

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



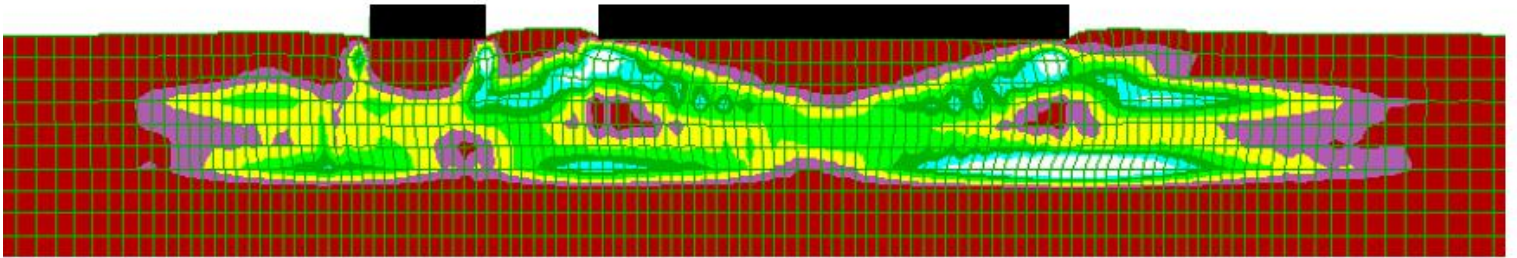
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

Αλληλεπίδραση Γειτονικών Κατασκευών σε Ρευστοποιήσιμο Έδαφος με Αργιλική Επιφανειακή Στρώση

Διπλωματική Εργασία

Ανδρέας Α. Καλύβας

Επιβλέπων: Αχιλλέας Γ. Παπαδημητρίου



Interaction of Neighboring Structures on Liquefiable Soil with Clayey Surface Layer

Diploma Thesis

Andreas A. Kalyvas

Supervisor: Achilleas G. Papadimitriou

Ευχαριστίες

Μία παράγραφος δεν είναι αρκετή για να ευχαριστήσω όλα εκείνα τα άτομα που έκαναν αυτά τα 5 χρόνια αξέχαστα. Για αυτό θα το κάνω συνοπτικά...

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή Αχιλλέα Παπαδημητρίου. Τον ευχαριστώ τόσο για τη διαρκή καθοδήγηση και υπομονή κατά τη διάρκεια αυτής της Διπλωματικής, αλλά και για την έμπρακτη στήριξη τον τελευταίο χρόνο εκτός αυτής. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Τομέα Γεωτεχνικής του ΕΜΠ που με έκαναν να αγαπήσω αυτό το αντικείμενο και να πιστέψω τους στόχους μου.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που ομόρφυναν αυτή τη διαδρομή, είτε ήταν μέρος της από την αρχή, είτε ήρθαν στην πορεία. Χωρίς αυτούς σίγουρα τα πάντα θα ήταν πιο μονότονα. Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει σε αυτούς που ήταν εκεί πολύ πριν η διαδρομή αρχίσει, και με ανιδιοτέλεια και πίστη με στήριξαν σε κάθε μου βήμα: στην Οικογένειά μου.

Ανδρέας Καλύβας

Αθήνα, 07/07/2024, πολύ μετά τα μεσάνυχτα...

Περίληψη

Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες στη διεθνή βιβλιογραφία που ποσοτικοποιούν τις καθιζήσεις μεμονωμένων αβαθών θεμελίων λόγω σεισμικής ρευστοποίησης (π.χ., Karamitros et. al., 2014, Macedo & Bray, 2017). Όμως, σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα η θεώρηση του μεμονωμένου θεμελίου είναι μάλλον εξιδανικευμένη, καθώς παρατηρείται αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών κατασκευών, καθιστώντας τις παραπάνω μεθοδολογίες ανεπαρκείς. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διερευνήθηκε η δυναμική αλληλεπίδραση ζεύγους γειτονικών θεμελιο-λωρίδων εδραζόμενων σε δίστρωτο εδαφικό προφίλ με επιφανειακή αργιλική στρώση («κρούστα») αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u πάνω από στρώση κοκκώδους εδάφους πάχους H_L υπό καθεστώς ρευστοποίησης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία Αλληλεπίδραση Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (SSSI). Οι δύο θεμελιο-λωρίδες απέχουν μεταξύ του απόσταση D , επιβάλλουν τάση έδρασης q και έχουν πλάτος B (άρα ασκούν φορτίο $Q=qB$). Τα μεγέθη ενδιαφέροντος που αξιολογήθηκαν ήταν ο λόγος σεισμικών καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z (δηλαδή της καθίζησης λαμβάνοντας υπόψιν την αλληλεπίδραση Z_{SSSI} διαιρεμένη με την καθίζηση του αντίστοιχου μεμονωμένου θεμελίου Z) και οι στροφές θ στο τέλος της διέγερσης.

Η παρούσα εργασία διερευνά εκτενώς παραμέτρους που δεν έχουν εξετασθεί μέχρι στιγμής (π.χ. πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L) μέσω δυναμικών μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων με χρήση FLAC2D και κατάλληλου καταστατικού προσομοιώματος για το ρευστοποιήσιμο έδαφος (NTUA-SAND). Έπειτα, συνδυάζοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα με αντίστοιχα προηγούμενης έρευνας (Δημουλά, 2022) δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων για 152 περιπτώσεις αλληλεπίδρασης ζεύγους θεμελίων. Με τη βοήθεια αυτής της βάσης δεδομένων, έγινε στατιστική επεξεργασία με χρήση μη-γραμμικής παλινδρόμησης με σκοπό την κατάστρωση μιας μεθοδολογίας με εξισώσεις «κλειστού τύπου» για τον υπολογισμό του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z κάθε θεμελίου ενός ζεύγους.

Η διερεύνηση υποδεικνύει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αλληλεπίδραση προκαλεί μείωση των καθιζήσεων σε σχέση με αυτές των μεμονωμένων θεμελίων. Παρόλα αυτά, κυρίως σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις D , εμφανίζονται μη-αμελητέες στροφές θ . Συνεπώς, η SSSI, ενώ μπορεί να θεωρηθεί «ευμενής» σε όρους καθιζήσεων, πολλές φορές είναι «δυσμενής» σε όρους στροφών και άρα δυσμενής για τα έργα Πολιτικού Μηχανικού. Όταν τα γειτονικά θεμέλια είναι όμοια μεταξύ τους, υπάρχει συμμετρία στο πρόβλημα, οπότε τα θεμέλια χαρακτηρίζονται από μια κοινή μέση καθίζηση και μια κοινή στροφή. Όταν είναι ανόμοια, το κρίσιμο μέγεθος είναι το σχετικό φορτίο Q/Q_n (όπου ο δείκτης n υποδηλώνει γειτονικό θεμέλιο). Θεμέλια με μεγάλο σχετικό φορτίο (βαριά/ευρέα, $Q/Q_n > 1$) επηρεάζονται σημαντικά λιγότερο από ότι τα γειτονικά τους θεμέλια με μικρό σχετικό φορτίο (ελαφριά/στενά, $Q/Q_n < 1$). Και για τα μεν και για τα δε, βέβαια, η αλληλεπίδραση μειώνεται με την ενδιάμεση απόσταση D και πρακτικώς εξαλείφεται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από $D/B_{min} = 2$ έως 5, όπου B_{min} είναι το μικρότερο πλάτος θεμελίου από τα δύο του ζεύγους.

Προκύπτει ότι οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης είναι δύο: α) ο «δυσμενής» μηχανισμός της *Επαλληλίας Τάσεων* που εμφανίζεται μόνο σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις D , και οφείλεται στην επαλληλία διατμητικών τάσεων (και παραμορφώσεων), με επακόλουθο την αύξηση καθιζήσεων και εμφάνιση στροφών, και β) ο μηχανισμός του *Εκτοπιζόμενου Εδάφους* που εμφανίζεται σε μικρές και μεσαίες ενδιάμεσες αποστάσεις D . Ο δεύτερος αυτός μηχανισμός σχετίζεται με τη διάθεση ενός θεμέλιου με μεγάλες καθιζήσεις (π.χ., αστοχία λόγω φέρουσας ικανότητας) να εκτοπίζει έδαφος πλευρικά και να προκαλεί ανύψωση στην γειτονική του περιοχή. Όταν σε αυτή την περιοχή εδράζεται ένα θεμέλιο, αυτό εκτός από την πρωτογενή του διάθεση να καθιζάνει, αποκτά και μια δευτερογενή διάθεση να ανυψωθεί. Άρα, αυτός ο μηχανισμός είναι «ευμενής» σε όρους καθιζήσεων, αλλά «δυσμενής» σε όρους στροφών.

Η επίδραση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{\min} επί του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z είναι γενικώς αυξητική, παρότι συνήθως η ελάχιστη τιμή του δεν εμφανίζεται στην μικρότερη D/B_{\min} , αλλά σε μια (ελαφρώς) μεγαλύτερη ($D/B_{\min} = 0.5 - 1.0$). Η επίδραση του σχετικού φορτίου Q/Q_n είναι αυξητική επί του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z , κάτι που οφείλεται στο ότι ένα βαρύ/ευρύ θεμέλιο εκτοπίζει πολύ περισσότερο έδαφος από ότι ένα ελαφρύ/στενό. Η επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u της επιφανειακής αργιλικής «κρούστας» επί του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z είναι γενικώς μειωτική, λόγω του αυξημένου εύρους της επηρεαζόμενης περιοχής πλευρικώς του θεμελίου. Τέλος, η επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L επί του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z είναι γενικώς μειωτική μιας και όσο αυξάνει το πάχος το διαθέσιμο έδαφος προς εκτόπιση είναι περισσότερο. Ως προς τη φορά των στροφών των θεμελίων, αυτές είναι συγκλίνουσες σε μικρές κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις D/B_{\min} (μηχ. *Επαλληλίας Τάσεων*) και αποκλίνουσες σε μεγαλύτερες (μηχ. *Εκτοπιζόμενου Εδάφους*). Σημαντικές τιμές στροφών παρατηρήθηκαν κυρίως για στενά/ελαφριά θεμέλια και μόνο σε μικρές κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις ($D/B_{\min} < 2$).

Η βέλτιστη μεθοδολογία που προέκυψε από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων είναι μια σύνθετη πολύ-παραμετρική εξίσωση που περιλαμβάνει εκτίμηση σε 2 βήματα. Αυτή δεν παρουσιάζει μεροληψία, και έχει τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος ίση με $\pm 26.4\%$ και μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα ίσο με 18.7% . Επιπλέον, οι σχέσεις που την απαρτίζουν εκφράζουν ποιοτικά τις επιδράσεις των 4 σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση. Ουσιαστικά, το προϊόν της μεθοδολογίας είναι ένας «διορθωτικός συντελεστής» Z_{SSSI}/Z ο οποίος μπορεί να πολλαπλασιαστεί με την τιμή Z ενός μεμονωμένου θεμελίου σε ίδιες συνθήκες (εκτιμώμενη από υπάρχουσες μεθοδολογίες όπως η Karamitros et. al., 2014), με σκοπό να συμπεριληφθεί η επίδραση της Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής στην εκτιμώμενη καθίζηση δύο γειτονικών θεμελίων.

Abstract

There are several methodologies that predict the settlement of isolated shallow footings due to seismic liquefaction (e.g., Karamitros et. al., 2014; Macedo & Bray, 2017). However, in dense urban environments, the assumption that any footing is isolated is rather idealized, since interaction between neighboring structures is observed, making the above methodologies inadequate. In the context of this Diploma Thesis, the dynamic interaction of a pair of neighboring strip footings resting on a soil profile with a surface clayey layer ("crust") of undrained shear strength S_u over a liquefiable sand layer thickness H_L was investigated. In the literature, this phenomenon is called Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI). The two strip footings are separated by a distance D , apply a contact pressure q and have a width B (thus exerting a load $Q=qB$). The parameters of engineering interest were the seismic settlement ratio Z_{SSSI}/Z (i.e. the settlement taking into account the SSSI divided by the settlement of the corresponding isolated footing Z) and the rotations θ at the end of the seismic excitation.

This thesis investigates extensively parameters that have not been considered so far (e.g., liquefiable layer thickness H_L) through dynamic non-linear numerical analyses using FLAC2D and a suitable constitutive model for the liquefiable sand layer (NTUA-SAND). Then, by combining the numerical results with those of existing research (Dimoula, 2022), a database of 152 cases of interaction between neighboring footings was created. With the help of this database, a statistical analysis using non-linear regression was performed in order to set up a methodology with "closed-form" equations which predict the settlement ratio Z_{SSSI}/Z of each footing in the pair.

The findings indicate that in most cases the interaction causes a reduction in settlements compared to those of isolated footings. However, especially at small intermediate distances D , rather substantial rotations θ appear. Therefore, SSSI, while it can be considered "favorable" in terms of settlements, is often "unfavorable" in terms of rotations and thus unfavorable for civil engineering works as a whole. When the neighboring footings are identical, the problem is symmetric and the footings are characterized by the same average settlement and the same rotation. When they are different, the critical response parameter is the relative load Q/Q_n (where the subscript n denotes the neighboring footing). Footings with a large relative load (heavy/wide: $Q/Q_n > 1$) are significantly less affected than their neighboring footings with a small relative load (light/narrow: $Q/Q_n < 1$). For both footings the interaction reduces as the interdistance D increases and it's practically eliminated at distances greater than $D/B_{\min} = 2$ to 5, where B_{\min} is the smallest footing width of the pair.

The mechanisms that govern the phenomenon are two: a) the "unfavorable" mechanism of "Stress Superposition" which occurs only at small interdistances D , and is caused by the superposition of shear stresses (and strains) resulting in increased settlements and rotations, and b) the mechanism of "Displaced Soil" which occurs at small and medium intermediate interdistances D . This second mechanism is related to the tendency of a footing with large settlements (e.g., during bearing capacity failure) to displace soil

laterally and cause uplift in its neighboring area. When a footing rests in this area, it develops, in addition to its primary tendency to settle, a secondary tendency to uplift. Thus, this mechanism is considered "favorable" in terms of settlements, but "unfavorable" in terms of rotations.

The effect of the normalized interdistance D/B_{\min} on the settlement ratio Z_{SSSI}/Z is generally increasing, although usually the minimum value does not occur at the smallest D/B_{\min} , but at a (slightly) larger one ($D/B_{\min} = 0.5 - 1.0$). The effect of the relative load Q/Q_n is increasing on the settlement ratio Z_{SSSI}/Z , due to the fact that a heavy/wide footing displaces much more soil than a light/narrow one. The effect of the undrained shear strength S_u of the clayey surface layer on the settlement ratio Z_{SSSI}/Z is generally decreasing, due to the increased width of the influenced area at the sides of the footing. Finally, the effect of the liquefiable layer thickness H_L on the settlement ratio Z_{SSSI}/Z is generally decreasing, given that as the layer becomes thicker, the soil available for displacement becomes larger. As far as the directions of the footings' rotations are concerned, they are generally convergent at small normalized interdistances D/B_{\min} (Stress Superposition mechanism) and divergent at larger ones (Displaced Soil mechanism). Significant rotations were mainly observed for light/narrow footings and only at small normalized interdistances ($D/B_{\min} < 2$).

The optimal methodology derived from the statistical analysis of the numerical data is a complex multi-variable equation involving a 2-step estimation. It has no statistical bias, a standard deviation of relative error equal to $\pm 26.4\%$ and a mean absolute relative error equal to 18.7% . Moreover, the relations that constitute this equation qualitatively express the effects of the 4 aforementioned key parameters that influence the interaction. Essentially, the end result of the methodology is a "correction factor" Z_{SSSI}/Z which can multiply the settlement Z of an isolated footing under the same conditions (estimated by existing methodologies such as Karamitros et. al., 2014), in order to include the effect of Structure-Soil-Structure Interaction on the estimated settlement of two neighboring footings.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	5
Abstract	7
Περιεχόμενα	9
1. Εισαγωγή	12
1.1 Αντικείμενο	12
1.2 Δομή Εργασίας	13
2. Βιβλιογραφική Έρευνα	14
2.1 Εισαγωγή	14
2.2 Απόκριση Μεμονωμένου Θεμελίου επί Ρευστοποιήσιμου Εδάφους	14
2.3 Ιστορικά Περιστατικά Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής σε ρευστοποιήσιμο έδαφος	15
2.3.1 Παρατηρήσεις από τον Σεισμό στο Luzon (1990)	16
2.3.1 Παρατηρήσεις από τον Σεισμό στο Kocaeli (1999)	16
2.3.1 Παρατηρήσεις από τον Σεισμό στο Tohoku Pacific (2011)	17
2.4 Φυσικά Πειράματα (υπό Κλίμακα) σε Φυγοκεντρική	18
2.4.1 Εργασία των Hayden et. al. (2014)	18
2.4.2 Εργασία των Kirkwood and Dashti (2018)	19
2.5 Μελέτες Υπολογιστικής Φύσης	20
2.5.1 Εργασία της Δημουλά (2022)	20
2.5.2 Εργασία του Yarmohammadi (2023)	22
2.5.3 Εργασία των Kassas et. al. (2022)	27
2.6 Στόχος παρούσας εργασίας	29
3. Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων	31
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Καταστατική Προσομοίωση Εδαφικών Υλικών	31
3.2.1 Ρευστοποιήσιμη Άμμος	31
3.2.2. Επιφανειακή Αργιλική Στρώση	32
3.2.3. Αργιλική Στρώση Βάσης	33
3.3. Προσομοίωση Θεμελίων	33
3.4. Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης Συνεχούς Μέσου	34

3.4.1. Διακριτοποίηση Πεπερασμένων Διαφορών.....	34
3.4.2. Υπόγειο Νερό.....	36
3.4.3. Συνοριακές Συνθήκες.....	36
3.5. Δυναμικά Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης	37
3.5.1. Σεισμική Διέγερση Βάσης	37
3.5.2. Απόσβεση	37
3.6 Διερεύνηση Επάρκειας Μεθοδολογίας	38
3.6.1. Επίδραση Συνοριακών Συνθηκών	38
3.6.2. Επίδραση Πύκνωσης Καννάβου	39
3.7 Στρατηγική Παραμετρικής Διερεύνησης	40
4. Απόκριση Αλληλεπιδρώντων Κατασκευών	43
4.1. Γενικά	43
4.1.1. Εξεταζόμενες Παράμετροι	43
4.1.2. Σύνοψη Εκτελεσθέντων Αναλύσεων	45
4.2. Τυπική Απόκριση	49
4.2.1. Δίδυμα Θεμέλια	49
4.2.2. Θεμέλια με Εξόχως Διαφορετικό Φορτίο Q	52
4.2.3. Επιρροή του Q/Q_n Ανεξαρτήτως Απόστασης D	55
4.3. Επίδραση Ενδιάμεσης Απόστασης	57
4.3.1. Απόκριση για Μικρή Ενδιάμεση Απόσταση	58
4.3.2. Απόκριση για Μεσαία Ενδιάμεση Απόσταση	61
4.3.1. Απόκριση για Μεγάλη Ενδιάμεση Απόσταση	63
4.4 Επίδραση Αστράγγιστης Διατμητικής Αντοχής S_u της Αργιλικής Κρούστας	66
4.5. Επίδραση Πάχους Ρευστοποιήσιμης Στρώσης H_L	71
4.5.1. Απόκριση σε Μικρό Πάχος Ρευστοποιήσιμης Στρώσης	71
4.5.2. Απόκριση σε Μεγάλο Πάχος Ρευστοποιήσιμης Στρώσης	73
4.6. Περί της Φοράς των Στροφών Γειτονικών Κατασκευών	79
5. Σχέση Εκτίμησης Λόγου Καθιζήσεων.....	83
5.1. Γενικά	83
5.2. Μέθοδος Στατιστικής Επεξεργασίας	83
5.3. Απλή Μονο-παραμετρική Προσέγγιση	85
5.4. Πολυ-παραμετρική Προσέγγιση	90
5.5. Σύνθετη Πολυ-παραμετρική Προσέγγιση	95

6. Συμπεράσματα – Προτάσεις	104
6.1. Βασικά Συμπεράσματα	104
6.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	107
Βιβλιογραφικές Αναφορές	110
Παράρτημα	112
Παράρτημα Α: Λεπτομερή Αριθμητικά Αποτελέσματα	112
Παράρτημα Β: Συγκεντρωτικά Αριθμητικά Αποτελέσματα	176

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Η ρευστοποίηση εδαφών είναι ένα από τα θεαματικότερα και συνάμα καταστροφικότερα φαινόμενα κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών δονήσεων. Κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής φόρτισης, χαλαρά, κορεσμένα κοκκώδη εδάφη έχουν την τάση να συμπυκνωθούν, κάτι που είναι δύσκολο να συμβεί μιας και επικρατούν αστράγγιστες συνθήκες λόγω της ταχύτητας της (δυναμικής) φόρτισης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων, η οποία μεταφράζεται σε μείωση της ενεργού τάσης και άρα της στιβαρότητας και της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Συνεπώς, στο έδαφος εκδηλώνονται μεγάλες (διατμητικές) παραμορφώσεις, και αν σε αυτό θεμελιώνονται κατασκευές, τότε αυτές υπόκεινται σε παραμένουσες καθιζήσεις και στροφές.

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία έχει υποδείξει ότι είναι δυνατός ο ικανοτικός σχεδιασμός μεμονωμένων αβαθών θεμελίων ακόμα και υπό καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης (π.χ., Karamitros et. al., 2014, Bray & Macedo, 2017). Παρόλα αυτά, σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα εμφανίζεται το φαινόμενο της Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (SSSI), με αποτέλεσμα οι μηχανισμοί ανάπτυξης καθιζήσεων και στροφών του κάθε θεμελίου να επηρεάζεται από την ύπαρξη του γειτονικού του. Συνεπώς, οι προαναφερθείσες μεθοδολογίες ικανοτικού σχεδιασμού δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περίπτωση που υπάρχουν γειτονικές κατασκευές σε «κοντινή» απόσταση.

Έτσι, η παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζει τη δυναμική αλληλεπίδραση ζεύγους γειτονικών θεμελιο-λωρίδων (σε όρους στροφών και (μέσων) καθιζήσεων) σε ρευστοποιήσιμη στρώση με επιφανειακή αργιλική στρώση («κρούστα»). Αποτελεί συνέχεια της εργασίας της Δημουλά (2022) και έχει στόχο την επέκταση της (διερεύνηση άλλων σημαντικών παραμέτρων, π.χ., το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης) και τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από μεγάλο πλήθος συζευγμένες δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις του προβλήματος. Η έμφαση δίνεται στη μέση καθίζηση της κάθε θεμελιο-λωρίδας όταν βρίσκεται σε ζεύγος με γειτονική της, συγκριτικά με την μέση καθίζηση της ίδιας θεμελιο-λωρίδας αν βρισκόταν στο ίδιο έδαφος υπό την ίδια διέγερση, αλλά μακριά από άλλη κατασκευή. Τελικός στόχος είναι η στατιστική επεξεργασία να καταλήξει σε μια αναλυτική μεθοδολογία εκτίμησης ενός «διορθωτικού συντελεστή» της τιμής της καθιζήσης λόγω SSSI, που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάποια από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες για καθίζηση μεμονωμένης θεμελιο-λωρίδας (π.χ., Karamitros et. al., 2014).

1.2 Δομή Εργασίας

Συνοπτικά, τα περιεχόμενα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας έχουν ως ακολούθως:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται οι ιστορικές καταγραφές πεδίου μετά από σεισμούς που οδήγησαν στην ανάδειξη της σημαντικότητας του φαινομένου της SSSI υπό ρευστοποίηση. Επίσης, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα που έγινε με σκοπό τον εντοπισμό των κυριότερων ερευνών στο αντικείμενο αυτό, τόσο πειραματικών όσο και υπολογιστικών, καθώς και μία μεθοδολογία υπολογισμού καθιζήσεων μεμονωμένου θεμελίου εδραζόμενου σε εδαφικό προφίλ ίδιο με της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η αριθμητική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε να προσομοιωθεί το πρόβλημα σε δισδιάστατο περιβάλλον πεπερασμένων διαφορών με το πρόγραμμα FLAC2D. Συγκεκριμένα, περιγράφονται όλα τα χαρακτηριστικά και οι παραδοχές που έλαβαν χώρα με σκοπό τη βέλτιστη προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης ενός ζεύγους θεμελιο-λωρίδων που εδράζεται επί ρευστοποιήσιμου εδάφους που υπόκειται επιφανειακής αργιλικής «κρούστας».

Έπειτα, στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων δυναμικής αλληλεπίδρασης γειτονικών θεμελιο-λωρίδων εδραζόμενων σε δίστρωτο εδαφικό προφίλ που εκτελέστηκαν. Με τη βοήθεια παραμετρικών διερευνήσεων, περιγράφεται η τυπική απόκριση όμοιων και ανόμοιων γειτονικών θεμελίων και αναλύεται η επίδραση που έχει κάθε σημαντική παράμετρος επί των μέσων καθιζήσεων και των στροφών. Επιπλέον, περιγράφονται οι βασικοί μηχανισμοί που διέπουν το φαινόμενο της SSSI υπό ρευστοποίηση.

Το **Κεφάλαιο 5** αφορά στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με σκοπό τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που εκτελέστηκαν, τόσο στην παρούσα εργασία όσο και σε αυτή της Δημουλά (2022). Συγκεκριμένα, μετά από μη-γραμμική παλινδρόμηση, διατυπώνονται τρεις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του προαναφερθέντος «διορθωτικού συντελεστή» της τιμής της καθίζησης λόγω SSSI, κλιμακούμενης πολυπλοκότητας και ακρίβειας.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία και γίνονται μερικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με ένα εκτενές **Παράρτημα** όπου παρουσιάζονται αναλυτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας, και τα οποία δεν εμπεριέχονται στο Κεφάλαιο 4, αλλά μόνο στο Κεφάλαιο 5 ως στοιχεία της βάσης δεδομένων. Στο **Μέρος Α** παρουσιάζονται τα Λεπτομερή Αριθμητικά Αποτελέσματα από κάθε ανάλυση ενώ στο **Μέρος Β** παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα Συγκεντρωτικά Αριθμητικά Αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Έρευνα

2.1 Εισαγωγή

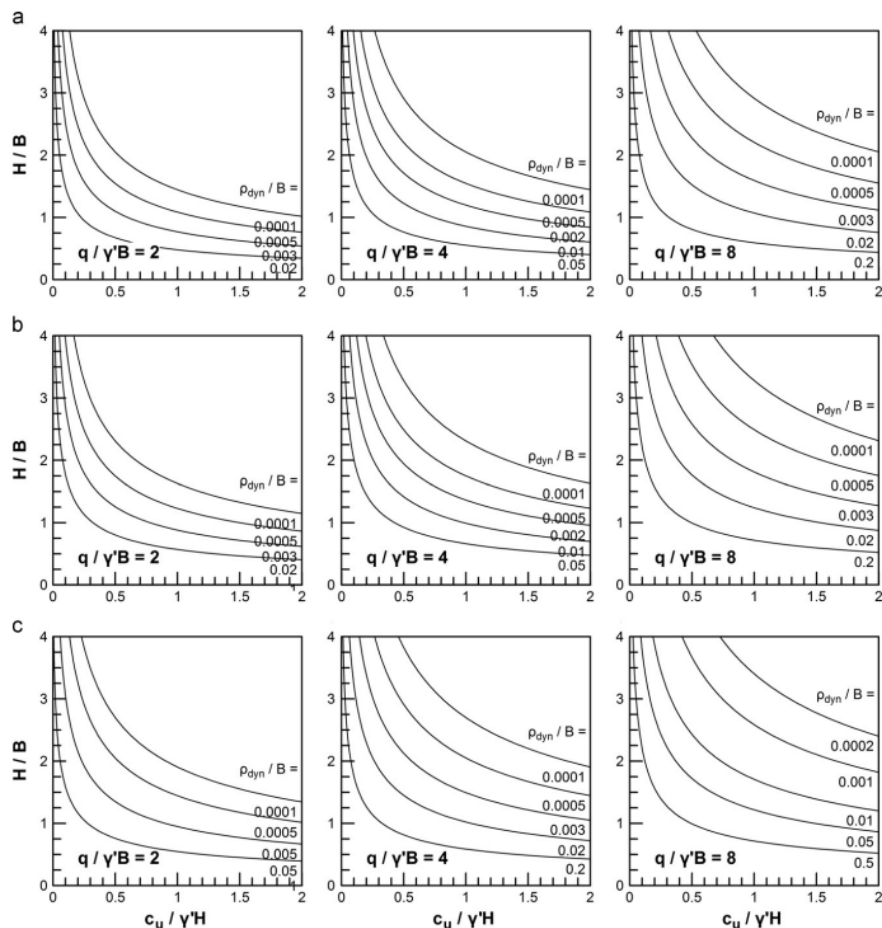
Στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα στο θέμα της Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (SSSI). Αρχικά, γίνεται αναφορά σε σχέσεις της βιβλιογραφίας οι οποίες ποσοτικοποιούν αναλυτικά την απόκριση μεμονωμένων θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος σε όρους καθιζήσεων. Έπειτα, παρουσιάζεται το ιστορικό καταγραφών πεδίου μετά από σεισμούς που οδήγησε στην αναγνώριση της σημαντικότητας του φαινομένου της SSSI. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για να προσομοιωθεί το φαινόμενο, με τη βοήθεια φυσικών πειραμάτων σε φυγοκεντριστή. Πιο μετά, παρουσιάζονται κάποιες από τις περιεκτικότερες προσπάθειες που έχουν εντοπιστεί στη διεθνή βιβλιογραφία και έχουν στόχο την αναλυτική παραμετροποίηση του προβλήματος με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων. Στο τέλος, καταγράφονται οι ερευνητικές ελλείψεις πάνω στο συγκεκριμένο πρόβλημα και συνεπώς παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2 Απόκριση Μεμονωμένου Θεμελίου επί Ρευστοποιήσιμου Εδάφους

Με δεδομένη την καταστροφικότητα της ρευστοποίησης, έχουν υπάρξει πολλές μελέτες για την απόκριση κατασκευών θεμελιωμένων σε τέτοια εδάφη. Οι πιο πολλές αφορούν στην απόκριση μεμονωμένων κατασκευών και συνεπώς έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες για την εκτίμηση καθιζήσεων σε αυτή την περίπτωση. Ίσως η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία για την εκτίμηση καθιζήσεων μεμονωμένου θεμελίου μετά από ρευστοποίηση εδάφους είναι αυτή των Bray and Macedo (2017) βασισμένη σε αποτελέσματα από ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis). Άλλη μια ευρέως διαδεδομένη σχέση είναι αυτή των Shahir and Pak (2010) που εισήγαγε το πάχος της ρευστοποίησιμης στρώσης ως παράμετρο επιρροής.

Μια χαρακτηριστική μεθοδολογία η οποία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τη συγκεκριμένη εργασία λόγω του προφίλ εδάφους το οποίο πραγματεύεται είναι η εργασία των Karamitros et. al. (2013). Ο λόγος είναι ότι το εδαφικό προφίλ με το οποίο ασχολήθηκε η συγκεκριμένη εργασία είναι «ρευστοποιήσιμη στρώση με αργιλική «κρούστα», δηλαδή οι εδαφικές συνθήκες που πραγματεύεται και η παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, ασχολήθηκαν με μεμονωμένα λωριδωτά και τετραγωνικά επιφανειακά θεμέλια και κατέληξαν σε μια αναλυτική μεθοδολογία υπολογισμού των καθιζήσεων τους, βασιζόμενοι τόσο σε στατιστική επεξεργασία όσο και στον φυσικό μηχανισμό αστοχίας («διάτρηση» της αργιλικής κρούστας). Η μεθοδολογία εκφράζεται με τα νομογραφήματα του Σχήματος 2.1. Η καθιζήση συσχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (μέγιστη επιτάχυνση και ταχύτητα a_{max} και v_{max} , καθώς και αριθμός σημαντικών κύκλων N) και με τον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} , έναντι φέρουσας

ικανότητας μετά από τη διέγερση. Οι καθιζήσεις είναι αντιστρόφως ανάλογες με το πάχος και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής κρούστας. Η μεθοδολογία ελέγχθηκε έναντι δοκιμών σε φυγοκεντριστές, καθώς και καταγεγραμμένων καθιζήσεων μετά από σεισμούς.



Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστικά νομογραφήματα για εκτίμηση της καθίζησης τετραγωνικού θεμελίου κατά τους Karamitros et. al. (2013)

2.3 Ιστορικά Περιστατικά Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (SSSI) σε ρευστοποιημένο έδαφος

Όμως, ειδικά σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα, είναι σπάνιο να έχουμε μια κατασκευή μόνη της, χωρίς αλληλεπίδραση με γειτονικές κατασκευές. Έτσι, το πρόβλημα της Αλληλεπίδρασης Εδάφους-Κατασκευής μετουσιώνεται σε ένα πρόβλημα Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψιν την επιρροή που έχει η μια γειτονική κατασκευή στην άλλη.

Μια σειρά από ιστορικά περιστατικά μετά από σεισμούς που προκάλεσαν φαινόμενα ρευστοποίησης ήταν αυτά που ανέδειξαν τη σημαντικότητα της μελέτης της SSSI, και με βάση τα οποία εξήχθησαν τα πρώτα - αδρομερή - συμπεράσματα για τη συμπεριφορά

γειτονικών κτιρίων σε ρευστοποιήσιμα εδάφη. Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω τέτοια περιστατικά.

2.3.1 Παρατηρήσεις από τον Σεισμό στο Luzon (1990)

Η πρώτη αναφορά σε SSSI υπό ρευστοποίηση έγινε πιθανώς από τους Tokimatsu et. al. (1991) μετά τον σεισμό στο Luzon στις Φιλιππίνες το 1990 ($M_w=7.7$). Εκεί παρατηρήθηκε ότι μεμονωμένες κατασκευές έτειναν να καθιζάνουν περισσότερο από ότι κατασκευές κοντά σε γειτονικές. Επίσης καταγράφηκε η τάση που είχαν οι κατασκευές να στραφούν συγκλίνοντας προς γειτονικές τους. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι κατά κανόνα, βαριά κτίρια προκαλούσαν μεγαλύτερες ζημιές σε γειτονικά ελαφρύτερα κτίρια. Στα συμπεράσματα τους ανέφεραν «ενίσχυση των καταστροφών σε κατασκευές λόγω αλληλεπίδρασης κατασκευής με κατασκευή» (βλ. Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Ζημία σε κτίριο προκλιθείσα από γειτονικό κτίριο στον σεισμό του Luzon το 1990 (Tokimatsu et.al. 1991)

2.3.2 Παρατηρήσεις από τον Σεισμό στο Kocaeli (1999)

Το 1999, μετά τον σεισμό του Kocaeli στην Τουρκία ($M_w=7.6$), καταγράφηκαν «τυχαίες στροφές» σε πολλά γειτονικά κτίρια. Μάλιστα, ήταν η πρώτη φορά που καταγράφηκαν κτίρια να στρέφονται αποκλίνοντας, λόγω αστοχίας φέρουσας ικανότητας μετά από ρευστοποίηση, από τους Bray et. al. (2000), όπως στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Γειτονικά κτίρια που έχουν στραφεί αποκλίνοντας στο Adarazari το 1999 (Bray et.al.)

2.3.3 Παρατηρήσεις από τον Σεισμό στο Tohoku Pacific (2011)

Το 2011, οι Tokimatsu et. al. (2013) έφθασαν στο πιο σημαντικό μέχρι τότε συμπέρασμα. Μετά τον σεισμό του Tohoku Pacific στην Ιαπωνία το 2011 ($M_w=9.0$) κτίρια τα οποία βρισκότουσαν κοντά το ένα με το άλλο εμφάνισαν συγκλίνουσες στροφές, ενώ κτίρια που βρισκότουσαν στην άλλη μεριά του δρόμου (δηλαδή σε μεγαλύτερη απόσταση) το ένα με το άλλο εμφάνιζαν αποκλίνουσες στροφές.



Σχήμα 2.4: Έντονα κεκλιμένο κτίριο μετά τον σεισμό Tohoku Pacific το 2011 (Tokimatsu et.al. 2013)

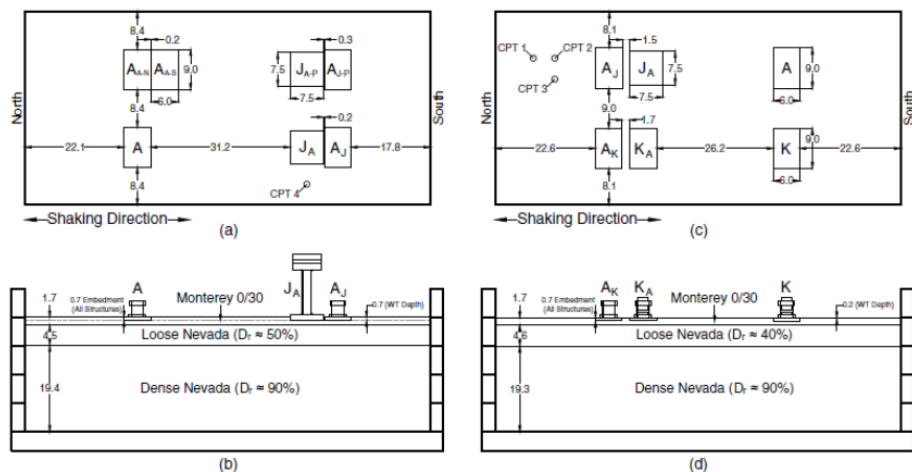
2.4 Φυσικά Πειράματα (υπό Κλίμακα) σε Φυγοκεντριστή

Τα προαναφερθέντα ιστορικά περιστατικά αποτέλεσαν την αφετηρία για τη διενέργεια πειραμάτων και εκτεταμένων αριθμητικών αναλύσεων για να βρεθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν αυτή την αλληλεπίδραση είτε σε όρους καθιζήσεων ή σε όρους στροφών. Η σημαντικότητα της SSSI είναι εμφανής από τις παρατηρήσεις πεδίου και δείχνει ότι η υπόθεση μεμονωμένων κτιρίων είναι μη-συντηρητική, τουλάχιστον ως προς τις στροφές. Τα πειράματα είχαν τη μορφή φυσικών πειραμάτων σε φυγοκεντριστές, τα χαρακτηριστικότερα από τα οποία παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

2.4.1 Εργασία των Hayden et. al. (2014)

Οι Hayden et. al. (2014) πραγματοποίησαν 2 δοκιμές φυγοκεντριστή για κατασκευές θεμελιωμένες με κοιτόστρωση τόσο σε απομονωμένες διατάξεις όσο και εβρισκόμενες γειτονικά. Κατέληξαν στο ότι στην κοντινή διάταξη οι επιταχύνσεις που εμφανίζει η θεμελίωση είναι ελαφρώς μικρότερες από εκείνες στην απομονωμένη διάταξη. Σε όρους καθιζήσεων, αυτές ήταν μικρότερες στην κοντινή διάταξη από ότι στην απομονωμένη διάταξη. Τέλος, ενώ προφανώς οι απομονωμένες κατασκευές καθιζάνουν ομοιόμορφα και δεν στρέφονται, οι γειτονικές κατασκευές παρατηρήθηκαν να στρέφονται αποκλίνοντας η μία από την άλλη (όπως στο περίφημο περιστατικό στο Adarazari το 1999, βλ. Σχήμα 2.3).

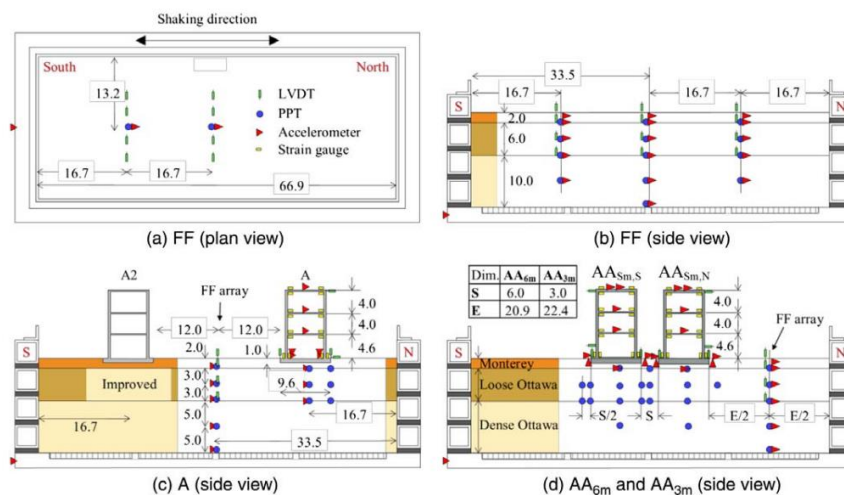
Structure	Mat width (m)	Mat length (m)	Height (m)	Weight (kN)	Bearing pressure (kPa)	Fixed-base period (s) ^b	Center of mass (m) ^b
A	6.0	9.0	4.4	3,510	65	0.33	3.9
K	6.0	9.0	5.3	9,700	180	0.38	3.9
J	7.5	7.5	13.5	10,470	186	0.85	15.0



Σχήμα 2.5: Η πειραματική διάταξη των Hayden et. al. (2014) στις 2 δοκιμές φυγοκεντριστή που πραγματοποιήσαν καθώς και τα χαρακτηριστικά των κατασκευών

2.4.2 Εργασία των Kirkwood and Dashti (2018)

Οι Kirkwood and Dashti (2018) πραγματοποίησαν 4 δοκιμές σε φυγοκεντριστή με εδαφικό προφίλ αποτελούμενο, από τα επιφανειακά προς τα βαθύτερα, από λεπτή επιφανειακή στρώση («κρούστα») πυκνής άμμου, χαλαρή άμμο και πυκνή άμμο. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.6**. Το FF Test έγινε για να προσδιορισθεί η απόκριση του ελευθέρου πεδίου. Έπειτα, έλαβε χώρα το Test A όπου ελέγχθηκε η απόκριση ενός μεμονωμένου και απομονωμένου κτιρίου (τάση 76.5 kPa, τετραγωνική κοιτόστρωση, εγκιβωτισμένο im υπόγεια) υπό συνθήκες ρευστοποίησης. Τέλος στα AA3 και AA6 πειράματα εκλέχθηκε η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο πανομοιότυπων κτιρίων A σε απόσταση 3m και 6m αντίστοιχα. Αυτή ήταν και η πρώτη προσπάθεια για μια (ολιγό)παραμετρική ανάλυση του φαινομένου. Σε όρους στρωφών, σε αντίθεση με τους Hayden et. al. (2015) παρατηρήθηκε και συγκλίνουσα στρόφη μεταξύ των κατασκευών, κάτι που ταιριάζει με πολλαπλές παρατηρήσεις πεδίου όπως και στον σεισμό Hokkaido Eastern Ibari το 2018 στην Ιαπωνία (Ishikawa et. al. (2018)). Σε όρους καθιζήσεων, τονίστηκε ξανά η ευεργετική επίδραση της γειτνίασης των κατασκευών χωρίς όμως να παρατηρηθεί κάποια συσχέτιση μεταξύ της τιμής της καθίζησης και της απόστασης μεταξύ των κατασκευών, λόγω και του μικρού αριθμού δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.



Σχήμα 2.6: Η πειραματική διάταξη των Kirkwood et. al. (2018) στις 4 δοκιμές φυγοκεντριστή που πραγματοποίησαν

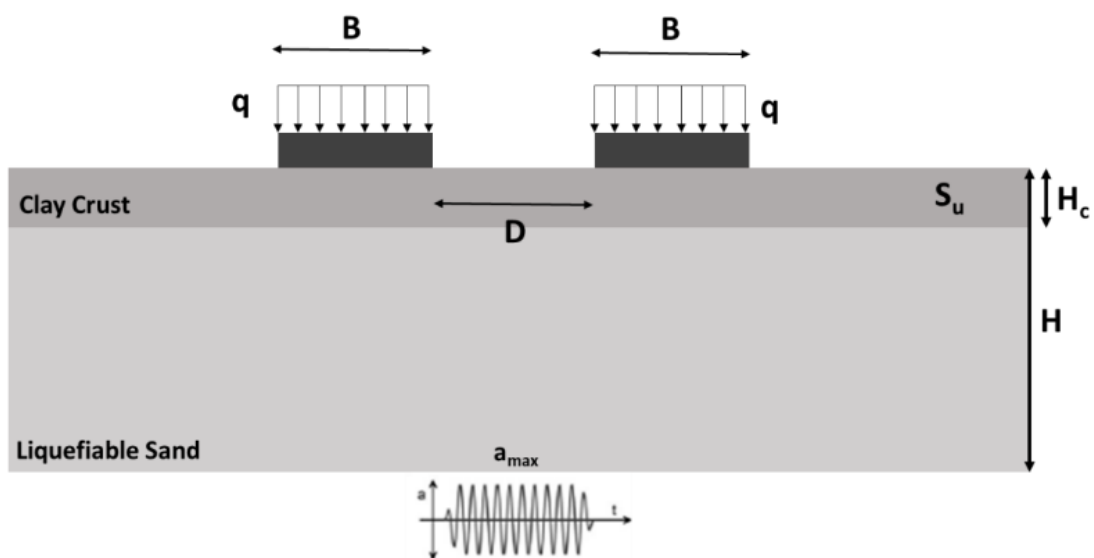
2.5 Μελέτες Υπολογιστικής Φύσης

Παρότι οι δοκιμές σε φυγοκεντριστή είναι ομολογουμένως χρήσιμες και προσφέρουν δεδομένα μεγάλης ακρίβειας, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος λόγω κόστους. Για παράδειγμα, στις μελέτες της παραγράφου 2.4 εξετάστηκαν περιορισμένου πλήθους διατάξεις με αποτέλεσμα οι

ενδείξεις των πειραμάτων αυτών να μην μπορούν να γενικευθούν. Η λύση σε αυτό το αδιέξοδο είναι η χρήση αριθμητικών αναλύσεων όπου μπορούν να ελεγχθούν απεριόριστες διατάξεις με ευρεία παραμετρική διερεύνηση με μηδαμινό κόστος. Αυτές βέβαια χρειάζονται πολύ προσεκτική βαθμονόμηση με πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα. Απόπειρες παραμετρικών αναλύσεων του προβλήματος της Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής επιφανειακά θεμελιωμένων κατασκευών υπό καθεστώς ρευστοποίησης έχουν πραγματοποιηθεί από τη Δημουλά (2022) και τον Yarmoohammadi (2023) στη μεταπτυχιακή και διδακτορική διατριβή τους, αντιστοίχως, καθώς και από τους Kassas et. al. (2022). Αυτές θα παρουσιαστούν λίγο πιο εκτενώς παρακάτω:

2.5.1 Εργασία της Δημουλά (2022)

Η Δημουλά (2022) στη μεταπτυχιακή της εργασία προσπάθησε με μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων σε λογισμικό πεπερασμένων διαφορών, να ποσοτικοποιήσει το πρόβλημα του SSSI και να εντοπίσει τις κύριες παραμέτρους που το διέπουν, καθώς και την επιρροή που αυτές έχουν σε καθιζήσεις Z και στροφές θ . Στο Σχήμα 2.7 δίνεται η τυπική διάταξη των αριθμητικών αναλύσεων της Δημουλά (2022).



Σχήμα 2.7: Τυπική διάταξη αριθμητικών αναλύσεων της Δημουλά (2022)

Το εδαφικό προφίλ που εξετάστηκε ήταν αργιλική επιφανειακή στρώση («κρούστα») επί ρευστοποιήσιμης στρώσης με πάχη 2m και 8m αντίστοιχα, καθώς και αρμονική διέγερση με $a_{max}=0.2g$ και $T=0.35$ sec. Τα πάχη των στρώσεων καθώς και τα χαρακτηριστικά της διέγερσης δεν εξετάστηκαν παραμετρικά. Αντιθέτως, εξετάστηκε η απόσταση D μεταξύ των θεμελίων, τα πλάτη B των θεμελίων, τα φορτία q των ανωδομών καθώς και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής κρούστας S_u .

Καθιζήσεις

Σε όρους καθιζήσεων, η Δημουλά (2022) έδειξε ότι η αλληλεπίδραση θεμελίων με $q = 50 \text{ kPa}$ είναι πάντοτε ευμενής ($Z_{SSSI}/Z < 1$), όπου Z_{SSSI} είναι η καθίζηση γειτονικών κατασκευών. Μονάχα φορτία $q > 100 \text{ kPa}$ στενών θεμελίων επί προφίλ άμμου χωρίς αργιλική κρούστα και μπορούν να εμφανίσουν δυσμενή αλληλεπίδραση ($Z_{SSSI}/Z > 1$).

Για συνήθη φορτία (50-100 kPa) η αλληλεπίδραση τείνει να μηδενιστεί ($Z_{SSSI}/Z \rightarrow 1$) σε απόσταση $D=20\text{m}$. Γενικά για ευρέα θεμέλια, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση D , τόσο μειώνεται η αλληλεπίδραση, ενώ για στενά θεμέλια μπορεί η μέγιστη αλληλεπίδραση να εμφανιστεί και σε ενδιάμεσα D . Πάντως, η αλληλεπίδραση τείνει να μηδενιστεί σε απόσταση $D/B = 4$.

Όσο μειώνεται ο λόγος B/B_n (όπου B το πλάτος του εξεταζόμενου θεμελίου και B_n το πλάτος του γειτονικού θεμελίου), τόσο ευμενέστερη είναι η αλληλεπίδραση για το θεμέλιο πλάτους B . Δηλαδή, το στενό θεμέλιο ακολουθεί την απόκριση του ευρέος θεμελίου και οι καθιζήσεις του μειώνονται σε σχέση με την ύπαρξη δίδυμου θεμελίου ή σε σχέση με το μεμονωμένο θεμέλιο. Αντίθετα, η απόκριση του ευρέος θεμελίου είναι παρόμοια με την απόκριση ενός μεμονωμένου θεμελίου (δεν επηρεάζεται από το γειτονικό στενό θεμέλιο).

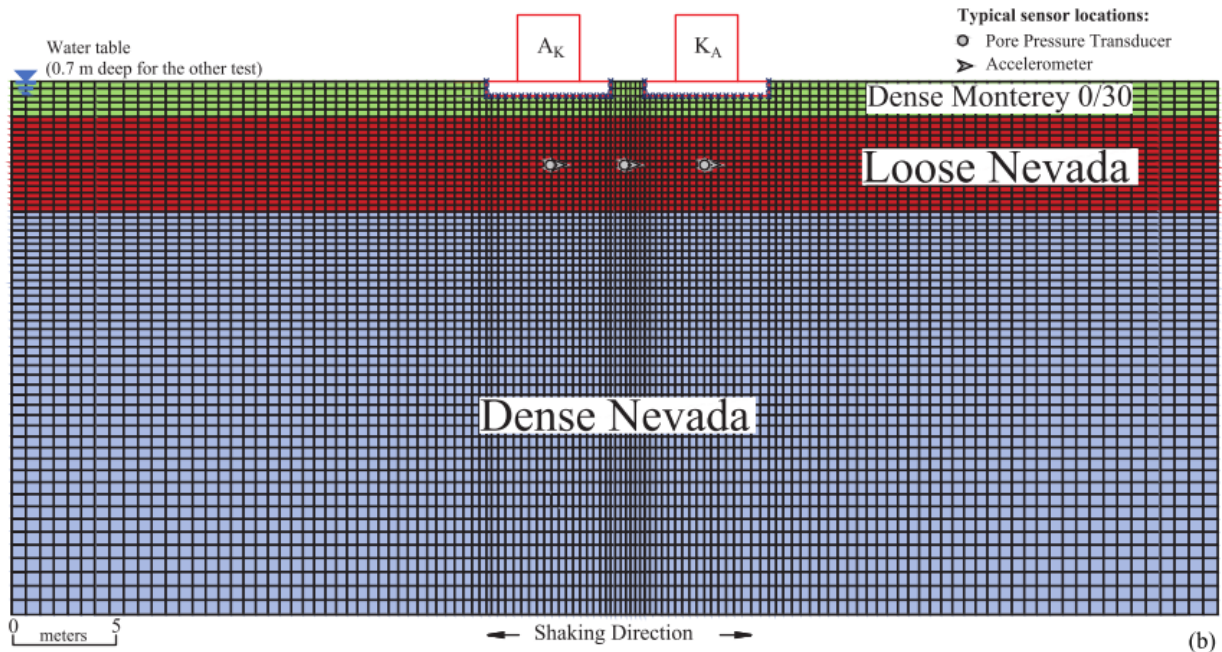
Ο λόγος q/q_n επιδρά αλλά όχι όσο ο λόγος B/B_n ή η απόσταση D . Η μείωση του λόγου είναι πάντα ευμενής για το εξεταζόμενο θεμέλιο, εφόσον αυτό είναι ευρύ. Αν αυτό είναι στενό, τότε για μεγαλύτερα B_n η αλληλεπίδραση είναι ευμενής, ενώ για μικρότερα B_n η αλληλεπίδραση είναι δυσμενής. Αν αυξηθεί το q του εξεταζόμενου θεμελίου τότε το Z_{SSSI} αυξάνεται άρα η αλληλεπίδραση τείνει να γίνει δυσμενέστερη. Τέλος, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της «κρούστας», για μικρότερη διατμητική αντοχή S_u , το Z_{SSSI} αυξάνεται.

Στροφές

Τα ευρέα θεμέλια παρουσιάζουν πρακτικά μηδενικές στροφές σε κάθε περίπτωση. Για στενά θεμέλια οι στροφές τείνουν να μηδενιστούν πάλι σε απόσταση $D=20\text{m}$ ή $D/B=4$. Σε μικρές αποστάσεις ($D/B < 1$) οι στροφές είναι συγκλίνουσες, ενώ σε ενδιάμεσες αποστάσεις ($1 < D/B < 4$) οι στροφές είναι αποκλίνουσες. Όσο μειώνεται ο λόγος B/B_n οι στροφές γίνονται όλο και πιο αποκλίνουσες.

2.5.2 Εργασία του Yarmohammadi (2023)

Ο Yarmohammadi (2023) στη διδακτορική του διατριβή προσπάθησε να ποσοτικοποιήσει παραμετρικά όλες τις παραμέτρους που διέπουν το πρόβλημα του SSSI σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.



Σχήμα 2.8: Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε από τον Yarmohammadi (2023)

Η διάταξη, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.8**, αποτελείται από μια πυκνότερη επιφανειακή στρώση (μη-ρευστοποιήσιμη, η οποία λειτουργεί με παραπλήσια λογική με μια αργιλική «κρούστα») και μια ενδιάμεση ρευστοποιήσιμη στρώση, ενώ η ανάλυση έγινε σε περιβάλλον FLAC 2D (όπως και της Δημουλά 2022). Ο Yarmohammadi (2023) εξέτασε την απόκριση σε όρους καθιζήσεων και στρωφών συναρτήσεων χαρακτηριστικών της διέγερσης (ένταση), της κατασκευής (απόσταση, φορτίο, πλάτος, ιδιοπερίοδος) και του εδάφους (πάχος και βάθος ρευστοποιήσιμης στρώσης), με τιμές που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.9**.

Structure	Bearing pressure (kPa)	Fixed-base period (s)	Deck centre of mass (m)*	Foundation width (m)	Foundation length (m)
A	65	0.33	3.9	6.0	9.0
K	180	0.38	3.9	6.0	9.0
J	180	0.85	15.0	7.5	7.5

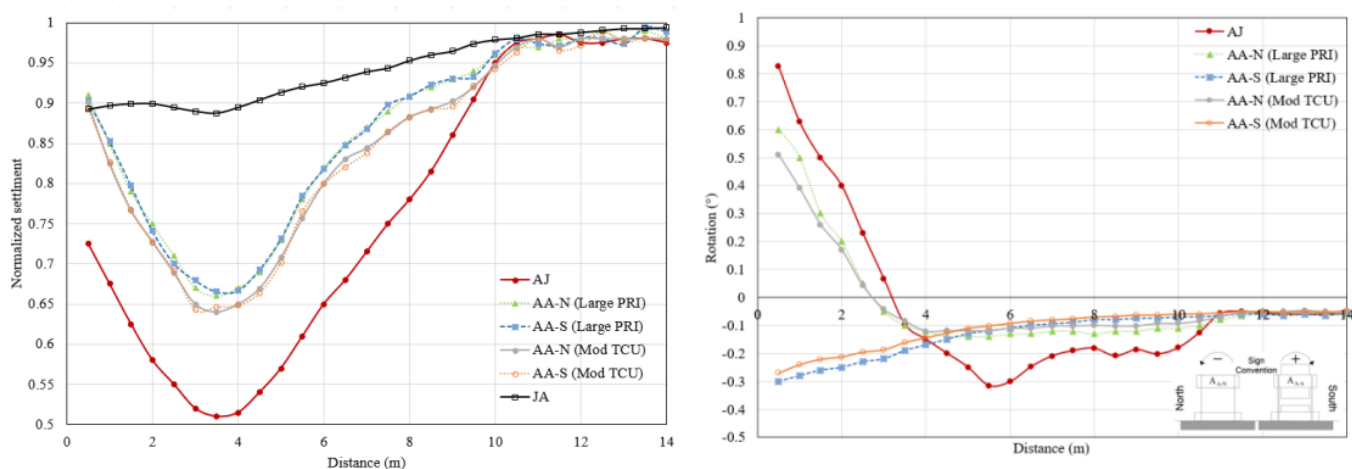
* Measured from the bottom of the foundation

Σχήμα 2.9: Χαρακτηριστικά των κατασκευών στις αναλύσεις του Yarmohammadi (2023)

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παραμετρική διερεύνηση παρουσιάζονται παρακάτω.

Απόσταση Θεμελίων D

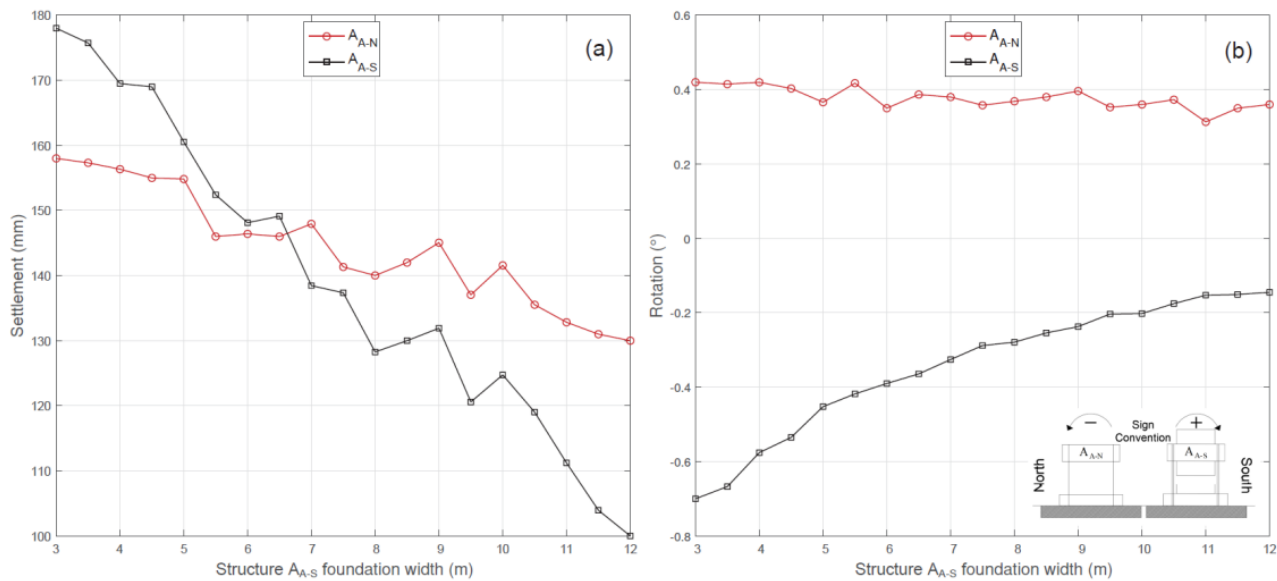
Σε ζεύγος κατασκευών AA (ελαφριές), η μέγιστη αλληλεπίδραση (θετική, σε όρους καθιζήσεων) εμφανίστηκε σε απόσταση $D = B/2$, ενώ για απόσταση $D = 2B$ αυτή μηδενίστηκε. Σε ζεύγος κατασκευών AJ (ελαφριά-βαριά), η αλληλεπίδραση είναι ισχυρότερη (λόγω της επιρροής του J). Σε απόσταση $D = B/2$, το A στρέφεται προς το J, ενώ σε απόσταση $D = 2B$ το A στρέφεται από την άλλη πλευρά. Σε όρους στροφών, η μέγιστη στροφή, καθ' απόλυτη τιμή, παρατηρείται στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κατασκευών. Η συμπεριφορά της βαριάς κατασκευής J δεν δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά με την απόσταση. Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν, μεταξύ άλλων, από τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.10.



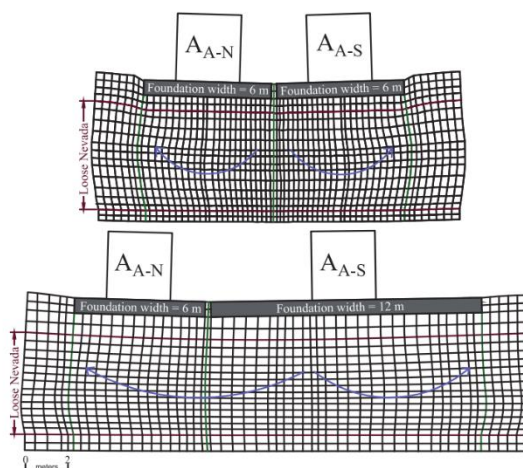
Σχήμα 2.10: Διαγράμματα Απόστασης Θεμελίων-Καθιζήσεων και Απόστασης Θεμελίων-Στροφών κατά τον Yarmoahmadi (2023)

Πλάτος Θεμελίου B

Για να ελεγχθεί η επίδραση του πλάτους B αποφασίστηκε να ελεγχθούν δυο κατασκευές A (ίδιο φορτίο και γεωμετρικά χαρακτηριστικά) και το πλάτος της μίας εκ των δύο να αλλάζει από 3-12m ενώ το πλάτος της άλλης να μένει σταθερό στα 6m (Σχήμα 2.11). Παρατηρήθηκε πως η αύξηση του πλάτους B μειώνει τις καθιζήσεις και των δύο κατασκευών (ακόμα ισχυρότερα όμως της AAs, δηλαδή της κατασκευής με το μεταβαλλόμενο πλάτος). Σύμφωνα με τον Yarmoahmadi (2023), αυτό συμβαίνει διότι όταν οι κατασκευές έχουν ίδιο πλάτος, το έδαφος ανάμεσα τους μένει πρακτικά ανεπηρέαστο, ενώ όταν αυξάνεται το ένα εκ των πλατών, το έδαφος ανάμεσά τους κινείται και συνεπώς ανασηκώνεται κάτω από το στενό θεμέλιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Άρα, όσο αυξάνεται το B, οι καθιζήσεις μειώνονται και στις δυο κατασκευές, ενώ οι στρόφες μειώνονται κυρίως στο θεμέλιο με το μεταβαλλόμενο πλάτος (στη γειτονική κατασκευή μένουν πρακτικά ίδιες οι στρόφες).



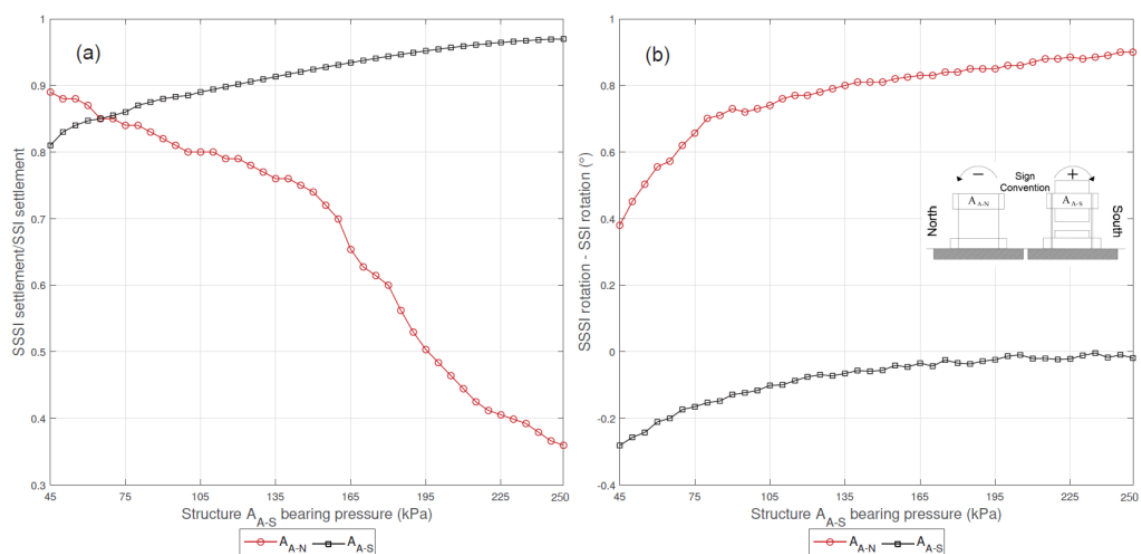
Σχήμα 2.11: Διαγράμματα Πλάτους Θεμελίου-Καθιζήσεων και Πλάτους Θεμελίων-Στροφών κατά τον Υαρμοηαμμάδι (2023)



Σχήμα 2.12: Μηχανισμός «ανασηκώματος» του εδάφους κάτω από το στενό θεμέλιο, όταν βρίσκεται πλησίον ευρέος θεμελίου (Υαρμοηαμμάδι 2023)

Φορτίο Ανωδομής q

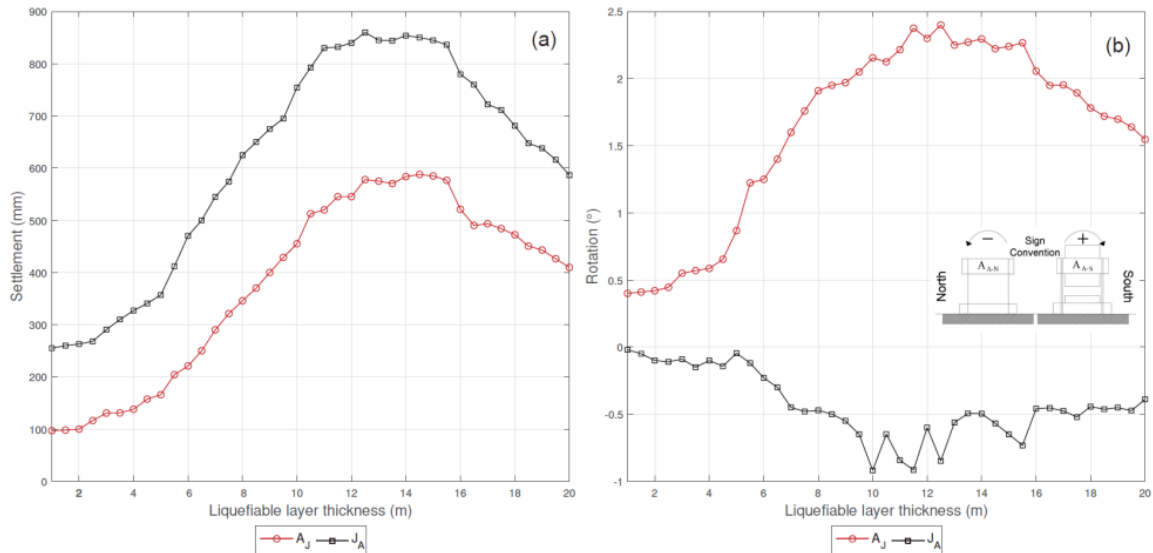
Και πάλι ελέγχεται διάταξη AA με το φορτίο της μιας κατασκευής σταθερό στα 65 kPa και το φορτίο της άλλης να αλλάζει από 45-250 kPa. Όσο μεγαλώνει το φορτίο της γειτονικής κατασκευής (δηλαδή ο λόγος q/q_n μειώνεται) δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφορά στις καθιζήσεις της AAs (της κατασκευής δηλαδή με το μεταβλητό φορτίο) σε σχέση με αυτές μιας μεμονωμένης κατασκευής. Παρόλα αυτά, παρατηρείται σημαντική μείωση των καθιζήσεων της κατασκευής με το σταθερό φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Σε όρους στροφών, οι στροφές της κατασκευής μεταβλητού φορτίου τείνουν να μειωθούν, αλλά πρακτικά δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μιας και τείνουν να εξισωθούν με αυτές του μεμονωμένου θεμελίου. Όσον αφορά στην κατασκευή σταθερού φορτίου, οι στροφές της αυξάνονται σημαντικά (και είναι συγκλίνουσες).



Σχήμα 2.13: Διαγράμματα Φορτίου Θεμελίου-Καθιζήσεων και Φορτίου Θεμελίου-Στροφών κατά τον Yarmohammadi (2023)

Πάχος Ρευστοποιήσιμης Στρώσης

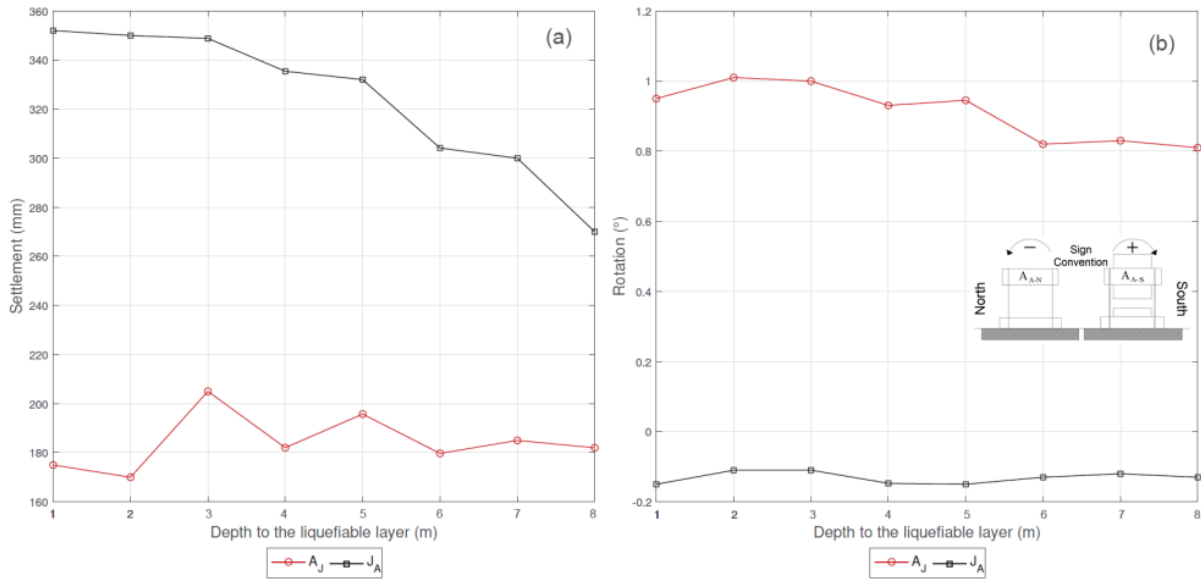
Υπάρχουν δυο κρίσιμα πάχη που επηρεάζουν το πρόβλημα. Το h_{liq} το οποίο ορίζει το πόσο πάχος έχει η στρώση της ρευστοποιήσιμης άμμου (2^η στρώση) και το d_{crust} που ορίζει πόσο πάχος έχει η στρώση της επιφανειακής μη-ρευστοποιήσιμης άμμου (δηλαδή πόσο βαθιά αρχίζει η ρευστοποιήσιμη στρώση). Εδώ, ο Yarmohammadi (2023) δούλεψε με συνδυασμό AJ (ελαφριά-βαριά) και έγινε ανάλυση για h_{liq} από 1-20m. Στο Σχήμα 2.14 παρατηρείται ότι στο εύρος $h_{liq} = 1-13m$, οι καθιζήσεις και οι στροφές (πιο έντονα στο A) αυξάνουν με αύξηση του h_{liq} . Αυτό συμβαίνει γιατί όσο αυξάνει το πάχος της στρώσης, τόσο αυξάνει ο όγκος κορεσμένου εδάφους που κινείται προς το ελεύθερο πεδίο, και τόσο εμποδίζεται η κατακόρυφη αποστράγγιση. Στο εύρος $h_{liq} = 13-20m$ παρατηρείται ακόμα και μείωση των καθιζήσεων και των στροφών, γιατί η ρευστοποίηση της παχιάς στρώσης πλέον λειτουργεί ως φυσική μόνωση (base isolator), προστατεύοντας τα θεμέλια από τη διέγερση (π.χ. Bouckovalas et al. 2016).



Σχήμα 2.14: Διαγράμματα πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης h_{liq} -Καθιζήσεων θεμελίων και πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης h_{liq} -Στροφών θεμελίων κατά τον Yarmohammadi (2023)

Πάχος Μη-Ρευστοποιήσιμης Επιφανειακής Στρώσης

Το πάχος της μη-ρευστοποιήσιμης επιφανειακής στρώσης ή αλλιώς το πάχος μέχρι την ρευστοποιήσιμη στρώση θα οριστεί ως d_{crust} . Και πάλι εξετάζεται ζεύγος κατασκευών AJ και εύρος d_{crust} από 1-8m. Για το J, όσο αυξάνεται το d_{crust} οι καθιζήσεις μειώνονται γιατί πλέον ο επηρεάζεται λιγότερο η βαθύτερη στρώση και συνεπώς εκτοπίζεται μικρότερος όγκος εδάφους στο ελεύθερο πεδίο. Άρα, αλυσιδωτά, το J δεν εκτοπίζει αρκετό έδαφος για να μειώσει δραματικά τις καθιζήσεις του A, και άρα αυτές δεν επηρεάζονται αρκετά. Η επίδραση στις στροφές είναι πρακτικά αμελητέα, αν και παρατηρείται μια μείωση της στροφής της A στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Διαγράμματα πάχους μη-ρυστοποιήσιμης στρώσης d_{crust} -Καθιζήσεων θεμελίων και πάχους μη-ρυστοποιήσιμης στρώσης d_{crust} -Στροφών θεμελίων κατά τον Yarmohammadi (2023)

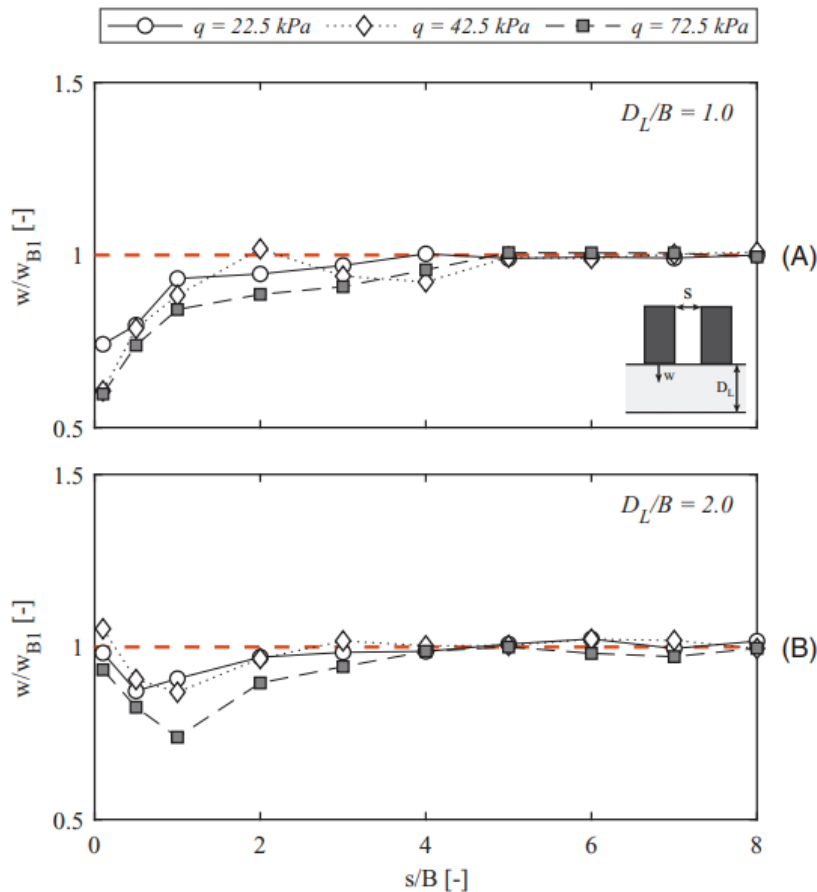
2.5.3 Εργασία των Kassas et. al. (2022)

Οι Kassas et. al. (2022) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της παραμετρικής διερεύνησης διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν το πρόβλημα του SSSI, όχι τόσο συστηματικά βέβαια όσο ο Yarmohammadi (2023) και η Δημουλά (2022). Εξετάσθηκαν δίδυμες κατασκευές με παραμετρική διερεύνηση του φορτίου q , του πάχους ρυστοποιήσιμης στρώσης (ως αδιαστατοποιημένος λόγος) D_L/B και η απόσταση μεταξύ τους (ως αδιαστατοποιημένος λόγος) s/B . Εδώ, δεν διερευνήθηκε η ύπαρξη επιφανειακής μη-ρυστοποιήσιμης στρώσης, συνεπώς οι κατασκευές εδράζονται απευθείας στη ρυστοποιήσιμη στρώση.

Καθιζήσεις

Σε όρους καθιζήσεων, παρατηρήθηκε ότι για μικρό πάχος ρυστοποιήσιμης στρώσης ($D_L/B=1$) μείωση του λόγου s/B οδηγεί σε μείωση των καθιζήσεων της εξεταζόμενης κατασκευής. Εισάγουν την έννοια της στιβαρής στήλης εδάφους κάτω από το θεμέλιο, γιατί αυτό χαρακτηρίζεται από λόγο υπερπίεσης πόρων $\gamma_u < 1$, έναντι του $\gamma_u = 1.0$ (ρυστοποίηση) του ελευθέρου πεδίου. Έτσι, οι στιβαρές στήλες εδάφους κάτω από τα θεμέλια τείνουν να ενοποιηθούν σε μικρές τιμές s/B , οδηγώντας σε μείωση των καθιζήσεων. Βάσει του Σχήματος 2.16, σε $s/B=2$ η αλληλεπίδραση αρχίζει να θεωρείται αμελητέα, μέχρι να μηδενιστεί οριστικά για $s/B=5$. Προφανώς, για ζεύγος βαριών κατασκευών η αλληλεπίδραση αυξάνεται. Για μεγάλο πάχος ρυστοποιήσιμης στρώσης ($D_L/B=2$) τα πράγματα αλλάζουν. Τώρα, όταν τα θεμέλια είναι πολύ κοντά ($s/B < 0.1$) οι

καθιζήσεις δεν μειώνονται αλλά τείνουν να εξισωθούν με τις καθιζήσεις ενός μεμονωμένου θεμελίου μιας και τώρα τα 2 θεμέλια συμπεριφέρονται σαν 1 ευρύτερο. Από $s/B=0.1$ μέχρι και $s/B=1$ παρατηρήθηκε η αναμενόμενη μείωση των καθιζήσεων, ενώ από $s/B \geq 2$ (μέχρι $s/B=5$ όπου μηδενίζεται η αλληλεπίδραση) τα 2 θεμέλια συμπεριφέρονται πρακτικώς ως μεμονωμένα.

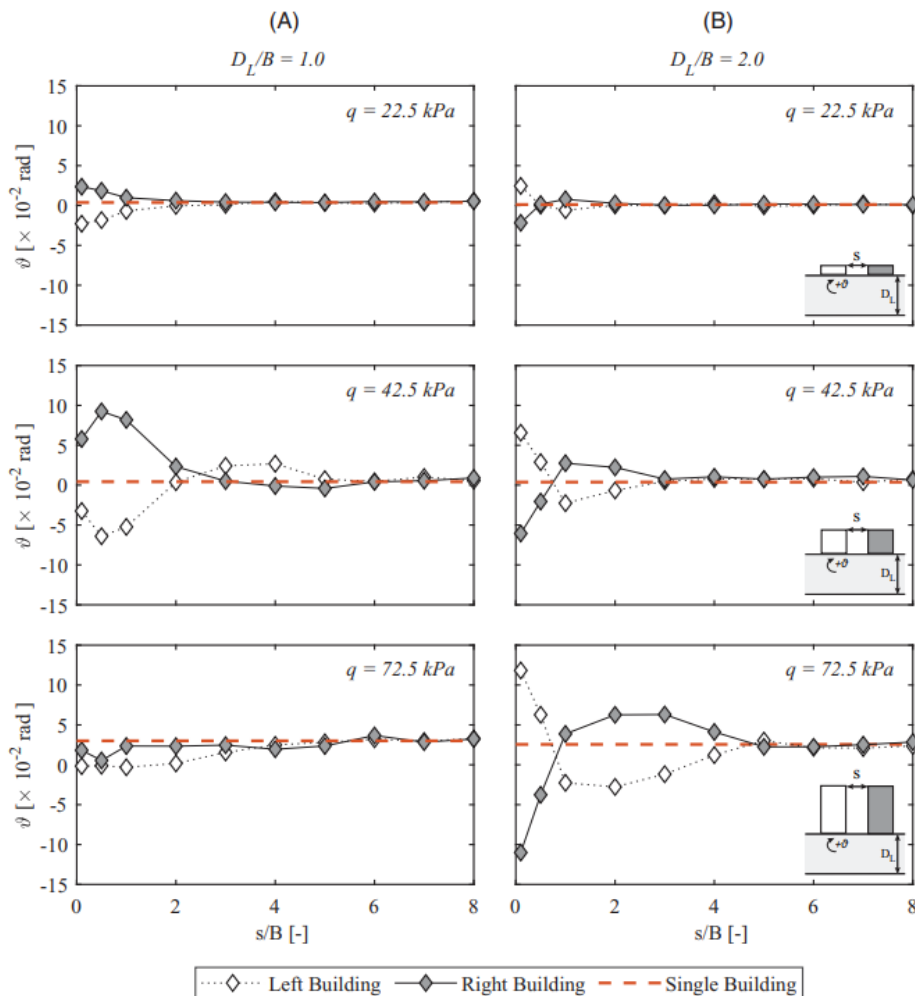


Σχήμα 2.16: Διαγράμματα κανονικοποιημένης απόστασης θεμελίων s/B – λόγου Καθιζήσεων προς Καθιζήσεων μεμονωμένων θεμελίων w/w_B για κανονικοποιημένο πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης τόσο $D_L/B=2$ όσο και $D_L/B=4$ κατά τους Kassas et. al. (2022)

Στροφές

Και πάλι, μια απόσταση $s/B=5$ αρκεί για μηδενισμό της αλληλεπίδρασης τόσο για μικρό όσο και για μεγάλο πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης. Σε αντίθεση όμως με τις καθιζήσεις όπου η αλληλεπίδραση είναι θετική, σε όρους στροφών η αλληλεπίδραση σχεδόν πάντα είναι αρνητική. Γενικά, αύξηση του q (και στις δυο κατασκευές) σε κάθε περίπτωση προκαλεί μείωση των στροφών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.17. Γενικά, τόσο για λεπτή όσο και για παχιά ρευστοποιήσιμη στρώση οι στροφές αυξάνουν σε μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις. Ια $D_L/B=1$, σε κάθε περίπτωση οι στροφές είναι αποκλίνουσες ενώ για $D_L/B=2$,

για $s/B < 1$ οι στροφές είναι συγκλίνουσες και για $s/B > 1$ αποκλίνουσες. Για $s/B > 2$ η αλληλεπίδραση θεωρείται αμελητέα.



Σχήμα 2.17: Διαγράμματα $s/B-\theta$ για διαφορετικά D_L/B και q κατά τους Kassas et. al. (2022)

2.6 Στόχος παρούσας εργασίας

Η έρευνα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα επικεντρωθεί στο πρόβλημα της Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (SSSI) σε ρευστοποιήσιμο έδαφος υπό επιφανειακή μη-ρευστοποιήσιμη αργιλική κρούστα. Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από τις αναλύσεις της Δημουλά (2022) τα οποία είναι διαθέσιμα, ενώ θα διεξαχθούν νέες αναλύσεις που θα αφορούν παραμέτρους που δεν διερευνήθηκαν διεξοδικά σε εκείνη την εργασία και βάσει της βιβλιογραφικής έρευνας έδειξαν να έχουν σημαντική επιρροή στην απόκριση σε όρους καθιζήσεων και στροφών ενός θεμελίου που επηρεάζεται από γειτονικό του. Συγκεκριμένα, θα γίνουν αναλύσεις αντίστοιχης λογικής με εκείνες της Δημουλά (2022), αλλά για διαφορετικές τιμές πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης. Επιπλέον θα γίνουν στοχευμένες αναλύσεις για πληρέστερη μελέτη όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν το πρόβλημα της SSSI. Έτσι, θα

συμπληρωθεί η βάση δεδομένων με αποτελέσματα και από τις δύο εργασίες, ώστε να αποτελέσει το όχημα για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της SSSI πάνω στο λόγο καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z κυρίως, και δευτερευόντως πάνω στις στροφές θ. Συνεπώς, αυτή η ποσοτικοποίηση θα αποτελέσει εργαλείο για να χρησιμοποιηθεί μαζί με οποιαδήποτε μέθοδο εκτίμησης καθιζήσεων Z μεμονωμένης κατασκευής (π.χ. Karamitros et al. 2013, Bray and Macedo 2017, Shahir and Pak 2010) , ώστε να προκύπτει η τιμή της αναμενόμενης καθίζησης γειτονικών κατασκευών.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

3.1 Εισαγωγή

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιαστούν τα αναγκαία στοιχεία για την αριθμητική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία έκανε χρήση του FLAC 2D, που είναι ένας κώδικας πεπερασμένων διαφορών που προσομοιώνει τη συμπεριφορά κατασκευών από έδαφος, βράχο ή άλλα υλικά. Κάθε στοιχείο του καννάβου ακολουθεί έναν προκαθορισμένο ελαστικό ή ανελαστικό καταστατικό νόμο τάσεων/παραμορφώσεων. Αυτοί οι καταστατικοί νόμοι είτε είναι ενσωματωμένοι στο λογισμικό (π.χ. προσομοίωμα Mohr-Coulomb), είτε εισάγονται από τον χρήστη (π.χ. NTUA-SAND των Andrianopoulos et al. 2010). Λόγω της φύσης του προβλήματος που εξετάζεται, στην εργασία αυτή το εδαφικό προφίλ αποτελείται από μια επιφανειακή αργιλική κρούστα (πάχους 2m), μια στρώση ρευστοποιήσιμης άμμου (πάχους 4m ή 8m) και (μονάχα στις περιπτώσεις της ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχους 4m) μια στρώση αδιαπέρατης αργίλου βάσης (πάχους 4m) που δεν αστοχεί. Έτσι, στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται το πως προσομοιώθηκαν τα εδαφικά υλικά στην παρούσα εργασία.

3.2 Καταστατική προσομοίωση εδαφικών υλικών

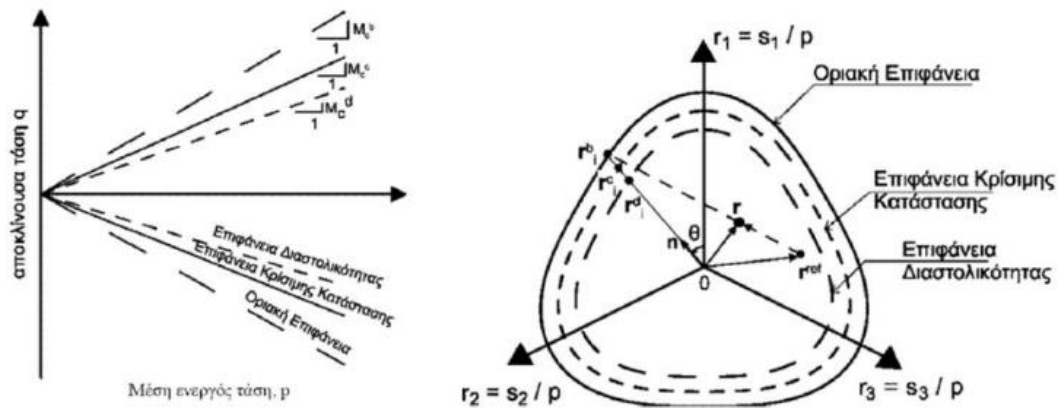
3.2.1 Ρευστοποιήσιμη άμμος

Για να προσομοιωθεί η απόκριση της στρώσης ρευστοποιήσιμης άμμου αποφασίσθηκε η χρήση ενός εξειδικευμένου και σοφιστευμένου καταστατικού προσομοιώματος. Αυτό ήταν το NTUA-Sand που δημιουργήθηκε από τον Τομέα Γεωτεχνικής του ΕΜΠ και συγκεκριμένα τους Papadimitriou & Bouckovalas (2002) και τους Andrianopoulos (2006) και Karamitros (2010) στις διδακτορικές τους διατριβές. Σκοπός του είναι η προσομοίωση της απόκρισης μη-συνεκτικών εδαφών σε συνθήκες μικρών, μεσαίων και μεγάλων παραμορφώσεων καθώς και ρευστοποίησης τόσο υπό ανακυκλική διάτμηση όσο και υπό μονοτονική φόρτιση.

Το προσομοίωμα είναι βασισμένο στη Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης και τα χαρακτηριστικά του γνωρίσματα μπορούν να συνοψισθούν παρακάτω:

- Θεωρούνται τρεις επιφάνειες στον τασικό χώρο, η Επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης, η Οριακή Επιφάνεια και η Επιφάνεια Διαστολικότητας, οι οποίες παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.1**. Αυτές παριστάνουν τον λόγο αποκλινοσών τάσεων σε τρία χαρακτηριστικά σημεία, δηλαδή της κρίσιμης κατάστασης, της οριακής αντοχής και της αλλαγής φάσης (συστολή-διαστολή) αντιστοίχως.

- Οι κλίσεις των Επιφανειών Οριακής Επιφάνειας (M_c^b) και Διαστολικότητας (M_c^d) ορίζονται μέσω της παραμέτρου ψ ($\psi = e - e_{cs}$, όπου e είναι ο δείκτης πόρων και e_{cs} ο δείκτης πόρων στην κρίσιμη κατάσταση, υπό ίδια μέση ενεργό τάση p). Η κλίση της Επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης είναι παράμετρος εισόδου του προσομοιώματος (M_c^c).



Σχήμα 3.1: Οι τρεις Επιφάνειες που ορίζονται στο NTUA-SAND (Andrianopoulos et. al. (2010))

Ως άμμος θεωρήθηκε η Nevada Sand, καθώς το προσομοίωμα NTUA-SAND έχει βαθμονομηθεί στο παρελθόν επιτυχώς επί αυτής με βάση δοκιμές φυγοκεντρική (Andrianopoulos et. al. 2010). Συνεπώς οι τιμές των παραμέτρων εισόδου του NTUA-SAND για αυτή την άμμο δεν χρειάζεται να επαναληφθούν εδώ. Αυτό που έχει σημασία να αναφερθεί είναι ποιες παράμετροι κατάστασης της άμμου (τύπου Nevada) θεωρήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αυτές συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.1:

Παράμετρος	Τιμή
Σχετική Πυκνότητα D_r (%)	45
Δείκτης Πόρων e	0.7178
Ξηρή Πυκνότητα ρ_s (Mg/m^3)	1.554
Διαπερατότητα k (m/s)	$6.5 \cdot 10^{-5}$

Πίνακας 3.1: Παράμετροι κατάστασης της ρευστοποιήσιμης άμμου (τύπου Nevada)

3.2.2 Επιφανειακή αργιλική στρώση

Για την προσομοίωση της επιφανειακής αργίλου χρησιμοποιήθηκε το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Εξετάστηκαν δυο διαφορετικές αργιλικές κρούστες, μια με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $S_u = 20 \text{ kPa}$ και μια με $S_u = 40 \text{ kPa}$. Σε κάθε περίπτωση, οι

γωνίες τριβής ϕ και διαστολικότητας ψ θεωρήθηκαν μηδενικές, σε εφελκυσμό η αντοχή περιορίζεται σε μια τιμή $S_u/2$ (tension cutoff), το μέγιστο μέτρο διάτμησης G_{max} υπολογίστηκε εμπειρικά ως $1500 \cdot S_u$, ενώ, λόγω ανακυκλικής παραμόρφωσης, κατά τη διάρκεια δυναμικών φορτίσεων υπήρξε απομείωση του μέτρου διάτμησης στο 50% της τιμής G_{max} . Βάσει των παραπάνω, τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής αργίλου ήταν τα παρακάτω

Παράμετρος	Τιμή
Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή S_u (kPa)	20 / 40
Γωνία Τριβής ϕ (°)	0 / 0
Γωνία Διαστολικότητας ψ (°)	0 / 0
Μέγιστο Μέτρο Διάτμησης G_{max} (MPa)	30 / 60
Μέτρο Διάτμησης G (MPa)	15 / 30
Συντελεστής Διαπερατότητας k (m/s)	$6.5 \cdot 10^{-9}$ / $6.5 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας 3.2: Παράμετροι εισόδου και κατάστασης της επιφανειακής αργιλικής στρώσης

3.2.3 Αργιλική στρώση βάσης

Στις περιπτώσεις που η ρευστοποιήσιμη στρώση ήταν πάχους 4m, στη βάση του εδαφικού προφίλ υπήρχε αργιλική στρώση πάχους 4m που δεν ρευστοποιείται, ούτε επιτρέπει την στράγγιση. Επιπλέον θεωρείται ότι δεν αστοχεί, απλά μεταδίδει τη σεισμική διέγερση από τη βάση του καννάβου στην υπερκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση. Συνεπώς, για τη στρώση αυτή θεωρήθηκε ελαστικό προσομοίωμα (Γραμμική Ισότροπη Ελαστικότητα), με $\rho_{κορ} = 2$ και ταχύτητα διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων $V_s = 300\text{m/s}$, λόγω Poisson $\nu=0.3$ Και συντελεστή διαπερατότητας $k = 6.5 \cdot 10^{-5}$ m/s όπως ακριβώς και η επιφανειακή αργιλική στρώση.

3.3 Προσομοίωση θεμελίων

Σε συνέπεια με τη Δημουλά (2022), δεν προσομοιώθηκαν κατασκευές κάποιου ύψους και στιβαρότητας, αλλά η θεμελίωσή τους. Με δεδομένο ότι οι αναλύσεις είναι 2Δ επίπεδης παραμόρφωσης, πρόκειται για θεμελιολωρίδες αμελητέου βάρους, αλλά οριζοντίως άκαμπτες. Το βάρος της κατασκευής λαμβάνεται υπόψη ως ομοιόμορφη επιφόρτιση q (kPa). Συγκεκριμένα, θεωρήθηκαν θεμελιολωρίδες δεδομένου πλάτους B (5m και 20m), οι

οποίες φορτίζονται με κατακόρυφη δύναμη $Q=q*B$ (kN/m) ανά μονάδα μήκους του θεμελίου.

Τα θεμέλια προσομοιώθηκαν με χρήση εδαφικών στοιχείων (zones) ιδίων διαστάσεων με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του εδάφους για λόγους υπολογιστικής ταχύτητας. Λόγω της μη-αστοχίας τους, θεωρήθηκαν ελαστικά, και για να επιτευχθεί η οριζόντια ακαμψία τους υιοθετήθηκαν μεγάλες τιμές των ελαστικών σταθερών (G και K). Λόγω της πλήρους σύνδεσης των στοιχείων των θεμελίων με τα στοιχεία του εδάφους, τα θεμέλια ήταν απολύτως τραχιά. Τέλος, η διαπερατότητα k τους ορίστηκε τέτοια ώστε να είναι αδιαπέρατα, ενώ η πυκνότητα ρ τους θεωρήθηκε ευλόγως μικρή ώστε να μην αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις λόγω της διέγερσης. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης των «ελαστικών» θεμελίων, απ' όπου προκύπτει ότι οι τιμές των G και K επιλέχθηκαν ώστε να αποφευχθεί κάμψη (bending) των θεμελίων. Για αυτόν τον λόγο είναι ισοπλάσιες για $B=20m$ από ότι για $B=5m$, ώστε να εξασφαλιστεί η ακαμψία τους παρόλο το μεγαλύτερο πλάτος. Οι εν λόγω τιμές δεν ελήφθησαν ακόμη μικρότερες, καθώς αυτό θα είχε δυσμενή επίδραση στον υπολογιστικό χρόνο, αλλά βρέθηκαν επαρκείς για την εξασφάλιση της «ακαμψίας».

Παράμετρος	Τιμή
Πλάτος B (m)	5 / 20
Μέτρο Διάτμησης G (MPa)	1 / 10
Μέτρο Ισότροπης Συμπίεσης K (MPa)	2 / 20
Πυκνότητα ρ (Mgr/m ³)	0.2 / 0.2
Συντελεστής Διαπερατότητας k (m/s)	$6.5*10^{-10}$ / $6.5*10^{-10}$

Πίνακας 3.3: Τα χαρακτηριστικά των θεμελίων

3.4 Χαρακτηριστικά προσομοίωσης συνεχούς μέσου

3.4.1. Διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών

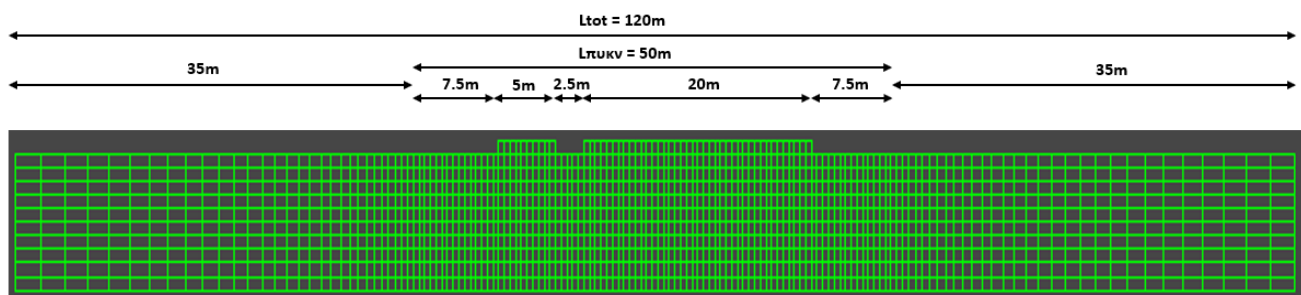
Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την εκτέλεση παραμετρικών διερευνήσεων ως προς μια σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του πλάτους B και της ενδιάμεσης απόστασης D των θεμελίων. Αυτά τα δύο μεγέθη, όπως είναι αναμενόμενο, επηρεάζουν την οριζόντια διάσταση του καννάβου πεπερασμένων διαφορών. Όσο μεγαλώνουν οι τιμές των D και B τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η οριζόντια διάσταση ώστε τόσο πιο μακριά να είναι τα σύνορα του καννάβου και να μην επηρεάζουν τη συμπεριφορά των θεμελίων. Η κατακόρυφη διάσταση του μοντέλου έμεινε πάντοτε σταθερή και ίση με 10m, ανεξαρτήτως εδαφικού τύπου. Ο κάνναβος δεν είναι ομοιόμορφος, αλλά έχει πύκνωση στην ευρύτερη περιοχή των δύο θεμελίων συμπεριλαμβάνοντας πάντα και την μεταξύ τους περιοχή.

Έτσι, ανάλογα με τον συνδυασμό θεμελίων της κάθε περίπτωσης (5m-5m, 5m-20m, 20m-20m, 5m, 20m) ο κάναβος έχει άλλη οριζόντια διάσταση και οι διαστάσεις του πυκνωμένου (κεντρικού) τμήματος του καννάβου είναι επίσης διαφορετικές. Παρόλα αυτά, η λογική που ακολουθείται είναι κοινή:

- Η περιοχή πύκνωσης του καννάβου εκτείνεται σε πλάτος 7.5m εκατέρωθεν του κάθε θεμελίου, και συμπεριλαμβάνει το πλάτος των θεμελίων και της μεταξύ τους περιοχής.
- Τα στοιχεία της πυκνωμένης περιοχής έχουν διαστάσεις 0.5 x 1.0 όπου 0.5 το πλάτος και 1.0 το ύψος
- Από το πέρασ της πυκνωμένης περιοχής μέχρι τα πλευρικά σύνορα του μοντέλου, το πλάτος αυξάνεται σταδιακά με ρυθμό 1:1.05. Το ύψος μένει πάντοτε σταθερό.
- Η οριζόντια διάσταση του καννάβου υπολογίζεται ως εξής: $L=35+(7.5+B_1+D+B_2+7.5)+35$, όπου B_1 και B_2 είναι τα εύρη των δύο θεμελίων, ενώ τα 35m προστίθενται ως απόσταση μέχρι τα πλευρικά σύνορα για να μην επηρεάζεται η απόκριση της πυκνωμένης περιοχής. Η απόσταση αυτή επιλέχτηκε με το σκεπτικό ο κάναβος να εκτείνεται σε απόσταση τουλάχιστον $3H$ (όπου $H=10m$, το ύψος του μοντέλου) εκατέρωθεν της περιοχής ενδιαφέροντος.

Για παράδειγμα, σε μια περίπτωση ζεύγους θεμελίων $B_1=5m$ και $B_2=20m$ με ενδιάμεση απόσταση $D=10m$, η πυκνωμένη περιοχή έχει πλάτος όσο το πλάτος των θεμελίων και της ενδιάμεσης τους απόστασης και 7.5m εκατέρωθεν. Άρα, $L_{\text{πυκν.}}=50m$. Η συνολική οριζόντια διάσταση του καννάβου σε αυτή την περίπτωση θα είναι $L=120m$ γιατί προστίθενται 35m εκατέρωθεν της πυκνωμένης περιοχής. Συνεπώς ο κάναβος είναι πολύ επιμήκης, αφού έχει ύψος μόλις 10m.

Με βάση τα ανωτέρω, η πυκνωμένη περιοχή διακριτοποιείται σε 100 στοιχεία πλάτους 0.5m (αφού $L_{\text{πυκν.}}=50m$), ενώ οι «μεταβατικές» περιοχές ανάμεσα στην πυκνωμένη περιοχή και τα σύνορα του μοντέλου διακριτοποιούνται σε 30 στοιχεία αυξανόμενου πλάτους (προς τα σύνορα του μοντέλου) η καθεμία. Άρα, στην οριζόντια διάσταση του καννάβου υπάρχουν 160 στοιχεία. Στην κατακόρυφη διάσταση του καννάβου υπάρχουν 11 στοιχεία, μιας και το ύψος κάθε στοιχείου σε όλο το μοντέλο είναι 1m (10m για το έδαφος + 1m για το θεμέλιο). Χάριν παραδείγματος, ο κάναβος για την περίπτωση ενδιάμεσης απόστασης $D=2.5m$ παρουσιάζεται παρακάτω, στο **Σχήμα 3.3**:



Σχήμα 3.3: Ο διακριτοποιημένος κάναβος και οι διαστάσεις του για ζεύγος θεμελίων $B_1=5m$, $B_2=20m$ με ενδιάμεση απόσταση $D=2.5m$

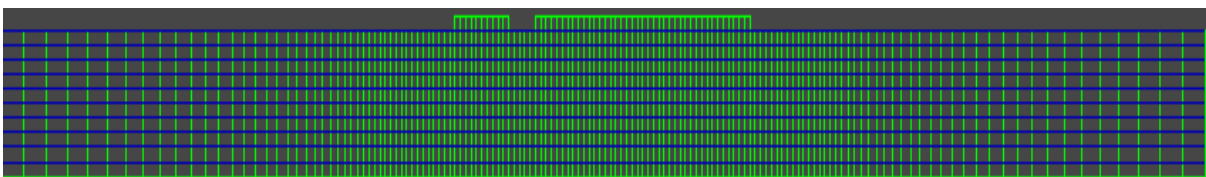
3.4.2. Υπόγειο νερό

Αρχικά, η στάθμη του Υδροφόρου Ορίζοντα (Σ.Υ.Ο.) βρίσκεται πάντοτε στην επιφάνεια του εδάφους. Θεωρείται βαθμός κορεσμού $S_r=1.0$, δηλαδή συνθήκες πλήρους κορεσμού, μιας και εξετάζονται φαινόμενα ρευστοποίησης. Αυτή η στάθμη παραμένει σταθερή στη διάρκεια της δόνησης, αλλά όχι και οι πιέσεις πόρων που παύουν να είναι υδροστατικές όταν ξεκινάει η δόνηση.

3.4.3. Συνοριακές Συνθήκες

Η διαδικασία φόρτισης περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια, τη στατική και τη δυναμική φόρτιση, τα οποία είναι διαδοχικά:

- ❖ Κατά τη διάρκεια της στατικής φόρτισης επιβάλλονται οι γεωστατικές τάσεις του εδαφικού προφίλ και μετά τα φορτία των θεμελίων. Σε αυτό το στάδιο δεσμεύονται οριζοντίως οι δύο ακραίες κατακόρυφες παρειές του καννάβου. Δηλαδή, δεν μπορούν να «συγκλίνουν» μεταξύ τους, σαν να έχει εφαρμοσθεί μια κατακόρυφη κύλιση. Επίσης δεσμεύεται κατακορύφως η χαμηλότερη σειρά κόμβων, σαν να έχει εφαρμοσθεί μια οριζόντια κύλιση. Έτσι επιτρέπονται ελεύθερα οι καθιζήσεις του εδάφους λόγω ιδίου βάρους και της επιφόρτισης των θεμελίων.
- ❖ Κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης αλλάζουν οι συνοριακές συνθήκες. Εδώ ο στόχος είναι οι κόμβοι του ίδιου υψομέτρου να αναπτύσσουν κοινή μετατόπιση κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης, προσομοιώνοντας συνθήκες ελεύθερου πεδίου (free field). Όταν χρησιμοποιείται το NTUA-Sand έχει παρατηρηθεί ότι οι συζευγμένοι κόμβοι (tied nodes) προσομοιώνουν καλύτερα την απόκριση ελεύθερου πεδίου, σε σχέση με την επιλογή χρήσης των συνόρων ff του κώδικα FLAC. Οι συζευγμένοι κόμβοι επιτυγχάνονται ενώνοντας τους δύο ακραίους κόμβους κάθε υψομέτρου με ένα στοιχείο καλωδίου (cable). Το καλώδιο ορίζεται ως αρκετά αβαρές ώστε να μην επηρεάζει το πρόβλημα ($\rho=0.001 \text{ Mgr/m}^3$). Έπειτα, σε κάθε επίπεδο, ο ένας ακραίος κόμβος γίνεται «slave» του άλλου ακραίου, δηλαδή εξαναγκάζονται να έχουν κοινή συμπεριφορά. Ουσιαστικά είναι ένα υπολογιστικό ανάλογο δοκιμών φυγοκεντρική σε laminae box οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την προσομοίωση δυναμικών προβλημάτων σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, μιας και αυτό έχει μεταλλικούς δακτυλίους που είναι ελεύθεροι να μετακινηθούν οριζόντια, χωρίς να αλλάζει η οριζόντια διάστασή τους. Στο Σχήμα 3.4 δίνεται ένα παράδειγμα καννάβου, όπου με μπλε χρώμα εμφανίζεται το «καλώδιο» που συνδέει τους ακραίους κόμβους ίδιου υψομέτρου.

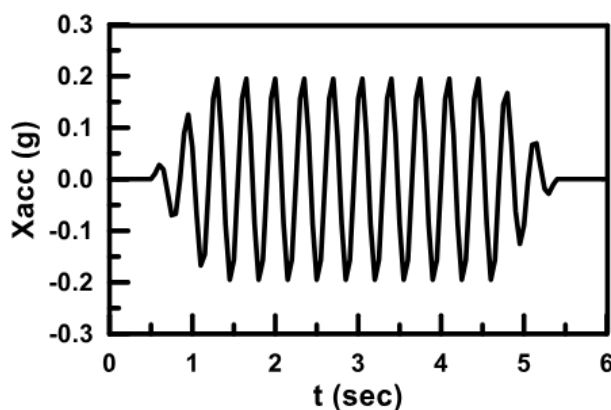


Σχήμα 3.4: Ο κάνναβος με τις συνοριακές συνθήκες Tied Nodes που εφαρμόστηκαν

3.5 Δυναμικά Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης

3.5.1. Σεισμική Διέγερση Βάσης

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θεώρησε ένα είδος διέγερσης και δεν έγινε διερεύνηση για πολλές διαφορετικές διεγέρσεις. Θεωρήθηκε μια αρμονική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.2g$ και περίοδο $T=0.35$ sec με σκοπό να υπάρχει αντιστοιχία με τα αποτελέσματα από τη μεταπτυχιακή εργασία της Δημουλά (2022). Θεωρήθηκε αρμονική διέγερση για λόγους εύκολης ερμηνευσιμότητας (π.χ., γραμμική συσσώρευση καθιζήσεων με τον χρόνο). Θεωρήθηκε $a_{max}=0.2g$ ώστε η διέγερση να είναι αρκετά ισχυρή για να ρευστοποιηθεί μια άμμος μέσης πυκνότητας σχετικά γρήγορα. Θεωρήθηκε $T=0.35$ sec ως μια καλή τιμή για χαλαρά/μαλακά εδάφη, μιας και αποτελεί τη μέση τιμή των «πλατώ» των φασμάτων σχεδιασμού κατηγοριών εδάφους C και E κατά EC8. Επίσης, όντας μια μη-υψίσυχη διέγερση προκαλεί μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις σύμφωνα με τη Θεωρία Ολισθαίνοντος Πρανούς (Newmark, 1965). Ο συνολικός αριθμός κύκλων της διέγερσης ήταν $n=14$, αλλά οι 10 ενδιάμεσοι είχαν σταθερό (και μέγιστο) πλάτος. Οι 2 αρχικοί και οι 2 τελικοί κύκλοι μικρότερης έντασης είχαν σκοπό την ομαλότερη μετάβαση στη μέγιστη επιτάχυνση στην αρχή και στην ηρεμία στο τέλος της διέγερσης. Οι προαναφερθέντες 10 κύκλοι είναι επαρκείς ώστε να καταστεί σαφής η γραμμική συσσώρευση καθιζήσεων με το χρόνο. Η επιτάχυνση εφαρμόστηκε στους κόμβους βάσης του καννάβου και ήταν αποκλειστικά οριζόντια, δηλαδή η κατακόρυφη επιτάχυνση βάσης θεωρήθηκε μηδενική. Η χρονοϊστορία της διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Η χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης της αρμονικής διέγερσης με $a_{max}=0.2g$ και $T=0.35$ sec που χρησιμοποιήθηκε

3.5.2. Απόσβεση

Κάθε ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα προβλέπει υστερητική απόσβεση, οπότε θεωρητικά δεν χρειάζεται πρόσθετη απόσβεση στη δυναμική ανάλυση. Όμως για διάφορους λόγους στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας έχει θεωρηθεί επιπλέον απόσβεση αριθμητικής φύσης. Συγκεκριμένα, όπου χρησιμοποιείται το NTUA-SAND, η πρόσθετη απόσβεση είναι

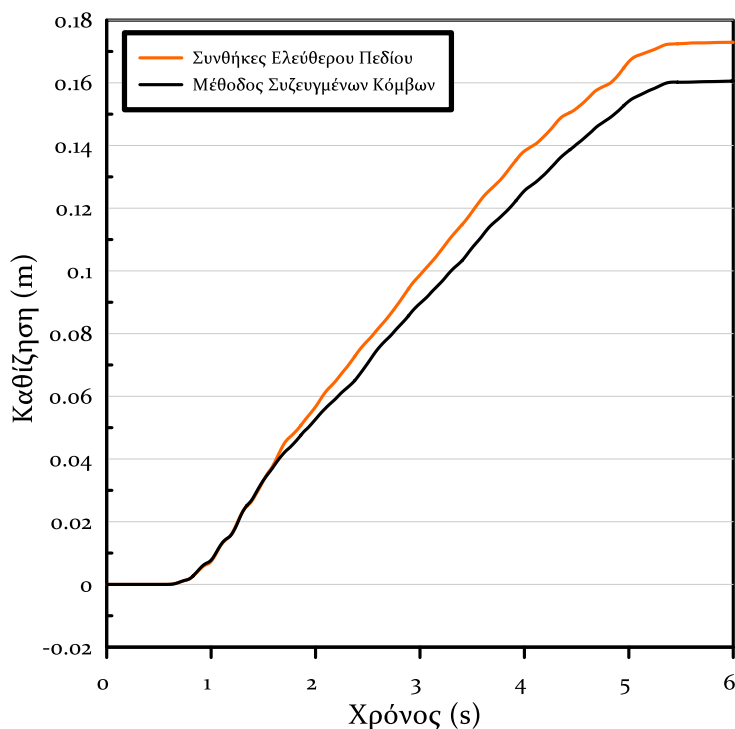
ελάχιστη (2%) γιατί η προβλεπόμενη καταστατικά υστερητική απόσβεση είναι ορθή, με εξαίρεση τις μικρού εύρους ταλαντώσεις όπου υποτιμάται (και για το λόγο αυτό προστίθεται 2%). Για την αργιλική επιφανειακή στρώση (που μπορεί τοπικά να έχει αστοχία, αλλά σε άλλες θέσεις θα παραμένει στην ελαστική κατάσταση) η ανωτέρω τιμή αυξάνεται σε 10%, καθώς το Mohr-Coulomb δεν κάνει ορθή πρόβλεψη της υστερητικής απόσβεσης (πχ. σε μικρές παραμορφώσεις προβλέπει μηδενική απόσβεση). Για την αργιλική στρώση βάσης (όπου δεν προβλέπεται αστοχία), η απόσβεση αριθμητικής φύσης θεωρήθηκε και πάλι η ελάχιστη (2%), η οποία είναι αναγκαία για την απόσβεση ψευδο-ταλαντώσεων αριθμητικής φύσης.

Υιοθετήθηκε τοπική (local) απόσβεση στον κώδικα FLAC, η οποία δεν είναι συνάρτηση της συχνότητας. Έτσι αποφεύχθηκε η χρήση απόσβεσης Rayleigh που θα χρειαζόταν αναβαθμονόμηση ως προς την κυρίαρχη συχνότητα, λόγω ανάλυσης εδαφικών προφίλ με διαφορετική ιδιοσυχνότητα κάθε φορά, γεγονός που θα καθιστούσε δυσχερή τον στόχο να παραμείνουν συγκρίσιμες οι παραμετρικές αναλύσεις μεταξύ τους.

3.6 Διερεύνηση Επάρκειας Αριθμητικής Μεθοδολογίας

3.6.1 Επίδραση συνοριακών συνθηκών

Εδώ διερευνάται η επίδραση χρήσης των «συζευγμένων κόμβων», αντί για τα σύνορα ελευθέρου πεδίου (ff) του κώδικα FLAC στη δυναμική ανάλυση, για το ευρύ πλάτος καννάβου που προαναφέρθηκε. Η ενδεικτική περίπτωση που εξετάστηκε και στις δύο αναλύσεις ήταν η απόκριση μεμονωμένου θεμελίου με $B=5m$, $q=50kPa$ πάνω σε αργιλική «κρούστα» με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $S_u=20kPa$. Στην περίπτωση της χρήσης συζευγμένων κόμβων προέκυψε καθίζηση ίση με $16.4cm$, ενώ στην περίπτωση της χρήσης συνόρων ελευθέρου πεδίου ίση με $17.3cm$ (βλ. Σχήμα 3.6). Όπως φαίνεται, οι καθιζήσεις του θεμελίου είναι πρακτικά ίσες, ανεξαρτήτως των συνόρων που επιλέχθηκαν, με δεδομένο το «μεγάλο» συνολικό πλάτος καννάβου που έχει υιοθετηθεί. Συνεπώς, προτιμάται η χρήση των «συζευγμένων κόμβων», καθώς δεν εμφανίζει τα προβλήματα που έχουν εντοπιστεί στο παρελθόν σε αναλύσεις με σοφιστευμένα καταστατικά προσομοιώματα όπως το NTUA-SAND.



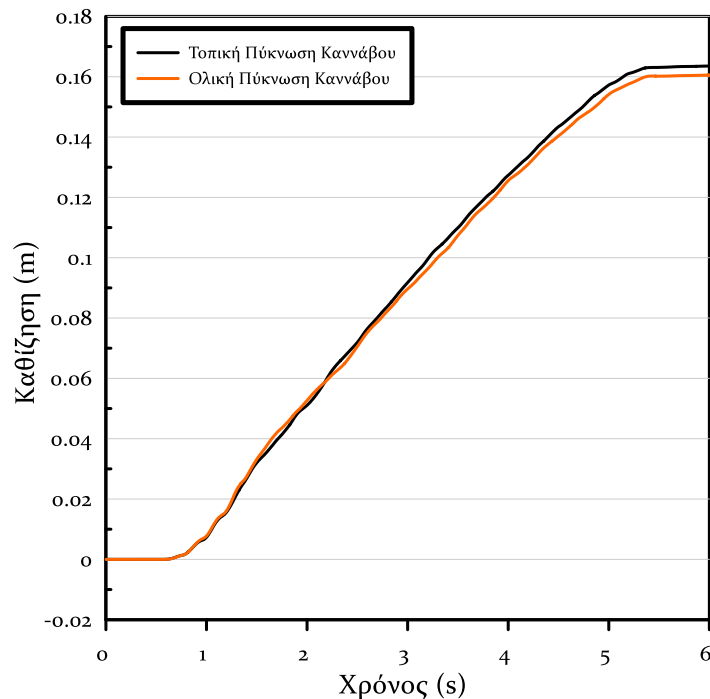
Σχήμα 3.6: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων θεμελίου με χρήση «συζευγμένων κόμβων» και συνόρων ελεύθερου πεδίου σε ανάλυση μεμονωμένου θεμελίου με $B=5m$, $q=50kPa$ πάνω σε αργιλική «κρούστα» με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $S_u=20kPa$

3.6.2 Επίδραση πύκνωσης καννάβου

Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή πύκνωσης του καννάβου που χρησιμοποιήθηκε εκτείνεται σε πλάτος 7.5m εκατέρωθεν του κάθε θεμελίου, ενώ συμπεριλαμβάνει το πλάτος του θεμελίου (και την περιοχή ανάμεσά τους όταν αναλύεται ζεύγος γειτονικών θεμελίων). Τα στοιχεία της πυκνωμένης περιοχής έχουν οριζόντιο πλάτος 0.5m, ενώ από το πέρασ της πυκνωμένης περιοχής μέχρι τα πλευρικά σύνορα του μοντέλου, το οριζόντιο πλάτος αυξάνεται σταδιακά. Το ύψος μένει πάντοτε σταθερό και ίσο με 1m. Αυτό το ύψος στοιχείων έχει αποδειχθεί επαρκές για αναλύσεις ρευστοποίησης σε σύγκριση με πειράματα φυγοκεντριστή (π.χ., Andrianopoulos et al. 2010) και δεν διερευνάται περαιτέρω. Το πλάτος όμως αξίζει διερεύνησης, και ο στόχος της είναι να διαφανεί αν επαρκεί η πύκνωση του καννάβου μόνο στην «περιοχή ενδιαφέροντος» (ευρύτερη των θεμελίων).

Για να επιβεβαιωθεί η επάρκεια της πύκνωσης έγιναν δύο αναλύσεις, μια με την πύκνωση μόνο στην «περιοχή ενδιαφέροντος» και μία όπου η ίδια πύκνωση (πλάτος 0.5m) επεκτείνεται σε όλον τον κάνναβο. Ξανά, η ανάλυση αναφοράς είναι για την ίδια περίπτωση (απόκριση μεμονωμένου θεμελίου με $B=5m$, $q=50kPa$ πάνω σε αργιλική κρούστα με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $S_u=20kPa$). Σύμφωνα με το Σχήμα 3.7, η καθίζηση θεμελίου για τοπική πύκνωση ήταν ίση με 16.4cm, ενώ η καθίζηση για ολική πύκνωση ήταν

ίση 16.1cm. Συνεπώς, οι καθιζήσεις είναι πρακτικά ίσες, και άρα η πιο «συμφέρουσα» υπολογιστικά τοπική πύκνωση είναι προτιμότερη της ολικής πύκνωσης. Επισημαίνεται εδώ ότι το ανωτέρω αποτέλεσμα οφείλεται στο ότι ο μηχανισμός αστοχίας του θεμελίου μέσα στη ρευστοποιημένη άμμο δεν εκτείνεται πολύ πλευρικά (πρόκειται για punching failure), οπότε η πύκνωση έως πλάτος 7.5m εκατέρωθεν του θεμελίου επαρκεί για την προσομοίωση του.



Σχήμα 3.7: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων θεμελίου με τοπική πύκνωση καλλάβου ή με ολική πύκνωση καλλάβου σε ανάλυση μεμονωμένου θεμελίου με $B=5m$, $q=50kPa$ πάνω σε αργιλική «κρούστα» με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $S_u=20kPa$

3.7 Στρατηγική Παραμετρικής Διερεύνησης

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επεκτείνει και γενικεύει τα αποτελέσματα των αναλύσεων της Δημουλά (2022). Συνεπώς, η αριθμητική μεθοδολογία και οι παραδοχές της είναι ίδιες (χάριν συμβατότητας), απλά εδώ διερευνώνται πληρέστερα κάποιες παράμετροι και προστίθεται μια επιπλέον κύρια παράμετρος: το πάχος της ρευστοποιημένης στρώσης.

Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που διερευνώνται πληρέστερα είναι:

- ❖ Ο λόγος του συνολικού βάρους των γειτονικών θεμελίων, αναλύοντας περιπτώσεις γειτνίασης ακραίως ελαφρύ θεμελίου με ακραίως βαρύ θεμέλιο (λόγος βάρους 8:1).
- ❖ Η απόσταση μεταξύ των θεμελίων, αναλύοντας περιπτώσεις όπου τα δύο θεμέλια είναι πολύ κοντά (έως ελάχιστης απόστασης 1m).

Σε ό,τι αφορά στο πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης, επαναλήφθηκαν όλες οι αναλύσεις που αφορούν σε πάχος 8m (από την εργασία της Δημουλά (2022) με τις εδώ προσθήκες), για την περίπτωση όπου το πάχος αυτό είναι 4m.

Παρακάτω, παρουσιάζονται πινακοποιημένες όλες οι αναλύσεις που αποτέλεσαν τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε (τόσο από τη Δημουλά (2022) όσο και από την παρούσα διπλωματική εργασία):

D (m)	D/B1	B (m)	Bn	B/Bn	q (kPa)	qn (kPa)	q/qn	Q (kN/m)	Qn (kN/m)	Q/Qn
1	0.2	5	5	1	50	50	1	250	250	1
2.5	0.5	5	5	1	50	50	1	250	250	1
5	1	5	5	1	50	50	1	250	250	1
10	2	5	5	1	50	50	1	250	250	1
15	3	5	5	1	50	50	1	250	250	1
20	4	5	5	1	50	50	1	250	250	1
25	5	5	5	1	50	50	1	250	250	1
1	0.2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25
2.5	0.5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25
5	1	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25
10	2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25
15	3	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25
20	4	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25
25	5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25
	0.2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125
2.5	0.5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125
5	1	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125
10	2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125
15	3	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125
20	4	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125
25	5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125
2.5	0.125	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1
10	0.5	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1
20	1	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1
40	2	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1
1	0.2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4
2.5	0.5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4
5	1	20	5	4	50	50	1	1000	250	4
10	2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4
15	3	20	5	4	50	50	1	1000	250	4
20	4	20	5	4	50	50	1	1000	250	4
25	5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4
1	0.2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8
2.5	0.5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8
5	1	20	5	4	100	50	2	2000	250	8
10	2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8
15	3	20	5	4	100	50	2	2000	250	8
20	4	20	5	4	100	50	2	2000	250	8
25	5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8

Πίνακας 3.4: Οι παραμετρικές αναλύσεις που αποτέλεσαν τη βάση δεδομένων

Αξίζει να σημειωθεί ότι στον πίνακα φαίνονται μόνο οι διαφορετικές περιπτώσεις αναλύσεων που έγιναν βάσει του πλάτους B, της ενδιάμεσης απόστασης D και της φόρτισης q. Αυτές οι αναλύσεις έγιναν 4 φορές η καθεμία, για τιμές αργλικής «κρούστα» αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u και πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L ίσες με (20kPa, 8m), (40kPa, 8m), (20kPa, 4m) και (40kPa, 4m).

Άρα, συνολικά σε κάθε ένα από τα 4 εδαφικά προφίλ έγιναν 40 αναλύσεις για διαφορετικά ζεύγη θεμελίων και 3 αναλύσεις μεμονωμένων θεμελίων χάριν σύγκρισης. Συνεπώς, οι συνολικές αναλύσεις είναι $43 \times 4 = 172$.

Κεφάλαιο 4

Απόκριση Αλληλεπιδρώντων Κατασκευών

4.1 Γενικά

4.1.1 Εξεταζόμενες Παράμετροι

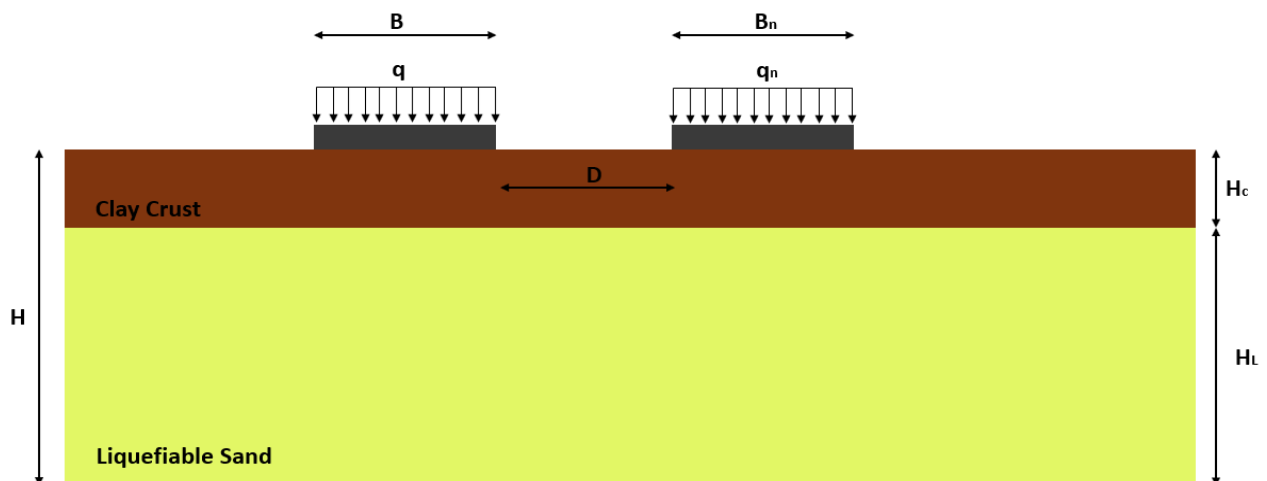
Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα διπλωματική εργασία ο πρώτος στόχος ήταν η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με αποτελέσματα από παραμετρικές αναλύσεις σε υπολογιστικό περιβάλλον FLAC 2D. Οι αναλύσεις αφορούσαν στην απόκριση 2 γειτονικών κατασκευών, επιφανειακά θεμελιωμένων με θεμελιολωρίδες επί δίστρωτου εδαφικού προφίλ. Επιφανειακά τοποθετήθηκε μια επιφανειακή στρώση αργίλου (αργιλική «κρούστα») πάχους $H_c=2\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ ή 40kPa . Βαθύτερα αυτής, τοποθετήθηκε μια στρώση ρευστοποιήσιμης άμμου πάχους $H_L=4\text{m}$ ή 8m .

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είχαν τη μορφή στροφών (θ) και καθιζήσεων (z_{SSSI}), μεγέθη τα οποία βοήθησαν στην ποσοτικοποίηση του προβλήματος. Από τη βιβλιογραφία του προβλήματος εντοπίστηκαν τα κρίσιμα μεγέθη που διέπουν το εξεταζόμενο πρόβλημα, δηλαδή αυτό της Δυναμικής Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής σε Ρευστοποιήσιμο Έδαφος. Αυτά τα μεγέθη ήταν που διερευνήθηκαν παραμετρικά ώστε να δειχθεί, πρώτα ποιοτικά και μετά ποσοτικά η επίδραση τους. Τα μεγέθη αυτά ήταν:

- **Ενδιάμεση Απόσταση Θεμελίων D:** Ως D ορίστηκε η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των γειτονικών θεμελίων μετρούμενη ανάμεσα στις δύο κοντινότερες άκρες τους. Με σκοπό την αδιαστατοποίηση του προβλήματος συχνότερα η απόσταση παρουσιάζεται διαιρεμένη με το πλάτος του μικρότερου εκ των δυο θεμελίων B_{min} και απεικονίζεται ως D/B_{min} . Το εύρος που εξετάστηκε ήταν από $D/B_{\text{min}}=0.2$ (που αντιστοιχεί σε $D=1\text{m}$) έως και $D/B_{\text{min}}=5$, δηλαδή $D=25\text{m}$ (πρακτικώς απόσταση όπου η αλληλεπίδραση είναι πλέον ισχνή, σε κατασκευές που π.χ. χωρίζονται από έναν πλατύ δρόμο).
- **Πλάτος Θεμελίου B:** Ως B ορίστηκε το πλάτος του κάθε θεμελίου (B_1 και B_2). Βάσει αυτής της παραμέτρου χωρίστηκαν αναλύσεις δίδυμων θεμελίων (ίδιο B) και διαφορετικών θεμελίων (διαφορετικό B). Εξετάστηκαν θεμέλια με $B=5\text{m}$ (στενά θεμέλια) και $B=20\text{m}$ (ευρέα θεμέλια), ενώ στη μελέτη των αποτελεσμάτων το πλάτος κάθε θεμελίου παρουσιάζεται ως B και εκείνο του γειτονικού του ως B_n (neighbor).

- **Τάση Ανωδομής q :** Ως q ορίστηκε η τάση (μετρούμενη σε kPa) η οποία μεταφέρεται στο εκάστοτε θεμέλιο από την ανωδομή του. Αξίζει να σημειωθεί ότι πέραν της τάσης q , ενδιαφέρον παρουσιάζει το συνολικό φορτίο Q του θεμελίου (όπου $Q = qB$ σε kN/m). Σε κάθε περίπτωση, εξετάστηκαν κατασκευές με $q=50$ kPa (μετριώς βαριές κατασκευές) και με $q=100$ kPa (βαριές κατασκευές), ενώ τα Q διαφοροποιούνται από 250 kN/m έως 2000 kN/m. Και πάλι ο δείκτης n στην τάση q και το φορτίο Q υποδηλώνει την τιμή του μεγέθους στο γειτονικό θεμέλιο.
- **Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή Αργιλικής Κρούστας S_u :** Με σκοπό τη διερεύνηση του παράγοντα της αντοχής της επιφανειακής αργιλικής κρούστας έγιναν αναλύσεις με $S_u=20$ kPa που αντιστοιχεί σε χαμηλή τιμή S_u και $S_u=40$ kPa που αντιστοιχεί σε μέση τιμή S_u επιφανειακής στρώσης.
- **Πάχος Ρευστοποιήσιμης Στρώσης H_L :** Σύμφωνα με τους Kassas et. al. (2022) το πόσο παχιά είναι η στρώση της ρευστοποιήσιμης άμμου επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών κατασκευών. Για αυτόν τον λόγο αποφασίστηκε να διερευνηθεί συστηματικά η επίδραση του πάχους της για όλες τις περιπτώσεις. Επιλέχθηκαν πάχη $H_L = 8$ m και 4 m για την παραμετρική διερεύνηση των ίδιων θεμελίων.

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας του προβλήματος και των παραμέτρων, παρατίθεται ένα σχήμα μιας ενδεικτικής διάταξης ανάλυσης.



Σχήμα 4.1: Μια τυπική διάταξη ανάλυσης με γειτονικά θεμέλια πλάτους B και B_n , σε ενδιάμεση απόσταση D , υπό τάσεων ανωδομής q και q_n , εδραζόμενα σε αργιλική κρούστα πάχους H_c και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u , επί στρώσης ρευστοποιήσιμης άμμου πάχους H_L

4.1.2 Σύνοψη Εκτελεσθέντων Αναλύσεων

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελεί μια «συνέχεια» της εργασίας της Δημουλά (2022). Η λογική της διερεύνησης παρουσιάστηκε λεπτομερώς στην παράγραφο 3.7, και εδώ παρουσιάζονται πινακοποιημένες όλες οι αναλύσεις που αποτέλεσαν τη βάση δεδομένων της παρούσας εργασίας.

Su=20 kPa & HL=8m											
D (m)	D/B1	B (m)	Bn	B/Bn	q (kPa)	qn (kPa)	q/qn	Q (kN/m)	Qn (kN/m)	Q/Qn	Thesis
1	0.2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
2.5	0.5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
5	1	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
10	2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
15	3	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
20	4	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
25	5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
1	0.2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
2.5	0.5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
5	1	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
10	2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
15	3	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
20	4	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
25	5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
1	0.2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
2.5	0.5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
5	1	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
10	2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
15	3	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
20	4	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
25	5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
2.5	0.125	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS
10	0.5	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	DIMOULA
20	1	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	DIMOULA
40	2	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	DIMOULA
1	0.2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
2.5	0.5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
5	1	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
10	2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
15	3	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
20	4	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
25	5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
1	0.2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
2.5	0.5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
5	1	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
10	2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
15	3	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
20	4	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
25	5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS

Πίνακας 4.1: Οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν για αργιλική κρούστα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ και πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L=8\text{m}$

Su=40 kPa & HL=8m											
D (m)	D/B1	B (m)	Bn (m)	B/Bn	q (kPa)	qn (kPa)	q/qn	Q (kN/m)	Qn (kN/m)	Q/Qn	Thesis
1	0.2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
2.5	0.5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
5	1	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
10	2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
15	3	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
20	4	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
25	5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	DIMOULA
1	0.2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
2.5	0.5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
5	1	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
10	2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
15	3	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
20	4	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
25	5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	DIMOULA
1	0.2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
2.5	0.5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
5	1	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
10	2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
15	3	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
20	4	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
25	5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
1	0.125	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS
10	0.5	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	DIMOULA
20	1	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	DIMOULA
40	2	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	DIMOULA
1	0.2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
2.5	0.5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
5	1	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
10	2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
15	3	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
20	4	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
25	5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	DIMOULA
1	0.2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
2.5	0.5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
5	1	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
10	2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
15	3	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
20	4	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
25	5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS

Πίνακας 4.2: Οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν για αργλική κρούστα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$ και πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L=8\text{m}$

Su=20 kPa & HL=4m												
D (m)	D/B1	B (m)	Bn	B/B _n	q (kPa)	q _n (kPa)	q/q _n	Q (kN/m)	Q _n (kN/m)	Q/Q _n	Thesis	
1	0.2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS	
2.5	0.5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS	
5	1	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS	
10	2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS	
15	3	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS	
20	4	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS	
25	5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS	
1	0.2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS	
2.5	0.5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS	
5	1	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS	
10	2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS	
15	3	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS	
20	4	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS	
25	5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS	
1	0.2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS	
2.5	0.5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS	
5	1	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS	
10	2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS	
15	3	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS	
20	4	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS	
25	5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS	
2.5	0.125	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS	
10	0.5	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS	
20	1	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS	
40	2	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS	
1	0.2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS	
2.5	0.5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS	
5	1	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS	
10	2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS	
15	3	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS	
20	4	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS	
25	5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS	
1	0.2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS	
2.5	0.5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS	
5	1	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS	
10	2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS	
15	3	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS	
20	4	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS	
25	5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS	

Πίνακας 4.3: Οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν για αργλική κρούστα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ και πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L=4\text{m}$

Su=40 kPa & HL=4m											
D (m)	D/B1	B (m)	Bn	B/B _n	q (kPa)	qn (kPa)	q/q _n	Q (kN/m)	Qn (kN/m)	Q/Qn	Thesis
1	0.2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
2.5	0.5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
5	1	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
10	2	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
15	3	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
20	4	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
25	5	5	5	1	50	50	1	250	250	1	KALYVAS
1	0.2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
2.5	0.5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
5	1	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
10	2	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
15	3	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
20	4	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
25	5	5	20	0.25	50	50	1	250	1000	0.25	KALYVAS
1	0.2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
2.5	0.5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
5	1	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
10	2	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
15	3	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
20	4	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
25	5	5	20	0.25	50	100	0.5	250	2000	0.125	KALYVAS
2.5	0.125	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS
10	0.5	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS
20	1	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS
40	2	20	20	1	50	50	1	1000	1000	1	KALYVAS
1	0.2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
2.5	0.5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
5	1	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
10	2	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
15	3	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
20	4	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
25	5	20	5	4	50	50	1	1000	250	4	KALYVAS
1	0.2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
2.5	0.5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
5	1	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
10	2	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
15	3	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
20	4	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS
25	5	20	5	4	100	50	2	2000	250	8	KALYVAS

Πίνακας 4.4: Οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν για αργιλική κρούστα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$ και πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_L=4\text{m}$

Στους παραπάνω πίνακες αναφέρονται μεταξύ άλλων οι τιμές των μεταβλητών παραμέτρων για κάθε ανάλυση καθώς και η εργασία στα πλαίσια της οποίας έγινε η καθεμία.

Στην παρούσα διπλωματική θα παρουσιασθούν λεπτομερώς μόνον μερικές ενδεικτικές περιπτώσεις με σκοπό την ποιοτική κατανόηση της απόκρισης των αλληλεπιδρώντων θεμελίων σε όρους καθιζήσεων και στροφών συναρτήσει των εξεταζόμενων παραμέτρων.

Στόχος αυτής της παρουσίασης είναι η μελέτη των φυσικών μηχανισμών που διέπουν αυτή την αλληλεπίδραση. Το σύνολο των αναλύσεων που έλαβαν χώρα σε αυτή την εργασία θα συμπεριληφθούν ξεχωριστά στο Παράρτημα το οποίο θα επισυναφθεί, λεπτομερώς από κάθε ανάλυση στο Μέρος Α, και συγκεντρωτικά στο Μέρος Β.

4.2 Τυπική Απόκριση

Ο σκοπός αυτής της παραγράφου είναι η αναλυτική παρουσίαση της απόκρισης δύο διαφορετικών περιπτώσεων γειτονικών θεμελίων ώστε να δοθεί μια πρώτη αδρή ερμηνεία του φαινομένου της SSSI. Μιας και οι δυο περιπτώσεις θα έχουν κοινή ενδιάμεση απόσταση D και κοινές γεωτεχνικές παραμέτρους (S_u , H_L), η διαφορά τους θα έγκειται στα διαφορετικά πλάτη B και τάσεις q , ή γενικότερα στη διαφορετική επιφόρτιση $Q=qB$. Με αυτόν τον τρόπο θα εξετασθεί η από κοινού επίδραση των παραμέτρων B και q στην αλληλεπίδραση γειτονικών κατασκευών σε όρους καθιζήσεων και στροφών. Επιλέχθηκαν δύο εξόχως διαφορετικές περιπτώσεις, μια με $Q/Q_n=1$ (δίδυμα θεμέλια) και μια με $Q/Q_n=8$ (ακραία περίπτωση διαφοράς φόρτισης) ώστε να εξετασθούν οι διαφορές που παρουσιάζουν μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα θα παρουσιασθούν σε όρους καθιζήσεων και στροφών, τόσο με τη βοήθεια χρονοϊστοριών (καθιζήσεων και στροφών) όσο και με τη βοήθεια της χωρικής κατανομής του συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης, σε μορφή ισοκαμπυλών στο τέλος της διέγερσης. Αναλυτικά, τα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται παρακάτω:

- ❖ $B=5\text{m}$, $B_n=5\text{m}$, $q=50\text{kPa}$, $q_n=50\text{kPa}$ ($Q/Q_n=1$), $D=5\text{m}$, $S_u=20\text{kPa}$, $H_L=4\text{m}$
- ❖ $B=5\text{m}$, $B_n=20\text{m}$, $q=50\text{kPa}$, $q_n=100\text{kPa}$ ($Q/Q_n=8$), $D=5\text{m}$, $S_u=20\text{kPa}$, $H_L=4\text{m}$

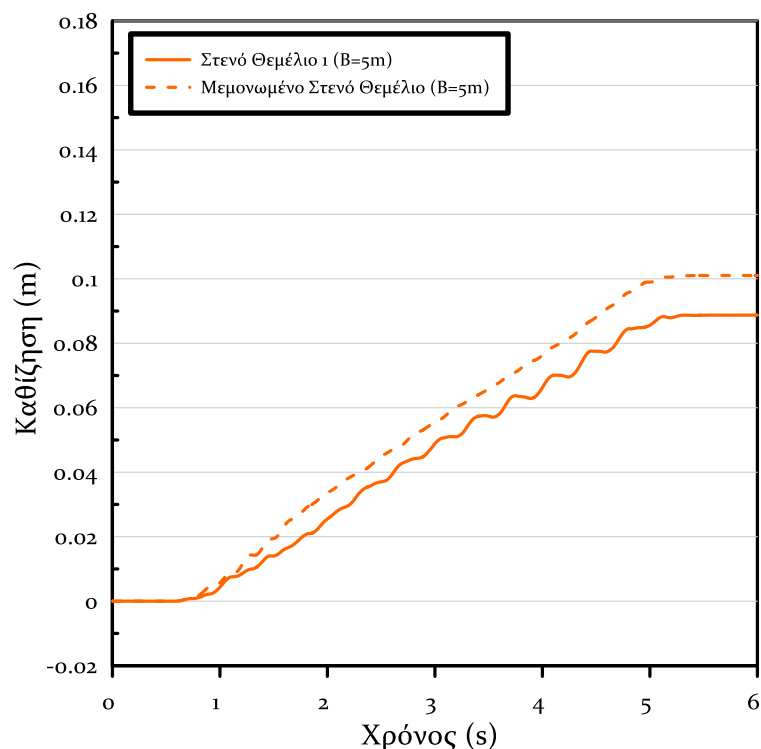
4.2.1 Δίδυμα Θεμέλια

Γενικά, στις περιπτώσεις των διδύμων θεμελίων, για να βρεθεί η τελική (μέση) καθίζηση, λήφθηκε υπόψιν η μέση τιμή των καθιζήσεων των δύο θεμελίων (σε αντίθεση με τις περιπτώσεις μη-διδύμων θεμελίων), ώστε να απαλειφθούν οι μικρο-διαφορές που προκύπτουν για αποκλειστικά αριθμητικούς λόγους. Στη συνέχεια, η κοινή αυτή (μέση) καθίζηση Z_{SSSI} κανονικοποιήθηκε διαιρούμενη με την ομοιόμορφη καθίζηση Z του αντίστοιχου μεμονωμένου θεμελίου υπό τις ίδιες γεωτεχνικές, γεωμετρικές και τασικές συνθήκες.

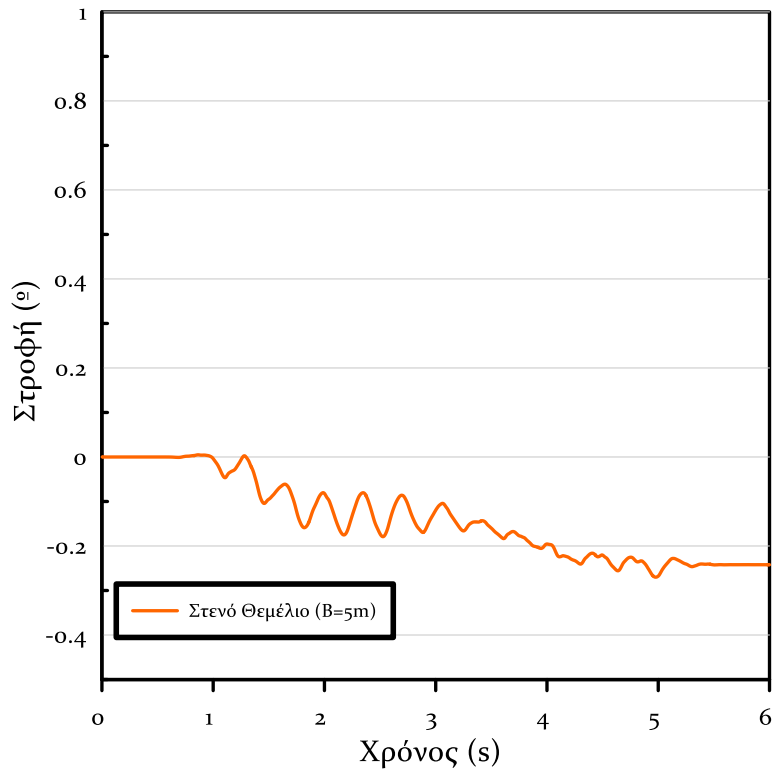
Αντίστοιχα, και για τις στροφές χρησιμοποιήθηκε η μέση στροφή των δύο δίδυμων θεμελίων. Όμως, καθώς ένα ομοιόμορφα φορτιζόμενο επιφανειακό μεμονωμένο θεμέλιο δεν στρέφεται όταν βρίσκεται σε οριζόντιο ομοιόμορφο έδαφος, δεν υπήρχε κάποια τιμή αναφοράς για τη στροφή που να προσφέρεται για κανονικοποίηση. Για αυτόν τον λόγο παρουσιάσθηκε απλώς ως στροφή θ στην εργασία. Επισημαίνεται ότι για τις στροφές υιοθετήθηκε η σύμβαση των θετικά προσημασμένων στροφών να αποτυπώνει συγκλίνοντα

θεμέλια και η σύμβαση των αρνητικά προσημασμένων στροφών να υπονοεί αποκλίνοντα θεμέλια.

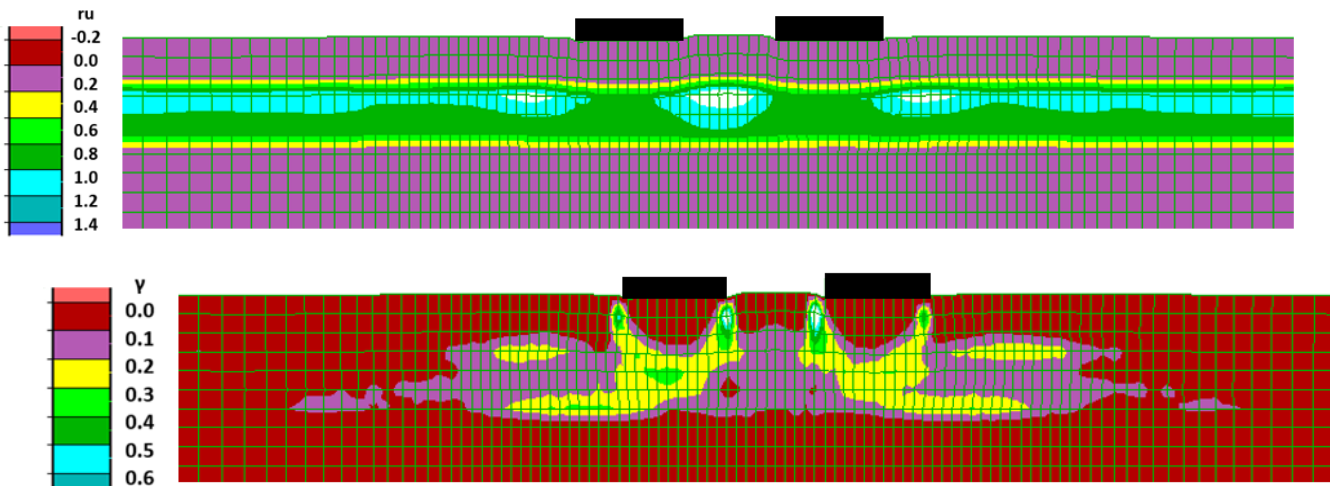
Έτσι, στα Σχήματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών για τα δύο δίδυμα θεμέλια, ενώ γίνεται σύγκριση και με τη χρονοϊστορία καθιζησης του αντίστοιχου μεμονωμένου θεμελίου. Προκύπτει γραμμική με το χρόνο συσσώρευση καθιζήσεων τόσο για το μεμονωμένο όσο και για τα δίδυμα θεμέλια, ενώ η σχετική αλληλεπίδραση προκύπτει ευμενής καθώς $Z_{SSSI}/Z = (0.086 \text{ m} / 0.10 \text{ m}) = 0.85$. Αυτή συνοδεύεται από τη συσσώρευση μικρής αποκλίνουσας στροφής $\theta = -0.19^\circ$. Για τη στροφή η συσσώρευση δεν είναι εντελώς γραμμική με το χρόνο, αλλά αυτό οφείλεται και στο ότι το μέγεθος της είναι μικρό και συνεπώς ευμετάβλητο για αριθμητικούς λόγους. Σε άλλες περιπτώσεις όπου η στροφή είναι μεγαλύτερη, προκύπτει σαφέστερα η «γραμμική» αύξηση της στροφής με το χρόνο.



Σχήμα 4.2: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζησης ζεύγους ίδιων θεμελίων ($B_1=B_2=5\text{m}$, $q_1=q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 5\text{m}$ με την αντίστοιχη του ίδιου θεμελίου αν ήταν μεμονωμένο, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



Σχήμα 4.3: Χρονοϊστορία στροφής ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=5\text{m}$, $q_1=q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 5\text{m}$, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



Σχήμα 4.4: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=5\text{m}$, $q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 5\text{m}$.

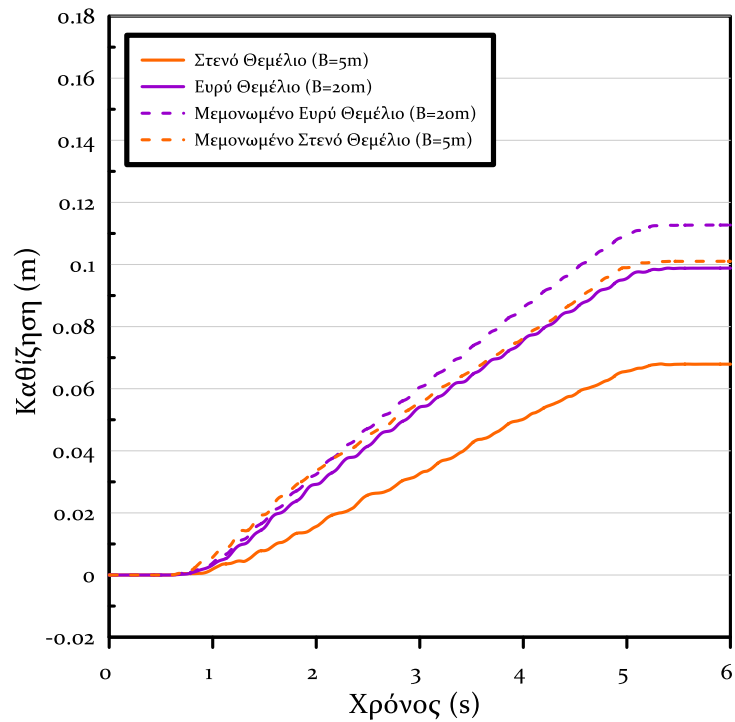
Συνεπώς, η απόκριση προκύπτει «συμμετρική» λόγω της ομοιότητας των δύο θεμελίων και της φορτίσεως τους. Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ στο έδαφος θεμελίωσης των δύο θεμελίων στο τέλος της διέγερσης. Εντός της στρώσης άμμου, προκύπτει $r_u < 1.0$ κάτω από τα δύο θεμέλια, αλλά $r_u = 1.0$ τόσο ανάμεσα στα δύο θεμέλια, όσο και στο ελεύθερο πεδίο. Επιπλέον προκύπτει ότι ανάμεσα στα δύο θεμέλια οι διατμητικές παραμορφώσεις μειώνονται αλλά δεν μηδενίζονται, δηλαδή υπάρχει μια, ισχνή μεν υπαρκτή δε, παραμόρφωση του εδάφους εκεί, και άρα αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο θεμελίων. Επιπλέον, προκύπτει ότι οι μηχανισμοί αστοχίας κάτω από τα δύο θεμέλια είναι συμμετρικοί ως προς τον άξονα συμμετρίας του προβλήματος, αλλά όχι συμμετρικοί ως προς το κάθε θεμέλιο, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα της κοινής μέσης καθίζησης και της κοινής ελαφράς στροφής και των δύο.

4.2.2 Θεμέλια με εξόχως διαφορετικό φορτίο Q

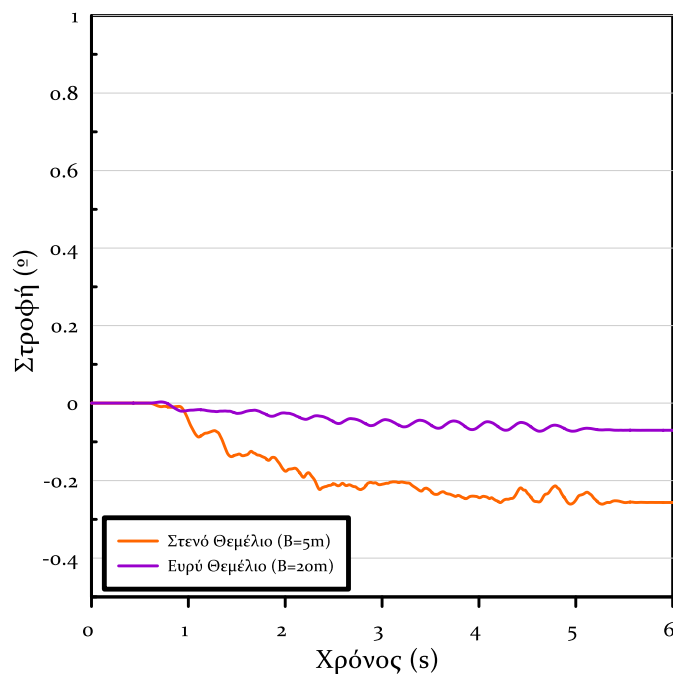
Στις περιπτώσεις των θεμελίων διαφορετικού φορτίου, έγινε ξεχωριστή ανάλυση για τις (μέσες) καθιζήσεις και τις στροφές των δύο θεμελίων. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις περιπτώσεις των δίδυμων θεμελίων όπου η απόκριση θεωρήθηκε κοινή και για τα δύο θεμέλια. Άρα, προέκυψε διαφορετικός λόγος Z_{SSSI}/Z και διαφορετική στροφή θ για τα δύο θεμέλια, οπότε γίνεται δυνατή η μελέτη της αλληλεπίδρασης θεμελίων με εξόχως διαφορετική τιμή Q.

Η συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί την πιο ακραία περίπτωση διαφοράς Q μεταξύ δύο θεμελίων. Η διάταξη αποτελείται από ένα στενό/ελαφρύ θεμέλιο που βρίσκεται δίπλα σε ένα ευρύ/βαρύ θεμέλιο. Γενικά, υπήρχε η κατεύθυνση από τους Hayden et. al. (2015) ότι τα στενά/ελαφριά θεμέλια εμφανίζουν σημαντική μείωση των καθιζήσεων συγκριτικά με τις αντίστοιχες αν ήταν μεμονωμένα, ενώ στρέφονται και εντόνως. Η επικρατούσα ερμηνεία που είχε δοθεί ήταν ο μηχανισμός **Εκτοπιζόμενου Εδάφους**, δηλαδή της πλευρικής εξάπλωσης γαιών από το ευρύ/βαρύ θεμέλιο που καθιζάνει εντόνως προς το γειτονικό στενό/ελαφρύ λόγω της ασυμπιεστότητας του εδάφους (αστράγγιστες συνθήκες). Έτσι, το στενό/ελαφρύ θεμέλιο που δεν έχει πρωτογενώς την ίδια διάθεση για καθίζηση, αποκτά δευτερογενώς και μια τάση να ανυψωθεί, και αυτό αποτυπώνεται τελικώς σε έντονη μείωση της καθιζήσής του σε σχέση με το αν ήταν μεμονωμένο. Αντίθετα, το ευρύ/βαρύ θεμέλιο πρακτικά δεν επηρεάζεται, αφού το στενό/ελαφρύ θεμέλιο δεν καθιζάνει σημαντικά, οπότε δεν εκτοπίζει επαρκές έδαφος πλευρικά.

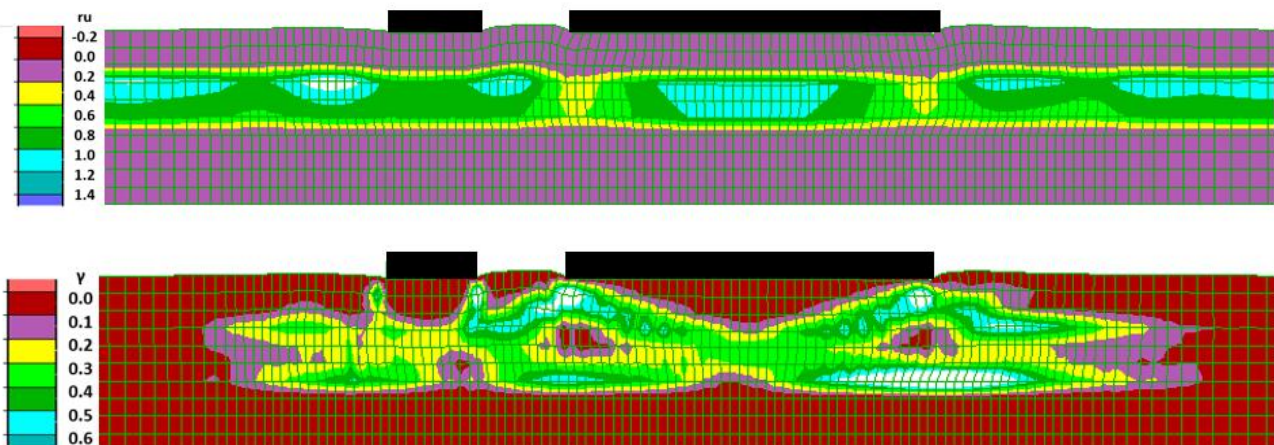
Η βιβλιογραφία επιβεβαιώνεται και στα αποτελέσματα αφού για το στενό θεμέλιο οι καθιζήσεις έχουν μειωθεί σημαντικά ($Z_{SSSI}/Z=0.67$), ενώ το ευρύ θεμέλιο πρακτικά αποκρίνεται με τον ίδιο τρόπο που θα αποκρινόταν και αν ήταν μεμονωμένο ($Z_{SSSI}/Z=0.94$). Αυτά τα συμπεράσματα είναι ακόμα πιο έντονα για μικρότερη ενδιάμεση απόσταση, αλλά αυτό θα αναλυθεί σε μεγαλύτερο εύρος στην επόμενη παράγραφο. Σε όρους στροφών, το στενό και ελαφρύ θεμέλιο στρέφεται σημαντικά παραπάνω (4 φορές παραπάνω) από το ευρύ και βαρύ θεμέλιο (που έχει πρακτικά ανεπαίσθητες στροφές, -0.26° έναντι -0.07°). Παρακάτω αποτυπώνονται σχηματικά οι χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών καθώς και οι ισοκαμπύλες r_u και γ για την αλληλεπίδραση θεμελίων με εξόχως διαφορετική τιμή Q.



Σχήμα 4.5: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



Σχήμα 4.6: Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.

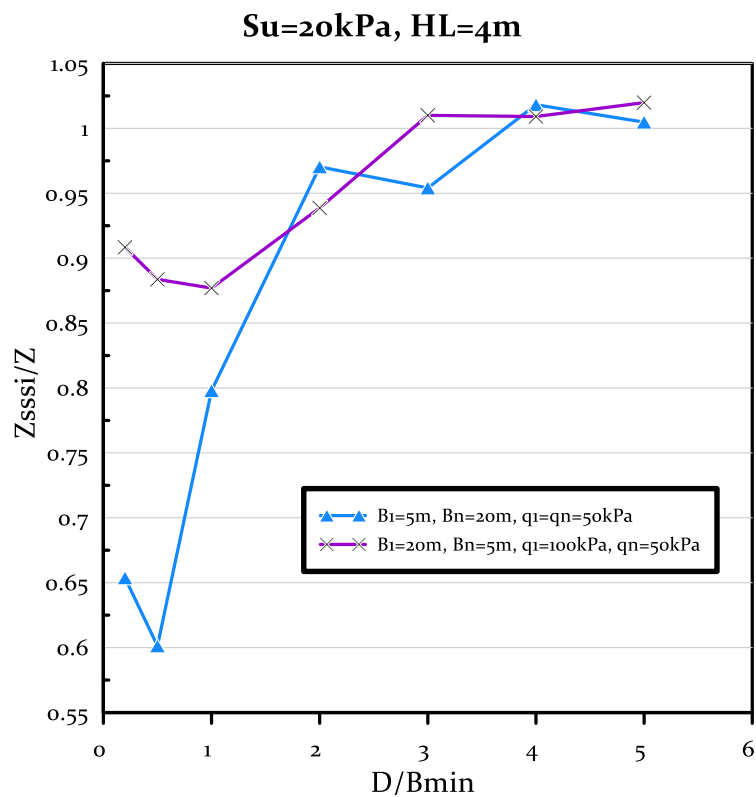


Σχήμα 4.7: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 5m$

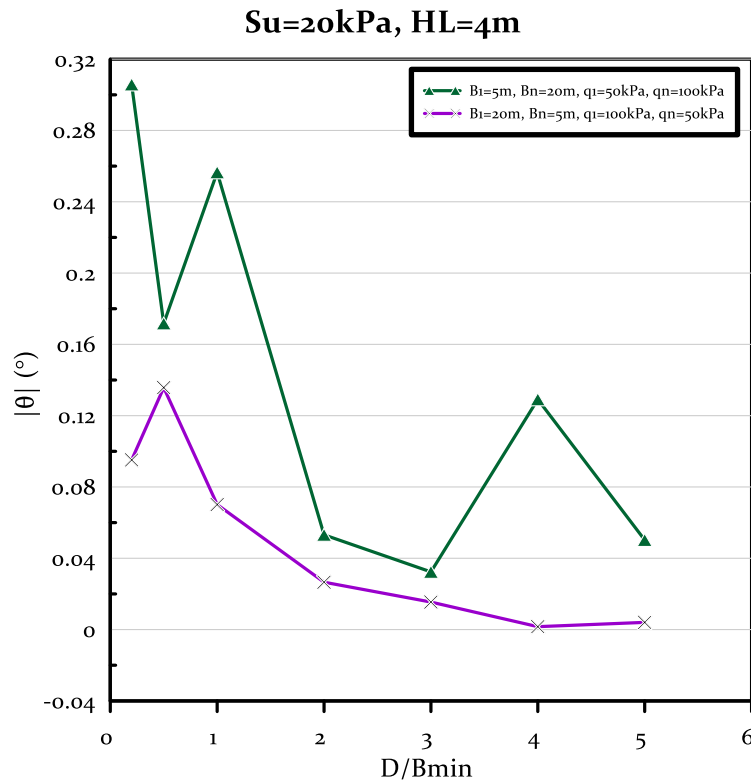
Παρατηρώντας τις ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης καθίσταται προφανές το έντονο επίπεδο της διατμητικής παραμόρφωσης στο έδαφος ανάμεσα στα δύο θεμέλια. Αν συγκριθεί με τις ισοκαμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης για τα δίδυμα θεμέλια η διαφορά είναι εξόφθαλμη. Αυτό, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα σε όρους καθιζήσεων και στροφών ουσιαστικά επιβεβαιώνει τον μηχανισμό πλευρικής ώθησης γαιών από το βαρύτερο/ευρύτερο προς το ελαφρύτερο/στενότερο θεμέλιο.

4.2.3 Επιρροή του Q/Q_n ανεξαρτήτως ενδιάμεσης απόστασης

Για να φανεί ακόμα πιο καθαρά η επίδραση του λόγου Q/Q_n στην αλληλεπίδραση θεμελίων ανεξαρτήτως της ενδιάμεσης απόστασης τους D συνοψίζονται εδώ τα αποτελέσματα τόσο σε όρους στροφών όσο και σε όρους καθιζήσεων, για την περίπτωση ζεύγους θεμελίων εξόχως διαφορετικών Q (με $Q/Q_n=0.125$ και $Q/Q_n=8$ ανάλογα το ποιο θεμέλιο θεωρούμε ως θεμέλιο αναφοράς) για κάθε ενδιάμεση απόσταση D αλλά υπό τις ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες (πάχη στρώσεων και γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού). Παρακάτω, στα **Σχήματα 4.8** και **4.9** παρατίθενται δύο συγκεντρωτικά γραφήματα $Z_{SSSI}/Z-D/B_{min}$ και $|\theta|-D/B_{min}$ για ζεύγος θεμελίων με εξόχως διαφορετικά Q ($B=5m$, $q=50kPa$, $B_n=20m$, $q_n=100kPa$) εδραζόμενα σε προφίλ εδάφους με αργιλική κρούστα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ επί στρώσης ρευστοποιήσιμης άμμου πάχους $H_L=8m$.



Σχήμα 4.8: Τυπική απόκριση σε όρους λόγου καθιζήσεων δύο εξόχως διαφορετικών περιπτώσεων θεμελίων ως προς τον λόγο Q/Q_n (0.25 και 8) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος λεπτής ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



Σχήμα 4.9: Τυπική απόκριση σε όρους κατ' απόλυτη τιμή στροφών δύο εξόχως διαφορετικών περιπτώσεων θεμελίων ως προς τον λόγο Q/Q_n (0.25 και 8) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος λεπτής ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

Για $D = 5m$ (εδώ $D/B_{min} = 5/5 = 1$) τα αποτελέσματα είναι αυτά που έχουν ήδη παρουσιαστεί. Προκύπτει επίσης καθαρά στο **Σχήμα 4.8**, ότι οι τιμές του λόγου Z_{SSSI}/Z στο βαρύ / ευρύ θεμέλιο κυμαίνονται πολύ κοντά στο 1 (>0.91) για κάθε ενδιάμεση απόσταση D . Αυτό, αποδεικνύει τον ισχυρισμό ότι το βαρύ/ευρύ θεμέλιο πρακτικά δεν επηρεάζεται από το γειτονικό του ελαφρύ/στενό θεμέλιο. Αυτό αποδεικνύεται και από το **Σχήμα 4.9**, καθώς όλες οι (απόλυτες) τιμές στροφών του βαριού / ευρέως θεμελίου είναι αρκετά μικρές ώστε να θεωρηθούν μη-σημαντικές ($\theta < 0.1^\circ$). Άρα, το βαρύ / ευρύ θεμέλιο ουσιαστικά αποκρίνεται με πολύ κοντινό τρόπο με τον τρόπο που θα αποκρινόταν αν αυτό ήταν μεμονωμένο.

Ως προς το ελαφρύ / στενό θεμέλιο, οι καθιζήσεις εμφανίζονται σημαντικά απομειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες καθιζήσεις αν αυτό ήταν μεμονωμένο. Εμφανίζονται έως και 14 φορές μικρότερες σε συγκεκριμένες (σχετικά μικρές) ενδιάμεσες τιμές D/B_{min} . Σε όρους στροφών, και πάλι οι στροφές του στενού / ελαφριού θεμελίου είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές του βαριού / ευρέως θεμελίου, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό όσο οι καθιζήσεις του είναι μικρότερες.

Συμπερασματικά, όσο μεγαλώνει το Q/Q_n τόσο λιγότερο επηρεάζεται το θεμέλιο από το γειτονικό του και τόσο περισσότερο η απόκρισή του θυμίζει αυτή του μεμονωμένου

θεμέλιου. Άρα, συγκριτικά βαρύτερες και ευρύτερες κατασκευές επηρεάζονται κατά κανόνα λιγότερο από το πρόβλημα της Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (SSSI) σε σχέση με τις γειτονικές τους που είναι συγκριτικά ελαφρύτερες και στενότερες. Αντίθετα, όσο μικραίνει το Q/Q_n , τόσο περισσότερο επηρεάζεται το θεμέλιο από το γειτονικό του. Συνολικά λοιπόν, η επίδραση του λόγου Q/Q_n είναι **αυξητική** στο λόγο καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z .

Επισημαίνεται εδώ ότι με τη μείωση του Q/Q_n , ο λόγος Z_{SSSI}/Z τείνει να μειωθεί και άρα το θεμέλιο να καθιζάνει λιγότερο σε σχέση με την καθίζηση του αν ήταν μεμονωμένο. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί και ευμενής αλληλεπίδραση. Παρόλα αυτά, όσο μειώνεται το Q/Q_n , οι στροφές στο θεμέλιο τείνουν να αυξηθούν σημαντικά, κάτι που είναι ένα δυσμενές αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης. Συνεπώς η έννοια της ευμενούς ή μη-αλληλεπίδρασης δεν είναι μονοσήμαντα οριζόμενη. Από την άλλη, όταν ισχύει $Q/Q_n=1$, δηλαδή τα θεμέλια είναι «δίδυμα», αυτά τείνουν να αποκριθούν με παρόμοιο τρόπο μεταξύ τους (πρακτικώς ίδιες καθιζήσεις και στροφές), καθώς και με μικρότερες καθιζήσεις από τα αντίστοιχα μεμονωμένα (όχι όμως τόσο μικρότερες όσο τα θεμέλια με $Q/Q_n < 1$) και σημαντικά αυξημένες στροφές. Άρα, ο ισχυρισμός ότι όσο μειώνεται το Q/Q_n τόσο μειώνεται και ο λόγος Z_{SSSI}/Z μοιάζει ισχύων.

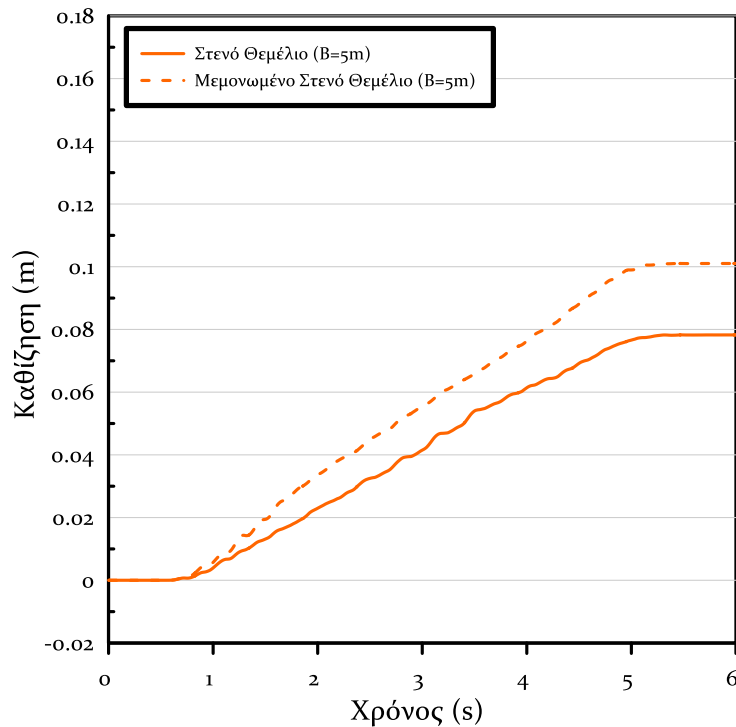
4.3 Επίδραση Ενδιάμεσης Απόστασης D

Ο σκοπός αυτής της παραγράφου είναι η συστηματική διερεύνηση της επίδρασης της ενδιάμεσης απόστασης D μεταξύ των δύο θεμέλιων στην απόκριση αυτών σε όρους καθιζήσεων και στροφών. Η επίδραση του D έχει τονισθεί από τους Kirkwood et. al. (2018) ως η κυρίαρχη επίδραση που διέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών κατασκευών. Μελετώντας την επίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου θα παρουσιασθούν και οι κυρίαρχοι μηχανισμοί που επηρεάζουν την απόκριση. Η επίδραση θα παρουσιασθεί εξετάζοντας 3 περιπτώσεις ενός ίδιου ζεύγους θεμελίων εδραζόμενο σε προφίλ εδάφους με ίδια γεωτεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε φορά. Έτσι, θα φανεί μόνο η επίδραση της ενδιάμεσης απόστασης D. Οι μηχανισμοί θα παρουσιασθούν με τη βοήθεια ισοκαμπυλών συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ για την κάθε περίπτωση. Οι αναλύσεις που θα παρουσιασθούν έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

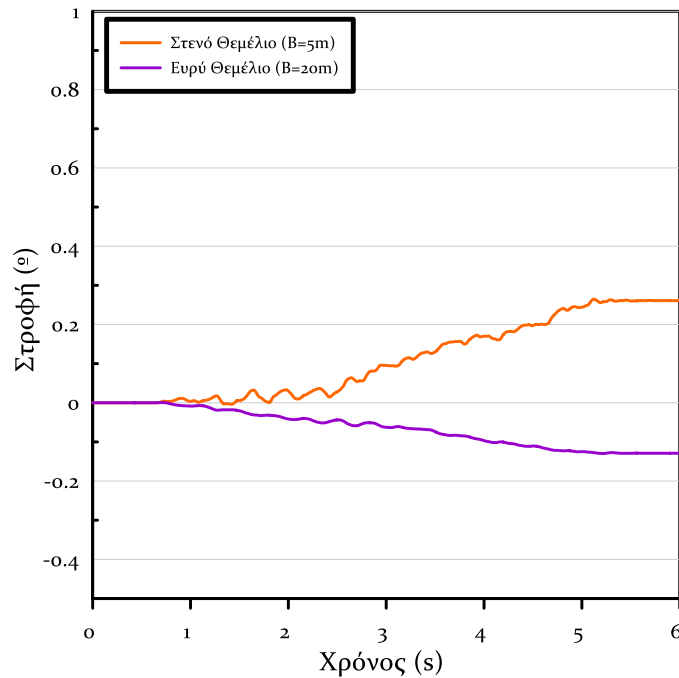
- ❖ $B=5m$, $B_n=5m$, $q=50kPa$, $q_n=50kPa$ ($Q/Q_n=1$), $D=1m$ ($D/B_{min}=0.2$), $S_u=20kPa$, $H_L=4m$
- ❖ $B=5m$, $B_n=5m$, $q=50kPa$, $q_n=50kPa$ ($Q/Q_n=1$), $D=5m$ ($D/B_{min}=1$), $S_u=20kPa$, $H_L=4m$
- ❖ $B=5m$, $B_n=5m$, $q=50kPa$, $q_n=50kPa$ ($Q/Q_n=1$), $D=25m$ ($D/B_{min}=5$), $S_u=20kPa$, $H_L=4m$

4.3.1 Απόκριση για Μικρή Ενδιάμεση Απόσταση

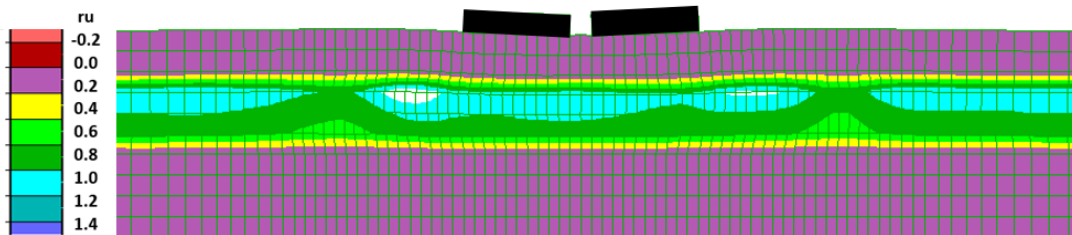
Η μικρότερη απόσταση που δοκιμάστηκε ήταν η $D=1\text{m}$, δηλαδή κανονικοποιημένη απόσταση $D/B_{\min}=0.2$. Δεν δοκιμάστηκε μικρότερη απόσταση λόγω του καννάβου των πεπερασμένων διαφορών που θα έπρεπε να έχει σημαντική τοπική πύκνωση με αποτέλεσμα την αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, και τη μη-συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων από διαφορετικές αναλύσεις. Αρχικά, παρακάτω παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθιζήσεων και στροφών καθώς και οι ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ και συντελεστή υπερπίεσεων πόρων r_u .



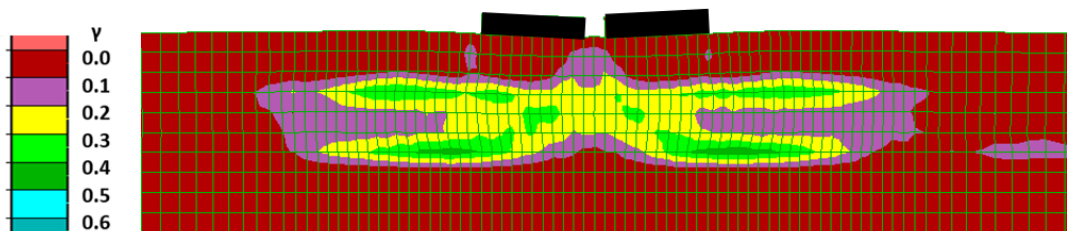
Σχήμα 4.10: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσης ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=5\text{m}$, $q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 1\text{m}$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_1=4\text{m}$ με αργλική κρούστα $H_c=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



Σχήμα 4.11: Σύγκριση χρονιοιστοριών στροφής ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.

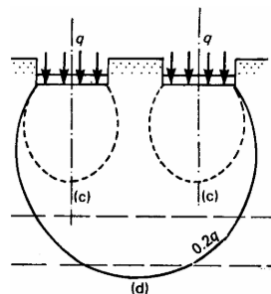


Σχήμα 4.12: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 1m$.



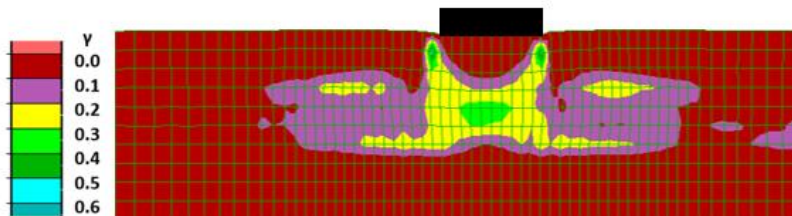
Παρατηρείται, ότι ο λόγος $Z_{SSSI}/Z = 0.77$, ενώ η κατ' απόλυτη τιμή στροφή $|\theta|=0.91^\circ$. Αυτά τα αποτελέσματα από μόνα τους δεν οδηγούν σε κάποιο συμπέρασμα για την επίδραση του D . Παρατηρώντας όμως τις ισοκαμπύλες συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων

μπορούν να προκύψουν κάποια βασικά συμπεράσματα για τον μηχανισμό που κυριαρχεί στην αλληλεπίδραση πολύ κοντινών γειτονικών κατασκευών. Αυτός, είναι ο μηχανισμός της **Επαλληλίας Τάσεων**. Οι τάσεις που ασκεί ένα επιφανειακό απειρομήκες θεμέλιο (θεμελιολωρίδα) όταν εδράζεται σε ένα εδαφικό προφίλ δεν ασκούνται μονάχα ακριβώς κάτω από το θεμέλιο αλλά και λίγο πλευρικά από αυτό συναρτήσει του βάθους. Για παράδειγμα, για ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο ο Boussinesq (1886) δημιούργησε μια αναλυτική μέθοδο υπολογισμού των τάσεων στο έδαφος κάτω από το θεμέλιο, η οποία για τις κατακόρυφες τάσεις γραφικά σχηματοποιείται ως ένας «βολβός τάσεων» κάτω από το θεμέλιο (περιοχή όπου η τάση αυτή είναι μεγαλύτερη από 10% της τάσης έδρασης). Όταν υπάρχουν δύο γειτονικά θεμέλια σε πολύ κοντινή απόσταση, υπάρχει μια περιοχή όπου αυτοί οι «βολβοί τάσεων» επαλληλίζονται. Σε αυτήν την περιοχή, η τάση που ασκείται στο κάθε σημείο ισούται με το άθροισμα της τάσης που ασκείται σε εκείνο το σημείο από το κάθε θεμέλιο. Αυτό, οδηγεί σε μεγαλύτερες τάσεις και συνεπώς σε μεγαλύτερες στατικές καθιζήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13: Παράδειγμα αυξημένης επιφόρτισης και συνεπώς καθίζησης λόγω επαλληλίας τάσεων γειτονικών δίδυμων θεμελίων (Καββαδάς (2007))

Εδώ το πρόβλημα είναι πιο πολύπλοκο, καθώς οι σεισμικές καθιζήσεις δεν είναι συνάρτηση της (σταθερής) κατακόρυφης τάσης, αλλά των ανακυκλικών διατμητικών τάσεων στη διάρκεια της δόνησης. Συγκεκριμένα, και οι διατμητικές τάσεις επαλληλίζονται, και στην περιοχή ανάμεσα σε δύο κοντινά θεμέλια είναι της ίδιας φοράς, οδηγώντας σε αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων, σε σχέση με την περιοχή εξωτερικά των θεμελίων. Ως περίπτωση αναφοράς, στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες διατμητικών παραμορφώσεων του μεμονωμένου θεμελίου, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τις περιπτώσεις ζεύγους ίδιων θεμελίων σε διαφορετικές ενδιάμεσες αποστάσεις D.



Σχήμα 4.14: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση μεμονωμένου θεμελίου ($B=5m, q=50kPa$)

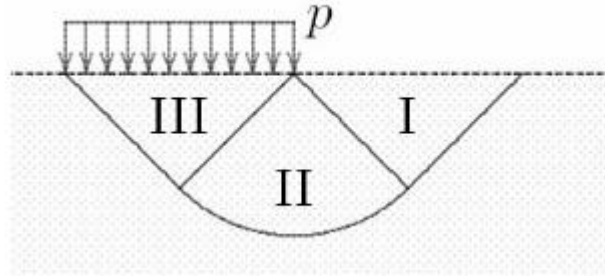
Αυτή η επαλληλία διατμητικών τάσεων είναι ο λόγος που η αναμενόμενη συμπεριφορά δύο πολύ κοντινών θεμελίων είναι να παρουσιάσουν μεγαλύτερες καθιζήσεις (και τιμές λόγου Z_{SSSI}/Z) από ότι αν βρισκόντουσαν σε (λίγο) μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτό το φαινόμενο φαίνεται καθαρά και στο **Σχήμα 4.12**, όπου στην περιοχή ανάμεσα στα δύο θεμέλια οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις είναι σημαντικά αυξημένες. Οι συγκεκριμένες διατμητικές παραμορφώσεις επεξηγούν και τις μεγάλες στροφές που εμφανίζουν τα δύο πολύ κοντινά θεμέλια. Από την άλλη, ο λόγος Z_{SSSI}/Z εξακολουθεί να είναι μικρότερος της μονάδας κατά κανόνα. Αυτό συμβαίνει γιατί εκτός από τον-δυσμενή σε όρους καθιζήσεων-μηχανισμό της Επαλληλίας Τάσεων λαμβάνει χώρα και ο -ευμενής σε όρους καθιζήσεων- μηχανισμός του Εκτοπιζόμενου Εδάφους, ο οποίος αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο και θα αναλυθεί πλήρως στην επόμενη υπό-παράγραφο.

4.3.2 Απόκριση για Μεσαία Ενδιάμεση Απόσταση

Όπως προαναφέρθηκε, σε πολύ μικρές αποστάσεις (όπως αυτή της προηγούμενης υπο-παραγράφου) εμφανίζονται και οι δύο μηχανισμοί, με τον πρώτο να είναι δυσμενής σε όρους καθιζήσεων για το θεμέλιο (Μηχανισμός Επαλληλίας Τάσεων) και τον δεύτερο να είναι ευμενής σε όρους καθιζήσεων (Μηχανισμός Εκτοπιζόμενου Εδάφους). Όσο η απόσταση μεγαλώνει, ο πρώτος μηχανισμός αρχίζει να αποδυναμώνεται και να «σβήνει», καθώς εξαλείφεται η αλληλεμπλοκή των διατμητικών τάσεων. Αυτό συμβαίνει σε μικρή απόσταση (π.χ., από $D/B_{\min} = 0.5$). Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, το φαινόμενο διέπεται κυρίως από τον δεύτερο μηχανισμό, αυτόν του Εκτοπιζόμενου Εδάφους, ο οποίος αναλύεται εδώ.

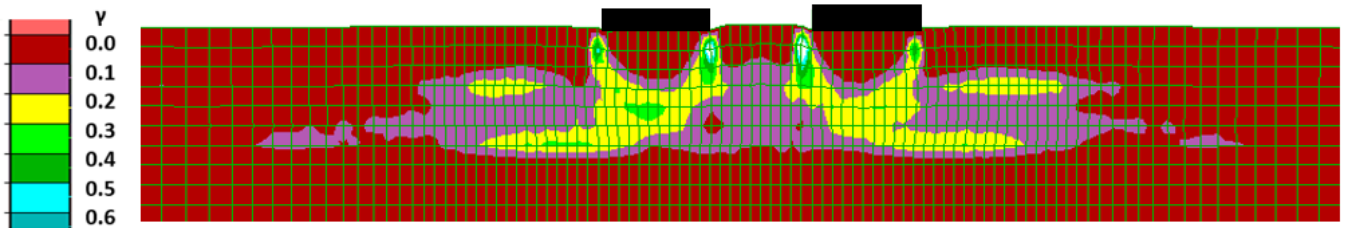
Όπως είναι λογικό, μιας και για το υπό μελέτη θεμέλιο αυτός ο μηχανισμός είναι ευμενής σε όρους καθιζήσεων, στις αποστάσεις όπου ο μηχανισμός αυτός είναι ισχυρός και ο έτερος μηχανισμός έχει πρακτικά μηδενιστεί, οι αναμένουσες καθιζήσεις είναι μικρότερες από ότι σε πολύ μικρές αποστάσεις. Άρα, αναμένεται στις αμέσως μεγαλύτερες αδιάστατες αποστάσεις D/B_{\min} , προς στιγμήν ο λόγος Z_{SSSI}/Z να μειώνεται, πριν αρχίσει πάλι να αυξάνεται όσο και ο μηχανισμός εκτοπιζόμενου εδάφους να πάψει να επηρεάζει το πρόβλημα. Αυτό το συμπέρασμα έχει τονισθεί και από τον Yarmohammadi (2023).

Συγκεκριμένα, ο δεύτερος μηχανισμός έχει να κάνει με το πλευρικά εκτοπιζόμενο έδαφος κάτω από το κάθε θεμέλιο που καθιζάνει εντόνως. Ο Prandtl (1921) στις αναλυτικές λύσεις που συνέταξε για αστοχία φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελίων δημιούργησε τη «Σφήνα Prandtl» (Prandtl Wedge). Όταν ένα επιφανειακό θεμέλιο τείνει να αστοχήσει (ήτοι να συσσωρεύσει πολύ μεγάλες καθιζήσεις), εκτοπίζει παραπλεύρως έδαφος που βρίσκεται στη γειτονιά του (βλ. **Σχήμα 4.15**).



Σχήμα 4.15: Η Σφήνα Prandtl, Prandtl (1921)

Όταν, λοιπόν, καθιζάνει έντονα η περιοχή III (συνθήκες θλίψης), στην περιοχή I προκύπτει ανύψωση (συνθήκες εφελκυσμού). Έτσι, αν στην περιοχή I υπάρχει γειτονικό θεμέλιο, τότε αυτό αποκτά δευτερογενώς την τάση για ανύψωση, η οποία επαλληλίζεται με την πρωτογενή διάθεσή του για καθίζηση. Έτσι, αναλόγως με τον λόγο των φορτίων q και των πλατών B των δύο θεμελίων, τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά, καθώς δεν είναι ισόποσες οι τάσεις για καθίζηση (πρωτογενής) και ανύψωση (δευτερογενής). Από την άλλη, αν τα θεμέλια είναι δίδυμα, οι δύο τάσεις είναι ίδιες και στα δύο θεμέλια.



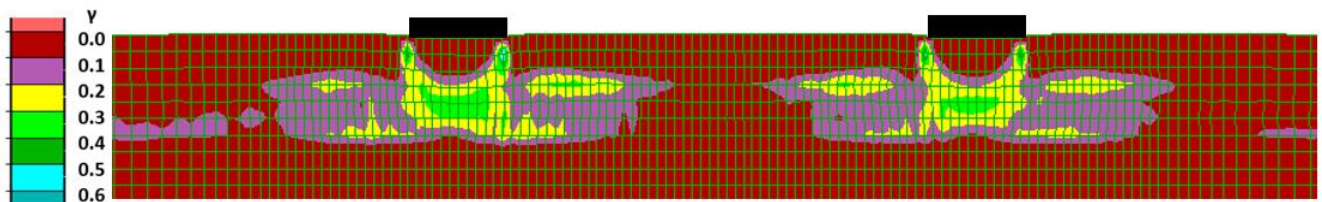
Σχήμα 4.16: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m, q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m, q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 5m$

Επιπλέον, αν το γειτονικό θεμέλιο βρίσκεται εκτός της περιοχής I, τότε η επίδραση του εν λόγω μηχανισμού εξαλείφεται. Εκτιμάται ότι η απόσταση που αρχίζει να εξαλείφεται ο μηχανισμός του εκτοπιζόμενου εδάφους (π.χ., $D/B_{\min} = 1$) είναι μεγαλύτερη από την μικρή απόσταση που εξαλείφεται ο μηχανισμός επαλληλίας τάσεων (π.χ. $D/B_{\min} = 0.5$).

Έτσι, στο Σχήμα 4.16 φαίνεται ότι πλέον δεν υπάρχει καμία επαλληλία τάσεων των δύο θεμελίων μιας και οι μηχανισμοί αστοχίας του καθενός είναι σχεδόν ανεξάρτητες. Παρόλα αυτά, ισχύει ότι $Z_{SSSI}/Z=0.85$. Άρα η καθίζηση εμφανίζεται απομειωμένη σε σχέση με το αντίστοιχο μεμονωμένο θεμέλιο. Συνεπώς, ο μηχανισμός εκτοπιζόμενου εδάφους είναι αυτός που έχει οδηγήσει σε αυτή την απομείωση. Από αναλύσεις που δεν δείχνονται εδώ, για ακόμα μικρότερη ενδιάμεση απόσταση ($D/B_{\min}=0.5$) η απομείωση του λόγου καθιζήσεων και συνεπώς η δράση του μηχανισμού εκτοπιζόμενου εδάφους είναι ακόμα εντονότερη, μιας και παρατηρείται ότι $Z_{SSSI}/Z=0.63$.

4.3.3 Απόκριση για Μεγάλη Ενδιάμεση Απόσταση

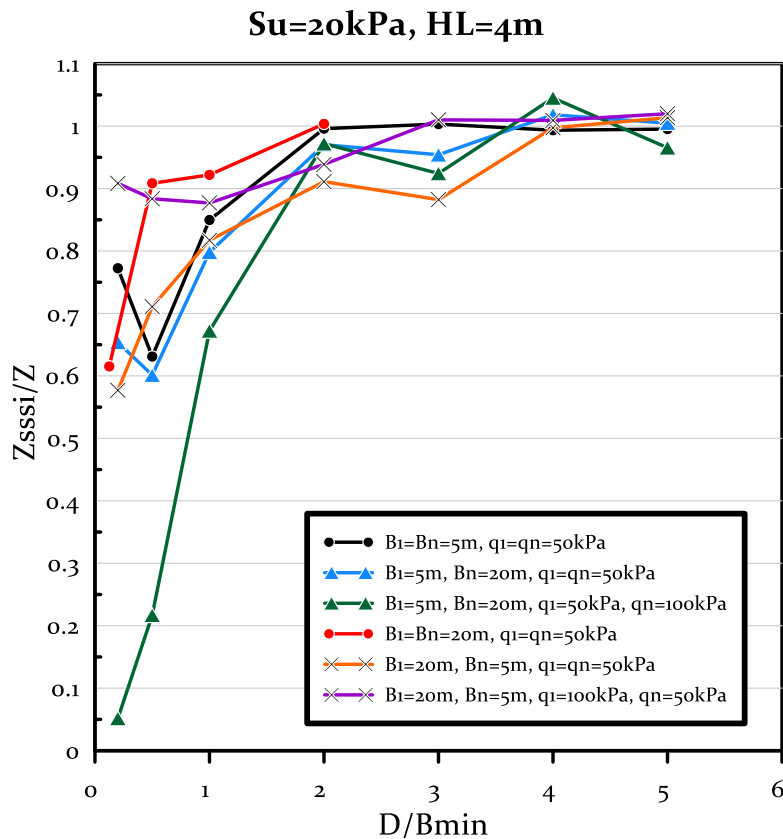
Είναι σαφές ότι δεν υπάρχουν απολύτως ξεκάθαρα όρια που ισχύει ο ένας και που ο άλλος μηχανισμός. Αυτό που είναι σίγουρο είναι ότι σε μεγάλη ενδιάμεση απόσταση, παύουν να έχουν ισχύ και οι δύο μηχανισμοί. Ως παράδειγμα δείχνεται εδώ η περίπτωση όπου τα ίδια θεμέλια των προηγούμενων παραγράφων βρίσκονται σε απόσταση $D/B_{\min} = 5$, στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 25m$.

Προκύπτουν μηχανισμοί αστοχίας που δεν αλληλεμπλέκονται και μοιάζουν πολύ με εκείνον του αντίστοιχου μεμονωμένου (βλ. Σχήμα 4.14). Αυτό αποτυπώνεται και στους λόγους $Z_{SSSI}/Z = 0.99$ Και στροφή $|\theta| = 0.08$ απ' όπου προκύπτει η μη-αλληλεπίδραση των δύο θεμελίων λόγω ικανά μεγάλης απόστασης.

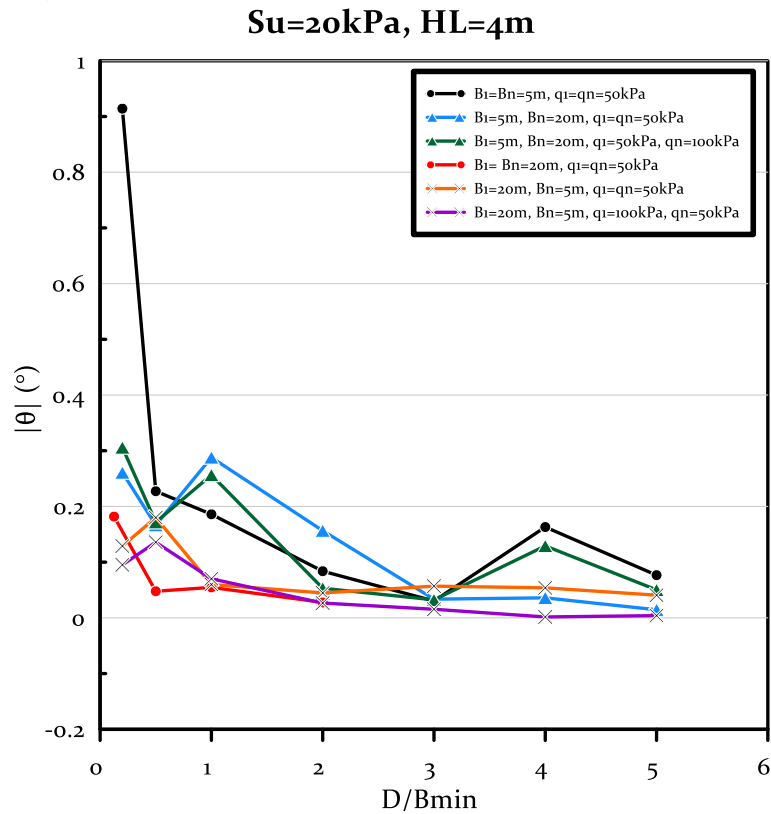
Προσπαθώντας να αποκαλυφθεί το πότε ισχύει οι δύο προαναφερθέντες μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των δύο θεμελίων, στο Σχήμα 4.18 αποτυπώνεται η επίδραση της αδιάστατης απόστασης D/B_{\min} στο λόγο καθίζησης για όλες τις περιπτώσεις ζεύγους θεμελίων που επικάθονται της ίδιας στρώσης με τις περιπτώσεις της παρούσας παραγράφου ($H_L=4m$ με αργιλική στρώση πάχους $H_C=2m$ και $S_u = 20kPa$).



Σχήμα 4.18: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος λεπτής ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

Προκύπτει ότι για $D/B_{min}=4$ αλλά ειδικά για $D/B_{min}=5$ ο λόγος Z_{sssi}/Z δείχνει να προσεγγίζει τη μονάδα και να σταθεροποιείται, αλλά για $D/B_{min}>5$ αυτό θα είναι ακόμα πιο έντονο για όλες τις περιπτώσεις. Από την άλλη, σε όλες τις περιπτώσεις εμφανίζεται μια ελάχιστη τιμή του λόγου Z_{sssi}/Z και η οποία μάλλον σχετίζεται με την ενδιάμεση απόσταση για την οποία παύει να κυριαρχεί η επαλληλία τάσεων στον μηχανισμό της αλληλεπίδρασης. Όμως αυτή η ελάχιστη τιμή του Z_{sssi}/Z εμφανίζεται είτε στο $D/B_{min}=0.5$ είτε στο $D/B_{min}=1$ ανάλογα με την περίπτωση οπότε δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα για το πού είναι ελάχιστες οι καθιζήσεις. Σε κάθε περίπτωση, αν εξαιρέσει κανείς την πιθανή ύπαρξη αυτής της ελάχιστης τιμής του λόγου σε κάποια ενδιάμεση (αλλά μικρή) απόσταση D/B_{min} , η επίδραση της παραμέτρου αυτής είναι γενικώς αυξητική επί της τιμής του λόγου Z_{sssi}/Z , καθώς εξαλείφεται η αλληλεπίδραση με την αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης.

Παρόμοιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας και το αντίστοιχο σχήμα συναρτήσει της απόλυτης τιμής των στροφών. Η επίδραση της παραμέτρου είναι γενικώς μειωτική επί της τιμής $|\theta|$, μιας και όσο μεγαλώνει η απόσταση τόσο πιο ισχυρή είναι η αλληλεπίδραση. Μάλιστα, όταν εξετάζονται οι στροφές, οι μέγιστες τιμές τους βρίσκονται κατά κανόνα στην μικρότερη εξεταζόμενη απόσταση D/B_{\min} . Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{\min} στις κατ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

4.4 Επίδραση Αστράγγιστης Διατμητικής Αντοχής S_u της Αργιλικής Κρούστας

Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία αποτελείται από μια στρώση επιφανειακής μη-ρευστοποιήσιμης αργίλου και μια ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου. Επιλέχθηκε γιατί σπανίως τα θεμέλια επικάθονται της ρευστοποιήσιμης στρώσης, καθώς υπάρχει μια μη ρευστοποιήσιμη κρούστα είτε αργιλική (όπως εδώ) είτε όχι (π.χ., μη-κορεσμένο έδαφος). Τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτής της επιφανειακής κρούστας επηρεάζει τους δύο μηχανισμούς αλληλεπίδρασης που προαναφέρθηκαν και συνεπώς επηρεάζει τα αποτελέσματα. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της επιφανειακής αργιλικής κρούστας S_u ως ο παράγοντας που θα διερευνηθεί παραμετρικά. Αν η επιφανειακή στρώση αποτελούνταν από μη-ρευστοποιήσιμη πυκνή άμμο, ένας αντίστοιχος παράγοντας θα ήταν η σχετική πυκνότητα αυτής $D_r(\%)$.

Μιας και για κάθε διαφορετικό S_u έπρεπε να γίνουν αναλύσεις για όλες τις περιπτώσεις D , B , q επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά S_u . Ένα S_u που αντιστοιχεί σε μαλακή άργιλο ($S_u=20\text{kPa}$) και ένα που αντιστοιχεί σε μεσαία στιφρή άργιλο ($S_u=40\text{kPa}$), π.χ. με βάση τον Ayadat (2021) στον Πίνακα 4.4. Δεν επιλέχθηκαν στιφρότερες άργιλοι, καθώς αυτές απομειώνουν έντονα τις καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης («προστατεύουν» το θεμέλιο), οπότε το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης θα ήταν δύσκολο να διερευνηθεί (π.χ., βλέπε Karamitros et al. 2014 για μεμονωμένο θεμέλιο).

Consistency	Undrained shear strength, C_u (kPa)	
	Vane Test	Swedish cone
Very Soft	< 12	< 7
Soft	12 - 25	7 - 19
Firm	25 - 50	19 - 42
Stiff	50 - 100	42 - 89
Very Stiff	100 - 200	89 - 183
Hard	> 200	> 183

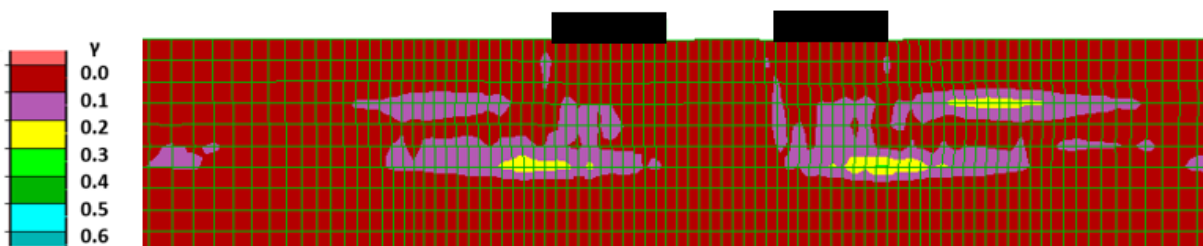
Πίνακας 4.4: Χαρακτηρισμός στιφρότητας αργίλου βάσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της S_u (kPa) (Ayadat (2021))

Η επίδραση της τιμής S_u εδώ θα δειχθεί συγκρίνοντας δύο περιπτώσεις με ίδιο πάχος στρώσεων και ίδια χαρακτηριστικά θεμελίων που εδράζονται σε αργίλους διαφορετικού S_u . Οι δύο περιπτώσεις που επιλέχθηκαν να παρουσιασθούν αναλυτικά είναι οι:

- ❖ $B=5\text{m}$, $B_n=5\text{m}$, $q=50\text{kPa}$, $q_n=50\text{kPa}$ ($Q/Q_n=1$), $D=5\text{m}$, $S_u=20\text{kPa}$, $H_L=4\text{m}$
- ❖ $B=5\text{m}$, $B_n=5\text{m}$, $q=50\text{kPa}$, $q_n=50\text{kPa}$ ($Q/Q_n=1$), $D=5\text{m}$, $S_u=40\text{kPa}$, $H_L=4\text{m}$

Για μεμονωμένο θεμέλιο, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αντοχής της κρούστας, τόσο μικρότερη αναμένεται η σεισμική καθίζηση και τόσο μικρότερες είναι οι μεταβιβαζόμενες τάσεις στο υποκείμενο ρευστοποιήσιμο έδαφος. Συνεπώς, και το φαινόμενο της SSSI αναμένεται να επηρεαστεί, καθώς θα επηρεαστούν οι δύο μηχανισμοί που το διέπουν. Πρακτικά, αναμένεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή της κρούστας, τόσο μικρότερη

θα είναι η τάση εμφάνισης και των δύο μηχανισμών αλληλεπίδρασης. Οπότε είναι κατ' αρχήν ασαφές το ποιος από τους δυο μηχανισμούς επηρεάζεται εντονότερα, και αντίστοιχα ποια η τελική επίδραση στον λόγο Z_{SSSI}/Z , δεδομένου ότι μειώνονται και ο αριθμητής και ο παρονομαστής του λόγου. Σε ό,τι αφορά στις στροφές, αναμένεται σαφής μείωση αυτών με την αύξηση της αντοχής της αργιλικής κρούστας, καθώς φορτίζεται λιγότερο η ρευστοποιήσιμη στρώση που δημιουργεί τη στροφή. Αντίστοιχα αποτελέσματα θα αναμένονται και με το αν αυξανόταν το πάχος H_c της αργιλικής κρούστας και όχι η αντοχή της S_u , αλλά δεν διερευνήθηκαν εδώ λόγω έλλειψης χρόνου. Στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ για μια περίπτωση μαλακής αργιλικής κρούστας. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας διαπερνά την μαλακή κρούστα και εμποδώνεται μέσα στη ρευστοποιήσιμη στρώση. Στο **Σχήμα 4.20** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για το ίδιο ζεύγος θεμελίων στο ίδιο εδαφικό προφίλ, με τη διαφορά ότι η αργιλική κρούστα είναι μέσης στιφρότητας ($S_u=40kPa$).

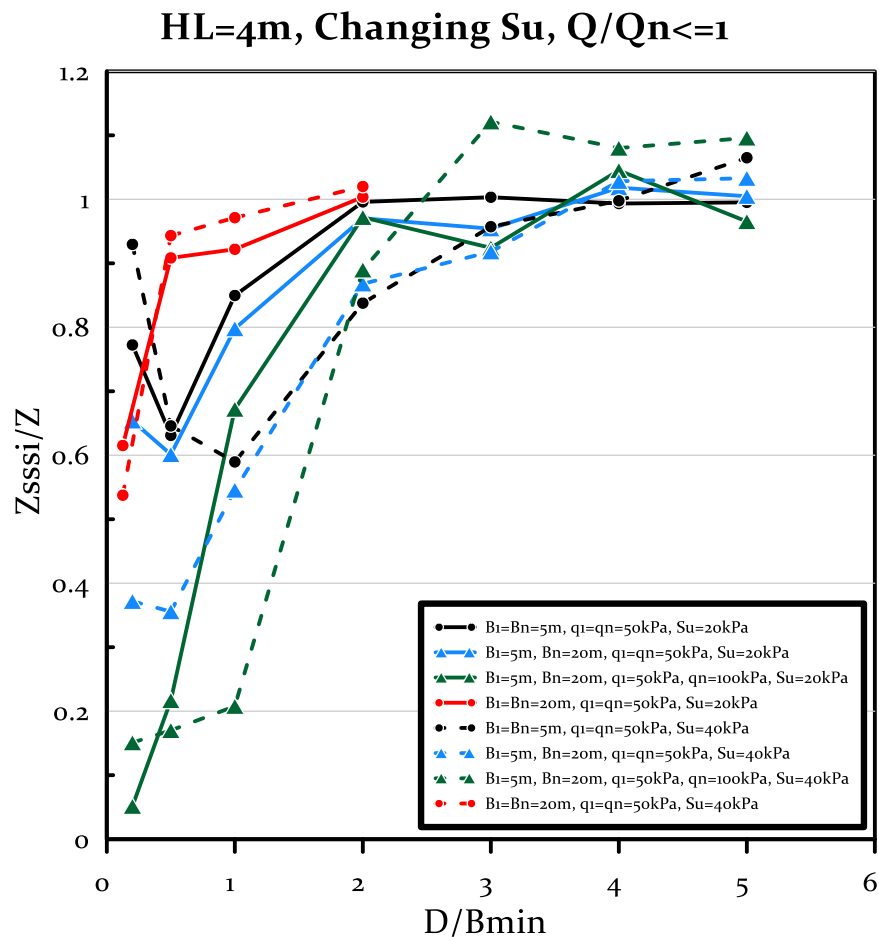


Σχήμα 4.20: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 5m$.

Προκύπτει ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις που εμφανίζονται στη ρευστοποιήσιμη στρώση είναι αισθητά μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται όταν εδράζονται σε μαλακότερη άργιλο. Συνεπώς, είναι προφανές ότι σε απόλυτη τιμή, οι καθιζήσεις Z_{SSSI} είναι μικρότερες όταν η άργιλος είναι στιφρότερη, και άρα το S_u είναι μεγαλύτερο και αυτό αποτυπώνεται σε όρους ισοκαμπυλών γ . Αυτό που δεν είναι σαφές είναι τι κάνει ο λόγος Z_{SSSI}/Z , όχι μόνο σε αυτό το παράδειγμα (όπου ο λόγος Z_{SSSI}/Z μικραίνει) με την αύξηση της τιμής της αντοχής S_u , αλλά και γενικότερα.

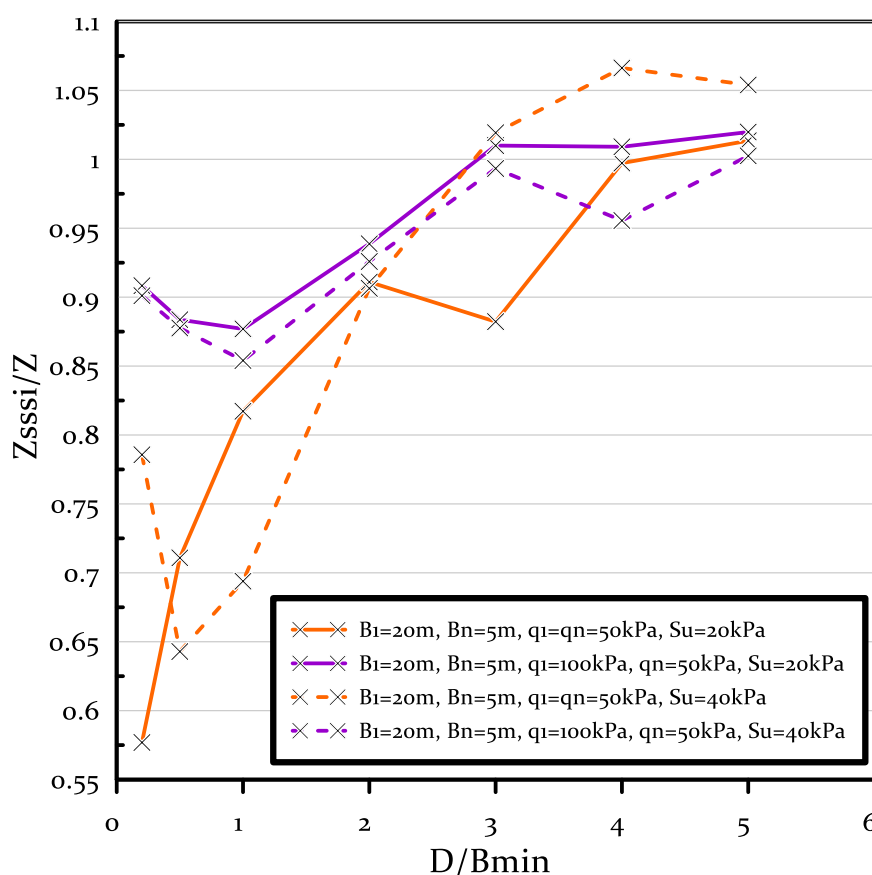
Για να μελετηθεί η επίδραση της αντοχής S_u στο λόγο καθιζήσεων, εδώ μαζεύονται όλα τα αποτελέσματα που αφορούν την επίδραση της απόστασης D/B_{min} για διαφορετικούς συνδυασμούς (B , q) για εδαφικά προφίλ με λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση ($H_L=4m$), αλλά διαφορετική αντοχή S_u αργιλικής κρούστας. Δεδομένου ότι έχουν εξεταστεί πολλοί συνδυασμοί, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δύο σχήματα, το **Σχήμα 4.21** για το ελαφρύ/στενό θεμέλιο του εκάστοτε ζεύγους, και το **Σχήμα 4.22** για το βαρύ/ευρύ εξ

αυτών. Η απόκριση των διδύμων έχει ενταχθεί στο **Σχήμα 4.21**. Και στα δύο σχήματα, οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για $S_u=40\text{kPa}$, ενώ οι συνεχείς εκείνα για $S_u=20\text{kPa}$.



Σχήμα 4.21: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4\text{m}$) με επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2\text{m}$) με αντοχή $S_u=20\text{kPa}$ ή $S_u=40\text{kPa}$.

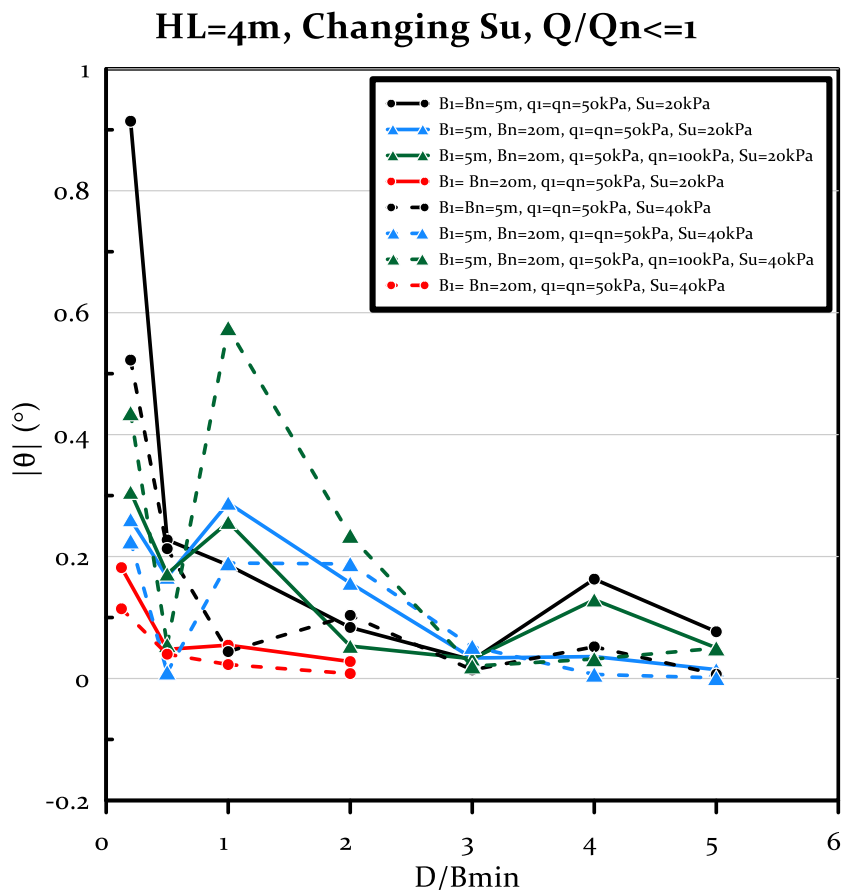
HL=4m, Changing Su, Q/Qn>1



Σχήμα 4.22: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).

Από παρατήρηση και των δύο σχημάτων προκύπτει ότι τις περισσότερες φορές, όσο μεγαλώνει η αντοχή της κρούστας S_u , τόσο μικραίνει και ο λόγος Z_{sssi}/Z . Αυτό ισχύει πάντα σε συνήθεις αποστάσεις (ούτε πολύ μεγάλες ούτε πολύ μικρές), αλλά δεν ισχύει αναγκαστικά στις πολύ μικρές αποστάσεις. Στις μεγάλες αποστάσεις, είτε ισχύει είτε δεν ισχύει, η σημασία είναι μικρή καθώς ο λόγος Z_{sssi}/Z προσεγγίζει τη μονάδα σε όλες τις περιπτώσεις. Ως γενικό συμπέρασμα αυτό σημαίνει ότι η επίδραση της παραμέτρου αυτής είναι **γενικώς μειωτική** επί της τιμής του λόγου Z_{sssi}/Z , δηλαδή μειώνεται περισσότερο ο αριθμητής απ' ότι ο παρονομαστής του λόγου λόγω αύξησης της αντοχής S_u . Με άλλα λόγια μοιάζει σαν η αλληλεπίδραση θεμελίων να είναι πιο έντονη για στιφρή επιφανειακή άργιλο στην ίδια ενδιάμεση απόσταση (π.χ., ο μηχανισμός Prandtl φτάνει σε μεγαλύτερη οριζόντια απόσταση όσο μεγαλώνει η αντοχή του εδάφους).

Όσον αφορά στις στροφές, στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται εκείνες που αφορούν στα ελαφριά/στενά του εκάστοτε ζεύγους ($Q/Q_n \leq 1$), καθώς στα βαριά/ευρέα οι στροφές είναι ούτως ή άλλως μικρές και χωρίς σημασία για τον μηχανικό.



Σχήμα 4.23: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις κατ' απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$) με $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).

Δεν προκύπτει σαφής επίδραση της αντοχής S_u . Τις περισσότερες φορές η απόλυτη τιμή της στροφής είναι μικρότερη όταν το θεμέλιο εδράζεται σε στιφρότερη άργιλο, δεδομένου ότι και οι καθιζήσεις είναι μικρότερες (αφού οι εδαφικές παραμορφώσεις είναι μικρότερες).

4.5 Επίδραση Πάχους Ρευστοποιήσιμης Στρώσης H_L

Μια νέα παράμετρος που διερευνήθηκε στην παρούσα εργασία και όχι στην εργασία της Δημουλά (2022) ήταν το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_L . Η επιρροή της συγκεκριμένης παραμέτρου τονίστηκε στην εργασία των Kassas et. al. (2022). Αποφασίστηκε να εξετασθούν δύο διαφορετικά πάχη H_L : ένα μεγάλο, $H_L=8\text{m}$, το οποίο θεωρήθηκε ως ένα «άνω όριο» για τις συνήθεις πρακτικές εφαρμογές και ένα μικρό, $H_L=4\text{m}$, το οποίο όμως δεν είναι και αμελητέο, καθώς επιτρέπει σημαντικές καθιζήσεις των θεμελίων. Το κοινό που έχουν οι δύο περιπτώσεις είναι ότι επικαλύπτονται οι στρώσεις από την αργιλική κρούστα πάχους $H_c=2\text{m}$, ενώ είναι άμεσα συγκρίσιμες καθώς δέχονται την ίδια επιτάχυνση βάσης (στα -10m από την επιφάνεια του εδάφους).

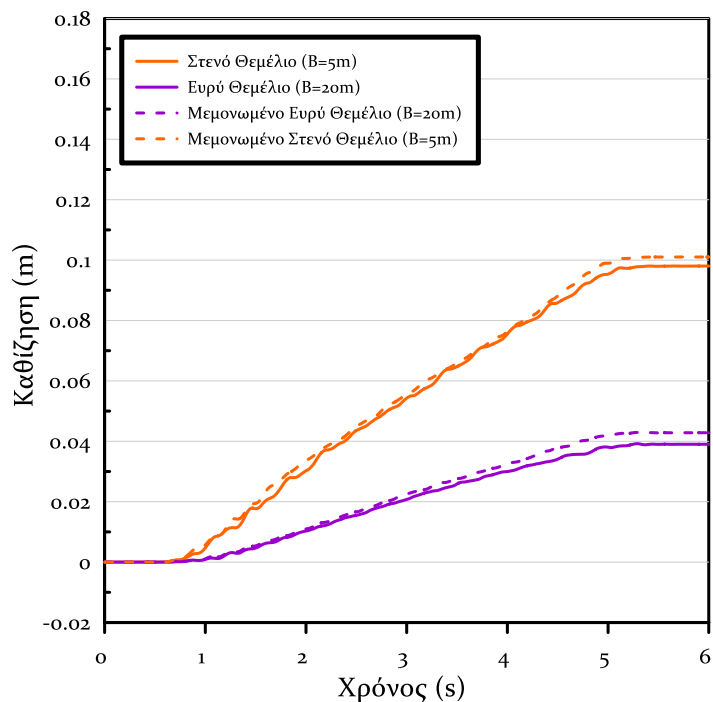
Εδώ, όπως και στην επίδραση της αντοχής της κρούστας S_u , η απόκριση σχετίζεται με το πόσο «στιβαρό» είναι το υποκείμενο έδαφος. Για την ίδια τιμή της αντοχής S_u , το μέγεθος των καθιζήσεων είναι ανάλογο του πάχους της «συμπιεστής» στρώσης, όπου εδώ είναι το πάχος H_L της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Έτσι, κατ' απόλυτη τιμή, οι αναμενόμενες καθιζήσεις και (πιθανώς και) οι αναμενόμενες στροφές είναι μικρότερες όταν μειώνεται το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Όμως, για τον λόγο Z_{SSSI}/Z , δεν είναι σίγουρο το πως επηρεάζεται, καθώς αλλάζουν ομόρροπα και ο αριθμητής και ο παρονομαστής του λόγου. Πάντως το πάχος της στρώσης αναμένεται να επηρεάσει περισσότερο το μηχανισμό εκτοπιζόμενου εδάφους, παρά εκείνον της επαλληλίας τάσεων, οπότε είναι σίγουρο ότι το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι σημαντική παράμετρος για το φαινόμενο της SSSI.

Και πάλι, επιλέχθηκε να συγκριθούν δύο τυπικές αποκρίσεις, μια με λεπτή και μια με παχιά ρευστοποιήσιμη στρώση με όλες τις άλλες παραμέτρους ίδιες, και μετά να παρουσιασθούν τα συγκεντρωτικά σχήματα που οδηγούν σε γενικότερα συμπεράσματα. Οι περιπτώσεις που επιλέχθηκαν να αναλυθούν εδώ είναι οι παρακάτω:

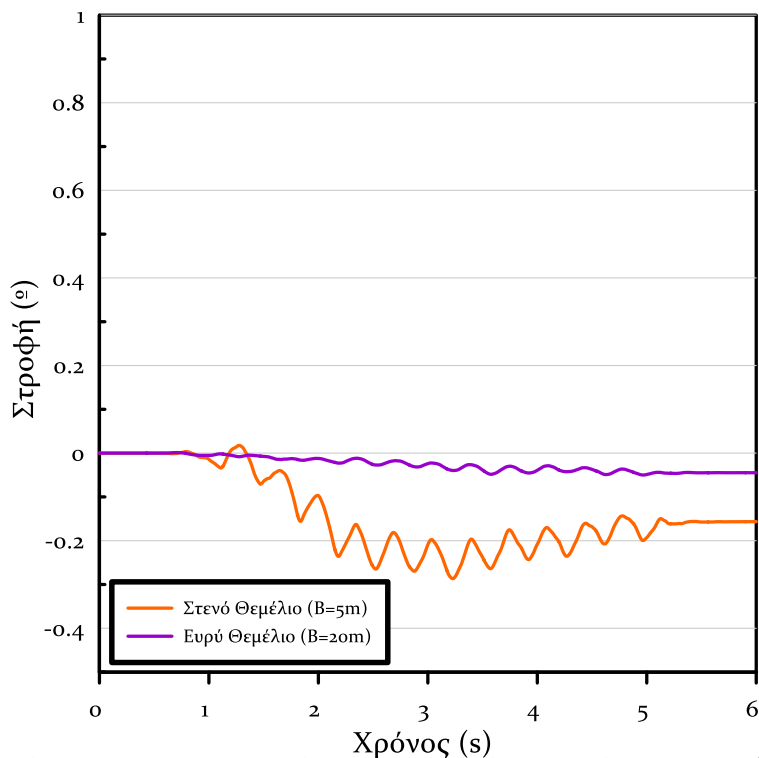
- ❖ $B=5\text{m}$, $B_n=20\text{m}$, $q=50\text{kPa}$, $q_n=50\text{kPa}$ ($Q/Q_n=0.25$), $D=10\text{m}$, $S_u=20\text{kPa}$, $H_L=4\text{m}$
- ❖ $B=5\text{m}$, $B_n=20\text{m}$, $q=50\text{kPa}$, $q_n=50\text{kPa}$ ($Q/Q_n=0.25$), $D=10\text{m}$, $S_u=20\text{kPa}$, $H_L=8\text{m}$

4.5.1 Απόκριση σε Μικρό Πάχος Ρευστοποιήσιμης Στρώσης

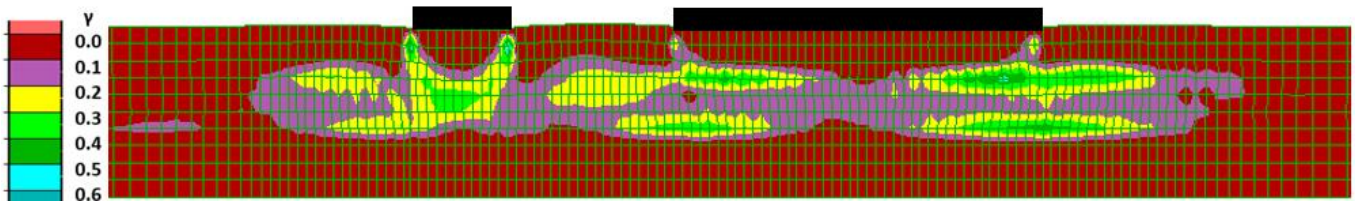
Επιλέχθηκε να παρουσιασθεί ένα παράδειγμα με έντονο μηχανισμό εκτοπιζόμενου εδάφους (ανόμοια θεμέλια), αλλά και με αρκετή ενδιάμεση απόσταση ($D/B_{\min}=2$) ώστε να μην είναι έντονος ο μηχανισμός της επαλληλίας τάσεων. Έτσι, πιστεύεται ότι θα γίνει σαφέστερη η διαφορά στην απόκριση μεταξύ της λεπτής και της παχιάς ρευστοποιήσιμης στρώσης. Παρακάτω θα παρουσιασθούν οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής και οι ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης για να καταστεί σαφέστερη η απόκριση. Συγκεκριμένα στα Σχήματα 4.24 και 4.25 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής, ενώ στο Σχήμα 4.26 δίνονται οι ισοκαμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης γ για την περίπτωση όπου το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι μικρό ($H_L=4\text{m}$).



Σχήμα 4.24: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



Σχήμα 4.25: Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφής ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.

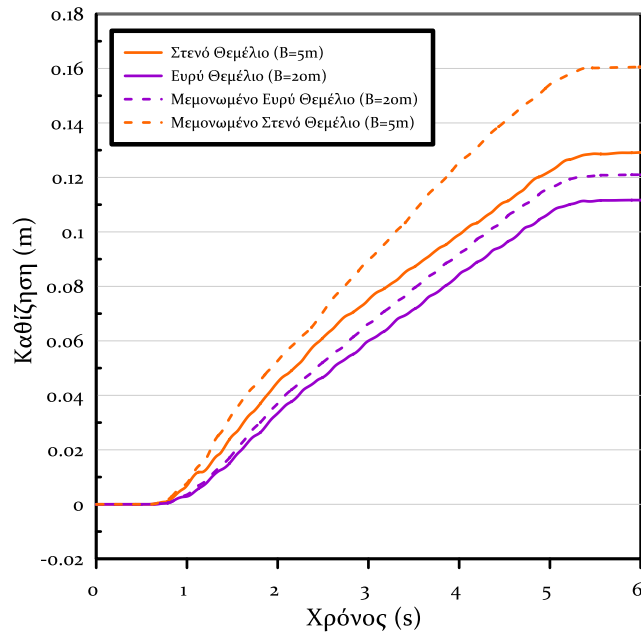


Σχήμα 4.26: Ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$

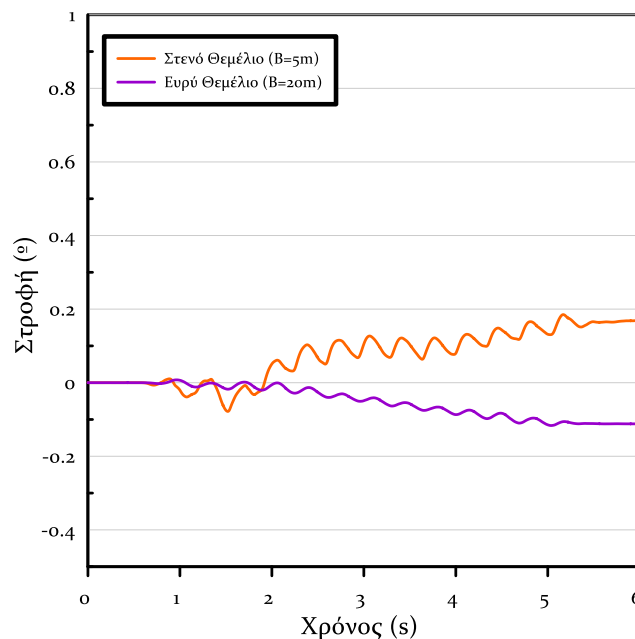
Από τις χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής καθίσταται προφανές ότι πρόκειται για μια περίπτωση που δεν εμφανίζει αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών κατασκευών. Συγκεκριμένα, οι καθιζήσεις τόσο του ενός όσο και του άλλου θεμελίου είναι πρακτικά όμοιες με τις αντίστοιχες ενός μεμονωμένου θεμελίου ίδιων διαστάσεων και φορτίου σε ίδιο έδαφος ($Z_{SSSI}/Z=0.97$ και $(Z_{SSSI}/Z)_n=0.91$), ενώ το ίδιο ισχύει και για τις στροφές μιας και είναι και οι δύο πρακτικά μηδενικές ($|\theta|=0.16^\circ$ και $|\theta|_n=0.04^\circ$).

4.5.2 Απόκριση σε Μεγάλο Πάχος Ρευστοποιήσιμης Στρώσης

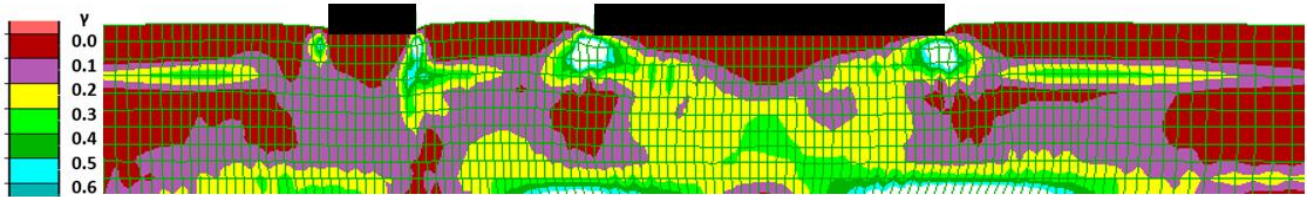
Για να προσεγγισθεί μια παρόμοια εικόνα ισχνής αλληλεπίδρασης σε αντίστοιχη περίπτωση με παχιά ρευστοποιήσιμη στρώση χρειάζεται η απόσταση να φθάσει σε τιμές $D/B_{\min}=4$ αν όχι ακόμα παραπάνω. Άρα, φαίνεται η αλληλεπίδραση να παύει σε μικρότερη απόσταση όταν το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι μικρότερο. Αυτό θα επιβεβαιωθεί και παρατηρώντας τα αντίστοιχα σχήματα συγκρίσεων απόκρισης για $H_L=8m$, τα οποία παρουσιάζονται εδώ. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 4.27 και 4.28 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες καθίζησης και στροφής, ενώ στο Σχήμα 4.29 δίνονται οι ισοκαμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης γ για την περίπτωση όπου το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι μεγάλο ($H_L=8m$).



Σχήμα 4.27: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθίζησης ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



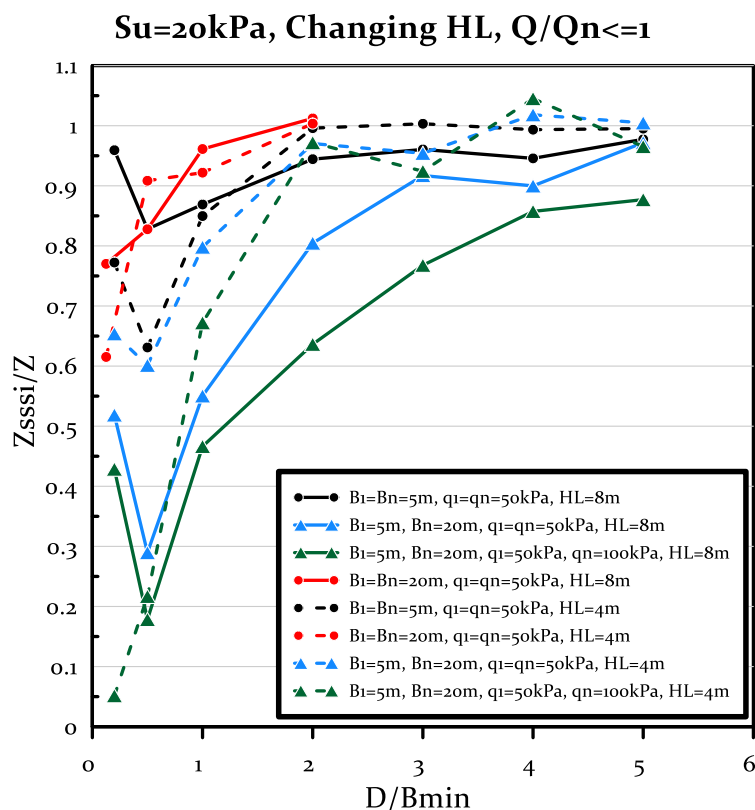
Σχήμα 4.28: Σύγκριση χρονοϊστοριών στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



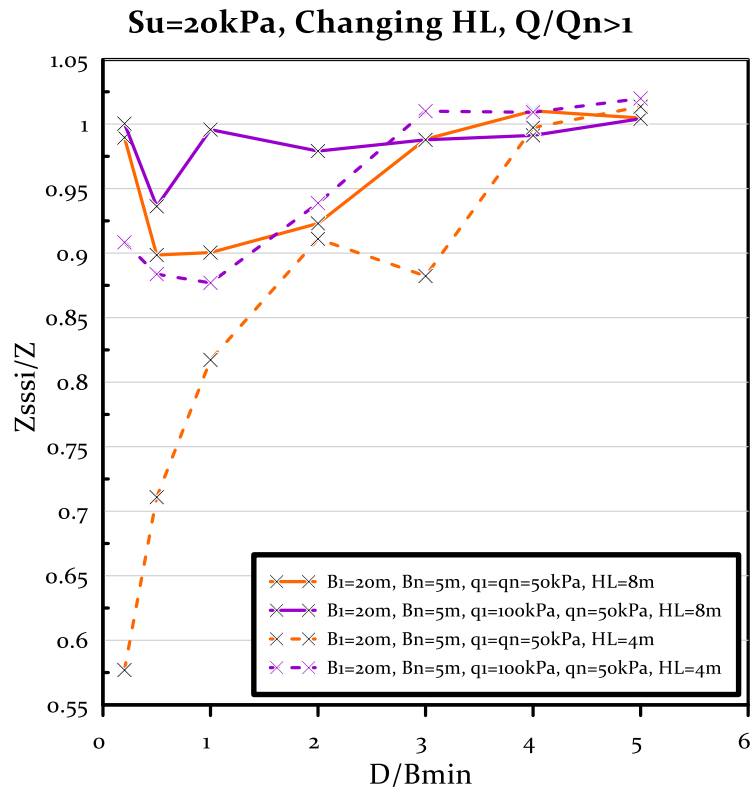
Σχήμα 4.29: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων γ_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m, q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m, q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$

Προκύπτει ότι με ίδιες γεωμετρικές, γεωτεχνικές και τασικές συνθήκες ο λόγος Z_{SSSI}/Z για το στενό θεμέλιο ισούται με 0.80, δηλαδή η αλληλεπίδραση είναι υπαρκτή σε αυτή την απόσταση. Αυτό μοιάζει να επιβεβαιώνεται και παρατηρώντας το Σχήμα 4.29 σε σύγκριση με το Σχήμα 4.26, απ' όπου παρατηρείται ότι ο μηχανισμός αστοχίας φθάνει σε μεγαλύτερο βάθος (μέχρι τον πυθμένα της ρευστοποιήσιμης στρώσης) και κινητοποιεί μεγαλύτερο όγκο εδάφους, όταν το πάχος H_L είναι μεγαλύτερο. Συνεπώς, ο μηχανισμός Εκτοπιζόμενου Εδάφους (στο Σχήμα 4.29) έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο εδάφους να εκτοπίσει κάτω από το βαρύ/ευρύ προς το ελαφρύ/στενό θεμέλιο και συνεπώς ο λόγος Z_{SSSI}/Z είναι χαμηλότερος όταν $H_L=8m$.

Για να εξαχθεί όμως ένα γενικευμένο συμπέρασμα για την επιρροή του H_L κυρίως στον λόγο Z_{SSSI}/Z και δευτερευόντως στην απόλυτη τιμή των στροφών $|\theta|$ πρέπει να αναλυθούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για κάθε περίπτωση και σε κάθε ενδιάμεση απόσταση. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 4.30 και 4.31 παρουσιάζονται οι λόγοι καθίζησης για αργιλική κρούστα με $S_u=20kPa$ (μιας και αυτές οι περιπτώσεις παρουσιάστηκαν άνωθεν) για τα ελαφριά ($Q/Q_n \leq 1$) και τα βαριά θεμέλια ($Q/Q_n > 1$), αντίστοιχα.



Σχήμα 4.30: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



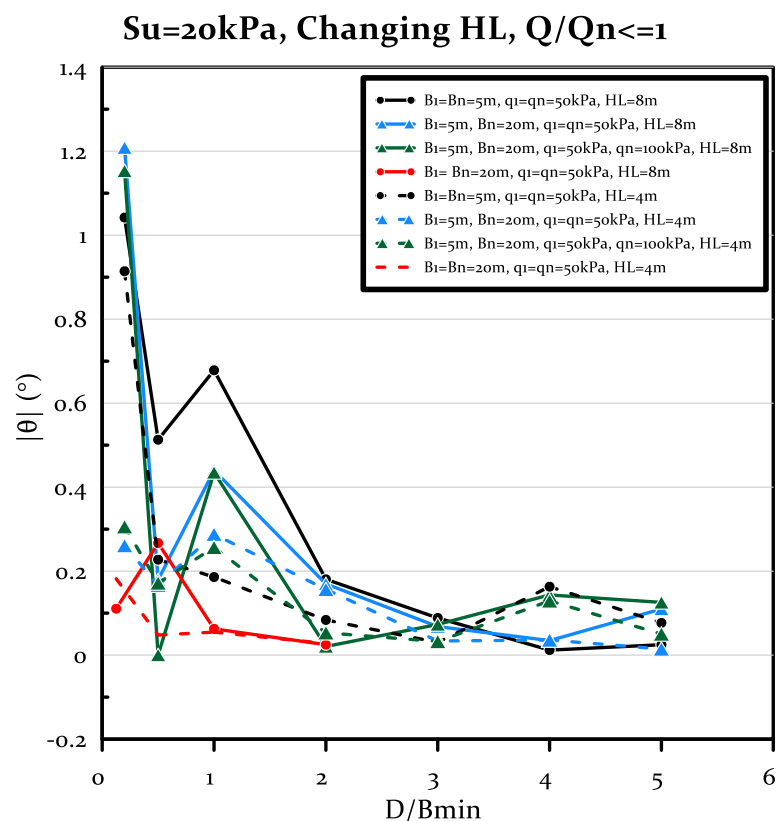
Σχήμα 4.31: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

Προκύπτει ότι η αλληλεπίδραση για λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση (διακεκομμένες γραμμές) φθίνει πολύ νωρίτερα με την απόσταση D/B_{min} συγκριτικά με την παχιά ρευστοποιήσιμη στρώση (συνεχείς γραμμές). Σε κάθε περίπτωση λεπτής ρευστοποιήσιμης στρώσης, για κανονικοποιημένη απόσταση $D/B_{min}=2$ ο λόγος $Z_{sssi}/Z > 0.90$, αλλά για περιπτώσεις παχιάς ρευστοποιήσιμης στρώσης η απόσταση που χρειάζεται ώστε να αρχίσει να φθίνει η αλληλεπίδραση είναι τουλάχιστον διπλάσια.

Επιπλέον, σε όρους λόγου καθιζήσεων Z_{sssi}/Z , ειδικά στις περιοχές όπου αυτός δεν τείνει στη μονάδα (δηλαδή όχι για μεγάλες ενδιάμεσες αποστάσεις) φαίνεται ο λόγος Z_{sssi}/Z να είναι κατά κανόνα μεγαλύτερος για λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση σε περιπτώσεις όπου $Q/Q_n \leq 1$ και μικρότερος σε περιπτώσεις όπου $Q/Q_n > 1$. Αυτό ήταν αναμενόμενο για μεγαλύτερες αποστάσεις μιας και εκεί ο μηχανισμός Εκτοπιζόμενου εδάφους έχει απαλειφθεί για λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση. Παρόλα αυτά, ακόμα και για μικρότερες αποστάσεις ο μηχανισμός αυτός μοιάζει πιο ανίσχυρος όταν υπάρχει λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση, και για αυτό ο λόγος Z_{sssi}/Z τείνει να είναι συγκριτικά μεγαλύτερος. Αυτό εξηγεί και γιατί δεν υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά και για τα θεμέλια όπου $Q/Q_n > 1$. Συγκεκριμένα, καθώς είναι πιο ευρεία και βαριά από τα γειτονικά τους, είτε υπάρχει παχιά είτε υπάρχει λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση δεν επηρεάζονται

ιδιαίτερα από το έδαφος που εκτοπίζεται από τα γειτονικά τους στενά και ελαφριά θεμέλια. Συνεπώς γενικότερα, το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L έχει **μειωτική επίδραση** στον λόγο καθιζήσεων, καθώς η αύξηση του πάχους H_L ενισχύει τον μηχανισμό Εκτοπιζόμενου Εδάφους, οπότε και την αλληλεπίδραση των γειτονικών κατασκευών.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε όρους απόλυτης τιμής στροφής $|\theta|$ εμφανίζονται στο **Σχήμα 4.32**, ειδικά για τα θεμέλια με $Q/Q_n \leq 1$ που είναι αυτά που έχουν ουσιώδεις στροφές.



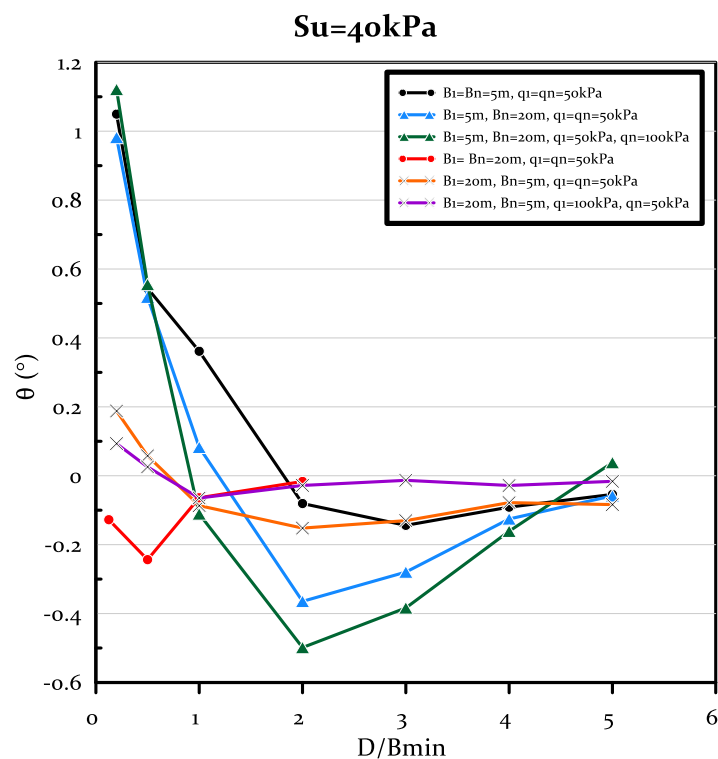
Σχήμα 4.32: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις κατ' απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$ ή $H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

Και εδώ, οι στροφές για ενδιάμεση απόσταση $D/B_{min}=2$ δείχνουν να έχουν μειωθεί ουσιαστικά και συνεπώς η αλληλεπίδραση να έχει αρχίσει να γίνεται πιο ισχνή, ανεξαρτήτως πάχους H_L . Σε ό,τι αφορά στο πάχος H_L διαφαίνεται ότι η αύξηση του αυξάνει ελαφρώς την απόλυτη τιμή της στροφής, αν και η επίδραση δεν είναι τόσο σαφής. Αυτό θα πρέπει να αποδοθεί και πάλι στο ότι η αύξηση του πάχους H_L ενισχύει

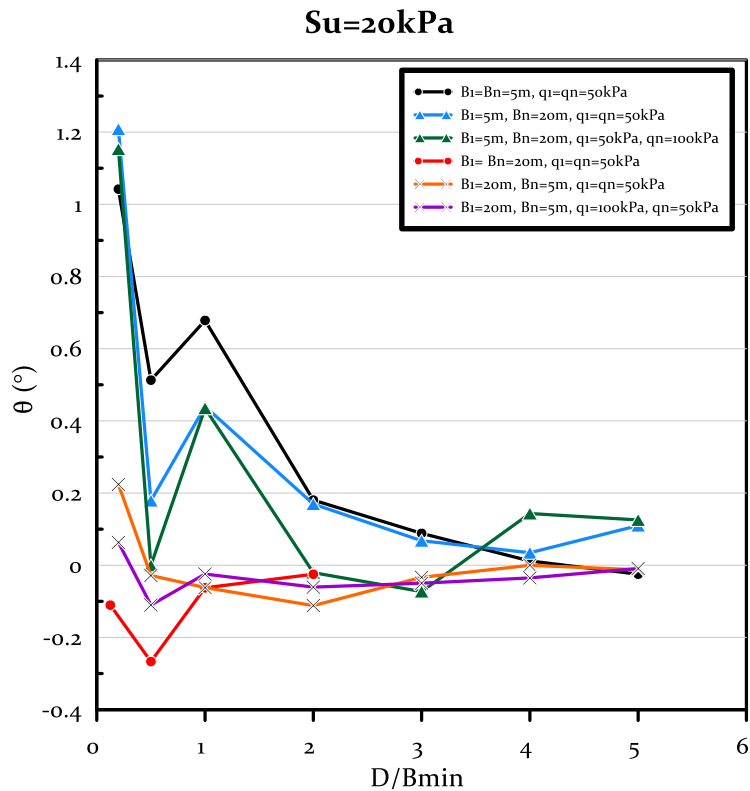
τον μηχανισμό Εκτοπιζόμενου Εδάφους, οπότε και την αλληλεπίδραση των γειτονικών κατασκευών.

4.6 Περί της Φοράς των Στροφών Γειτονικών Κατασκευών

Σε όλες τις ανωτέρω παραγράφους, η όποια αναφορά στις στροφές αφορούσε τις απόλυτες τιμές αυτής, καθώς αυτή κυρίως ενδιαφέρει τον μηχανικό. Ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει και η φορά της στροφής αυτής, αν είναι συγκλίνουσα ή αποκλίνουσα. Αυτό είναι το αντικείμενο της παρούσας παραγράφου. Με βάση τη βιβλιογραφία (π.χ. Hayden (2015)), η συνήθης εικόνα είναι ότι σε κοντινές αποστάσεις τα θεμέλια τείνουν να συγκλίνουν μεταξύ τους, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις τείνουν να αποκλίνουν το ένα από το άλλο.



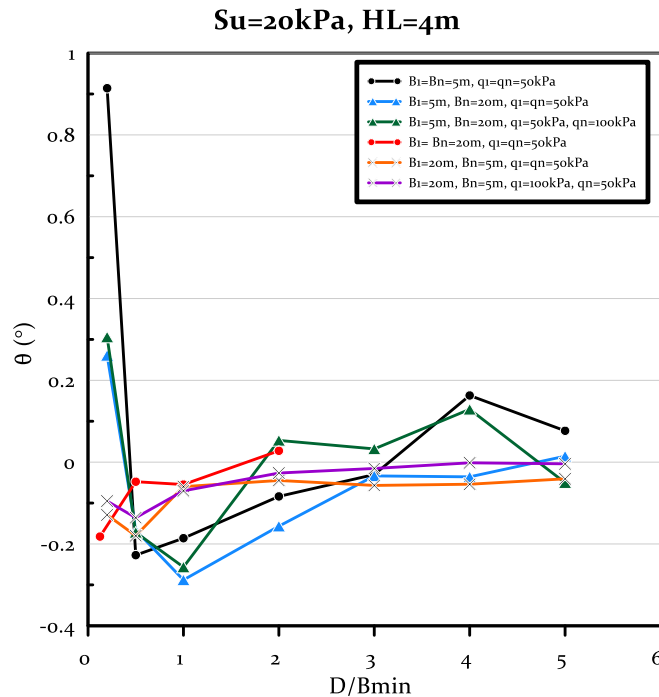
Σχήμα 4.33: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στη στροφή θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ισχυρή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



Σχήμα 4.34: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στη στροφή θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

Έτσι, στα Σχήματα 4.33 και 4.34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους στροφής θ , με το πρόσημό της ($\theta < 0$ αποκλίνουσα και $\theta > 0$ συγκλίνουσα), για τις περιπτώσεις όπου η αργιλική κρούστα έχει αντοχή $S_u = 20$ και 40 kPa, αντίστοιχα, και η ρευστοποιήσιμη στρώση είναι παχιά ($H_L=8m$). Για το εδαφικό προφίλ με ισχυρή αργιλική κρούστα ($S_u = 40kPa$) ο κανόνας της βιβλιογραφίας δείχνει να ισχύει, δηλαδή για αποστάσεις μικρότερες από $D/B_{min} = 2$ οι στροφές είναι συγκλίνουσες, ενώ για αποστάσεις μεγαλύτερες οι στροφές είναι αποκλίνουσες. Για εδαφικό προφίλ με ασθενή αργιλική κρούστα ($S_u=20kPa$), τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο σαφή, καθώς διαφαίνεται επιπλέον επίδραση του σχετικού φορτίου του θεμελίου Q/Q_n .

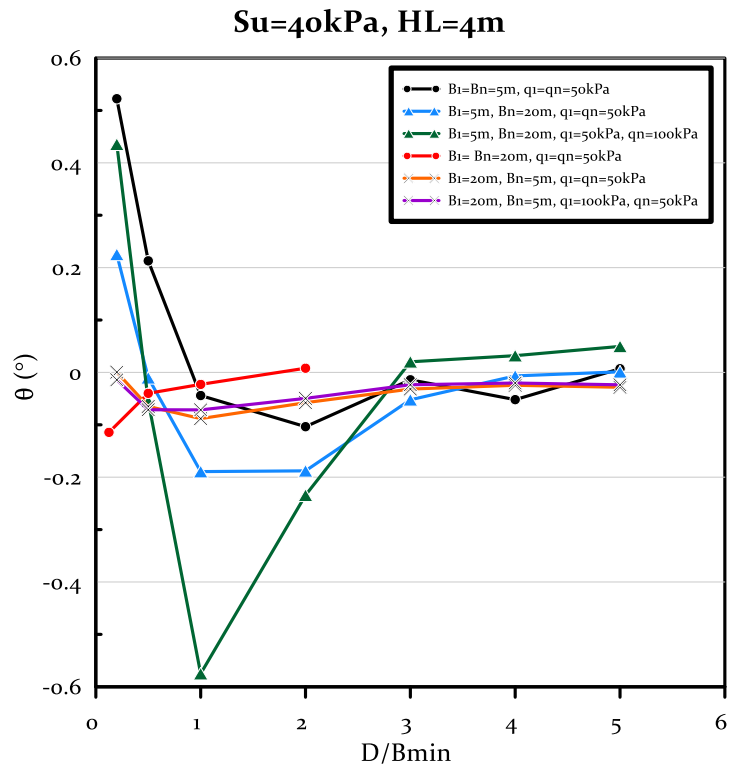
Για να προκύψουν πιο γενικευμένα συμπεράσματα εξετάζονται και τα εδαφικά προφίλ με λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση ($H_L=4m$), στα Σχήματα 4.35 και 4.36 που ακολουθούν.



Σχήμα 4.35: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις τιμή στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος λεπτής ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $Su=20kPa$).

Και πάλι, ο εμπειρικός κανόνας που έχει προκύψει από την υπάρχουσα βιβλιογραφία δείχνει να ισχύει για το προφίλ με τη ισχυρότερη αργιλική κρούστα. Εκεί βέβαια, το όριο αλλαγής φοράς δεν είναι πλέον το $D/B_{min}=2$ αλλά το $D/B_{min}=1$ ή ακόμα και μικρότερο. Για την ασθενέστερη αργιλική κρούστα τα συμπεράσματα είναι και πάλι παρόμοια με πριν, δηλαδή δεν επιβεβαιώνεται ο κανόνας, αλλά διαφαίνεται επιπλέον επίδραση του σχετικού φορτίου του θεμελίου Q/Q_n : τα βαριά και ευρέα θεμέλια δείχνουν να έχουν τάση να αποκλίνουν, ενώ τα στενά και ελαφριά να συγκλίνουν, στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Με άλλα λόγια, συνολικά, υπάρχει επίδραση της απόστασης D/B_{min} στη φορά της στροφής γειτονικών κατασκευών, η οποία είναι σύμφωνη με τη βιβλιογραφία όταν υπάρχει ισχυρή αργιλική κρούστα (συγκλίνουσα σε μικρές τιμές απόστασης και αποκλίνουσα σε μεγάλες). Αντιθέτως, όταν υπάρχει ασθενής κρούστα, υπάρχει επιπλέον επίδραση του σχετικού φορτίου του θεμελίου Q/Q_n (τα βαριά/ευρέα θεμέλια συγκλίνουν, ενώ τα στενά/ελαφριά αποκλίνουν), ενώ δεν προκύπτει ποιοτική επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L στη φορά της στροφής.



Σχήμα 4.36: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις τιμή στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος λεπτής ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ισχυρή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).

Κεφάλαιο 5

Σχέση Εκτίμησης Λόγου Καθιζήσεων

5.1 Γενικά

Στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και στις προηγούμενες αναφορές στο θέμα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, ο στόχος ήταν πρωτίστως ο εντοπισμός των παραμέτρων που διέπουν το πρόβλημα της SSSI και ο «ποιοτικός» προσδιορισμός της επίδρασής τους. Δηλαδή, ο προσδιορισμός του αν μειώνεται ή αυξάνεται ο λόγος καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z όταν μειώνεται ή αυξάνεται η κάθε παράμετρος. Οι παραμετρικές αναλύσεις που έλαβαν χώρα τόσο κατά τη διάρκεια της εργασίας της Δημουλά (2022) όσο και στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας εντόπισαν τις παραμέτρους αυτές, καθώς και την αναμενόμενη επίδραση της καθεμίας.

Ο στόχος λοιπόν του Κεφαλαίου 5 και συνεπώς και τελικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διατύπωση μιας αναλυτικής μεθοδολογίας μέσω «κλειστών» μαθηματικών σχέσεων για τον υπολογισμό του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z συναρτήσεως των επιδρώντων παραμέτρων μετά από στατιστική επεξεργασία όλων των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Η συγκεκριμένη αναλυτική μεθοδολογία θα μπορεί να χρησιμοποιείται μαζί με υπάρχουσες μεθοδολογίες εκτίμησης καθιζήσεων μεμονωμένων θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος (π.χ. Karamitros et. al. (2013), Bray & Macedo (2017) κλπ.) ώστε να λαμβάνεται υπόψιν και η επίδραση γειτονικών κατασκευών.

Συνολικά η βάση δεδομένων περιλαμβάνει λόγους καθιζήσεων για 3 θεμέλια, επί τη βάση 152 περιπτώσεων αλληλεπίδρασης. Το συνολικό εύρος τιμών του λόγου καθιζήσεων στη βάση δεδομένων είναι από 0.15 έως 1.12, για θεμέλια σε κανονικοποιημένες αποστάσεις από $D/B_{\min} = 0.125$ έως 5, με σχετικά φορτία $Q/Q_n = 0.125$ έως 8, εδραζόμενα σε δίστρωτο εδαφικό προφίλ με επιφανειακή αργιλική «κρούστα» αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 20 \text{ kPa}$ ή 40 kPa επί ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου πάχους $H_L = 4 \text{ m}$ ή 8 m

5.2 Μεθοδολογία Στατιστικής Επεξεργασίας

Ο στόχος της στατιστικής επεξεργασίας ήταν η κατάστρωση μιας σχέσης εκτίμησης του λόγου καθιζήσεων της μορφής της Σχέσης 5.1:

$$\frac{Z_{SSSI}}{Z} = \alpha \left(\frac{D}{B_{\min}} \right)^\beta \left(\frac{Q}{Q_n} \right)^\gamma \left(\frac{S_u}{P_a} \right)^\delta \left(\frac{H_L}{H_c} \right)^\epsilon \quad (5.1)$$

Από τη Σχέση 5.1 προκύπτει ότι οι σημαντικές παράμετροι παρουσιάζονται σε αδιάστατη ή κανονικοποιημένη μορφή. Πιο συγκεκριμένα, ήδη από το Κεφάλαιο 4, η ενδιάμεση απόσταση εμφανίζεται κανονικοποιημένη ως προς το ελάχιστο πλάτος θεμελίου D/B_{\min} ,

ενώ το ίδιο ισχύει και για το σχετικό φορτίο θεμελίου Q/Q_n (διαιρεμένο ως προς το φορτίου του γειτονικού του). Επιπλέον, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής «κρούστας» S_u αδιαστατοποιείται ως προς με την ατμοσφαιρική πίεση P_a , η οποία θεωρήθηκε ίση με 100kPa. Έτσι, η χρήση της Σχέσης 5.1 γίνεται ανεξάρτητη των μονάδων, ενώ επιπλέον το εν λόγω σημαντικό μέγεθος αποκτά ίδια τάξη μεγέθους με τις υπόλοιπες σημαντικές παραμέτρους, ώστε να μην επηρεαστεί η στατιστική επεξεργασία από τη διαφορά στο σχετικό μέγεθος των παραμέτρων (ανεξάρτητων μεταβλητών). Για τους ίδιους λόγους γίνεται και η κανονικοποίηση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L ως προς το πάχος της αργιλικής «κρούστας» H_c . Παρόλα αυτά, καθώς έχουν γίνει αναλύσεις μόνο για $H_c = 2m$, οι όποιες σχέσεις προκύπτουν παρακάτω, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται θεωρώντας αυτή την τιμή για το πάχος H_c , ανεξαρτήτως της πραγματικής τιμής του.

Για να ποσοτικοποιηθούν ο σταθερός όρος α και οι εκθέτες β , γ , δ και ε της Σχέσης 5.1, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Πολύ-μεταβλητής Παλινδρόμησης (Multivariate Regression). Με στόχο την απλούστερη εφαρμογή της μεθόδου με συνήθη λογισμικά στατιστικής επεξεργασίας (μέσω Microsoft Excel) ήταν αναγκαία η χρήση λογαριθμικών μετασχηματισμών (logarithmic transformations) ώστε εμμέσως, μέσω μιας γραμμικής παλινδρόμησης να προκύψει μια μη-γραμμική παλινδρόμηση (power regression). Ουσιαστικά, κάνοντας γραμμική παλινδρόμηση με τις τιμές των αποτελεσμάτων σε \ln , προσομοιάζεται η μη-γραμμική παλινδρόμηση με την παρακάτω διαδικασία:

- **Βήμα 1:** Μετατροπή της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών με λογαριθμικό μετασχηματισμό (log-transformed)
- **Βήμα 2:** Εκτέλεση γραμμικής παλινδρόμησης με τις λογαριθμικά μετασχηματισμένες τιμές. Εδώ προκύπτει εξίσωση της παρακάτω μορφής, στο Σχήμα 5.2 (απλουστευτικά για 1 ανεξάρτητη και 1 εξαρτημένη μεταβλητή):

$$\ln(Y) = \alpha + \beta_1 \ln(X_1) + \beta_2 \ln(X_2) + \beta_3 \ln(X_3) + \beta_4 \ln(X_4) \quad (5.2)$$

- **Βήμα 3:** Η παραπάνω εξίσωση είναι ισοδύναμη με μια πολυωνυμική εξίσωση (power function) η οποία αποτελεί και τον τελικό στόχο μιας μη-γραμμικής παλινδρόμησης. Η τελική εξίσωση που αποτελεί και τον στόχο της παλινδρόμησης παρουσιάζεται στη Σχέση 5.3

$$Y = \alpha X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} X_4^{\beta_4} \quad (5.3)$$

Στην περίπτωση μας, ως εξαρτημένη μεταβλητή Y θεωρείται ο λόγος καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z , ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές X_1 έως X_4 οι τέσσερις αδιάστατες παράμετροι της Σχέσης 5.1. Δοκιμάστηκαν διάφορες σχέσεις εκτίμησης, ξεκινώντας από την πιο απλή μονο-παραμετρική, (όπου $N=1$) στην παράγραφο 5.3, στην απλή πολύ-παραμετρική (όπου $N=4$) στην παράγραφο 5.4 και σε μια σύνθετη πολύ-παραμετρική (όπου $N=4$) στην παράγραφο 5.5.

Η ακρίβεια κάθε αναλυτικής μεθοδολογίας που δοκιμάστηκε κρίθηκε με πολλούς τρόπους. Ο βασικός τρόπος εκτίμησης της ακρίβειας γίνεται μέσω του σχετικού λάθους R ανά μέτρηση, που ορίζεται ως:

$$R = \frac{(\text{Πρόβλεψη} - \text{Παρατήρηση})}{\text{Παρατήρηση}} \quad (5.4)$$

Με βάση τον ορισμό, τέλεια πρόβλεψη σημαίνει $R=0$. Αρχικά, ο στόχος ήταν το Μέσο Σχετικό Σφάλμα (Average Relative Error) μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών $(Z_{SSSI}/Z)_{\text{PRED}}$ και των παρατηρούμενων τιμών $(Z_{SSSI}/Z)_{\text{OBS}}$ να είναι μηδενικό. Αυτό θεωρήθηκε βασική απαίτηση ώστε να εξασφαλιστεί η απουσία Στατιστικής Μεροληψίας (Bias), δηλαδή η μεθοδολογία να μην υπερεκτιμά περισσότερο από όσο υποεκτιμά τις μετρήσεις, και το αντίθετο. Όμως ένδειξη ακρίβειας δίνει και η Τυπική Απόκλιση (Standard Deviation) του Σχετικού Σφάλματος, η οποία δείχνει πόσο αποκλίνουν τα Σχετικά Σφάλματα από το μηδέν. Εκτός αυτής, χρησιμοποιήθηκε και το Μέσο Απόλυτο Σχετικό Σφάλμα (Average Absolute Relative Error) ως μια επιπλέον ένδειξη της ακρίβειας της σχέσης, όπου το απόλυτο σχετικό σφάλμα ορίζεται ως η απόλυτη τιμή του R της Σχέσης 5.4.

Επιπλέον, διερευνήθηκε και η μεταβολή του Σχετικού Σφάλματος όσο αλλάζει κάθε παράμετρος μέσω διαγραμμάτων R vs. Ανεξάρτητης Μεταβλητής. Ο στόχος είναι όλα τα σημεία κάθε διαγράμματος να βρίσκονται όσο πιο κοντά στον άξονα x γίνεται (όπου $R = 0$, τέλεια πρόβλεψη), αλλά και η τάση (trendline) των διαγραμμάτων αυτών να αντιστοιχεί σε μια οριζόντια ευθεία γραμμή πάνω στον άξονα x. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει ουσιώδης μεροληψία του σχετικού σφάλματος ως προς τις μικρές ή τις μεγάλες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής.

Επιπλέον αυτών, παρουσιάζεται και το διάγραμμα $(Z_{SSSI}/Z)_{\text{PRED}}$ vs. $(Z_{SSSI}/Z)_{\text{OBS}}$ στο οποίο γίνεται απευθείας σύγκριση πρόβλεψης-μέτρησης για όλες τις περιπτώσεις στη βάση δεδομένων. Ο στόχος είναι όλα τα σημεία να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ευθεία $y=x$, δηλαδή στην τέλεια πρόβλεψη, αλλά και η τάση (trendline) του διαγράμματος αυτού να αντιστοιχεί στην ευθεία $y=x$. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει ουσιώδης μεροληψία ως προς τις μικρές ή τις μεγάλες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Στο διάγραμμα αυτό προστίθενται και οι ευθείες στο $Y=1.5X$ και στο $Y=X/1.5$ από την τέλεια πρόβλεψη ως ένα είδος μέτρησης του εύρους του σχετικού σφάλματος.

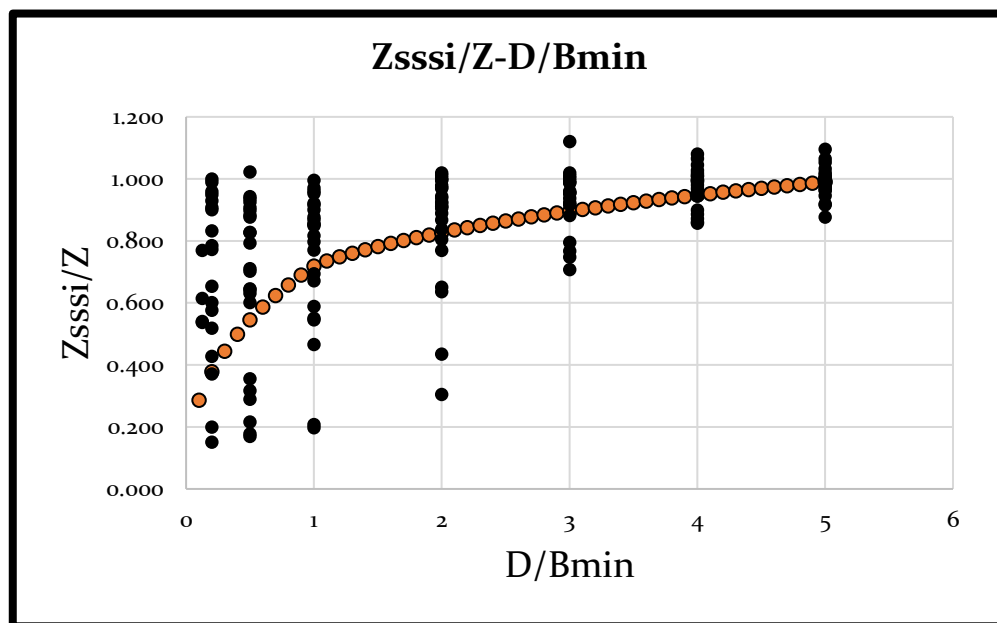
5.3 Απλή μονο-παραμετρική προσέγγιση

Η πρώτη προσέγγιση ήταν η δημιουργία της απλούστερης δυνατής μεθοδολογίας. Επιλέχθηκε μόνο μια ανεξάρτητη μεταβλητή, αυτή της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{min} . Ο λόγος ήταν ότι θεωρήθηκε η σημαντικότερη εκ των τεσσάρων παραμέτρων που εξετάστηκαν παραμετρικά και ελέγχθηκε πόσο αποδοτική μπορεί να είναι μια σχέση που βασίζεται μόνο σε αυτή. Παρατηρώντας τα δεδομένα κατέστη προφανές ότι η συμπεριφορά για μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_{\text{min}} (\leq 1)$ και μεγάλες (> 1) ήταν αρκετά διαφορετική ώστε να μην μπορεί να προσομοιωθεί με μία μόνο σχέση,

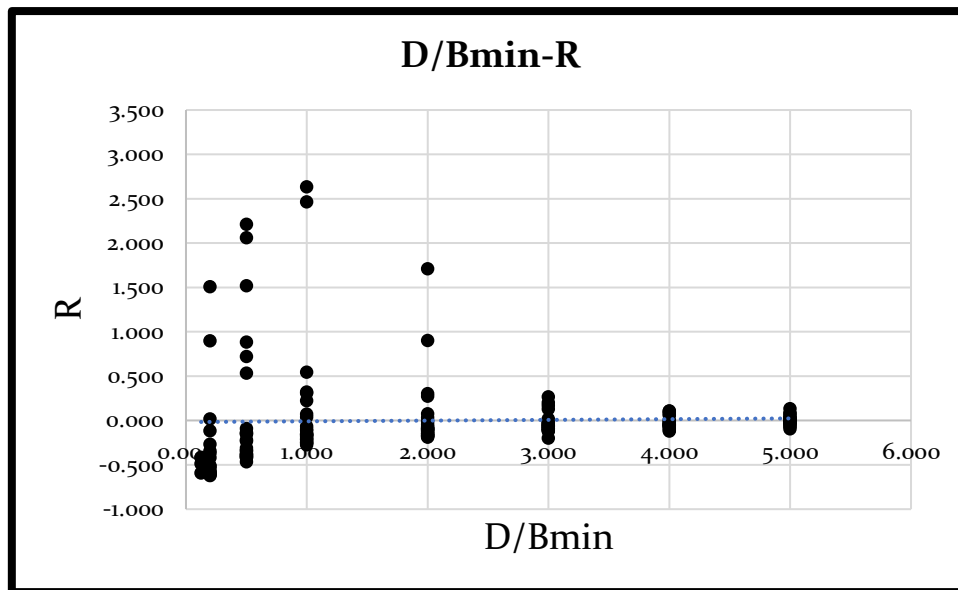
ειδικά μονο-παραμετρική. Για αυτό λοιπόν, αποφασίσθηκε η ξεχωριστή επεξεργασία των δεδομένων για $D/B_{min} \leq 1$ και $D/B_{min} > 1$, δηλαδή η δημιουργία μιας δίκλαδης εξίσωσης. Επιπροσθέτως, διασφαλίσθηκε η συνέχεια μεταξύ των δύο κλάδων με ισότητα των σταθερών όρων. Η σχέση η οποία προέκυψε από τη μεθοδολογία της απλής (μονο-παραμετρικής) σχέσης ήταν η παρακάτω:

$$\frac{Z_{SSSI}}{Z} = \begin{cases} 0.723 \left(\frac{D}{B_{min}}\right)^{0.4}, & \frac{D}{B_{min}} \leq 1 \\ 0.723 \left(\frac{D}{B_{min}}\right)^{0.196}, & \frac{D}{B_{min}} > 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

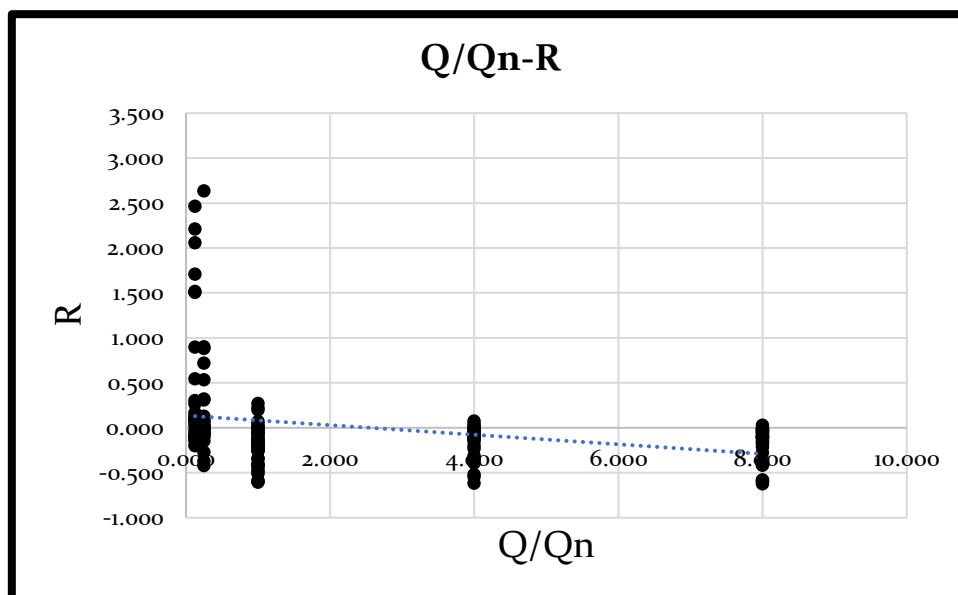
Η Σχέση 5.5 θεωρείται προσέγγιση αναφοράς, και σε κάθε περίπτωση, οποιαδήποτε πιο σύνθετη σχέση πρέπει να επιτυγχάνει μεγαλύτερη ακρίβεια. Μιας και η προσέγγιση είναι μονο-παραμετρική, μπορεί να οπτικοποιηθεί η μεταβολή του λόγου Z_{SSSI}/Z συναρτήσει της απόστασης D/B_{min} και να δειχθεί πόσο καλό είναι το «ταίριασμα» της σχέσης στα δεδομένα. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.1, όπου με πορτοκαλί χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα της Σχέσης 5.5 και με μαύρο χρώμα οι παρατηρούμενες τιμές.



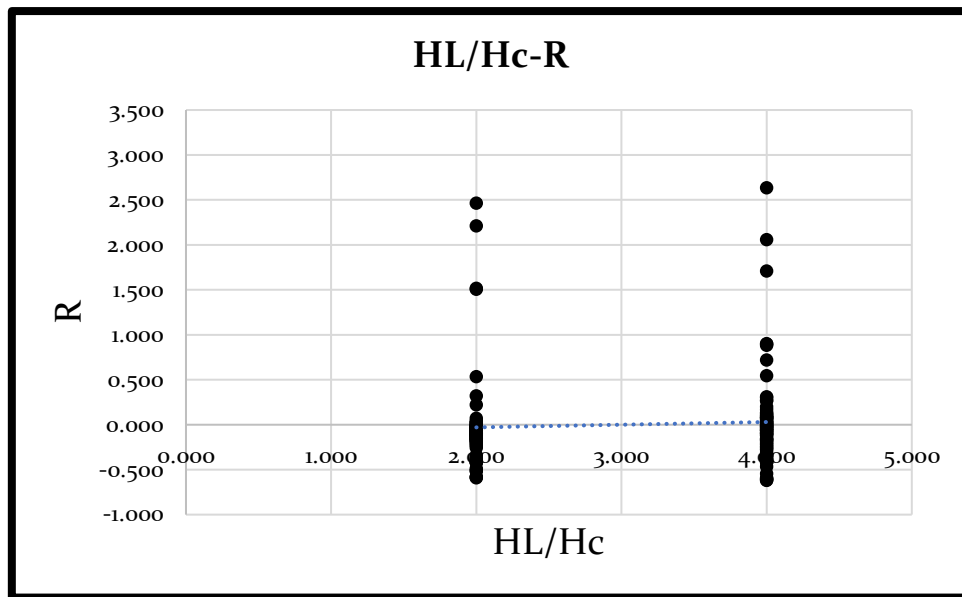
Σχήμα 5.1: Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές του λόγου Z_{SSSI}/Z συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{min} σύμφωνα με την απλή μονο-παραμετρική προσέγγιση



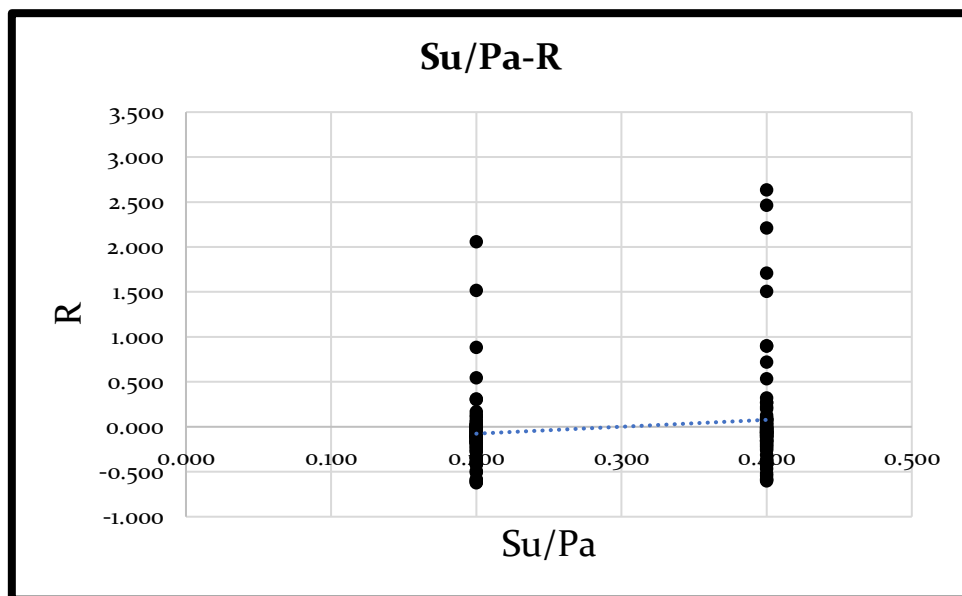
Σχήμα 5.2: Σχετικό σφάλμα της απλής μονο-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{min}



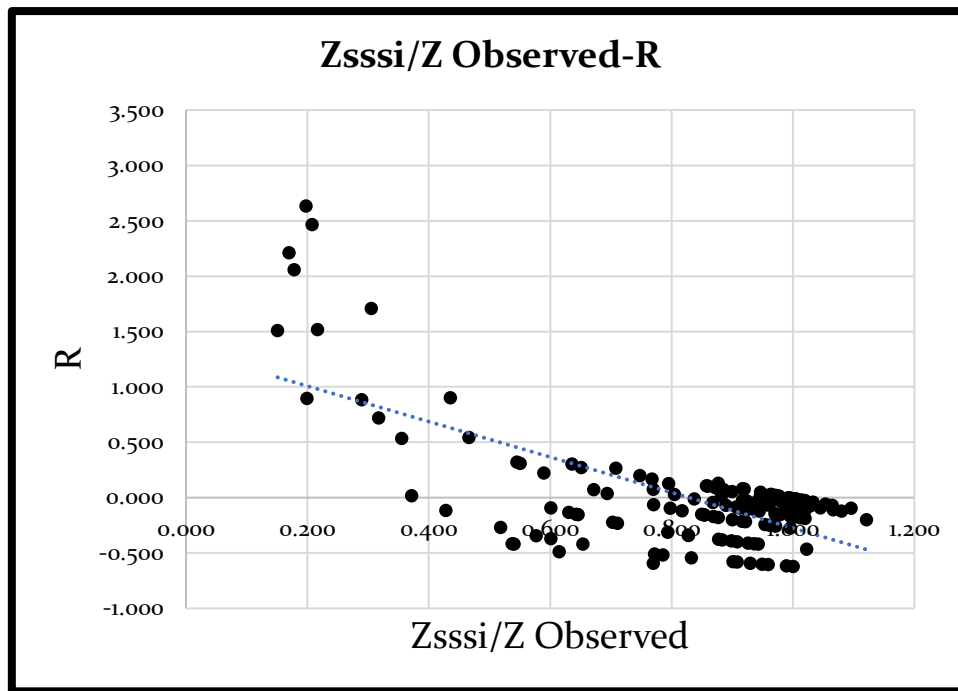
Σχήμα 5.3: Σχετικό σφάλμα της απλής μονο-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει του σχετικού φορτίου θεμελίου Q/Q_n



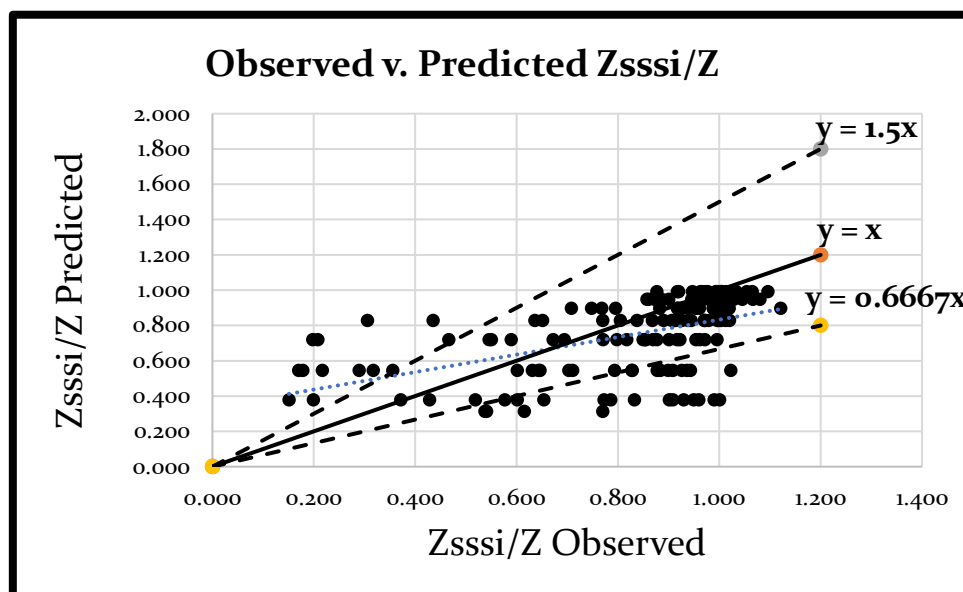
Σχήμα 5.4: Σχετικό σφάλμα της απλής μονο-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει του κανονικοποιημένου πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L/H_c



Σχήμα 5.5: Σχετικό σφάλμα της απλής μονο-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει της αδιάστατης αντοχής της «κρούστας» S_u/P_a



Σχήμα 5.6: Σχετικό σφάλμα της απλής μονο-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει του παρατηρούμενου λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση παρατηρούμενων τιμών του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$ με προβλεπόμενες τιμές του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{PRED}$ με βάση την απλή μονο-παραμετρική προσέγγιση

Μέσω των παραπάνω σχημάτων στόχος είναι να χαραχθεί η κατεύθυνση των επόμενων δοκιμών. Το Σχήμα 5.2 και το Σχήμα 5.3 δείχνουν ότι παρατηρούνται πολύ μεγαλύτερα σφάλματα για μικρές τιμές του D/B_{min} και του Q/Q_n . Ειδικά στις μικρές τιμές του Q/Q_n

($Q/Q_n < 1$) φαίνεται η πρόβλεψη να μην είναι καθόλου ικανοποιητική. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 5.5 μιας και στις μικρές τιμές του $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$, τα σφάλματα είναι πολύ μεγάλα. Οι δύο προηγούμενες παρατηρήσεις είναι πρακτικά ισοδύναμες μιας και συνήθως σε μικρές τιμές του σχετικού φορτίου Q/Q_n (στενό/ελαφρύ θεμέλιο δίπλα σε ευρύ/βαρύ) οι τιμές του λόγου καθιζήσεων είναι συστηματικά μικρότερες. Στα Σχήματα 5.4 και 5.5 φαίνεται ότι δεν υπάρχει συστηματική μεροληψία ως προς μικρές ή μεγάλες τιμές των λόγων S_u/P_a και H_L/H_c . Από το Σχήμα 5.7 μπορεί να παρατηρηθεί ότι με αυτή τη μεθοδολογία υπάρχει συστηματική υπερεκτίμηση των μικρών τιμών του λόγου καθιζήσεων καθώς και (λιγότερο συστηματική) υποεκτίμηση μεγάλων τιμών του λόγου καθιζήσεων.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος ήταν $\pm 52.2\%$ ενώ η μέση τιμή της απόλυτης τιμής του σχετικού σφάλματος ήταν 28.7% . Αυτές οι τιμές θα αποτελέσουν και τη βάση αναφοράς για τις επόμενες μεθοδολογίες. Είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι πρακτικώς ανεπαρκής για να περιγράψει το πρόβλημα, μιας και δεν προβλέπει επαρκώς καμία «περιοχή» δεδομένων, ενώ οδηγεί συστηματικά σε μεγάλες τιμές σχετικού σφάλματος.

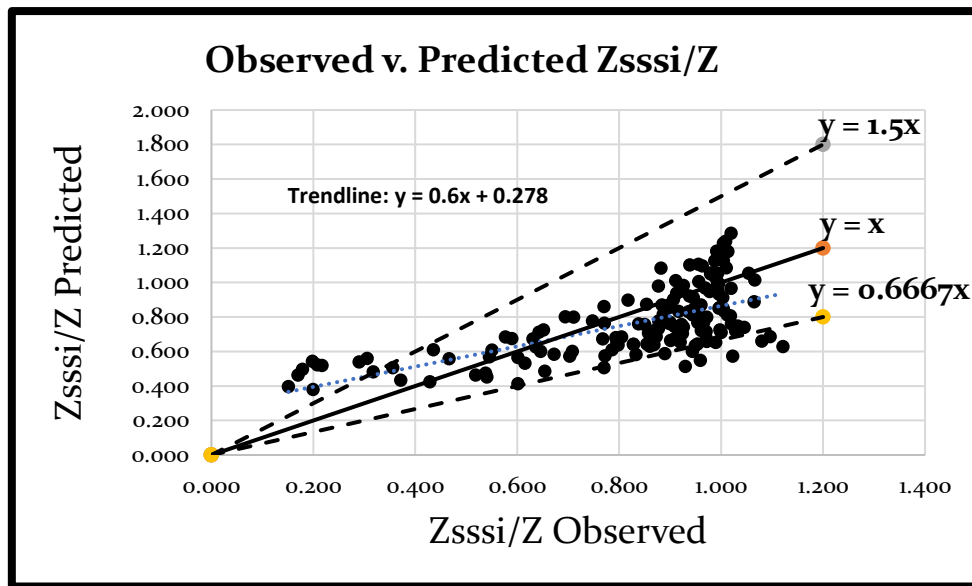
5.4 Πολυ-παραμετρική προσέγγιση

Το επόμενο λογικό βήμα ήταν η εξαγωγή μιας σχέσης εκτίμησης που χρησιμοποιεί και τις τέσσερις σημαντικές παραμέτρους που εξετάστηκαν παραμετρικά ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Η σχέση που παρουσιάζεται είναι ουσιαστικά η απλούστερη δυνατή πολύ-παραμετρική σχέση και προέκυψε από μια διαδικασία 2 βημάτων.

Στο πρώτο βήμα χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της παραγράφου 5.2, για $N=4$ σε όλα τα δεδομένα της βάσης. Η πολύ-παραμετρική σχέση αυτή δίνεται από τη Σχέση 5.6.

$$\left(\frac{Z_{SSSI}}{Z}\right)_{,0} = 0.608 \left(\frac{D}{B_{min}}\right)^{0.17} \left(\frac{Q}{Q_n}\right)^{0.124} \left(\frac{H_L}{H_c}\right)^{-0.068} \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.164} \quad (5.6)$$

Αυτή θεωρείται η τιμή αναφοράς του λόγου καθιζήσεων, γι' αυτό υπάρχει και ο δείκτης $_{,0}$ στην τιμή του λόγου. Στη συνέχεια, ως δεύτερο βήμα, γίνεται «διόρθωση» αυτής της τιμής, με βάση την ακρίβεια της Σχέσης 5.6 στην πρόβλεψη όλων των τιμών της βάσης δεδομένων. Η ακρίβεια πρόβλεψης της Σχέσης 5.6 διερευνάται στο Σχήμα 5.8.

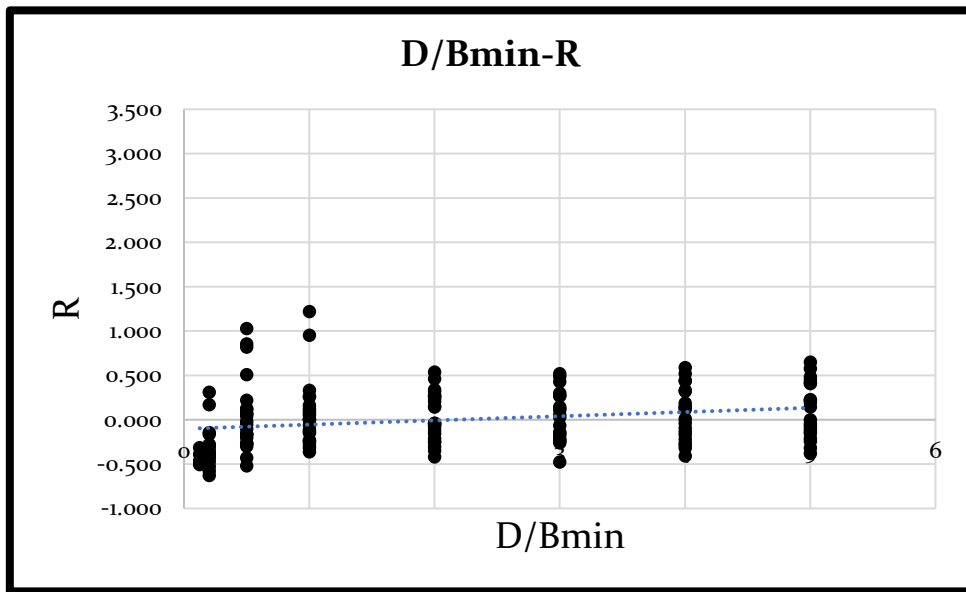


Σχήμα 5.8: Σύγκριση παρατηρούμενων τιμών του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$. με προβλεπόμενες τιμές του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{PRED}$. μετά το 1^ο βήμα της πολύ-παραμετρικής προσέγγισης

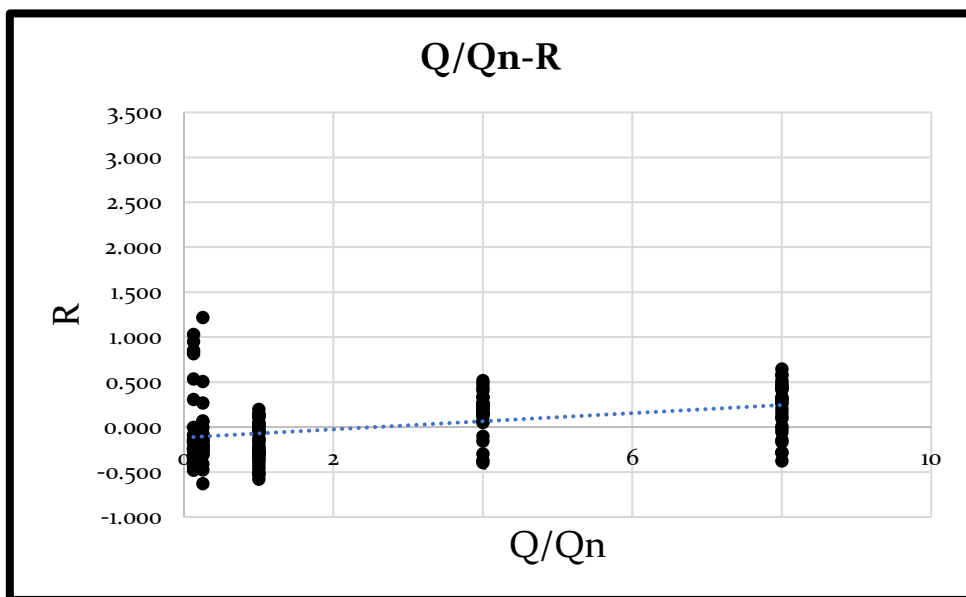
Από το σχήμα αυτό προκύπτει μια γραμμική τάση (trendline) υπερ-εκτίμησης και υπο-εκτίμησης για μικρές και μεγάλες τιμές του λόγου καθιζήσεων, η οποία μάλιστα δίνεται μαθηματικά στο σχήμα. Η «ανάστροφη» χρήση αυτής της σχέσης για τη διόρθωση της τιμής αναφοράς $(Z_{SSSI}/Z)_o$ από το 1^ο βήμα, αποτελεί το 2^ο βήμα της πολύ-παραμετρικής σχέσης που δίνεται από τη Σχέση 5.7:

$$\frac{Z_{SSSI}}{Z} = \frac{\left(\frac{Z_{SSSI}}{Z}\right)_o - 0.278}{0.6} \quad (5.7)$$

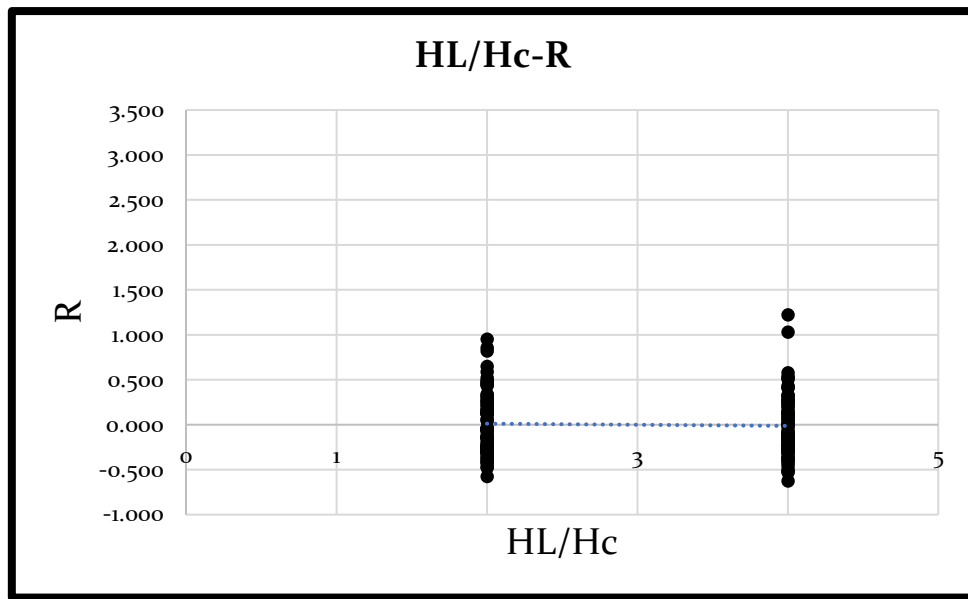
Οι Σχέσεις 5.6 και 5.7 αποτελούν πρακτικά την «απλή» πολύ-παραμετρική προσέγγιση. Η ακρίβεια τους ως ενιαία προσέγγιση διερευνάται με την ίδια ομάδα 6 σχημάτων ελέγχου σφάλματος που χρησιμοποιήθηκε και στην παράγραφο 5.3, εδώ στα Σχήματα 5.9 έως 5.14.



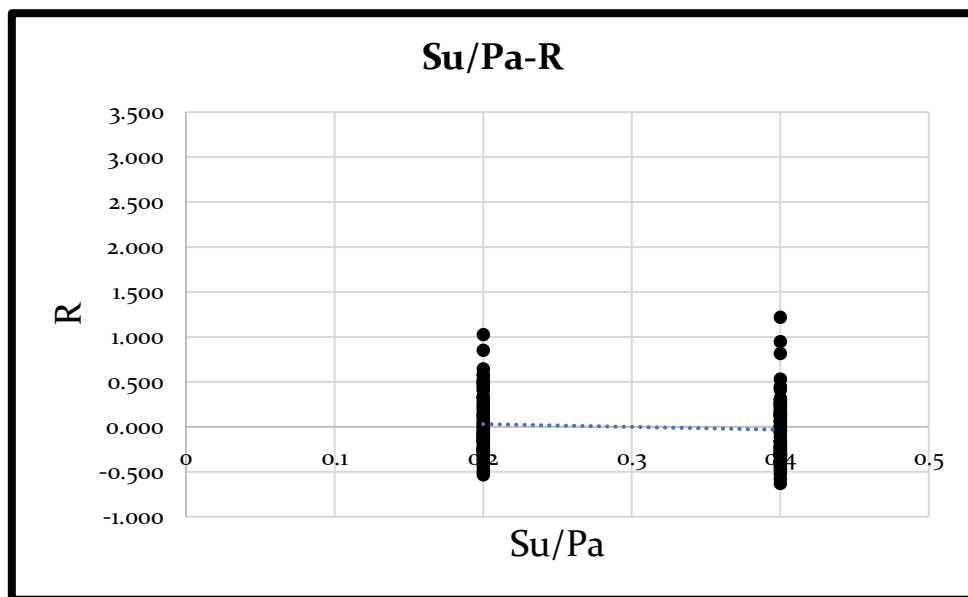
Σχήμα 5.9: Σχετικό σφάλμα της πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσεως της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{min}



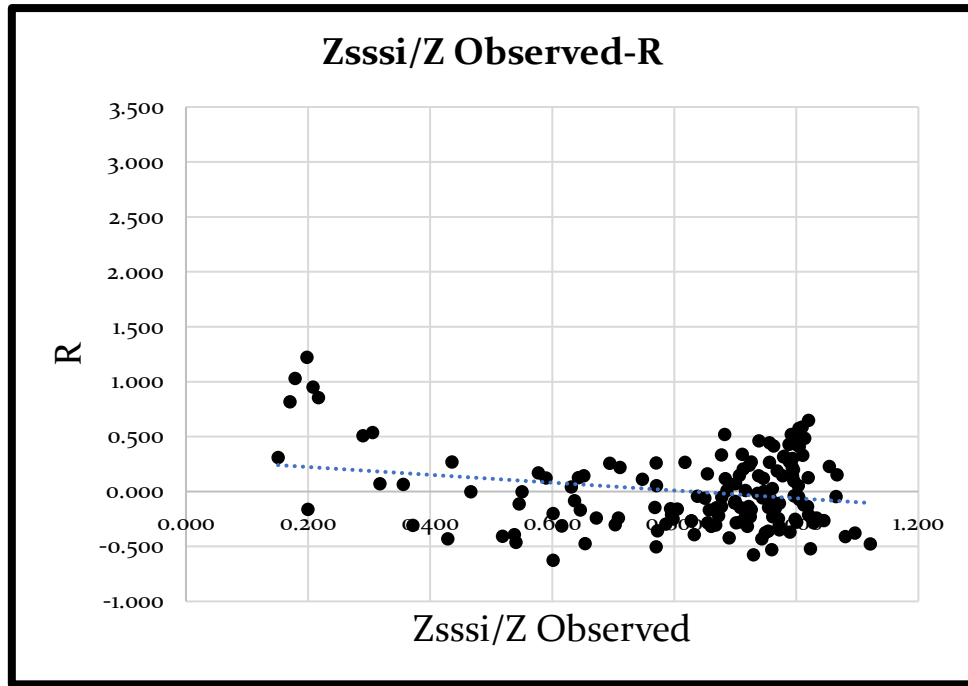
Σχήμα 5.10: Σχετικό σφάλμα της πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσεως του σχετικού φορτίου Q/Q_n



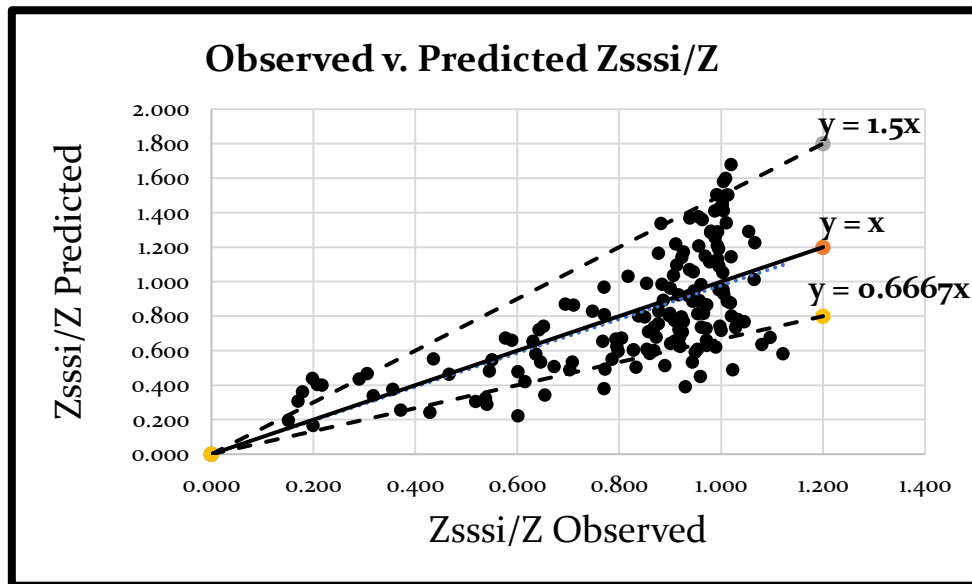
Σχήμα 5.11: Σχετικό σφάλμα της πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει του κανονικοποιημένου πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L/H_c



Σχήμα 5.12: Σχετικό σφάλμα της πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει της αδιάστατης αντοχής «κρούστας» S_u/P_a



Σχήμα 5.13: Σχετικό σφάλμα της πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσεως του παρατηρούμενου λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$.



Σχήμα 5.14: Σύγκριση παρατηρούμενων τιμών του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$ με προβλεπόμενες τιμές του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{PRED}$ με βάση την πολυ-παραμετρική προσέγγιση.

Συνολικά προκύπτει ότι η πολυ-παραμετρική προσέγγιση παρουσιάζει μια αισθητή βελτίωση συγκριτικά με την απλή μονο-παραμετρική προσέγγιση, κυρίως σε όρους

τυπικής απόκλισης σχετικού σφάλματος ($\pm 33.9\%$ έναντι $\pm 52.2\%$) και λιγότερο σε όρους μέσου απόλυτου σχετικού σφάλματος (27.3% έναντι 28.7%). Όμως, ακόμα και με αυτή τη μεθοδολογία είναι φανερό το ότι σε μικρές τιμές του σχετικού φορτίου Q/Q_n το σχετικό σφάλμα είναι δυσανάλογα μεγάλο (βλ. **Σχήμα 5.10**). Κάτι τέτοιο συμβαίνει και σε μικρές τιμές της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{min} (βλ. **Σχήμα 5.9**).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πολύ-παραμετρική προσέγγιση (Σχέσεις 5.6 και 5.7) οι επιδράσεις της D/B_{min} και του Q/Q_n είναι αυξητικές στην τιμή του λόγου καθιζήσεων (θετικοί εκθέτες), ενώ των H_L/H_c και S_u/P_a είναι μειωτικές (αρνητικοί εκθέτες). Αυτό βρίσκεται σε σύμπτωση με τις παρατηρήσεις που έγιναν στο Κεφάλαιο 4. Ενδεικτικά, από το **Σχήμα 4.18** είναι προφανές ότι (παρά μια μικρή περιοχή φθίνουσας επίδρασης) σε γενικές γραμμές η επίδραση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z είναι αυξητική, και αυτό είχε επιβεβαιωθεί και από τον αντίστοιχα θετικό εκθέτη της απλής μονο-παραμετρικής σχέσης (Σχέση 5.5, **Σχήμα 5.1**). Από το ίδιο **Σχήμα 4.18** βγαίνει το ίδιο συμπέρασμα και για το σχετικό φορτίο Q/Q_n , ότι δηλαδή, κατά κανόνα, όσο αυτό αυξάνεται τόσο αυξάνεται και ο λόγος Z_{SSSI}/Z .

Αντιθέτως, από το **Σχήμα 4.24** φαίνεται ότι η γενική μειωτική τάση του λόγου Z_{SSSI}/Z όσο αυξάνεται η αδιάστατη αντοχή «κρούστας» S_u/P_a , γεγονός που συνάδει με το αρνητικό πρόσημο του εκθέτη στην πολύ-παραμετρική προσέγγιση. Τέλος, αντίστοιχο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί και για το κανονικοποιημένο πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L/H_c από το **Σχήμα 4.33**, γεγονός που δικαιολογεί και τον αρνητικό εκθέτη στην πολύ-παραμετρική σχέση.

Το πρόβλημα της μεγάλης υπερεκτίμησης σε μικρές τιμές του λόγου Z_{SSSI}/Z φαίνεται να έχει μειωθεί αισθητά (αλλά όχι πλήρως) σε σχέση με την απλή μονο-παραμετρική σχέση, κάτι που φαίνεται και από τη γραμμή τάσης στο **Σχήμα 5.13**. Ταυτόχρονα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.14**, έχει αντιμετωπιστεί εν μέρει και το πρόβλημα της υποεκτίμησης σε μεγάλες τιμές του λόγου Z_{SSSI}/Z , χωρίς να έχει εξαιρεθεί εντελώς. Σε αυτές τις τιμές όμως έχει προκύψει ένα νέο πρόβλημα μεγάλων υπερεκτιμήσεων, με αρκετές τιμές $Z_{SSSI}/Z \gg 1$ (π.χ. $Z_{SSSI}/Z > 1.5$). Τέτοιες τιμές δημιουργούν πρόβλημα στη γενική εικόνα της μεθοδολογίας, μιας και τέτοιες μεγάλες τιμές του λόγου δεν υπάρχουν στη βάση δεδομένων, ούτε έχουν αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Και πιθανώς αυτές οι τιμές είναι εκείνες που δεν επιτρέπουν τη ραγδαία μείωση του μέσου απόλυτου σχετικού σφάλματος συγκριτικά με την μονο-παραμετρική προσέγγιση.

5.5 Σύνθετη πολυ-παραμετρική προσέγγιση

Μελετώντας την «απλή» πολυ-παραμετρική προσέγγιση στην παράγραφο 5.4, παρατηρείται η αδυναμία της να προβλέψει ικανοποιητικά μικρές τιμές του λόγου Z_{SSSI}/Z . Αυτό καθίσταται φανερό παρατηρώντας τόσο το **Σχήμα 5.13** όσο και το **Σχήμα 5.10**. Από

το **Σχήμα 5.8** γίνεται επιπλέον φανερό η ανακρίβεια στις περιπτώσεις μικρού σχετικού φορτίου $Q/Q_n < 1$.

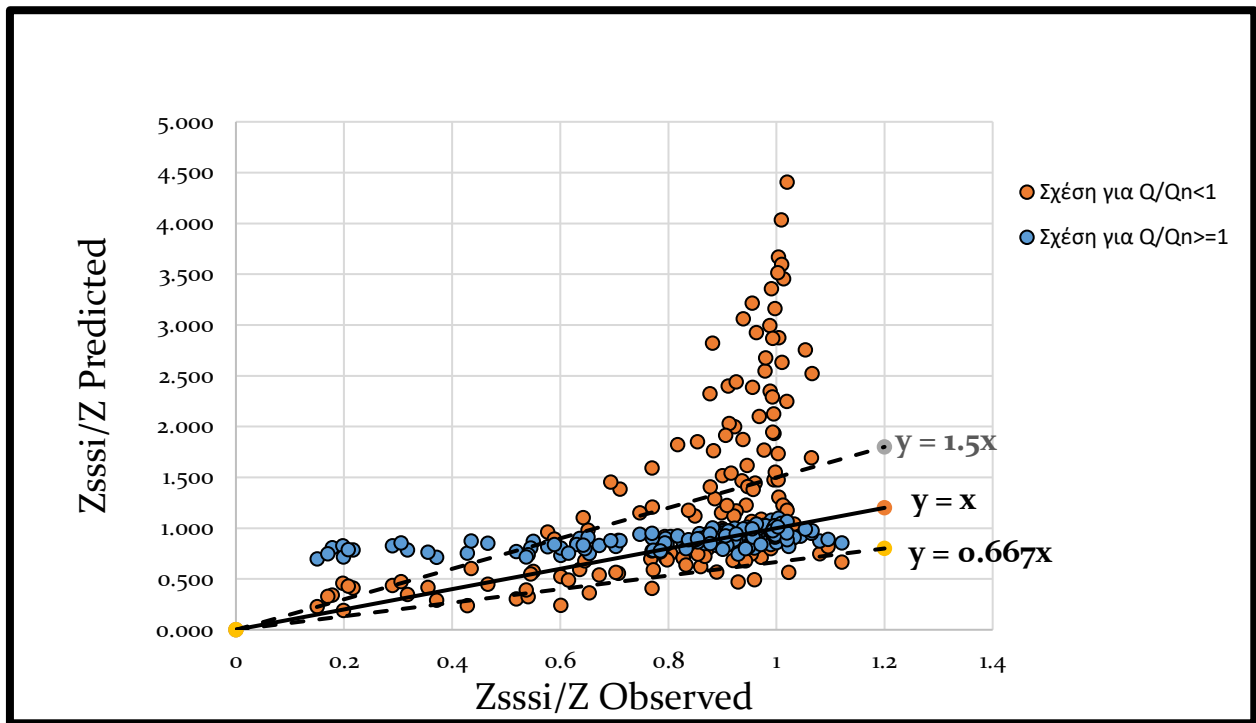
Έτσι, με σκοπό να βελτιωθεί περαιτέρω η ακρίβεια, θεωρήθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός των δεδομένων της βάσης σε 2 ομάδες, μιας για τις περιπτώσεις θεμελίων με $Q/Q_n < 1$ (των στενών/ελαφρών δίπλα σε ευρύτερα/βαρύτερα) και της δεύτερης που περιλαμβάνει τα δίδυμα και τα ευρύτερα/βαρύτερα δίπλα σε στενά/ελαφρά, με $Q/Q_n \geq 1$. Κύριος στόχος αυτού του διαχωρισμού ήταν η αύξηση της ακρίβειας στην πρώτη ομάδα περιπτώσεων της βάσης, όπου $Q/Q_n < 1$. Έτσι, ακολουθώντας τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.2 για $N=4$ σε 2 ξεχωριστές ομάδες δεδομένων προέκυψαν 2 διαφορετικές πολυ-παραμετρικές σχέσεις, που δίνονται παρακάτω στις Σχέσεις 5.8 και 5.9 για τις περιπτώσεις με $Q/Q_n \geq 1$ και $Q/Q_n < 1$, αντίστοιχα.

$$\left(\frac{Z_{SSSI}}{Z}\right)_{,0} = 0.795 \left(\frac{D}{B_{min}}\right)^{0.398} \left(\frac{Q}{Q_n}\right)^{0.351} \left(\frac{H_L}{H_c}\right)^{-0.265} \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.327} ; \text{για } Q/Q_n < 1 \quad (5.8)$$

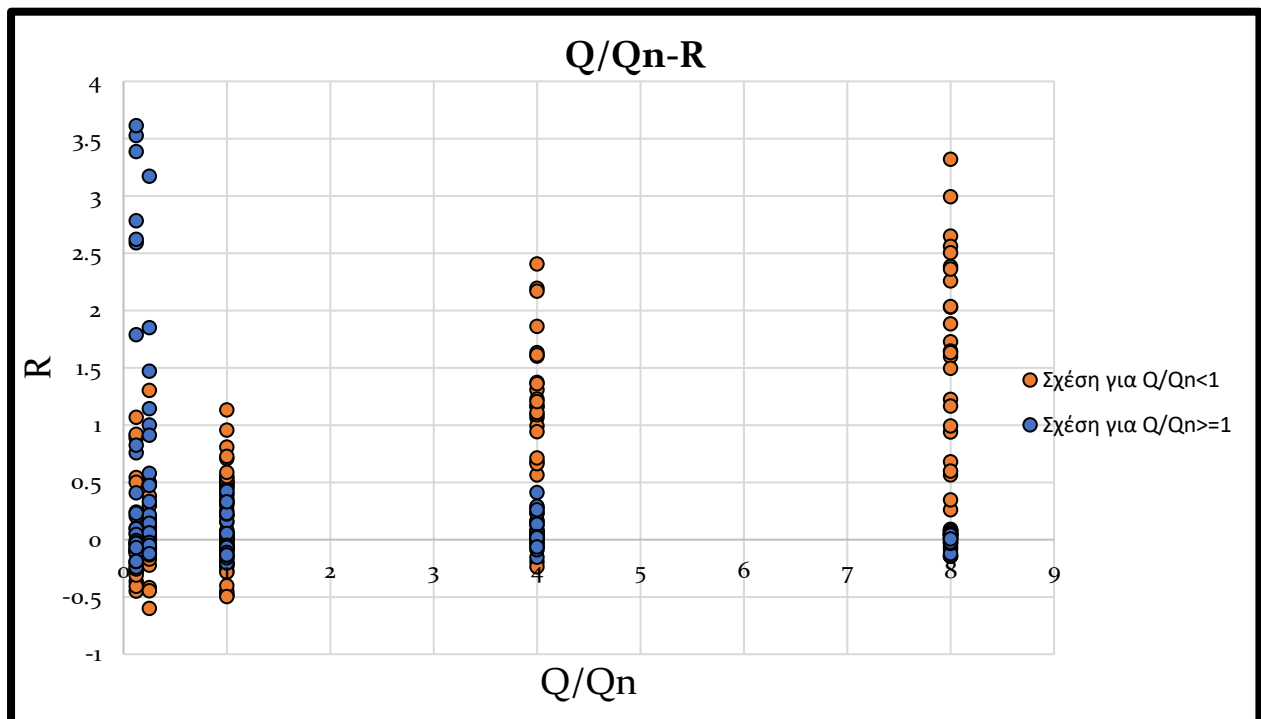
$$\left(\frac{Z_{SSSI}}{Z}\right)_{,0} = 0.762 \left(\frac{D}{B_{min}}\right)^{0.076} \left(\frac{Q}{Q_n}\right)^{0.031} \left(\frac{H_L}{H_c}\right)^{-0.041} \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.074} ; \text{για } Q/Q_n \geq 1 \quad (5.9)$$

Όμως η χρήση αυτών των 2 σχέσεων δημιουργεί ασυνέχεια στο πρόβλημα. Δηλαδή τα πλευρικά όρια του λόγου καθίζησης για την περίπτωση όπου $Q/Q_n \rightarrow 1^-$ και $Q/Q_n \rightarrow 1^+$ είναι διαφορετικά, συνεπώς η πρακτική εφαρμογή της σχέσης δεν έχει φυσικό νόημα και μπορεί να οδηγήσει σε λάθη τον μηχανικό που θα θελήσει να τις χρησιμοποιήσει.

Για τη διερεύνηση του προβλήματος συνέχειας στα **Σχήματα 5.15** και **5.16** εφαρμόζονται και οι 2 σχέσεις για όλα τα δεδομένα της βάσης, ανεξάρτητα από το ποια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους. Από το **Σχήμα 5.15** γίνεται προφανές ότι οι δύο σχέσεις «προβλέπουν» με επιτυχία τα δεδομένα του εύρους σχετικού φορτίου Q/Q_n για το οποίο έχουν δημιουργηθεί. Συγκεκριμένα, για μικρές τιμές $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS} (< 0.5)$ φαίνεται ότι η σχέση για $Q/Q_n < 1$ είναι πιο ακριβής, ενώ το ανάποδο συμβαίνει για μεγάλες τιμές $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS} (> 0.7)$. Η αντιστοίχιση σχετικού λάθους R των 2 σχέσεων με την τιμή του σχετικού φορτίου Q/Q_n γίνεται σαφέστερη στο **Σχήμα 5.16**. Όμως, προσεκτική παρατήρηση των δύο σχημάτων δείχνει ότι αν, σε κάθε περίπτωση, υιοθετηθεί η ελάχιστη (minimum) τιμή εκ των 2 σχέσεων, τότε η ακρίβεια γίνεται ικανοποιητική, καθώς για λόγους $Q/Q_n < 1$ η ελάχιστη τιμή οδηγεί στη χρήση της **Σχέσης 5.8** (που εξήχθη για $Q/Q_n < 1$), ενώ για λόγους $Q/Q_n \geq 1$ η ελάχιστη τιμή οδηγεί στις περισσότερες περιπτώσεις στη χρήση της **Σχέσης 5.9** (που εξήχθη για $Q/Q_n \geq 1$). Συνεπώς, μπορεί να γίνει χρήση συνδυασμένης χρήσης των 2 σχέσεων, χωρίς τα προβλήματα συνέχειας που δημιουργεί το κριτήριο ως προς το σχετικό φορτίο Q/Q_n .



Σχήμα 5.15: Σύγκριση παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών του λόγου καθιζήσεων (Z_{sssi}/Z) για χρήση των Σχέσεων 5.8 και 5.9 για όλα τα δεδομένα της βάσης.

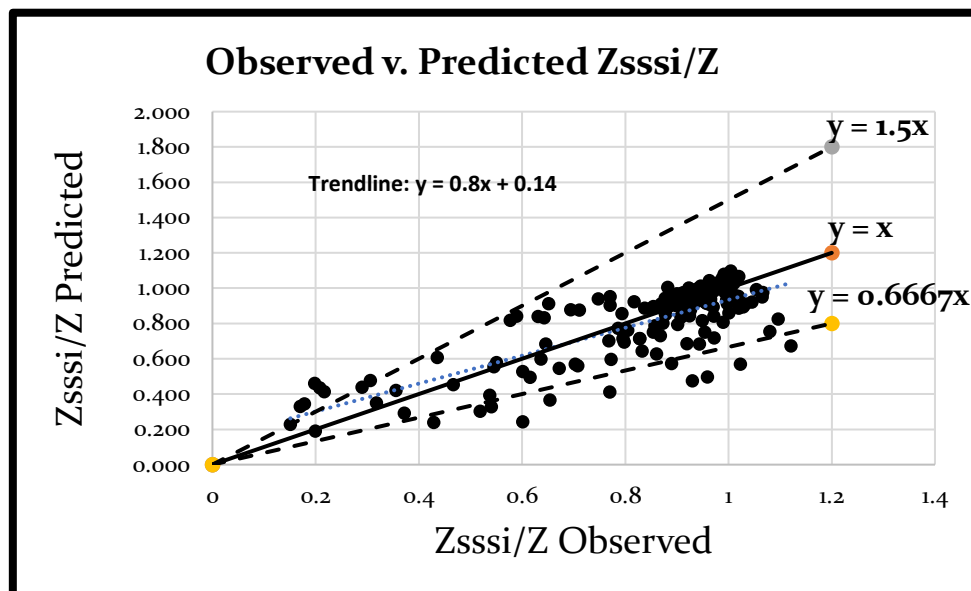


Σχήμα 5.16: Σχετικό σφάλμα στην εκτίμηση του λόγου καθιζήσεων ως συνάρτηση του σχετικού φορτίου, για χρήση των Σχέσεων 5.8 και 5.9 για όλα τα δεδομένα της βάσης

Με βάση όλα τα ανωτέρω, αντίστοιχα με ό,τι παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.4, και εδώ η σύνθετη πολύ-παραμετρική προσέγγιση θα γίνει με διαδικασία 2 βημάτων. Ως πρώτο βήμα, θα θεωρηθεί η χρήση της ελάχιστης τιμής εκ των Σχέσεων 5.8 και 5.9, η οποία παρουσιάζεται ως ενιαία Σχέση 5.10:

$$\left(\frac{Z_{SSSI}}{Z}\right)_{,0} = \min \left[0.795 \left(\frac{D}{B_{min}}\right)^{0.398} \left(\frac{Q}{Q_n}\right)^{0.351} \left(\frac{H_L}{H_c}\right)^{-0.265} \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.327} ; \right. \\ \left. 0.762 \left(\frac{D}{B_{min}}\right)^{0.076} \left(\frac{Q}{Q_n}\right)^{0.031} \left(\frac{H_L}{H_c}\right)^{-0.041} \left(\frac{S_u}{P_a}\right)^{-0.074} \right] \quad (5.10)$$

Όπως και στην παράγραφο 5.4, αυτή θεωρείται η τιμή αναφοράς του λόγου καθιζήσεων, γι' αυτό υπάρχει και ο δείκτης ,ο στην τιμή του λόγου. Στη συνέχεια, ως δεύτερο βήμα, γίνεται «διόρθωση» αυτής της τιμής, με βάση την ακρίβεια της Σχέσης 5.10 στην πρόβλεψη όλων των τιμών της βάσης δεδομένων. Η ακρίβεια πρόβλεψης της Σχέσης 5.10 διερευνάται στο Σχήμα 5.17.



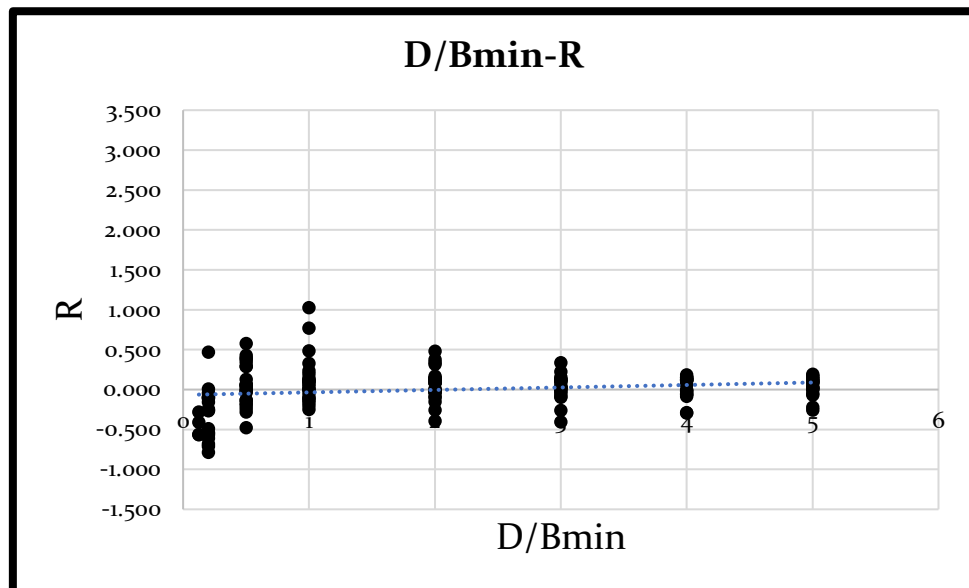
Σχήμα 5.17: Σύγκριση παρατηρούμενων τιμών του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$, με προβλεπόμενες τιμές του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{PRED}$, μετά το 1^ο βήμα της σύνθετης πολυ-παραμετρικής προσέγγισης

Από το Σχήμα 5.17 προκύπτει και πάλι μια γραμμική τάση (trendline) υπερ-εκτίμησης και υπο-εκτίμησης για μικρές και μεγάλες τιμές του λόγου καθιζήσεων, η οποία μάλιστα δίνεται μαθηματικά στο σχήμα. Η σχέση αυτή είναι σαφώς πιο κοντά στην «τέλεια» πρόβλεψη $Y=X$, συγκριτικά με το 1^ο βήμα της απλής μονο-παραμετρικής σχέσης στην παράγραφο 5.4, αλλά απέχει αρκετά ώστε να υπάρχει λόγος «διόρθωσης» της. Έτσι, η

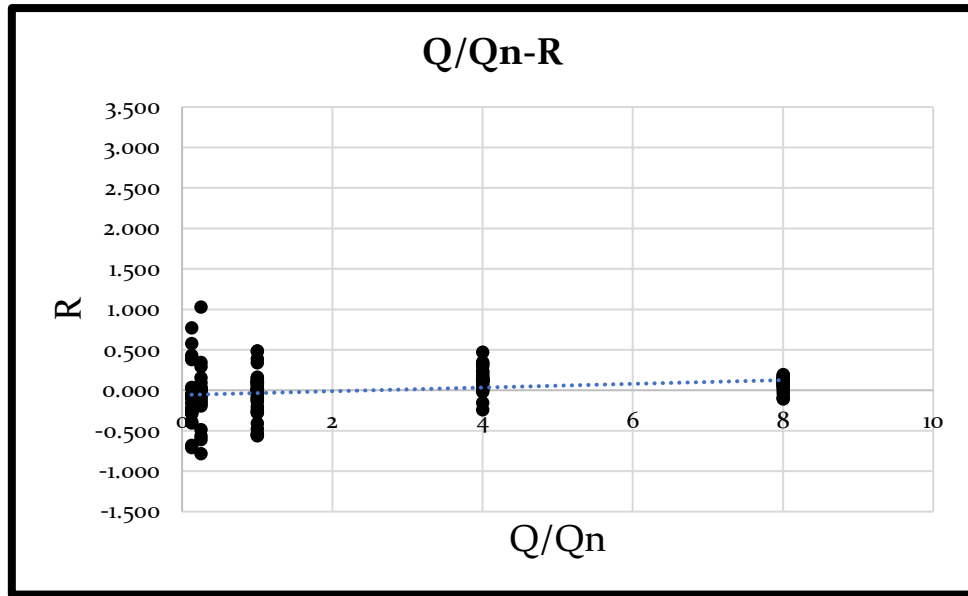
«ανάστροφη» χρήση αυτής της σχέσης για τη διόρθωση της τιμής αναφοράς $(Z_{SSSI}/Z)_{,0}$ από το 1^ο βήμα, αποτελεί το 2^ο βήμα της σύνθετης πολύ-παραμετρικής σχέσης που δίνεται από τη Σχέση 5.11:

$$\frac{Z_{SSSI}}{Z} = \frac{\left(\frac{Z_{SSSI}}{Z}\right)_{,0}^{-0.14}}{0.80} \quad (5.11)$$

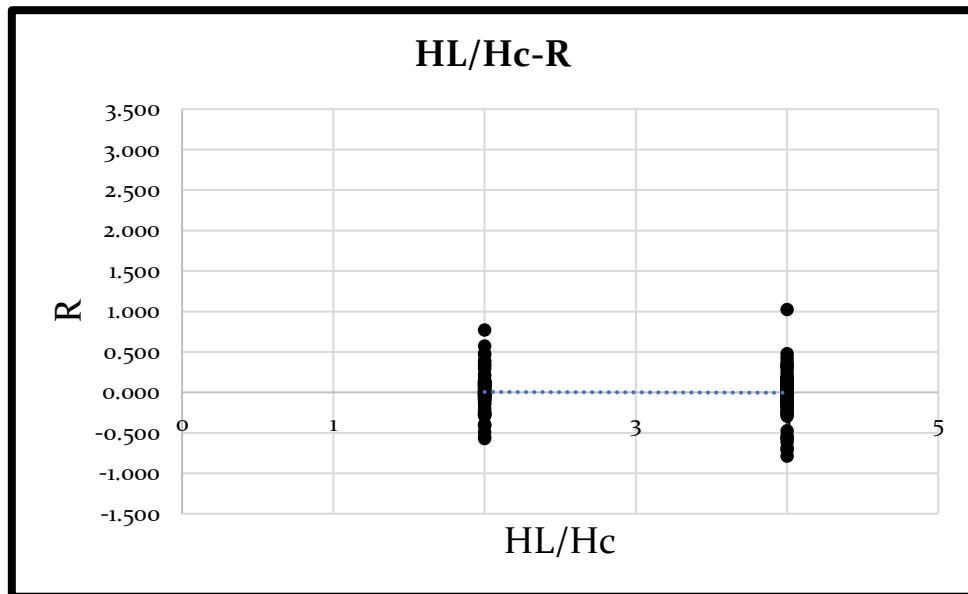
Οι Σχέσεις 5.10 και 5.11 αποτελούν πρακτικά την «σύνθετη» πολύ-παραμετρική προσέγγιση. Η ακρίβεια τους ως ενιαία προσέγγιση διερευνάται με την ίδια ομάδα 6 σχημάτων ελέγχου σφάλματος που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, εδώ στα Σχήματα 5.18 έως 5.23.



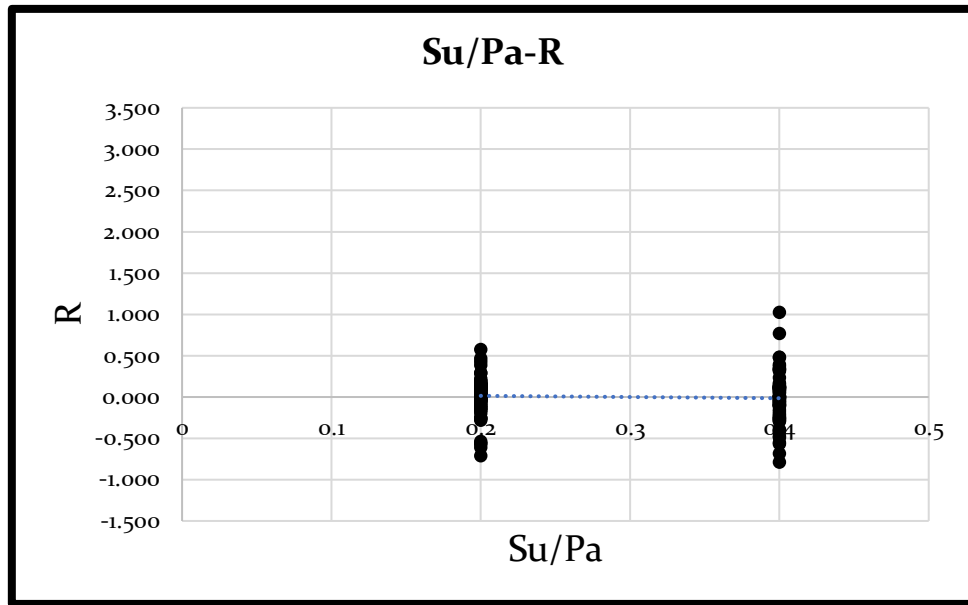
Σχήμα 5.18: Σχετικό σφάλμα της σύνθετης πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσει της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{min}



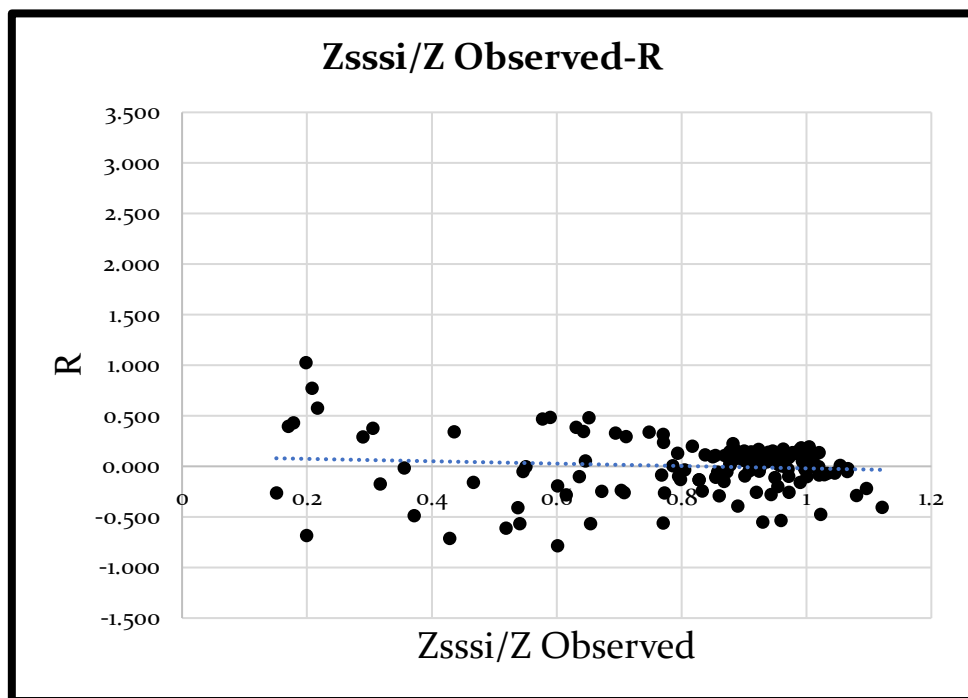
Σχήμα 5.19: Σχετικό σφάλμα της σύνθετης πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσεως του σχετικού φορτίου Q/Q_n



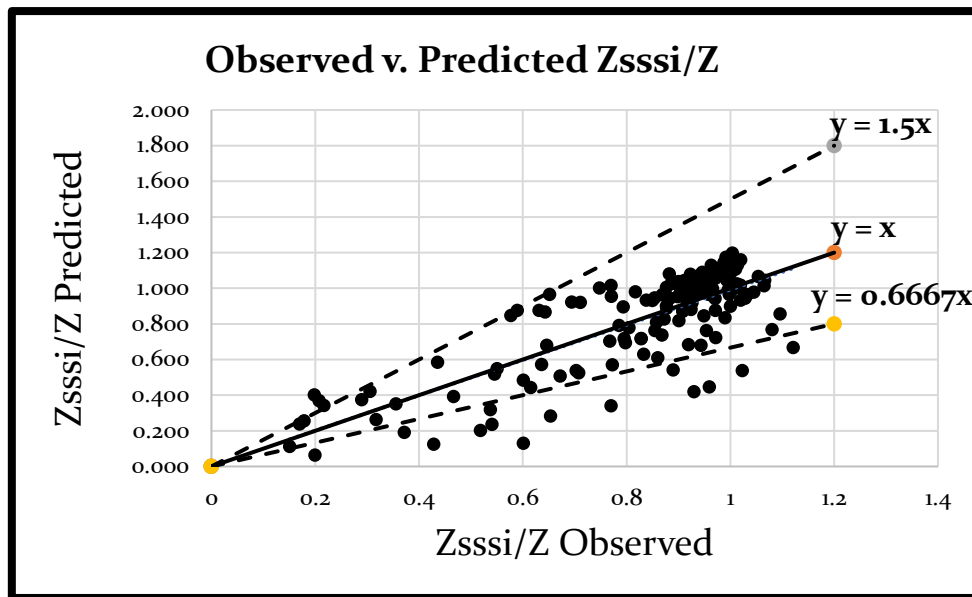
Σχήμα 5.20: Σχετικό σφάλμα της σύνθετης πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσεως του κανονικοποιημένου πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L/H_c



Σχήμα 5.21: Σχετικό σφάλμα της σύνθετης πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσεως της αδιάστατης αντοχής «κρούστας» S_u/P_a



Σχήμα 5.22: Σχετικό σφάλμα της σύνθετης πολυ-παραμετρικής προσέγγισης συναρτήσεως του παρατηρούμενου λόγου καθιζήσεων $(Z_{sssi}/Z)_{OBS}$.



Σχήμα 5.23: Σύγκριση παρατηρούμενων τιμών του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{OBS}$. με προβλεπόμενες τιμές του λόγου καθιζήσεων $(Z_{SSSI}/Z)_{PRED}$. στη σύνθετη πολυ-παραμετρική προσέγγιση

Καθαρά σε όρους αριθμών, η σύνθετη πολυ-παραμετρική προσέγγιση παρουσιάζει σαφή βελτίωση ακρίβειας συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες προσεγγίσεις. Η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος είναι πια $\pm 26.4\%$ (έναντι $\pm 33.9\%$ στην απλή πολυ-παραμετρική σχέση), ενώ η μείωση είναι πιο εντυπωσιακή στο μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα που είναι μόλις 18.7% (έναντι 27.3% στην απλή πολυ-παραμετρική σχέση).

Από εκεί και πέρα, η πρώτη παρατήρηση από τα Σχήματα 5.18, 5.20 και 5.21 είναι ότι σε αυτή την προσέγγιση η κατανομή των σφαλμάτων όσο μεταβάλλονται οι παράμετροι είναι πιο ισορροπημένη. Ακόμα και για μικρές τιμές του λόγου Q/Q_n , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.19, το σφάλμα δεν είναι δυσανάλογα μεγάλο. Αυτό σημαίνει ότι είναι μια προσέγγιση που «προβλέπει» καλά όλο το εύρος των περιπτώσεων. Αυτό γίνεται πιο σαφές παρατηρώντας το Σχήμα 5.22. Σε αυτό φαίνεται ότι η «μεροληψία» για καλύτερη πρόβλεψη μεγάλων τιμών του λόγου Z_{SSSI}/Z από μικρές τιμές του, είναι λιγότερο έντονη. Έπειτα, συγκρίνοντας το Σχήμα 5.22 με τα Σχήματα 5.13 και 5.6, προκύπτει ότι το πρόβλημα της υπερεκτίμησης των χαμηλών πραγματικών τιμών του λόγου Z_{SSSI}/Z πλέον δεν υφίσταται. Αντίστοιχα έχει αντιμετωπιστεί και το πρόβλημα της υπερεκτίμησης υψηλών πραγματικών τιμών του λόγου Z_{SSSI}/Z και της «πρόβλεψης» μη-ρεαλιστικών τιμών μεγαλύτερων της μονάδας, που εμφάνισε η απλή πολυ-παραμετρική προσέγγιση διατηρώντας το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα σχετικά υψηλό. Αυτό γίνεται σαφές συγκρίνοντας το Σχήμα 5.23 με το Σχήμα 5.14.

Το μόνο συστηματικό (και ίσως ανησυχητικό) μοτίβο σφαλμάτων που προκαλείται από τη σύνθετη πολυ-παραμετρική προσέγγιση είναι οι διακριτές περιπτώσεις υποεκτιμήσεων σε μεσαίες και μεγάλες τιμές του λόγου Z_{SSSI}/Z . Αυτές αποδίδονται στη μη-τέλεια λειτουργία της επιλογής της ελάχιστης τιμής εκ των δύο σχέσεων στη Σχέση 5.9.

Άλλες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις είναι ότι και οι δύο Σχέσεις 5.8 και 5.9 (που συνδυάζονται στη Σχέση 5.10) έχουν ίδιο πρόσημο στους εκθέτες κάθε παραμέτρου που εμπεριέχουν, ενώ τα εν λόγω πρόσημα είναι τα ίδια και με εκείνα στη Σχέση 5.6: θετικό πρόσημα για D/B_{\min} και Q/Q_n και αρνητικό για H_L/H_c και S_u/Pa . Συνεπώς, και στη σύνθετη πολύ-παραμετρική προσέγγιση διατηρείται η ποιοτική συμφωνία για την επίδραση των σημαντικών παραμέτρων στον λόγο καθιζήσεων που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Μια άλλη επιπλέον παρατήρηση είναι ότι η τιμή του εκθέτη κάθε παραμέτρου στη Σχέση 5.6 είναι ανάμεσα στις τιμές των εκθετών της ίδιας παραμέτρου στις Σχέσεις 5.8 και 5.9 (π.χ., ο εκθέτης 0.17 στην επίδραση της D/B_{\min} στη Σχέση 5.6 είναι ανάμεσα στους εκθέτες 0.398 και 0.076 στις άλλες δύο σχέσεις για την ίδια παράμετρο).

Σε γενικές γραμμές, η σύνθετη πολυ-παραμετρική προσέγγιση στην παρούσα παράγραφο είναι μια σαφώς βελτιωμένη μεθοδολογία εκτίμησης του λόγου καθιζήσεων, συγκριτικά με τις μεθοδολογίες των προηγούμενων παραγράφων, έχοντας όμως «θυσιάσει» την απλότητά τους. Παρόλα αυτά, η χρήση της είναι σαφώς πιο εύκολη από τη χρήση συζευγμένων μη-γραμμικών δυναμικών αριθμητικών αναλύσεων σε στατιστική επεξεργασία των οποίων στηρίχθηκε η εξαγωγή της.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Βασικά Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διερευνήθηκε η δυναμική αλληλεπίδραση ζεύγους γειτονικών θεμελιο-λωρίδων εδραζόμενων σε δίστρωτο εδαφικό προφίλ με επιφανειακή αργιλική στρώση («κρούστα») πάνω από στρώση άμμου υπό καθεστώς ρευστοποίησης. Στη βιβλιογραφία το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως Αλληλεπίδραση Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (Structure-Soil-Structure Interaction, SSSI). Κύρια στόχευση ήταν η μελέτη του πως η SSSI επηρεάζει τις σεισμικές καθιζήσεις των γειτονικών θεμελίων (καθίζηση Z_{SSSI}), σε σύγκριση με το αν τα θεμέλια ήταν μεμονωμένα (καθίζηση Z) στο ίδιο έδαφος και υπό την ίδια σεισμική διέγερση, καθώς και του πως δημιουργούνται παραμένουσες στροφές θ στα δύο θεμέλια για τον ίδιο λόγο.

Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψιν προηγούμενη έρευνα στο ΕΜΠ (Δημουλά, 2022), καθώς και ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, ο πρώτος στόχος της εργασίας ήταν η αριθμητική διερεύνηση παραμέτρων που δεν έχουν εξετασθεί εκτενώς έως τώρα (π.χ., πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L). Η διερεύνηση έγινε με 2D συζευγμένες δυναμικές μη-γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων διαφορών με χρήση του FLAC2D και κατάλληλου καταστατικού προσομοιώματος για τη ρευστοποιήσιμη άμμο (NTUA-SAND). Η ανωδομή της κάθε κατασκευής προσομοιώνεται μόνο μέσω της ομοιόμορφης τάσης q που επιβάλλει στο άκαμπτο αβαρές τραχύ θεμέλιο (μορφής λωρίδας εύρους B). Τα ζεύγη θεμελίων βρίσκονται σε ενδιάμεση απόσταση D , ενώ σημασία έχει το πάχος H_c και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u της αργιλικής «κρούστας». Δεδομένου ότι η μελέτη αφορά στην αλληλεπίδραση γειτονικών κατασκευών, ένας δείκτης n (neighbor) σε κάποιο φυσικό μέγεθος υπονοεί την τιμή που έχει το μέγεθος στο γειτονικό θεμέλιο.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων από την παρούσα εργασία και εκείνη της Δημουλά (2022), που είχε ακολουθήσει την ίδια αριθμητική μεθοδολογία. Συνολικά η βάση δεδομένων έχει αποτελέσματα για 156 περιπτώσεις αλληλεπίδρασης ζεύγους θεμελίων. Έτσι, έγινε δυνατή η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της βάσης με τη βοήθεια μη-γραμμικής παλινδρόμησης και καταρτίστηκε μια σχέση εκτίμησης «κλειστού τύπου» του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z για κάθε θεμέλιο ενός ζεύγους. Η σχέση αυτή θεωρείται «διορθωτικός συντελεστής» της τιμής της καθίζησης λόγω SSSI και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάποια από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες για την εκτίμηση καθίζησης Z μεμονωμένης θεμελιο-λωρίδας σε αντίστοιχες γεωτεχνικές συνθήκες (π.χ., Karamitros et. al., 2014). Δεν έγινε αντίστοιχη ανάλυση για τη στροφή θ , καθώς αυτή δεν έχει τιμή αναφοράς έναντι της οποίας να οριστεί «διορθωτικός συντελεστής» (ένα μεμονωμένο κεντρικά-φορτισμένο θεμέλιο έχει μηδενική στροφή για τις εν λόγω γεωτεχνικές συνθήκες).

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- i. Γενικά: Το φαινόμενο της Αλληλεπίδρασης Κατασκευής-Εδάφους-Κατασκευής (SSSI) υπό ρευστοποίηση στην πλειονότητα των περιπτώσεων οδηγεί σε μείωση των καθιζήσεων σε σχέση με τις καθιζήσεις των αντίστοιχων μεμονωμένων θεμελίων ($Z_{SSSI}/Z < 1$), δηλαδή σε «ευμενή» αλληλεπίδραση σε όρους καθιζήσεων. Παρόλα αυτά, κυρίως σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις D και ειδικά σε στενά/ελαφριά θεμέλια, υπάρχει εμφάνιση μη-αμελητέων στροφών θ . Συνεπώς, η αλληλεπίδραση είναι «δυσμενής» σε όρους στροφών. Συνολικά, το φαινόμενο θεωρείται «δυσμενές» για τα έργα Πολιτικού Μηχανικού σε μικρές και μέτριες ενδιάμεσες αποστάσεις D μεταξύ των θεμελίων.
- ii. Τυπική Απόκριση: Σε περιπτώσεις δίδυμων θεμελίων (ίδια τάση q και εύρος B) οι μηχανισμοί αστοχίας κάτω από τα δύο θεμέλια είναι συμμετρικοί ως προς τον άξονα συμμετρίας του προβλήματος (στο μέσον της ενδιάμεσης απόστασης D), αλλά όχι ως προς τον άξονα συμμετρίας κάθε θεμελίου. Αυτό σημαίνει ότι η απόκριση τους σε όρους καθιζήσεων είναι συμμετρική, οπότε η απόκριση και των δύο θεμελίων περιγράφεται από την ίδια χρονοϊστορία μέσης καθίζησης και την ίδια χρονοϊστορία στροφής (με πρόσημο θετικό αν στρέφονται το ένα προς το άλλο και το ανάποδο). Προφανώς, στην περίπτωση ανόμοιων θεμελίων, το κάθε θεμέλιο έχει τη δική του μέση καθίζηση και στρόφη, και το σημαντικό μέγεθος γίνεται το σχετικό φορτίο Q/Q_n (όπου $Q = qB$), δηλαδή ο λόγος των συνολικών φορτίων των δύο θεμελίων. Κατά κανόνα, τα βαρύτερα και ευρύτερα θεμέλια επηρεάζονται σημαντικά λιγότερο από την αλληλεπίδραση από ότι τα ελαφρύτερα και στενότερα θεμέλια του κάθε ζεύγους. Σε κάθε περίπτωση όμως, η αλληλεπίδραση φθίνει με την αύξηση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{\min} (όπου B_{\min} η μικρότερη από τις δύο τιμές εύρους B του ζεύγους θεμελίων). Πρακτικώς, η αλληλεπίδραση θεωρείται ότι έχει εξαλειφθεί όταν ο λόγος καθιζήσεων $|Z_{SSSI}/Z - 1| < 0.05$ και οι στρόφες $|\theta| < 0.1^\circ$, και αυτό συμβαίνει σε κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις $D/B_{\min} \geq 2$ έως 5. Η ακριβής τιμή που συμβαίνει αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των θεμελίων και του γεωτεχνικού προφίλ.
- iii. Μηχανισμοί Αλληλεπίδρασης: Προκύπτουν δύο βασικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των θεμελίων, και η σχετική σημασία τους εξαρτάται κυρίως από την κανονικοποιημένη ενδιάμεση απόσταση D/B_{\min} μεταξύ τους. Ο πρώτος μηχανισμός είναι αυτός της *Επαλληλίας Τάσεων*. Ένα απειρομήκες επιφανειακό θεμέλιο που εδράζεται σε ένα εδαφικό προφίλ ασκεί τάσεις όχι μόνο στο έδαφος που υπόκειται αυτού, αλλά και λίγο πλευρικά από αυτό. Σε στατικές συνθήκες, όταν υπάρχουν δύο θεμέλια σε πολύ κοντινή απόσταση οι κατακόρυφες τάσεις των δύο θεμελίων επαλληλίζονται με το βάθος και προκύπτει αύξηση των καθιζήσεων. Σε δυναμικές συνθήκες, οι καθιζήσεις είναι κυρίως συνάρτηση των επιβαλλόμενων ανακυκλικών διατμητικών τάσεων, οι οποίες επίσης επαλληλίζονται στην περιοχή ανάμεσα σε δύο κοντινά θεμέλια. Έτσι προκύπτει αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων στην ενδιάμεση περιοχή, συγκριτικά με σημεία στο ίδιο βάθος

αλλά εκτός αυτής της περιοχής. Αποτέλεσμα της επαλληλίας είναι η διάθεση για αύξηση των καθιζήσεων, αλλά κυρίως η εμφάνιση σημαντικών (συγκλινουσών) στροφών, δηλαδή πρόκειται για έναν «δυσμενή» μηχανισμό αλληλεπίδρασης, τόσο σε όρους καθιζήσεων όσο και στροφών, που εμφανίζεται μόνο σε μικρές κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις D/B_{\min} . Ο δεύτερος μηχανισμός είναι αυτός του *Εκτοπιζόμενου Εδάφους*. Στατικά, ένα θεμέλιο που τείνει να αστοχήσει λόγω φέρουσας ικανότητας, εμφανίζει πολύ μεγάλες καθιζήσεις και εκτόπιση εδάφους πλευρικά που οδηγεί σε ανύψωση της επιφάνειας στη γειτονική περιοχή. Έτσι, ένα δεύτερο θεμέλιο που εδράζεται σε αυτή τη γειτονική περιοχή αποκτά δευτερογενώς τη διάθεση να ανυψωθεί (ανομοιόμορφα), πέρα από την πρωτογενή του διάθεση να καθιζάνει (ομοιόμορφα). Ο ίδιος αυτός μηχανισμός είναι έντονος σε δυναμικές συνθήκες όπου το έδαφος παραμορφώνεται υπό σταθερό όγκο λόγω αστράγγιστων συνθηκών, και είναι «ευμενής» ως προς τις καθιζήσεις, αλλά «δυσμενής» ως προς τις (αποκλίνουσες) στροφές. Σε κάθε περίπτωση, ο μηχανισμός αυτός εμφανίζεται σε μικρές αλλά και σε μέτριες κανονικοποιημένες ενδιάμεσες αποστάσεις D/B_{\min} . Πέραν της ενδιάμεσης απόστασης, η ένταση των μηχανισμών αυτών (που επαλληλίζονται) εξαρτάται σημαντικά και από το σχετικό φορτίο Q/Q_n , ενώ φθίνουν με την αύξηση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{\min} .

iv. Επίδρασεις σημαντικών παραμέτρων στον λόγο καθιζήσεων:

(α) Η επίδραση της κανονικοποιημένης ενδιάμεσης απόστασης D/B_{\min} είναι εν γένει αυξητική στον λόγο καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z , ο οποίος τείνει στο 1.0 για μεγάλες τιμές της D/B_{\min} . Η ελάχιστη τιμή του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z εμφανίζεται σε μικρές τιμές της απόστασης $D/B_{\min} = 0.5$ έως 1. Σε τέτοια απόσταση παύει να ενεργεί ο Μηχανισμός Επαλληλίας Τάσεων και πλέον κυριαρχεί ο Μηχανισμός Εκτοπιζόμενου Εδάφους, που με τη σειρά του εξαλείφεται για μεγάλες τιμές της $D/B_{\min} = 2 - 5$.

(β) Η επίδραση του λόγου φορτίων Q/Q_n επί του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z είναι γενικώς αυξητική. Συγκεκριμένα, βαριά/ευρέα θεμέλια ($Q/Q_n > 1$) επηρεάζονται λίγο από τα γειτονικά τους ελαφρά/στενά και η απόκριση τους προσεγγίζει εκείνη των αντίστοιχων μεμονωμένων θεμελίων ($Z_{SSSI}/Z \rightarrow 1.0$). Αντίθετα, τα ελαφριά/στενά θεμέλια ($Q/Q_n < 1$) επηρεάζονται έντονα από τα γειτονικά τους βαριά/ευρέα θεμέλια, οπότε η απόκρισή τους αποκλίνει από εκείνη των αντίστοιχων μεμονωμένων (μικρή τιμή Z_{SSSI}/Z). Η επίδραση αυτή εξηγείται από τον μηχανισμό *Εκτοπιζόμενου Εδάφους*, καθώς ένα θεμέλιο με $Q/Q_n > 1$ εκτοπίζει συγκριτικά περισσότερο έδαφος κάτω από το διπλανό του με $Q/Q_n < 1$, το οποίο αποκτά δευτερογενώς τη διάθεση ανύψωσης.

(γ) Η επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u της επιφανειακής αργιλικής «κρούστας» επί του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z είναι γενικώς μειωτική, δηλαδή όσο αυξάνει η αντοχή της «κρούστας» τόσο μειώνεται ο λόγος Z_{SSSI}/Z . Αυτό αποδίδεται στο ότι το εύρος της πλευρικής επηρεαζόμενης περιοχής αυξάνει όσο

μεγαλύτερη είναι η αντοχή του εδάφους (όπως συμβαίνει και στατικά), οπότε ο μηχανισμός *Εκτοπιζόμενου Εδάφους* γίνεται πιο σημαντικός.

(δ) Τέλος, η επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L επί του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z είναι γενικώς μειωτική. Συγκεκριμένα, όταν η ρευστοποιήσιμη στρώση είναι λεπτότερη, ο μηχανισμός *Εκτοπιζόμενου Εδάφους* είναι πιο ανίσχυρος μιας και δεν υπάρχει επαρκές έδαφος προς εκτόπιση, και το αντίστροφο.

- v. Αλληλεπίδραση στις στροφές των θεμελίων: Κατά κανόνα, σε μικρότερες ενδιάμεσες αποστάσεις D/B_{min} οι στροφές των θεμελίων είναι συγκλίνουσες (κυρίαρχος ο μηχανισμός *Επαλληλίας Τάσεων*), ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις είναι αποκλίνουσες (κυρίαρχος ο μηχανισμός *Εκτοπιζόμενου Εδάφους*). Όταν η αλληλεπίδραση φθίνει, τα θεμέλια τείνουν να αποκριθούν σαν να ήταν μεμονωμένα, και συνεπώς οι στροφές τείνουν να μηδενιστούν. Γενικώς, σημαντικές τιμές στροφών εμφανίζουν μόνο τα στενά/ελαφριά θεμέλια ($Q/Q_n < 1$), ενώ τα βαριά/ευρεία θεμέλια ($Q/Q_n > 1$) δεν έχουν τάση να στραφούν. Πάντως, ακόμα και για τα στενά/ελαφριά θεμέλια οι τιμές των στροφών είναι σημαντικές μόνο σε μικρές ενδιάμεσες αποστάσεις D/B_{min} (≤ 2 , για τη συγκεκριμένη έστω αρμονική διέγερση).
- vi. Στατιστική προσέγγιση του λόγου καθιζήσεων: Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων 156 αριθμητικών αναλύσεων μέσω μη-γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψαν διάφορες σχέσεις υπολογισμού του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z με μεταβλητή πολυπλοκότητα και ακρίβεια. Η βέλτιστη σχέση που προτείνεται είναι μια *σύνθετη πολυ-παραμετρική προσέγγιση*, που περιλαμβάνει εκτίμηση σε 2 βήματα. Οι προτεινόμενες σχέσεις εκφράζουν ποσοτικά τις επιδράσεις των προαναφερθέντων 4 σημαντικών μεγεθών. Η προτεινόμενη προσέγγιση δεν παρουσιάζει μεροληψία (μηδενικό μέσο σχετικό σφάλμα) και εμφανίζει τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος ίση με $\pm 26.4\%$ και μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα ίσο με 18.7% . Στην πράξη του μηχανικού, η προτεινόμενη σχέση εκτιμάει έναν «διορθωτικό συντελεστή» Z_{SSSI}/Z ο οποίος μπορεί να πολλαπλασιαστεί με την τιμή της εκτιμώμενης καθιζήσης Z για το αντίστοιχο μεμονωμένο θεμέλιο στο ίδιο έδαφος υπό την ίδια σεισμική διέγερση για να συμπεριληφθεί η επίδραση της αλληλεπίδρασης SSSI. Με τη σειρά της, η εν λόγω τιμή της Z μπορεί να εκτιμηθεί από υπάρχουσες μεθοδολογίες της βιβλιογραφίας (π.χ. Karamitros et. al. (2014)) που κάνουν πάντα τη θεώρηση μεμονωμένου θεμελίου.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Παρότι η παρούσα Διπλωματική Εργασία κατέληξε στην πρόταση μιας αναλυτικής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z , η πολυπαραμετρικότητα του προβλήματος οδηγεί στην ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης. Για αυτόν τον λόγο γίνονται οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- i. Έχουν πραγματοποιηθεί παραμετρικές αναλύσεις για διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης H_L . Αυτή η παράμετρος εμφανίζεται στην αναλυτική μεθοδολογία διαιρούμενη με το πάχος της αργιλικής «κρούστας» H_c για λόγους αδιαστατοποίησης. Παρόλα αυτά, έχουν πραγματοποιηθεί αναλύσεις μόνο για $H_c = 2m$ και συνεπώς ενδείκνυται η χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας μόνο με αυτή την τιμή. Οπότε προτείνεται η εκτέλεση επιπλέον παραμετρικών αναλύσεων και για άλλες τιμές του H_c (π.χ. 1 έως 4m) κάτι που έχει τονισθεί και στη διεθνή βιβλιογραφία ως «βάθος ρευστοποιήσιμης στρώσης» (Kassas et. al., 2022), με σκοπό να ελεγχθεί η εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας ή να τροποποιηθεί κατάλληλα.
- ii. Εκτός της επίδρασης των γεωμετρικών και γεωτεχνικών παραμέτρων που έχουν ήδη εξετασθεί θα πρέπει να εξετασθεί και η επίδραση βασικών παραμέτρων της σεισμικής διέγερσης. Όλες οι παραμετρικές αναλύσεις έως τώρα (παρούσα εργασία και Δημουλά 2022) έχουν πραγματοποιηθεί με τη θεώρηση αρμονικής διέγερσης με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.2g$, περίοδο $T = 0.35$ sec και $N = 10$ σημαντικούς κύκλους, ήτοι μιας σχετικά σημαντικής διέγερσης. Η χρήση μόνο μίας διέγερσης γίνεται χάριν απλότητας, και με βάση την παραδοχή ότι η επίδραση της διέγερσης «απαλείφεται» σε όρους λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z αφού επιδρά «ισόποσα» σε αριθμητή και παρονομαστή. Οπότε προτείνεται η μελέτη της αλληλεπίδρασης και για άλλες αρμονικές διεγέρσεις, αλλά κυρίως και για διάφορες σεισμικές καταγραφές από πραγματικές δονήσεις, για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων και της προτεινόμενης μεθοδολογίας.
- iii. Ως επόμενο αντικείμενο μελέτης προτείνεται η προσομοίωση και των ανωδομών των θεμελίων, ως μονο-διάστατων ταλαντωτών. Προφανώς αυτή η επέκταση λειτουργεί υπέρ του ρεαλισμού, αλλά προσθέτει επιπλέον παραμέτρους στο ήδη πολύ-παραμετρικό πρόβλημα. Τουλάχιστον η βιβλιογραφία έχει δείξει (π.χ., Bazaios et al. 2023) πως σε ό,τι αφορά στις καθιζήσεις, η υιοθετηθείσα απλούστευση (αβαρές θεμέλιο με ομοιόμορφο φορτίο q) οδηγεί (συνήθως) σε συντηρητική εκτίμηση των καθιζήσεων λόγω ρευστοποίησης. Προς το παρόν, και πάλι υιοθετείται η παραδοχή ότι η επίδραση της ανωδομής «απαλείφεται» σε όρους λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z αφού επιδρά «ισόποσα» σε αριθμητή και παρονομαστή.
- iv. Ως απώτερο αντικείμενο μελέτης προτείνεται η χρήση 3Δ αναλύσεων για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης δύο κατασκευών που δεν θεμελιώνονται σε

θεμελιο-λωρίδες αλλά σε πεπερασμένου μήκους θεμέλια. Όπως και ανωτέρω, αυτή η επέκταση λειτουργεί υπέρ του ρεαλισμού, αλλά προσθέτει επιπλέον παραμέτρους στο ήδη πολύ-παραμετρικό πρόβλημα. Και πάλι, προς το παρόν υιοθετείται η παραδοχή ότι η επίδραση της τρίτης διάστασης των θεμελίων «απαλείφεται» σε όρους λόγου καθιζήσεων Z_{SSSI}/Z αφού επιδρά «ισόποσα» σε αριθμητή και παρονομαστή.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

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

Ayadat, T. (2021). Determination of the Undrained Shear Strength of Sensitive Clay Using Some Laboratory Soil Data. *Studies in Engineering and Technology*, 8(1), 14-27.

Benoit, K. (2011). Linear regression models with logarithmic transformations. London School of Economics, London, 22(1), 23-36.

Bouckovalas, G. D., Tsiapas, Y. Z., Theocharis, A. I., & Chaloulos, Y. K. (2016). Ground response at liquefied sites: seismic isolation or amplification?. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91, 329-339.

Boussinesq J., Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et mouvement des solides élastiques, Gauthier-Villard, Paris, 1885

Bray, J. D., & Macedo, J. (2017). 6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, 215-231.

Bray, J., J. Stewart, M. Baturay, T. Durgunoglu, A. Onalp, R. Sancio, J. Stewart, D. Ural, A. Ansal, and J. Bardet, Damage patterns and foundation performance in Adapazari. *Earthquake Spectra*, 2000. 16(S1): p. 163-189

Dimoula, M. (2022). Structure-Soil-Structure Interaction in Liquefiable Soils with a Clay Crust (Master Thesis, DSpace@NTUA).

Hayden, C.P., J.D. Zupan, J.D. Bray, J.D. Allmond, and B.L. Kutter, Centrifuge tests of adjacent mat-supported buildings affected by liquefaction. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2014.

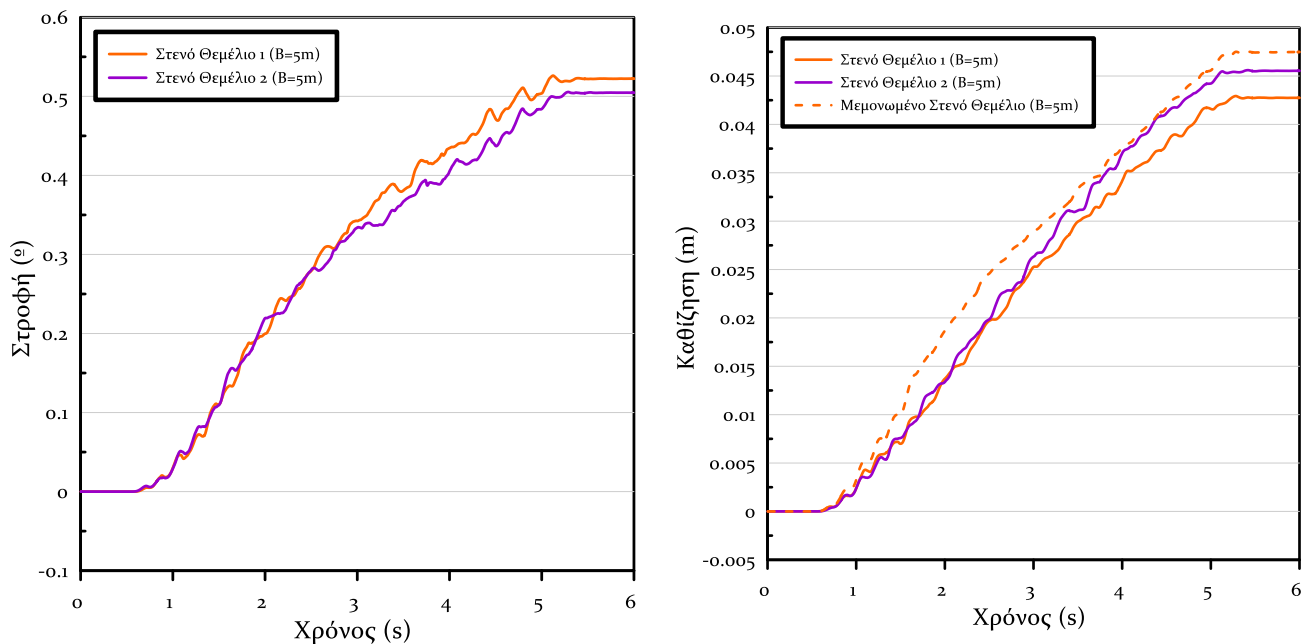
Ishikawa, T., Yoshimi, M., Isobe, K., & Yokohama, S. (2021). Reconnaissance report on geotechnical damage caused by 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake with JMA seismic intensity 7. *Soils and foundations*, 61(4), 1151-1171.

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

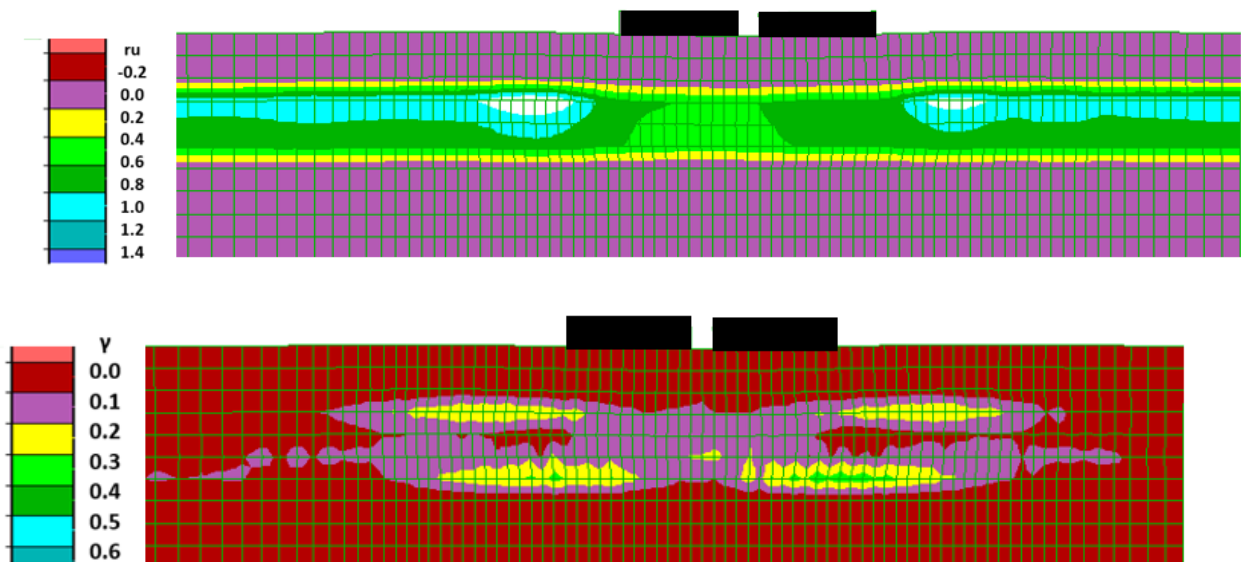
Kassas, K., Adamidis, O., & Anastasopoulos, I. (2022). Structure-soil-structure interaction (SSSI) of adjacent buildings with shallow foundations on liquefiable soil. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(10), 2315-2334.

- Kirkwood, P. and S. Dashti, A centrifuge study of seismic structure-soil structure interaction on liquefiable ground and implications for design in dense urban areas. *Earthquake Spectra*, 2018
- Limnaiou, T. (2022). Constitutive modeling of the monotonic and cyclic response of granular soils with applications in seismic liquefaction (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).
- Newmark NM. Effect of earthquakes on dams and embankments. *Géotechnique* 1965;15(2):139–59.
- Papadimitriou, A. G., & Bouckovalas, G. D. (2002). Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(3), 191-204.
- Prandtl, L. (1920) “Über die Härte plastischer Körper.” *Nachr. Ges. Wiss. Goettingen, Math.-Phys. Kl.*, pp. 74–85.
- Shahir, H., & Pak, A. (2010). Estimating liquefaction-induced settlement of shallow foundations by numerical approach. *Computers and Geotechnics*, 37(3), 267-279.
- Steven Lawrence Kramer. (2014). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson India Education Services.
- Tokimatsu, K., H. Suzuki, K. Katsumata, and S. Tamura (2013) Geotechnical problems in the 2011 Tohoku pacific earthquakes, in *Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering:: Chicago, Illinois*
- Tokimatsu, K., S. Kuwayama, S. Midorikawa, A. Abe, and S. Tamura, Preliminary report on the geotechnical aspects of the Philippine earthquake of July 16, 1990. 1991
- Tsiapas, Y. (2017). Seismic response analysis of liquefiable ground with computational methods. PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering.
- Yarmohammadi, F. (2023). Numerical Modelling of Structure-Soil-Structure Interaction Affected by Soil Liquefaction (Doctoral dissertation, ResearchSpace@ Auckland).

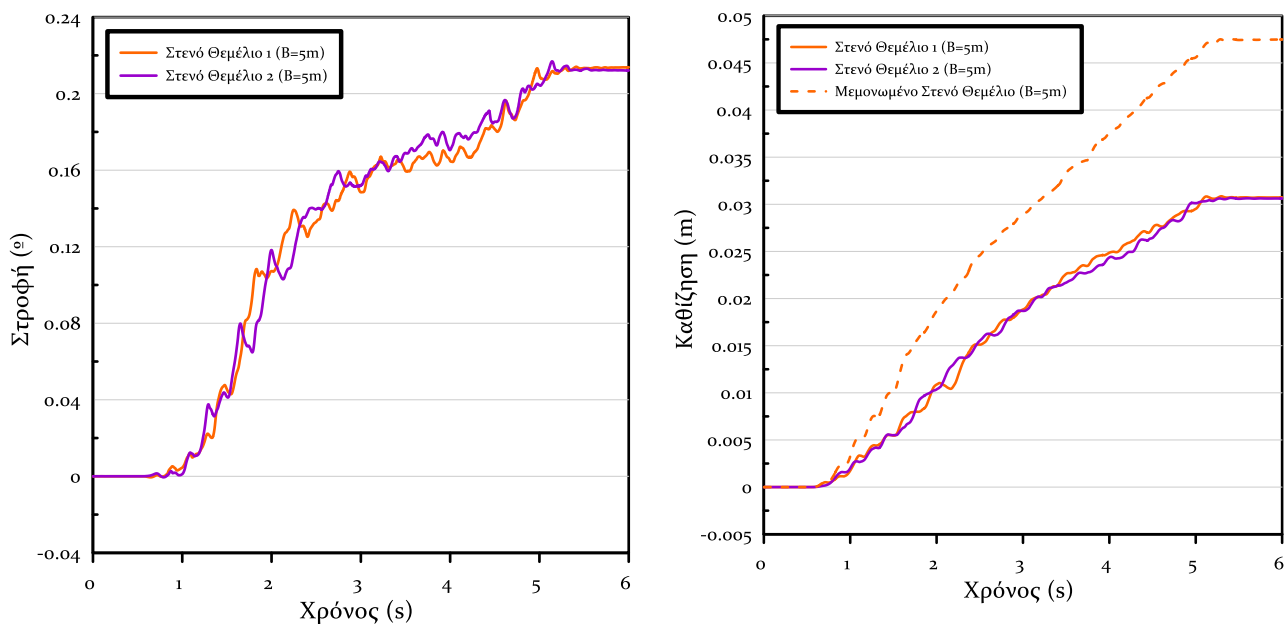
Παράρτημα Μέρος Α: Λεπτομερή Αριθμητικά Αποτελέσματα



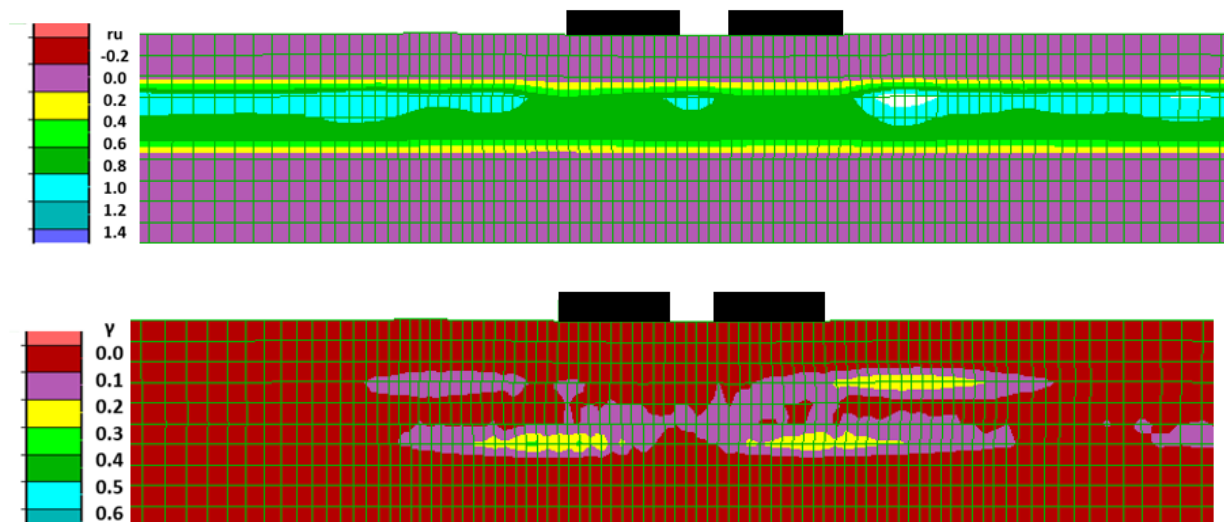
Σχήμα Α.1: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



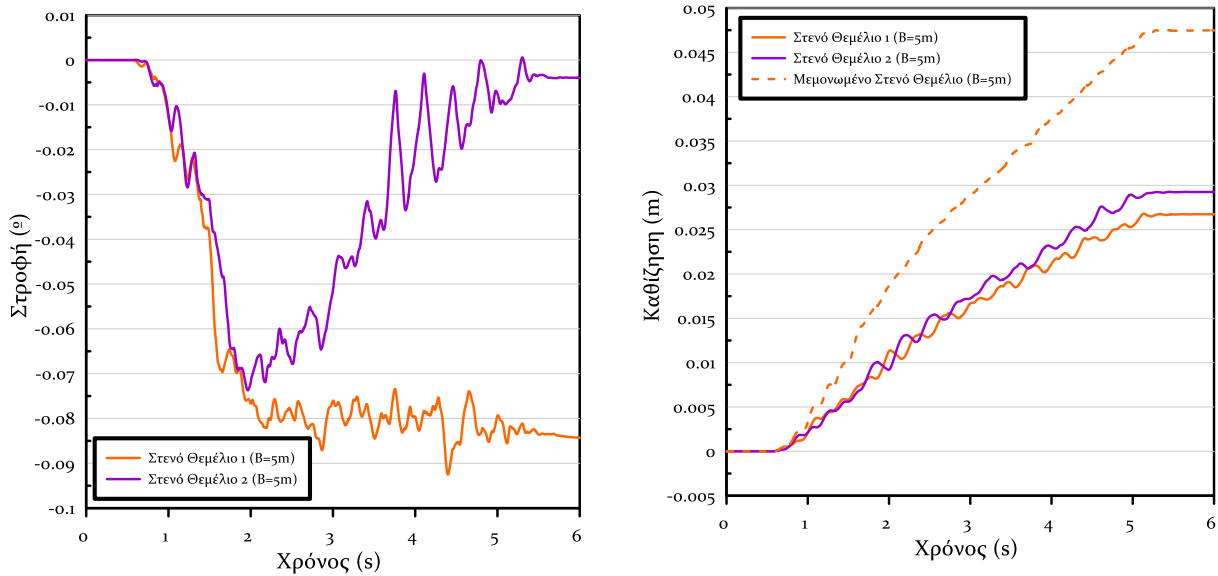
Σχήμα Α.2: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσης ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



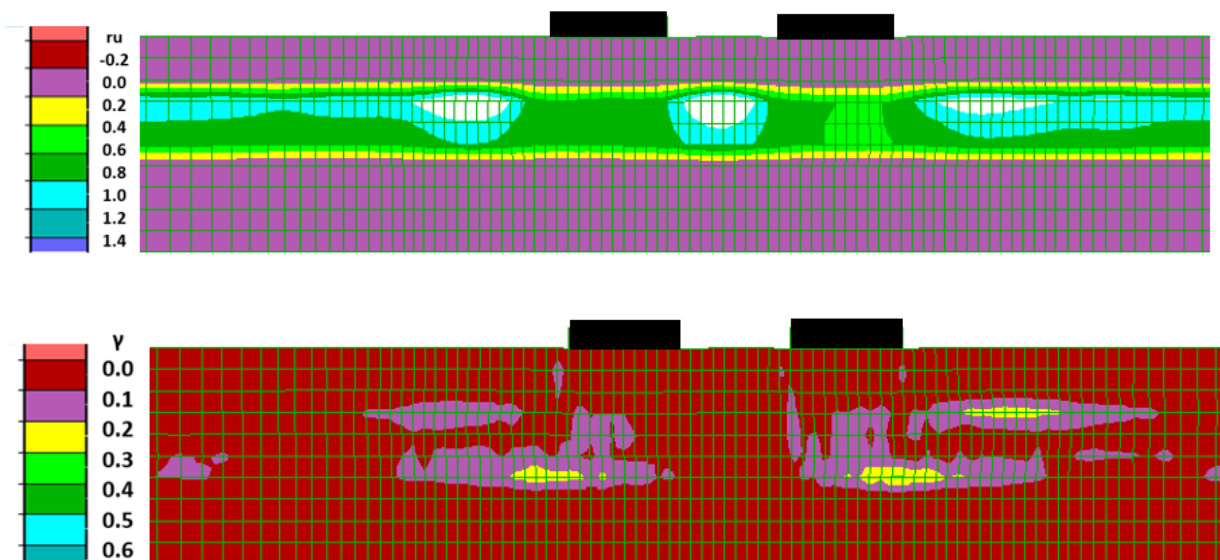
Σχήμα Α.3: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



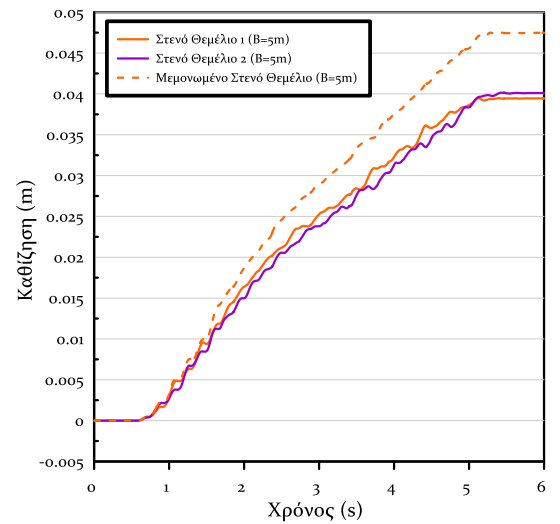
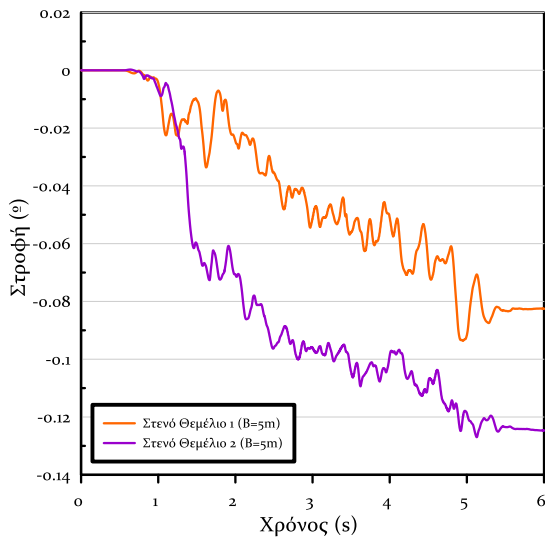
Σχήμα Α.4: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 2.5m$



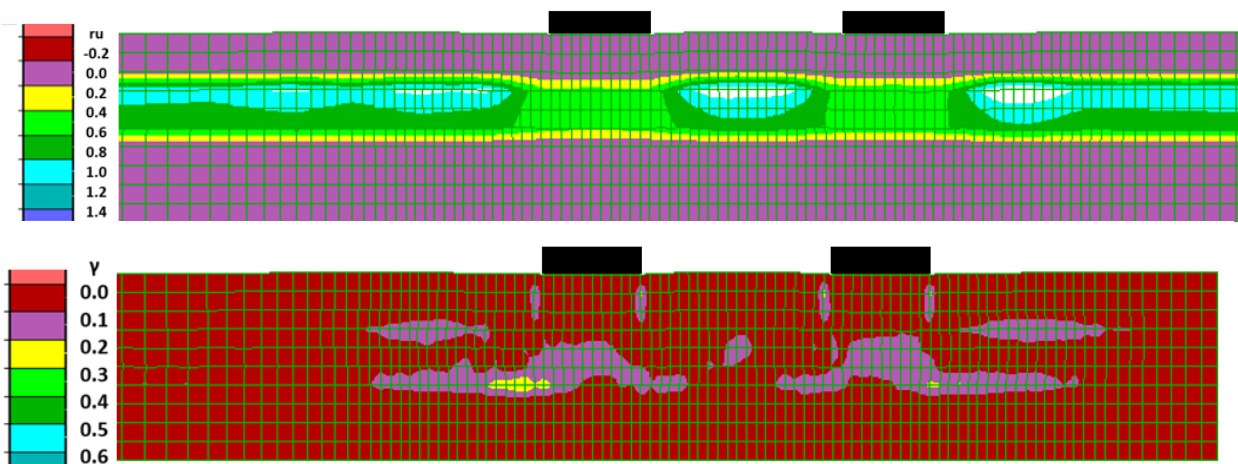
Σχήμα Α.5: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



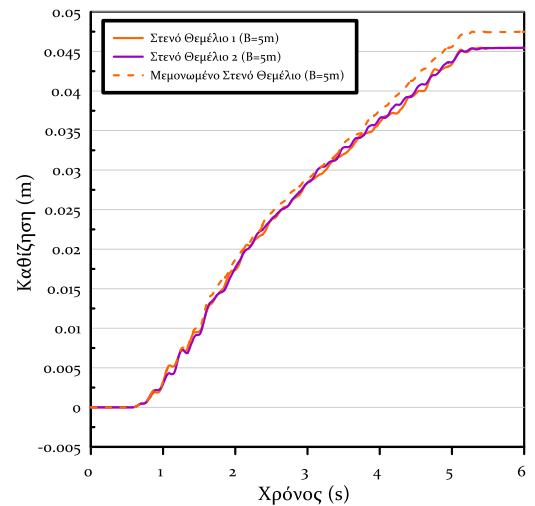
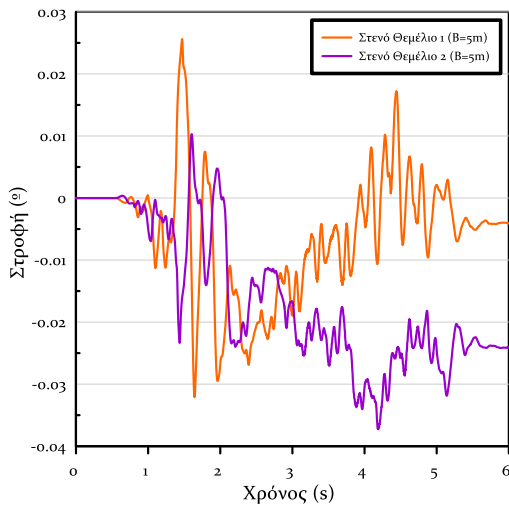
Σχήμα Α.6: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 5m$



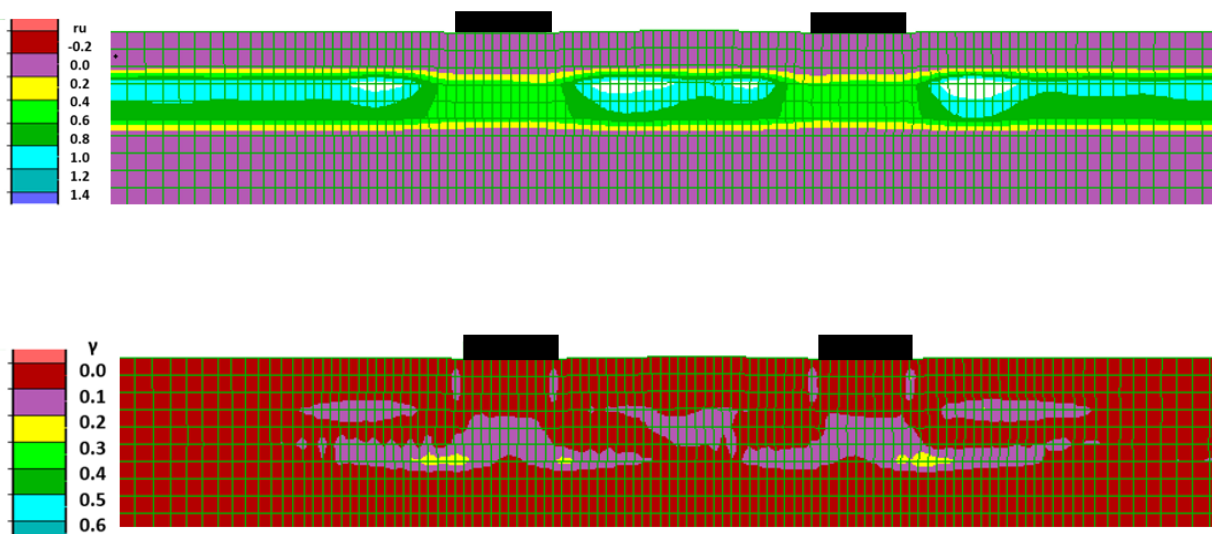
Σχήμα Α.7: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



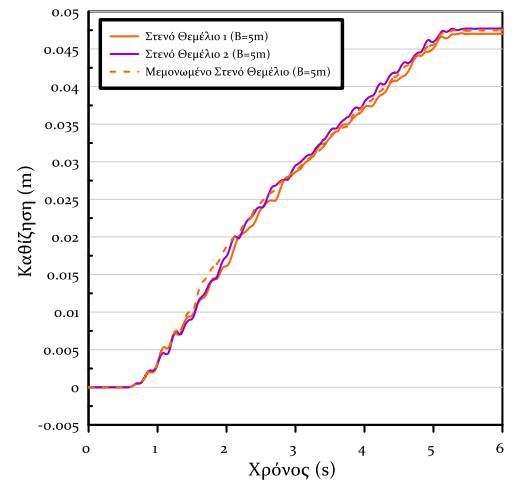
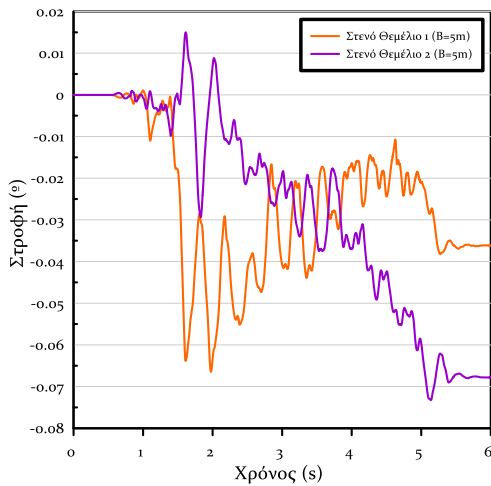
Σχήμα Α.8: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$



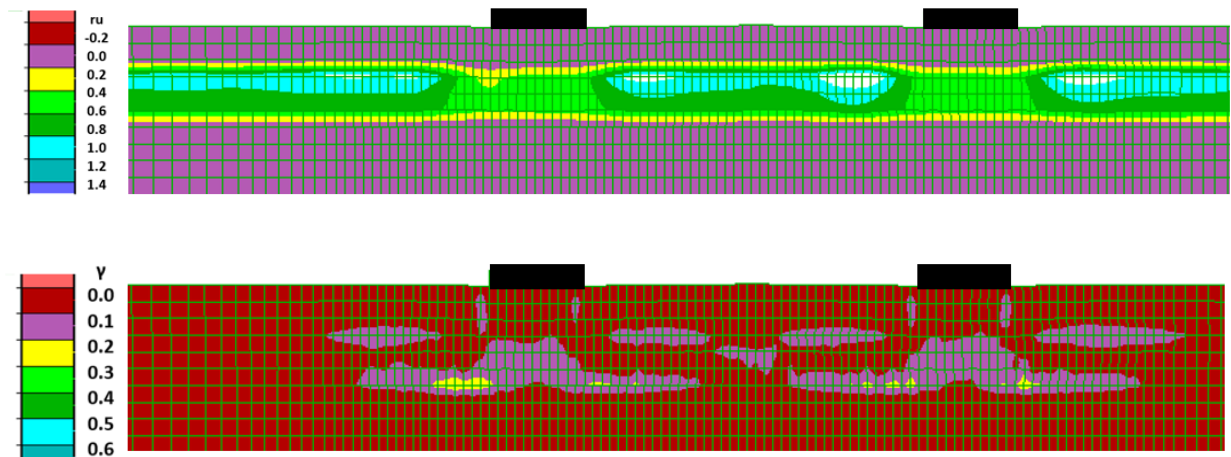
Σχήμα Α.9: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 15m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



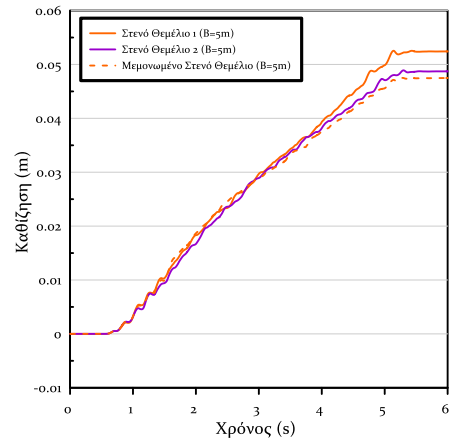
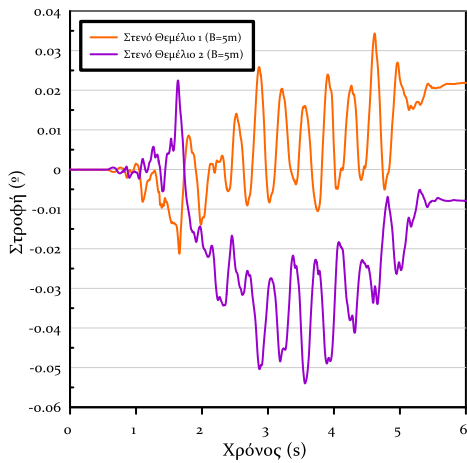
Σχήμα Α.10: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 15m$



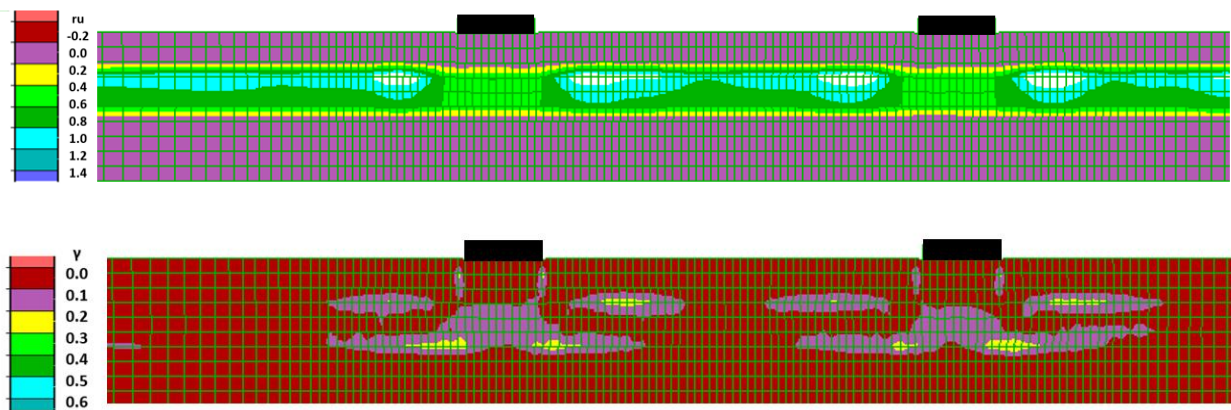
Σχήμα Α.11: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 20 m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



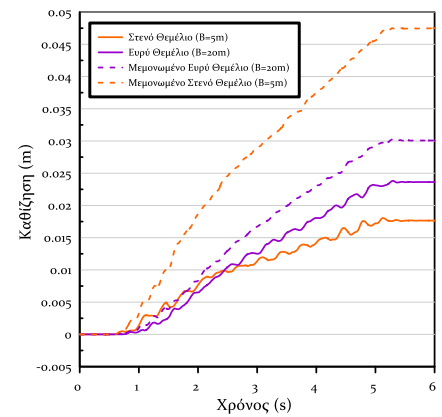
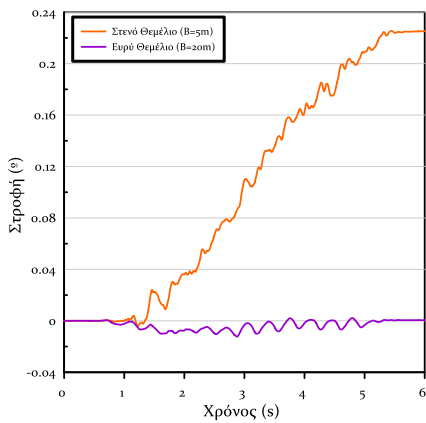
Σχήμα Α.12: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 20m$



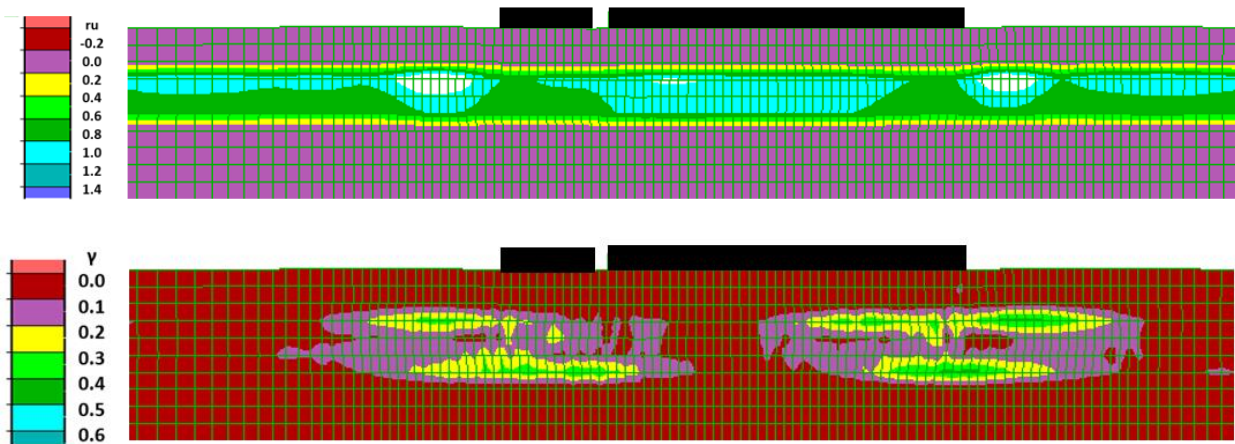
Σχήμα Α.13: Σύγκριση χρονιοιστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 25 m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



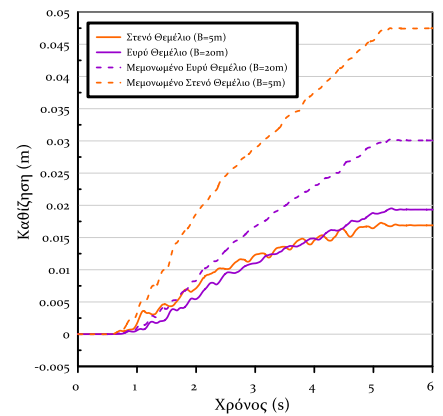
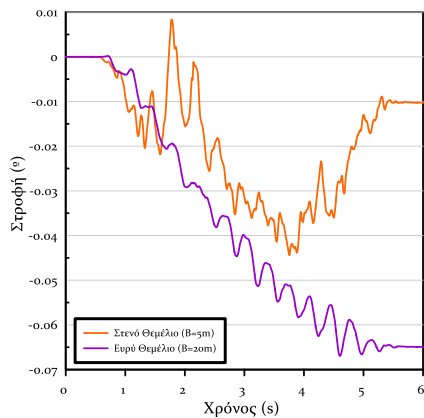
Σχήμα Α.14: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 25m$



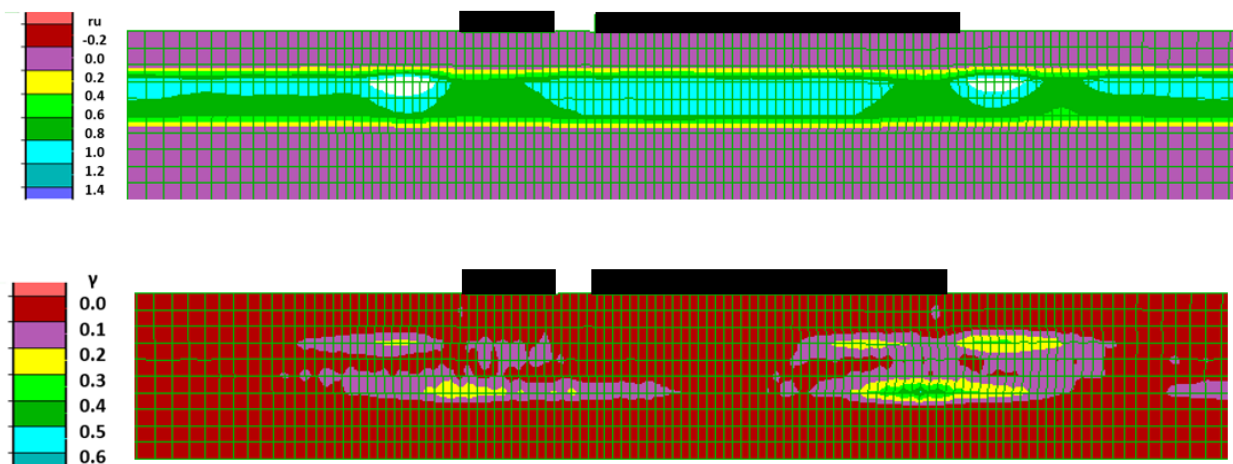
Σχήμα Α.15: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 1 m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



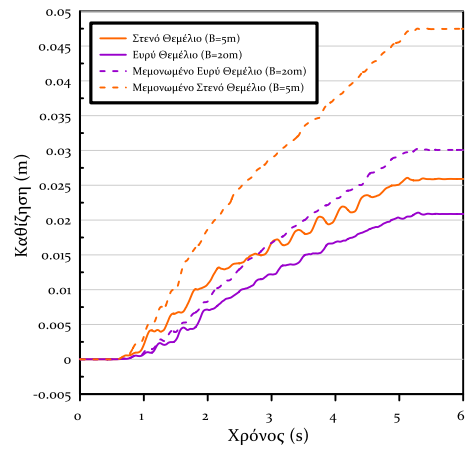
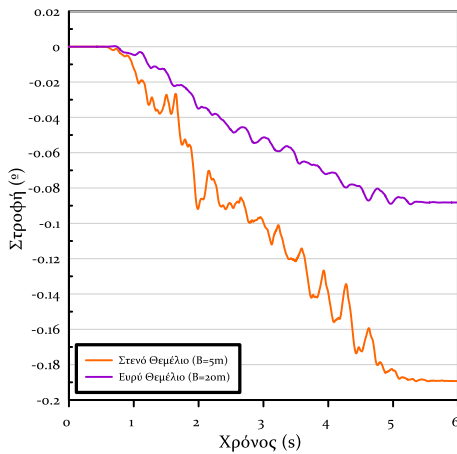
Σχήμα Α.16: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 1m$



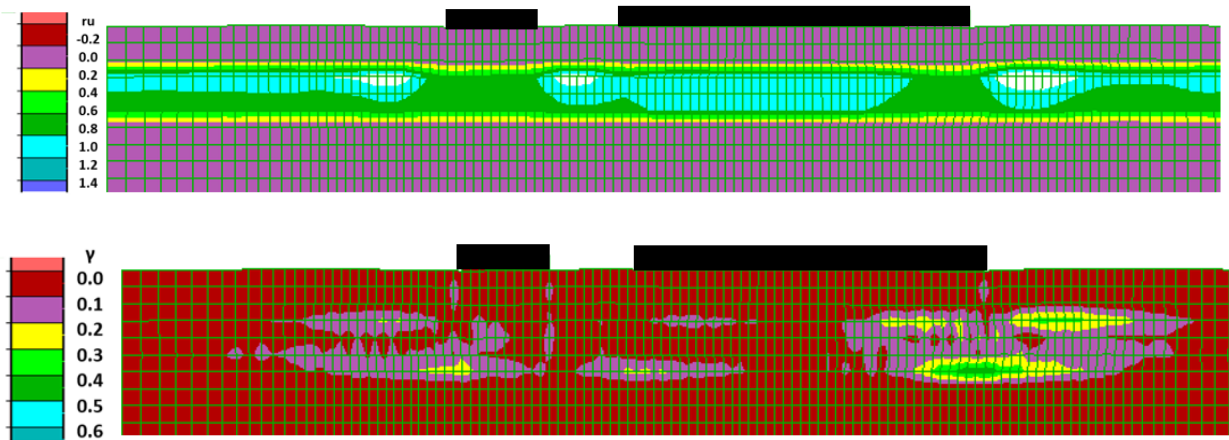
Σχήμα Α.17: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



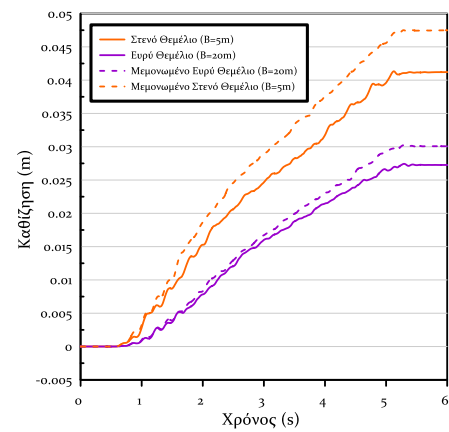
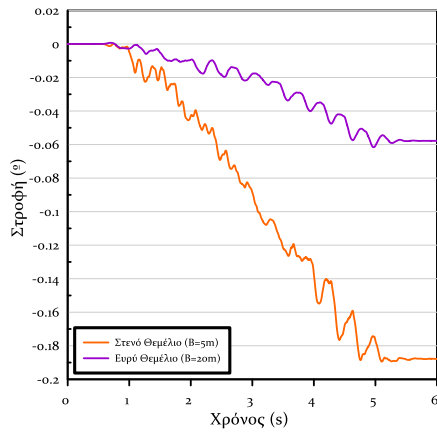
Σχήμα Α.18: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$



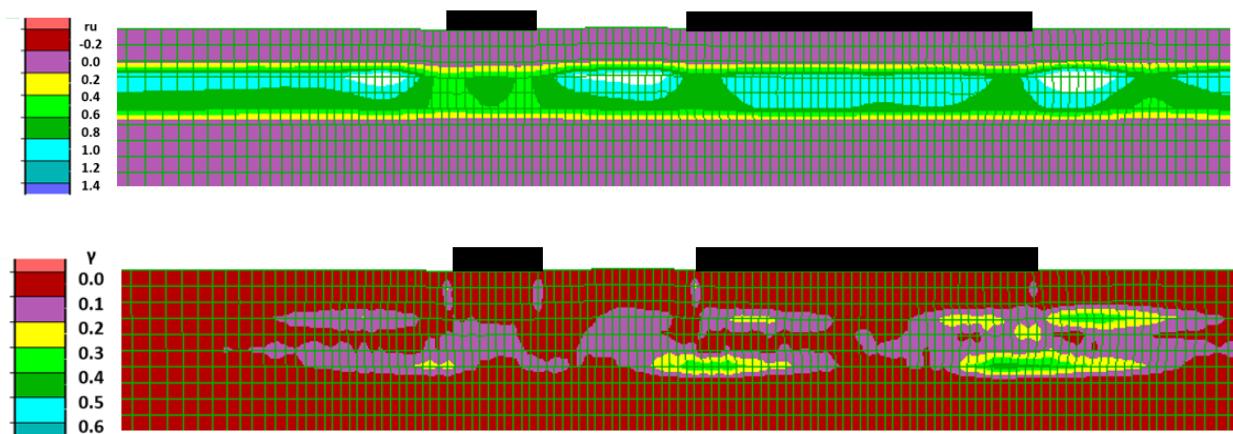
Σχήμα A.19: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



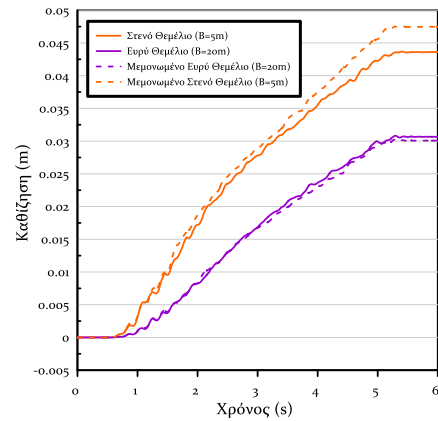
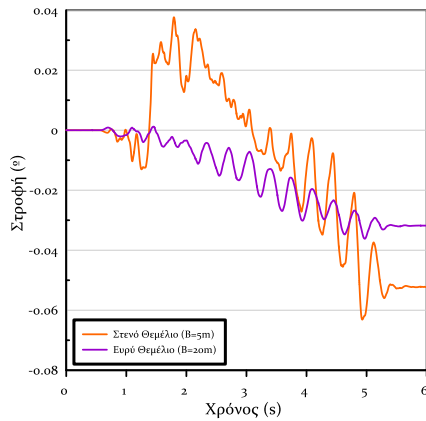
Σχήμα A.20: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=5m$



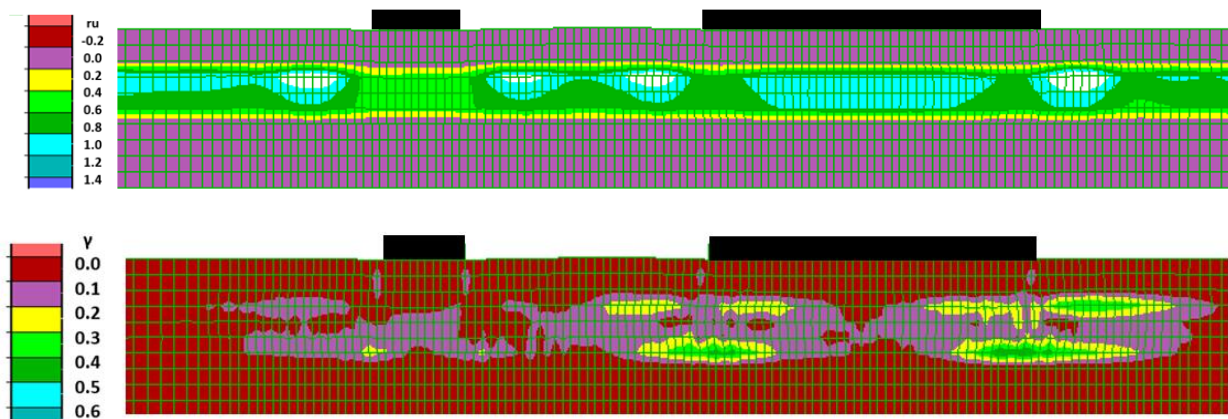
Σχήμα Α.21: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



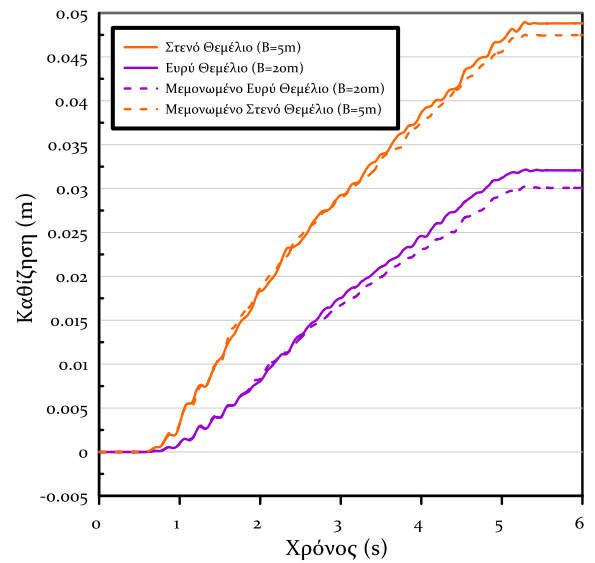
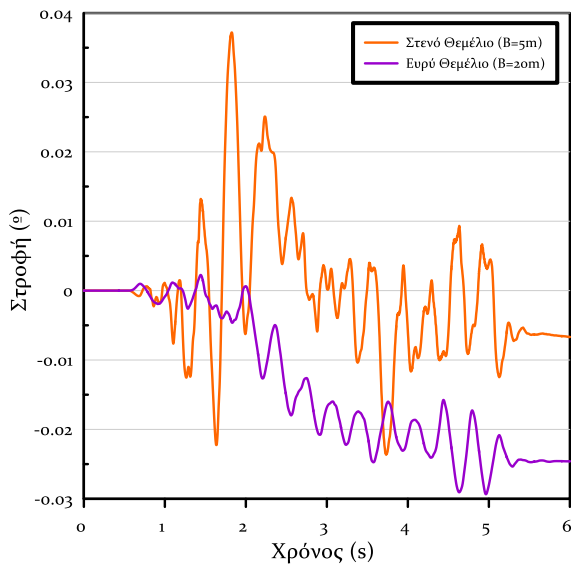
Σχήμα Α.22: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$



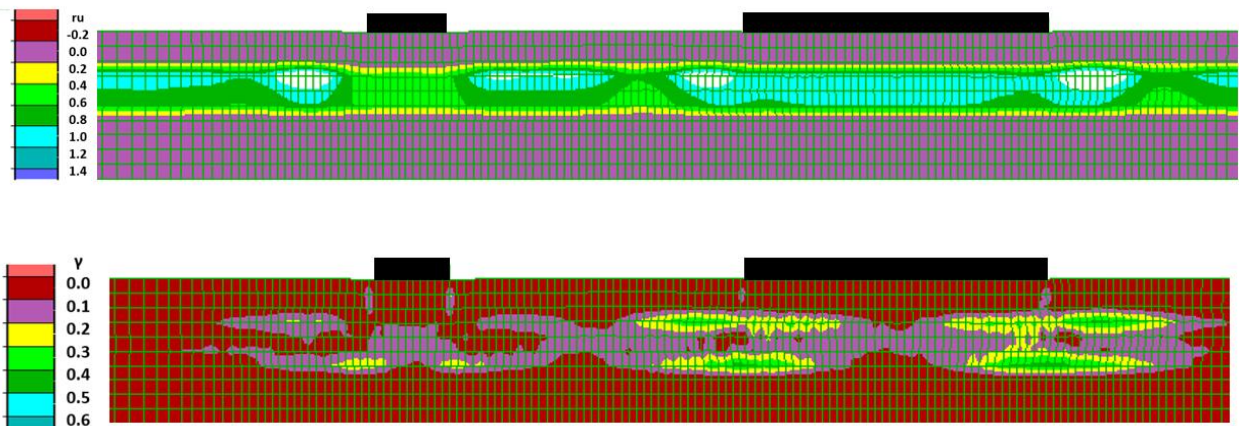
Σχήμα A.23: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=15m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



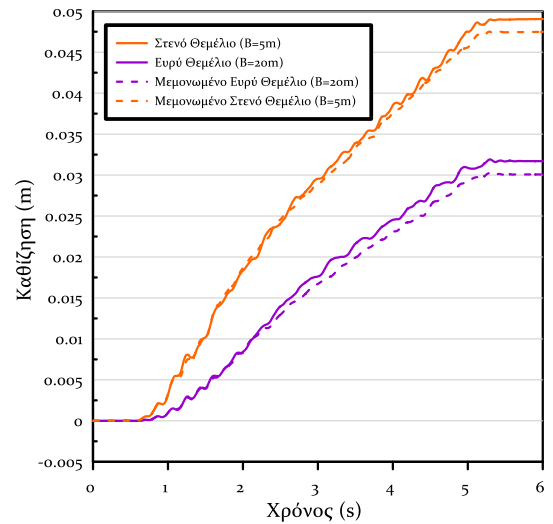
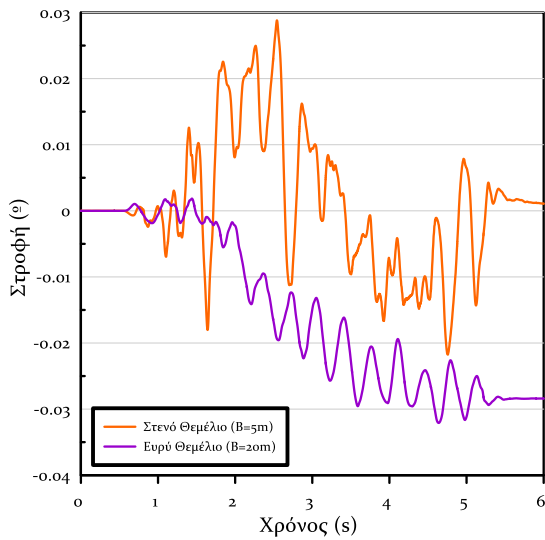
Σχήμα A.24: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=15m$



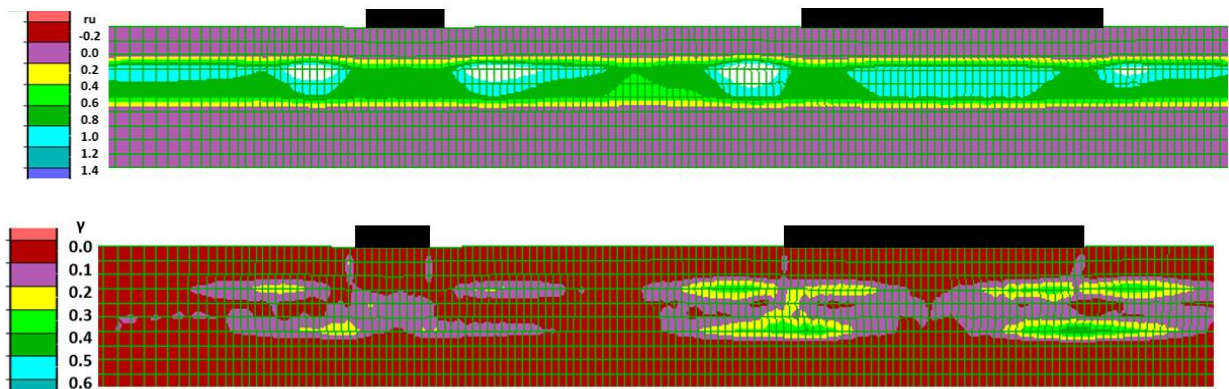
Σχήμα Α.25: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=20m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



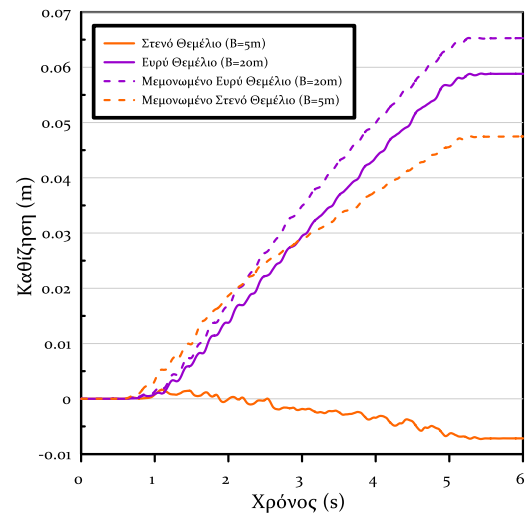
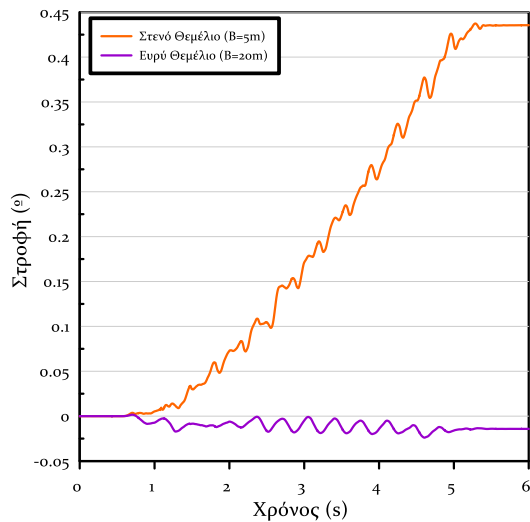
Σχήμα Α.26: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=20m$



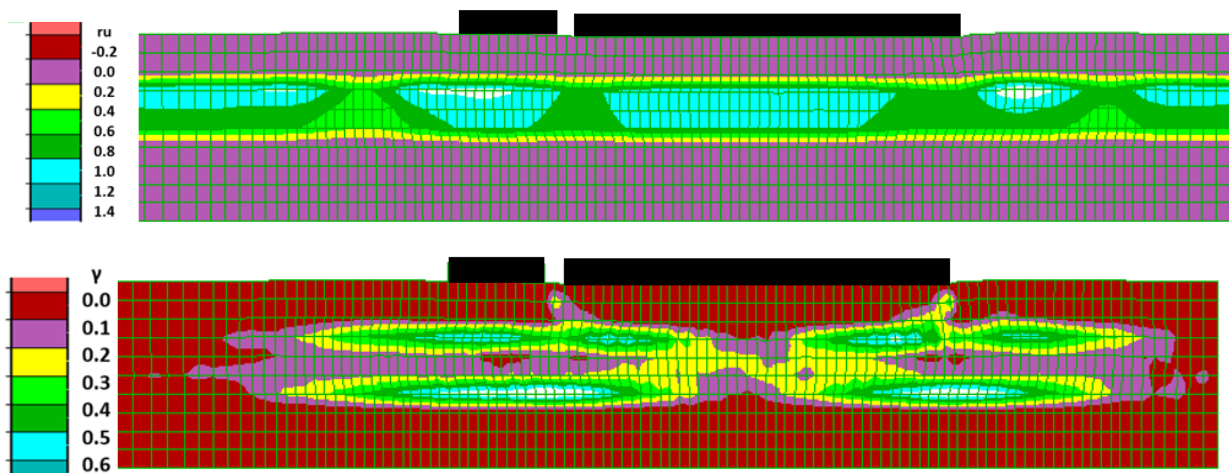
Σχήμα A.27: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D=25\text{m}$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$.



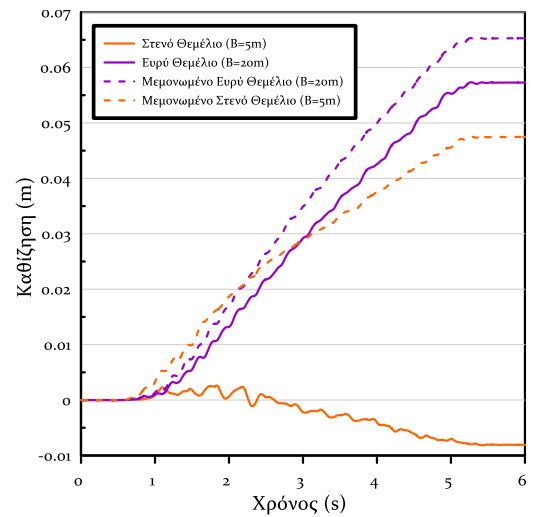
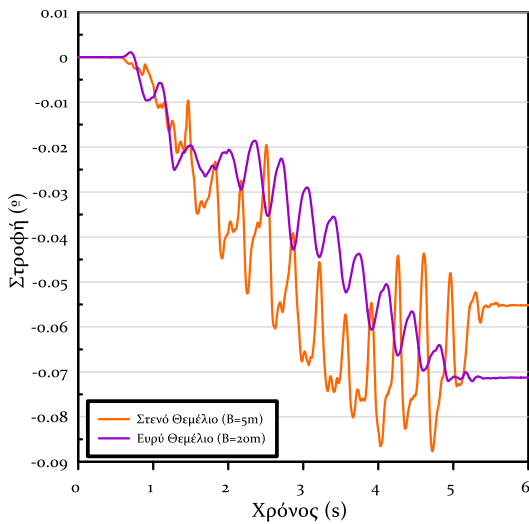
Σχήμα A.28: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40\text{kPa}$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D=25\text{m}$



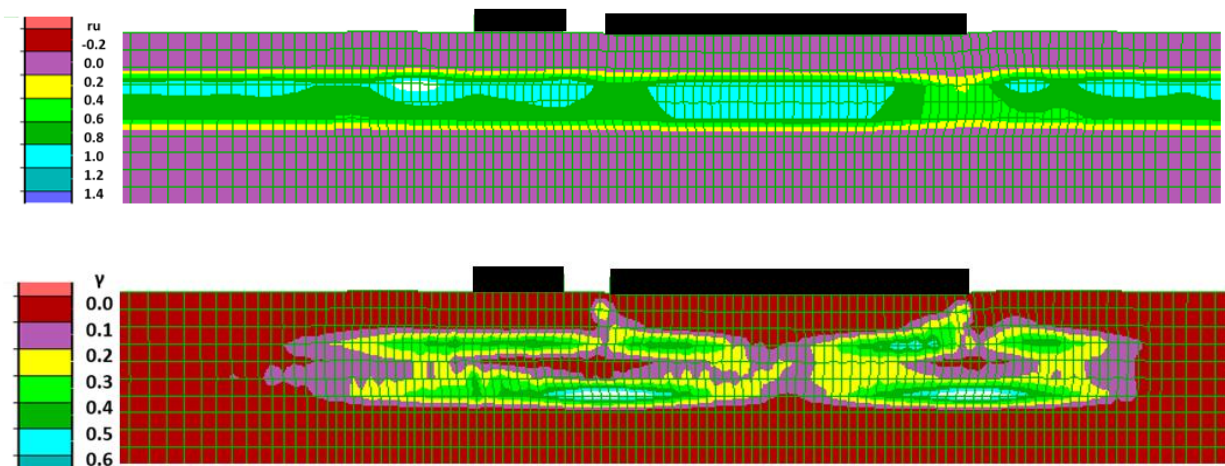
Σχήμα Α.29: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



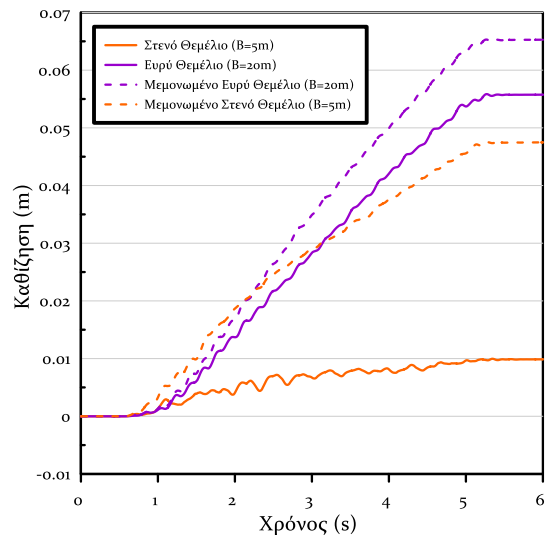
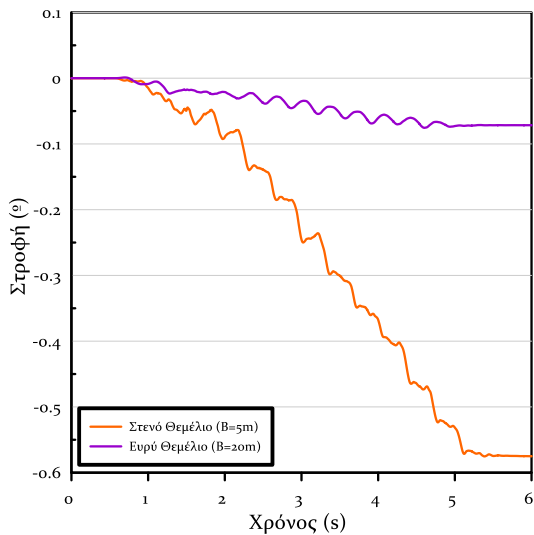
Σχήμα Α.30: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=1m$



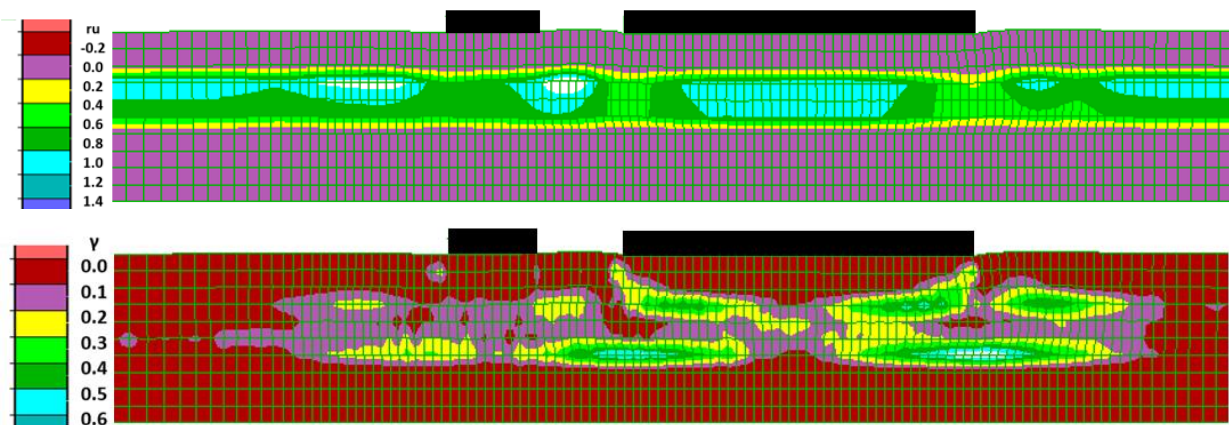
Σχήμα Α.31: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



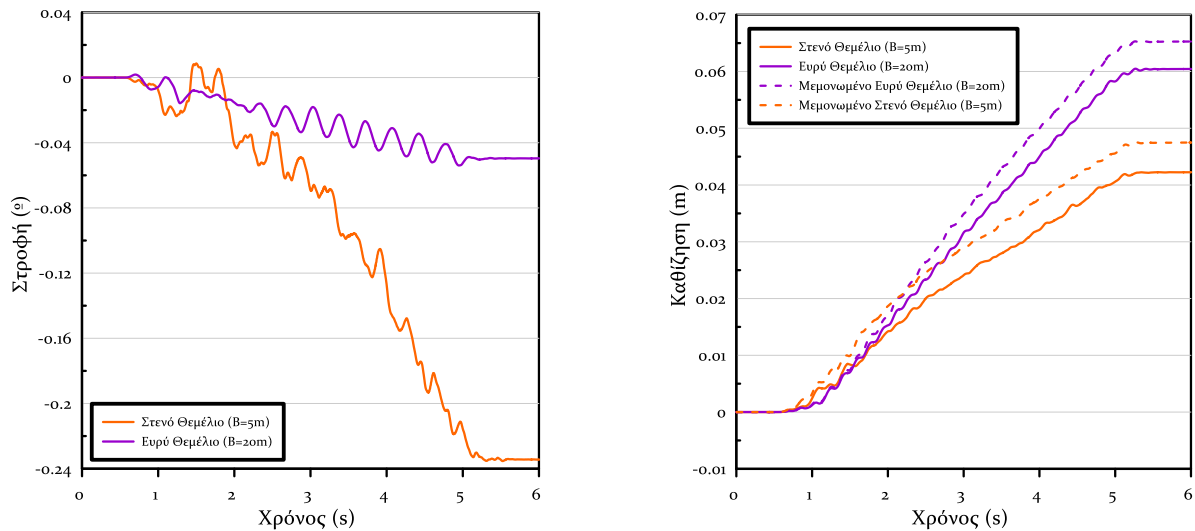
Σχήμα Α.33: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$



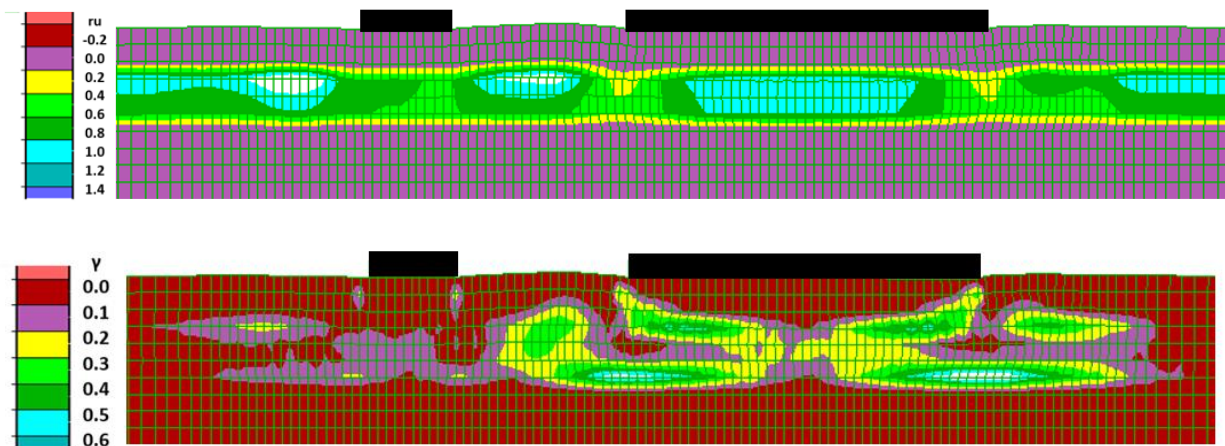
Σχήμα A.33: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



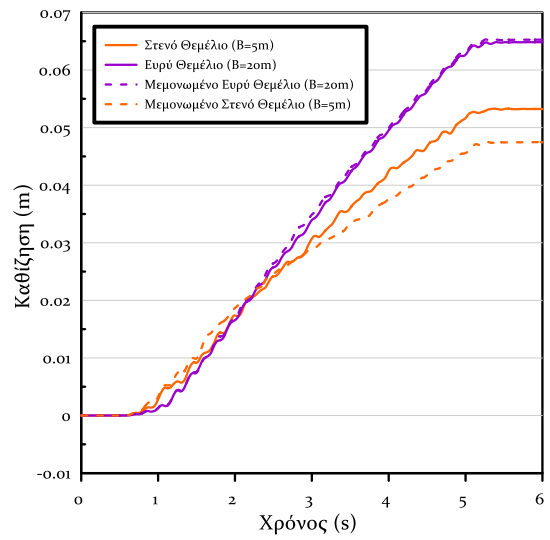
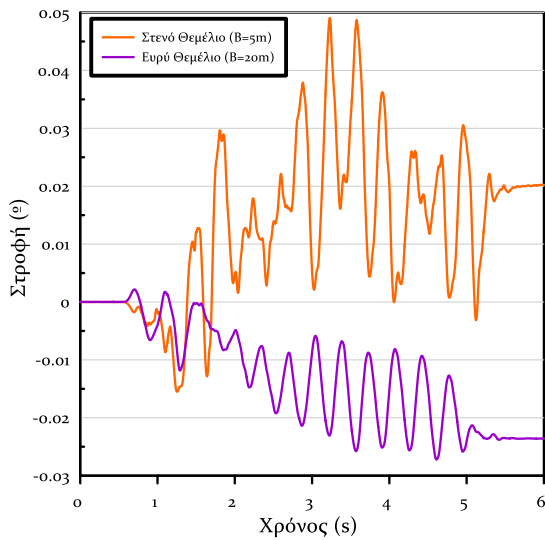
Σχήμα A.34: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=5m$



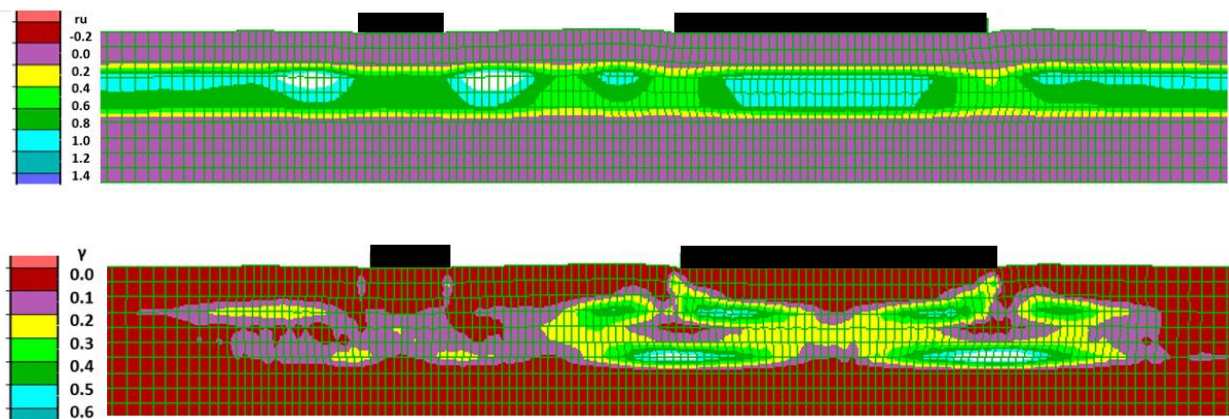
Σχήμα Α.35: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



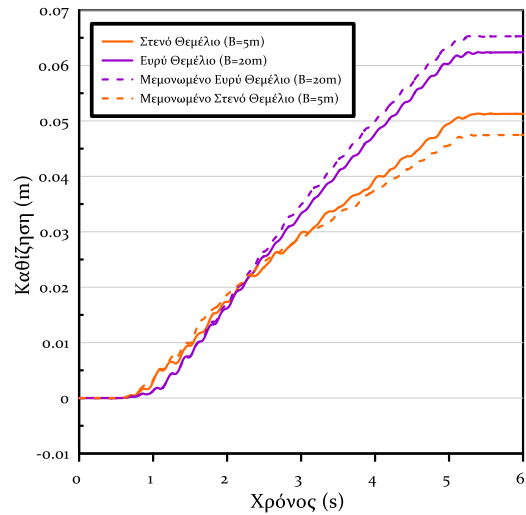
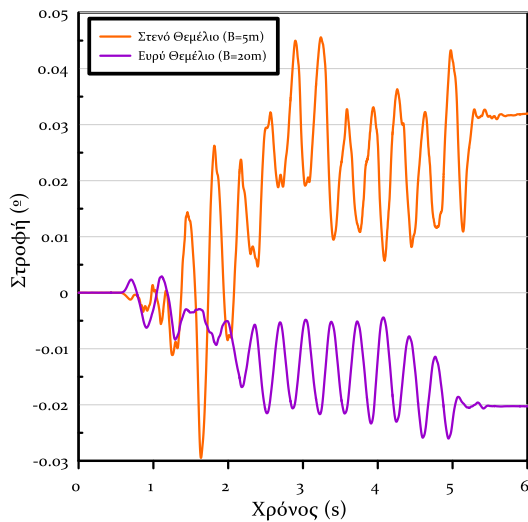
Σχήμα Α.36: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=10m$



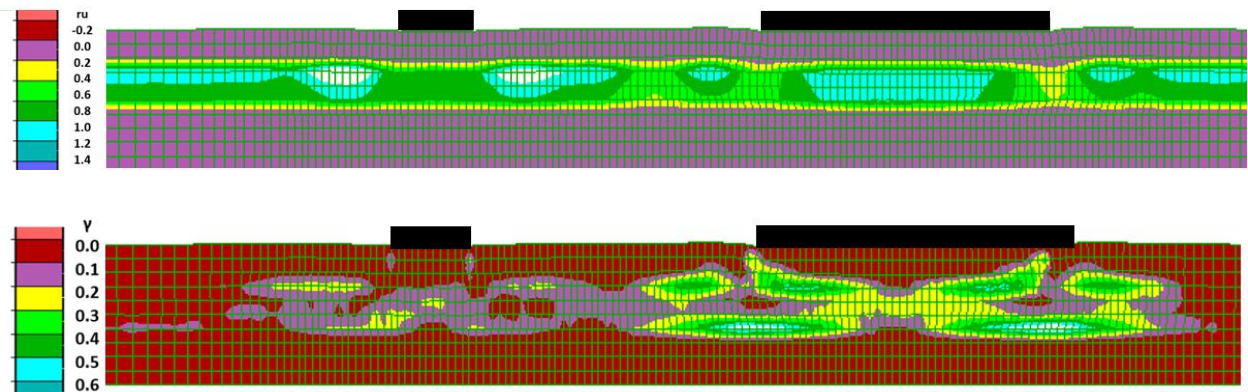
Σχήμα Α.37: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=15m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



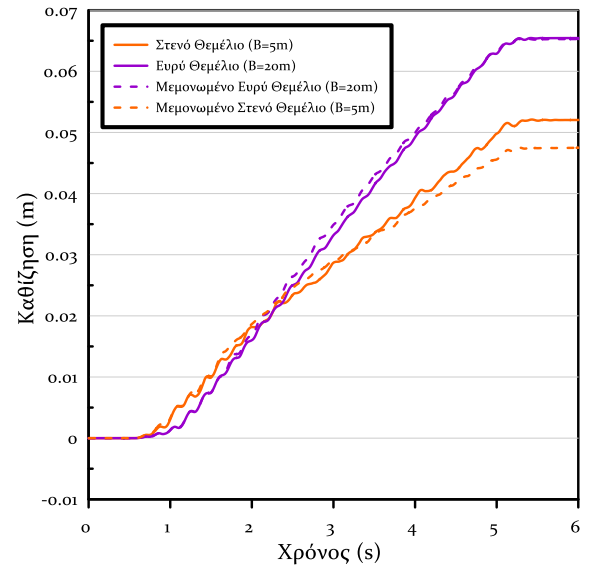
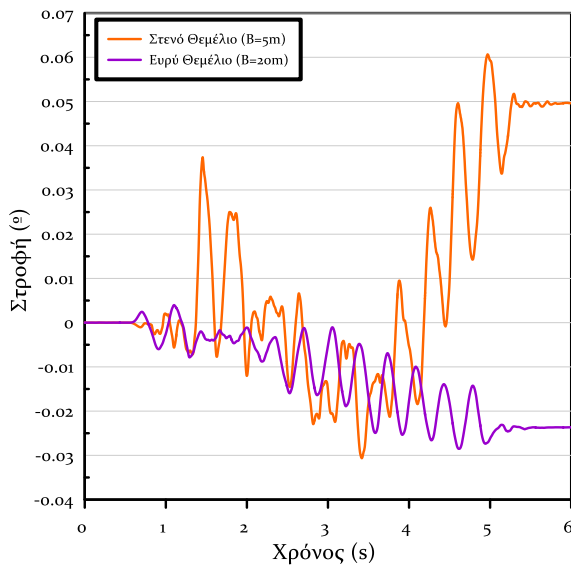
Σχήμα Α.38: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=15m$



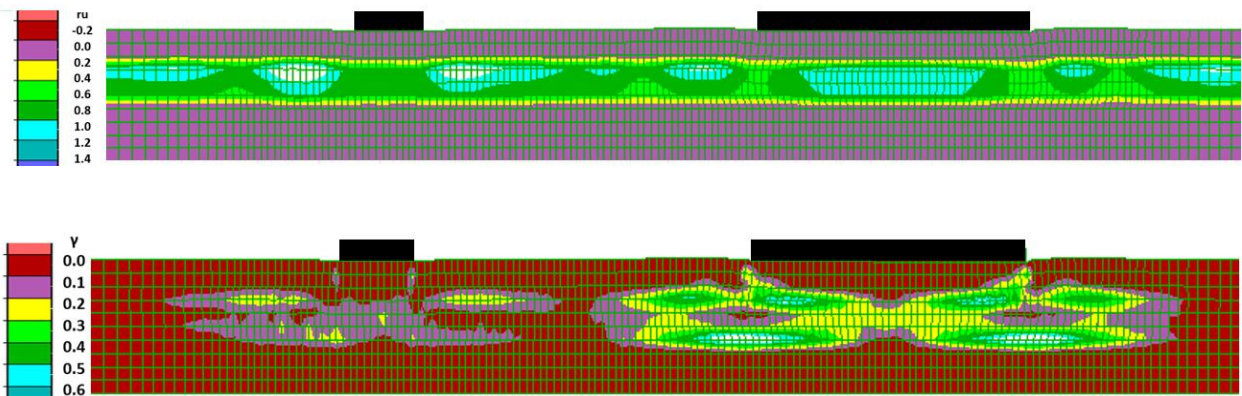
Σχήμα Α.39: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=20m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



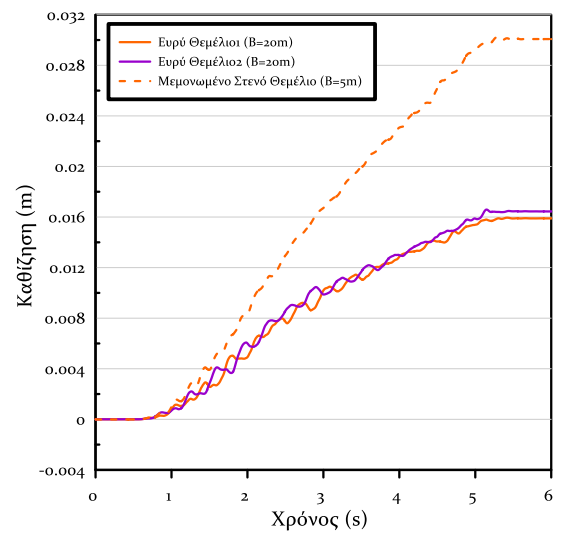
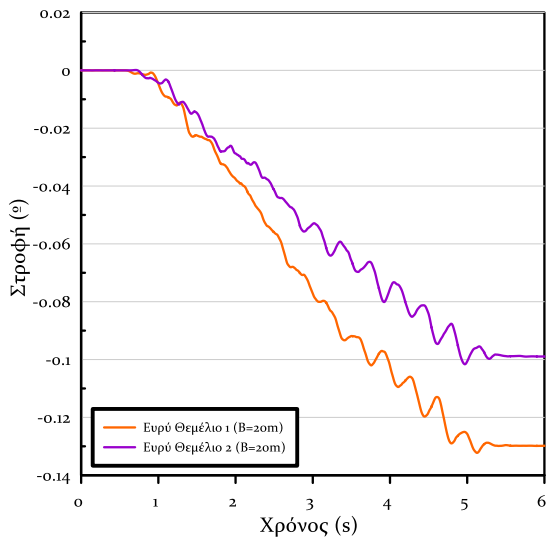
Σχήμα Α.40 Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=20m$



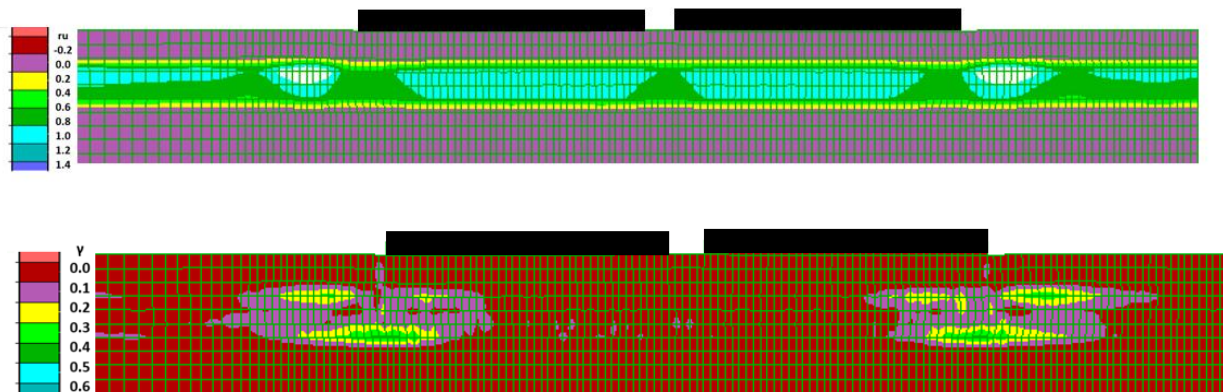
Σχήμα Α.41: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=25m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



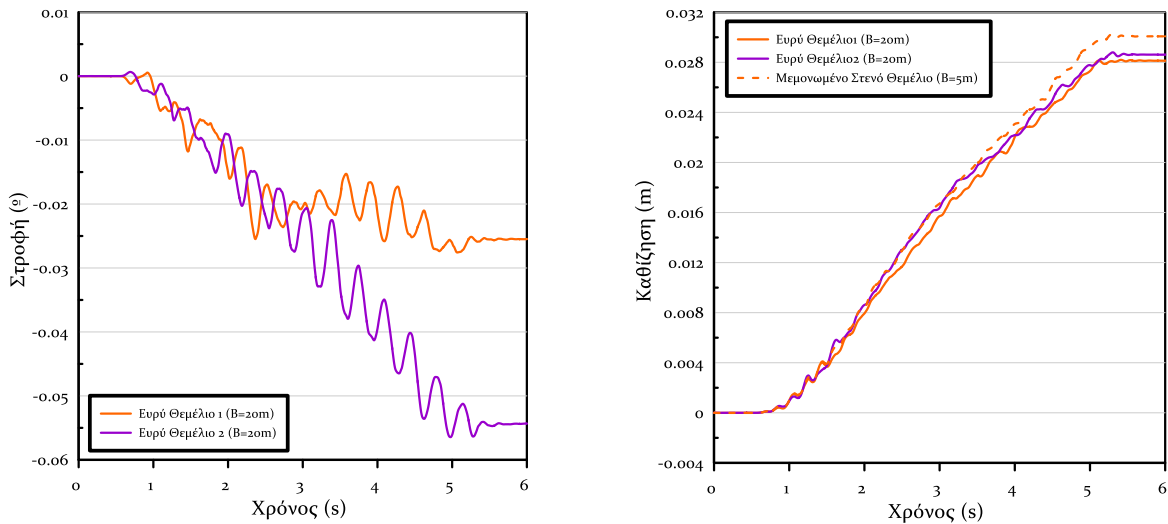
Σχήμα Α.42: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=25m$



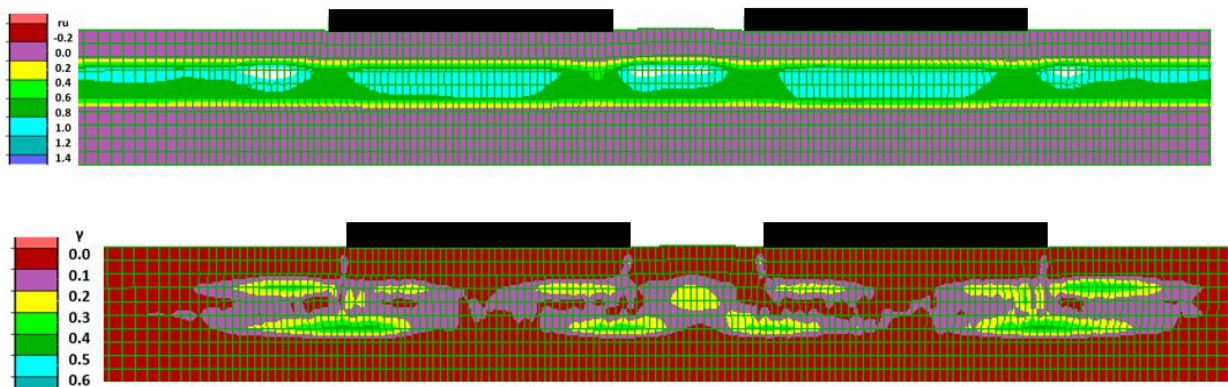
Σχήμα Α.43: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



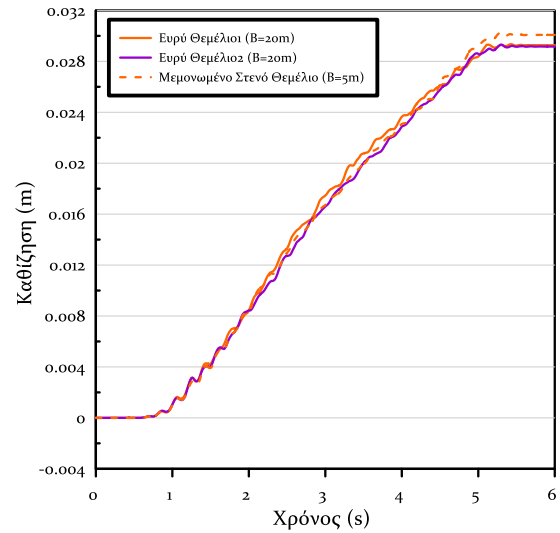
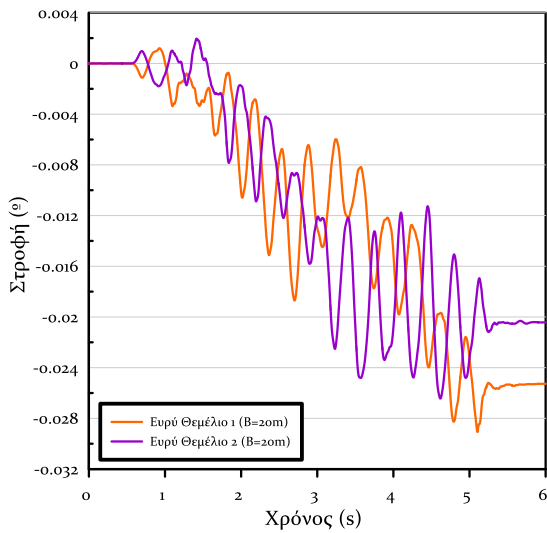
Σχήμα Α.44: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$



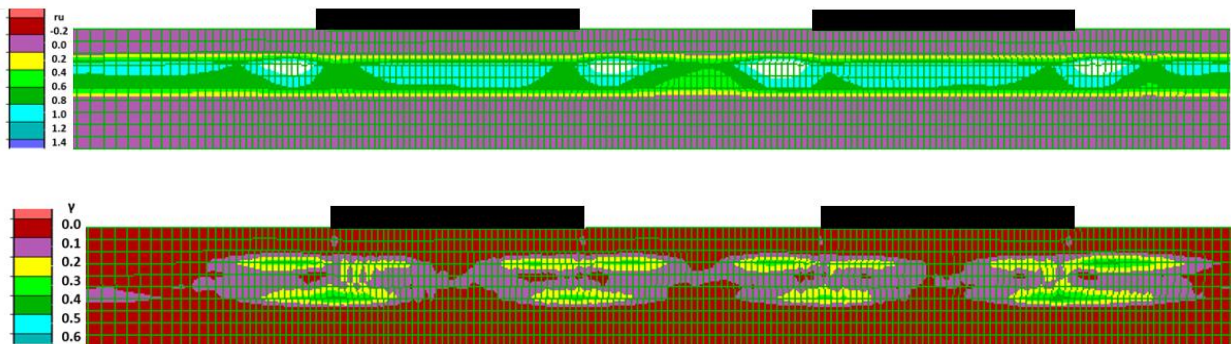
Σχήμα Α.45: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



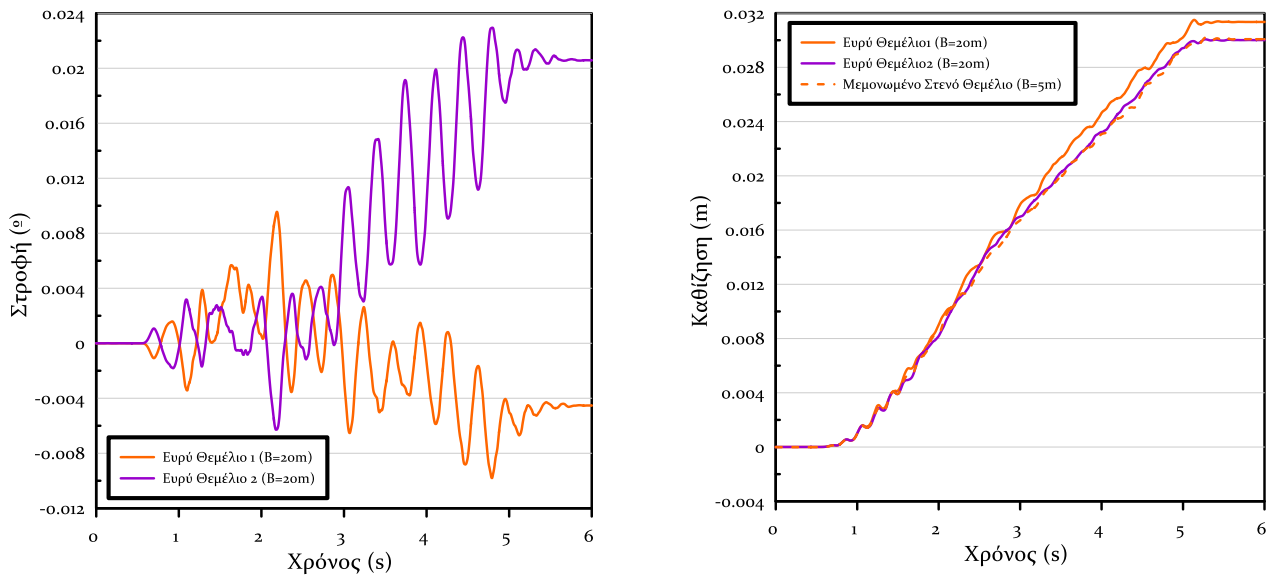
Σχήμα Α.46: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$



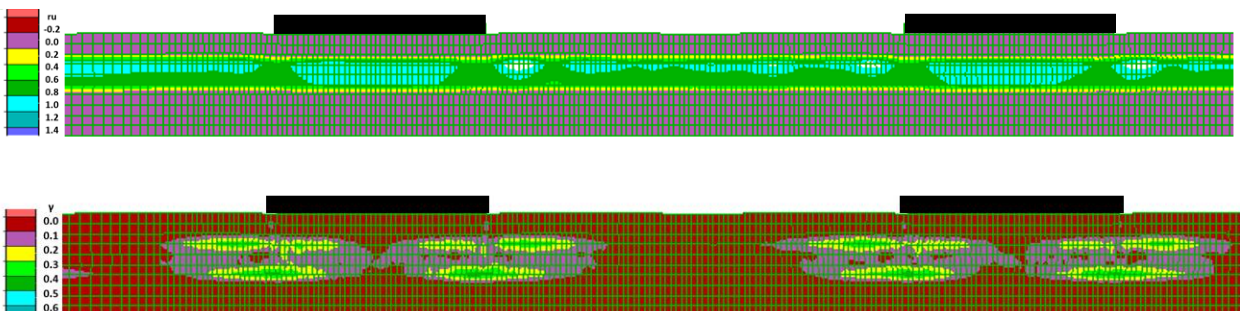
Σχήμα Α.47: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=20m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



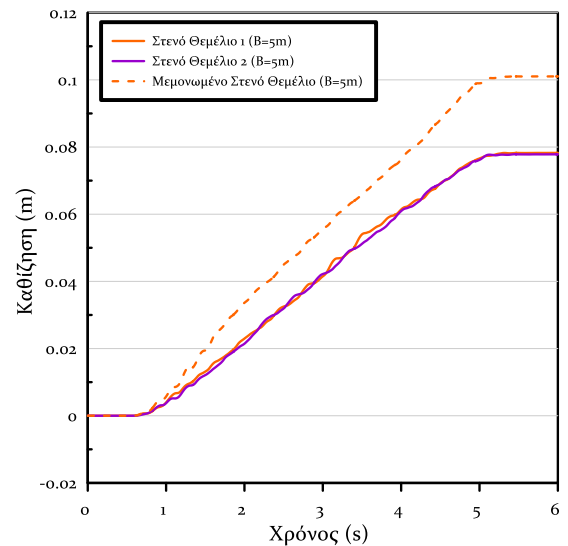
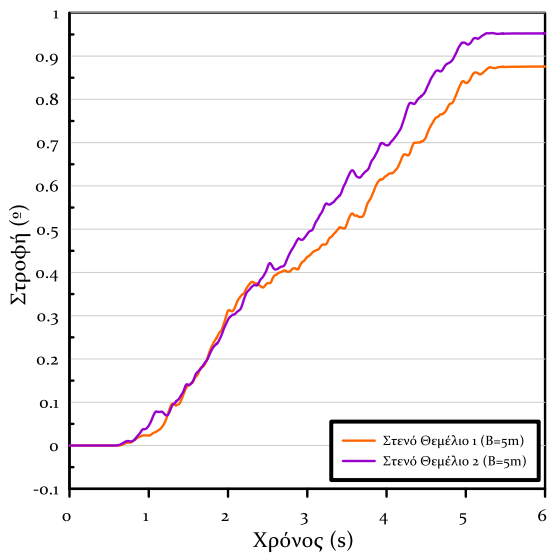
Σχήμα Α.48: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ν_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=20m$



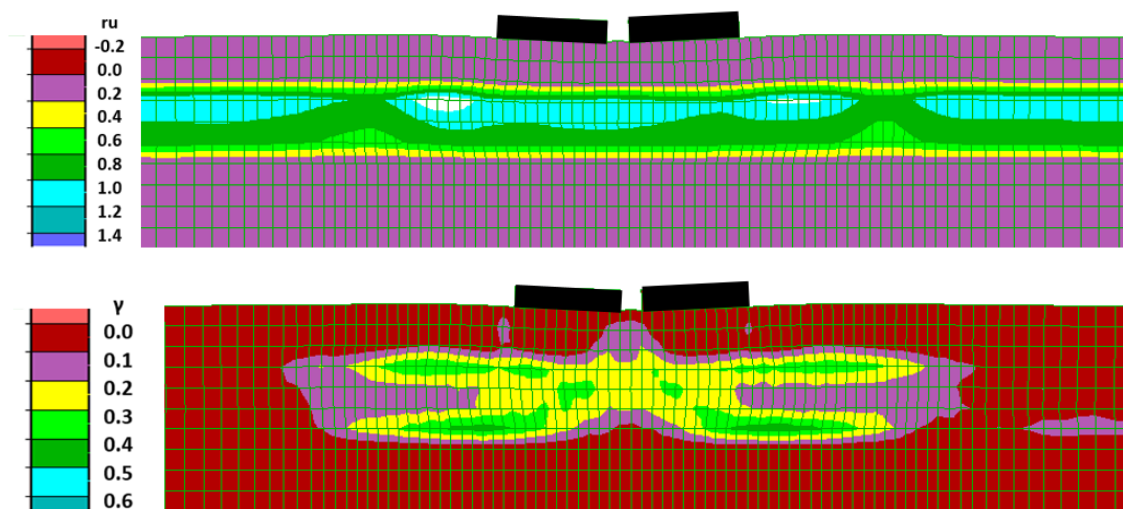
Σχήμα Α.49: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=40m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



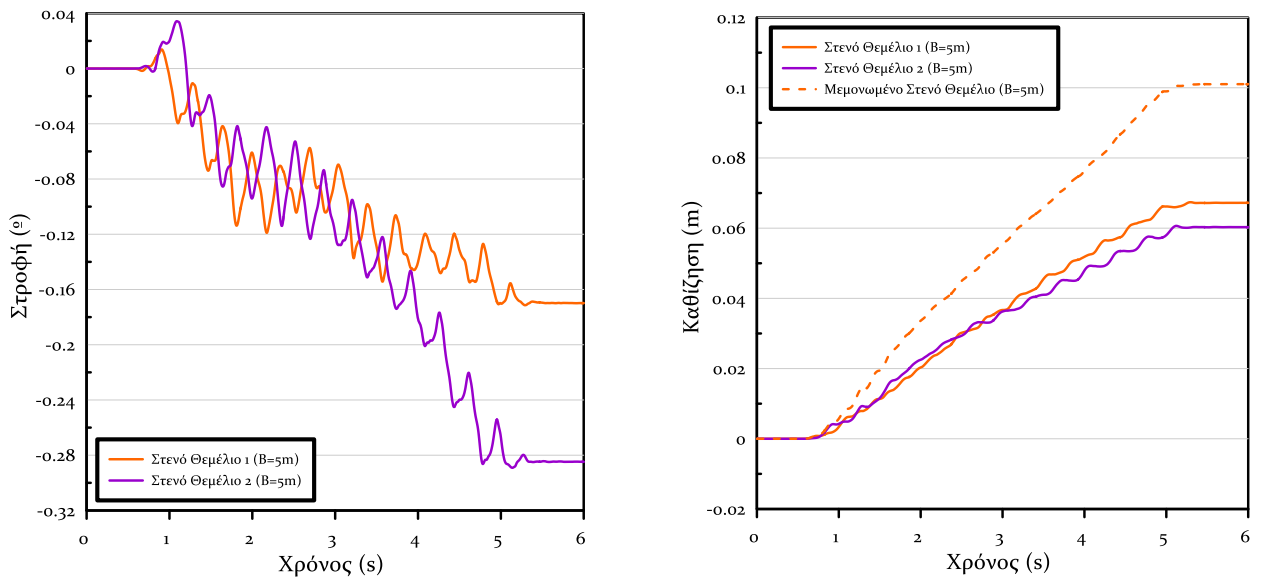
Σχήμα Α.50: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=40m$



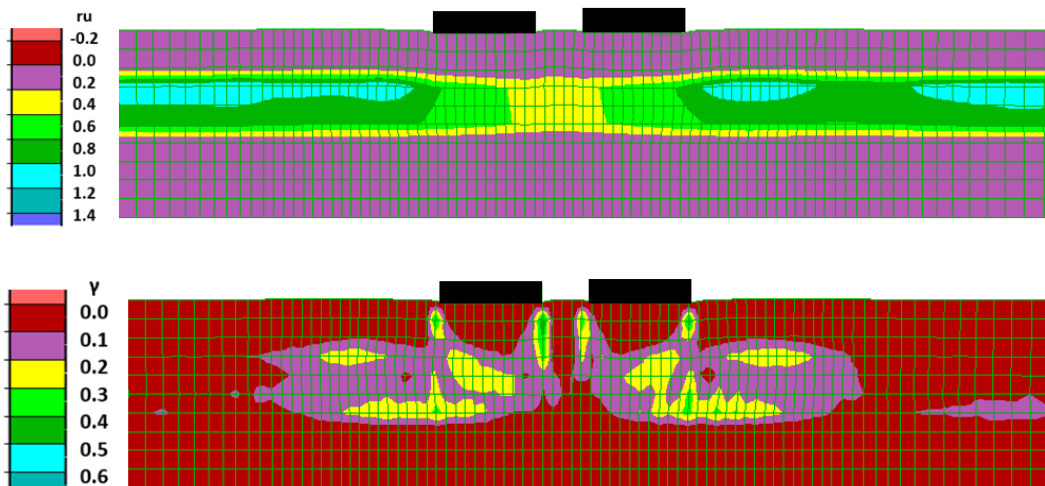
Σχήμα Α.51: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



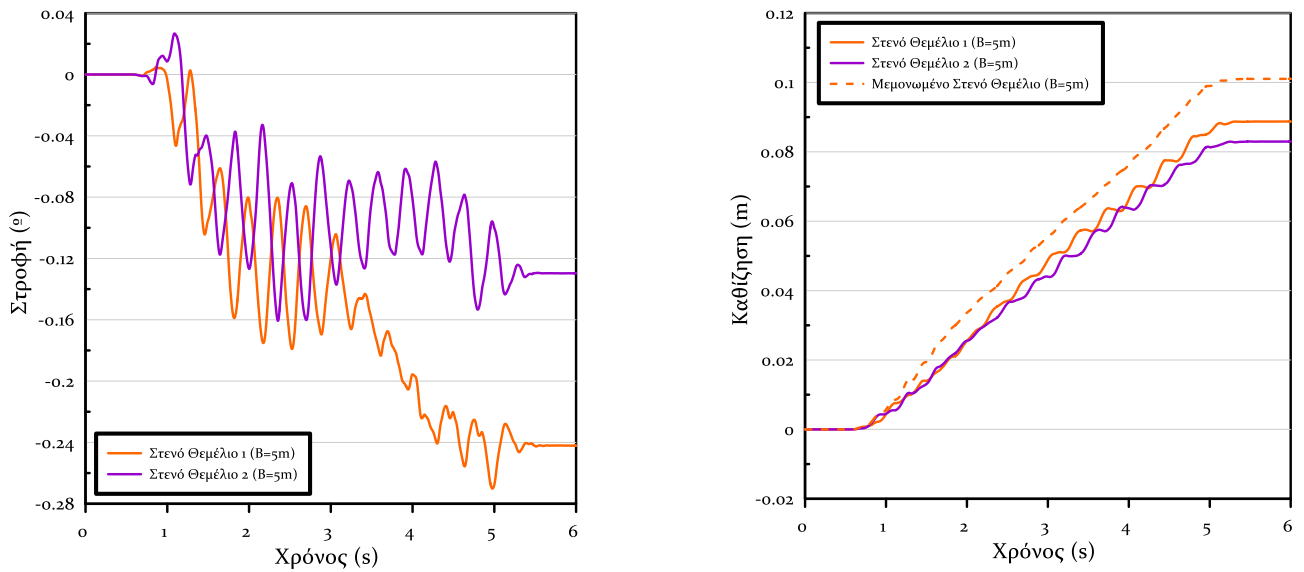
Σχήμα Α.52: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$



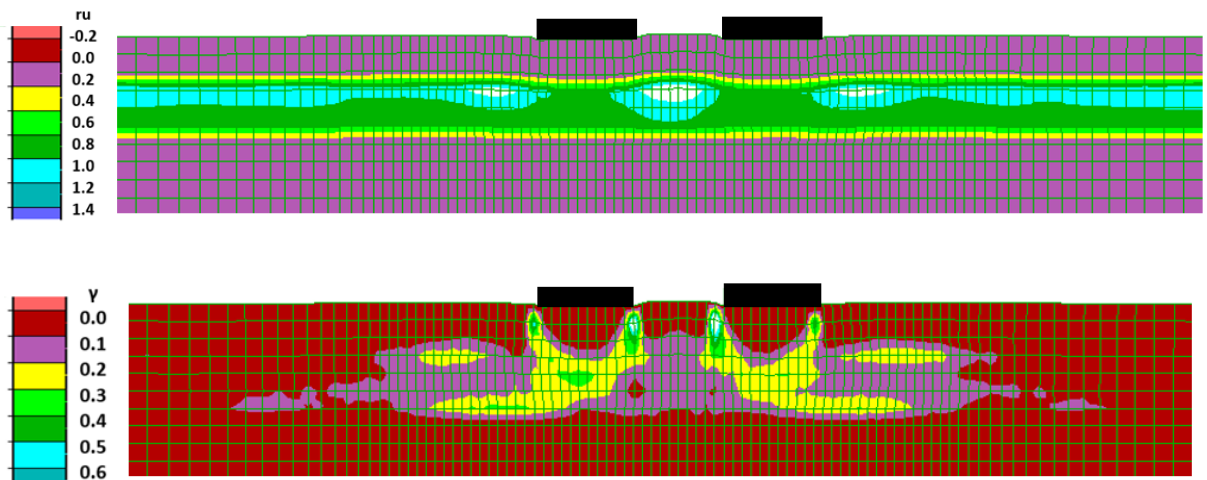
Σχήμα Α.53: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



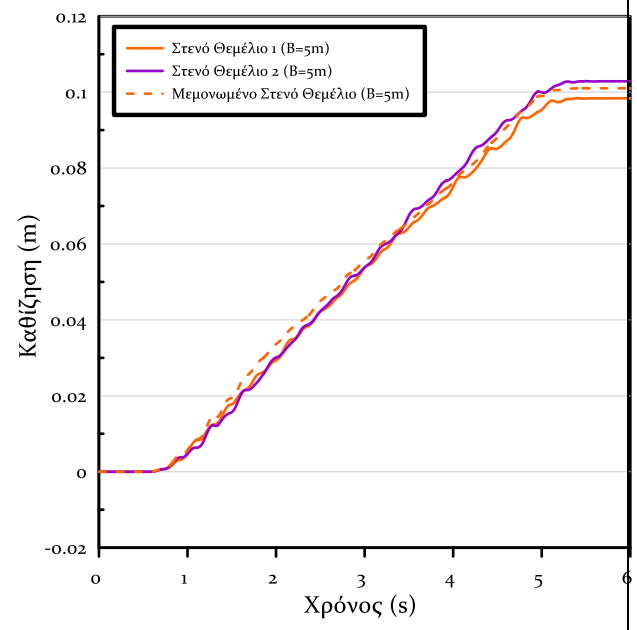
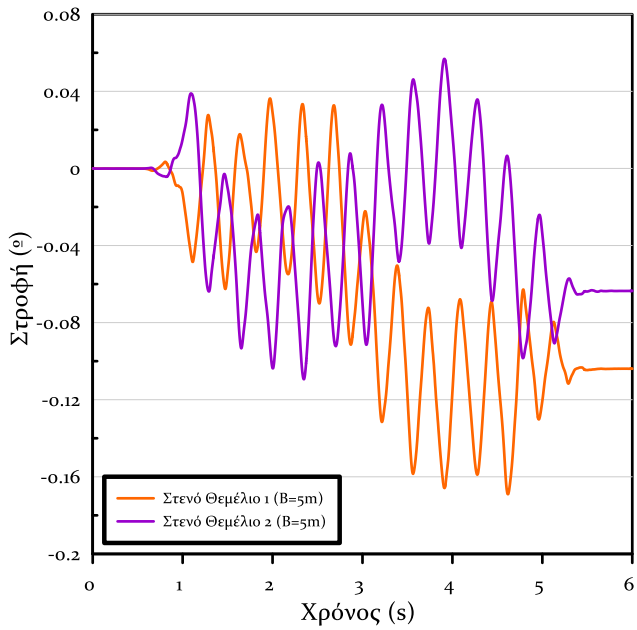
Σχήμα Α.54: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$



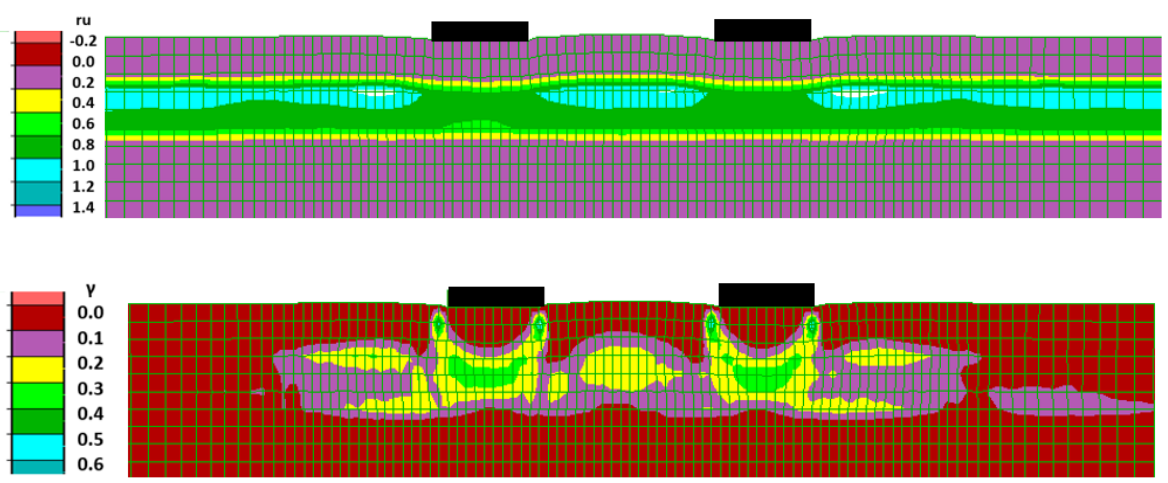
Σχήμα Α.55: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



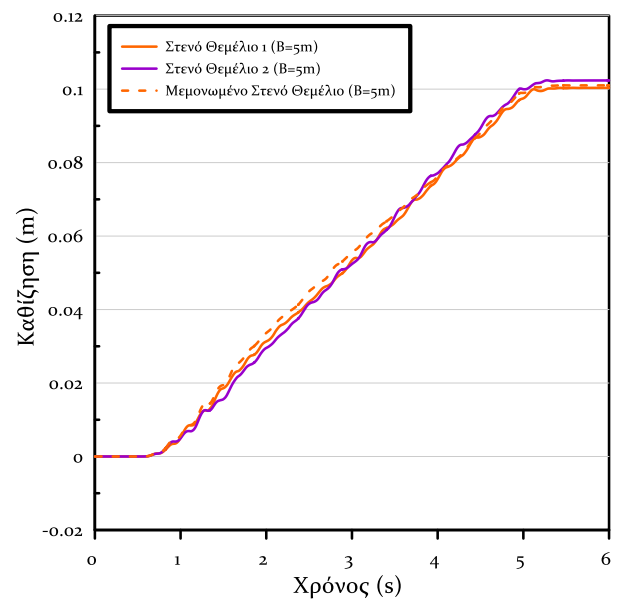
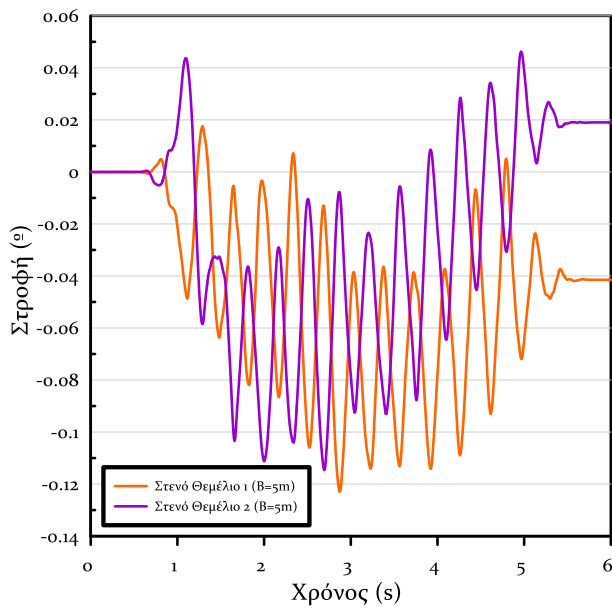
Σχήμα Α.56: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=5m$



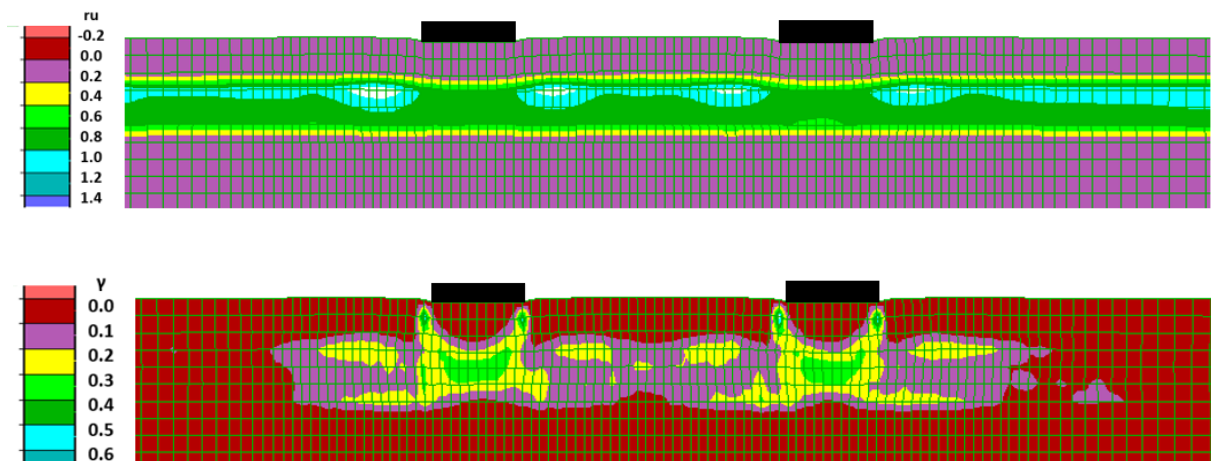
Σχήμα Α.57: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



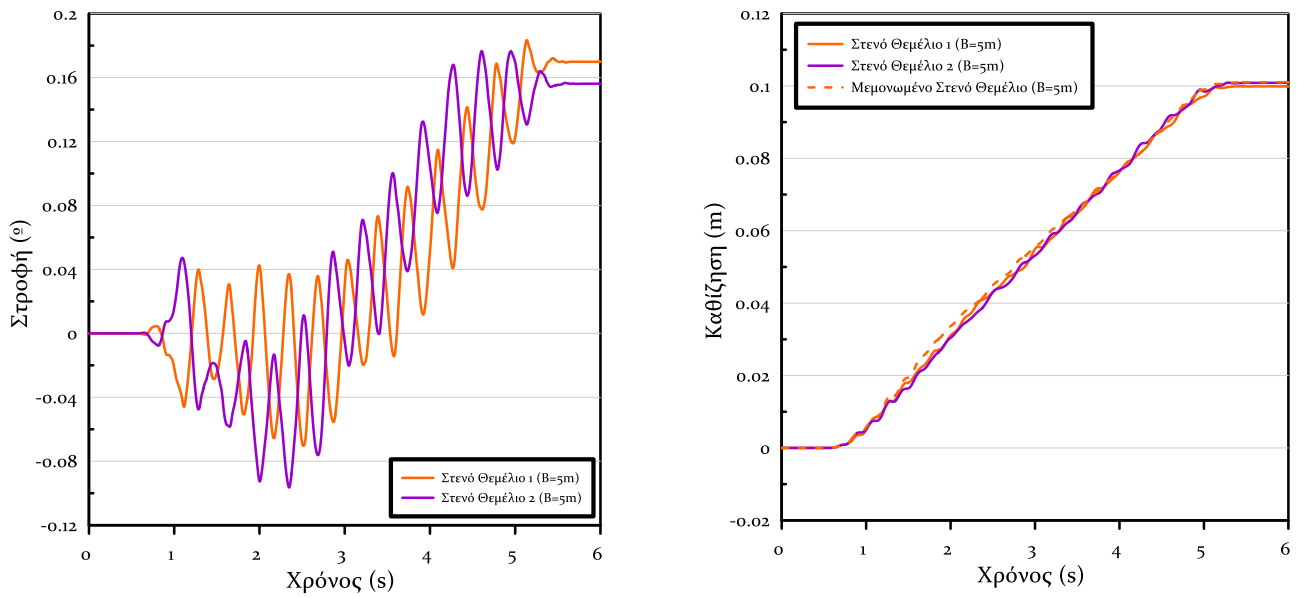
Σχήμα Α.58: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$



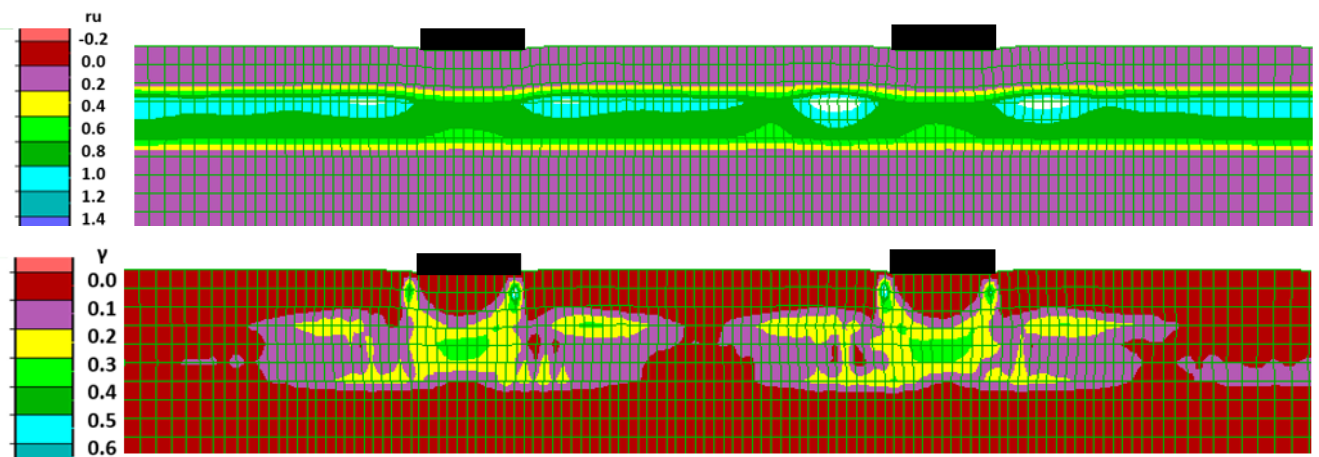
Σχήμα Α.59: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=15m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



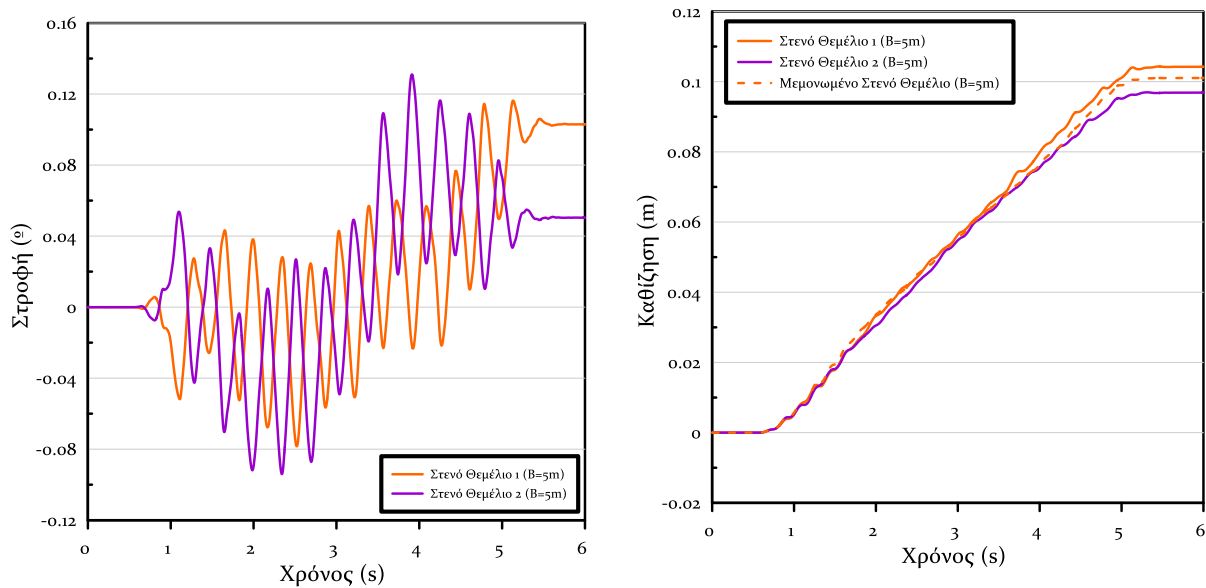
Σχήμα Α.60: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=15m$



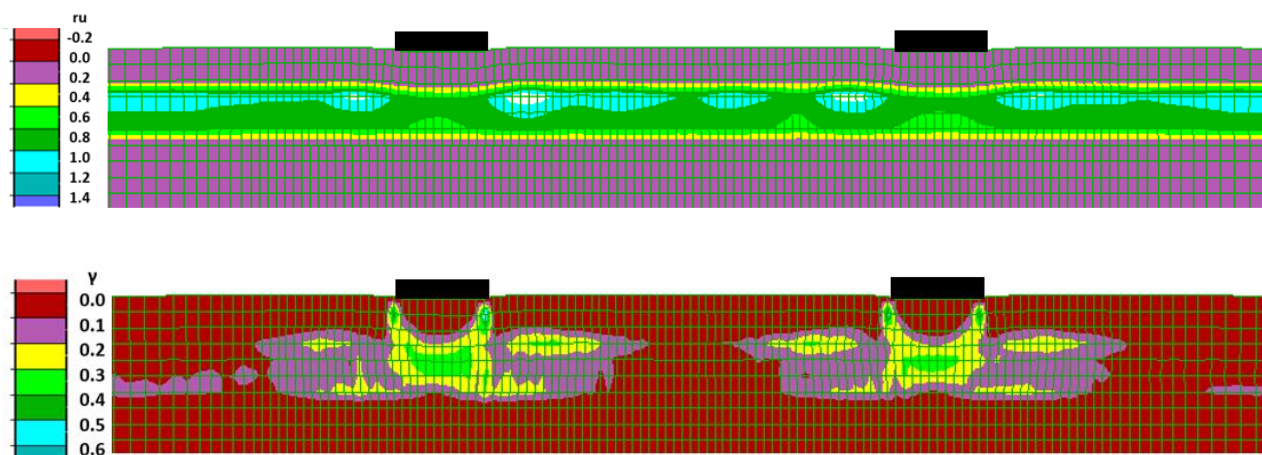
Σχήμα Α.61: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=20m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



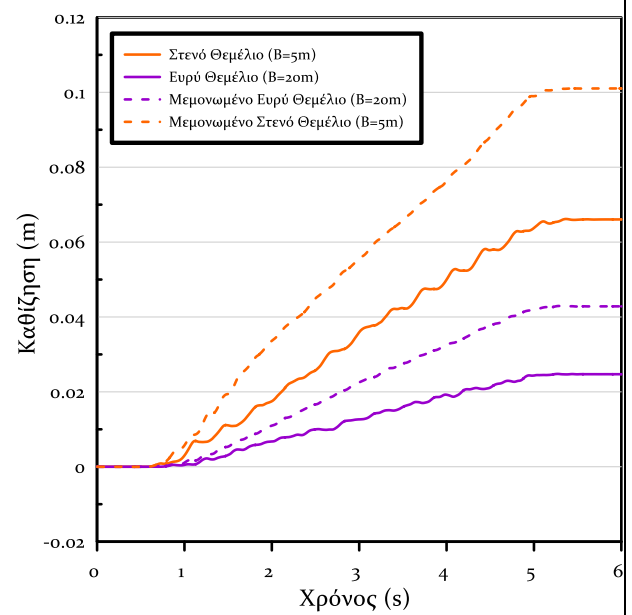
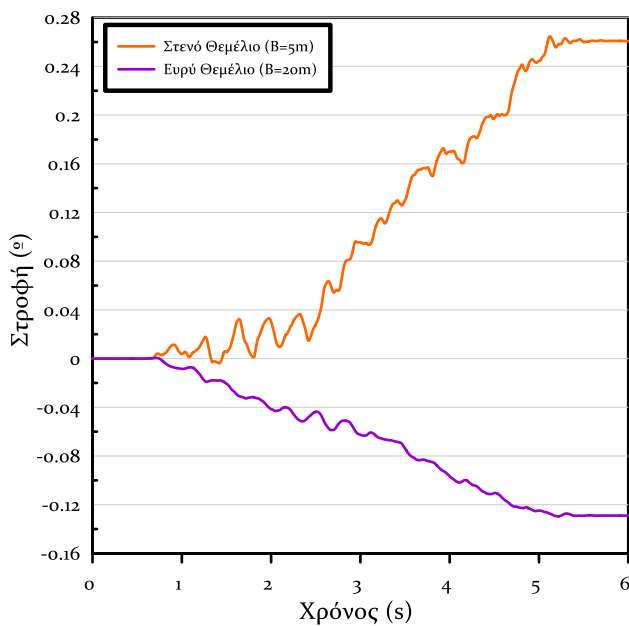
Σχήμα Α.62: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=20m$



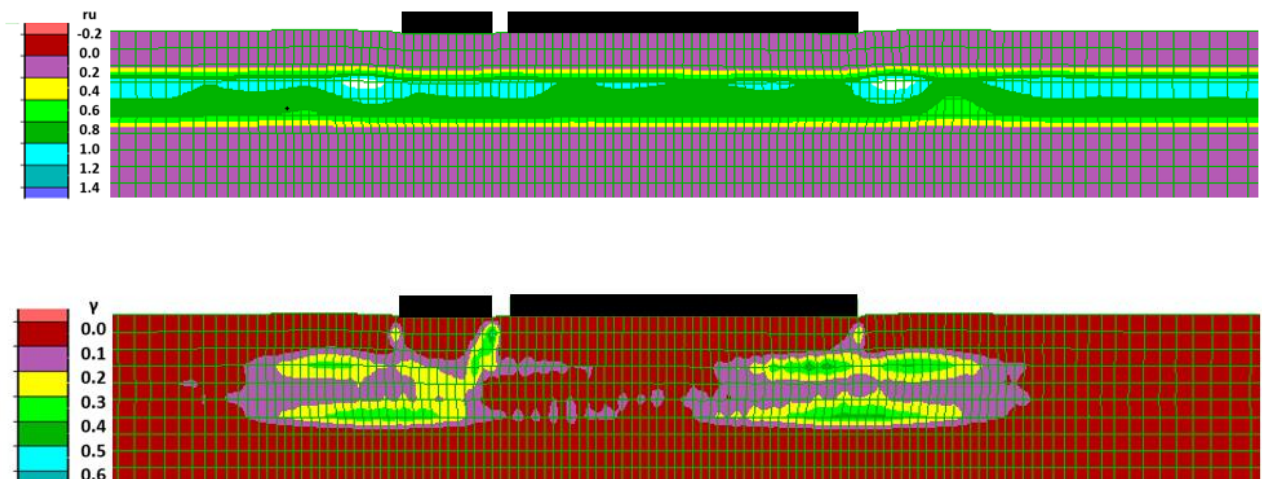
Σχήμα Α.63: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=25m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



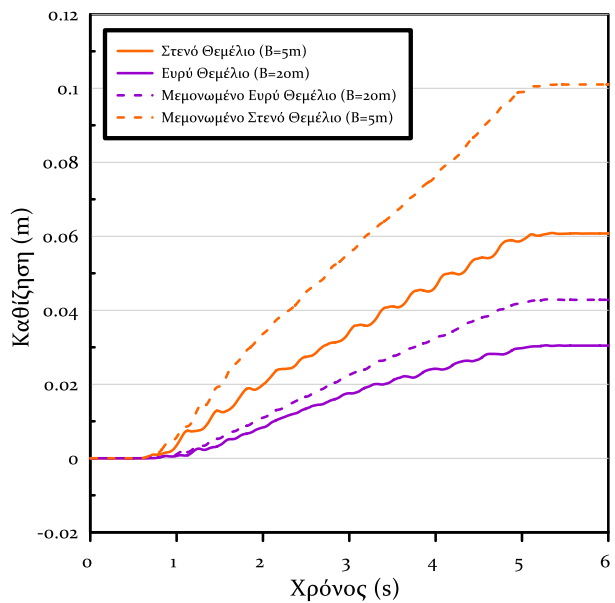
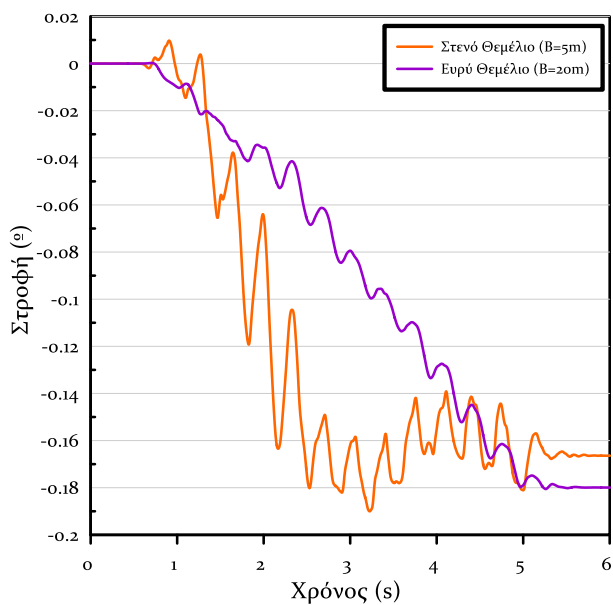
Σχήμα Α.64: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=25m$



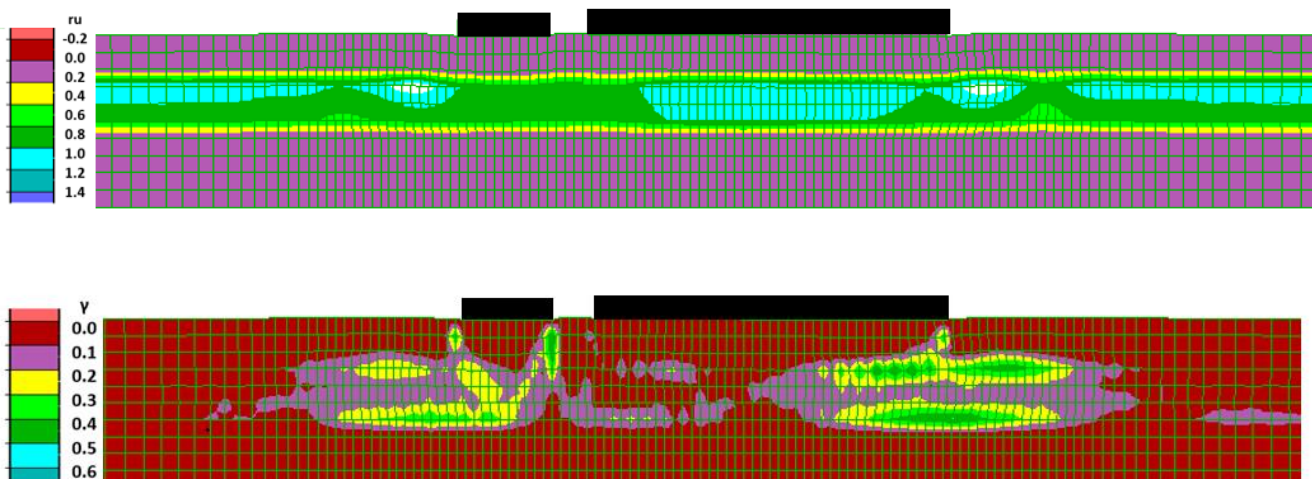
Σχήμα Α.65: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



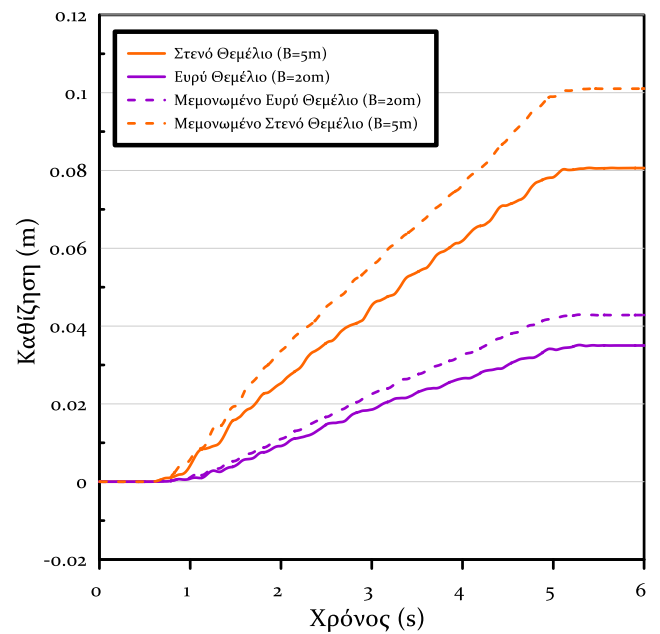
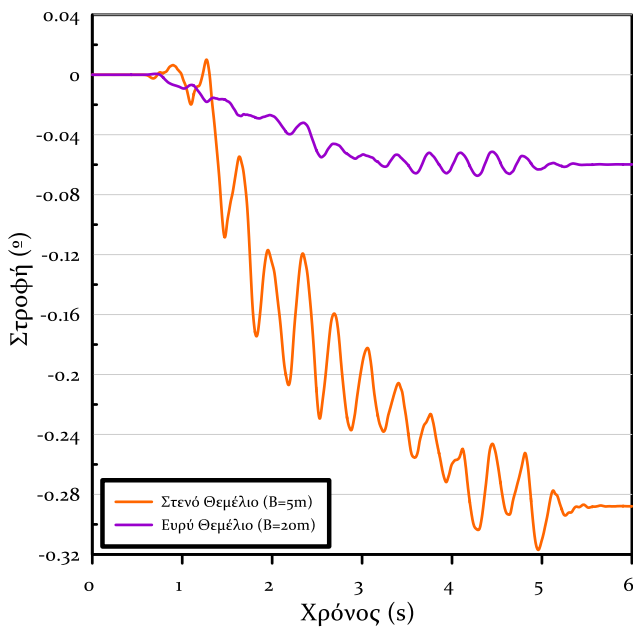
Σχήμα Α.66: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$.



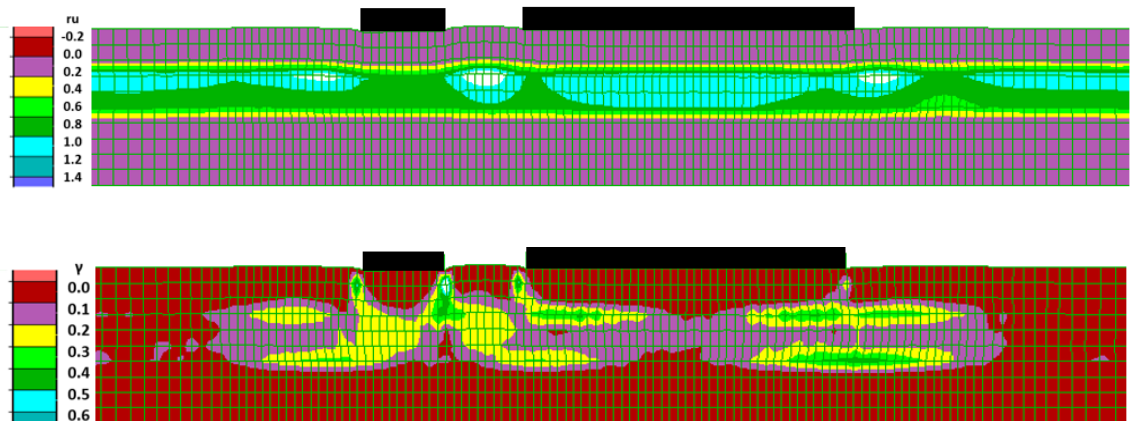
Σχήμα A.67: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



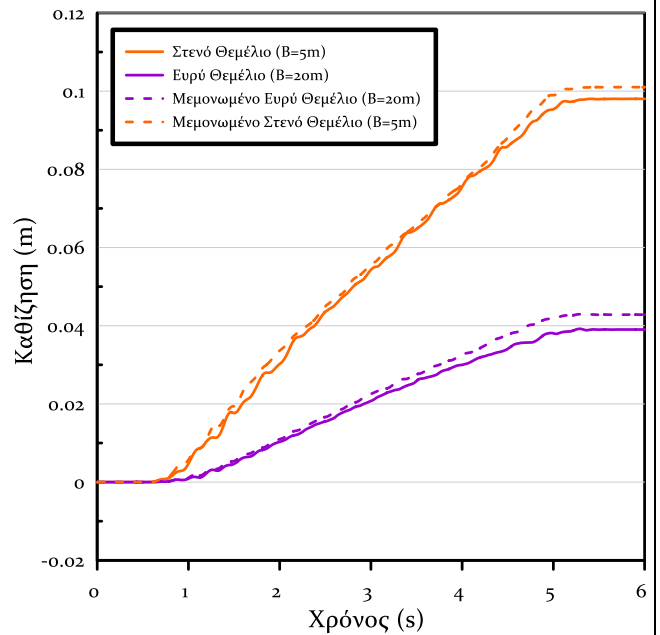
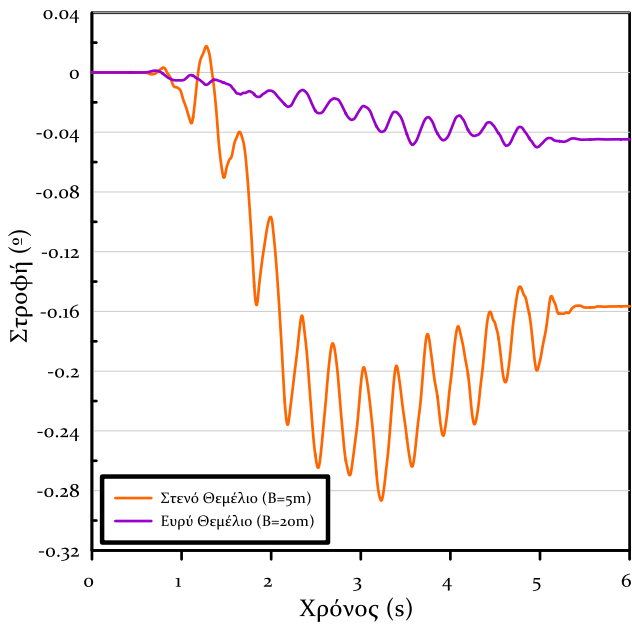
Σχήμα A.68: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$.



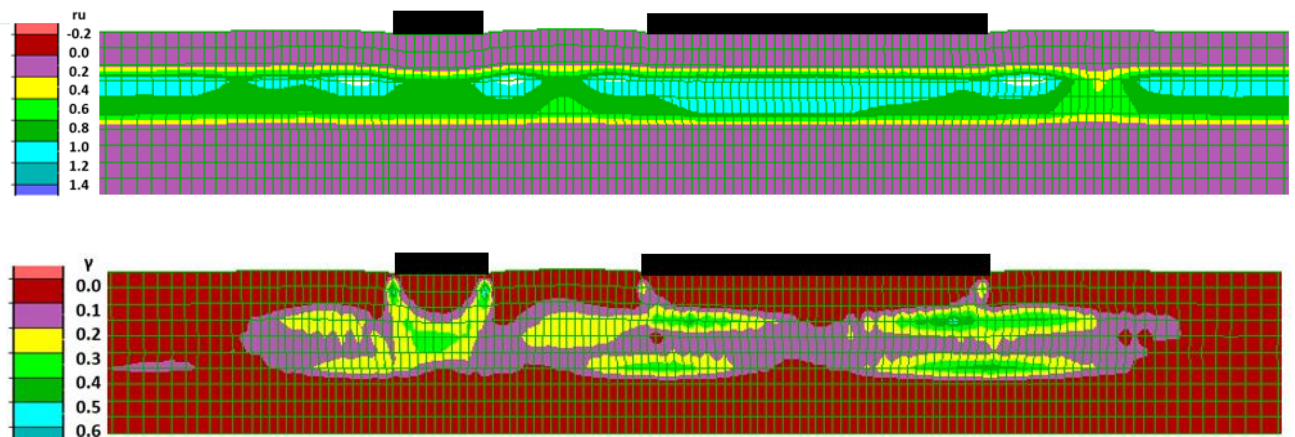
Σχήμα Α.69: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



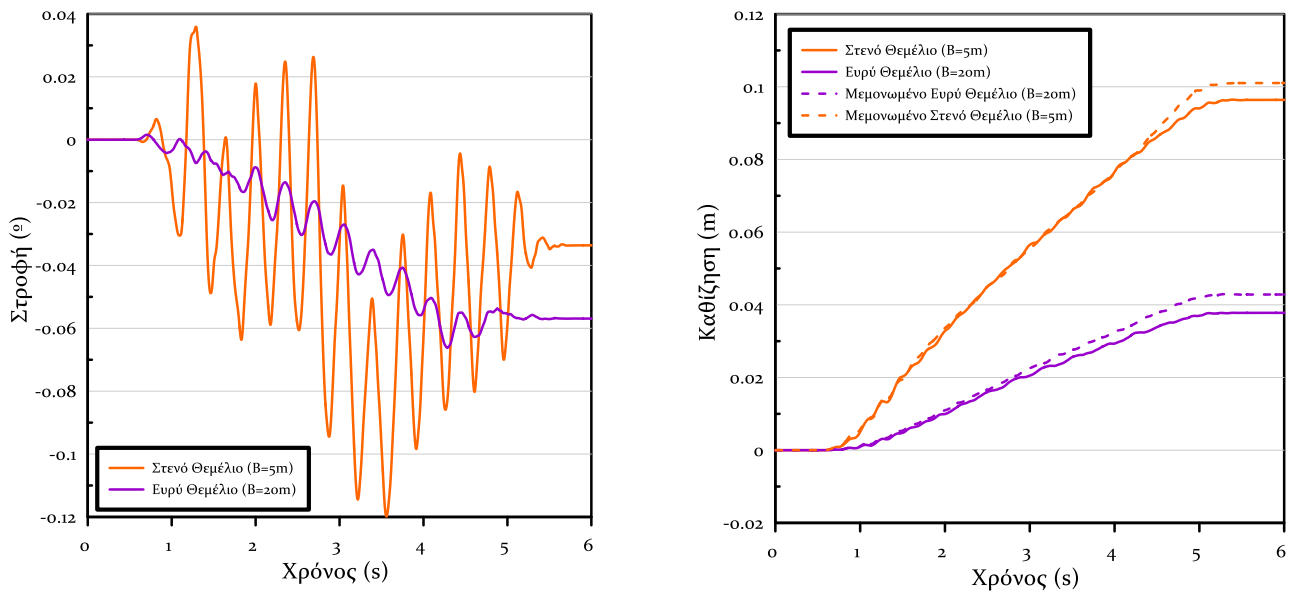
Σχήμα Α.70: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=5m$.



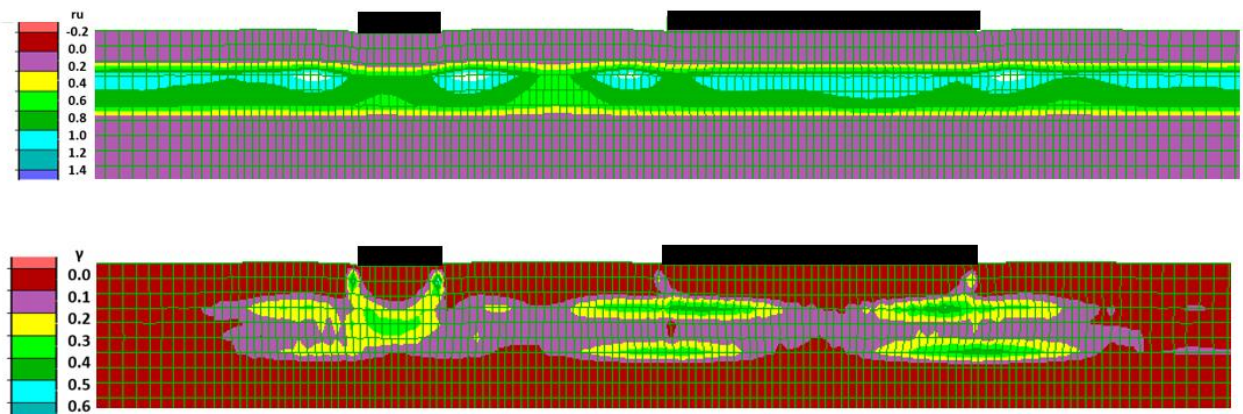
Σχήμα Α.71: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



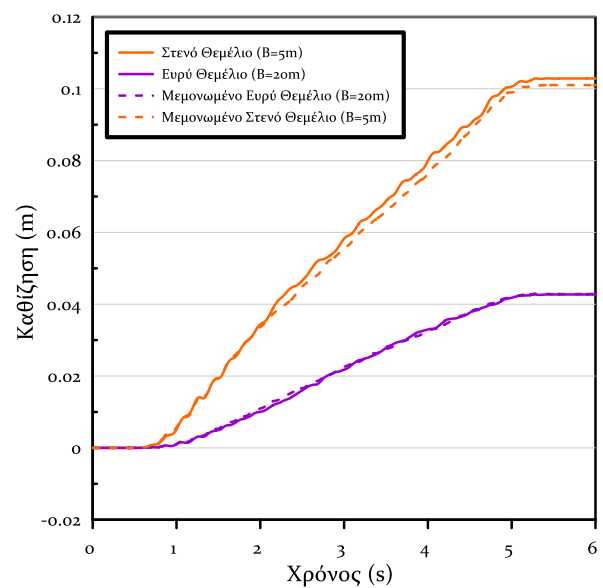
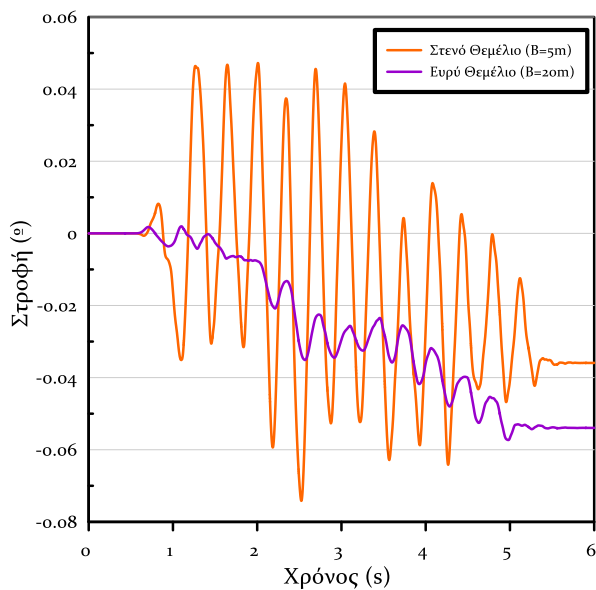
Σχήμα Α.72: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$.



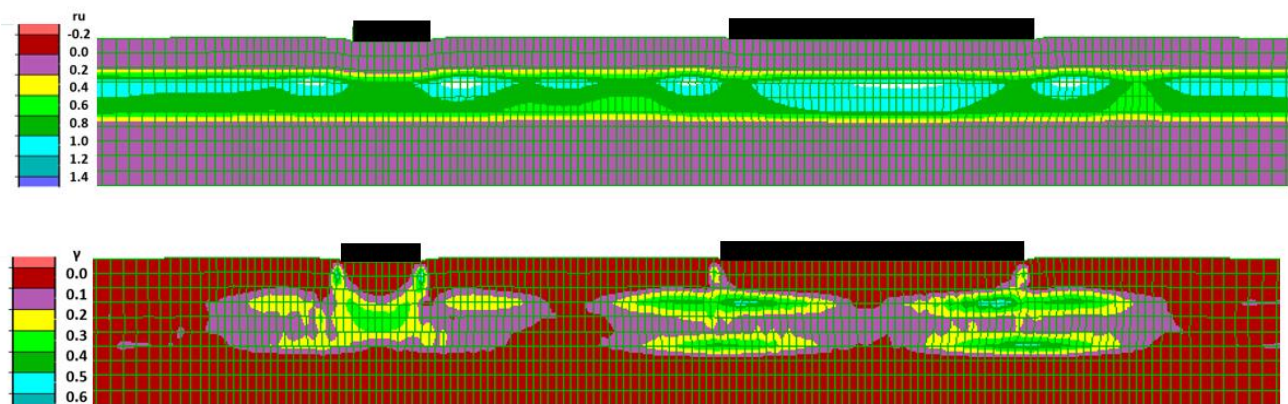
Σχήμα Α.73: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 15m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



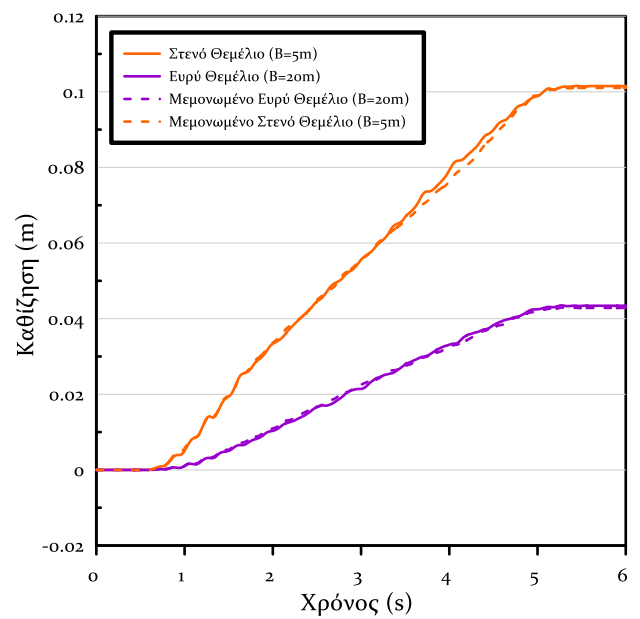
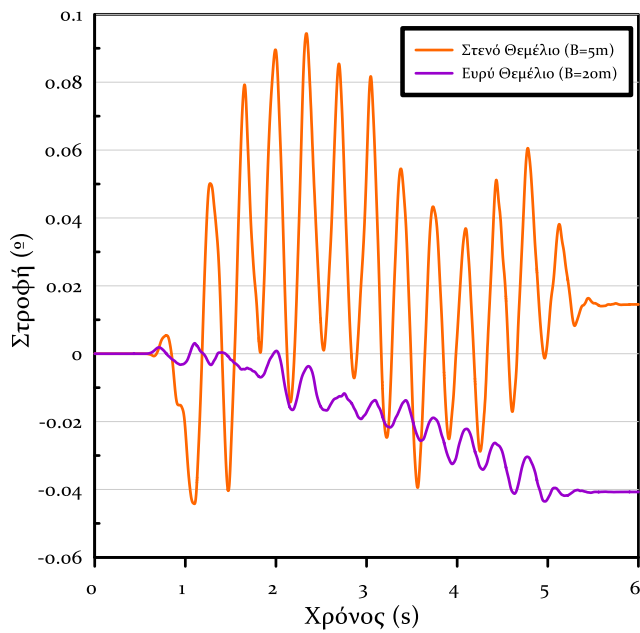
Σχήμα Α.74: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=15m$.



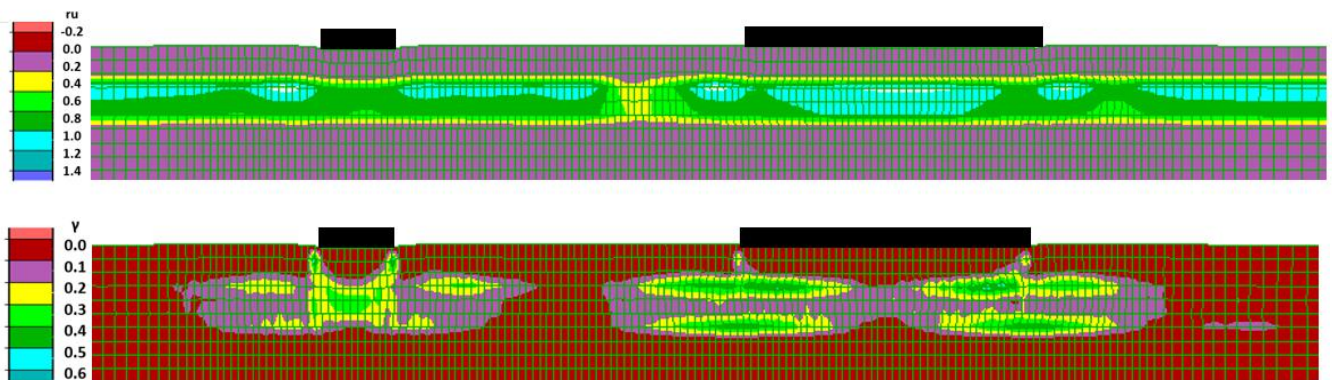
Σχήμα Α.75: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 20m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



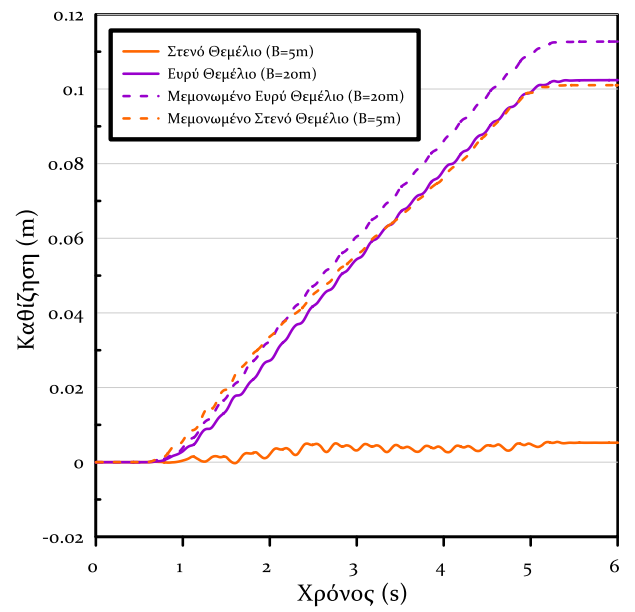
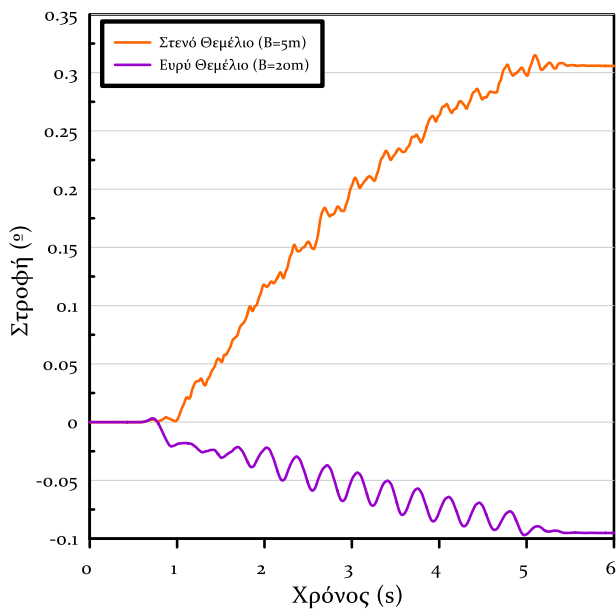
Σχήμα Α.76: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=20m$.



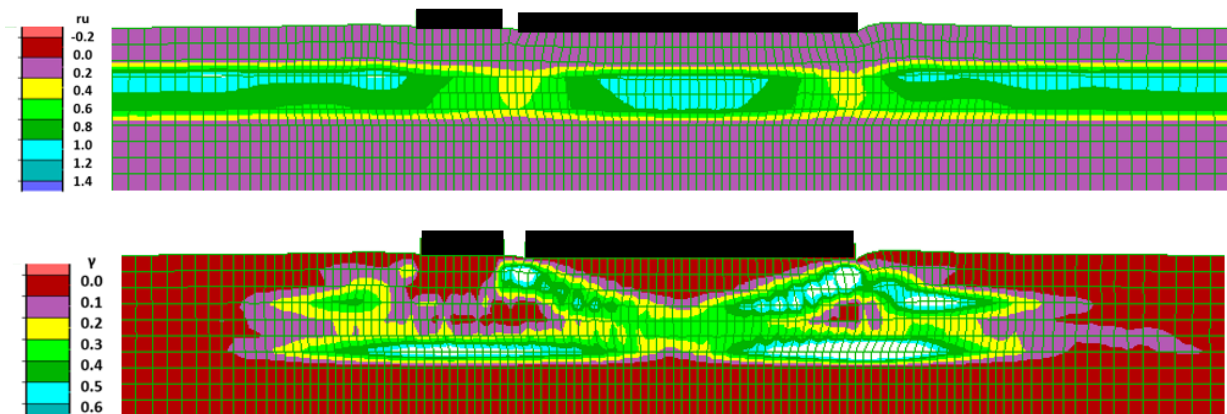
Σχήμα Α.77: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 25m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



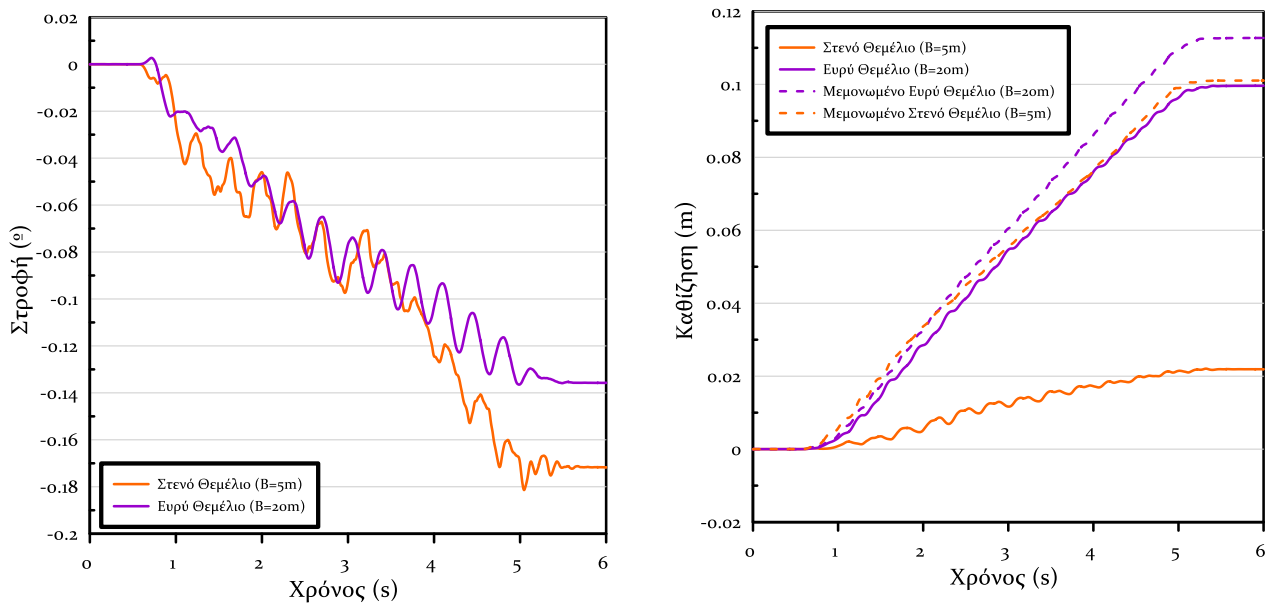
Σχήμα Α.78: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=25m$.



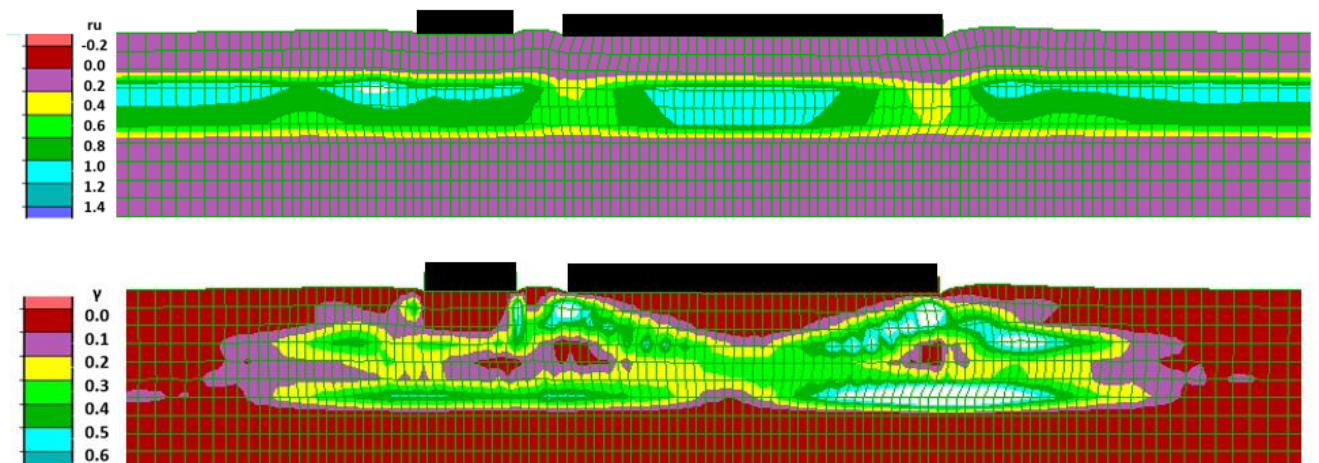
Σχήμα Α.79: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



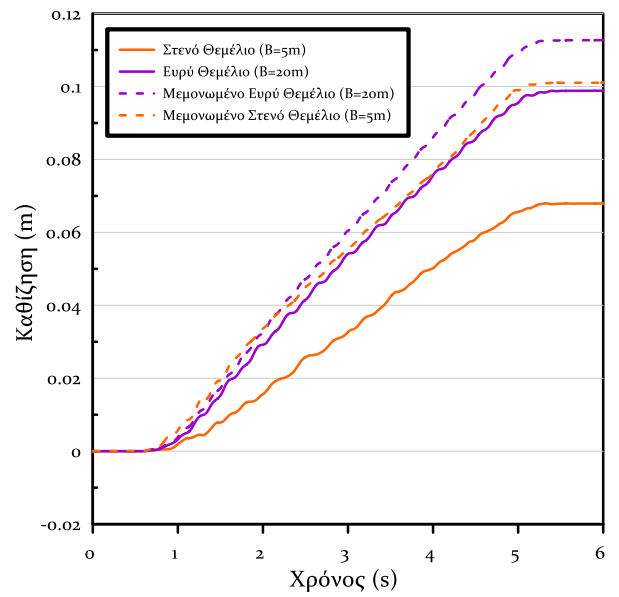
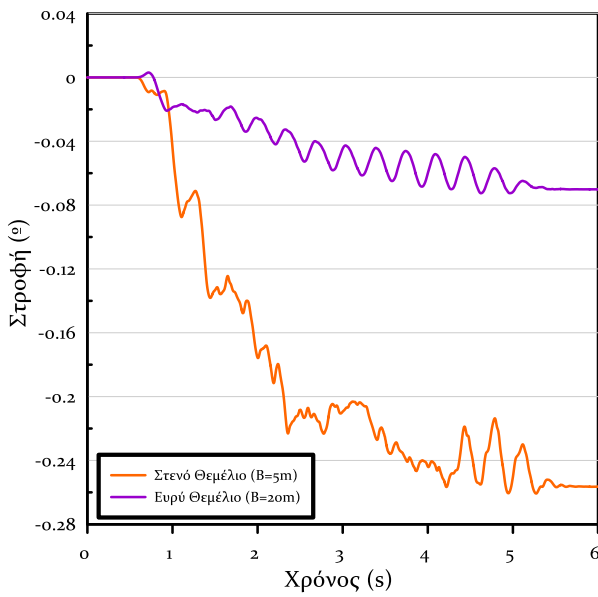
Σχήμα Α.80: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 1m$



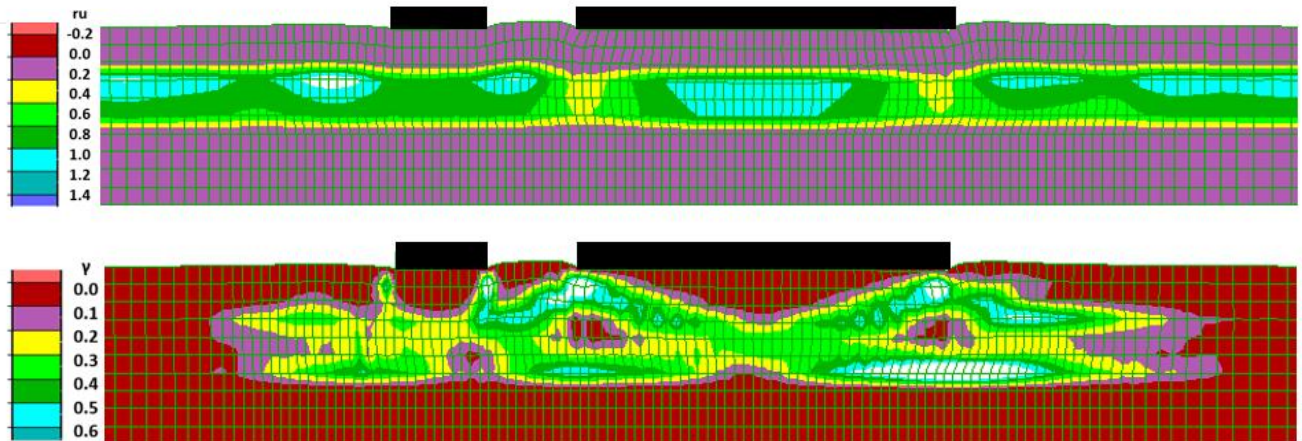
Σχήμα Α.81: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



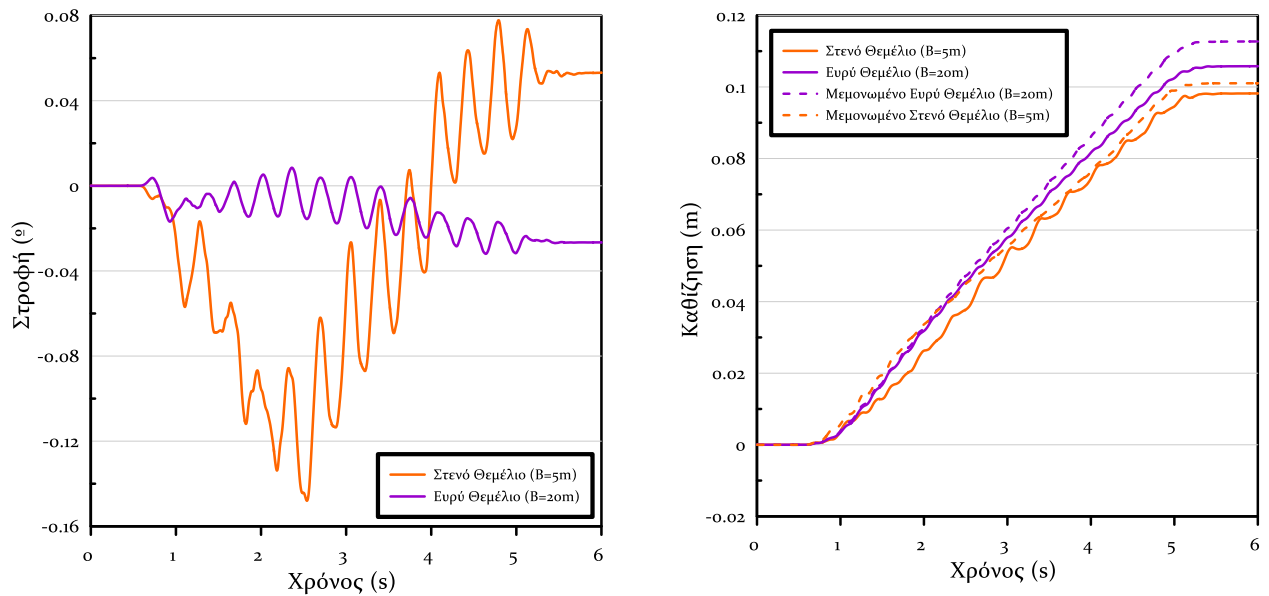
Σχήμα Α.82: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 2.5m$



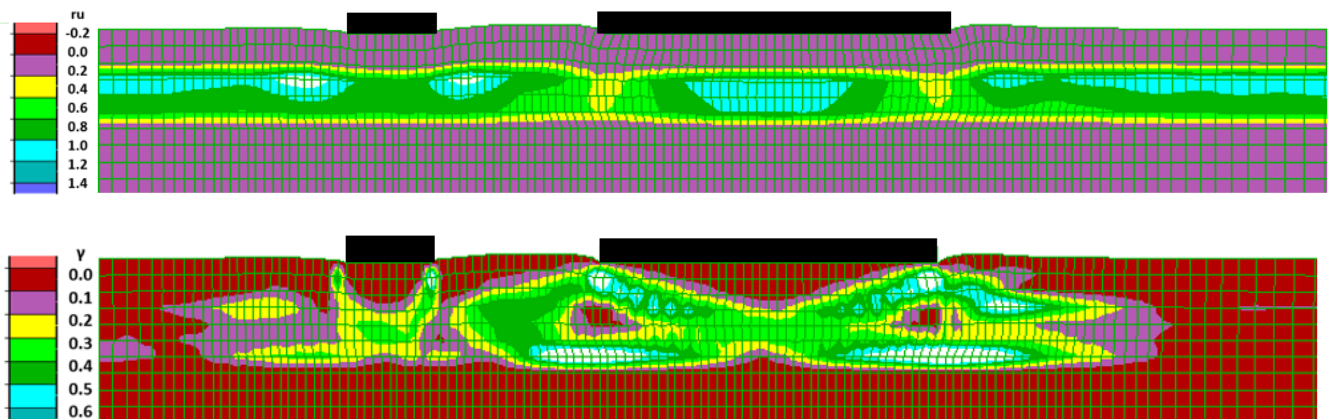
Σχήμα Α.83: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



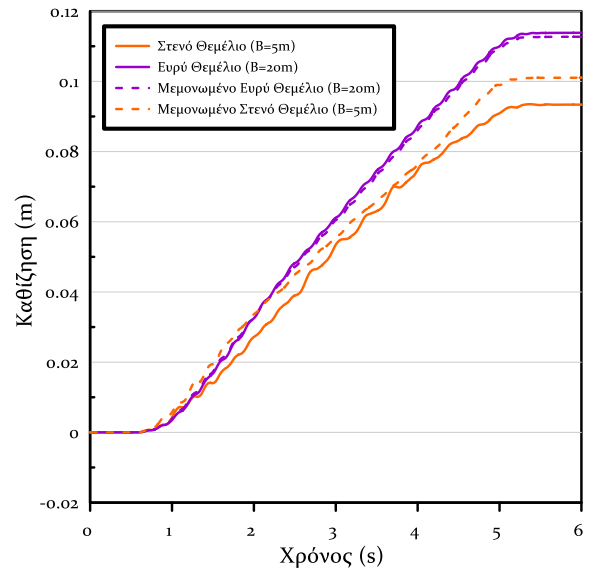
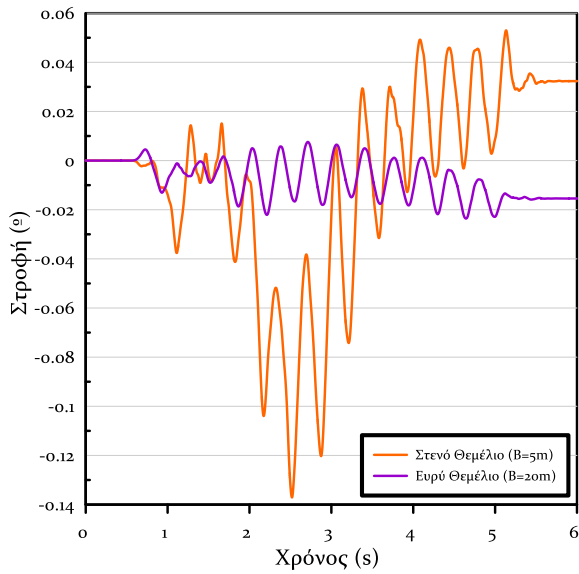
Σχήμα Α.84: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 5m$



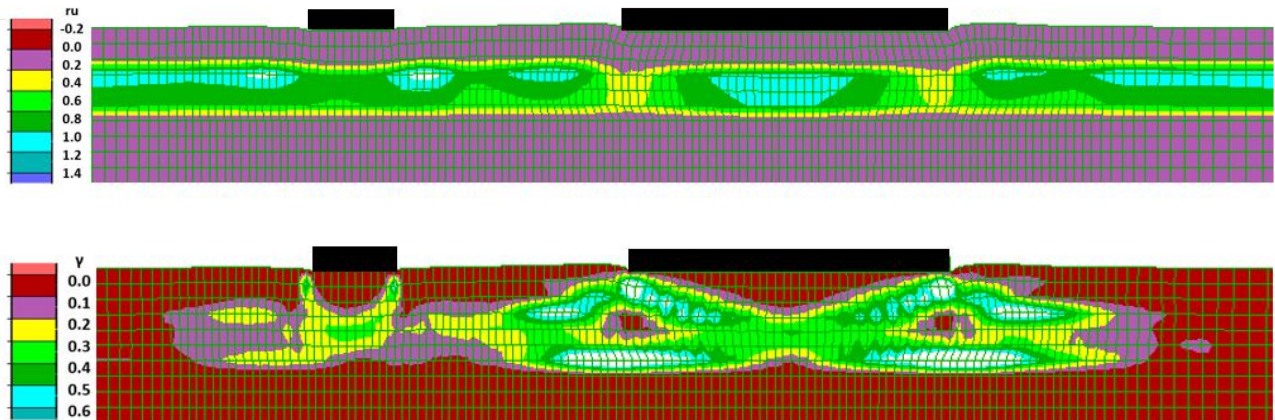
Σχήμα Α.85: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



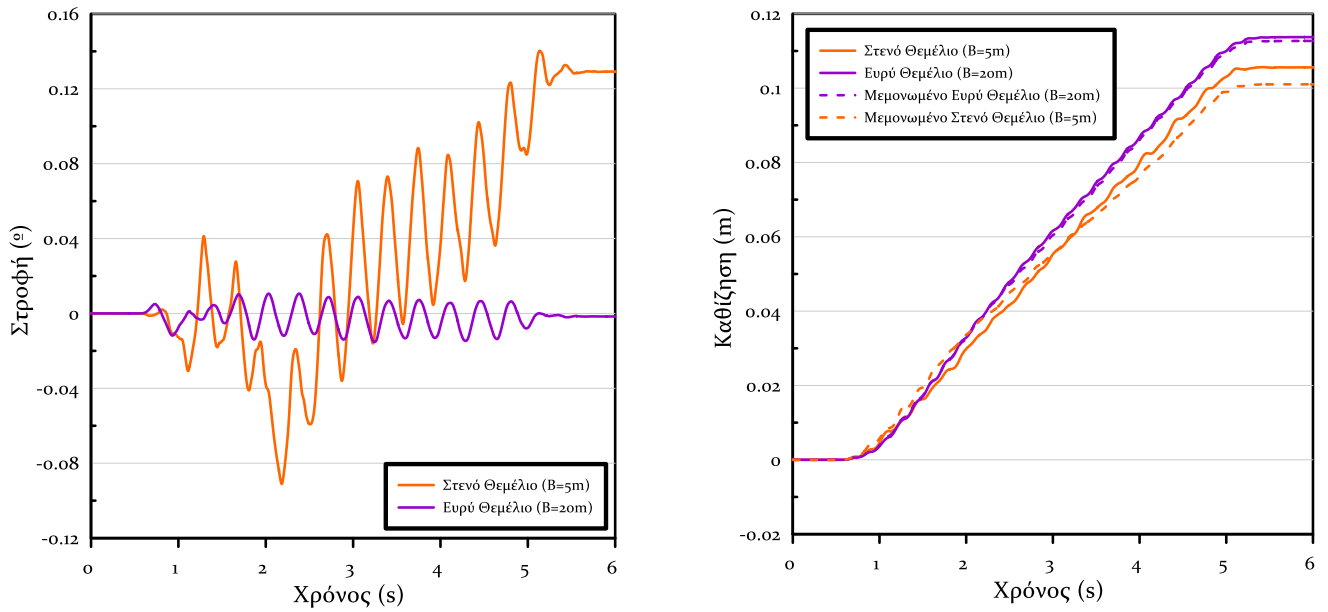
Σχήμα Α.86: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 10m$



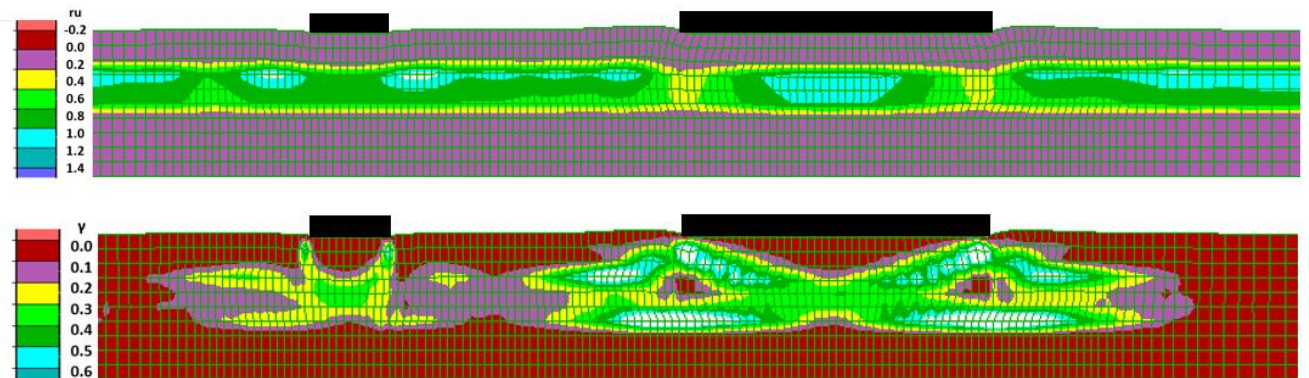
Σχήμα A.87: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 15m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



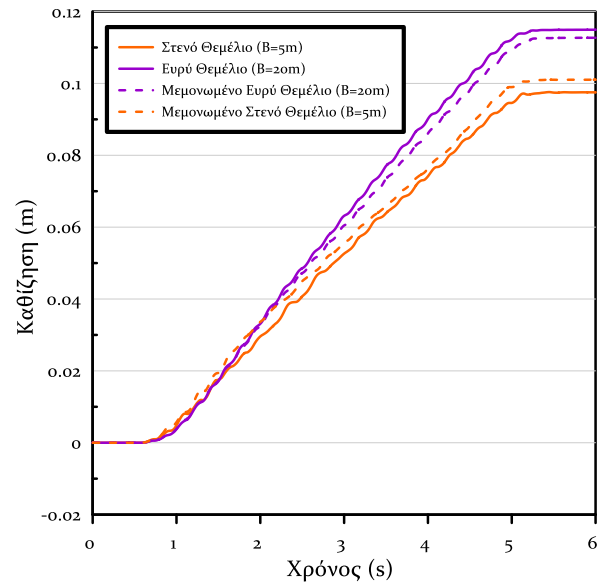
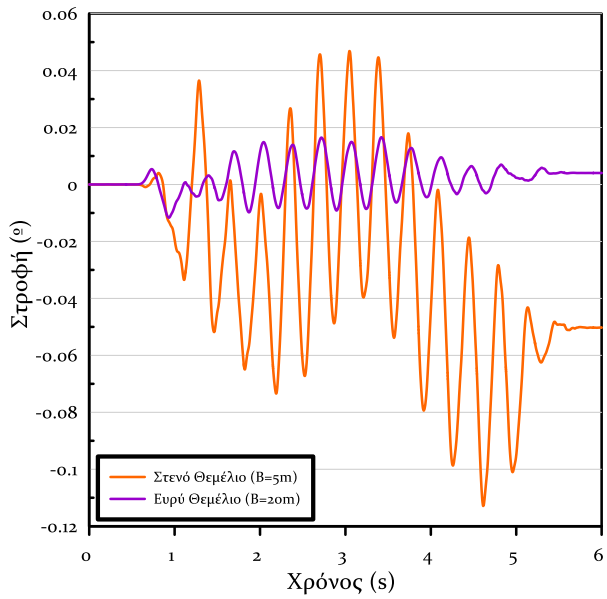
Σχήμα A.88: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 15m$



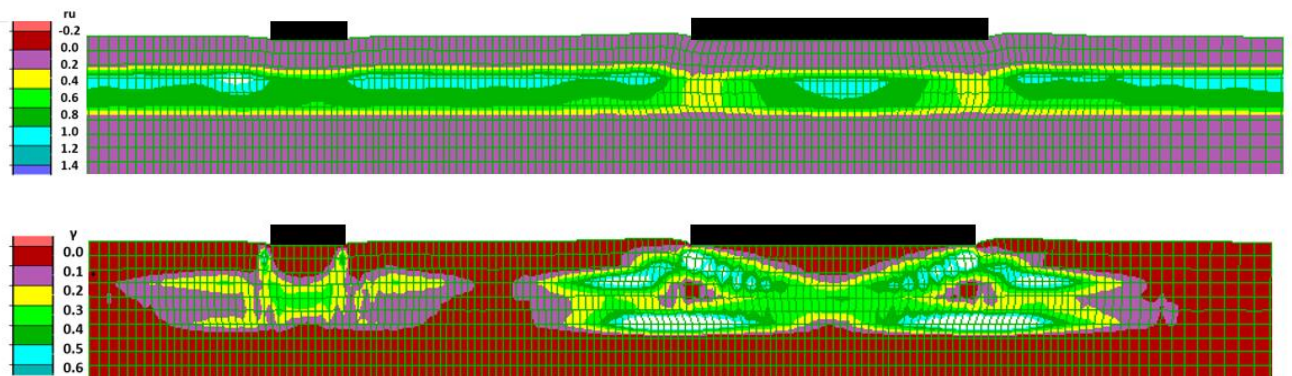
Σχήμα Α.89: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=100\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 20\text{m}$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



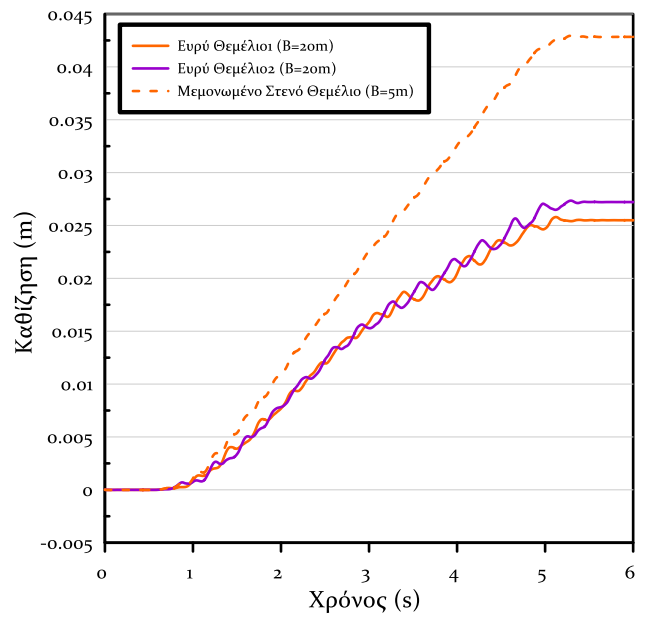
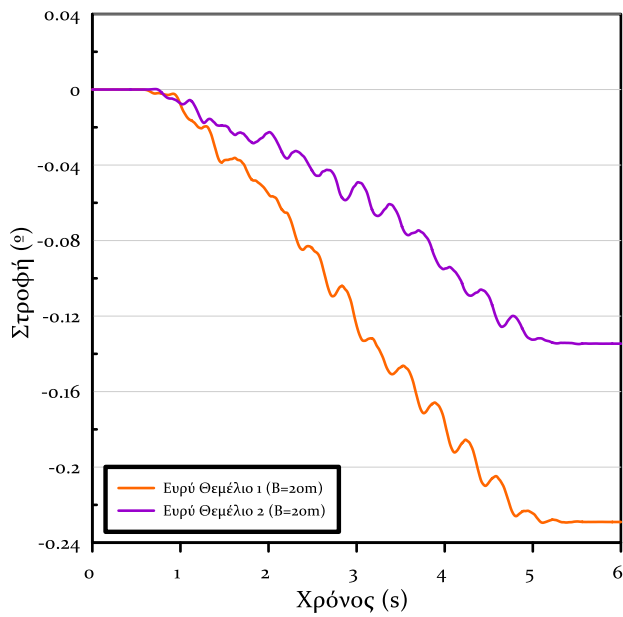
Σχήμα Α.90: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=100\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 20\text{m}$



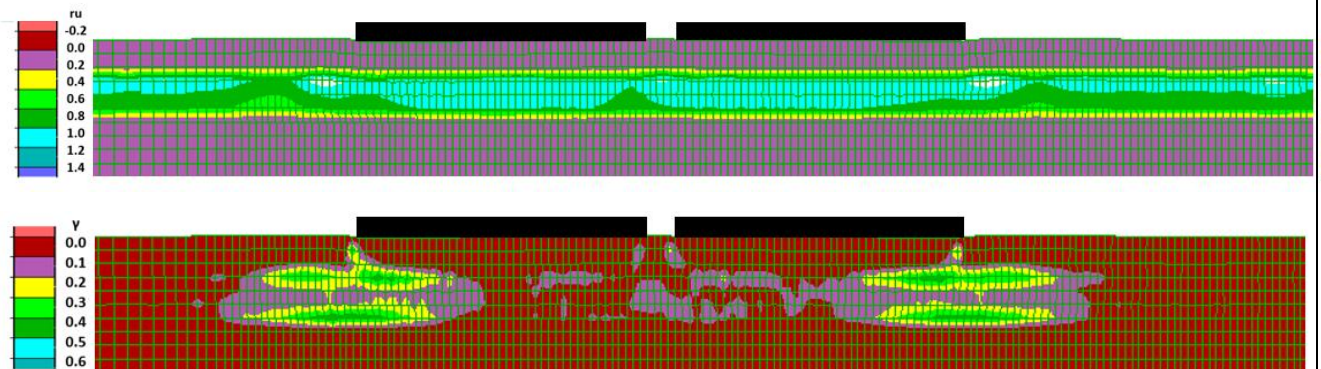
Σχήμα Α.91: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 25m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



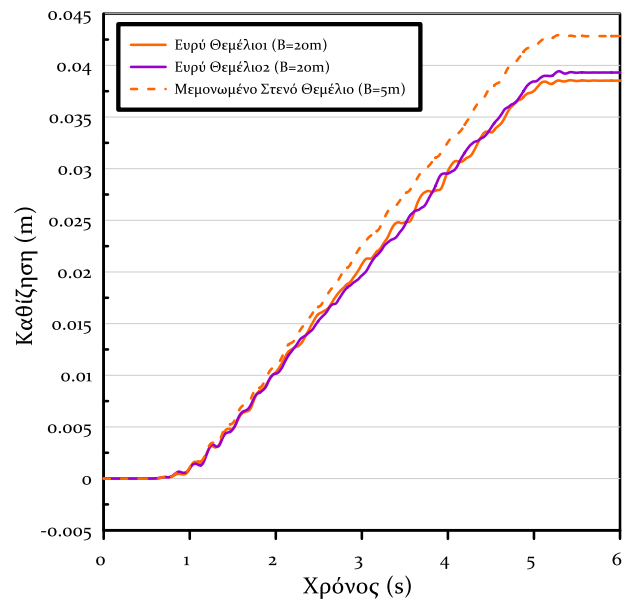
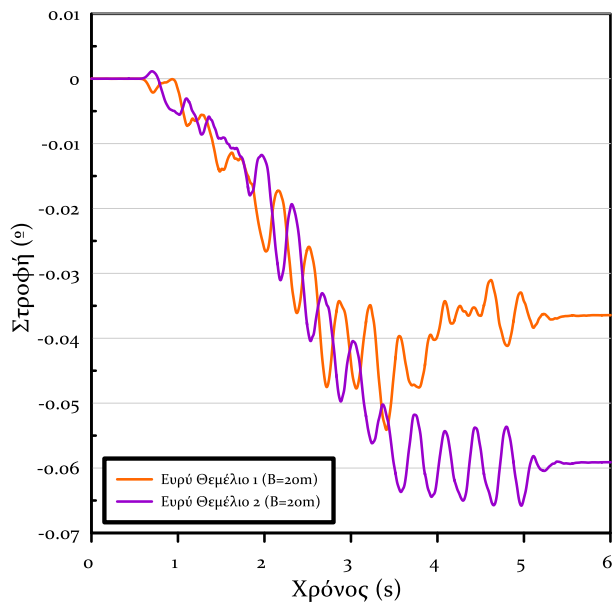
Σχήμα Α.92: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D = 25m$



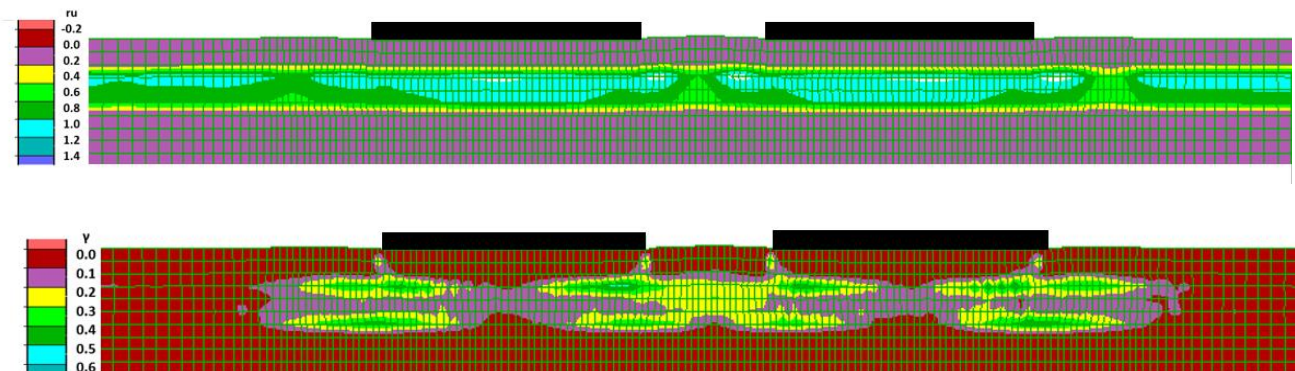
Σχήμα Α.93: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 2.5m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



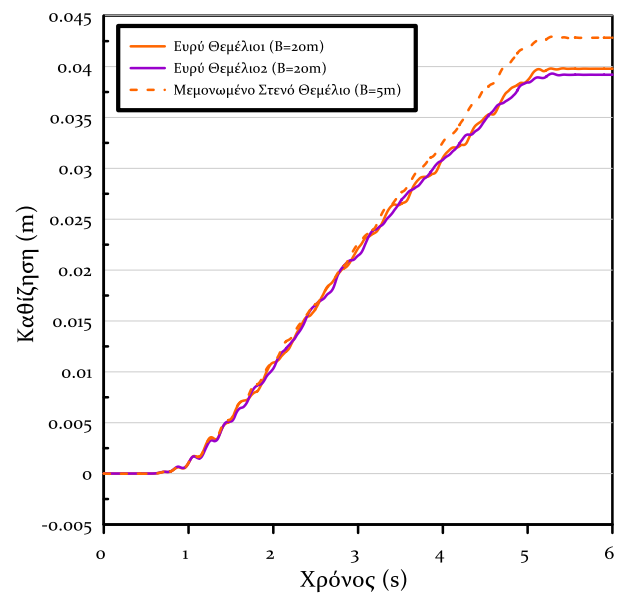
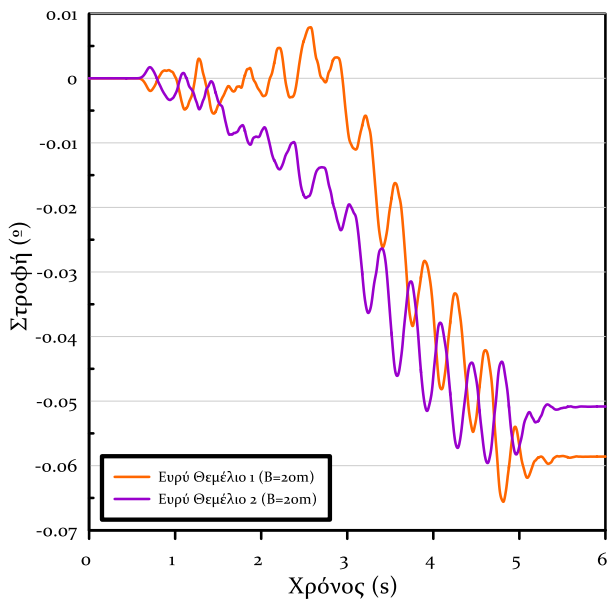
Σχήμα Α.94: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$.



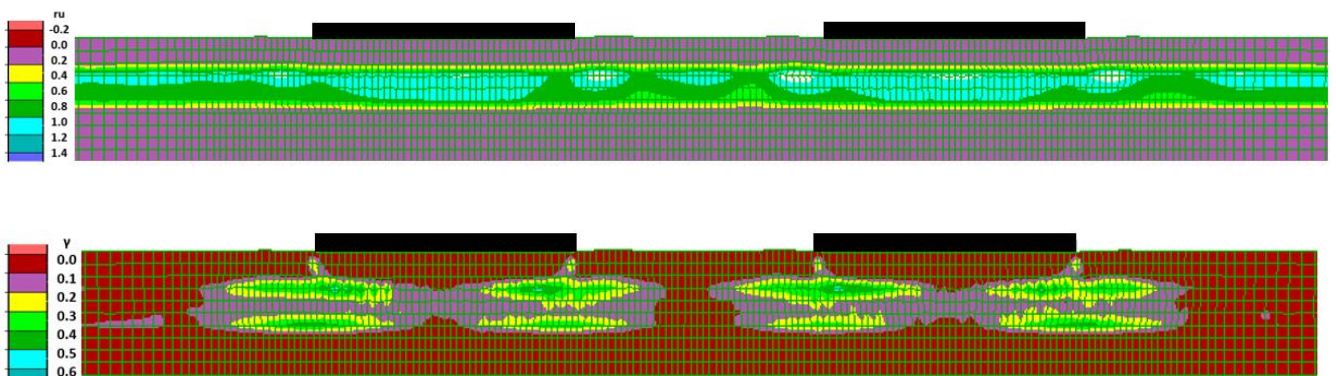
Σχήμα Α.95: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D = 10m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



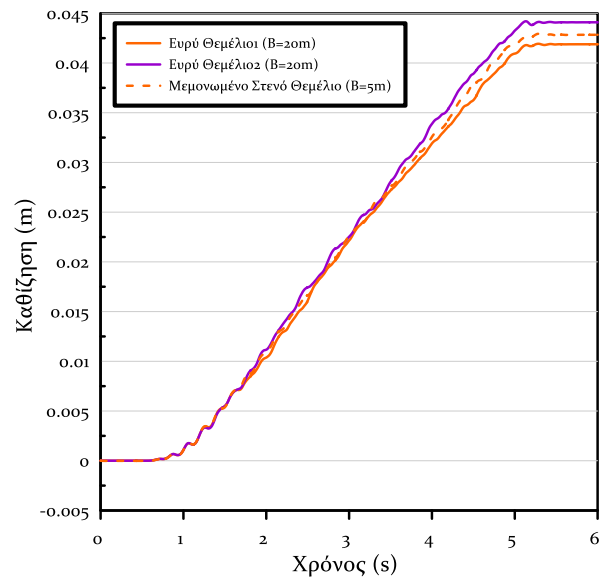
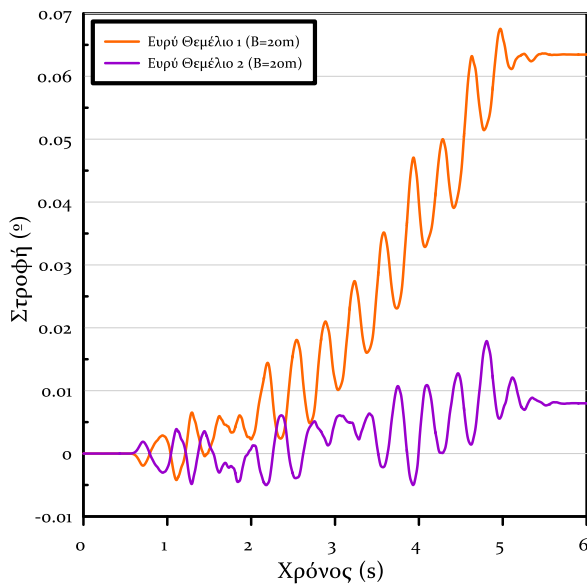
Σχήμα Α.96: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20m$, $q_1=q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=10m$.



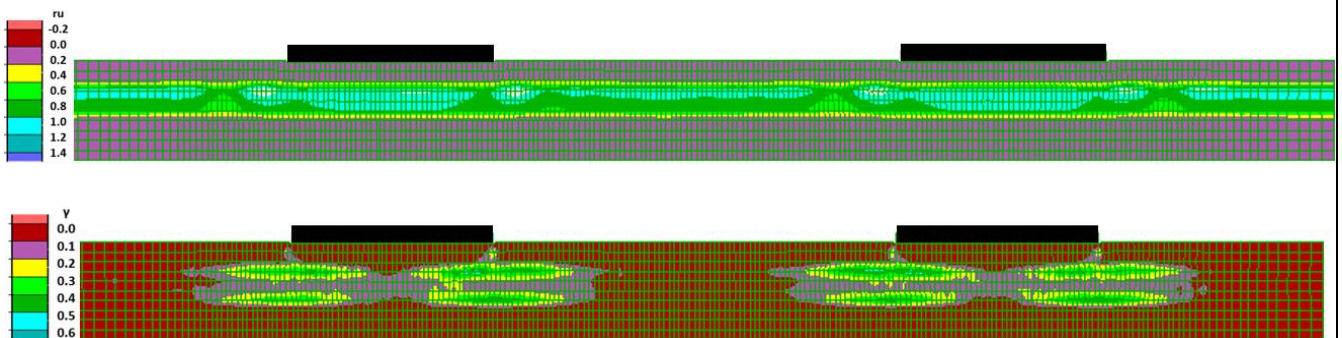
Σχήμα Α.97: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20\text{m}$, $q_1=q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 20\text{m}$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



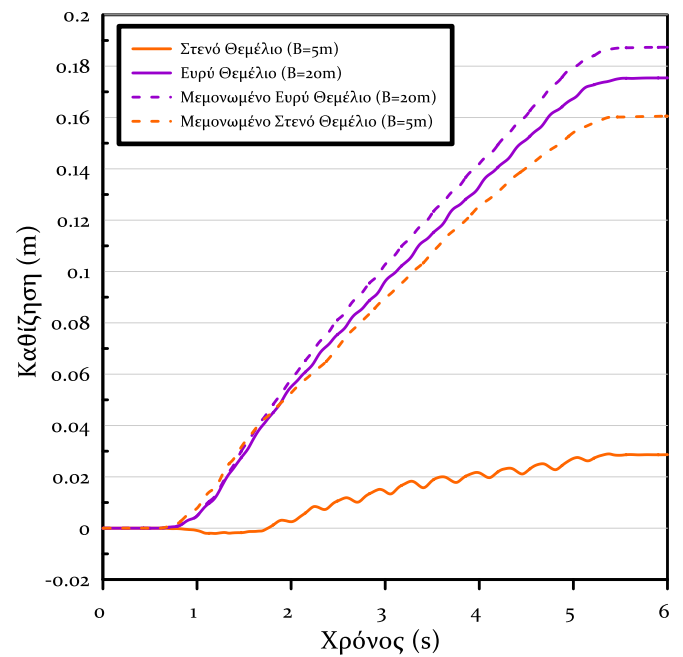
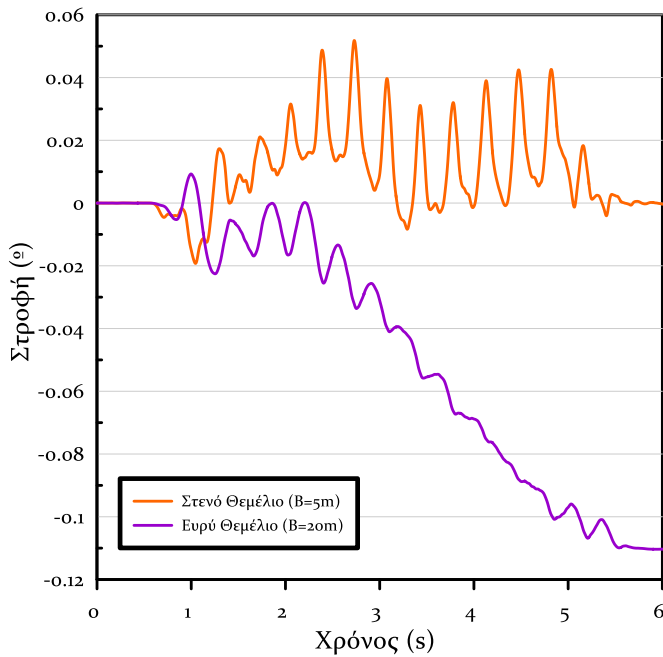
Σχήμα Α.98: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20\text{m}$, $q_1=q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D=20\text{m}$.



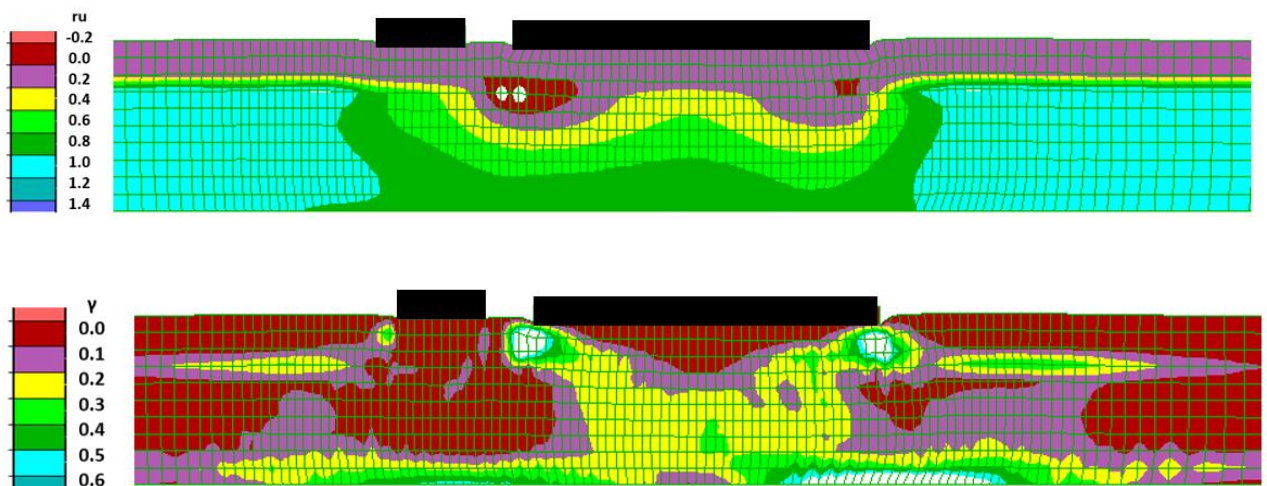
Σχήμα Α.99: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20\text{m}$, $q_1=q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D = 40\text{m}$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



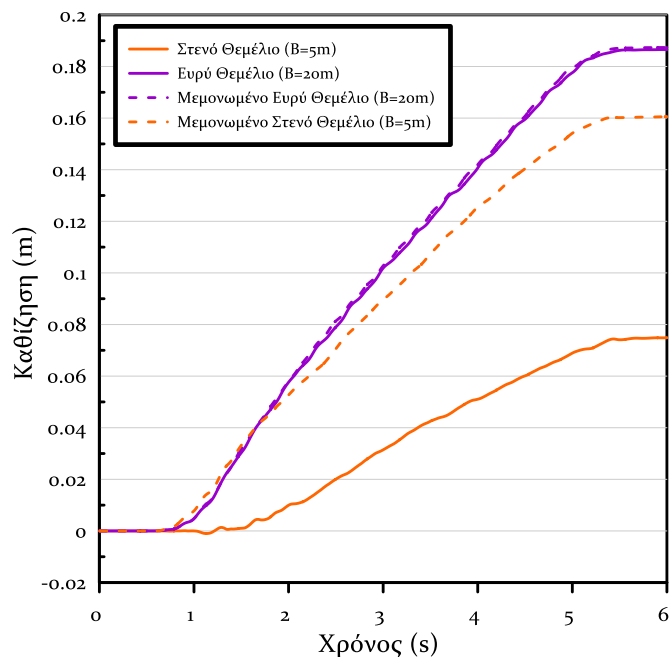
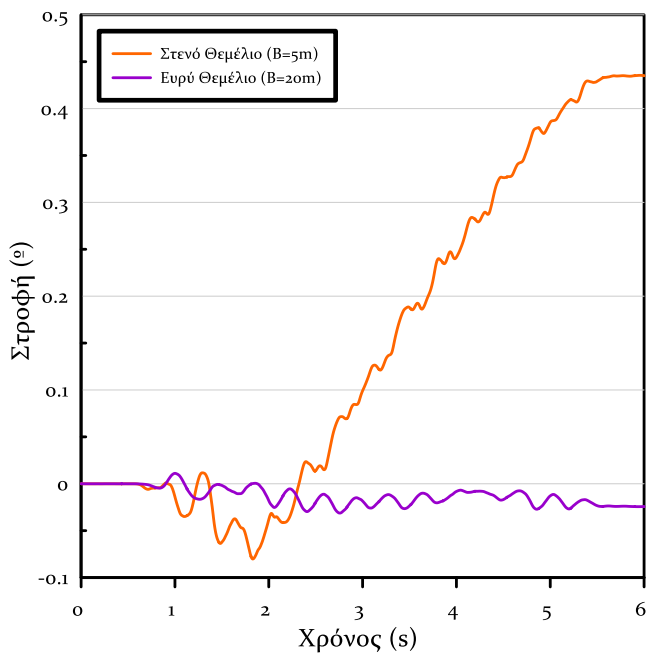
Σχήμα Α.100: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=4\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=B_2=20\text{m}$, $q_1=q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D=40\text{m}$.



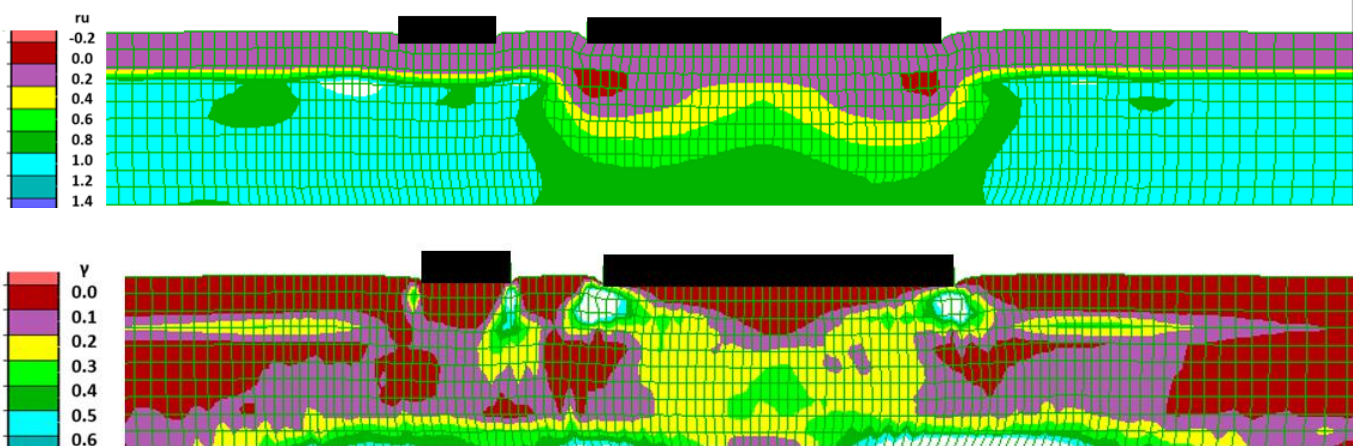
Σχήμα Α.101: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



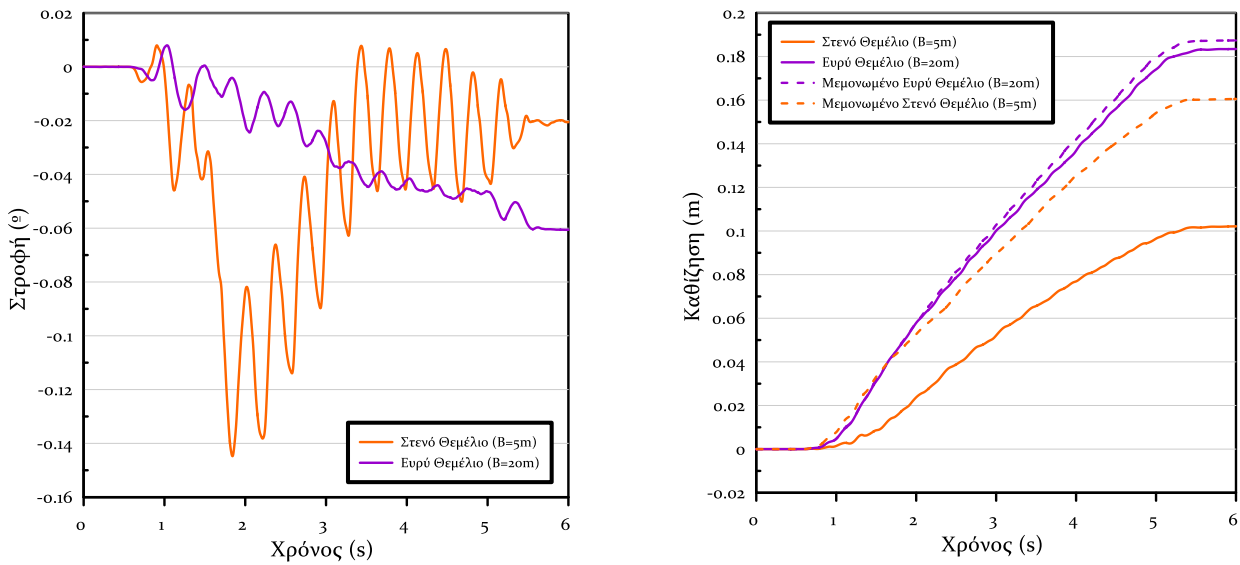
Σχήμα Α.102: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=2.5m$.



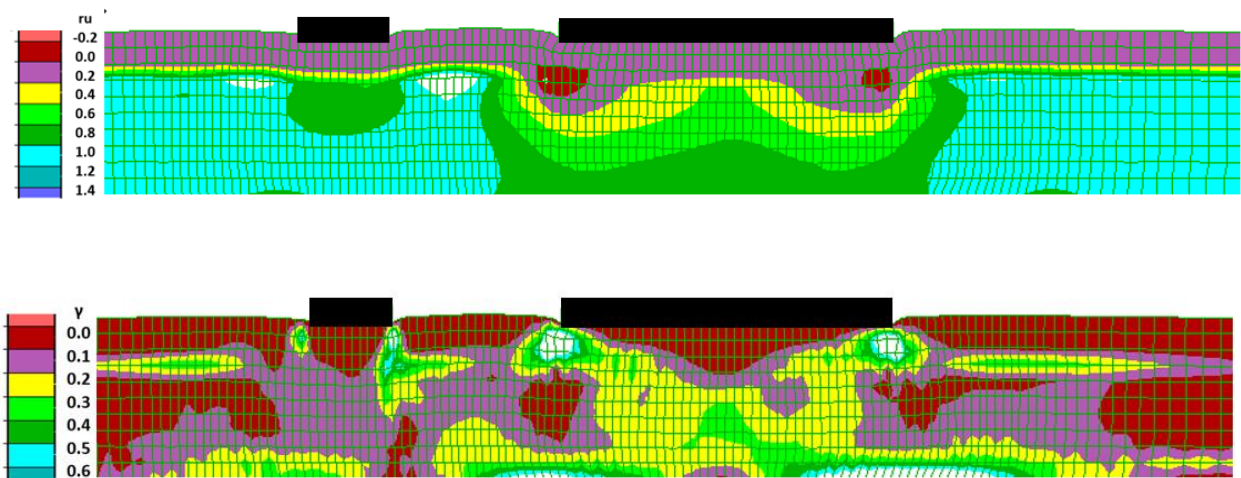
Σχήμα Α.103: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=5m$, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



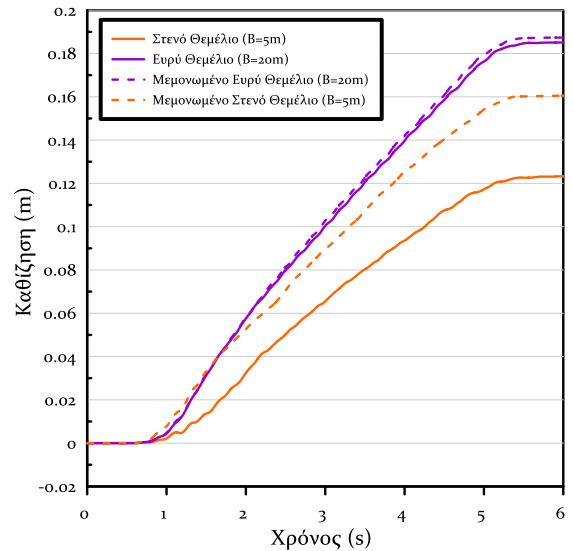
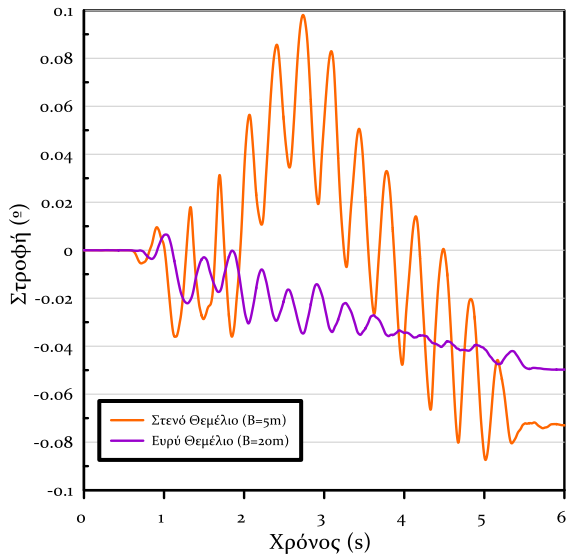
Σχήμα Α.104: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=5m$.



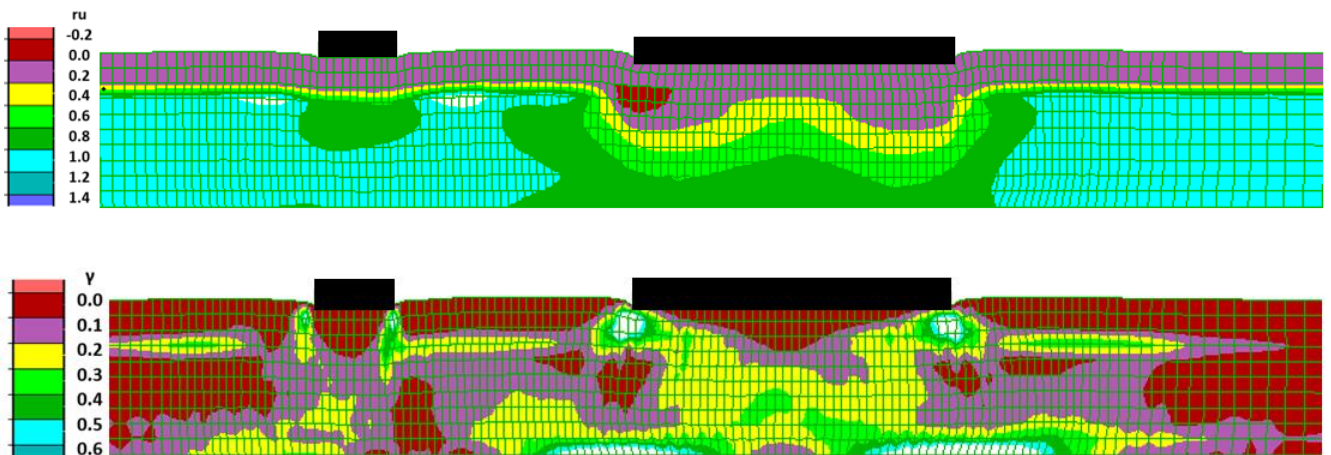
Σχήμα A.105: Σύγκριση χρονιοιστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=10m$, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



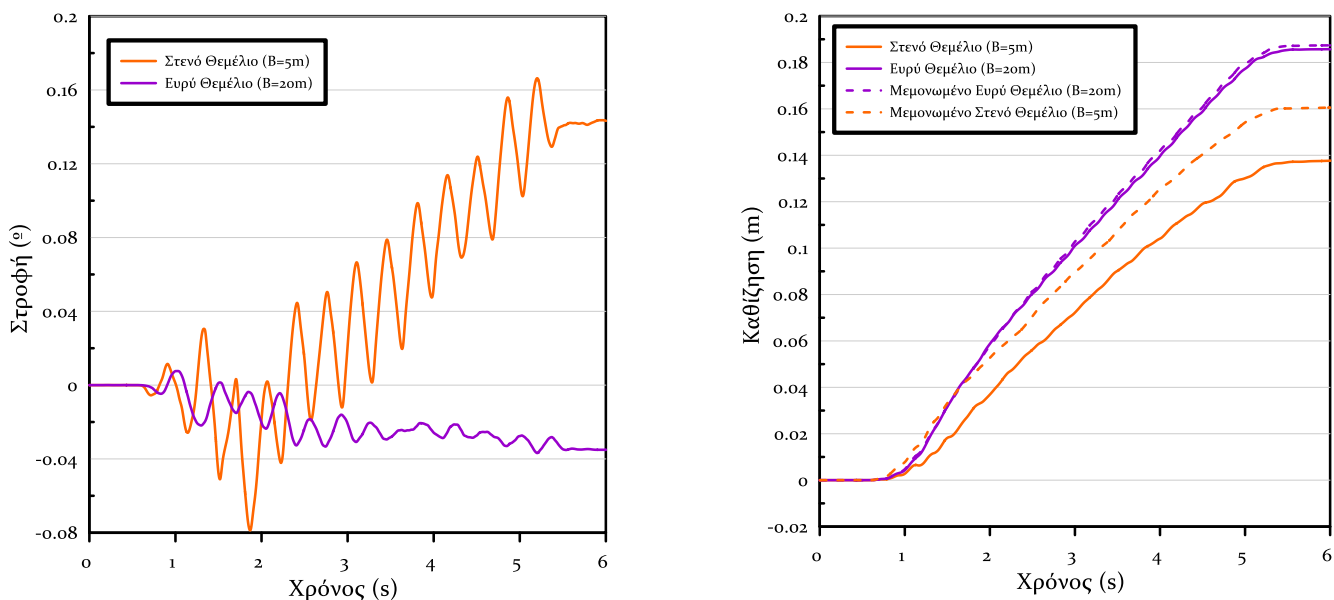
Σχήμα A.106: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=10m$.



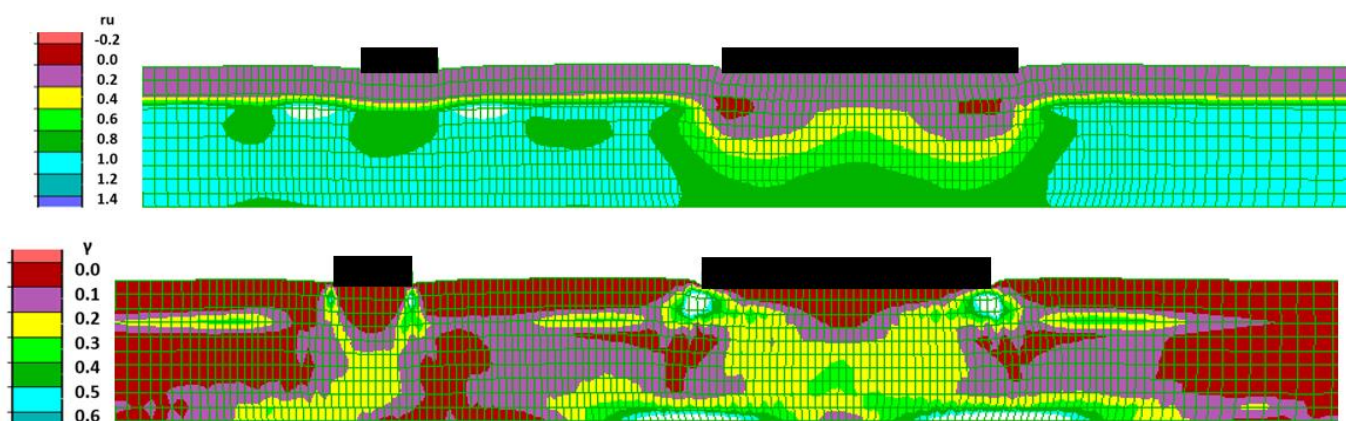
Σχήμα Α.107: Σύγκριση χρονιοιστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=15m$, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



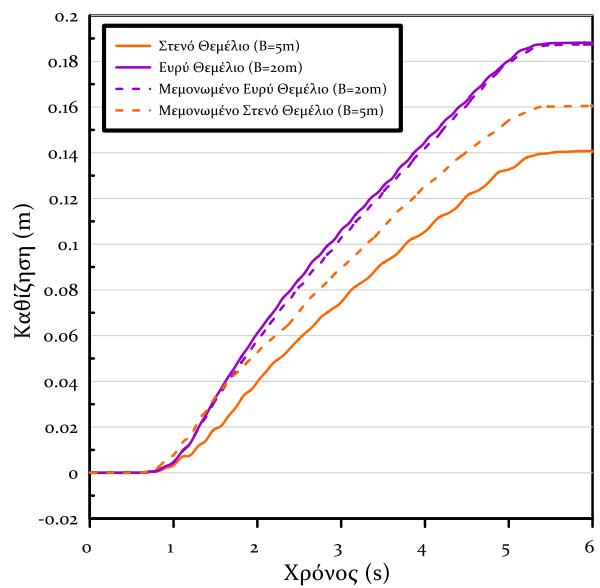
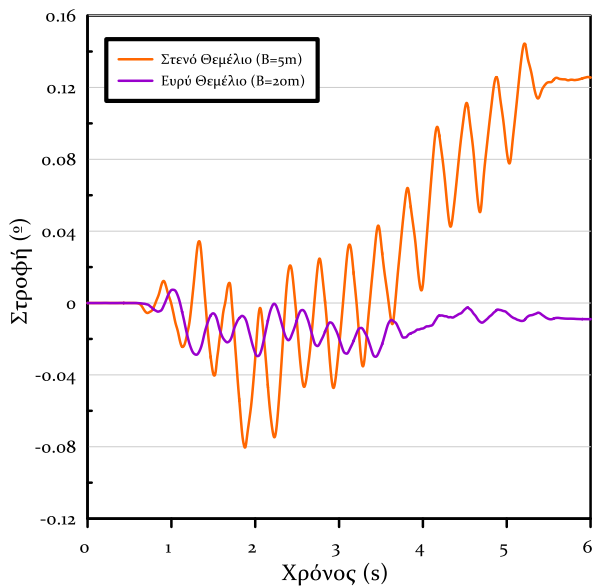
Σχήμα Α.108: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=15m$.



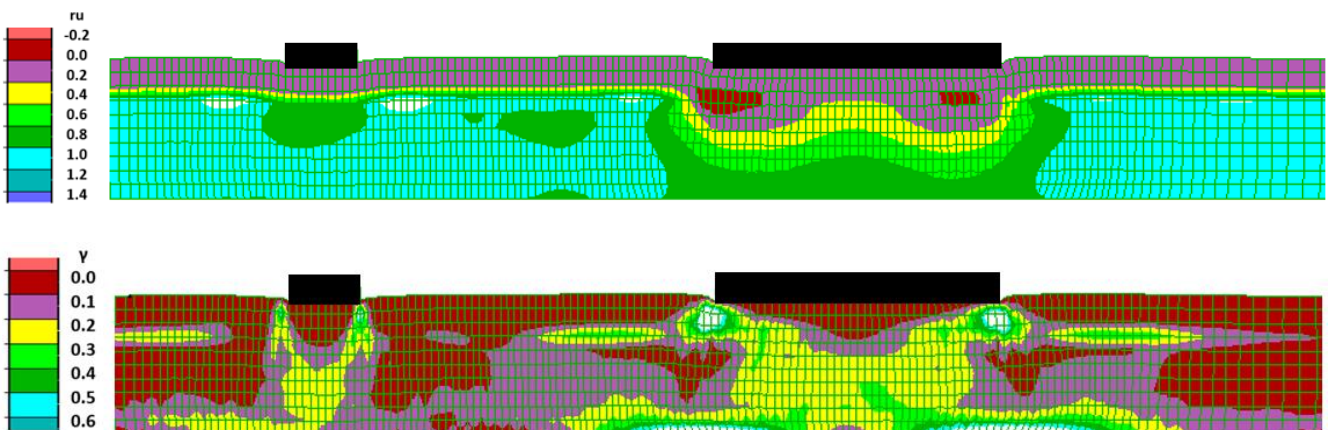
Σχήμα Α.109: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=20m$, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



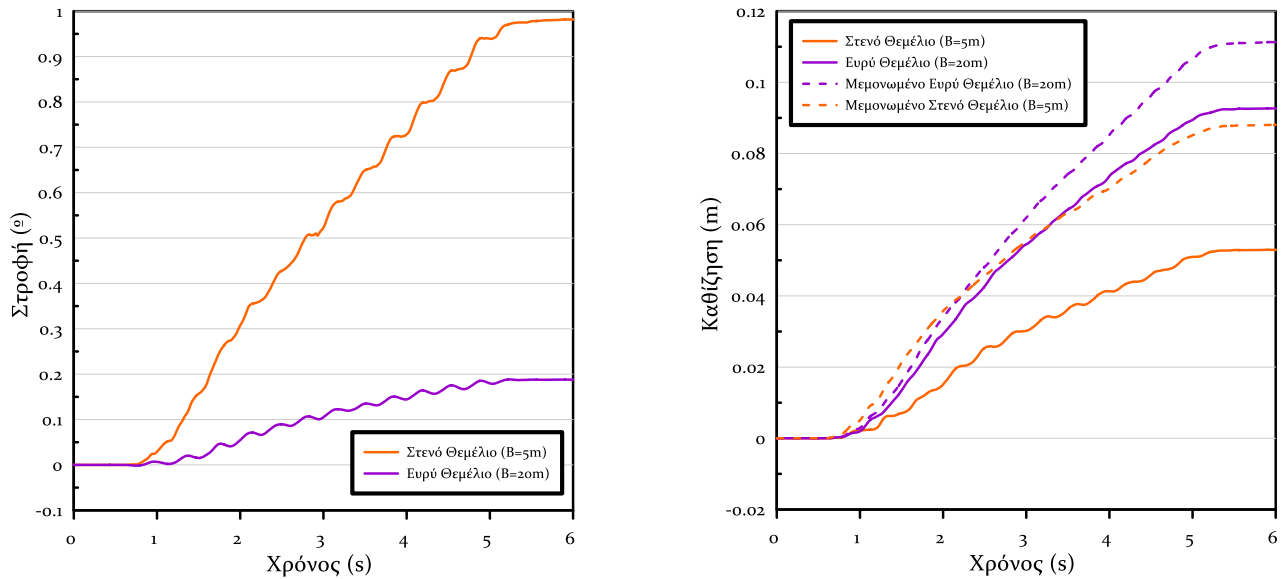
Σχήμα Α.110: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=20m$.



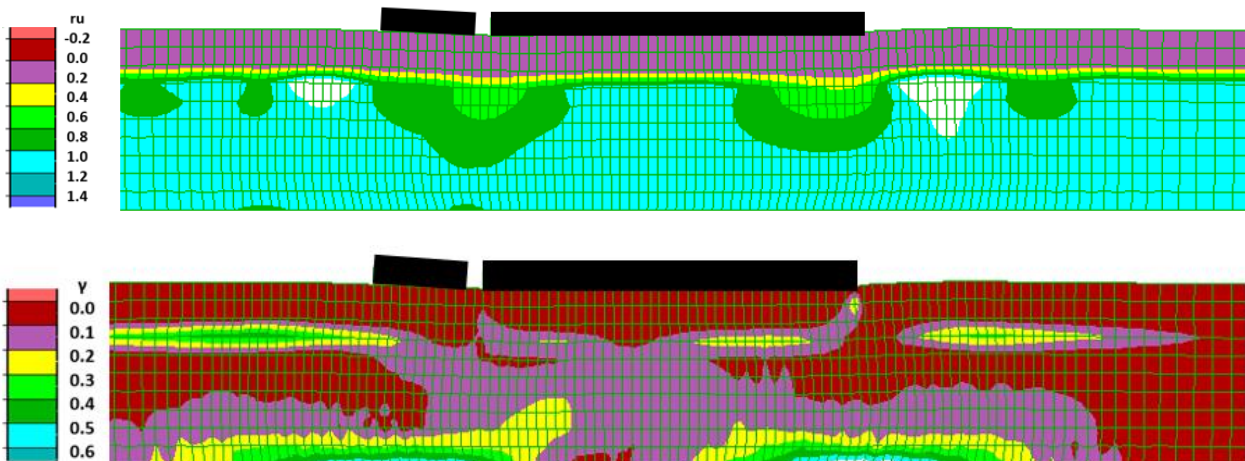
Σχήμα Α.11: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=25m$, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



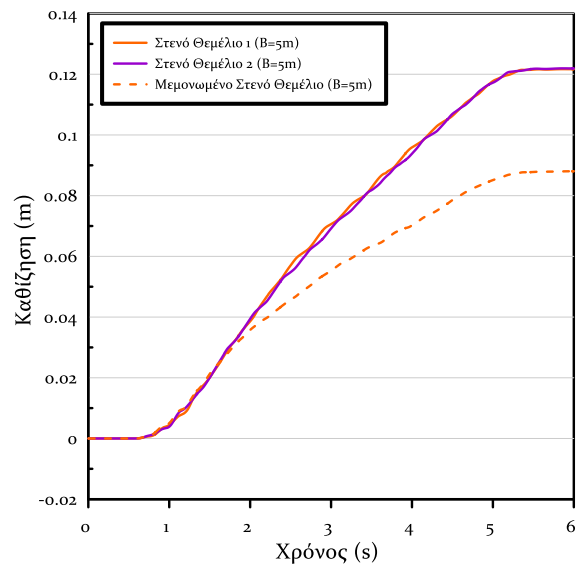
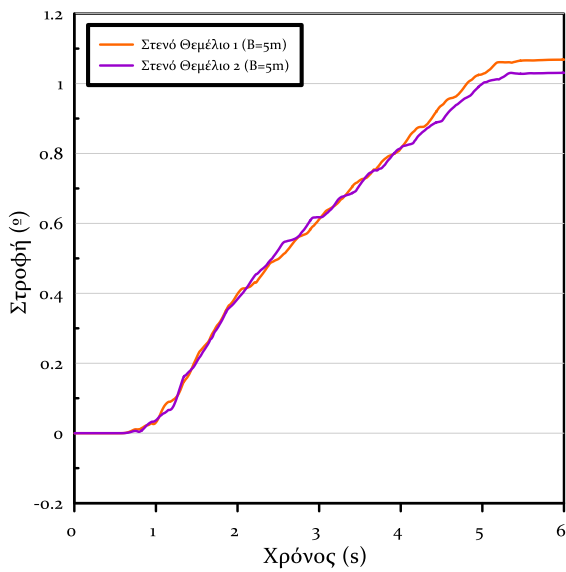
Σχήμα Α.112: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_c=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=25m$.



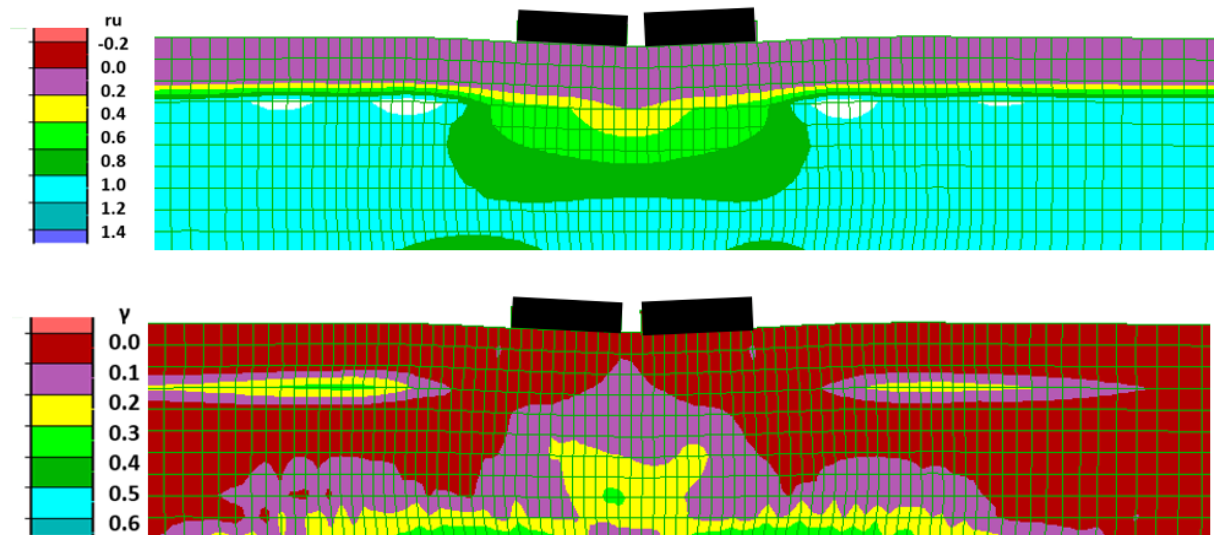
Σχήμα Α.113: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



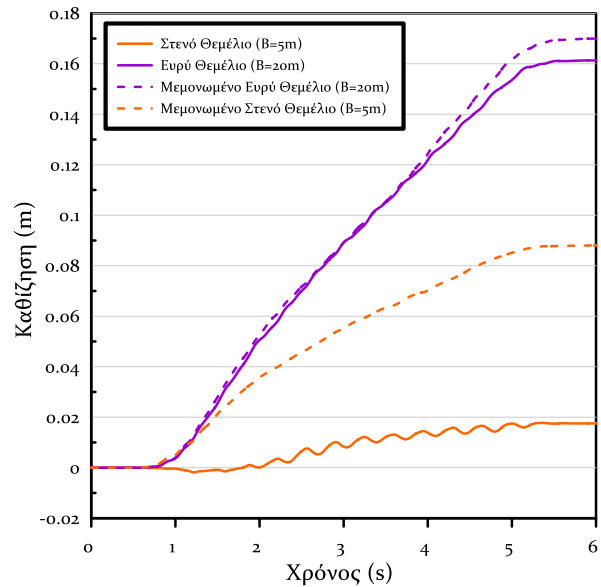
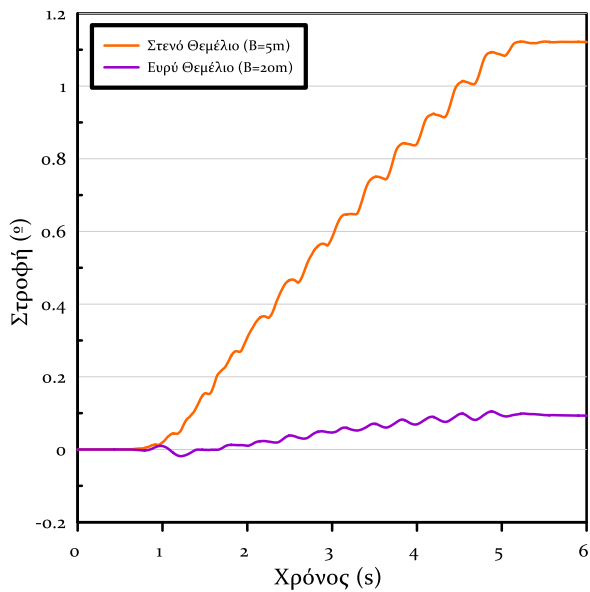
Σχήμα Α.114: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$.



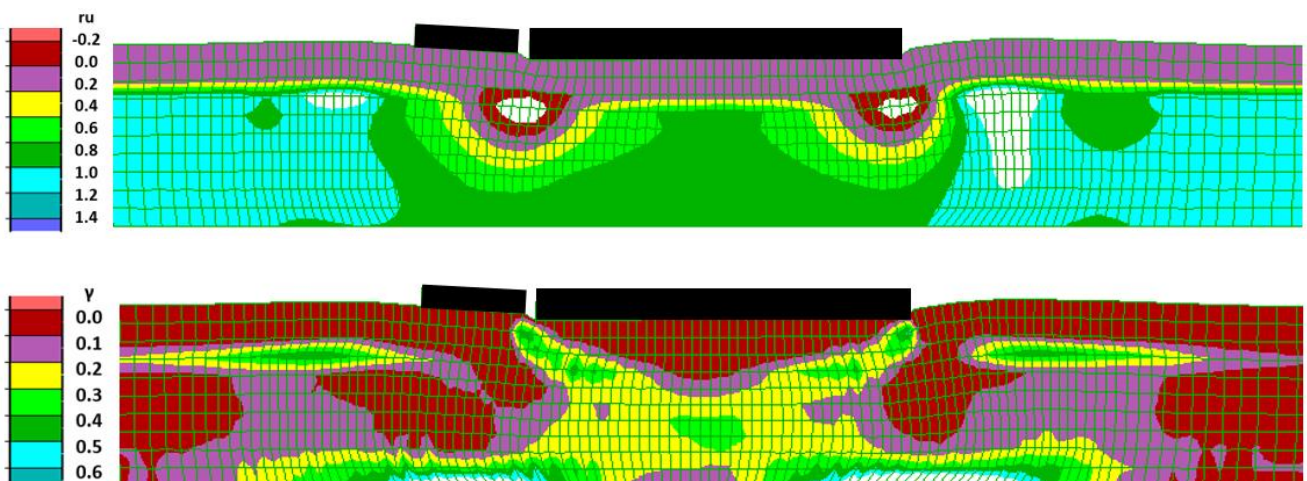
Σχήμα Α.115: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



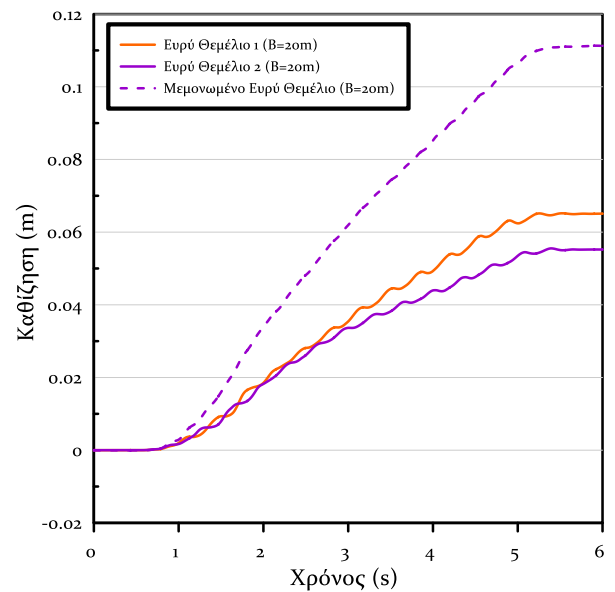
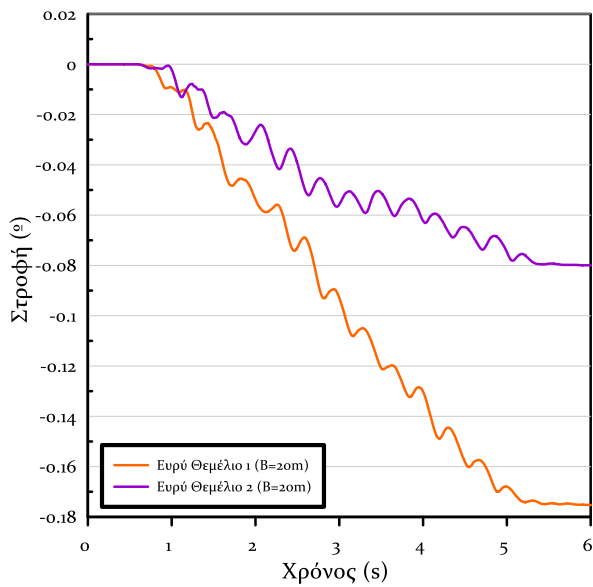
Σχήμα Α.116: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$.



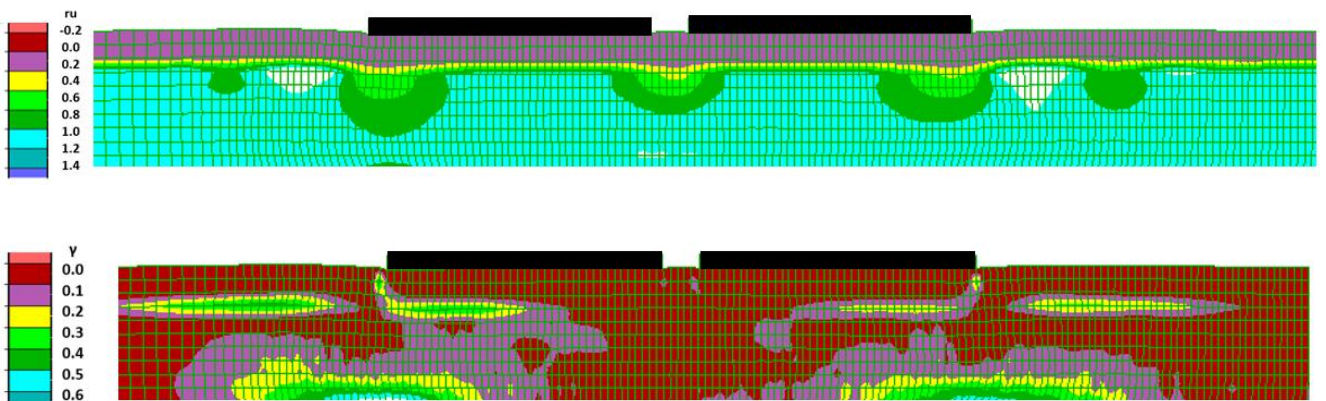
Σχήμα Α.117: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



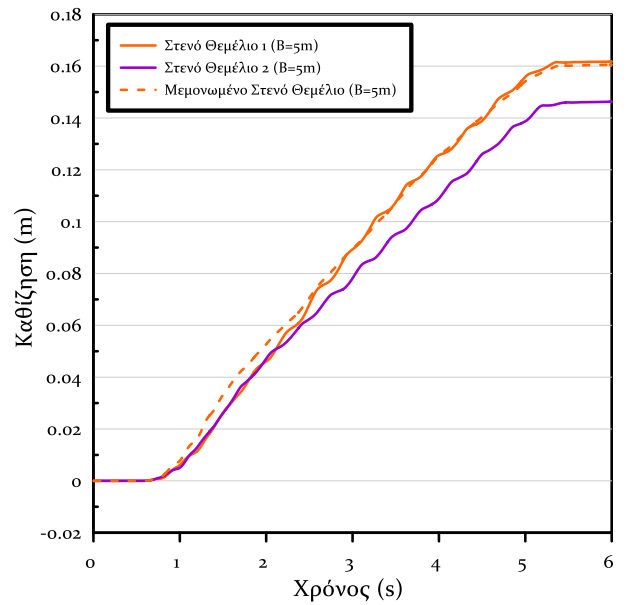
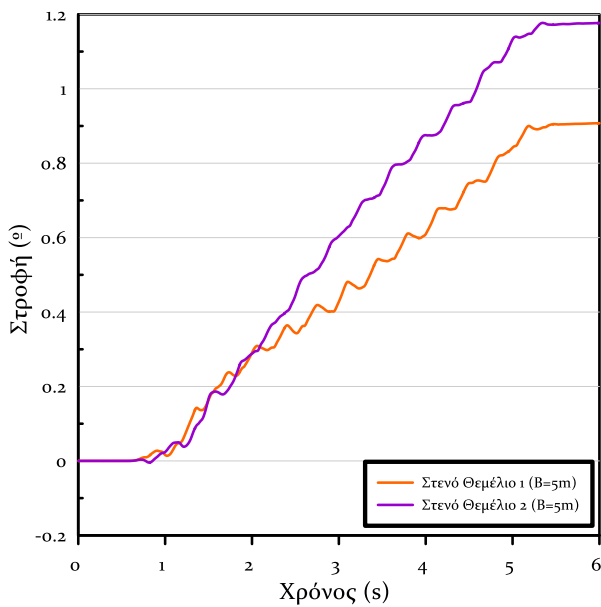
Σχήμα Α.118: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=100kPa$) σε απόσταση $D=1m$.



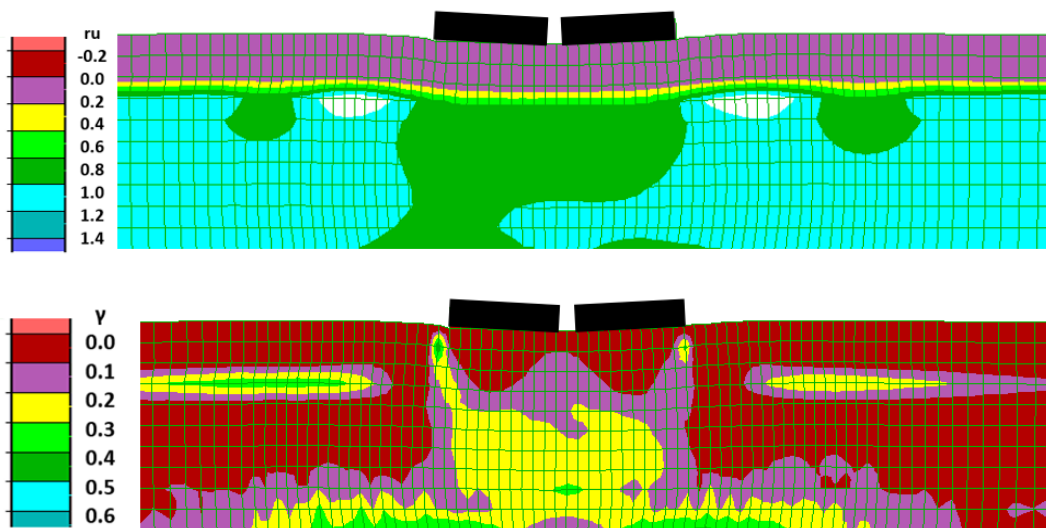
Σχήμα Α.119: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$.



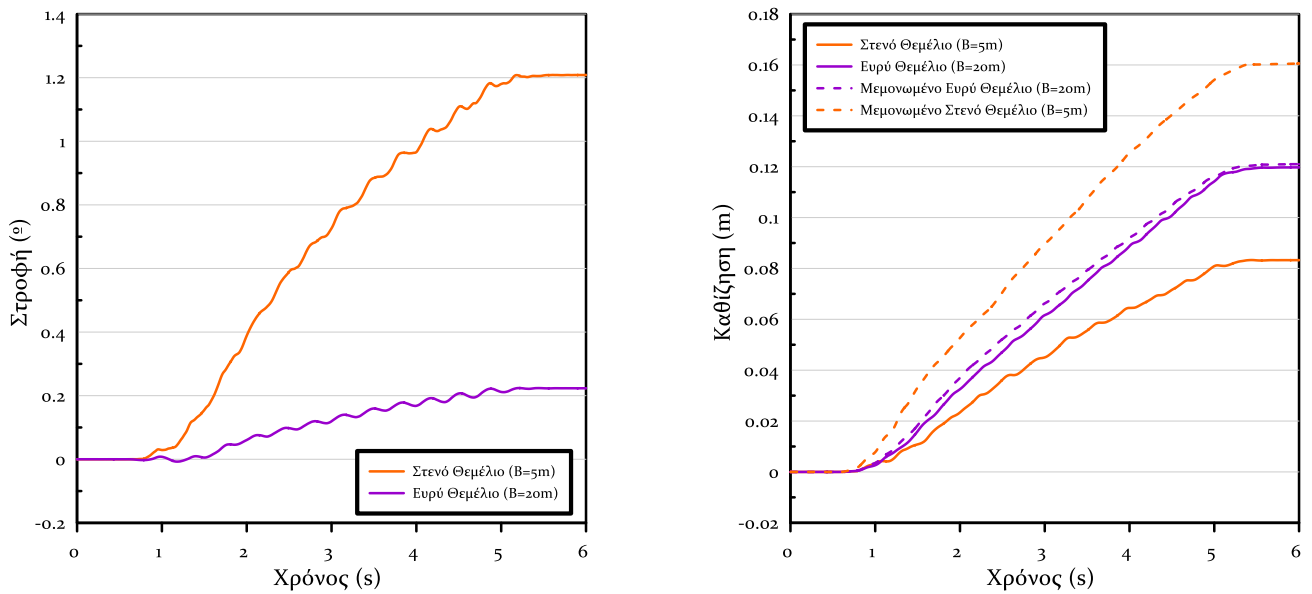
Σχήμα Α.120: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=40kPa$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$.



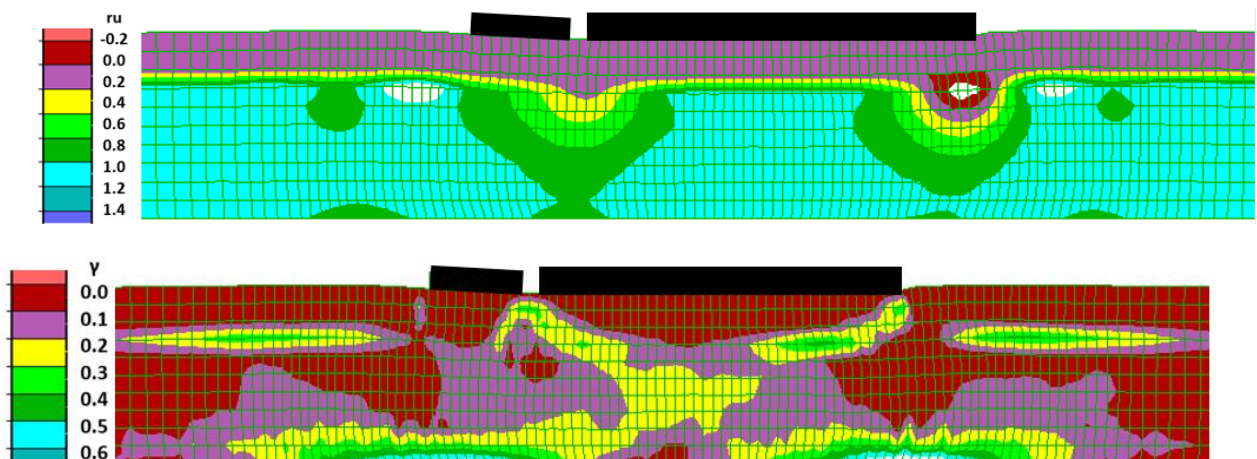
Σχήμα Α.121: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.



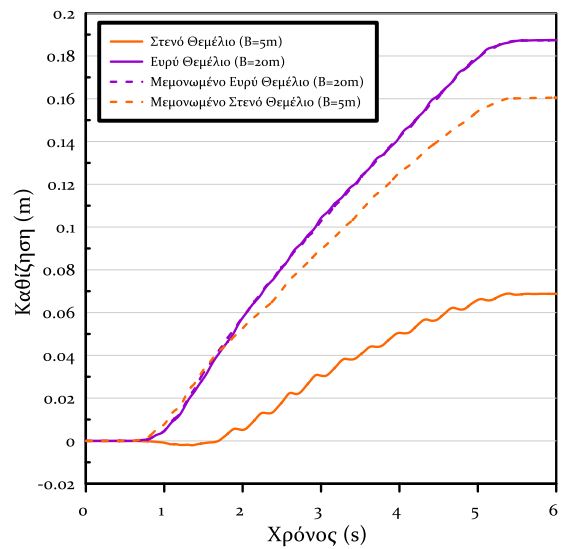
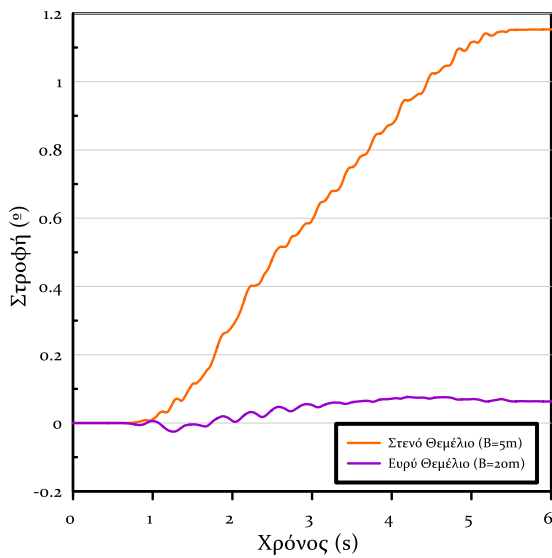
Σχήμα Α.122: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=5m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=5m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$.



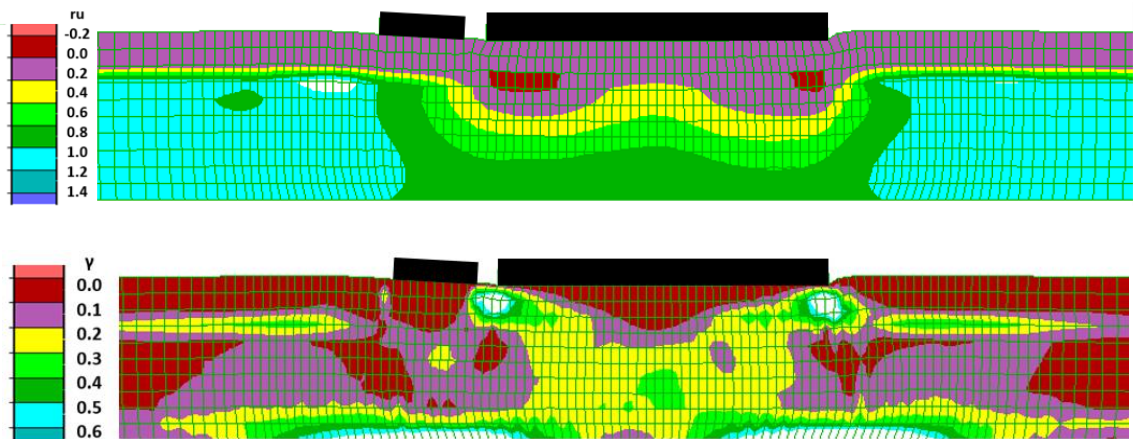
Σχήμα Α.123: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D=1\text{m}$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



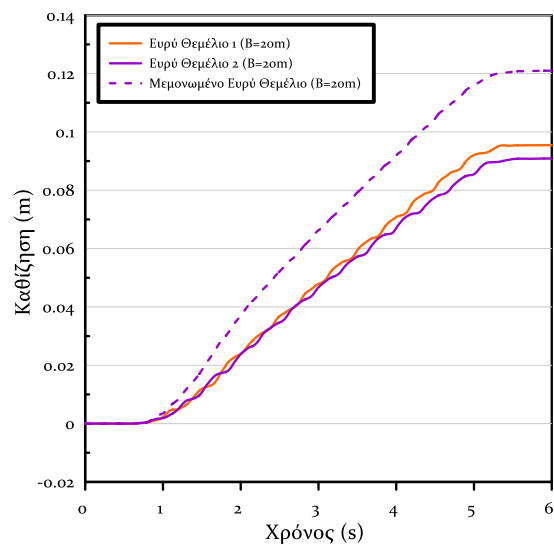
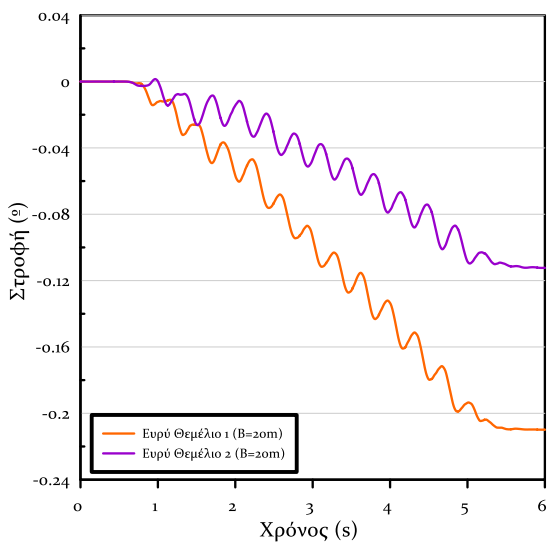
Σχήμα Α.124: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=50\text{kPa}$) σε απόσταση $D=1\text{m}$.



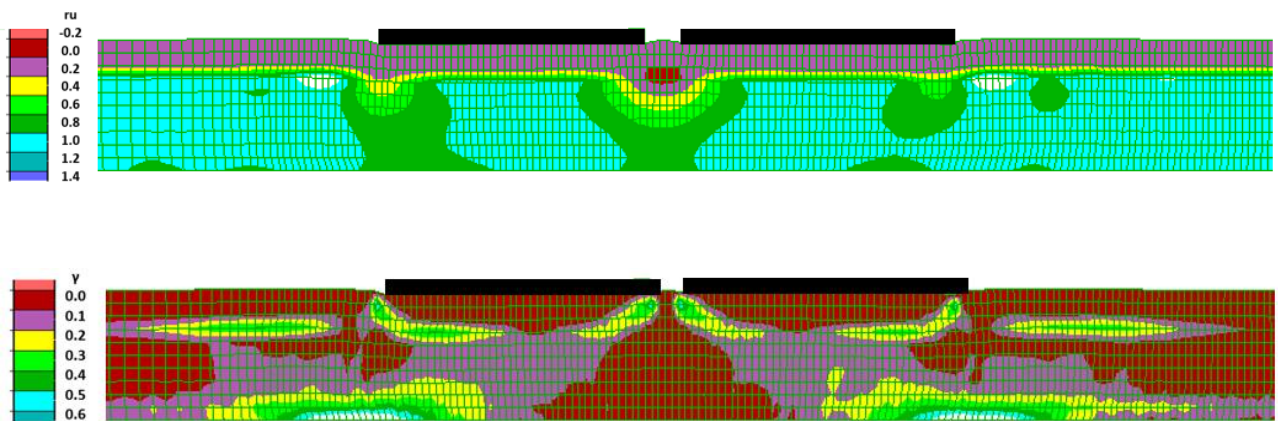
Σχήμα A.125: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=100\text{kPa}$) σε απόσταση $D=1\text{m}$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$.



Σχήμα A.126: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων ru και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8\text{m}$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0\text{m}$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20\text{kPa}$ για έδραση ζεύγους ανόμοιων θεμελίων ($B_1=5\text{m}$, $q_1=50\text{kPa}$ έναντι $B_2=20\text{m}$, $q_2=100\text{kPa}$) σε απόσταση $D=1\text{m}$.

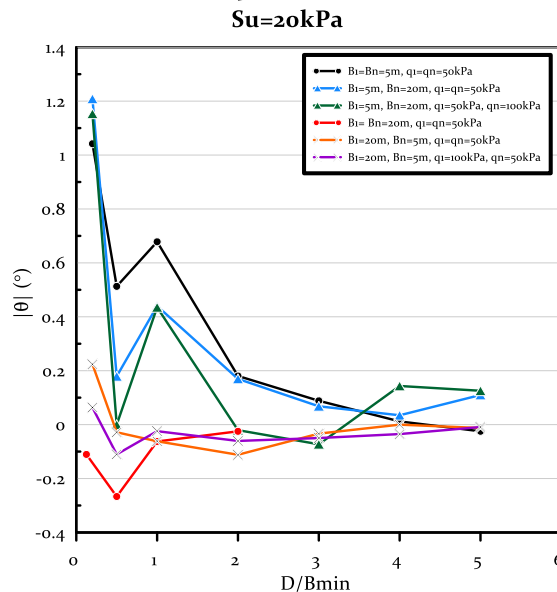


Σχήμα A.127: Σύγκριση χρονοϊστοριών καθιζήσεων και στροφών ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$ με τις αντίστοιχες των ίδιων θεμελίων αν ήταν μεμονωμένα, για έδραση σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$.

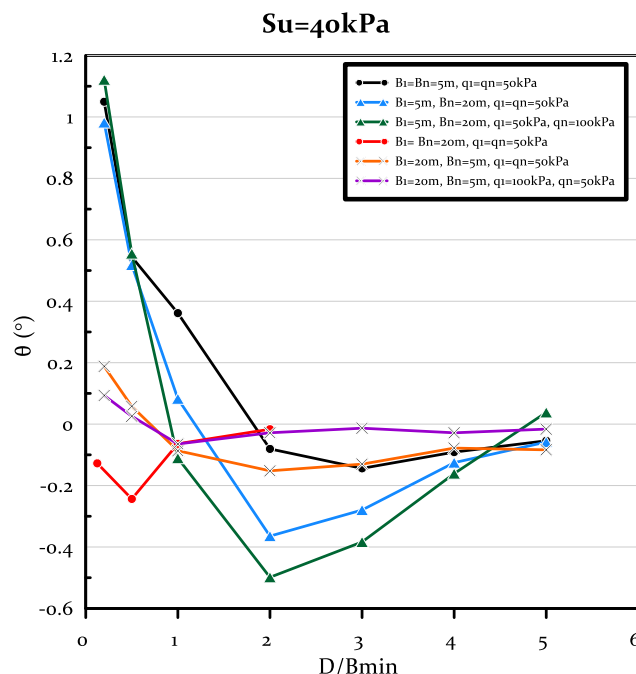


Σχήμα A.128: Ισοκαμπύλες συντελεστή υπερπίεσης πόρων r_u και συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης γ σε δίστρωτο ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους $H_L=8m$ με αργιλική κρούστα $H_C=2.0m$ και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u=20kPa$ για έδραση ζεύγους όμοιων θεμελίων ($B_1=20m$, $q_1=50kPa$ έναντι $B_2=20m$, $q_2=50kPa$) σε απόσταση $D=1m$.

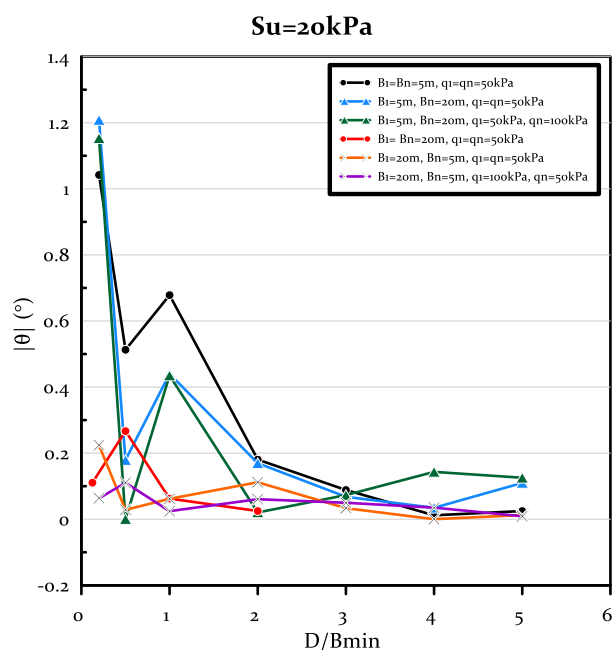
Παράρτημα Μέρος Β: Συγκεντρωτικά Αριθμητικά Αποτελέσματα



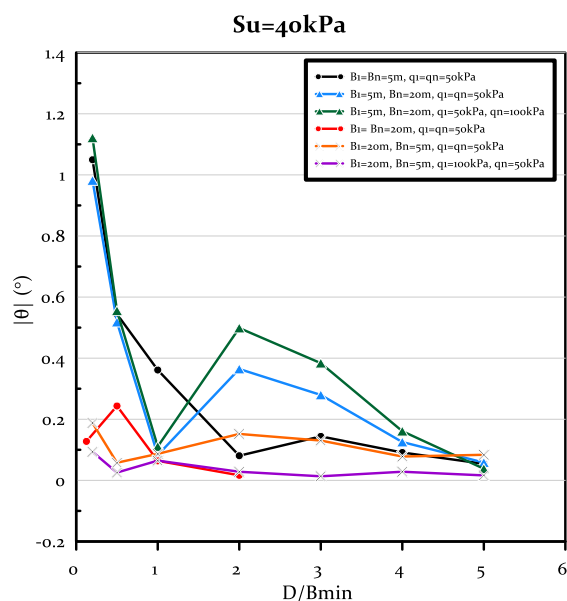
Σχήμα Β.1: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στη στροφή θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



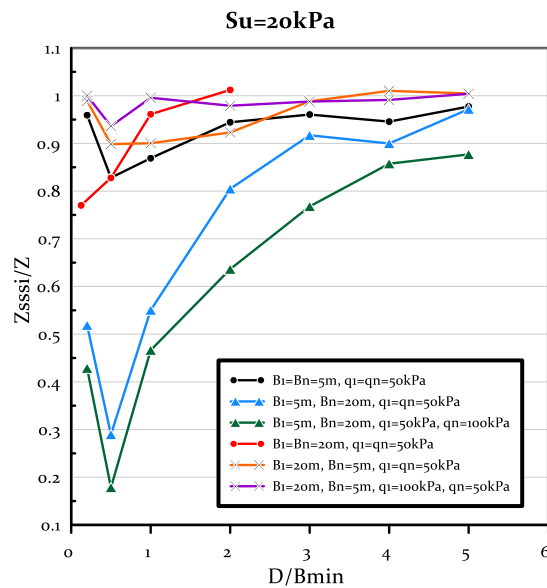
Σχήμα Β.2: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στη στροφή θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



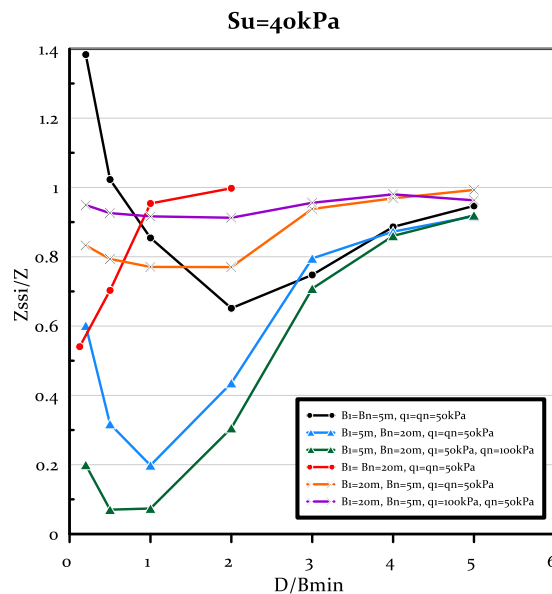
Σχήμα Β.3: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στην καθ'απόλυτη τιμή στροφή $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



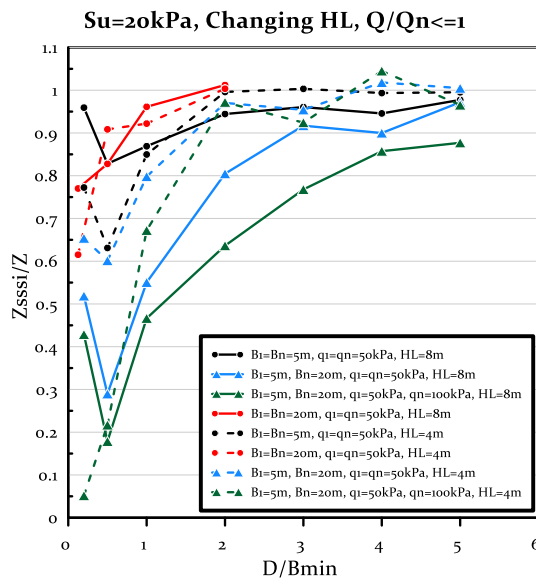
Σχήμα Β.4: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στην καθ'απόλυτη τιμή στροφή $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



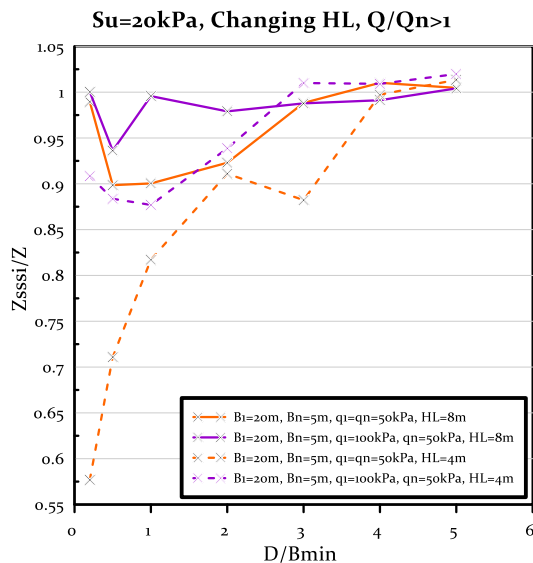
Σχήμα Β.5: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



Σχήμα Β.6: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).

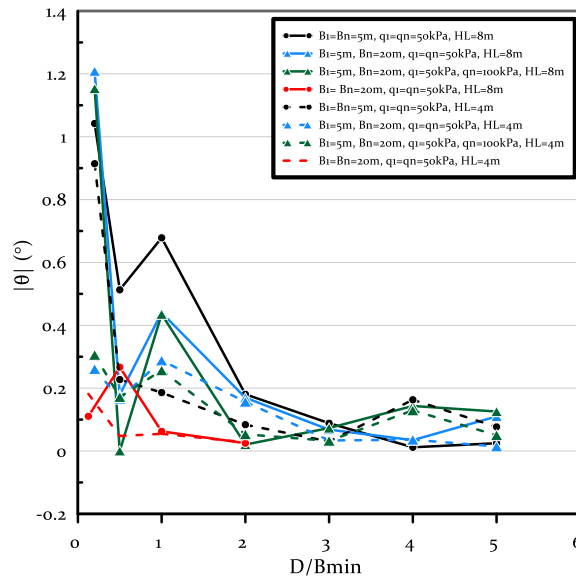


Σχήμα Β.7: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



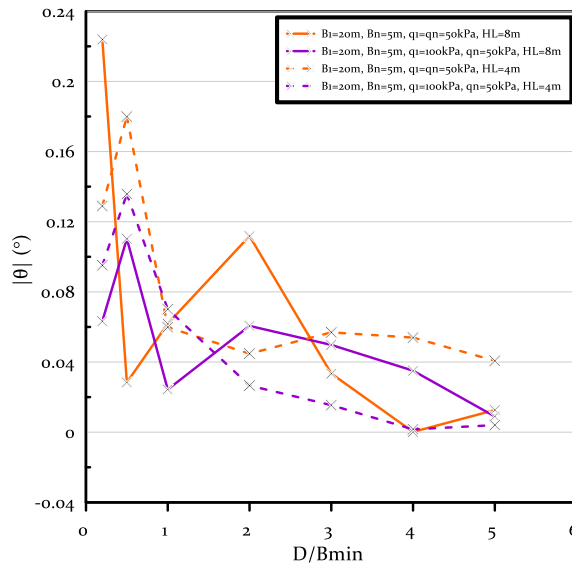
Σχήμα Β.8: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

Su=20kPa, Changing HL, Q/Qn<=1

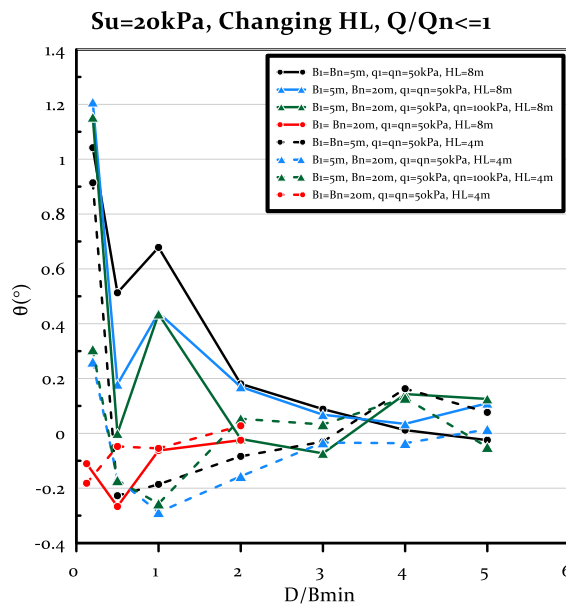


Σχήμα Β.9: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$ ή $H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).

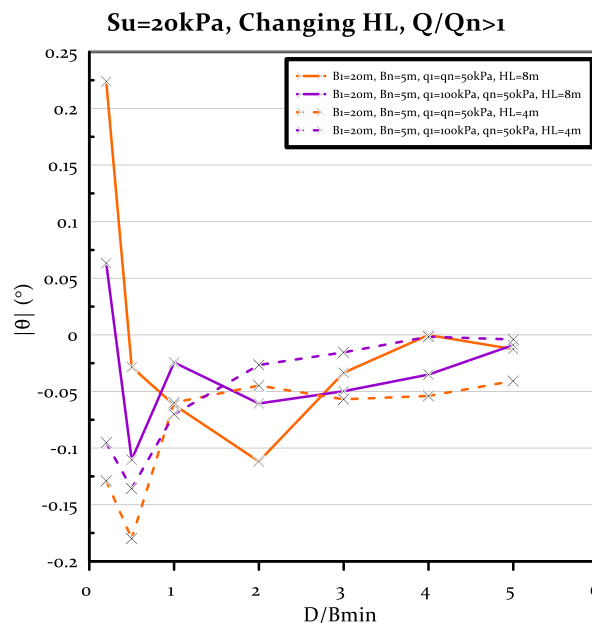
Su=20kPa, Changing HL, Q/Qn<1



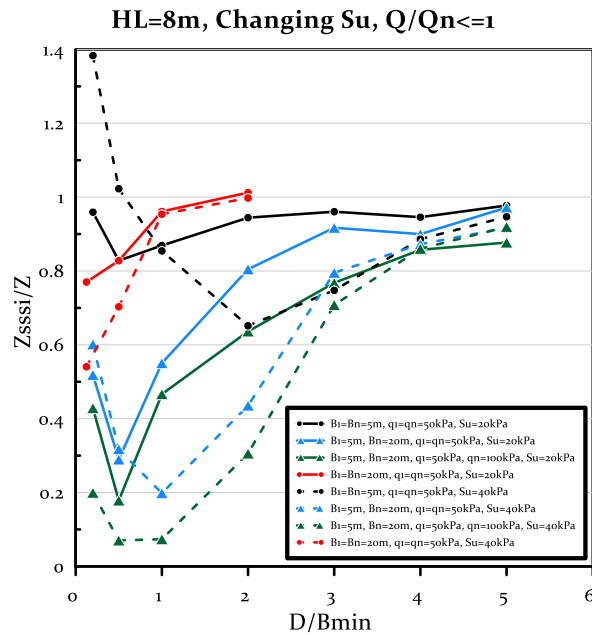
Σχήμα Β.10: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$ ή $H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



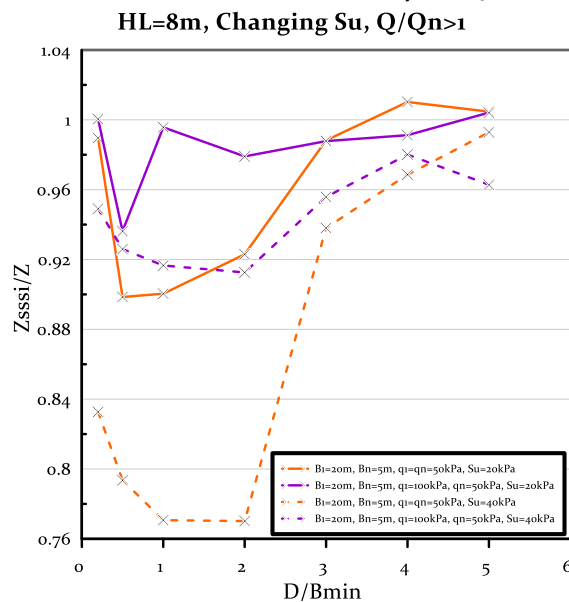
Σχήμα Β.11: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



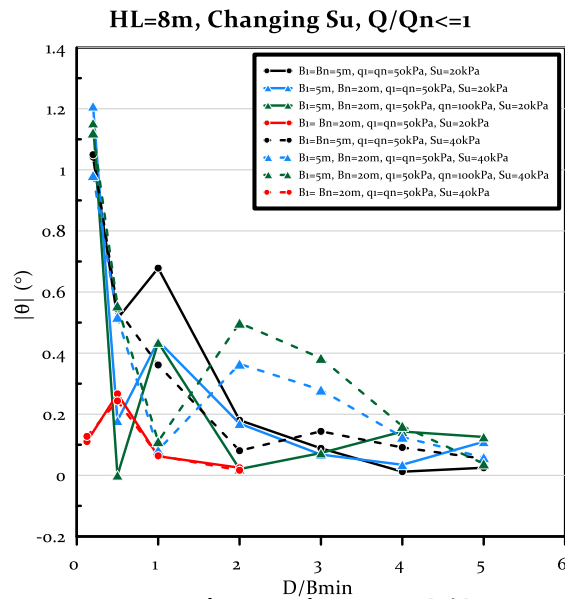
Σχήμα Β.12: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



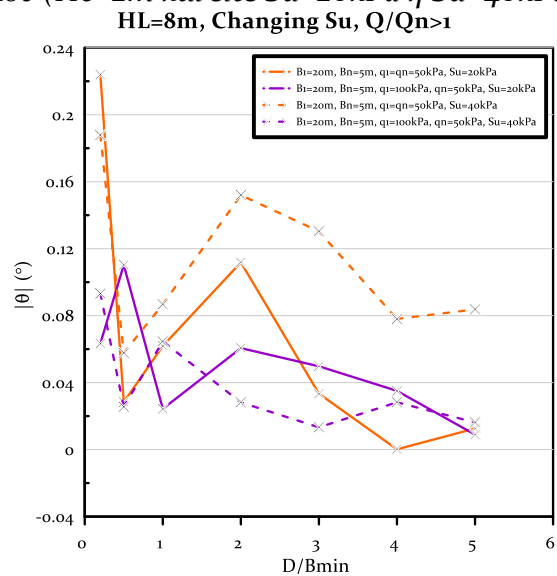
Σχήμα Β.13: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης $D/Bmin$ στον λόγο καθιζήσεων $Zsssi/Z$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Qn \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($Hc=2m$ και είτε $Su=20kPa$ ή $Su=40kPa$).



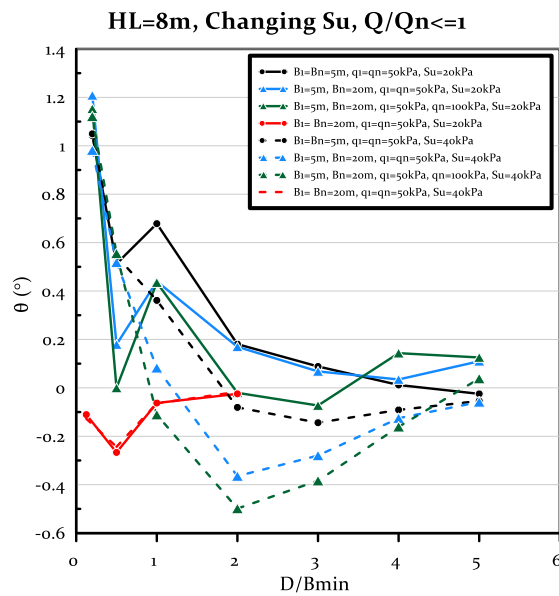
Σχήμα Β.14: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης $D/Bmin$ στον λόγο καθιζήσεων $Zsssi/Z$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Qn > 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($Hc=2m$ και είτε $Su=20kPa$ ή $Su=40kPa$).



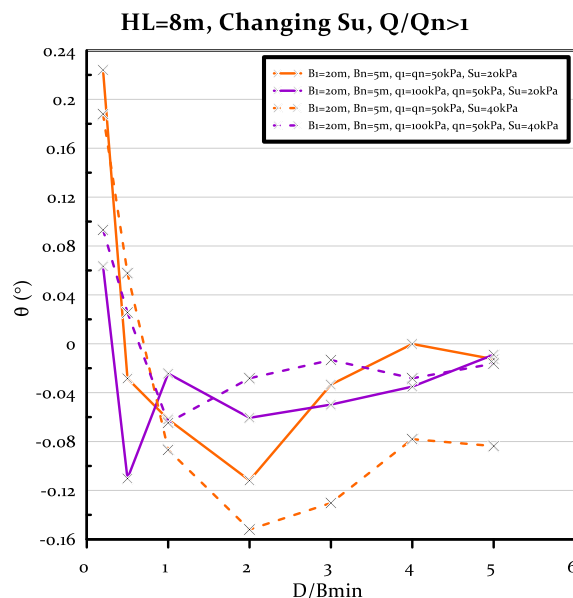
Σχήμα Β.15: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).



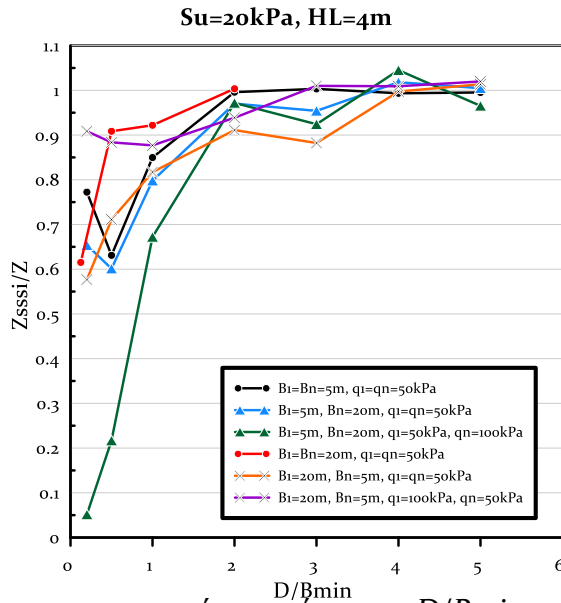
Σχήμα Β.16: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).



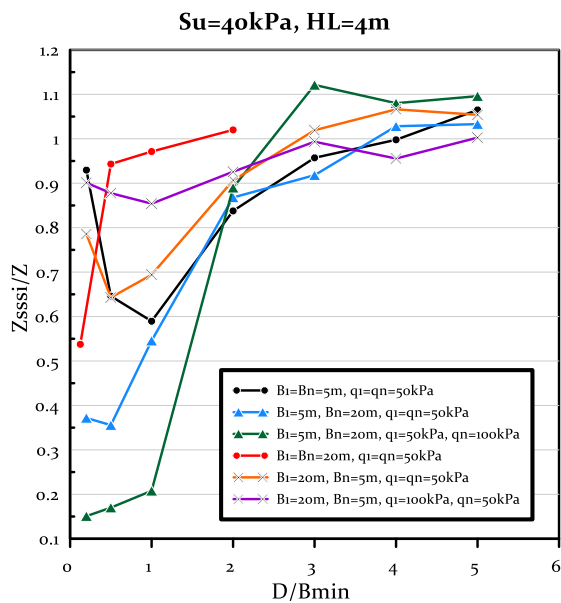
Σχήμα Β.17: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).



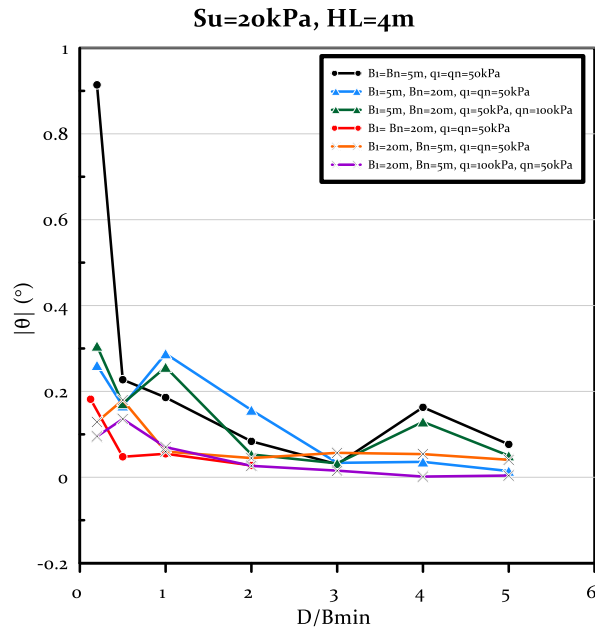
Σχήμα Β.18: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).



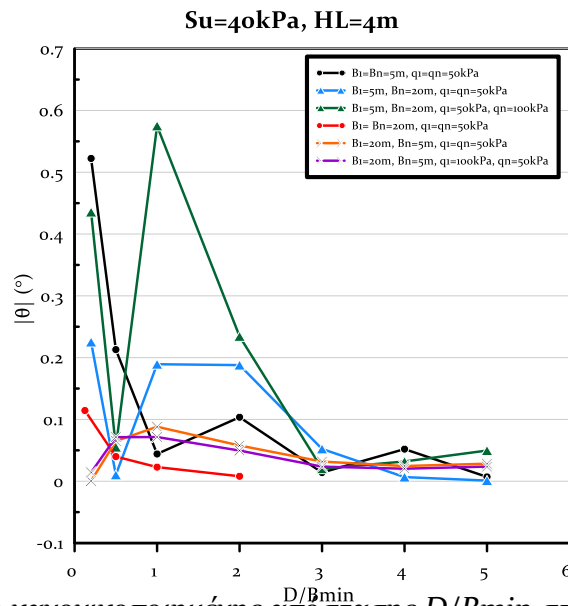
Σχήμα Β.19: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



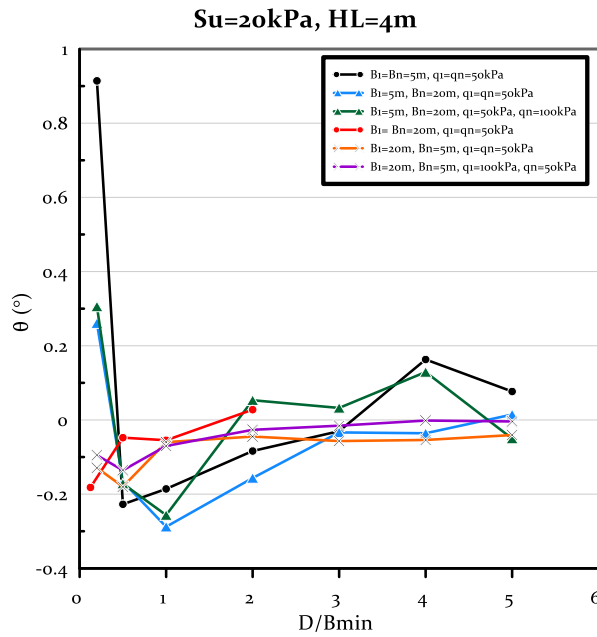
Σχήμα Β.20: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



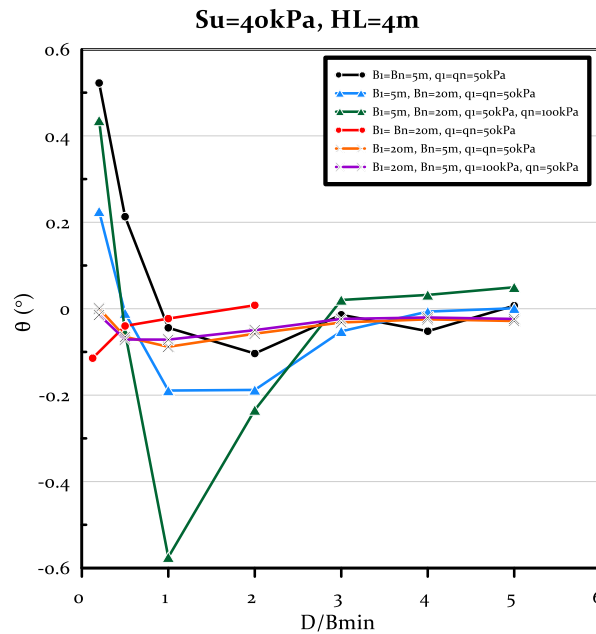
Σχήμα Β.21: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



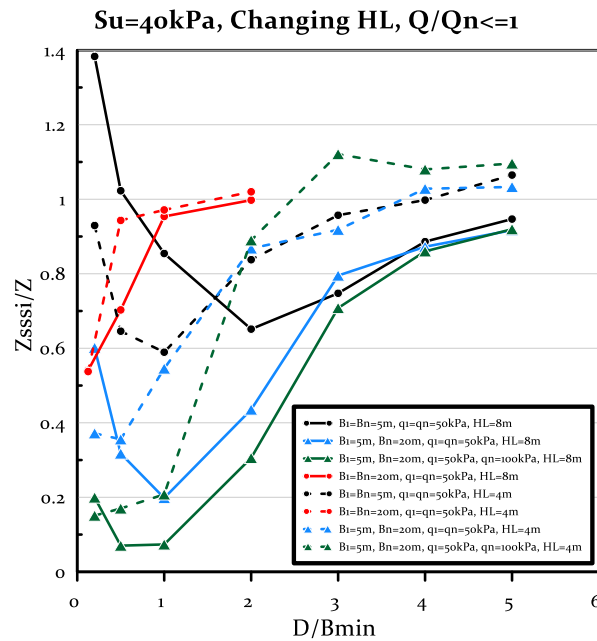
Σχήμα Β.22: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



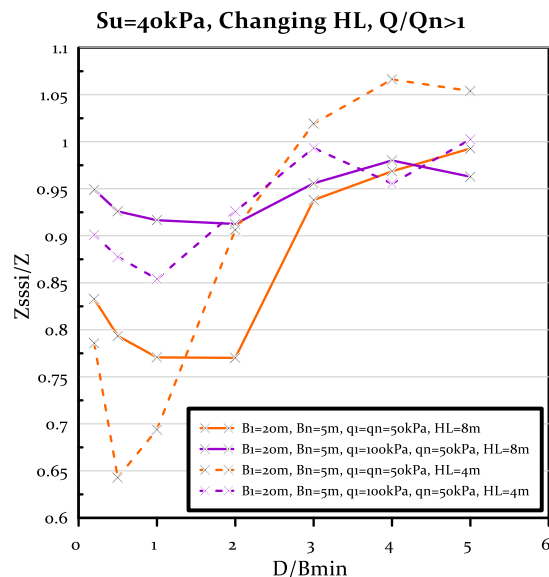
Σχήμα Β.23: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις τιμή στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=20kPa$).



Σχήμα Β.24: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις τιμή στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος παχιάς ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).

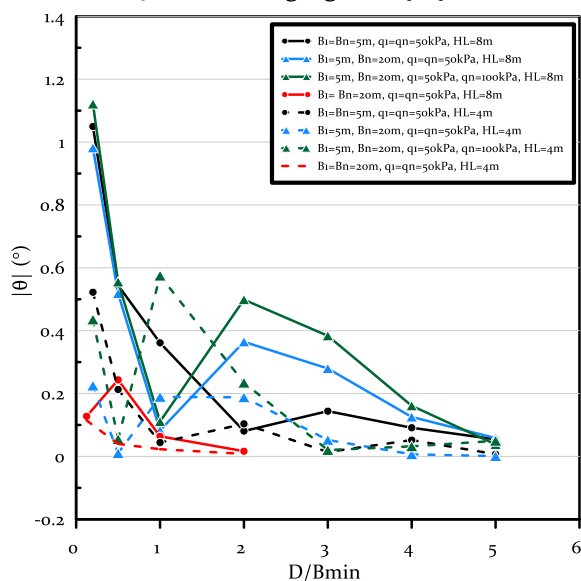


Σχήμα Β.25: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



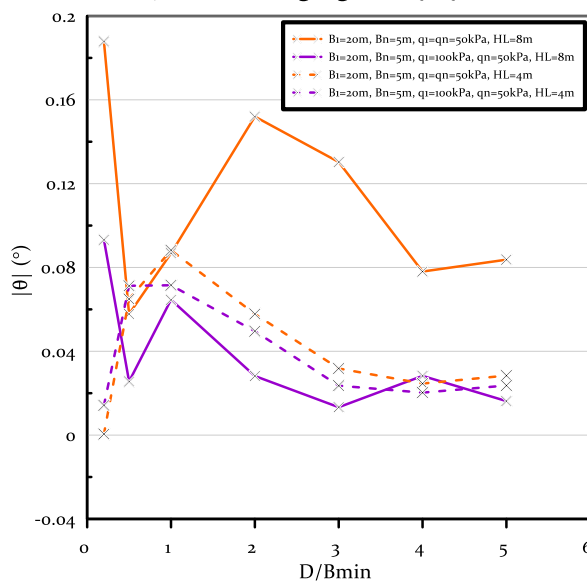
Σχήμα Β.26: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).

Su=40kPa, Changing HL, Q/Qn<=1

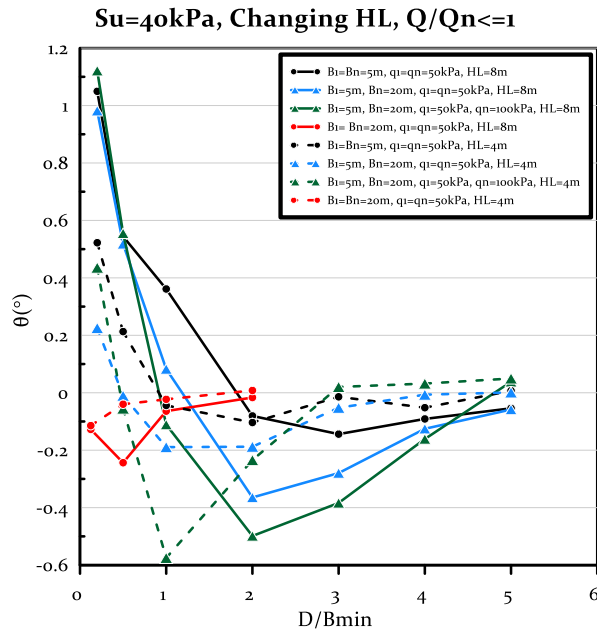


Σχήμα Β.27: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$ ή $H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).

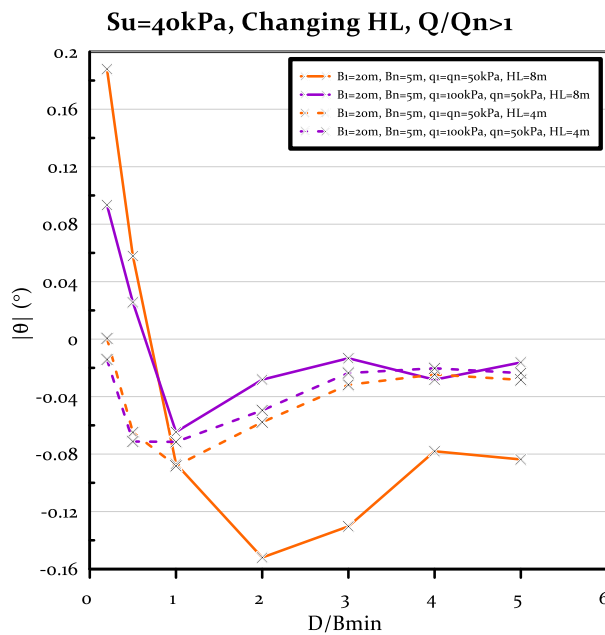
Su=40kPa, Changing HL, Q/Qn>1



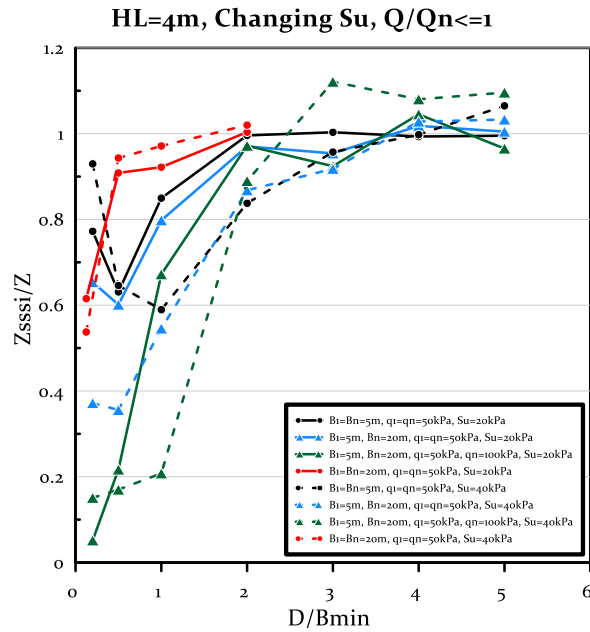
Σχήμα Β.28: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$ ή $H_L=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



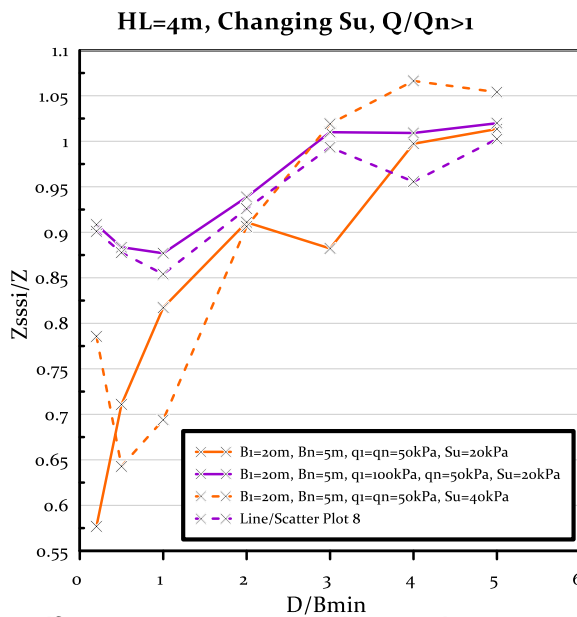
Σχήμα Β.29: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).



Σχήμα Β.30: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται είτε σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($HL=4m$ ή $HL=8m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και $S_u=40kPa$).

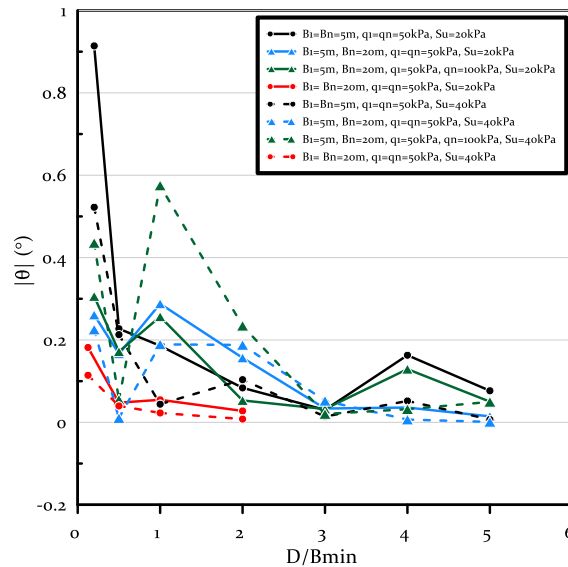


Σχήμα Β.31: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).



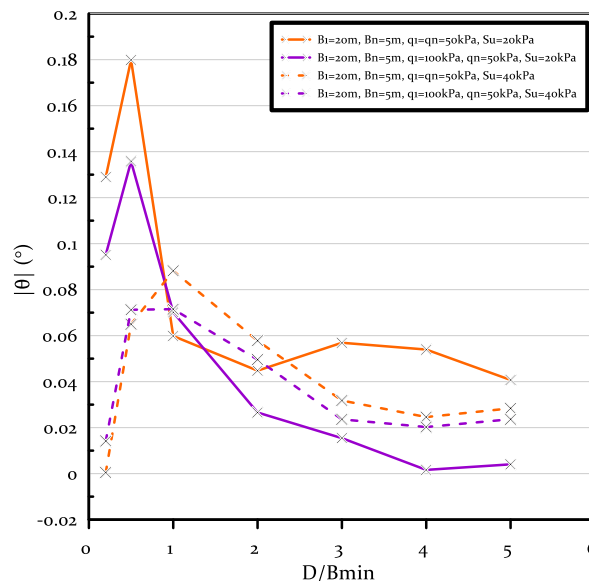
Σχήμα Β.32: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στον λόγο καθιζήσεων Z_{sssi}/Z κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).

HL=4m, Changing Su, Q/Qn<=1

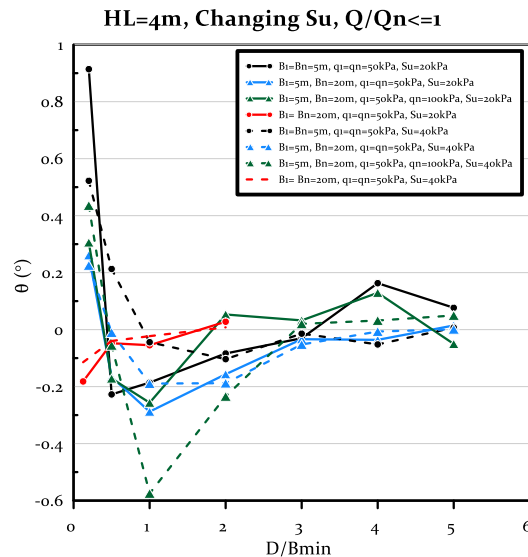


Σχήμα Β.33: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).

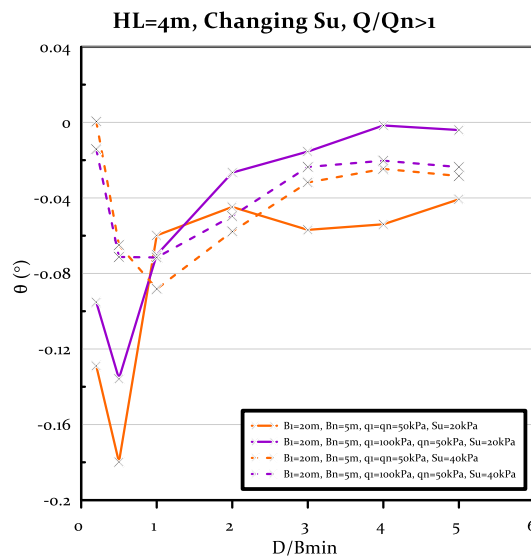
HL=4m, Changing Su, Q/Qn>1



Σχήμα Β.34: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).



Σχήμα Β.35: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις καθ'απόλυτη τιμή στροφές $|\theta|$ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n \leq 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).



Σχήμα Β.36: Επίδραση κανονικοποιημένης απόστασης D/B_{min} στις στροφές θ κάθε μέλους ζεύγους θεμελίων ίδιου ή διαφορετικού πλάτους (5 ή 20m) και ίδιου ή διαφορετικού φορτίου (50 ή 100 kPa) με λόγο $Q/Q_n > 1$, που εδράζονται σε δίστρωτο έδαφος ρευστοποιήσιμης άμμου ($H_L=4m$) με ασθενή επιφανειακή κρούστα αργίλου ($H_c=2m$ και είτε $S_u=20kPa$ ή $S_u=40kPa$).