στα ζεύγη θεμελίων. Προτείνεται η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης θεμελίων (με και χωρίς βελτίωση) σε έδαφος με ήπια κλίση, όπου θα προκαλούνται πέραν των καθιζήσεων και οριζόντιες μετακινήσεις και πιο συστηματικές στροφές (π.χ., ακόμα και σε μεμονωμένα θεμέλια).

## Βιβλιογραφία

- Andrianopoulos KI, Papadimitriou A.G., Bouckovalas G.D. (2010): “Bounding surface plasticity model for seismic liquefaction analysis of geostructures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 10, pp.895-911.
- Bouckovalas G.D., Papadimitriou A.G, Niarchos D.G., Tsiapas Y.Z., (2011) “Sand fabric evolution effects on drain design for liquefaction mitigation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 : 1426 – 1439.
- Hayden C.P., Zupan J.D., Bray J.D., Allmond J.D., Kutter B.I. (2015): “Centrifuge Tests of Adjacent Mat-Supported Buildings Affected by Liquefaction”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 141(3)
- Itasca (2011): “Fast Lagrangian Analysis of Continua”, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota
- Katsoularis V. (2021): “Multifunctional operation of gravel piles for improving the response of shallow foundations on liquefiable soils”, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil engineering, Geotechnical Department (in Greek).
- Kirkwood P. and Dashti S. (2019): “Influence of Prefabricated Vertical Drains on the Seismic Performance of Similar Neighbouring Structures Founded on Liquefiable Deposits”, *Geotechnique*, 69(11), 971 – 985.
- Krishna A.M., (2011), “mitigation of Liquefaction Hazard Using Granular Piles”, 44 *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 2 (1): 44-66.
- Tiznado J.C., Dashti S., Ledezma C., Whan B.P., Badanagki M.,(2020): “Performance of Embankments on Liquefiable Soils Improved with Dense Granular Columns: Observations from Case Histories and Centrifuge Experiments”, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 146(9)
- Tsepelidou N. (2021): “Structure – Soil – Structure interaction in a seismic liquefaction regime”, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil engineering, Geotechnical Department (in Greek).
- Vrana D.A. (2016): “Laboratory Investigation into the behavior of Improved Liquefiable Soils under Monotonic and Cyclic Loading”, Doctoral Thesis, University of Thessaloniki, School of Civil Engineering.
- Γκαζέτας Γ. (1996): «Εδαφοδυναμική και Σεισμική Μηχανική», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.