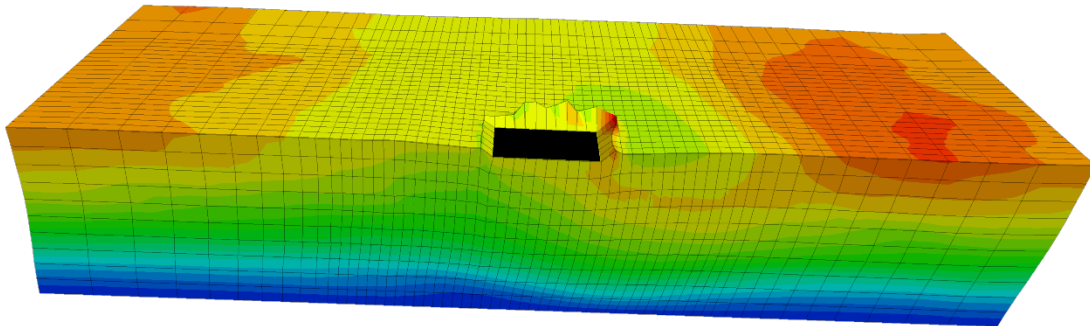




Διπλωματική Εργασία  
Ξυνοῦ Βασιλική  
Επιβλέπων  
Παπαδημητρίου Αχιλλέας  
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

*ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΤΡΟΠΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ  
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΠΟ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΕ  
ΕΛΑΦΟΣ ΜΕ ΗΠΙΑ ΚΛΙΣΗ*



*EFFECTIVENESS OF METHODS MITIGATING SEISMIC LIQUEFACTION UNDER  
EXISTING SQUARE STRUCTURES ON MILDLY INCLINED GROUND*

Diploma Thesis  
**Χυνου Vasiliki**  
Supervised by  
Papadimitriou Achilleas  
Associate Professor NTUA

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

## Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας έχουν συνεισφέρει πολλοί, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω. Το έργο αυτό δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την πολύτιμη συνδρομή τους για την υλοποίηση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παπαδημητρίου Αχιλλέα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και για την ανάθεση αυτής της εργασίας. Η εξαιρετική καθοδήγηση του καθώς και η άμεση ανταπόκριση του με βοήθησε στην οργάνωση και τη συγγραφή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βαλσαμή Αλέξανδρο, Διδάκτωρ ΕΜΠ, για την στήριξη που μου προσέφερε καθώς και για τις συμβουλές του στους προβληματισμούς μου σχετικά με τη διπλωματική εργασία, που με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε δυσκολία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους μου και κυρίως την φίλη μου Σαρλά Ευφροσύνη, για την συμπαράσταση της και τη συνεχή της ενθάρρυνση.

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1</b> .....	1
1.1. Αντικείμενο.....	1
1.2. Διάρθρωση εργασίας .....	2
<b>Κεφάλαιο 2</b> .....	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Ιστορικά περιστατικά οριζόντιας εξάπλωσης .....	3
2.3 Μεθοδολογίες εκτίμησης οριζόντιων μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης .....	12
2.4 Καθιζήσεις επιφανειακών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος .....	14
2.5 Βελτίωση ρευστοποιήσιμου εδάφους υπό υφιστάμενες κατασκευές.....	22
2.5.1. Πλαστικά Στραγγιστήρια .....	22
2.5.2. Χαλικοπάσσαλοι.....	29
2.5.3. Περιμετρικά τοιχία .....	33
<b>Κεφάλαιο 3</b> .....	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.1 Λογισμικό και καταστατικό προσομοίωμα.....	36
3.2 Γεωμετρία προσομοιώματος θεμελίου - εδάφους .....	39
3.2.1 Θεμέλιο .....	40
3.2.2 Κάνναβος .....	41
3.3 Προσομοίωση εδάφους .....	43
3.4 Διεγέρσεις.....	44
3.5. Προσομοίωση Βελτίωσης με Πλαστικά Στραγγιστήρια .....	45
3.6 Προσομοίωση Βελτίωσης με Περιμετρικά Τοιχία .....	49
<b>Κεφάλαιο 4</b> .....	53
4.1. Γενικά .....	53
4.2. Σημαντικές παράμετροι του προβλήματος.....	53
4.3. Τυπική απόκριση θεμελίου σε ρευστοποιήσιμη στρώση με ήπια κλίση .....	56
4.3.1. Απόκριση υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου .....	57
4.3.2. Απόκριση κεντρικά φορτιζόμενου θεμελίου .....	58
4.4. Επίδραση διέγερσης και φορτίου στην απόκριση θεμελίων .....	75
4.5. Οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο.....	78
4.6. Επίδραση κλίσης εδάφους στις μέσες καθιζήσεις θεμελίων .....	80

4.7. Επίδραση σχήματος θεμελίου στη σεισμική απόκριση.....	82
<b>Κεφάλαιο 5</b> .....	<b>86</b>
5.1. Γενικά .....	86
5.2. Τυπική απόκριση θεμελίων με πλαστικά στραγγιστήρια .....	88
5.3. Παραμετρική διερεύνηση απόκρισης θεμελίων με χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων .	118
5.4. Οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων με στραγγιστήρια σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο .....	128
5.5. Επίδραση κλίσης εδάφους στην καθίζηση θεμελίων με πλαστικά στραγγιστήρια.....	131
5.6. Επίδραση σχήματος θεμελίου στη σεισμική απόκριση τους με πλαστικά στραγγιστήρια .....	134
5.7. Αποδοτικότητα πλαστικών στραγγιστηρίων στη βελτίωση απόκρισης θεμελίου υπό οριζόντια εξάπλωση.....	139
<b>Κεφάλαιο 6</b> .....	<b>144</b>
6.1. Γενικά .....	144
6.2. Τυπική απόκριση θεμελίων με περιμετρικά τοιχία .....	146
6.3. Παραμετρική διερεύνηση απόκρισης θεμελίων με χρήση περιμετρικών τοιχίων .....	170
6.4. Οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων με περιμετρικά τοιχία σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο.....	184
6.5. Επίδραση κλίσης εδάφους στην καθίζηση θεμελίων με περιμετρικά τοιχία .....	187
6.6. Επίδραση σχήματος θεμελίου στη σεισμική απόκριση τους με περιμετρικά τοιχία.....	190
6.7. Αποδοτικότητα περιμετρικών τοιχίων στη βελτίωση απόκρισης θεμελίου υπό οριζόντια εξάπλωση.....	194
<b>Κεφάλαιο 7</b> .....	<b>202</b>
7.1. Τελικά συμπεράσματα.....	202
7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	204
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>206</b>

## Περίληψη

Η διεθνής βιβλιογραφία βρίθει δημοσιεύσεων που αφορούν στη σεισμική ρευστοποίηση, στις επιδράσεις της στα έργα Πολιτικού Μηχανικού, καθώς και σε τρόπους αποτροπής των επιδράσεων αυτών. Όμως η πλειονότητα των εργασιών της βιβλιογραφίας αφορά σε οριζόντιες ρευστοποιήσιμες στρώσεις. Στην προσπάθεια να καλυφτεί αυτό το κενό, η παρούσα εργασία μελετά την περίπτωση που η ρευστοποιήσιμη στρώση έχει ήπια κλίση. Ως έργο Πολιτικού Μηχανικού θεωρείται η επιφανειακή θεμελίωση, ενώ ως μέθοδοι αποτροπής της ρευστοποίησης επιλέγονται δύο που μπορούν να εφαρμοστούν ευχερώς ακόμη και σε υφιστάμενες κατασκευές: τα πλαστικά (προκατασκευασμένα) στραγγιστήρια και τα περιμετρικά τοιχία (σκυροδέματος ή από βαθιά εδαφική ανάμιξη).

Συγκεκριμένα, εδώ διερευνάται η σεισμική απόκριση επιφανειακού θεμελίου διαφορετικού σχήματος (τετραγωνικό και λωρίδα) και διαφορετικού πλάτους ( $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$ ), με και χωρίς τη βελτίωση του εδάφους με τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους. Εκτελέστηκαν 115 μη-γραμμικές δυναμικές 3D αναλύσεις απόκρισης θεμελίου επί ρευστοποιήσιμης στρώσης κλίσης  $i=2^\circ$  και πάχους  $10\text{m}$ , υπό τρεις (3) διαφορετικές αρμονικές διεγέρσεις. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC3D (Itasca, 2019), ενώ για την προσομοίωση της ρευστοποιήσιμης στρώσης χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA\_Sand (Andrianopoulos et al. 2010).

Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία είναι τα εξής:

- Η ήπια κλίση του εδάφους προκαλεί οριζόντια μετατόπιση του εδάφους, η οποία συμπαρασύρει εν μέρει και τα θεμέλια. Συγκεκριμένα, η οριζόντια μετατόπιση του θεμελίου προκύπτει πάντα μικρότερη από αυτή του ελεύθερου πεδίου στα πλατύτερα θεμέλια ( $B = 20\text{m}$ ), αλλά όχι πάντα στα στενότερα ( $B = 5\text{m}$ ).
- Κατά τη διάρκεια της οριζόντιας εξάπλωσης προκύπτουν επίσης καθιζήσεις των θεμελίων, αλλά και στροφές τους προς τα κατόντη, ακόμη και αν πρόκειται για κεντρικά φορτιζόμενα θεμέλια. Συγκριτικά με τις καθιζήσεις που θα είχε το ίδιο θεμέλιο υπό την ίδια διέγερση αν η εδαφική στρώση ήταν οριζόντια ( $i=0^\circ$ ), οι

καθιζήσεις κατά την οριζόντια εξάπλωση προκύπτουν συνήθως μικρότερες στα πλατύτερα θεμέλια ( $B = 20\text{m}$ ), αλλά όχι πάντα στα στενότερα ( $B = 5\text{m}$ ).

- Το σχήμα των θεμελίων (τετραγωνικό ή λωρίδα) παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκρισή τους. Συνοπτικά, οι οριζόντιες μετατοπίσεις, καθιζήσεις και στροφές τετραγωνικών θεμελίων προκύπτουν μικρότερες εκείνων των θεμελιολωρίδων όταν το πλάτος τους είναι μικρό ( $B = 5\text{m}$ ), ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν το πλάτος τους είναι μεγάλο ( $B = 20\text{m}$ ).
- Η χρήση περιμετρικών στραγγιστηρίων δεν επιφέρει ουσιαστική βελτίωση στην απόκριση του θεμελίου. Αντιθέτως, η τοποθέτηση καννάβου στραγγιστηρίων κάτω από όλη την κάτοψη οδηγεί σε μείωση των οριζόντιων μετατοπίσεων (22% - 44%) και καθιζήσεων (38% - 68%) θεμελίων, αλλά αυξάνει τις προς τα κατάντη στροφές του θεμελίου (48% - 120%). Όμως, η εφαρμογή τέτοιου καννάβου στραγγιστηρίων είναι πολύ δυσχερής, αν όχι αδύνατη, κάτω από υφιστάμενες κατασκευές.
- Η εφαρμογή τοιχίων από οπλισμένο σκυρόδεμα μέχρι το βάθος της ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι εξαιρετικά αποδοτική στη βελτίωση της απόκρισης του θεμελίου, καθώς οι οριζόντιες μετατοπίσεις του σχεδόν μηδενίζονται (μείωση κατά 92 - 98%), όπως και οι στροφές του, ενώ και οι καθιζήσεις μειώνονται πολύ σημαντικά (κατά 80 - 96%).
- Σχεδόν εξίσου αποτελεσματική είναι η εφαρμογή περιμετρικών τοιχίων από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους, με τις οριζόντιες μετακινήσεις να μειώνονται σημαντικά (κατά 58 - 91%), όπως και οι καθιζήσεις (κατά 41 - 83%), ενώ προκύπτει σημαντική μείωση και στις προς τα κατάντη στροφές (κατά 85 - 100%).
- Αντιθέτως, η εφαρμογή τοιχίων μέχρι το ήμισυ του βάθους της ρευστοποιήσιμης στρώσης δεν προσφέρει ουσιώδη βελτίωση στην απόκριση του θεμελίου.

Συνοπτικά, η οριζόντια εξάπλωση αποτελεί μια σύνθετη σεισμική διακινδύνευση για τις επιφανειακές θεμελιώσεις, που μπορεί να αντιμετωπιστεί πολύ ικανοποιητικά με περιμετρικά τοιχία (σκυροδέματος ή από βαθιά εδαφική ανάμιξη) που φθάνουν μέχρι το βάθος της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Η αποτελεσματικότητά τους μεγιστοποιείται για τετραγωνικά θεμέλια, λόγω της ευμενούς δράσης των τοιχίων στην εγκάρσια διεύθυνση.

## Abstract

The international literature includes a multitude of studies concerning seismic liquefaction, its effects on Civil Engineering works, as well as methods for mitigating these effects. However, most of these studies concern horizontal liquefiable ground. In an effort to close this gap, this Thesis studies the case that the liquefiable layer has a mild inclination. The Civil Engineering work of interest is a surface footing, and the study focuses on two liquefaction mitigation measures that can be applied easily even in existing structures: plastic (prefabricated) drains and perimeter walls (made of reinforced concrete or with deep soil mixing).

In particular, this work investigates the seismic response of a surface footing of different shapes (square or strip) and different widths ( $B = 5\text{m}$  and  $20\text{m}$ ), before or after the ground improvement with the two aforementioned methods. A total of 115 non-linear dynamic 3D analyses were performed for the response of a footing on a  $10\text{m}$ -thick liquefiable layer with an inclination  $i=2^\circ$ , under 3 different harmonic excitations. The analyses were performed with the finite difference code FLAC3D (Itasca, 2019), while for the simulation of the liquefiable layer the NTUA\_Sand (Andrianopoulos et al. 2010) constitutive model was used.

The basic conclusions driven from this study are the following:

- The mild inclination of the ground causes a horizontal soil displacement, which, in turn, creates a horizontal drift of the footings. The horizontal displacement of wide footings ( $B = 20\text{m}$ ) is generally always smaller than the free field horizontal soil displacement, but this is not always the case for narrow footings ( $B = 5\text{m}$ ).
- During lateral spreading, the footings also undergo settlement, as well as rotation towards the downstream side, even if they are centrally loaded. For wide footings ( $B = 20\text{m}$ ), these settlements are found smaller than what the same footings would undergo under the same excitations if the ground was horizontal ( $i=0^\circ$ ). This is not always the case for narrow footings ( $B = 5\text{m}$ ).

- The shape of the footings (square or strip) plays a significant role in their response. In summary, the horizontal displacements, settlements and rotations of square footings are smaller than those of strip footings when their width is small ( $B = 5\text{m}$ ), while the opposite occurs when their width is large ( $B = 20\text{m}$ ).
- The use of perimetric drains does not offer any improvement in the response of the footing. On the contrary, the implementation of a grid of drains under the whole footing leads to a reduction of horizontal displacements (by 22% - 44%) and settlements (by 38% - 68%) of the footing, but also to an increase of the downstream rotations (by 48% - 120%). However, such a grid of drains is very difficult, if not impossible, to implement under existing structures.
- The implementation of reinforced concrete walls reaching the depth of the liquefiable layer is extremely efficient in improving the response of the footing, since its horizontal displacements are almost nullified (reduction by 92 - 98%), as well as its rotations, while its settlements are very significantly reduced (by 80 - 96%).
- The implementation of full depth perimetric (soldier-pile) walls with deep soil mixing is similarly effective, since they reduce horizontal displacements significantly (by 58 - 91%). In addition, a significant reduction to settlements (by 41 - 83%) and downstream rotations (by 85 - 100%) is attained.
- On the contrary, the implementation of perimetric walls reaching half the depth of the liquefiable layer does not offer any valuable improvement in the response of the footing.

In summary, lateral spreading is a complex seismic risk for surface foundations, which may be mitigated very satisfactorily with perimetric walls (diaphragm walls or soldier-pile walls of deep soil mixing) that reach the depth of the liquefiable layer. Their effectiveness is maximum in square footings, due to the beneficial operation of the walls in the transverse direction.



## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

### **1.1. Αντικείμενο**

Η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται σε κορεσμένα χαλαρά εδάφη και κατά το οποίο η αντοχή και η δυσκαμψία μειώνονται σημαντικά (σχεδόν μηδενίζονται) κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης. Οι συνέπειες της ρευστοποίησης μπορεί να είναι από ενοχλητικές έως και καταστροφικές για μια κατασκευή. Συνεπώς, η κατασκευή τεχνικών έργων σε περιοχές με κίνδυνο ρευστοποίησης λόγω σεισμού είναι σύμφωνα με τον EC8 μη αποδεκτή, χωρίς πρώτα τη βελτίωση εδάφους (ή την εκπόνηση ειδικής μελέτης θεμελίωσης).

Όμως, καθώς η ρευστοποίηση ως φαινόμενο άρχισε να καταγράφεται από το 1960 και μετά, υπάρχει πληθώρα υφιστάμενων (παλαιών) κατασκευών θεμελιωμένων σε ρευστοποιήσιμες στρώσεις χωρίς να έχει ληφθεί οποιαδήποτε μέριμνα έναντι αυτής. Και αυτό επιβεβαιώνεται επανειλημμένα σε μικροζωνικές μελέτες αστικών κέντρων, για τις περιοχές πλησίον θαλασσιών, παραλίμνιων ή παραποτάμιων μετώπων. Το πρόβλημα είναι μεγάλο, καθώς οι διαθέσιμες μέθοδοι επέμβασης στην κατασκευή, στη θεμελίωσή της ή υπό αυτήν για να αντιμετωπιστεί η ρευστοποίηση ή όχι οι συνέπειές της είναι λίγες, δεδομένης της γειτονιάς με παρακείμενες κατασκευές.

Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία εκτιμά ποσοτικά τις συνέπειες της ρευστοποίησης στην περιοχή υφιστάμενων κατασκευών θεμελιωμένων επιφανειακά σε ελαφρώς κεκλιμένο ρευστοποιήσιμο έδαφος, μια περίπτωση δυσμενέστερη ενός οριζόντιου εδάφους, καθώς η κατασκευή καλείται να αντιμετωπίσει και την οριζόντια μετατόπιση του εδάφους (οριζόντια εξάπλωση). Επιπλέον, η εργασία αυτή στοχεύει και στην ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας δύο (2) μεθόδων βελτίωσης του εδάφους, τα πλαστικά (προκατασκευασμένα) στραγγιστήρια και τα περιμετρικά τοιχεία (χαμηλής διαπερατότητας), που μπορούν να εφαρμοστούν σε υφιστάμενες κατασκευές.

## 1.2. Διάρθρωση εργασίας

Συνολικά, η παρούσα εργασία αποτελείται από επτά (7) Κεφάλαια, ήτοι:

**Κεφάλαιο 1:** Παρουσιάζεται το αντικείμενο, καθώς και η διάρθρωση της εργασίας.

**Κεφάλαιο 2:** Γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση σε βασικές δημοσιεύσεις που αφορούν έρευνες σχετικά με το φαινόμενο της ρευστοποίησης σε οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια.

**Κεφάλαιο 3:** Συνοψίζεται η αριθμητική μεθοδολογία προσομοίωσης της σεισμικής απόκρισης ενός τετραγωνικού θεμελίου και μιας θεμελιολωρίδας σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με μικρή κλίση 2<sup>ο</sup>. Επιπλέον, περιγράφονται οι βασικές παράμετροι του προβλήματος που διαφοροποιούν τις αναλύσεις, καθώς και η μέθοδος προσομοίωσης των δύο προαναφερθέντων μεθόδων βελτίωσης εδάφους.

**Κεφάλαιο 4:** Περιγράφονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν προκειμένου να εξεταστεί η σεισμική απόκριση τετραγωνικών θεμελίων και θεμελιολωρίδων σε (μη βελτιωμένη) ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση με ήπια κλίση.

**Κεφάλαιο 5:** Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της απόκρισης των θεμελίων με χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων ως μέσου βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης του υποκείμενου εδάφους, και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που αφορούν τον ίδιο συνδυασμό θεμελίου-δόνησης όταν το έδαφος είναι ρευστοποιήσιμο (από Κεφ.4).

**Κεφάλαιο 6:** Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της απόκρισης των θεμελίων σε βελτιωμένο έδαφος με περιμετρικά τοιχία διαφορετικών τύπου και βάθους, καθώς και η ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητάς τους έναντι της απόκρισης όταν το έδαφος είναι ρευστοποιήσιμο (από Κεφ.4).

**Κεφάλαιο 7:** Συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Αναδρομή

### 2.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση σε βασικές δημοσιεύσεις που αφορούν έρευνες σχετικές με τα επακόλουθα της σεισμικής ρευστοποίησης σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο. Αρχικά θα γίνει αναφορά σε ιστορικά περιστατικά πλευρικής εξάπλωσης και στις εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού οριζοντίων μετατοπίσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Ύστερα θα περιγραφούν έρευνες που αφορούν στην καθίζηση των επιφανειακών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος καθώς και την ενίσχυση εδάφους σε υφιστάμενες κατασκευές.

### 2.2 Ιστορικά περιστατικά οριζόντιας εξάπλωσης

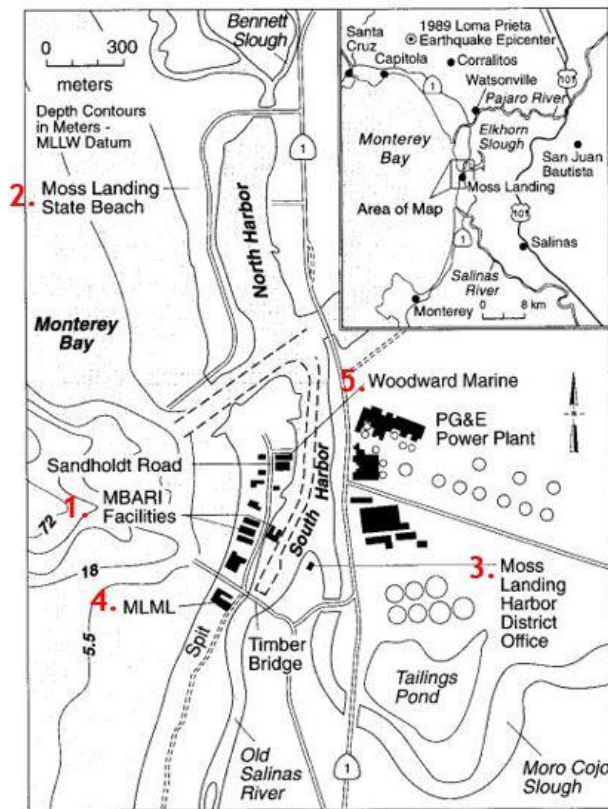
Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά καταγεγραμμένα ιστορικά περιστατικά οριζόντιας εξάπλωσης λόγω σεισμικής ρευστοποίησης σε υφιστάμενα κτίρια, όμως σε λίγα έχει γίνει ενδελεχής έρευνα για τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια του σεισμού.

Μια από τις δημοσιεύσεις όπου γίνεται συστηματική έρευνα είναι των **Boulanger et al (1997)** οι οποίοι μελέτησαν το φαινόμενο στην περιοχή του Moss Landing στην California.

Στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζεται ο χάρτης και συγκεκριμένα τα σημεία όπου εξετάστηκαν από τους ερευνητές.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών CPT και SPT οι ερευνητές έδειξαν ότι και στις πέντε περιοχές όπου παρατηρήθηκε οριζόντια εξάπλωση το έδαφος αποτελούνταν κυρίως από άμμο και σε χαμηλότερα βάθη μίγματα άμμου με άργιλο, τα οποία όμως είναι επιρρεπή σε ρευστοποίηση. Ύστερα από ένα σεισμό μεγέθους 7.0 Richter το έδαφος ρευστοποιήθηκε και στην περιοχή όπου παρατηρήθηκαν εντονότερα φαινόμενα ήταν στη Moss Landing

Marine Laboratory με οριζόντια εξάπλωση των κατασκευών κατά 1.00-1.30m από την αρχική τους θέση (Σχήμα 2.2).

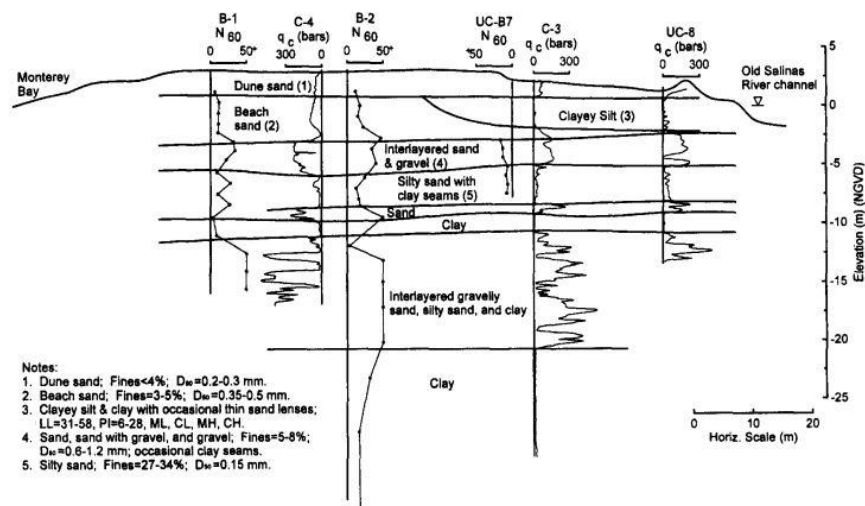


Σχήμα 2.1: Περιοχή του Moss Landing και εντοπισμός πέντε θέσεων οριζόντιας εξάπλωσης (Boulanger et al, 1997)



**Σχήμα 2.2:** Οριζόντια εξάπλωση κατασκευής στη περιοχή Moss Landing Marine Laboratory (περιοχή #4, *Boulanger et al, 1997*)

Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται η εδαφική τομή από Ανατολικά προς τα Δυτικά, στην οποία φαίνεται η έντονη παρουσία του στρώματος της άμμου. Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής έδειξαν ότι η παρουσία της αργίλου (Clayey Silt) θα μπορούσε να συμβάλει στην ρευστοποίηση του εδάφους, κατά τη διάρκεια του σεισμού.



**Σχήμα 2.3:** Εδαφική τομή Ανατολικά - Δυτικά στη Νότια πλευρά του MLMLS (*Boulanger et al, 1997*)

Οι **Boulanger et al (1997)** τόνισαν επίσης ότι το είδος της θεμελίωσης της κάθε κατασκευής ήταν ένας βασικός παράγοντας στην απόκριση της. Συγκεκριμένα, κτίρια με ενιαίες

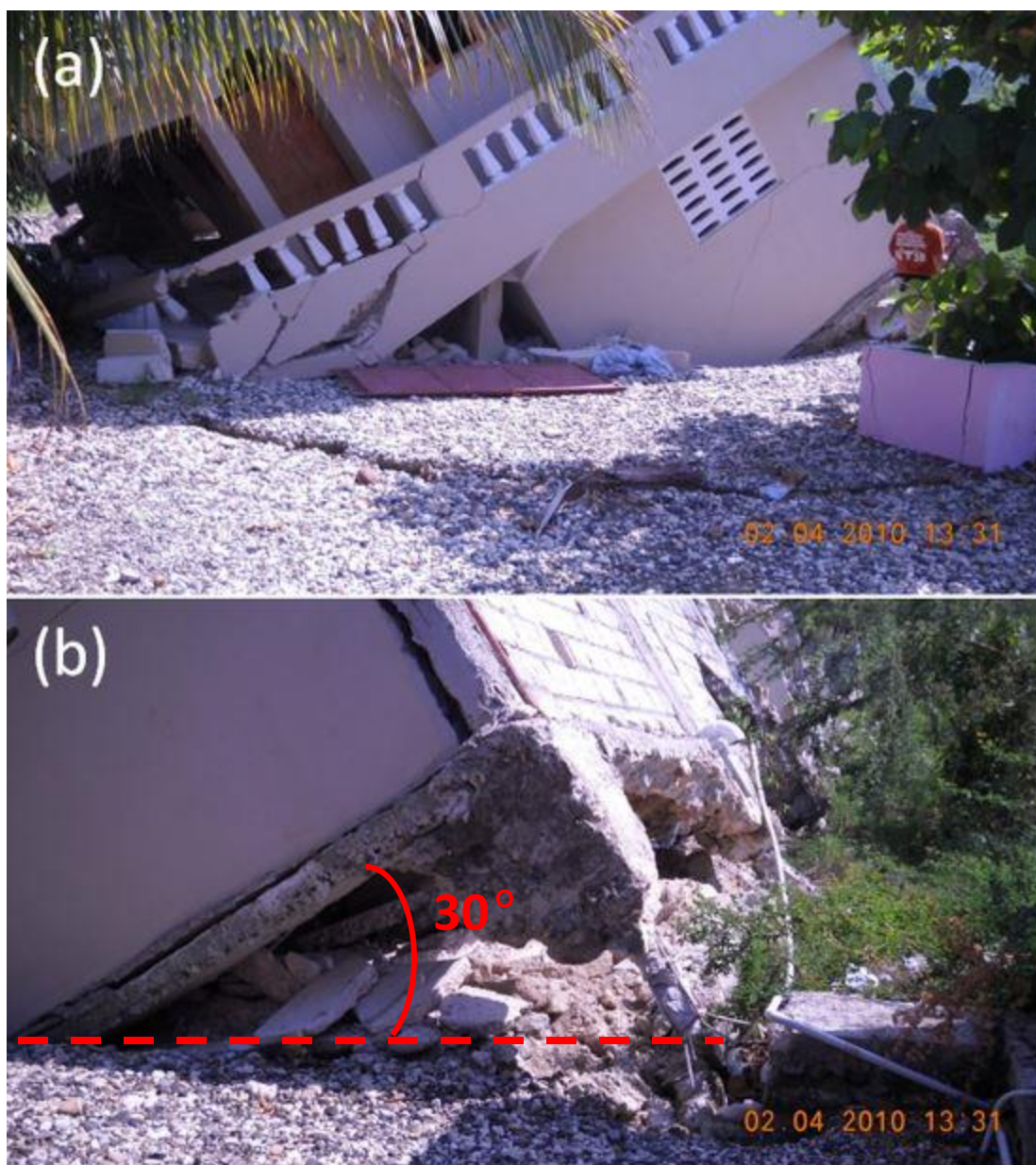
επιφανειακές θεμελιώσεις αποκρίθηκαν πολύ καλύτερα εν συγκρίσει με κτίρια σε μεμονωμένα θεμέλια. Στην περιοχή MBARI, η αποβάθρα η οποία ήταν θεμελιωμένη σε πασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος αποκρίθηκε πολύ καλά με μηδενικές οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις παρά την οριζόντια μετατόπιση 8-25cm του γειτονικού δρόμου. Αντίθετα, αρκετές αποβάθρες με ξύλινους πασσάλους υπέστησαν τεράστιες παραμορφώσεις λόγω της οριζόντιας εξάπλωσης στο γειτονικό έδαφος, όπως για παράδειγμα η προβλήτα Gravelle's Boatyard με οριζόντια εξάπλωση 0.4m.

Οι **Olson et al (2011)** περιγράφουν το φαινόμενο της ρευστοποίησης και της πλευρικής εξάπλωσης στην Αϊτή τον Ιανουάριο του 2010 μετά το σεισμός με μέγεθος  $M = 7.0$ , που προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές στη περιοχή Port-au-Prince και πιο συγκεκριμένα ρευστοποίηση στην ακτή Gulf of Gonâve. Στο **Σχήμα 2.4**, παρουσιάζεται ένα ξενοδοχείο το οποίο έχει πάρει κλίση, ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται ρωγμές λόγω οριζόντιας εξάπλωσης στο έδαφος και με πράσινο χρώμα θέσεις που εμφανίστηκαν κώνοι άμμου (sand boils), δηλαδή μικρές προς τα άνω διηθήσεις ρευστοποιημένου εδάφους προς την επιφάνεια, μέσω προϋπαρχόντων ή μη ρωγμών στο έδαφος, που αποτίθενται σχηματίζοντας μικρούς κρατήρες και οδηγούν σε υποσκαφή του υποκείμενου εδάφους. Από δοκιμή DCPT προέκυψε ότι το έδαφος στην περιοχή όπου υπήρξαν αστοχίες αποτελείται από χαλαρή άμμο στην επάνω στρώση και από κάτω μια πιο πυκνή άμμο με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στο ύψος της θάλασσας (0.6-1.2m κάτω από την επιφάνεια).



Σχήμα 2.4: Αστοχία ξενοδοχείου και εδάφους λόγω ρευστοποίησης (Olson et al, 2011)

Πιο συγκεκριμένα, το ξενοδοχείο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 υπέστη αστοχία φέρουσας ικανότητας και έντονη στροφή. Η θεμελίωση του αποτελούνταν από επιφανειακά θεμέλια χαμηλής ποιότητας σκυροδέματος. Κατά τη διάρκεια του σεισμού, ένα υποστύλωμα του πρώτου ορόφου αστόχησε, και αυτό σε συνδυασμό με το ρευστοποιημένο έδαφος θεμελίωσης, οδήγησε την κατασκευή σε καθίζηση 1.5 m και στροφή 30° προς τα βόρεια. Η στροφή προς τη βόρεια κατεύθυνση θα μπορούσε να συνδέεται και με το γεγονός ότι αυτή είναι η κατάντη πλευρά της παραλιακής οριζόντιας εξαίπλωσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 με κόκκινο χρώμα.

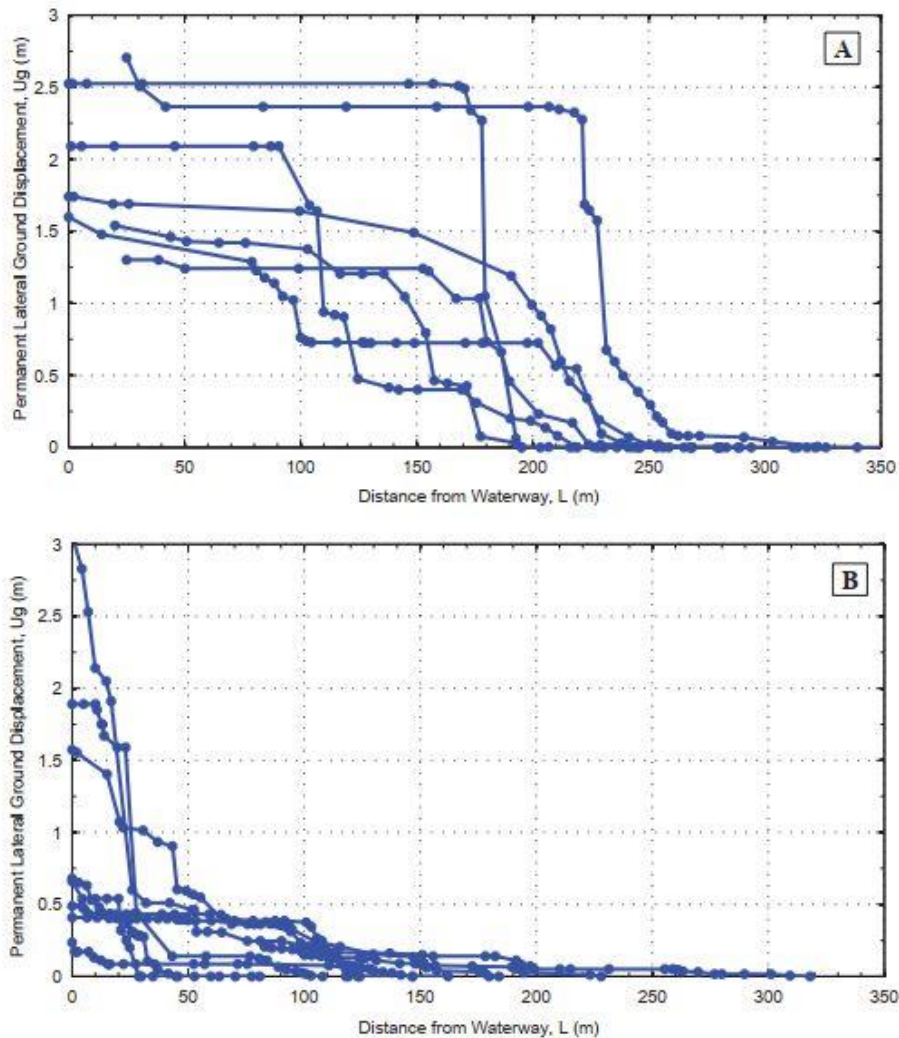


Σχήμα 2.5: Ξενοδοχείο σε αστοχία και υπό κλίση (Olson et al, 2011). (a) Εικόνα από την ΒΑ γωνία; (b) Εικόνα από την ΝΑ γωνία.

Ένα άλλο ιστορικό περιστατικό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι αυτό που παρουσιάζουν οι **Cubrinovski et al (2012)** όπου παρατηρήθηκε εκτενής ρευστοποίηση σε μια περιοχή με χαλαρά αμμώδη χαρακτηριστικά στη γειτονιά ποταμών (Καίαιοι και Avon River). Τέσσερις σεισμοί σε διάστημα ενός έτους έπληξαν τη Νοτιότερη πόλη της Νέας Ζηλανδίας, Christchurch, μεγεθών  $M = 5.3$  έως  $7.1$ , με τις σημαντικότερες βλάβες



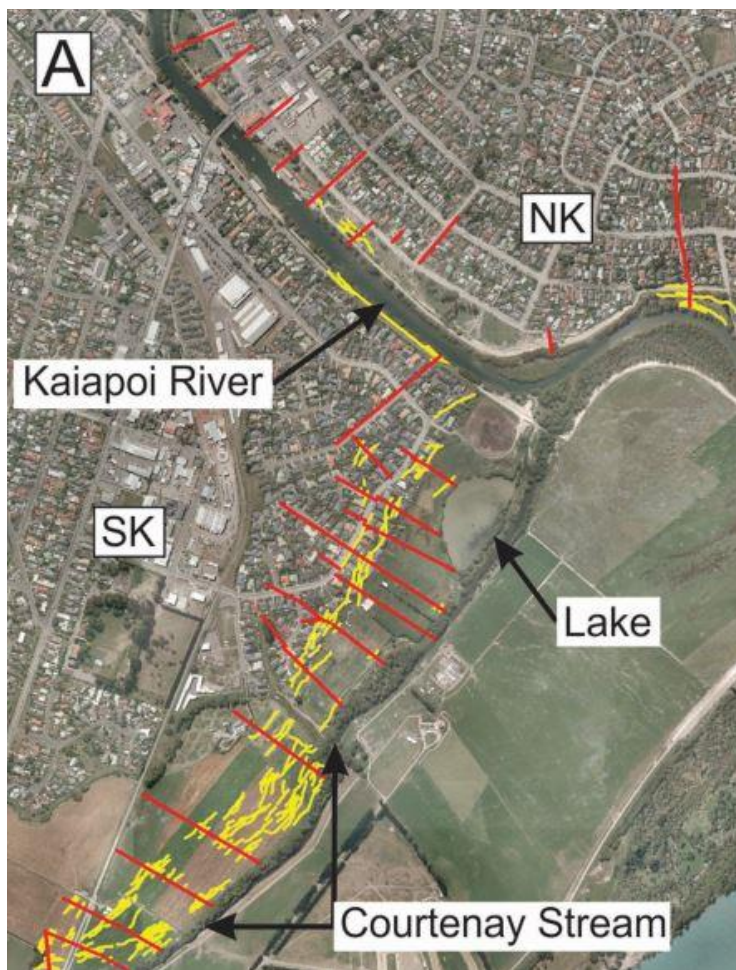
να επικεντρώνονται ακριβώς στη γειτονία των ποταμών. Στο **Σχήμα 2.6** παρουσιάζεται η οριζόντια μετατόπιση της νότιας και βόρειας πλευράς του ποταμού Καίαιοι συναρτήσει της απόστασης από την όχθη του ποταμού, όπου και φαίνεται η αρκετά μεγαλύτερη ζώνη επιρροής της οριζόντιας εξάπλωσης στη νότια πλευρά.



**Σχήμα 2.6:** Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης με την απόσταση από το ποτάμι Καίαιοι **A** Νότια πλευρά; **B** Βόρεια πλευρά (Cubrinovski et al, 2012).

Οι αρκετά μεγαλύτερου εύρους μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν στην νότια πλευρά του ποταμού (SK) φαίνεται και στο **Σχήμα 2.7**, όπου με κίτρινο χρώμα παρουσιάζονται οι εδαφικές ρωγμές. Πρακτικά ένα μέρος της Νότιας πλευράς μετακινήθηκε σαν ένα στερεό

μπλοκ προκαλώντας ρωγμές 0.5 m-1.5 m σε απόσταση μέχρι και 125 m-200 m από τον ποταμό.

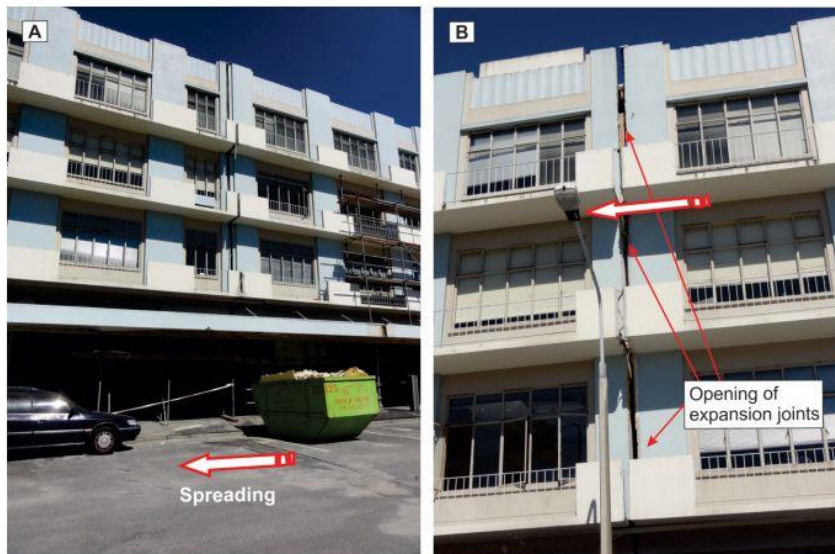


*Σχήμα 2.7: Αεροφωτογραφία υποδεικνύοντας με κόκκινο τα σημεία που έγιναν οι επιτόπου μετρήσεις και με κίτρινο τις οριζόντιες εδαφικές ρωγμές (Cubrinovski et al, 2012) .*

Οι επιπτώσεις όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 2.8** ήταν σοβαρές με μόνιμες στροφές και αστοχίες στη θεμελίωση των κατασκευών, ενώ παρόμοια φαινόμενα εντοπίστηκαν και στην περιοχή του ποταμού Αvon. Στο **Σχήμα 2.9** διακρίνεται το άνοιγμα αρμού κατασκευής μεταξύ κτιρίων λόγω οριζόντιας εξάπλωσης.



Σχήμα 2.8: Αστοχίες κατασκευής λόγω οριζόντιας εξάπλωσης στη Νότια πλευρά του ποταμού Κάιαιοι στον σεισμό του Σεπτεμβρίου 2010 (Cubrinovski et al, 2012).



Σχήμα 2.9: Απόκριση κτιρίου σε οριζόντια εδαφική μετατόπιση κοντά στον ποταμό Άβον (Cubrinovski et al, 2012).

## 2.3 Μεθοδολογίες εκτίμησης οριζόντιων μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης

Οι μεθοδολογίες εκτίμησης της πλευρικής εξάπλωσης είναι εμπειρικές και βασίζονται σε μετρήσεις από ιστορικά περιστατικά ή/και παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις. Η πολυπλοκότητά τους εξαρτάται από το πλήθος και το είδος των παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτές. Στην παρούσα εργασία, η οριζόντιας εξάπλωση που διερευνάται είναι εκείνη που αφορά σε ήπια κεκλιμένη εδαφική επιφάνεια, και όχι εκείνη που αφορά σε εγγύτητα με αναβαθμό. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα από μεθοδολογίες εκτίμησης της οριζόντιας μετατόπισης του εδάφους  $D_H$ .

Η πρώτη είναι η σχέση των **Youd et al (2002)** η οποία βασίστηκε σε μία εκτενή βάση δεδομένων από ιστορικά περιστατικά. Μη έχοντας διαθέσιμα στοιχεία έντασης της διέγερσης, χρησιμοποιούν σεισμολογικές παραμέτρους: το μέγεθος  $M_W$  και η επικεντρική απόσταση  $R$ :

$$\log D_H = -16.213 + 1.532M - 1.406 \log R^* - 0.012R + 0.338 \log S + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D_{50_{15}} + 0.1mm)$$

Όπου:

	Μονάδες	Ορισμός
$D_H$	m	Οριζόντια μετατόπιση εδάφους
$M_W$	-	Μέγεθος (σεισμικής ροπής) του σεισμού (δεδομένα για $M \geq 6.4$ )
$R$	km	(Οριζόντια) επικεντρική απόσταση
$T_{15}$	m	Συνολικό πάχος μη συνεκτικών εδαφικών στρώσεων με $(N_1)_{60} < 15$
$F_{15}$	%	Μέση τιμή του ποσοστού λίκος στις στρώσεις πάχους $T_{15}$
$(D_{50})_{15}$	mm	Μέση τιμή κοκκομετρικής διαμέτρου $D_{50}$ στις στρώσεις πάχους $T_{15}$
$S$	%	Μέση κλίση της επιφάνειας του εδάφους

$$\text{Και } R^* = R + 10^{[0.89M_w - 5.64]}$$

Η δεύτερη είναι η σχέση των **Valsamis et al (2012)**, η οποία βασίστηκε σε εκτενή βάση δεδομένων από αριθμητικές αναλύσεις και επαληθεύτηκε και με 16 δημοσιευμένα πειράματα οριζόντιας εξάπλωσης σε φυγοκεντριστή. Στη σχέση αυτή ενσωματώνεται άμεσα η ένταση της διέγερσης μέσω της μέσης επιτάχυνσης του σεισμού  $a_{max}$ , όπως φαίνεται εδώ:

$$D_H = 2.1 \left( \frac{a_{mean}}{g} \right)^{0.5} [T(N_{cyc} - N_L)]^{0.8} [(N_{1.60})_{cs}]^{-1.0} [H_{tot}] [\tan(i)]^{0.5} (1 - FC)^{3.0}$$

Όπου:

	Μονάδες	Ορισμός
$D_H$	m	Πλευρική μετατόπιση εδάφους
$a_{mean}$	m/s <sup>2</sup>	Μέση επιτάχυνση του σεισμού (όπου $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ )
T	sec	Ιδιοπερίοδος της σεισμικής δόνησης
$N_{cyc}$	-	Αριθμός σημαντικών κύκλων δόνησης
NL	-	Αριθμός κύκλων δόνησης μέχρι τη ρευστοποίηση
$(N_{1.60})_{cs}$	-	Διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT ισοδύναμης καθαρής άμμου
$H_{tot}$	m	Το συνολικό πάχος των στρώσεων που ρευστοποιούνται
i	deg	Η κλίση της επιφάνειας του εδάφους
FC	-	Ποσοστό λεπτόκοκκων (ως δεκαδικός)

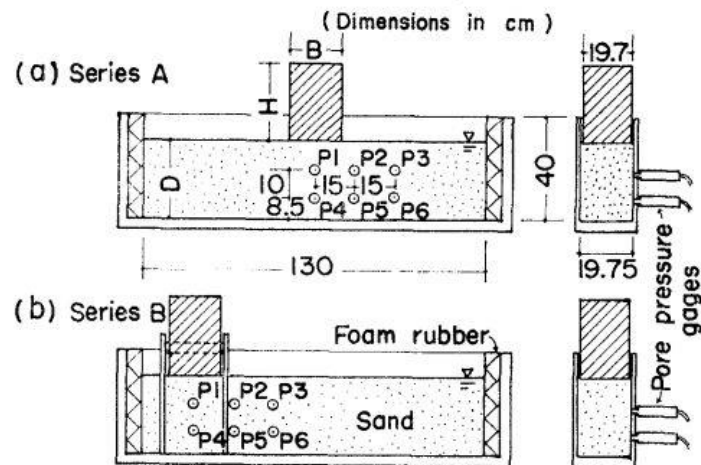
Υπογραμμίζεται εδώ ότι οι ανωτέρω σχέσεις, αλλά και όλες οι υπόλοιπες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, αφορούν αποκλειστικά σε οριζόντια εξάπλωση εδάφους χωρίς την παρουσία κτιρίων. Για το σκοπό αυτό, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της οριζόντιας μετατόπισης κτιρίων που βρίσκονται σε οριζόντια εξαπλούμενο έδαφος, καθώς είναι ασαφές αν τα κτίρια αυτά μετακινούνται λιγότερο, περισσότερο ή το ίδιο με το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο.

## 2.4 Καθιζήσεις επιφανειακών θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος

Η ρευστοποίηση αναφέρεται στη (σχεδόν) ολοκληρωτική απώλεια αντοχής του εδάφους λόγω ανάπτυξης υπερπίεσεων των πόρων κατά τη σεισμική φόρτιση. Η εμφάνισή της στη γειτονιά κτιρίων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες, όπως για παράδειγμα αστοχία θεμελίωσης λόγω της μείωσης της φέρουσας ικανότητας ή τη συγκέντρωση μεγάλων καθιζήσεων. Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία δεν εντοπίστηκε κάποιο άρθρο που να αφορά σε επιφανειακές θεμελιώσεις σε κεκλιμένο ρευστοποιήσιμο έδαφος (όπου αναμένονται και οριζόντιες μετατοπίσεις και στροφές, π.χ. **Σχήμα 2.5**). Έτσι εδώ παρουσιάζεται η αρθρογραφία που εντοπίστηκε για θεμέλια σε οριζόντιο ρευστοποιήσιμο έδαφος.

Οι **Yoshimi&Tokimatsu (1977)** διερεύνησαν με δοκιμές σε σεισμική τράπεζα την ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων σε κορεσμένα, μη συνεκτικά εδάφη κοντά σε υφιστάμενες κατασκευές υπό την επίδραση της οριζόντιας δόνησης, ενώ επικεντρώθηκαν στις προκαλούμενες καθιζήσεις στις κατασκευές. Εξετάστηκαν δύο προσομοιώματα, εκ των οποίων στο πρώτο η κατασκευή εδράζεται χωρίς βελτίωση στο ρευστοποιήσιμο έδαφος, ενώ στο δεύτερο τοποθέτησαν ένα ζεύγος ξύλινων άκαμπτων τοιχίων περιμετρικά της κατασκευής και μέχρι το τέλος της ρευστοποιήσιμης στρώσης (βλ. **Σχήμα 2.10**). Στη βάση των δοχείων τοποθετήθηκε μια στρώση από χονδρόκοκη άμμο και από πάνω άμμος Toyoura με ειδικό βάρος  $2.65 \text{Mg/m}^3$ . Και στα δύο πλευρικά τοιχώματα τοποθετήθηκε αφρός από καουτσούκ για να μην παρεμποδίζεται η διατμητική παραμόρφωση της άμμου κατά τη δόνηση.

Για την καταγραφή των πιέσεων πόρων τοποθετήθηκαν έξι αισθητήρες (P1 έως P6) κάτω και δίπλα από την κατασκευή. Τα κύρια αποτελέσματα των πειραμάτων των **Yoshimi & Tokimatsu (1977)** συνοψίζονται παρακάτω.



**Σχήμα 2.10:** Διατάξεις προσομοιωμάτων ρευστοποίησης εδάφους και κατασκευής, χωρίς (Series A) και με περιμετρικά τοιχία (Series B) (Yoshimi & Tokimatsu, 1977)

Συγκεκριμένα από τις τιμές των μέγιστων λόγων υπερπίεσης των πόρων, όπως καταγράφηκαν στα πειράματα και παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.11**, διαπιστώνεται:

- Η ανάπτυξη αρκετά μικρότερων υπερπίεσεων του νερού των πόρων κάτω από το θεμέλιο, σε αντίθεση με την πλήρη ρευστοποίηση μακριά από την κατασκευή (free field)
- Τα μεγάλα φορτία κατασκευής μειώνουν τις αναπτυσσόμενες υπερπίεσεις πόρων, π.χ. με σύγκριση του πειράματος A20 με φορτίο  $q=0.20\text{t/m}^2$  και του πειράματος A60 με  $q=0.60\text{t/m}^2$ , (σημειώνονται με κόκκινο χρώμα).
- Τα περιμετρικά τοιχία μείωσαν ακόμα περισσότερο τις υπερπίεσεις πόρων καθώς και τις καθιζήσεις κάτω από την κατασκευή (Πείραμα B20 που σημειώνεται με πράσινο χρώμα).

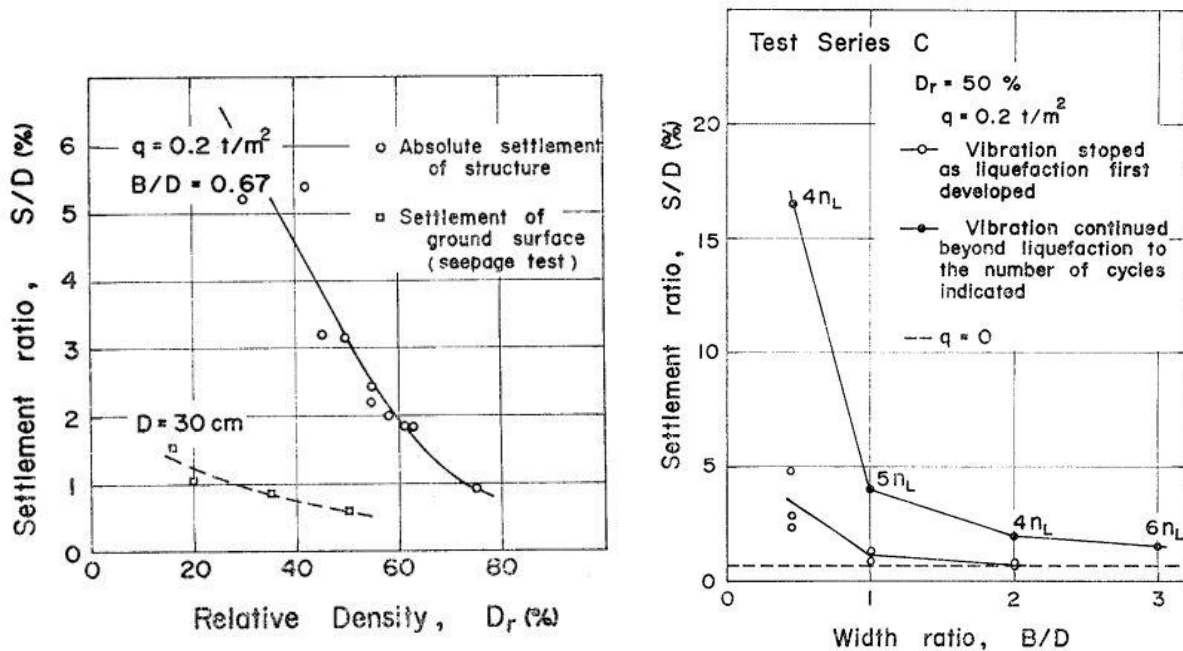
Οι ερευνητές επισημαίνουν επίσης ότι για τιμές  $u_{\max}/\sigma_{z0}$  και  $u_{\max}/\sigma_{z1}$  κάτω από 100%, πρακτικά δεν προκλήθηκε ρευστοποίηση.

Test	Max. pore pressure $u_{max}$ (gf/cm <sup>2</sup> )	Max. pore pressure ratio		Settlement s (mm)
		$u_{max}/\bar{\sigma}_{z0}$ (%)	$u_{max}/\bar{\sigma}_{z1}$ (%)	
A0				1-3
A20				1-4
A60				0.6-1.5
B0				0.5
B20				0.1-0.4

Σχήμα 2.11: Μέγιστοι λόγοι υπερπίεσης του νερού των πόρων σε διαφορετικές θέσεις κάτω και μακριά από την κατασκευή σε διάφορα πειράματα των *Yoshimi&Tokimatsu, (1977)*

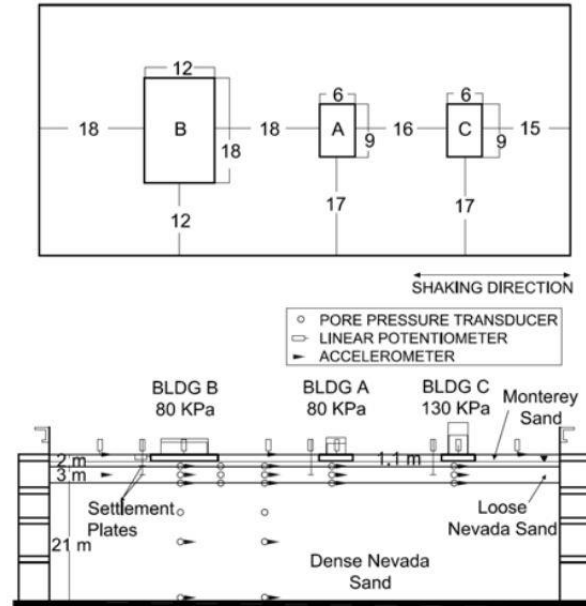


Από το **Σχήμα 2.12(α)** παρατηρείται ότι η καθίζηση των κατασκευών με μεγάλο φορτίο ( $q=0.2t/m^2$ ) επηρεάζεται από τη σχετική πυκνότητα της άμμου, αλλά όχι τόσο οι καθιζήσεις ελεύθερου πεδίου. Επίσης, στο **Σχήμα 2.12(β)** παρατηρείται ότι ο λόγος καθίζησης προς το πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης  $S/D$  μειώνεται με την αύξηση του πλάτους θεμελίωσης της κατασκευής, ή ορθότερα του λόγου πλάτους θεμελίωσης προς πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης.



**Σχήμα 2.12:** Αριστερά (α): Επιρροή της σχετικής πυκνότητας του εδάφους στις καθιζήσεις της κατασκευής λόγω ρευστοποίησης. Δεξιά (β): Επιρροή πλάτους της κατασκευής  $B$  ως προς το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος  $D$  στις καθιζήσεις (Yoshimi&Tokimatsu, 1977)

Πιο πρόσφατα, οι **Dashti et al (2010)** πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων φυγοκεντριστή για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των κατασκευών σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Για το σκοπό αυτό εξέτασαν τρεις διαφορετικές κατασκευές με επιφανειακή θεμελίωση (A, B και C) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.13**, στην οποία υπήρχε μια λεπτή ρευστοποιήσιμη στρώση.



**Σχήμα 2.13:** Πειραματική διάταξη δοκιμής T3-30: (α) κάτοψη (β) τομή (*Dashti et al, 2010*)

**Πίνακας 2.1:** Χαρακτηριστικά άμμου (*Dashti et al, 2010*)

Άμμος	$d_{50}(\text{mm})$	$C_u$	$e_{\min}$	$e_{\max}$
Nevada	0.14	2	0.51	0.78
Monterey	0.4	1.3	0.54	0.84

**Πίνακας 2.2:** Ονομασία και χαρακτηριστικά πειραμάτων (*Dashti et al, 2010*)

Test ID	Liquef. Layer Prototype Thickness / $D_r$
T3-30	3 m / 30%
T3-50-SILT	3 m / 50% (with silt placed on top of the liquefiable layer)
T6-30	6 m / 30%

Τα χαρακτηριστικά της άμμου και των πειραμάτων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.1** και **Πίνακα 2.2**. Πιο συγκεκριμένα:

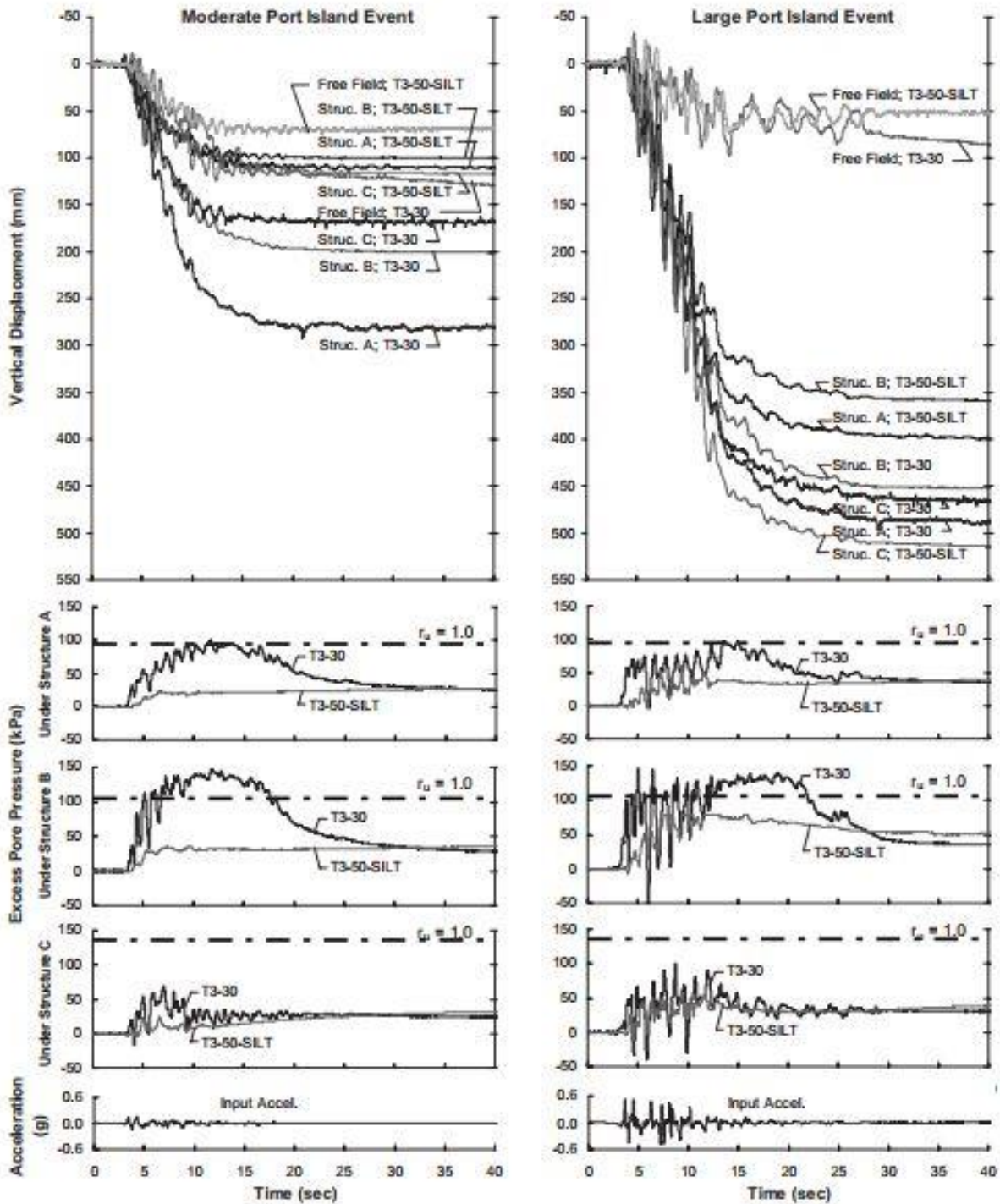
- Στην πρώτη δοκιμή (T3-30) το εδαφικό προφίλ αποτελούνταν από μια ρευστοποιήσιμη στρώση (λεπτής) άμμου Nevada, πάχους 3m, σχετικής πυκνότητας  $D_r=30\%$  και από μία επιφανειακή στρώση (χονδρόκοκκης) άμμου Monterey πάχους 2m.
- Στη δεύτερη δοκιμή (T3-50-Silt) χρησιμοποιήθηκε το ίδιο εδαφικό προφίλ, με τη διαφορά ότι η επιφανειακή στρώση πάχους 2m αποτελείται από μια υποκείμενη υπο-στρώση πάχους 0.8m από (χαμηλής διαπερατότητας) silica flour και μια υπερκείμενη υπο-στρώση άμμου Monterey πάχους μόνο 1.2m.
- Στην τρίτη δοκιμή (T6-30) η ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου Nevada είχε πάχος 6m και σχετική πυκνότητα  $D_r=30\%$ . Η επιφανειακή στρώση άμμου Monterey είχε πάχος 2m.

Οι κατασκευές στηρίζονταν σε δύο πλευρικά μεταλλικά υποστυλώματα και θεμελιώθηκαν σε άκαμπτη βάση αλουμινίου. Η επιβαλλόμενη τάση για την κατασκευή Α και Β ήταν ίση με 80KPa και για την C κατασκευή ίση με 130KPa (**Σχήμα 2.13**).

Σχετικά με το επίπεδο δόνησης πραγματοποιήθηκαν δύο κατηγορίες πειραμάτων, μέτριας (moderate) και μεγάλης (large) έντασης, με διακύμανση από 0.19g-0.55g. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους οι Dasthi et al (2010) κατέληξαν στο ότι οι καθιζήσεις δεν είναι ανάλογες του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης, συνεπώς δεν θα έπρεπε να χρησιμοποιείται ο λόγος πλάτος θεμελίου προς το πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης, χωρίς όμως να προτείνουν κάποιο εναλλακτικό κανονικοποιημένο μέγεθος. Επίσης στο **Σχήμα 2.14** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσης πόρων κάτω από κάθε κατασκευή και στο μέσο βάθος της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Οι Dasthi et al. (2010) συμπέραναν επίσης ότι:

- Η ένταση του σεισμού είναι από τις βασικότερες παραμέτρους
- Όλες οι κατασκευές υπέστησαν καθίζηση κατά τη δόνηση

- Η απόκριση της κατασκευής έχει άμεση σχέση με τη σχετική πυκνότητα  $D_r(\%)$  εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι για μεγάλο  $D_r(\%)$ , ναι μεν αναπτύσσει μικρότερες υπερπιέσεις πόρων, αλλά η κατασκευή επηρεάζεται παραπάνω από τα χαρακτηριστικά του σεισμού (δεν υπάρχει απομείωση του σεισμικού κραδασμού λόγω ρευστοποίησης).



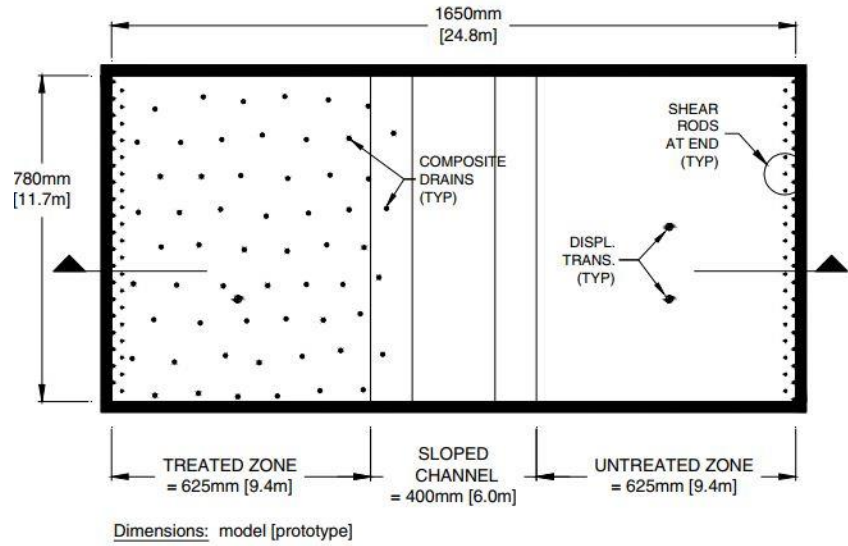
Σχήμα 2.14: Λόγος υπερπίεσης πόρων στο μέσο της ρευστοποιήσιμης στρώσης κάτω από κάθε κατασκευή και χρονιοϊστορίες καθιζήσεων στις δοκιμές T3-30 και T3-50-SILT (α) μέσης δόνησης (β) ισχυρής δόνησης (Dashti et al, 2010)

## 2.5 Βελτίωση ρευστοποιήσιμου εδάφους υπό υφιστάμενες κατασκευές

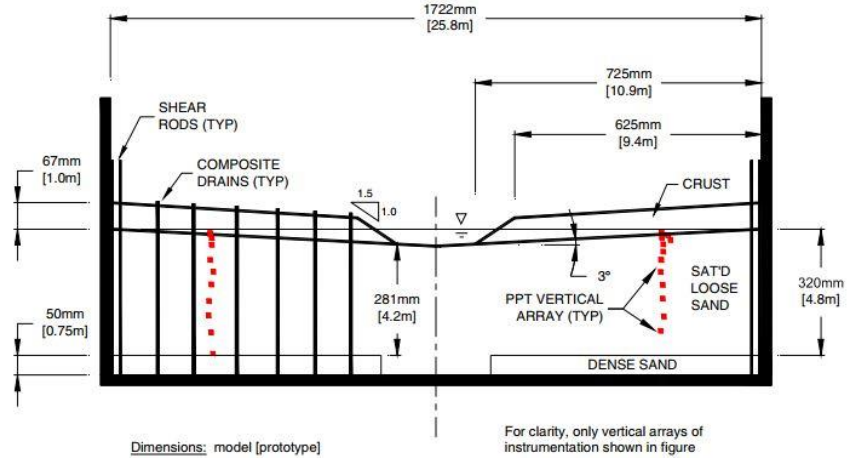
Όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως, οι συνέπειες της ρευστοποίησης στις υφιστάμενες κατασκευές μπορεί να είναι καταστρεπτικές και εφόσον επιβεβαιωθεί ο κίνδυνος για ρευστοποίηση, πρέπει να ληφθούν μέτρα αποτροπής της ρευστοποίησης ή αποτροπής των συνεπειών της. Όμως σε υφιστάμενες κατασκευές οι διαθέσιμοι τρόποι αποτροπής είναι σαφώς περιορισμένοι. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εξετάζονται δύο από αυτούς τους περιορισμένους πλήθους τρόπους αποτροπής (η εφαρμογή (πλαστικών) στραγγιστηρίων και η κατασκευή περιμετρικών τοιχιών) για τους οποίους παρουσιάζονται εδώ οι βασικότερες δημοσιεύσεις από τη βιβλιογραφία.

### 2.5.1. Πλαστικά Στραγγιστήρια

Οι **Marinnuci et al (2008)** παρουσίασαν μια σειρά πειραμάτων σε φυγοκεντριστή, σε εδαφικά προφίλ με και χωρίς πλαστικά στραγγιστήρια. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.15** το εδαφικό προφίλ έχει κλίση 3° ως προς το κέντρο και αποτελείται από 4.8m ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου Nevada και υπερκείμενη στρώση 1m συμπυκνωμένης (χαμηλής διαπερατότητας) Yolo Loam. Η ενισχυμένη περιοχή αποτελείται από 58 κατακόρυφα στραγγιστήρια σε τριγωνικό κάρναβο με απόσταση 1.5m από κέντρο σε κέντρο και διατομή 100mm (πρωτότυπη κλίμακα), ενώ η απέναντι περιοχή έχει ακριβώς την ίδια γεωμετρία και σύσταση αλλά παραμένει χωρίς στραγγιστήρια. Πραγματοποιήθηκαν πέντε διαδοχικές δονήσεις αυξανόμενης έντασης για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των στραγγιστηρίων σε εδαφικά προφίλ με μικρή κλίση και χωρίς κατασκευή. Στο **Σχήμα 2.16** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υπερπίεσης των πόρων, όπου στη βελτιωμένη περιοχή προσεγγίζουν τις αρχικές κατακόρυφες τάσεις σε όλα τα βάθη κατά τη διέγερση αλλά μειώνονται ραγδαία μετά το τέλος της δόνησης. Αντιθέτως, στο μη βελτιωμένο εδαφικό προφίλ οι υπερπίεσεις των πόρων έφτασαν τις αρχικές ενεργές τάσεις (αρχική ρευστοποίηση) και παρέμειναν σε αυτό το επίπεδο και για 10 δευτερόλεπτα μετά το πέρας της δόνησης.

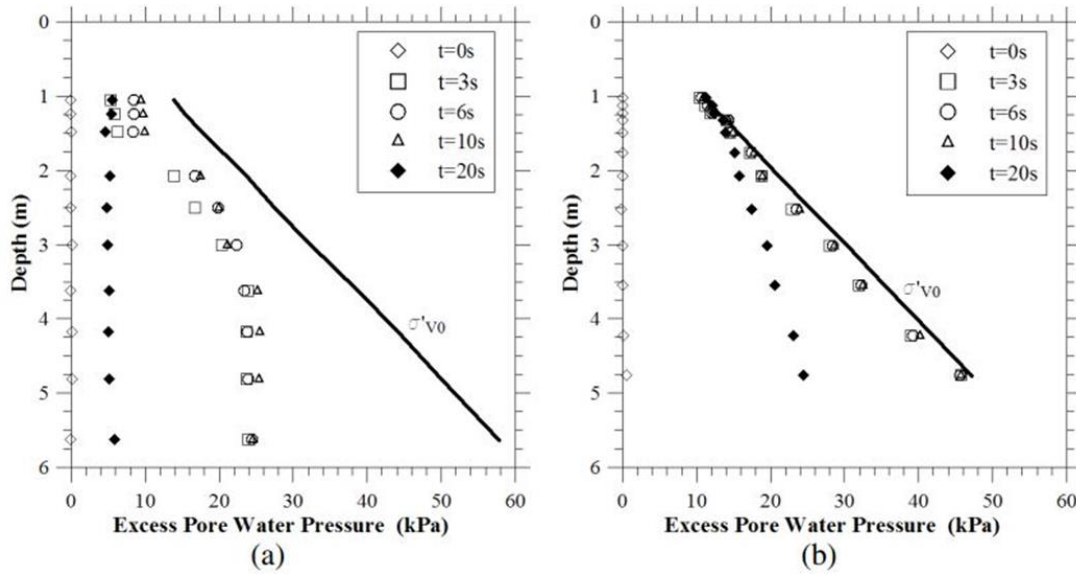


(α)



(b)

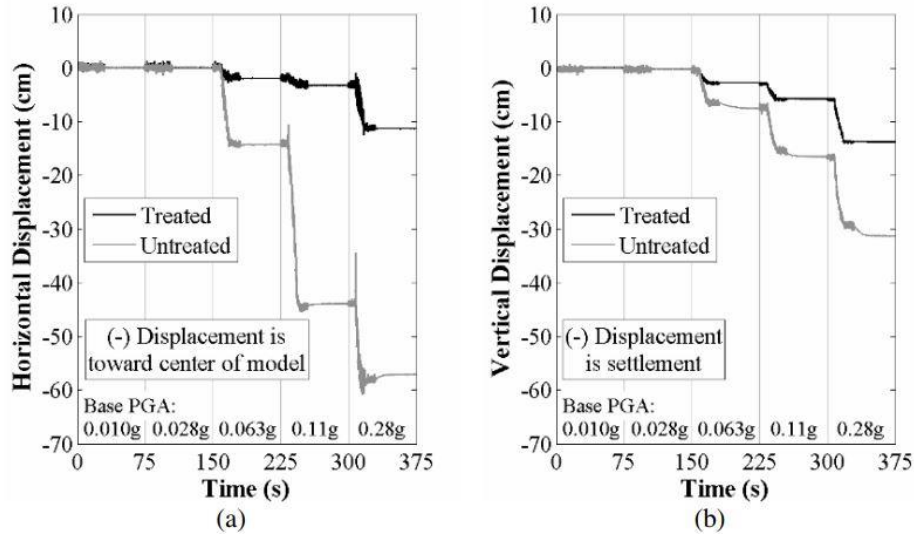
Σχήμα 2.15: Το μοντέλο εδάφους στο οποίο έγινε δυναμική δοκιμή φυγοκεντριστή: (α) Κάτοψη (b) Τομή (Marinucci et al, 2008)



**Σχήμα 2.16:** Υπερπίεση πόρων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές για τη διέγερση με  $PGA=0.28g$  (a) Βελτιωμένο έδαφος (b) Μη-βελτιωμένο έδαφος (Marinucci et al, 2008)

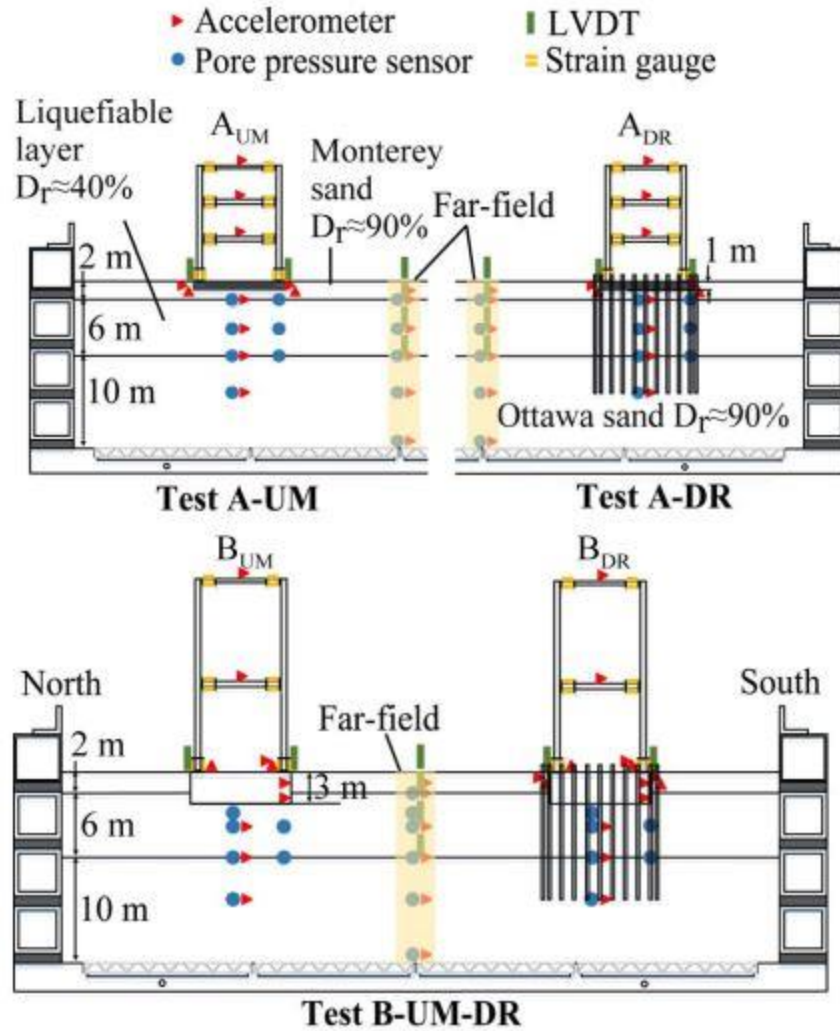
Τέλος, στο **Σχήμα 2.17** παρουσιάζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις για όλες τις (διαδοχικές) δονήσεις, συγκρίνοντας την απόκριση της βελτιωμένης και μη περιοχής. Προκύπτει σημαντική απομείωση (αλλά όχι μηδενισμός) των παραμενουσών μετατοπίσεων λόγω βελτίωσης, με τη μεγαλύτερη απομείωση να προκύπτει ποσοστιαία για τις οριζόντιες μετατοπίσεις.





**Σχήμα 2.17:** Παραμένουσες παραμορφώσεις (α) Οριζόντια μετατόπιση (β) Κατακόρυφη μετατόπιση (Marinucci et al, 2008)

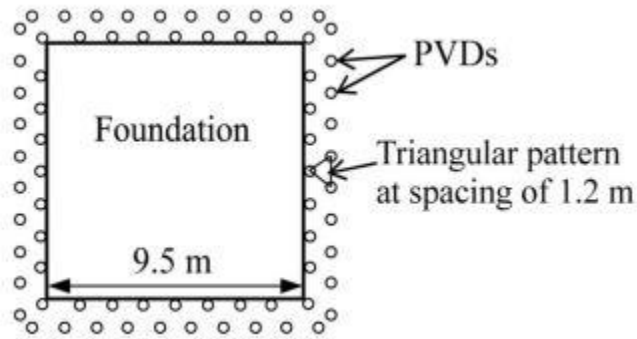
Πιο πρόσφατα, οι **Paramasivam et al (2018)** διερεύνησαν τη σεισμική απόκριση κατασκευής πριν και μετά την εισαγωγή περιμετρικών στραγγιστηρίων. Διεξήγαγαν μια σειρά πειραμάτων σε φυγοκεντριστή με 70g στα οποία προσομοίωσαν όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.18** δύο διαφορετικές κατασκευές. Η πρώτη κατασκευή είναι ένα τριώροφο κτίριο χωρίς στραγγιστήρια ( $A_{UM}$ ), και με στραγγιστήρια ( $A_{DR}$ ) ενώ η δεύτερη κατασκευή είναι ένα εννιαώροφο κτίριο χωρίς στραγγιστήρια ( $B_{UM}$ ) και με στραγγιστήρια ( $B_{DR}$ ). Σε όλα τα πειράματα το έδαφος είναι επίπεδο.



Σχήμα 2.18: Πειραματικές διατάξεις φυγοκεντριστή για τη μελέτη της βελτίωσης με χρήση περιμετρικών στραγγιστηρίων (Paramasivam et al, 2018)

Το εδαφικό προφίλ αποτελείται από μια στρώση Monterey 2m στην επιφάνεια με σχετική πυκνότητα  $D_r=90\%$ , ύστερα μια ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου Ottawa 6m με  $D_r=40\%$  και στο τέλος, μια στρώση άμμου Ottawa 10m με  $D_r=90\%$ .

Τα πλαστικά στραγγιστήρια (PVDs) τοποθετήθηκαν κατακόρυφα και περιμετρικά της κατασκευής, και επεκτείνονται έως το μέσον της βαθιάς στρώσης άμμου Ottawa (**Σχήμα 2.18**). Η διάμετρος τους είναι 0.11m (πρωτότυπη κλίμακα) και όπως βλέπουμε στο **Σχήμα 2.19**, τοποθετήθηκαν σε τριγωνικό κάρναβο με μεταξύ τους απόσταση 1.2m (πρωτότυπη κλίμακα).

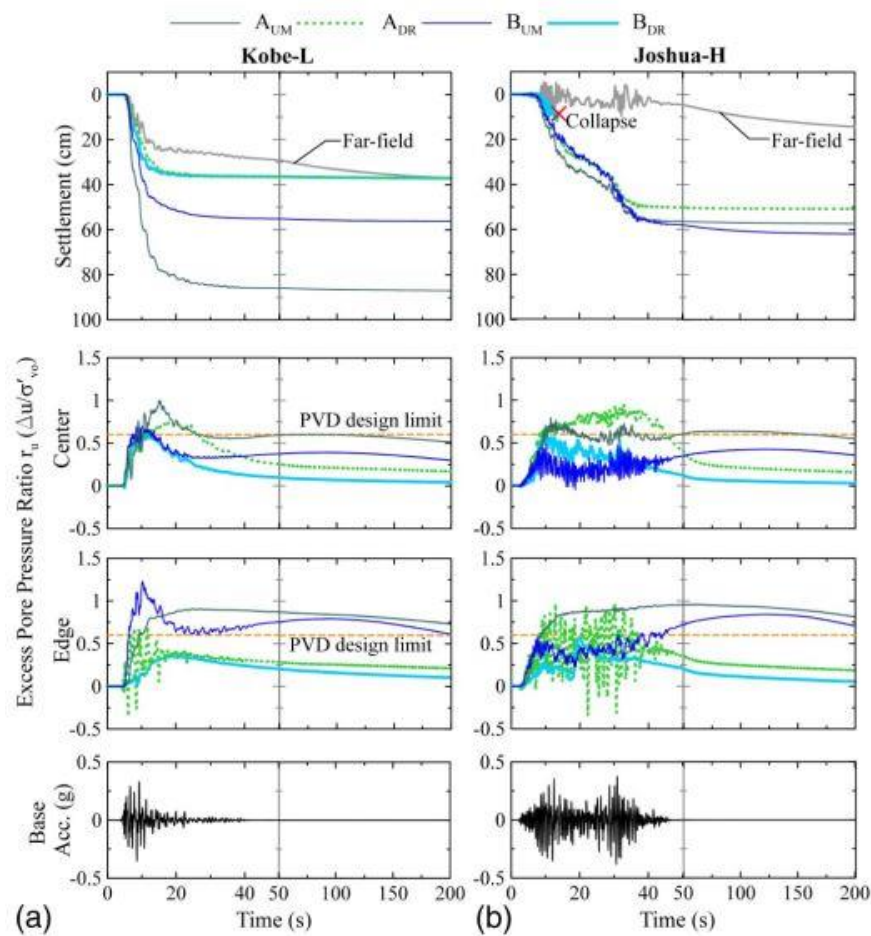


**Σχήμα 2.19:** Κάρναβος πλαστικών στραγγιστηρίων περιμετρικά του θεμελίου στις δοκιμές φυγοκεντριστή (*Paramasivam et al, 2018*)

**Πίνακας 2.3:** Ιδιότητες των σεισμικών διεγέρσεων που μετρήθηκαν στην βάση του πειράματος (*Paramasivam et al, 2018*)

Motion number	Motion identifier	Event name	Recorded station	Peak ground acceleration (PGA) (g)	Significant duration, $D_{5-95}$ (s)	Mean period, $T_m$ (s)	Arias Intensity, $I_a$ (m/s)
1	Kobe-L	1995-Kobe	Takatori	0.38	12	0.67	1.8
2	Joshua-H	1992-Landers	Joshua Tree	0.46	27	0.86	7.1

Στον Πίνακα 2.3 επισυνάπτονται τα κύρια χαρακτηριστικά των σεισμικών διεγέρσεων Kobe -L και Joshua-H που επιβλήθηκαν στις δοκιμές. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων των Paramasivam et al (2018), συνοψίζονται στο Σχήμα 2.20 από όπου διαπιστώνεται η ευεργετική επίδραση της βελτιωμένης απόκρισης του εδάφους στη μείωση των υπερπίεσεων των πόρων κάτω από τις κατασκευές ( $A_{DR}$  και  $B_{DR}$ ). Αντίθετα, η ύπαρξη της βελτιωμένης ζώνης έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της σεισμικής κίνησης και τη μετάδοση σημαντικών επιταχύνσεων στην εδαφική επιφάνεια και εν συνεχεία την επιπρόσθετη καταπόνηση των κατασκευών.

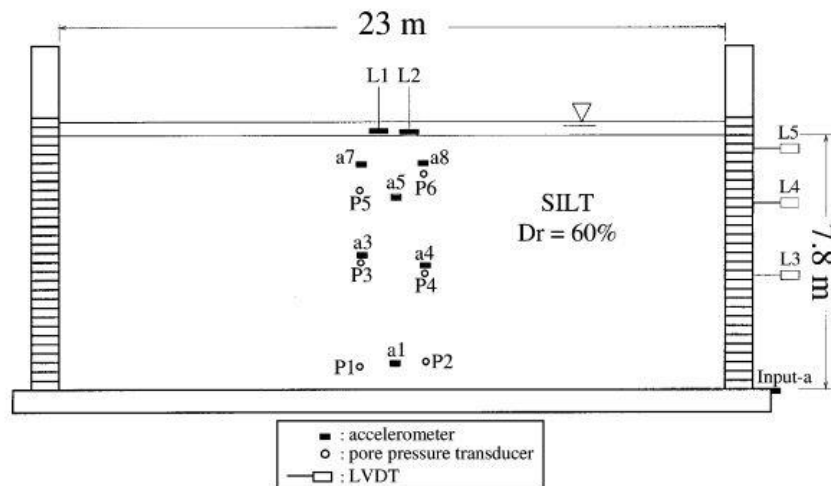


Σχήμα 2.10: Χρονοϊστορίες των καθιζήσεων και των υπερπίεσεων πόρων κάτω από το κέντρο και το άκρο θεμελιώσεων, στο μέσο της ρευστοποιήσιμης στρώσης κατά την διάρκεια των σεισμών Kobe-L και Joshua-H (Paramasivam et al, 2018)

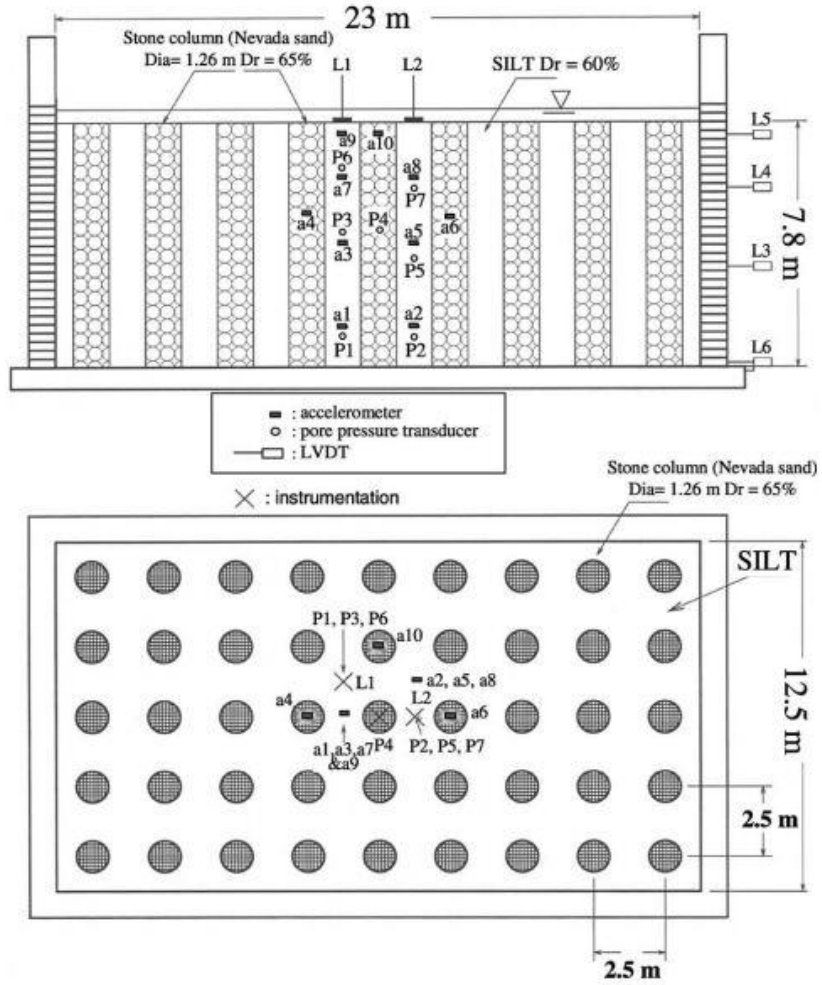
### 2.5.2. Χαλικοπάσσαλοι

Οι **Adalier et al (2003)** εξέτασαν την επίδραση χαλικοπασσάλων στη σεισμική απόκριση μιας κορεσμένης ιλυώδους εδαφική στρώση, αρχικά υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου και ύστερα υπό την παρουσία επιφανειακής θεμελίωσης. Υπογραμμίζεται ότι οι χαλικοπάσσαλοι αυξάνουν εκτός της διαπερατότητας και τη δυστημψία του εδάφους και κατά συνέπεια δε λειτουργούν ακριβώς όπως τα πλαστικά στραγγιστήρια, Παρόλα αυτά, παρουσιάζονται εδώ για λόγους πληρότητας.

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.21** και στο **Σχήμα 2.22**, τα δύο πρώτα πειράματα είναι για ρευστοποιήσιμο έδαφος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, το πρώτο χωρίς χαλικοπασσάλους (**Σχήμα 2.22**) και με το δεύτερο (**Σχήμα 2.22**) το ίδιο έδαφος να είναι ενισχυμένο με 45 χαλικοπασσάλους διαμέτρου 1.27m και μεταξύ τους απόσταση 2.25m σε τετραγωνικό κάναβο. Η στρώση αποτελείται από ιλύ, και έχει πάχος 7.8m (πρωτότυπη κλίμακα) και σχετική πυκνότητα  $D_r=57\%$ . Το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι εδκαμπτου τύπου (laminar box) και η φυγοκεντρική επιτάχυνση ίση με 50g.

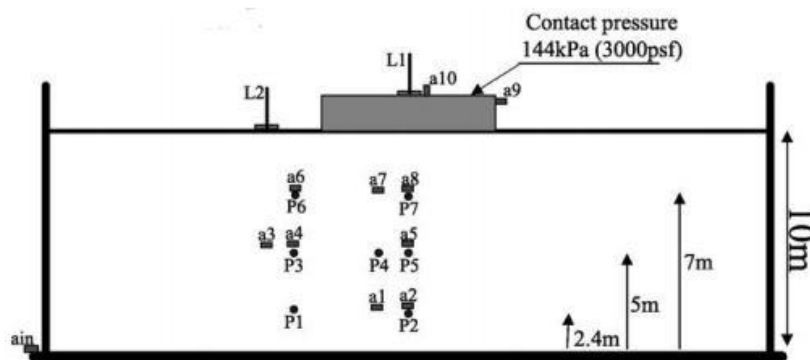


**Σχήμα 2.11:** Τομή πρώτου πειράματος ρευστοποιήσιμης άμμου σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (Adalier et al, 2003)

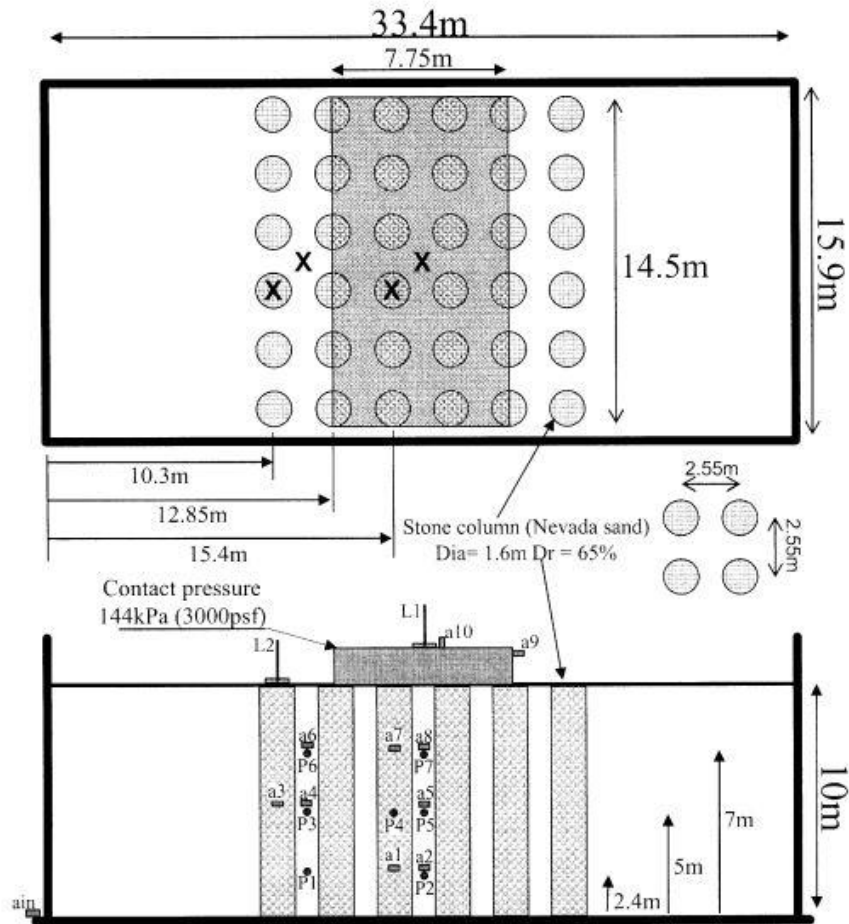


Σχήμα 2.12: Τομή και κάτοψη δεύτερου πειράματος ρευστοποιήσιμης άμμου με χαλικοπασσάλους σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (Adalier et al, 2003)

Τα επόμενα δύο πειράματα είναι υπό την παρουσία επιφανειακής θεμελίωσης. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.23** και στο **Σχήμα 2.24** το πάχος της ιλυώδους στρώσης είναι 10m με σχετική πυκνότητα  $D_r=65\%$  και το πείραμα στο **Σχήμα 2.24**, η στρώση είναι ενισχυμένη με 36 χαλικοπασσάλους διαμέτρου 1.6m και μεταξύ τους απόσταση 2.55m σε τετραγωνικό. Το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι άκαμπτο ορθογωνικό με φυγοκεντρική επιτάχυνση ίση με 63g.



**Σχήμα 2.13:** Τομή τρίτου πειράματος ρευστοποίησης εδάφους με επιφανειακή θεμελίωση (Adalier et al, 2003)



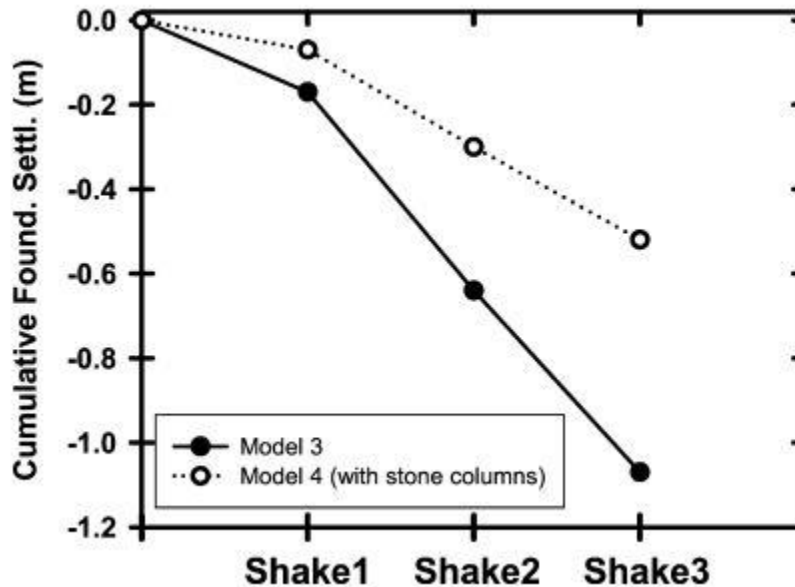
**Σχήμα 2.14:** Τομή και κάτοψη τέταρτου πειράματος ρευστοποιήσιμου εδάφους με επιφανειακή θεμελίωση και χαλικοπασσάλους (Adalier et al, 2003)

Στα δύο πρώτα πειράματα η δόνηση η οποία επιβλήθηκε αποτελούνταν από 20 αρμονικούς κύκλους αυξανόμενης έντασης, συχνότητα 1.8Hz με μέγιστη επιτάχυνση 0.30g. Τα δύο τελευταία πειράματα τα μοντέλα υποβλήθηκαν σε τρεις διαδοχικές αρμονικές διεγέρσεις αυξανόμενης έντασης και συχνότητας 1Hz. Με την πρώτη να αποτελείται από 10 αρμονικούς κύκλους με μέγιστη επιτάχυνση 0.08g, τη δεύτερη να αποτελείται από 30 κύκλους με μέγιστη επιτάχυνση 0.18g και την τρίτη από 30 κύκλους με μέγιστη επιτάχυνση 0.20g.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών στο **Σχήμα 2.25**, αποδεικνύεται ότι η παρουσία των χαλικοπασσάλων μειώνει (αλλά δεν μηδενίζει) τις σεισμικές καθιζήσεις. Οι συγγραφείς



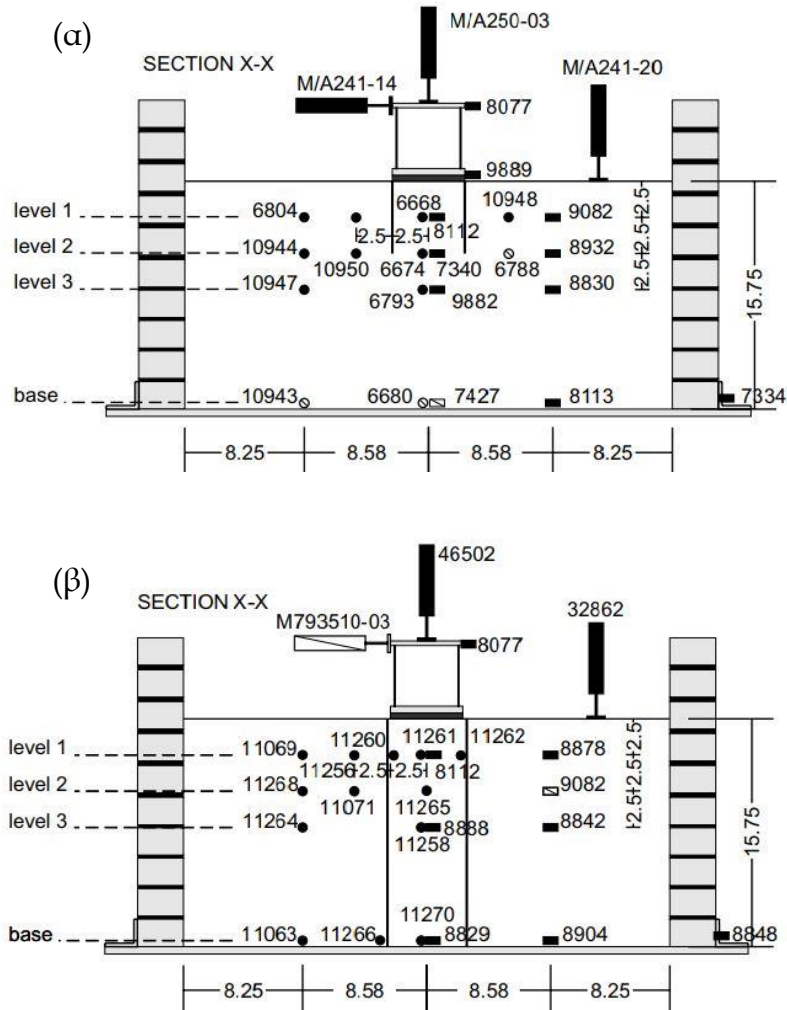
το αποδίδουν στην καθυστέρηση της ανάπτυξης των υπερπιέσεων εντός του ενισχυμένου εδάφους. Παρατήρησαν επίσης ότι η ύπαρξη χαλικοπασσάλων έχει ως αποτέλεσμα να μην απομειώνεται η διέγερση της κατασκευής, όπως συμβαίνει όταν το έδαφος ρευστοποιείται.



*Σχήμα 2.15: Επίδραση των χαλικοπασσάλων στη συσσωρευμένη καθίζηση με επιφανειακή θεμελίωση (Adalier et al, 2003)*

### 2.5.3. Περιμετρικά τοιχία

Για την αποτελεσματικότητα περιμετρικών τοιχιών έναντι ρευστοποίησης ίσως η πιο πλήρης έρευνα είναι αυτή των **Mitrani et al (2012)**, στα πλαίσια της οποίας διεξήχθησαν τρία πειράματα σε φυγοκεντρική επιτάχυνση 50g. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.26**, η πρώτη δοκιμή έγινε χωρίς ενίσχυση εδάφους (BM1), η δεύτερη έγινε με την προσθήκη τοιχιών μερικού βάθους 5m (WA1P) και η τρίτη με τοιχία που φτάνουν σε όλο το βάθος της στρώσης (WA1F). Οι ιδιότητες της εδαφικής στρώσης και της άμμου Hostun που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα συνοψίζονται στον **Πίνακα 2.4** και στον **Πίνακα 2.5**, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.16: Πειραματικές διατάξεις φυγοκεντριστή για κατασκευές σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με περιμετρικά τοιχεία (α) μερικού βάθους(WA1P), (β) σε όλη τη στρώση(WA1F) (Mitrani et al, 2012)

Πίνακας 2.4: Ιδιότητες της στρώσης άμμου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα (Mitrani et al, 2012)

	BM1	WA1P	WA1F
Layer thickness (m)	14.3	15.3	14.9
Dry unit weight, $\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.9	14.2	14.7
Saturated unit weight, $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.1	18.7	19.0
Relative density, $D_r$ (%)	59	40	53

**Πίνακας 2.5:** Ιδιότητες άμμου Hostun S28 που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα (Mitrani et al., 2012)

$e_{\max}$	1.01
$e_{\min}$	0.555
$G_s$	2.65
$\phi'_{\text{peak}}$	35°
(derived for Hostun RF sand)	

Επιπλέον, στον **Πίνακα 2.6** παρουσιάζονται οι πέντε διεγέρσεις στις οποίες υποβλήθηκαν οι πειραματικές διατάξεις.

**Πίνακας 2.6:** Λεπτομέρειες των σεισμών των πειραμάτων (Mitrani et al., 2012)

	Frequency (Hz)	Duration (s)			Max. base acceleration (g)			No. of cycles		
		BM1	WA1P	WA1F	BM1	WA1P	WA1F	BM1	WA1P	WA1F
EQ 1	0.6	27	28	40	0.08	0.08	0.07	17	17	24
EQ 2	0.8	28	27	51	0.13	0.12	0.15	22	22	40
EQ 3	1	29	27	54	0.20	0.23	0.27	28	28	52
sweep	1 → 0	≈190	≈193	—	0.27	0.31	—	≈113	≈113	—
EQ 4	1	29	27	—	0.27	0.32	—	28	27	—

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών των **Mitrani et al. (2012)** προκύπτει ότι:

- Και για τις δύο περιπτώσεις των άκαμπτων τοιχίων (WA1P και WA1F) υπήρξε μείωση των συνολικών καθιζήσεων της κατασκευής
- Η απόκριση των περιμετρικών τοιχίων μερικού βάθους (WA1P) εξαρτάται από την ένταση του σεισμού
- Για την αποφυγή της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης και την επιπρόσθετη καταπόνηση της θεμελίωσης, τα περιμετρικά τοιχεία πρέπει να μην είναι σε επαφή με την υπόλοιπη κατασκευή.

## Κεφάλαιο 3

# Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

### 3.1 Εισαγωγή

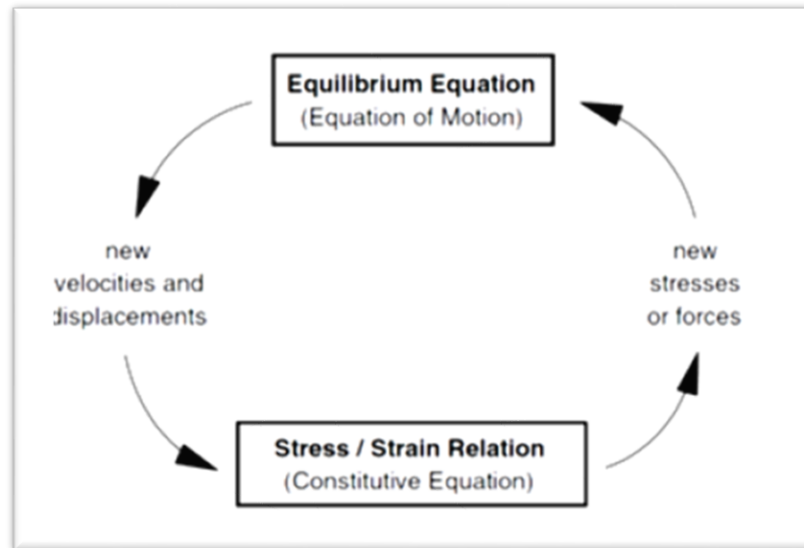
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης ενός τετραγωνικού θεμελίου και μιας θεμελιολωρίδας σε ρευστοποιήσιμο έδαφος υπό ήπια κλίση ( $i=2^\circ$ ). Επισημαίνεται ότι εδώ παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των 3D αναλύσεων, και όχι τα αποτελέσματα αυτών, τα οποία είναι αντικείμενο των Κεφαλαίων 4, 5 και 6 της εργασίας.

Συγκεκριμένα, η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης των τετραγωνικών θεμελίων έγινε σε τρεις διαστάσεις ενώ των θεμελιολωρίδων έγινε σε δύο διαστάσεις (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), αλλά πάντα με χρήση του λογισμικού, πεπερασμένων διαφορών FLAC3D (Itasca, 2019). Για την προσομοίωση του ρευστοποιήσιμου εδάφους χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA\_Sand (Andrianopoulos et al. 2010). Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

### 3.1 Λογισμικό και καταστατικό προσομοίωμα

Το λογισμικό FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D Dimensions) χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών με δυναμική χαλάρωση για την επίλυση προβλημάτων σε 3 διαστάσεις που σχετίζονται με συνεχή μέσα. Χρησιμοποιεί τη Μέθοδο Κεντρικών Διαφορών στη μη-πεπλεγμένη μορφή της προκειμένου να επιλύσει την εξίσωση ισορροπίας σε υπολογιστικά προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής. Η διακριτοποίηση του χωρίου σε πολλά τμήματα πραγματοποιείται με τη χρήση πλέγματος πεπερασμένων όγκων οι οποίες ονομάζονται ζώνες (zones), ενώ η επίλυση της εξίσωσης ισορροπίας πραγματοποιείται στους κόμβους που δημιουργούνται από τις ζώνες (grid points). Πιο συγκεκριμένα, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία διαδοχικών

επιλύσεων λαμβάνοντας υπόψιν το καταστατικό προσομοίωμα της κάθε ζώνης, αλλά και τα επιβαλλόμενα στο χωρίο φορτία και μετατοπίσεις, υπολογίζοντας τις τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται προκειμένου να ισορροπήσει κάθε κόμβος. Μια τυπική διαδικασία που ακολουθείται από το FLAC3D παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**.



**Σχήμα 3.1:** Μη πεπλεγμένο βήμα επίλυσης στο FLAC3D

Με βάση το **Σχήμα 3.1**, τα βασικότερα βήματα υπολογισμού μέχρι να ισορροπήσει είναι:

- Υπολογισμός των ισοδύναμων δυνάμεων στους κόμβους των πλεγμάτων με γνωστές τις τάσεις
- Με δεδομένες τις δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κόμβο υπολογίζεται η μη ισορροπούσα δύναμη, η οποία πρέπει να μηδενιστεί για να ισορροπήσει ο κάθε κόμβος
- Υπολογισμός της αναγκαίας προσαύξησης της ταχύτητας κάθε κόμβου με χρήση της μη ισορροπούσας δύναμης
- Παραγωγή των ταχυτήτων και υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής των ανηγμένων παραμορφώσεων κάθε ζώνης
- Μέσω των παραμορφώσεων, γίνεται ο υπολογισμός των προσαυξήσεων των τάσεων από το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται

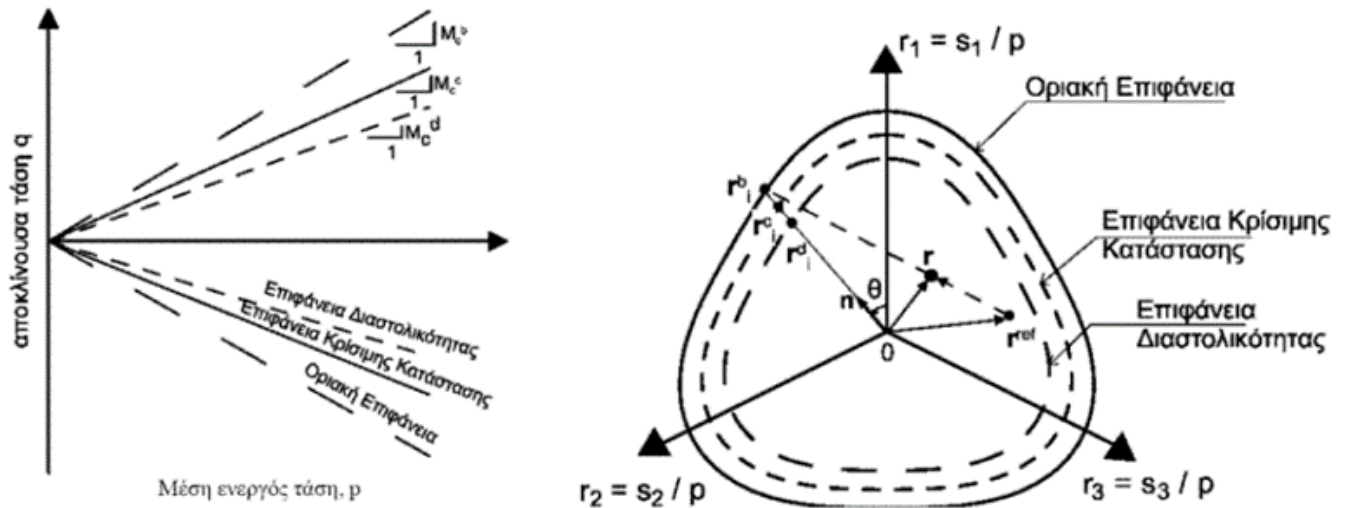
Η επαναληπτική διαδικασία σταματά όταν η μη ισορροπούσα δύναμη σε όλους τους κόμβους γίνει μικρότερη από το επιλεγμένο επίπεδο σφάλματος της αριθμητικής σύγκλισης και επιτευχθεί ισορροπία.

Το μειονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, που χρησιμοποιείται στο FLAC, είναι ότι ακόμα και στη περίπτωση επίλυσης γραμμικών συστημάτων απαιτούνται επαναλήψεις προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία. Εν αντιθέσει με τις πεπλεγμένες μεθόδους όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, είναι πολύ πιο αποτελεσματική σε τέτοιου είδους συστήματα ωστόσο παρουσιάζει έντονα προβλήματα σύγκλισης όταν τα συστήματα που πρέπει να λυθούν είναι έντονα μη γραμμικά όπως τα προβλήματα που αφορούν τη ρευστοποίηση.

Το προσομοίωμα NTUA-Sand αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης (**Papadimitriou & Bouckovalas, 2002** και **Andrianopoulos et al., 2010**), και πήρε την τωρινή του μορφή στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Δ. **Καραμήτρου (2010)**. Είναι βασισμένο στη θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης και της θεωρίας Πλαστικότητας, και περιλαμβάνει τρεις επιφάνειες στο χώρο των τάσεων, την Οριακή Επιφάνεια, την Επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης και την Επιφάνεια Διαστολικότητας. Στο **Σχήμα 3.2** παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση των επιφανειών αυτών για τριαξονική εντατική κατάσταση, καθώς και οι προβολές τους στο αποκλίνον επίπεδο π.

Το NTUA\_Sand έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών χωρίς ανάγκη αναβαθμονόμησης για:

- Στραγγιζόμενες και αστραγγιστες συνθήκες φόρτισης
- Μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικών παραμορφώσεων
- Διαφορετικές τιμές δείκτη πόρων ή σχετικής πυκνότητας
- Διαφορετικές ενεργές τάσεις στερεοποίησης



*Σχήμα 3.2: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο  $p$ - $q$  και η προβολή τους στο επίπεδο  $\pi$ .*

Πιο συγκεκριμένα, έχει ανάγκη βαθμονόμησης 13 αδιάστατων και θετικών παραμέτρων, από τις οποίες οι 11 αναφέρονται σε μονοτονική φόρτιση, ενώ οι υπόλοιπες 2 προστίθενται σε ανακυκλική φόρτιση. Για τη περίπτωση προσομοίωσης εδαφικής στρώσης από άμμο τύπου Nevada το προσομοίωμα αυτό έχει βαθμονομηθεί από τους **Andrianopoulos et al (2010)** με χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων του ερευνητικού προγράμματος VELACS **Arulmoli et al (1992)**. Η υιοθέτηση εδώ των τιμών των παραμέτρων αυτών υπονοεί ότι το ρευστοποιήσιμο έδαφος στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας είναι η λεπτή άμμος Nevada. Το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα αποδίδει την αναγκαία υστερητική απόσβεση στο έδαφος. Πέραν αυτής, για την αριθμητική σταθερότητα των αναλύσεων υιοθετήθηκε επιπλέον και απόσβεση Rayleigh με  $\zeta=0.5\%$  και σε συχνότητα 100Hz.

### 3.2 Γεωμετρία προσομοιώματος θεμελίου - εδάφους

Αρχικώς θα περιγραφούν τα είδη και χαρακτηριστικά των θεμελίων που διερευνήθηκαν εδώ και έπειτα οι κάρναβοι προσομοίωσης ανά θεμέλιο.

### 3.2.1 Θεμέλιο

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των θεμελίων που διερευνήθηκαν συνοψίζονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2:

*Πίνακας 3.17: Χαρακτηριστικά θεμελίου πλάτους  $B=5m$*

<b>B=5m</b>		
<b>Μέτρο Ελαστικότητας</b>	E (kN/m <sup>2</sup> )	10 <sup>6</sup>
<b>Ποκνότητα</b>	$\rho$ (Mgr/m <sup>3</sup> )	0.1
<b>Poisson</b>	$\nu$	0.2
<b>Ύψος</b>	H (m)	1
<b>Πλάτος</b>	(m)	5

*Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά θεμελίου πλάτους  $B=20m$*

<b>B=20m</b>		
<b>Μέτρο Ελαστικότητας</b>	E (kN/m <sup>2</sup> )	10 <sup>6</sup>
<b>Ποκνότητα</b>	$\rho$ (Mgr/m <sup>3</sup> )	0.1
<b>Poisson</b>	$\nu$	0.2
<b>Ύψος</b>	H (m)	1
<b>Πλάτος</b>	(m)	20

Για κάθε πλάτος B(m) ξεχωριστά, έγιναν αναλύσεις για τις αντίστοιχες κατακόρυφες τάσεις ανωδομής:

- $q=50kPa$
- $q=100kPa$
- $q=200kPa$

Όπως προκύπτει από τους ανωτέρω πίνακες, τα θεμέλια που προσομοιώθηκαν εδώ έχουν ομοιόμορφη μηδενική μάζα, ώστε να μην εμφανίζονται αδρανειακές δυνάμεις. Με άλλα λόγια, οι αναλύσεις αυτές διερευνούν την κινηματική αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίου, η οποία ούτως ή άλλως είναι η κυρίαρχη μορφή αλληλεπίδρασης όταν υπάρχει ρευστοποίηση του εδάφους. Το επιφανειακό θεμέλιο προσομοιώθηκε με στοιχεία



κελύφους (shell) χωρίς δυνατότητα αποκόλλησης από τον κάνναβο που προσομοιώνει το έδαφος θεμελίωσης.

### 3.2.2 Κάνναβος

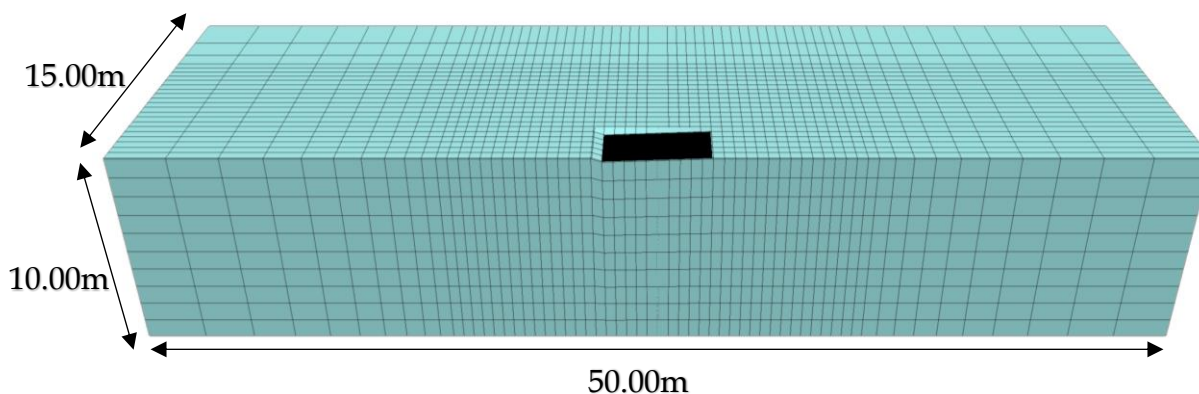
Η διαμόρφωση του καννάβου έγινε έτσι ώστε τα πλευρικά όρια να εκτείνονται επαρκώς περιμετρικά από τις παρειές του θεμελίου, και να μην επηρεάζουν τη συμπεριφορά του θεμελίου κατά την προσομοίωση.

- I. Για πλάτος θεμελίου  $B = 5\text{m}$  το συνολικό μήκος του καννάβου είναι 50 m, με πλάτος 15m, και ύψος 10m. Όπως βλέπουμε στο **Σχήμα 3.3**, η διακριτοποίηση του καννάβου πραγματοποιήθηκε με εξαπλευρικά ορθογώνια στοιχεία τύπου «brick», ενώ χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 13.800 στοιχεία. Τα στοιχεία σε απόσταση 10m περιμετρικά από το κέντρο του θεμελίου έχουν διαστάσεις πλάτους 0.5m και μετά το πέρας των 10m το πλάτος των στοιχείων αυξάνεται σταδιακά μέχρι και τα πλευρικά όρια του καννάβου.
- II. Για πλάτος θεμελίου  $B = 20\text{m}$  το συνολικό μήκος του καννάβου είναι 160m, το πλάτος είναι 50m και το ύψος 10m. Η διακριτοποίηση του καννάβου πραγματοποιήθηκε με εξαπλευρα ορθογώνια στοιχεία τύπου «brick» και συνολικά τα στοιχεία είναι 150.000. Αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.4** η περιοχή κοντά στο θεμέλιο και γύρω από τον άξονα συμμετρίας της διάταξης διαμορφώνεται από στοιχεία πλάτους 0.5m, ενώ μετά το πέρας των 40m εκατέρωθεν του θεμελίου το πλάτος των στοιχείων αυξάνεται σταδιακά μέχρι και τα πλευρικά όρια του καννάβου.

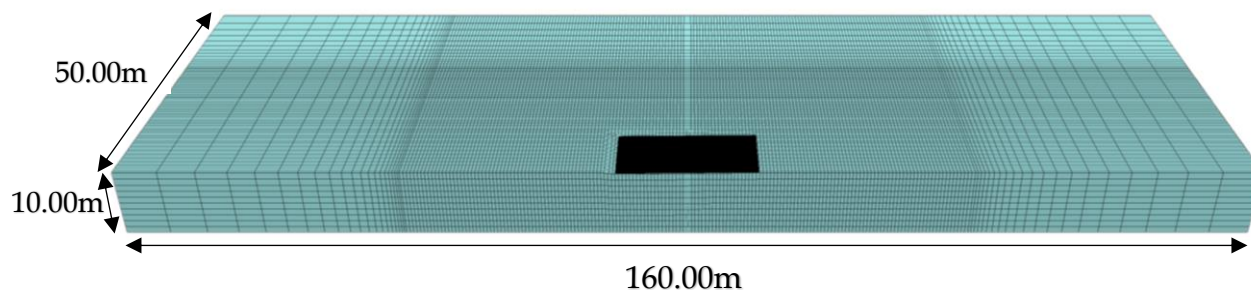
Οι συνοριακές συνθήκες του εδαφικού προσομοιώματος ορίστηκαν με βάση τις συνθήκες φόρτισης. Κατά την επιβολή των γεωστατικών τάσεων και των τάσεων του θεμελίου τοποθετήθηκαν κυλίσεις στα πλευρικά όρια και αρθρώσεις στη βάση του καννάβου.

Για την προσομοίωση των συνόρων κατά τη δυναμική φόρτιση, χρησιμοποιήθηκε η εσωτερική γλώσσα προγραμματισμού FISH με την οποία επιβλήθηκε κοινή μετακίνηση και ταχύτητα σε αντιδιαμετρικούς κόμβους του ίδιου ύψους (**Chaloulos, 2012**). Σκοπός αυτής της προσομοίωσης είναι η συμβατότητα απόκρισης των αναλύσεων της εργασίας

με εκείνη των εύκαμπτων δοχείων (laminar box) που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πειράματα σε φυγοκεντριστή και σε σεισμική τράπεζα, και τα οποία προσομοιώνουν με επιτυχία την απόκριση ελευθέρου πεδίου.

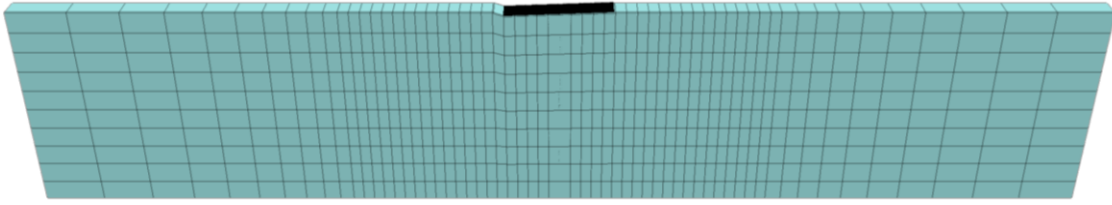


Σχήμα 3.3: Διάταξη καννάβου αριθμητικών αναλύσεων για τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=5m$



Σχήμα 3.4: Διάταξη καννάβου αριθμητικών αναλύσεων για τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=20m$

Ακόμα, με σκοπό την σύγκριση της απόκρισης θεμελιολωρίδας και τετραγωνικού θεμελίου, έγιναν και αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο επιπλέον διατάξεις με πλάτος καννάβου 1m, για την προσομοίωση ανάλυσης σε δύο διαστάσεις, δηλαδή θεώρηση λωριδωτού (απειρομήκους) θεμελίου με πλάτος  $B=5$  και  $20m$ , αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά (μήκος, ύψος, διακριτοποίηση καννάβου) διατηρήθηκαν όπως στα μοντέλα τριών διαστάσεων.



*Σχήμα 3.5: Διάταξη καννάβου αριθμητικών αναλύσεων για θεμελιολωρίδα πλάτους B=5m*



*Σχήμα 3.6: Διάταξη καννάβου αριθμητικών αναλύσεων για θεμελιολωρίδα πλάτους B=20m*

Χάριν πληρότητας, στο **Σχήμα 3.5** και στο **Σχήμα 3.6** παρουσιάζονται οι διατάξεις καννάβου αριθμητικών αναλύσεων για θεμελιο-λωρίδες πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , αντίστοιχα.

### 3.3 Προσομοίωση εδάφους

Στην εργασία αυτή, το ρευστοποιήσιμο έδαφος έχει ήπια κλίση, για την προσομοίωση του φαινομένου της οριζόντιας εξάπλωσης. Για την προσομοίωση της εδαφικής κλίσης, διατηρήθηκε ο οριζόντιος κάνναβος και εφαρμόστηκε κλίση εδάφους  $2^\circ$  προς τα κατάντη, μέσω στροφής του διανύσματος της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Δηλαδή, στις αναλύσεις αυτές, η επιτάχυνση της βαρύτητας έχει συνιστώσες:

$$g_x=9.81*\sin a \text{ και } g_z=9.81*\cos a, \text{ όπου } a=2^\circ$$

Στο σημείο εφαρμογής του θεμελίου, διαμορφώθηκε μια μικρή ζώνη εκκοκαφής καθώς το θεμέλιο (άρα και το κτίριο) κατασκευάζεται οριζόντια, χωρίς να ακολουθεί την κλίση του εδάφους (βλ. ενδεικτικά τη λεπτομέρεια στο **Σχήμα 3.3**).

Η στάθμη του υπόγειου νερού θεωρήθηκε ότι βρίσκεται σχεδόν (0.1m άνω) στην επιφάνεια του εδάφους με ομοιόμορφη κατακόρυφη τάση  $0.981\text{kN/m}^2$  σε όλη την επιφάνεια εδάφους.

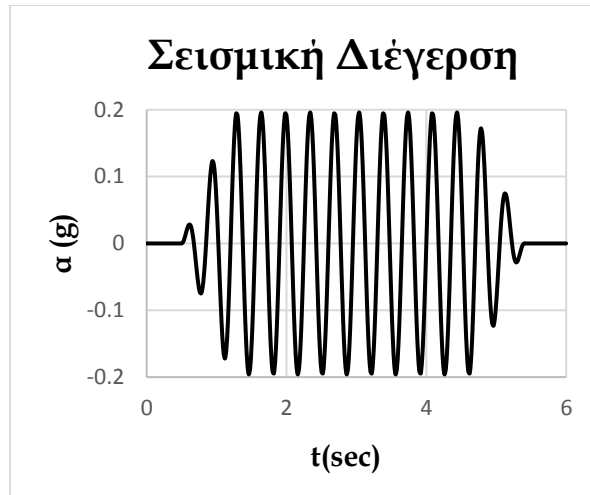
Στον **Πίνακα 3.3** παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της άμμου Nevada που επιλέχθηκε για την προσομοίωση της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης. Διευκρινίζεται ότι η επιλογή έγινε μέσω της υιοθέτησης των τιμών 13 παραμέτρων του προσομοιώματος NTUA\_Sand που είχε γίνει, μετά από βαθμονόμηση, από τους **Andrianopoulos et al. (2010)**.

*Πίνακας 3.3: Βασικά χαρακτηριστικά άμμου Nevada*

Άμμος Nevada		
Σχετική πυκνότητα	Dr (%)	45
Δείκτης πόρων	e	0.7178
Ξηρή πυκνότητα	$\rho$ (Mgr/m <sup>3</sup> )	1.554
Διαπερατότητα	k (m/s)	$6.6 \cdot 10^{-6}$

### 3.4 Διεγέρσεις

Στην βάση του εδαφικού προσομοιώματος εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές διεγέρσεις (οιονεί) αρμονικές διεγέρσεις επιτάχυνσης  $a=0.1g$ ,  $a=0.2g$  και  $a=0.4g$ , με βασική τιμή μέγιστης επιτάχυνσης την  $a=0.2g$  (**Σχήμα 3.7**). Αποτελούνται από 14 κύκλους με περίοδο  $T=0.35\text{sec}$ , εκ των οποίων οι δύο πρώτοι και δύο τελευταίοι κύκλοι προστέθηκαν στην χρονοϊστορία για να διασφαλιστεί η σταδιακή αύξηση και σταδιακή μείωση της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης από και έως την ηρεμία.



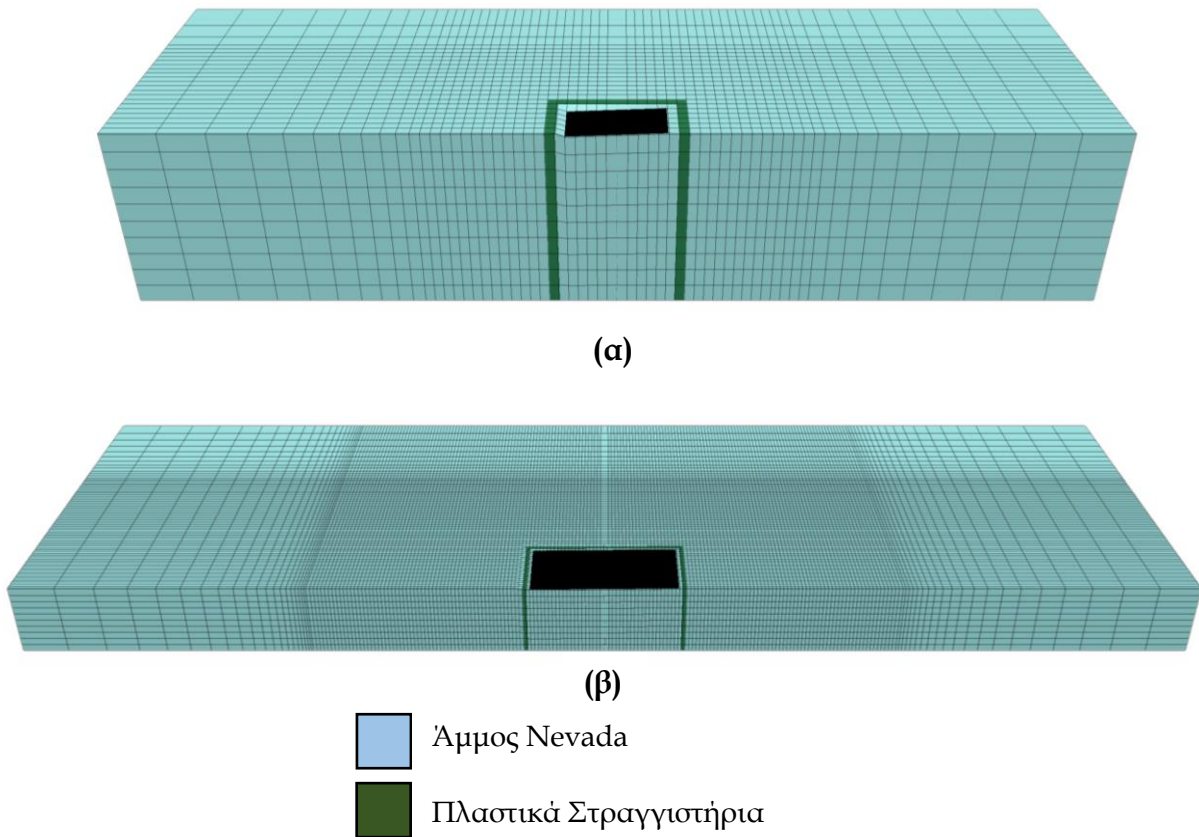
Σχήμα 3.7: Χρονοϊστορία βασικής επιτάχυνσης ( $a=0.2g$ )

### 3.5. Προσομοίωση Βελτίωσης με Πλαστικά Στραγγιστήρια

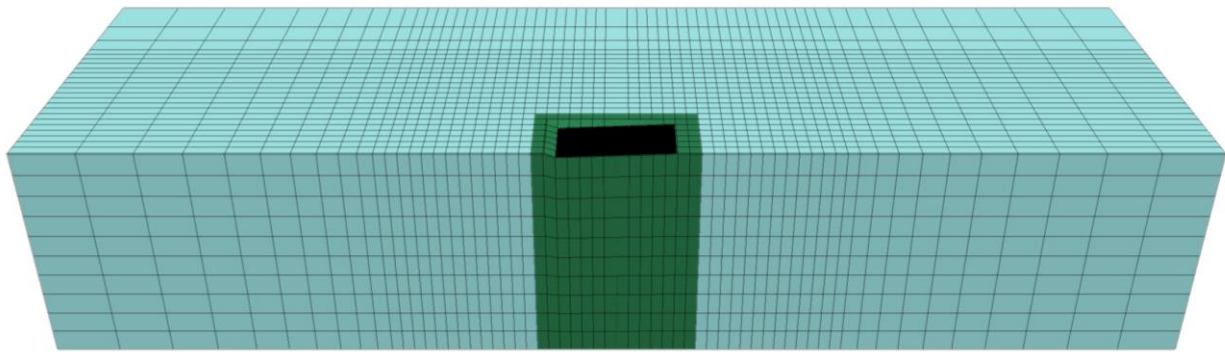
Η αριθμητική προσομοίωση των πλαστικών στραγγιστηρίων (Drains) πραγματοποιείται απλουστευτικά με την αύξηση της διαπερατότητας του εδάφους στα σημεία εφαρμογής τους. Η διαπερατότητα της άμμου είναι  $k_{FLACεδαφους} = 6.6 \cdot 10^{-6}$  m/s και σε όλες τις αναλύσεις η διαπερατότητα του υλικού των στραγγιστηρίων είναι 1000 φορές μεγαλύτερη από αυτή της άμμου,  $k_{FLACDrains} = 6.6 \cdot 10^{-3}$  m/s. Στις αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τρόποι εφαρμογής των στραγγιστηρίων:

- i. Περιμετρικά του θεμελίου με πλάτος 0.5m και σε όλο το βάθος του προσομοιώματος ( $z=10m$ ), αντιπροσωπεύοντας μια «πυκνή» σειρά περιμετρικών στραγγιστηρίων (Σχήμα 3.8),
- ii. Εφαρμογή στραγγιστηρίων σε όλη την περιοχή του θεμελίου και 0.5m περιμετρικά αυτού, με βάθος  $z=10m$  (Σχήμα 3.9).

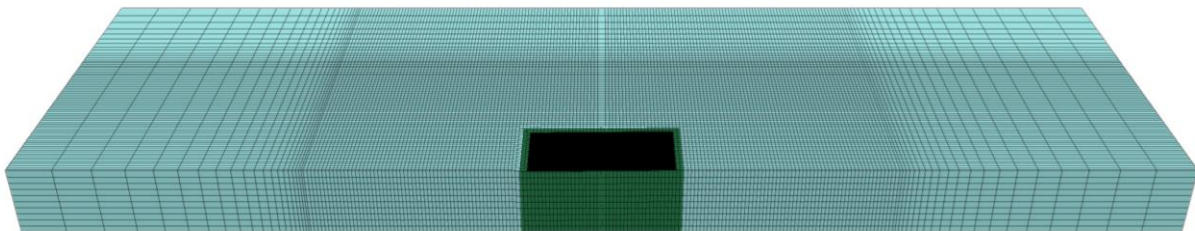
Η πρώτη περίπτωση είναι μια ρεαλιστική επιλογή, και είναι ποιοτικά παρόμοια με τα πειράματα φυγοκεντριστή των **Paramasivam et al (2018)**. Η δεύτερη περίπτωση εκτελέστηκε κυρίως ως ανάλυση αναφοράς, καθότι είναι πολύ δύσκολο να τοποθετηθούν στραγγιστήρια σε όλο το πλάτος μιας υφιστάμενης κατασκευής. Η ανάλυση αυτή ουσιαστικά αποτυπώνει το «μέγιστο» όφελος από τη χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων.



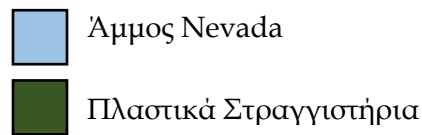
*Σχήμα 3.8: Διάταξη εδάφους - πλαστικών στραγγιστηρίων εκατέρωθεν του τετραγωνικού θεμελίου (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$*



(α)

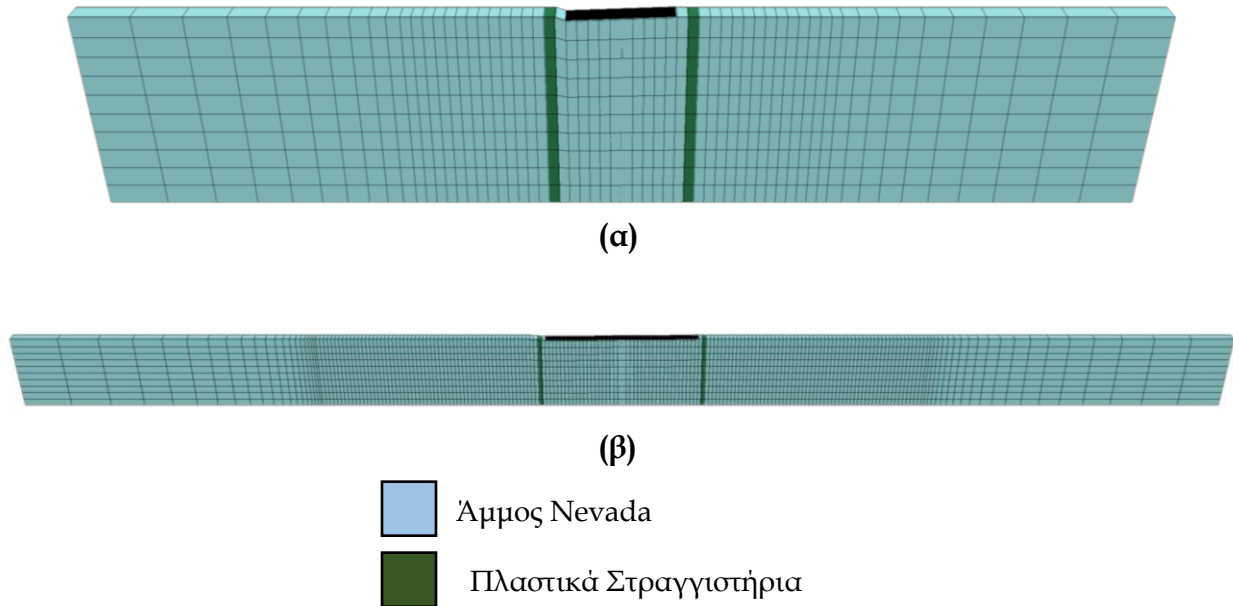


(β)

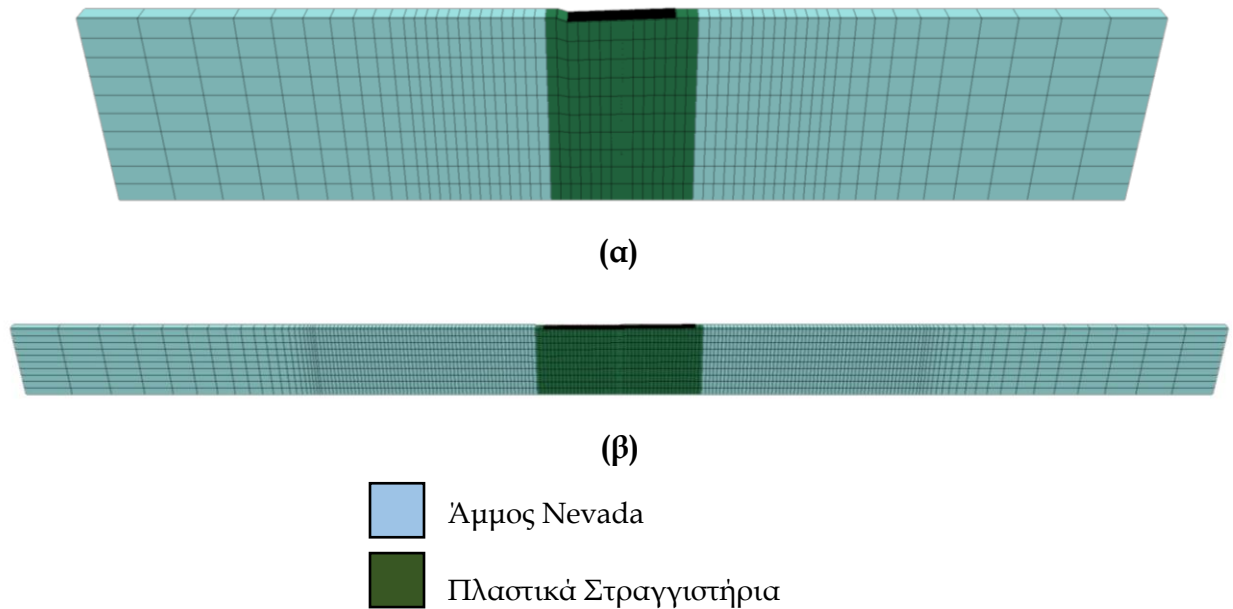


**Σχήμα 3.9:** Διατάξη εδάφους - πλαστικών στραγγιστηρίων σε όλη την περιοχή του τετραγωνικού θεμελίου και 0.5m εκατέρωθεν (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 3.10** και στο **Σχήμα 3.11** παρουσιάζονται οι διατάξεις εδάφους - πλαστικών στραγγιστηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , κατ' αντιστοιχία με τις διατάξεις για τετραγωνικά θεμέλια πλάτους  $B$  στο **Σχήμα 3.8** και **Σχήμα 3.9**, αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.10:** Διάταξη εδάφους - πλαστικών στραγγιστηρίων εκατέρωθεν θεμελιολωρίδας (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$



**Σχήμα 3.11:** Διάταξη εδάφους - πλαστικών στραγγιστηρίων σε όλη την περιοχή της θεμελιολωρίδας και 0.5m εκατέρωθεν (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$



### 3.6 Προσομοίωση Βελτίωσης με Περιμετρικά Τοιχία

Η δεύτερη μέθοδος βελτίωσης της εδαφικής στρώσης που διερευνήθηκε είναι η εφαρμογή διαφραγματικών τοιχίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (Diaphragm Walls) ή αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων σε γεωμετρία τοιχίων. Πρακτικά, τα διαφραγματικά τοιχία μπορούν να θεωρούνται «άκαμπτα» τοιχία, ενώ αντίστοιχα τα τοιχία από βαθιά εδαφική ανάμιξη (Soil Mixing) θεωρούνται «εύκαμπτα». Συνεπώς, η σύγκριση μεταξύ τους, μπορεί να υποδείξει τη σημασία της στιβαρότητας των τοιχίων στη βελτίωση του εδάφους έναντι ρευστοποίησης. Επιπλέον, σημασία έχει και το βάθος αυτών των τοιχίων, όπως προέκυψε και από τα πειράματα των **Mitrani et al (2012)**.

Στον **Πίνακα 3.5** και στον **Πίνακα 3.6** παρουσιάζονται οι παράμετροι των «άκαμπτων» και «εύκαμπτων» τοιχίων.

**Πίνακας 3.5:** Παράμετροι προσομοίωσης «άκαμπτων» διαφραγματικών τοιχίων (από οπλισμένο σκυρόδεμα)

Διαφραγματικά τοιχία		
Πυκνότητα	$\rho$ (Mgr/m <sup>3</sup> )	2.5
Μέτρο Ισότροπης Συμπίεσης	K (kPa)	1.67*10 <sup>7</sup>
Μέτρο Διάτμησης	G (kPa)	1.25*10 <sup>7</sup>
Διαπερατότητα	k (m/s)	6.6*10 <sup>-8</sup>

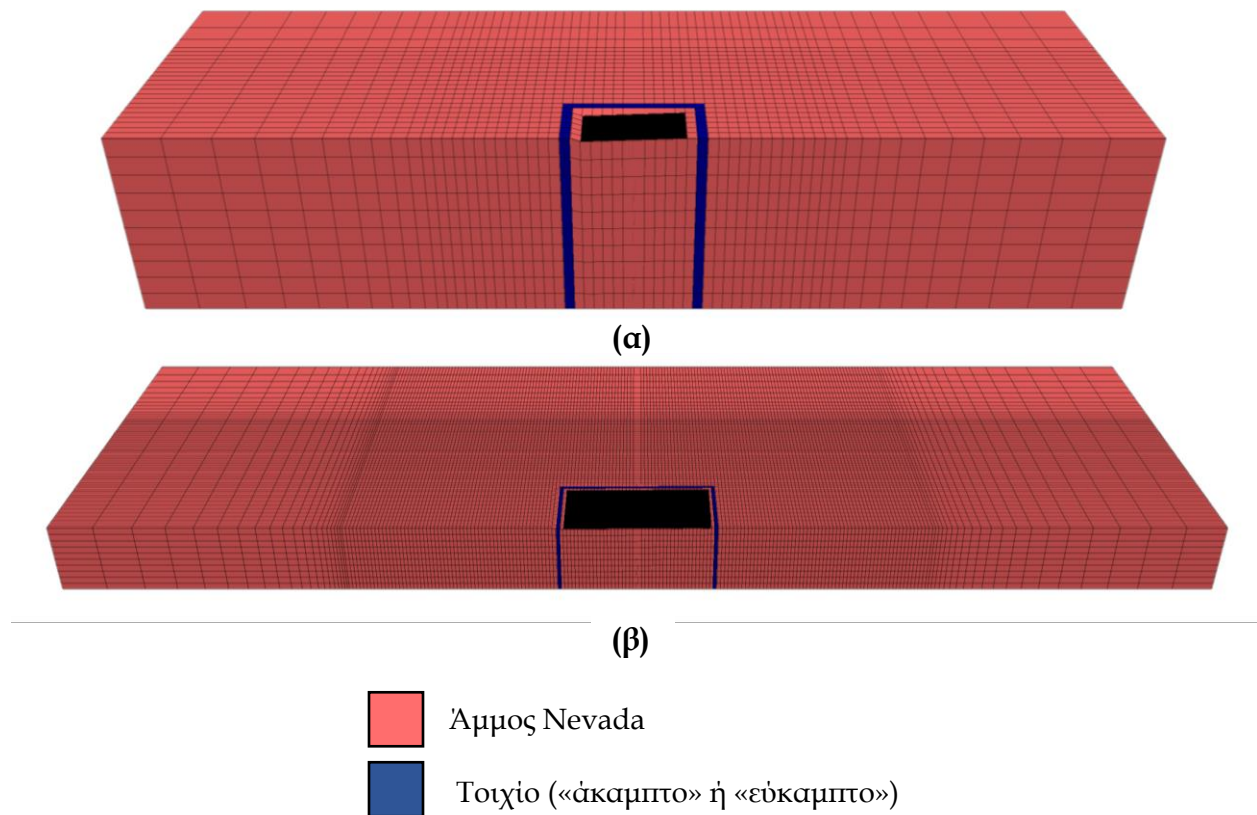
**Πίνακας 3.6:** Παράμετροι προσομοίωσης «εύκαμπτων» (από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους)

Αλληλοτεμνόμενοι Εδαφοπάσσαλοι		
Πυκνότητα	$\rho$ (Mgr/m <sup>3</sup> )	2.5
Μέτρο Ισότροπης Συμπίεσης	K (kPa)	1.67*10 <sup>6</sup>
Μέτρο Διάτμησης	G (kPa)	1.25*10 <sup>6</sup>
Διαπερατότητα	k (m/s)	6.6*10 <sup>-7</sup>

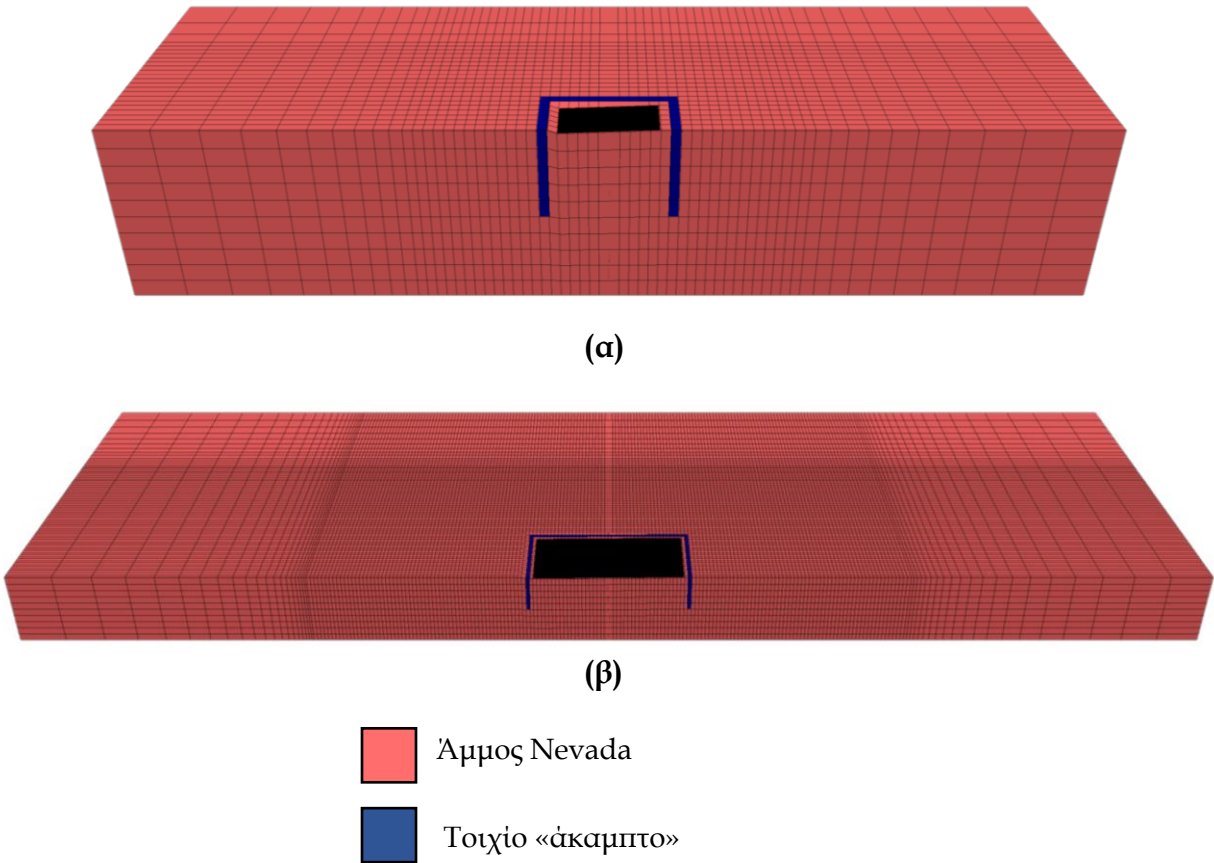
Στις αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις διερευνήθηκε και η επίδραση του βάθους των τοιχίων, οπότε έγιναν δύο σειρές αναλύσεων:

- i. Περιμετρικά τοιχία με πλάτος 0.5m και βάθος 10m, δηλαδή όλο το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης (Σχήμα 3.12).
- ii. Περιμετρικά τοιχία με πλάτος 0.5m και βάθος 5m, δηλαδή στο ήμισυ του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης (Σχήμα 3.13).

Συγκεκριμένα, η αποτελεσματικότητα τοιχίων πλήρους βάθους (έως τα 10m) διερευνήθηκε τόσο για «άκαμπτα» όσο και για «εύκαμπτα» τοιχία. Αντίθετα, η αποτελεσματικότητα τοιχίων μισού βάθους (έως τα 5m) έγινε μόνο για τα «άκαμπτα» τοιχία.

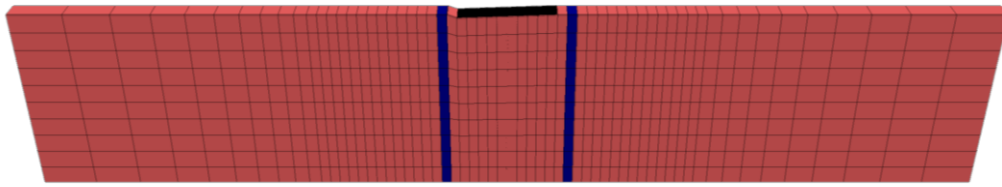


**Σχήμα 3.12:** Διάταξη τοιχίων πλήρους βάθους περιμετρικά του τετραγωνικού θεμελίου (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$



**Σχήμα 3.13:** Διάταξη τοιχίων μισού βάθους (έως 5m) περιμετρικά του τετραγωνικού θεμελίου: (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$

Τα ίδια χαρακτηριστικά για τα τοιχία χρησιμοποιούνται και στις αναλύσεις που προσομοιώνουν δισδιάστατες συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και λωριδωτού (απειρομήκους) θεμελίου πλάτους  $B=5$  και  $20m$ , αντίστοιχα. Έτσι, στο **Σχήμα 3.14** και στο **Σχήμα 3.15** παρουσιάζονται οι διατάξεις για τις εν λόγω αναλύσεις, στη μορφή του **Σχήματος 3.12** και του **Σχήματος 3.13** για τα αντίστοιχα τετραγωνικά θεμέλια.



(α)



(β)

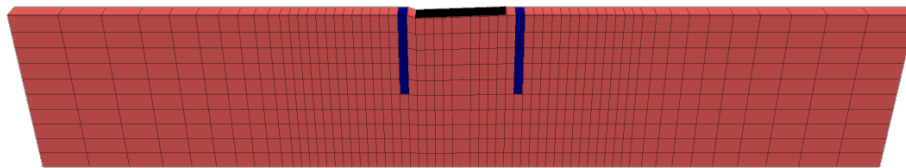


Άμμος Nevada



Τοίχιο («άκαμπτο» ή «εύκαμπτο»)

**Σχήμα 3.14:** Διάταξη τοιχίων πλήρους βάθους περιμετρικά θεμελιολωρίδας (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$



(α)



(β)



Άμμος Nevada



Τοίχιο «άκαμπτο»

**Σχήμα 3.15:** Διάταξη τοιχίων μισού βάθους (έως 5m) περιμετρικά της θεμελιολωρίδας: (α) Πλάτους  $B=5m$ , (β) Πλάτους  $B=20m$

## Κεφάλαιο 4

# Παραμετρική Διερεύνηση Απόκρισης Θεμελίων σε Ρευστοποιήσιμο Έδαφος με Ήπια Κλίση

### 4.1. Γενικά

Αξιοποιώντας την αριθμητική μεθοδολογία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν προκειμένου να εξεταστεί η σεισμική απόκριση τετραγωνικών θεμελίων και θεμελιολωρίδων σε (μη βελτιωμένη) ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση με ήπια κλίση. Αναλυτικότερα περιγράφονται παρακάτω:

- i. Οι σημαντικές παράμετροι που επιλέχθηκαν προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση τους στη σεισμική απόκριση θεμελίων.
- ii. Η τυπική απόκριση τέτοιων θεμελίων πλάτους  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$  για μια διέγερση αναφοράς, που αποτελεί το αποτέλεσμα της ανάλυσης αναφοράς της παρούσας εργασίας.
- iii. Τα αποτελέσματα (κυρίως σε όρους μετατοπίσεων και στροφών θεμελίων) επί τη βάση της παραμετρικής διερεύνησης, που εκτελέστηκε ως προς τις επιλεγείσες σημαντικές παραμέτρους του προβλήματος.

### 4.2. Σημαντικές παράμετροι του προβλήματος

Στις αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, διερευνήθηκαν οι εξής βασικές παράμετροι του προβλήματος: το πλάτος  $B$  και το σχήμα του θεμελίου [θεμελιολωρίδα (strip) και τετραγωνικό (square) θεμέλιο], η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}$  (g) καθώς και το φορτίο του θεμελίου  $q$  (kPa). Στόχος είναι να καταγραφεί ποιοτικά και ποσοτικά η σεισμική απόκριση του θεμελίου σε όρους μετατοπίσεων (οριζόντια  $x$ , κατακόρυφη  $z$ ) και στροφής  $\theta$ . Άλλες παράμετροι της διέγερσης (π.χ. δεσπόζουσα περίοδος  $T_e$ , αριθμός κύκλων διέγερσης  $N$  έχουν ήδη διερευνηθεί και δίνουν μονοτονικά αυξητική επίδραση στα  $x$ ,  $z$  και  $\theta$  (Καζάκης 2020). Όμως δεν διερευνώνται εδώ, χάριν συντομίας, καθώς η έμφαση δίνεται στην επίδραση του σχήματος του θεμελίου με  $3\Delta$

αναλύσεις μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Αντίστοιχα, και η εκκεντρότητα  $e$  του φορτίου έχει διερευνηθεί και δίνει μικρο-διαφορές στις τιμές των  $x, z$  και  $\theta$  σε σχέση με την περίπτωση όπου  $e=0$  (Καζάκης 2020). Δηλαδή το μέσο φορτίο  $q$  είναι σημαντική παράμετρος από απόψεως φορτίου θεμελίου.

*Πίνακας 4.7: Συνδυασμοί τιμών παραμέτρων στις αναλύσεις του παρόντος Κεφαλαίου*

		Free Field				
Case No	Type	B(m)	q(kPa)	$a_{max}$ (g)	$T_e$ (s)	N
1	-	-	-	0.10	0.35	14
2	-	-	-	0.20	0.35	14
3	-	-	-	0.40	0.35	14
		No Improvement				
4	square	5.00	100	0.20	0.35	14
5	strip	5.00	100	0.20	0.35	14
6	square	5.00	100	0.10	0.35	14
7	strip	5.00	100	0.10	0.35	14
8	square	5.00	100	0.40	0.35	14
9	strip	5.00	100	0.40	0.35	14
10	square	5.00	200	0.20	0.35	14
11	strip	5.00	200	0.20	0.35	14
12	square	5.00	50	0.20	0.35	14
13	strip	5.00	50	0.20	0.35	14
14	square	20.00	100	0.20	0.35	14
15	strip	20.00	100	0.20	0.35	14
16	square	20.00	100	0.10	0.35	14
17	strip	20.00	100	0.10	0.35	14
18	square	20.00	100	0.40	0.35	14
19	strip	20.00	100	0.40	0.35	14
20	square	20.00	200	0.20	0.35	14
21	strip	20.00	200	0.20	0.35	14
22	square	20.00	50	0.20	0.35	14
23	strip	20.00	50	0.20	0.35	14

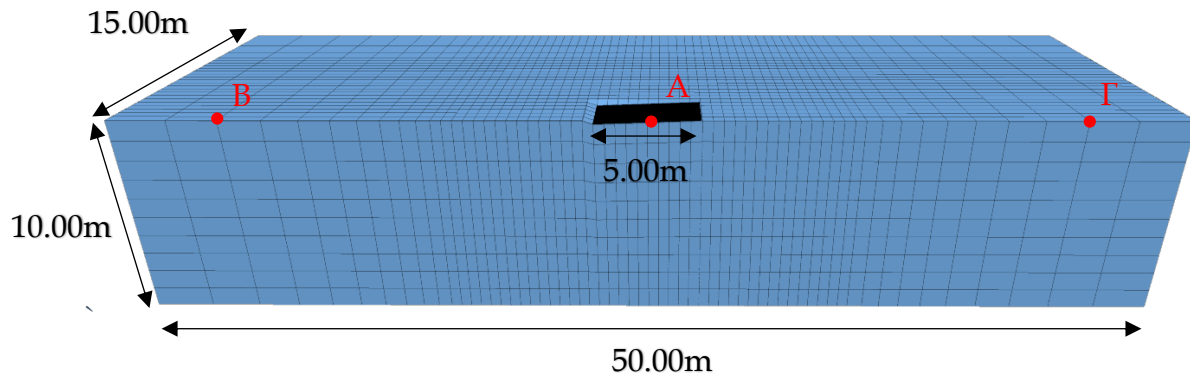
Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάλυση, ενώ η ανάλυση αναφοράς πραγματοποιήθηκε με

$a_{max}=0.2g$  και  $q=100kPa$  (Ανάλυση #4 για  $B = 5m$  και ανάλυση #14 για  $B = 20m$ ). Επιπλέον έγιναν και αναλύσεις ελευθέρου πεδίου (Free Field) για την κάθε διέγερση, ώστε να προκύπτει και η οριζόντια μετατόπιση του εδάφους  $x_{FF}$ .

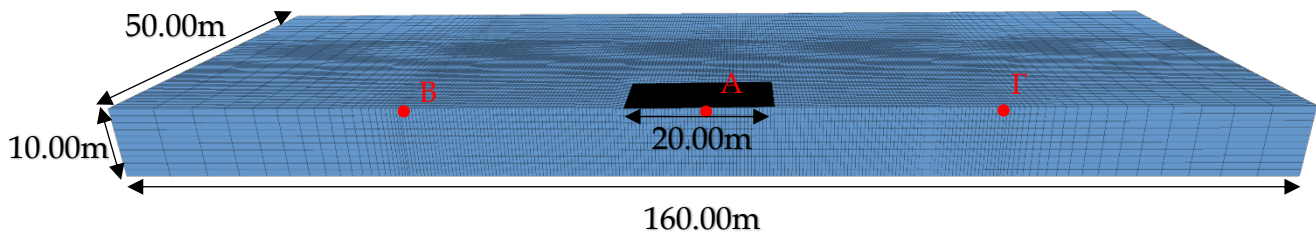
Υπογραμμίζεται ότι οι αναλύσεις αφορούν την απόκριση ελευθέρου πεδίου και εκείνη της θεμελιοωρίδας είναι αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης (2Δ), ενώ οι αναλύσεις που αφορούν την απόκριση τετραγωνικού θεμελίου είναι 3Δ. Υπογραμμίζεται ότι οι αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης ονομάζονται (απλουστευτικά) εδώ 2Δ, παρά το γεγονός ότι εκτελέστηκαν με το FLAC3D. Πιο συγκεκριμένα:

- **Αναλύσεις #1 - #3:** Αφορούν συνθήκες ελεύθερου πεδίου και πραγματοποιήθηκαν με τον κάρναβο που πραγματοποιήθηκαν οι 2Δ αναλύσεις.
- **Αναλύσεις #4 - #23:** Αφορούν συνθήκες σε ρευστοποιήσιμο έδαφος χωρίς βελτίωση με κεντρικά φορτισμένο θεμέλιο  $q(kPa)$  και πλάτος  $B(m)$ . Οι αναλύσεις που αναφέρονται ως strip και square έγιναν με τους 2Δ και 3Δ καννάβους, αντίστοιχα.

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται τα βασικότερα σημεία των αναλύσεων με το **Σχήμα 4.1** να αφορά την περίπτωση θεμελίωσης τετραγωνικού θεμελίου πλάτους  $B = 5m$  και το **Σχήμα 4.2** την περίπτωση του τετραγωνικού θεμελίου πλάτους  $B = 20m$ . Τα περισσότερα μεγέθη εξετάζονται στο σημείο A κάτω από το κέντρο του θεμελίου και στα σημεία B και Γ όπου βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το θεμέλιο (οιονεί ελεύθερο πεδίο) προς τα ανάντη (Free Field upstream) και τα κατάντη (Free Field downstream) αντίστοιχα. Ειδικότερα, για πλάτος θεμελίου 5m (**Σχήμα 4.1**), τα σημεία B και Γ απέχουν 20 από το κέντρο του καννάβου, ενώ για θεμέλιο πλάτους 20m (**Σχήμα 4.2**), απέχουν 40m. Στις ίδιες αποστάσεις από το κέντρο του θεμελίου εκτιμώνται τα μεγέθη και στις 2Δ αναλύσεις.



Σχήμα 4.1: Σημεία καταγραφής απόκρισης επιφανείας σε 3Δ αναλύσεις με πλάτος τετραγωνικού θεμελίου 5m



Σχήμα 4.2: Σημεία καταγραφής απόκρισης επιφανείας σε 3Δ αναλύσεις με πλάτος τετραγωνικού θεμελίου 20m

### 4.3. Τυπική απόκριση θεμελίου σε ρευστοποιήσιμη στρώση με ήπια κλίση

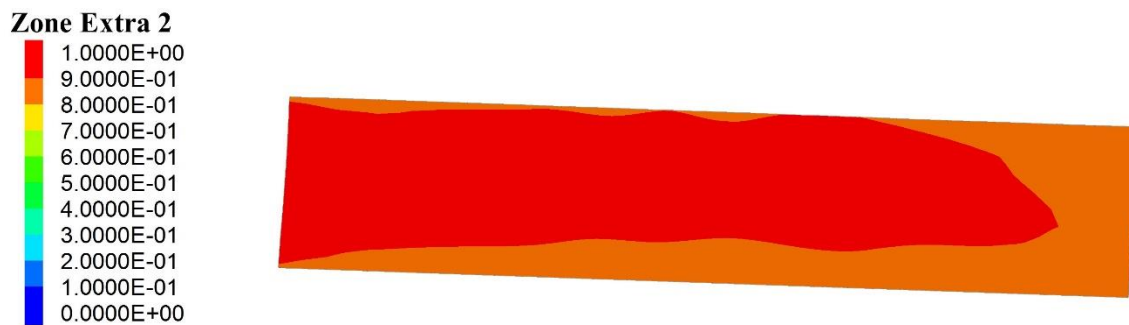
Για την μελέτη της συμπεριφοράς των άκαμπτων θεμελίων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, αρχικώς καταγράφηκε η απόκριση του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου και ύστερα η απόκριση κεντρικά φορτιζόμενου τετραγωνικού θεμελίου και θεμελιολωρίδας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αναφέρονται στην ανάλυση αναφοράς ( $a_{\max}=0.2g$  και  $q=100kPa$ ), ενώ τα βασικά μεγέθη ενδιαφέροντος, πέρα από τις (οριζόντιες και κατακόρυφες) μετακινήσεις και τη στροφή του θεμελίου, είναι οι



μετακινήσεις του εδάφους, ο λόγος υπερπιέσεων του νερού των πόρων ( $r_u$ ) και η συσσωρευμένη (μέγιστη) διατμητική παραμόρφωση στο έδαφος.

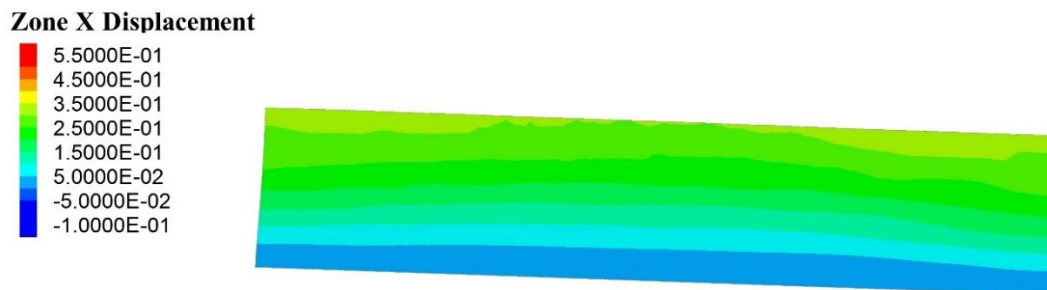
#### 4.3.1. Απόκριση υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η ανάλυση σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του λόγου υπερπιέσεων πόρων  $r_u$  και παρατηρείται πλήρη ρευστοποίηση στην εδαφική στρώση καθώς η ελάχιστη τιμή του  $r_u$  είναι κοντά στο 1 ( $\min r_u=0.8$ ).



**Σχήμα 4.3:** Κατανομή λόγου υπερπιέσεων πόρων  $r_u$  στο έδαφος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου για την διέγερση αναφοράς ( $a_{max}=0.2g$ )

Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζεται η οριζόντια μετακίνηση όπου φαίνεται ότι το έδαφος αναπτύσσει οριζόντιες μετακινήσεις (μέγιστη τιμή στην επιφάνεια 0.3m) προς την κατεύθυνση της ήπιας κλίσης, και οι οποίες μειώνονται με το βάθος.



**Σχήμα 4.4:** Κατανομή οριζόντιας μετακίνησης εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου για την διέγερση αναφοράς ( $a_{max}=0.2g$ )

#### **4.3.2. Απόκριση κεντρικά φορτιζόμενου θεμελίου**

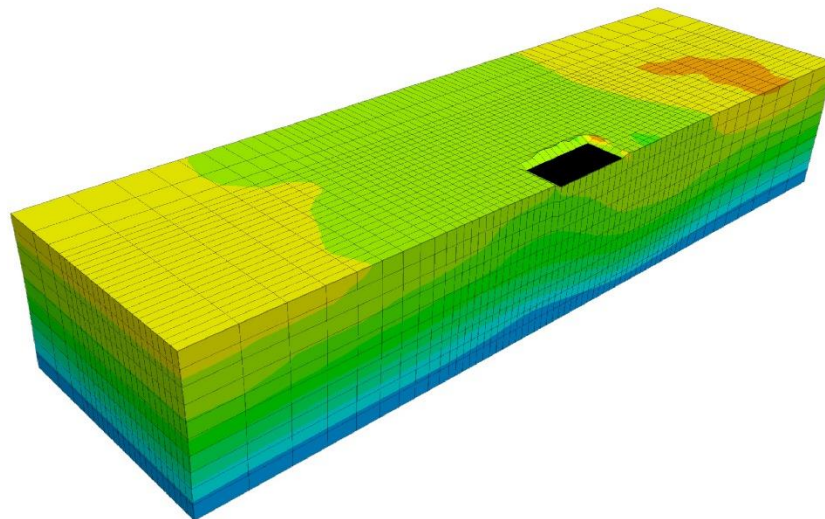
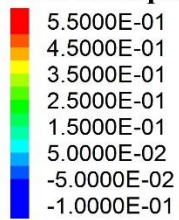
Για την απόκριση των κεντρικά φορτιζόμενων θεμελίων πλάτους  $B = 5\text{m}$  και  $B = 20\text{m}$  σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με ήπια κλίση, επιλέχθηκε η παρουσίαση αποτελεσμάτων της βασικής ανάλυσης με  $a_{\max}=0.2g$  και  $q=100\text{kPa}$ .

##### Οριζόντιες μετακινήσεις στο έδαφος θεμελίωσης

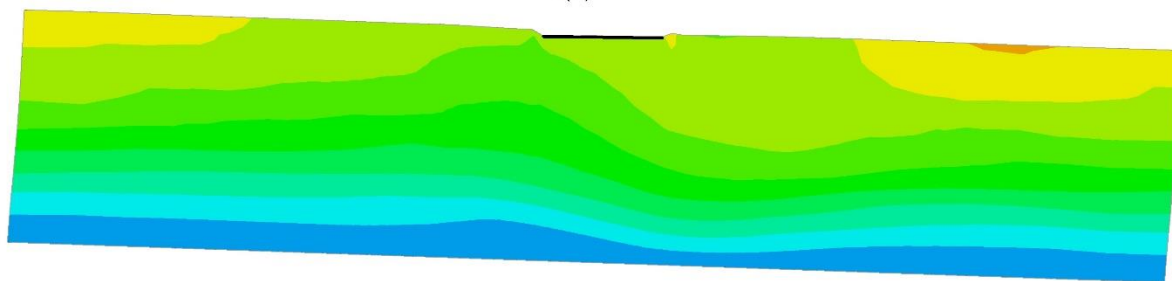
Αρχικώς παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος κάρναβος της εδαφικής στρώσης για τις δύο περιπτώσεις, καθώς και οι ισοκαμπύλες της οριζόντιας μετακίνησης στο τέλος της δόνησης της ανάλυσης αναφοράς. Στο **Σχήμα 4.5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$  και στο **Σχήμα 4.6** για το θεμέλιο πλάτους  $B = 20\text{m}$ , ενώ τα επιμέρους σχήματα δίνουν τη σχετική πληροφορία για τις περιπτώσεις που το θεμέλιο είναι τετραγωνικό ( $\alpha,\beta$ ) και μορφής λωρίδας ( $\gamma$ ).

Όπως φαίνεται, εν γένει οι οριζόντιες μετακινήσεις στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μεγαλύτερες στην κατάντη πλευρά των θεμελίων, ενώ ανάντη είναι μικρότερες. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι η ύπαρξη θεμελίου δημιουργεί μία πιο ισχυρή ζώνη που περιορίζει τις οριζόντιες μετατοπίσεις, αλλά μόνο στα ανάντη. Η μείωση είναι πιο σημαντική για τα πλατότερα θεμέλια ( $B = 20\text{m}$ ) και για τις θεμελιολωρίδες έναντι των τετραγωνικών θεμελίων. Σε μεγάλη απόσταση από το θεμέλιο, η οριζόντια μετατόπιση του εδάφους δείχνει να γίνεται ίση τόσο ανάντη όσο και κατάντη (με εκείνη στο ελεύθερο πεδίο). Από εκεί και πέρα, με το βάθος, οι οριζόντιες μετατοπίσεις μειώνονται, με αυτή τη μείωση να γίνεται πιο ραγδαία στη στενή περιοχή του θεμελίου.

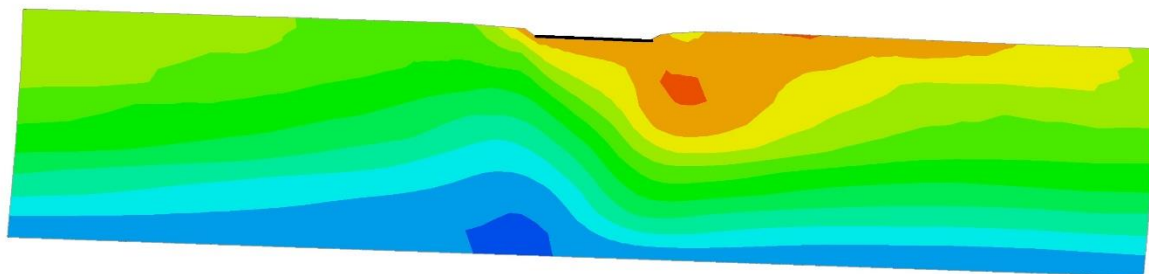
**Zone X Displacement**



(α)

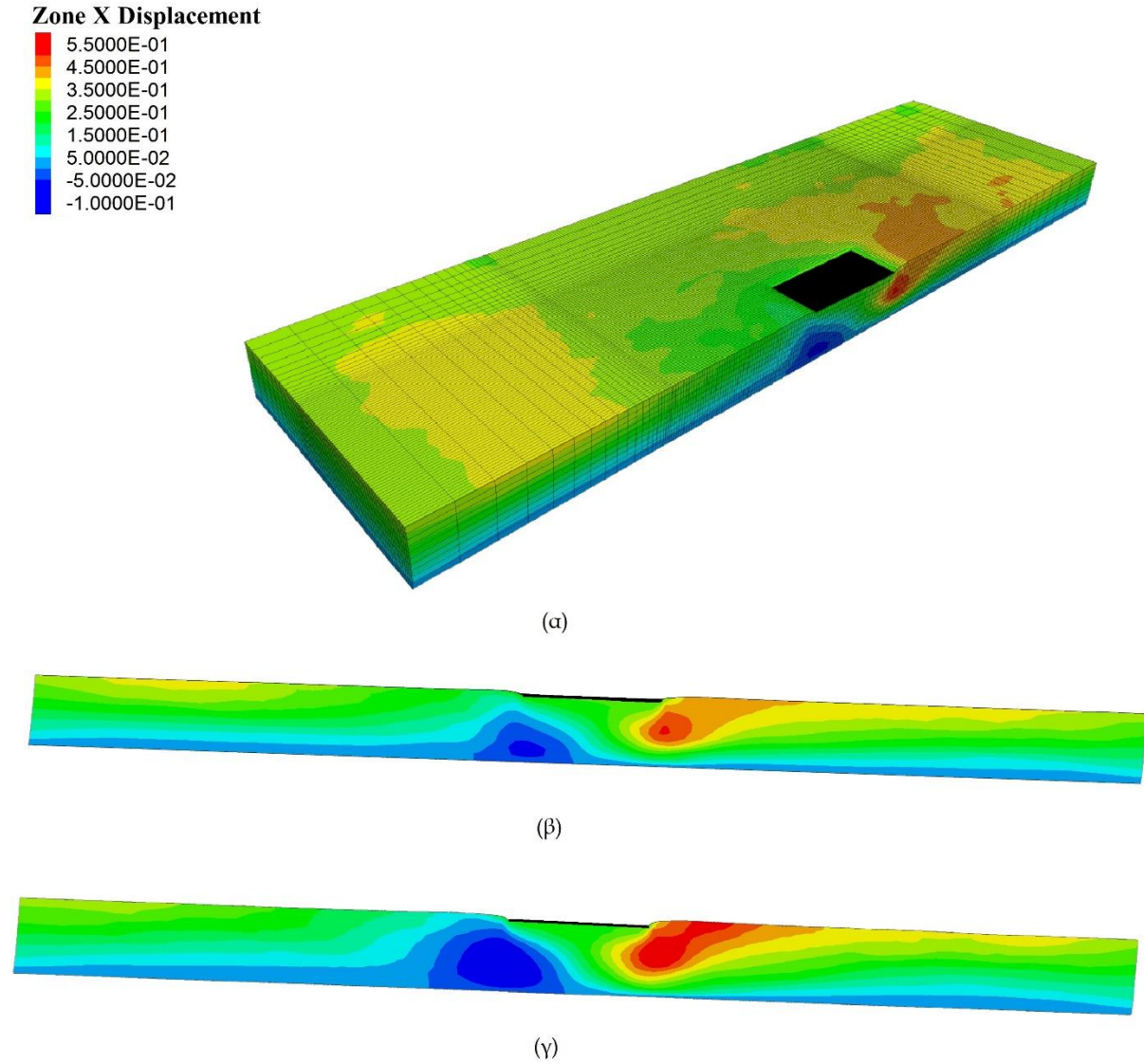


(β)



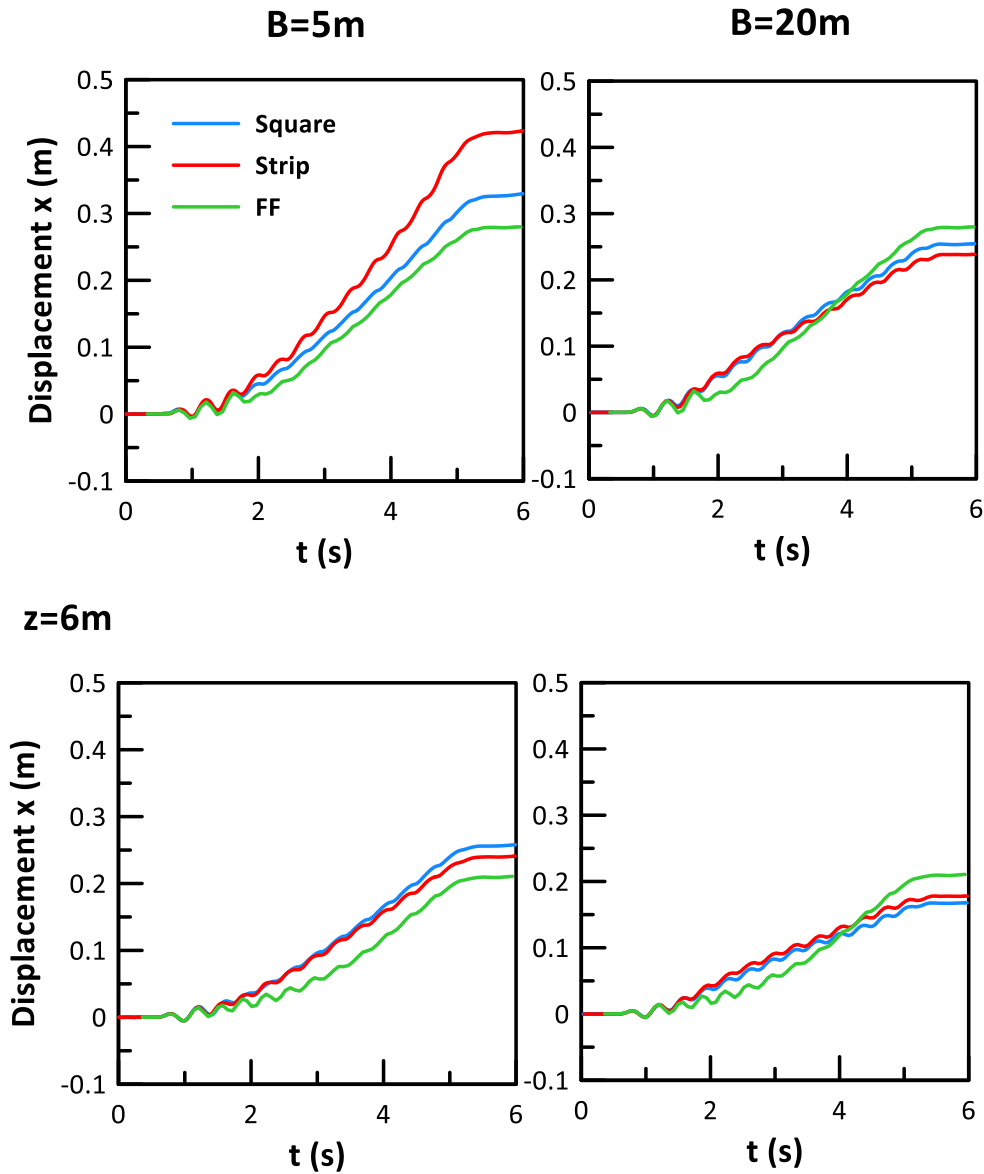
(γ)

**Σχήμα 4.5:** Παραμορφωμένος κώνναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο με πλάτος  $B=5m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)



**Σχήμα 4.6:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο με πλάτος  $B=20m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων μετακινήσεων στο σημείο A, στην επιφάνεια του εδάφους και σε βάθος  $z=6m$ . Όπως φαίνεται το θεμέλιο πλάτους 20m παρεμποδίζει μερικώς την οριζόντια εξάπλωση του εδάφους καθώς έχουμε μικρότερη οριζόντια μετακίνηση σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο (FF) σε αντίθεση με τα θεμέλια πλάτους 5m που μετακινούνται ελεύθερου πεδίου.



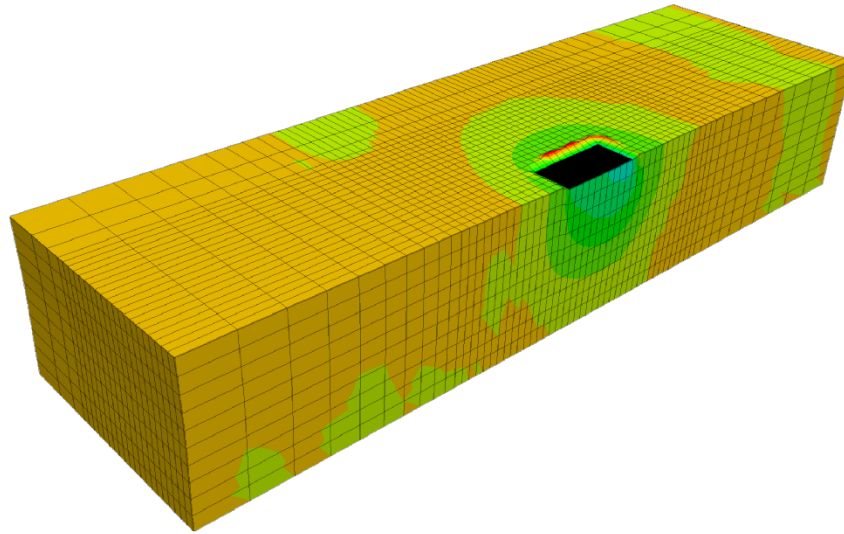
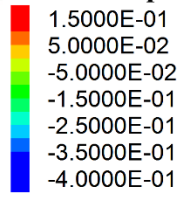
Σχήμα 4.7: Χρονοϊστορίες οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους και για βάθος  $z=6m$  κάτω από το κέντρο των θεμελίων πλάτους  $B=5m$  (αριστερά) και  $20m$  (δεξιά) για τις αναλύσεις αναφοράς.

Κατακόρυφες μετακινήσεις στο έδαφος θεμελίωσης

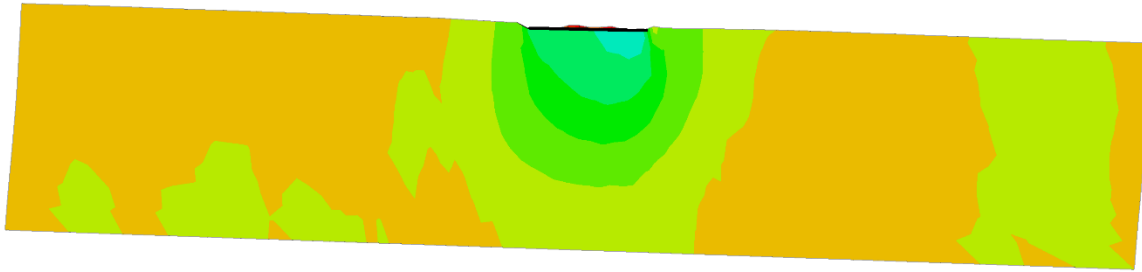
Στο **Σχήμα 4.8** και στο **Σχήμα 4.9** παρουσιάζεται η εικόνα των κατακόρυφων μετακινήσεων του εδάφους μετά το πέρας της δόνησης αναφοράς για τις περιπτώσεις θεμελίων πλάτους  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$ , αντίστοιχα. Προκύπτουν σημαντικές κατακόρυφες μετακινήσεις των θεμελίων οι οποίες μάλιστα είναι μεγαλύτερες προς τα κατόντη, υπονοώντας στροφή των θεμελίων προς τη διεύθυνση αυτή. Φυσικά, εκατέρωθεν των θεμελίων παρατηρούνται και ανυψώσεις, οι οποίες φθίνουν με την απόσταση από τα θεμέλια. Λεπτομερής παρατήρηση υποδηλώνει ότι για  $B = 5\text{m}$ , οι καθιζήσεις είναι μεγαλύτερες όταν το θεμέλιο έχει μορφή λωριδωτού φορτίου, ενώ το αντίθετο προκύπτει όταν το θεμέλιο έχει πλάτος  $B = 20\text{m}$ .

Στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων μετακινήσεων της ανάλυσης αναφοράς (κλίση  $i=2^\circ$ ) με την αντίστοιχη ανάλυση αναφοράς σε επίπεδο έδαφος (κλίση  $i=0^\circ$ ). Παρατηρείται ότι οι καθιζήσεις για  $i=2^\circ$  είναι εν γένει ελαφρώς αυξημένες από αυτές που μετρήθηκαν για  $i=0^\circ$ , ενώ ακολουθούν την ίδια εν γένει απόκριση, ήτοι (μικρότερες καθιζήσεις στο τετραγωνικό θεμέλιο με μικρό πλάτος  $B = 5\text{m}$  έναντι της θεμελιολωρίδας και μεγαλύτερες για την περίπτωση θεμελίου με πλάτος  $B = 20\text{m}$ ). Μία εξήγηση για αυτή την αντιστροφή της συμπεριφοράς σχετίζεται με το πως επηρεάζουν τα διάφορα θεμέλια τη στρώση πάχους  $10\text{m}$ . Συγκεκριμένα, το τετραγωνικό θεμέλιο με πλάτος  $B = 5\text{m}$  δεν αυξάνει σημαντικά τις τάσεις σε όλο το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος, με αποτέλεσμα να προκύπτει πλήρης ρευστοποίηση κάτω από το θεμέλιο και τελικά μείωση των καθιζήσεων λόγω της μείωσης των επιταχύνσεων που φθάνουν σε αυτό (φυσική «σεισμικής μόνωσης»). Αντίθετα, στην περίπτωση του  $B = 20\text{m}$  και στο τετραγωνικό θεμέλιο και στη λωρίδα οι τάσεις αυξάνουν σημαντικά σε όλο το πάχος της στρώσης, και έτσι, δεν υπάρχει (σημαντική) διαφοροποίηση της απόκρισης.

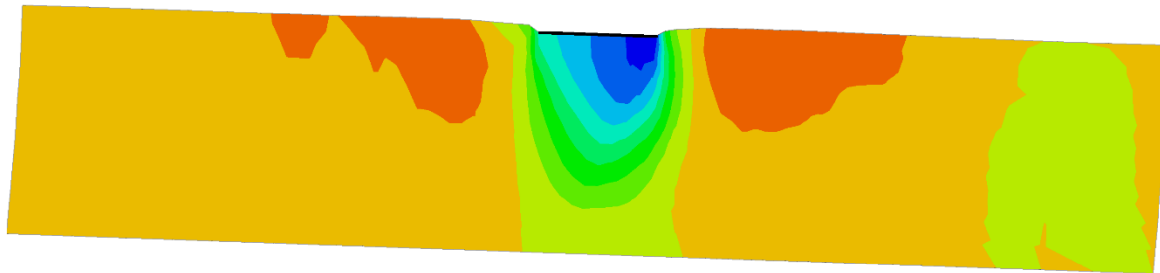
**Zone Z Displacement**



(α)

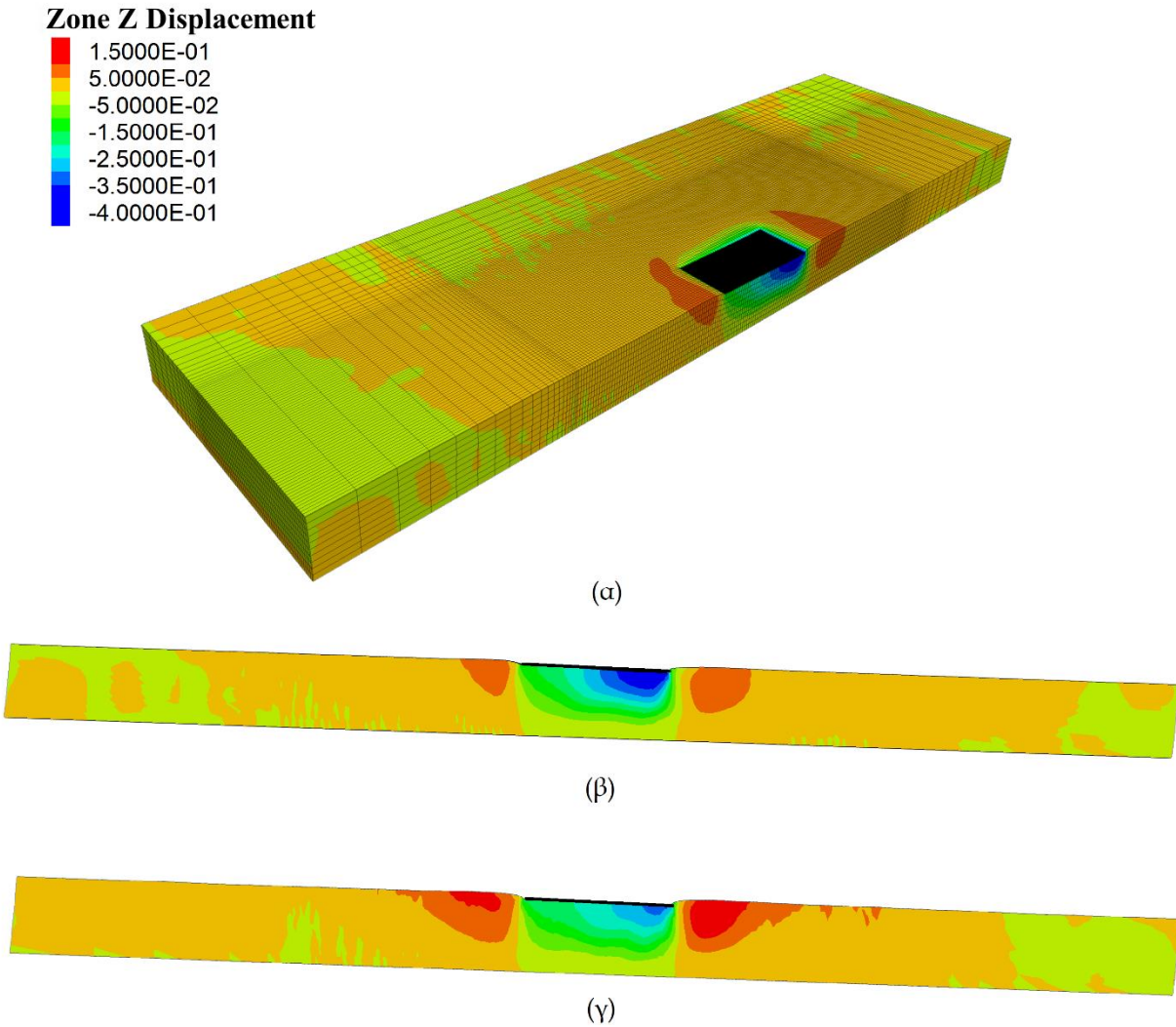


(β)



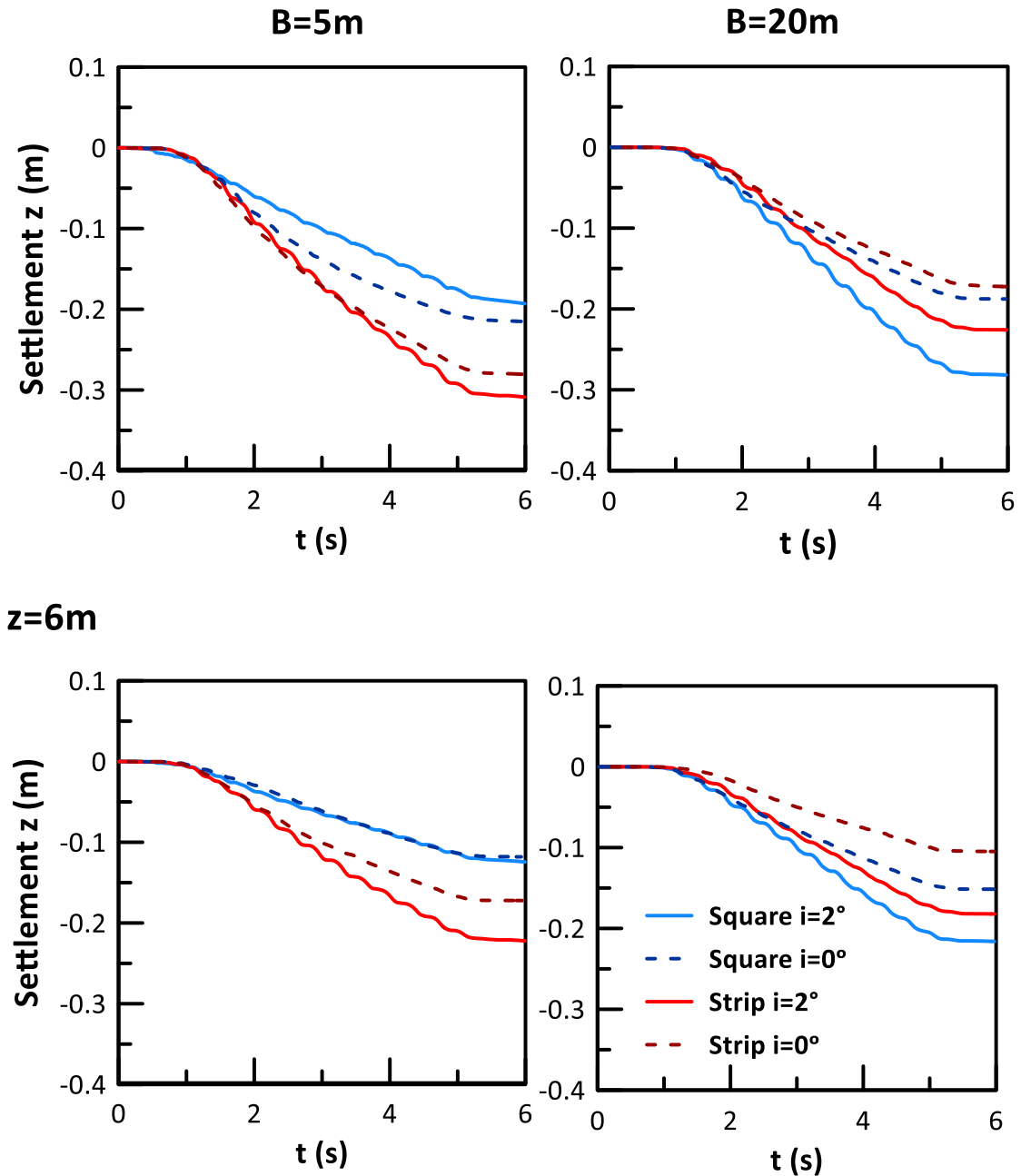
(γ)

**Σχήμα 4.8:** Παραμορφωμένος κώνναβος και κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για θεμέλιο με πλάτος  $B=5m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)



**Σχήμα 4.9:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για θεμέλιο με πλάτος  $B=20m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

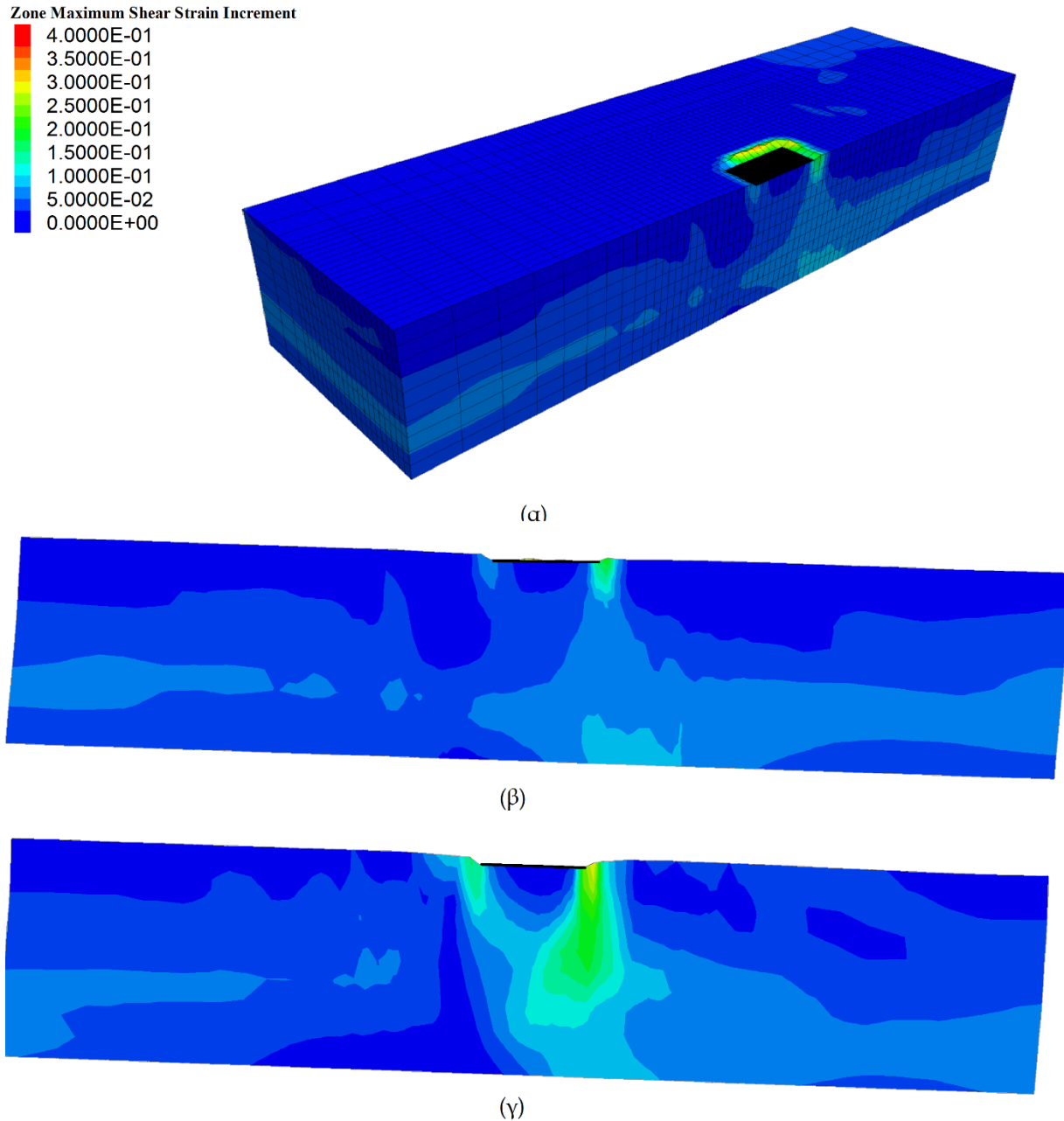




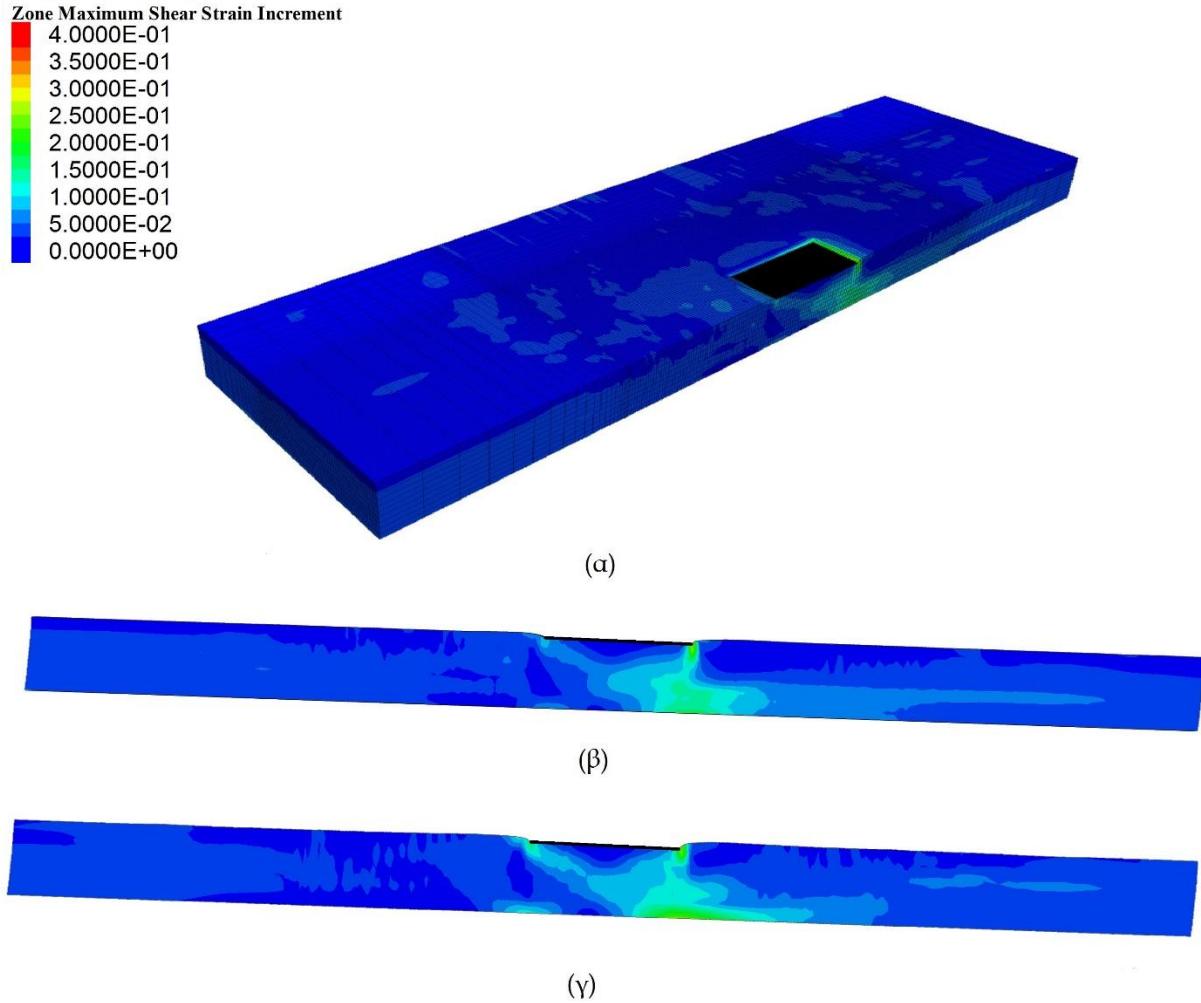
**Σχήμα 4.10:** Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους και για βάθος  $z=6m$  κάτω από το κέντρο των θεμελίων διαφορετικού σχήματος (*square, strip*) και πλάτους  $B=5m$  (αριστερά) και  $20m$  (δεξιά) για τις αναλύσεις αναφοράς, υπό τις συνθήκες οριζόντιου ( $i=0^\circ$ ) και επικλινούς εδάφους ( $i=2^\circ$ )

Διατμητικές παραμορφώσεις στο έδαφος θεμελίωσης

Στο **Σχήμα 4.11** και στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους μετά το πέρας της δόνησης αναφοράς για τις περιπτώσεις θεμελίων  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$ , αντίστοιχα. Και πάλι τα υπο-σχήματα δίνουν τη σχετική πληροφορία ξεχωριστά για το τετραγωνικό θεμέλιο ( $\alpha, \beta$ ) και τη θεμελιοωρίδα ( $\gamma$ ). Σε όλες τις περιπτώσεις, οι έντονες διατμητικές παραμορφώσεις εντοπίζονται στην κατάντη άκρη του θεμελίου (λόγω της στροφής του) και καλύπτουν όλο το πάχος της εδαφικής στρώσης, διαμορφώνοντας μια αστοχία μορφής «σφήνας». Οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι πιο έντονες στην περίπτωση της θεμελιοωρίδας συγκριτικά με του τετραγωνικού θεμελίου ίδιου πλάτους. Επίσης, για  $B = 5\text{m}$  οι ζώνες έντονων διατμητικών παραμορφώσεων δεν φτάνουν μέχρι το τέλος της ρευστοποιήσιμης στρώσης, ενώ για  $B = 20\text{m}$  οι εν λόγω ζώνες καλύπτουν όλο το πάχος της στρώσης, και μάλιστα επεκτείνονται προς τα κατάντη ελαφρώς στην περίπτωση θεμελιοωρίδας.



**Σχήμα 4.11:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων εδάφους για θεμέλιο με πλάτος  $B=5m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)



**Σχήμα 4.12:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων εδάφους για θεμέλιο με πλάτος  $B=20m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

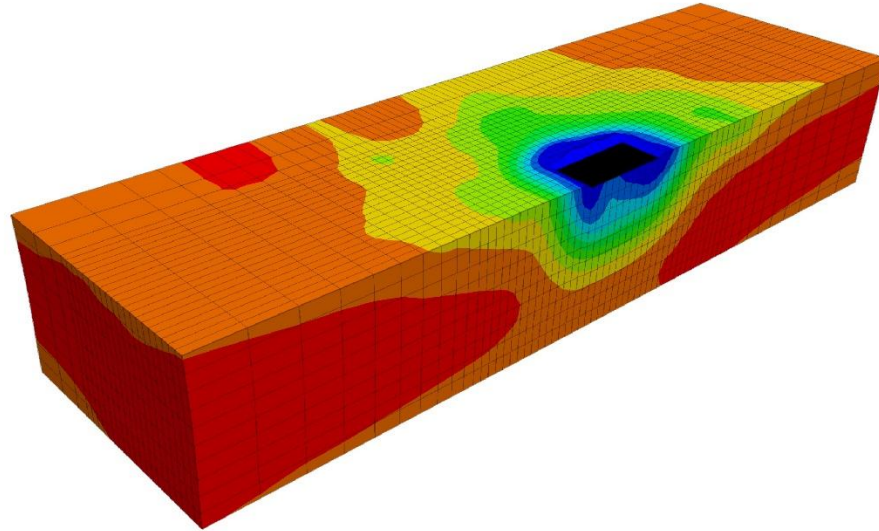
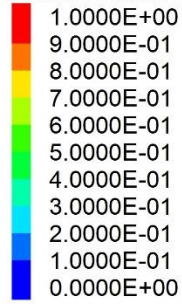
Υπερπίεση πόρων στο έδαφος θεμελίωσης

Στο **Σχήμα 4.13** και στο **Σχήμα 4.14** παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου υπερπίεσεων πόρων στο τέλος της δόνησης αναφοράς για τα θεμέλια  $B = 5\text{m}$  και  $B = 20\text{m}$ , αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι τιμές του λόγου  $r_u = 0$  αντιστοιχούν σε υδροστατικές πιέσεις πόρων, ενώ τιμές  $r_u = 1$  υποδεικνύουν ότι οι υπερπίεσεις πόρων  $\Delta u = \sigma_v'$  (την αρχική ενεργό κατακόρυφη τάση), δηλαδή ότι υπάρχει ρευστοποίηση.

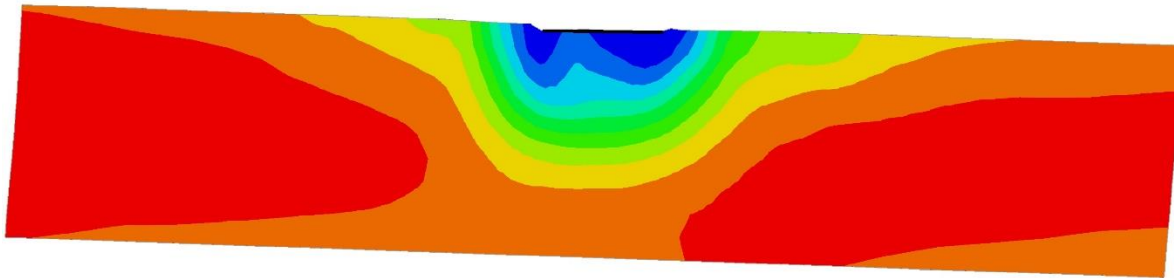
Αρχικώς προκύπτει ότι μακριά από τα θεμέλια προκύπτουν τιμές  $r_u > 0.8$ , και κατά τόπους μόνο ίσες με  $r_u = 1$ , δηλαδή ρευστοποίηση. Αυτό οφείλεται στο ότι μακριά από τα θεμέλια υπάρχει διάτμηση (λόγω της οριζόντιας εξάπλωσης), με αποτέλεσμα η διαστολικότητα του εδάφους να οδηγεί σε  $r_u < 1$ . Από εκεί και πέρα, το θεμέλιο λόγω του πρόσθετου φορτίου αλλά και της μετακίνησης της, επηρεάζει σημαντικά το λόγο υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  ύπο αυτό, λαμβάνοντας τιμές κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές κατά τόπους. Πιο συγκεκριμένα, η επιρροή του θεμελίου πλάτους  $B = 5\text{m}$  στην μείωση του συντελεστή  $r_u$  είναι εντονότερη στη θεμελιολωρίδα (**Σχήμα 4.13 γ**) σε σχέση με το τετραγωνικό θεμέλιο (**Σχήμα 4.13 β**) και αυτό αποδίδεται στον αβαθέστερο βολβό τάσεων του τετραγωνικού θεμελίου μικρού πλάτους. Παρόμοια εικόνα με απομειωμένες τιμές  $r_u$  παρατηρείται και κάτω από τα θεμέλια πλάτους  $20\text{m}$ , με τη διαφορά ότι εδώ η περιοχή αυτή είναι μεγαλύτερου βάθους, και δε παρουσιάζει ουσιαστικές διαφορές για τετραγωνικό θεμέλιο (**Σχήμα 4.14 β**) ή θεμελιολωρίδα **Σχήμα 4.14 (γ)**.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.15** και στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων των πόρων  $r_u$  σε χαρακτηριστικά σημεία, δηλαδή σε δύο βάθη στο θεμέλιο (Footing) και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη (Free Field upstream) και κατάντη (Free Field downstream) του θεμελίου, πρώτα για τα θεμέλια πλάτους  $B = 5\text{m}$  και μετά για εκείνα με  $B = 20\text{m}$ . Από τα σχήματα προκύπτει ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση στις τιμές του  $r_u$  μεταξύ ανάντη και κατάντη, όπου επιβεβαιώνονται ουσιαστικά η ρευστοποίηση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι οι τιμές  $r_u$  κάτω από το θεμέλιο απέχουν από τη ρευστοποίηση σε όλες τις περιπτώσεις, και ότι είναι λίγο μικρότερες κάτω από το θεμέλιο με  $B = 5\text{m}$ .

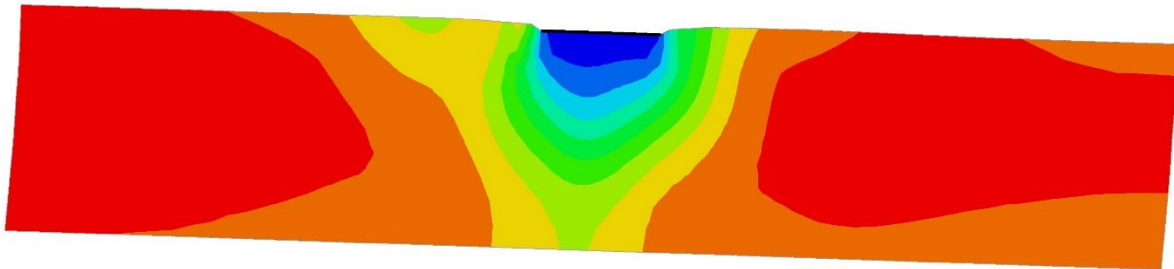
**Zone Extra 2**



(α)

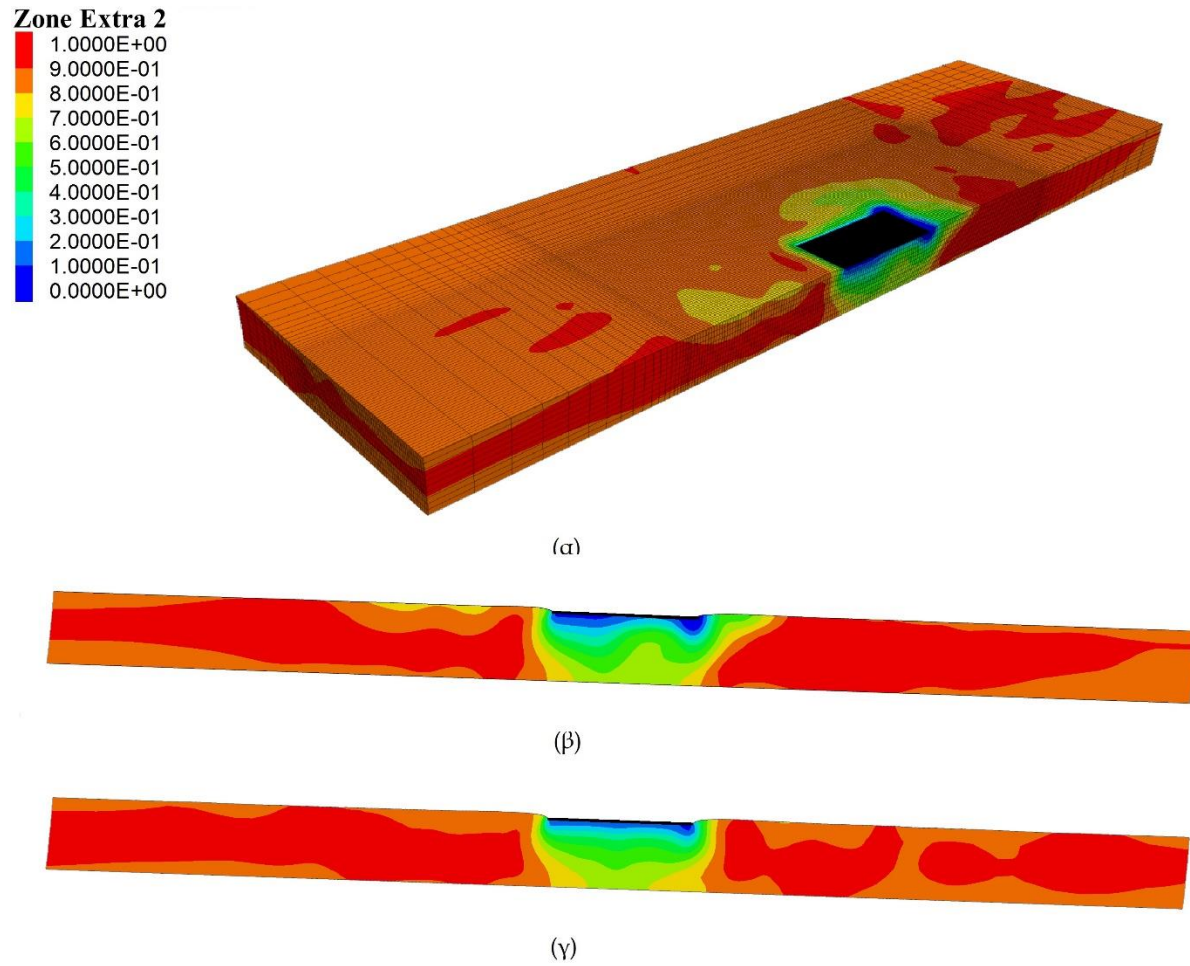


(β)

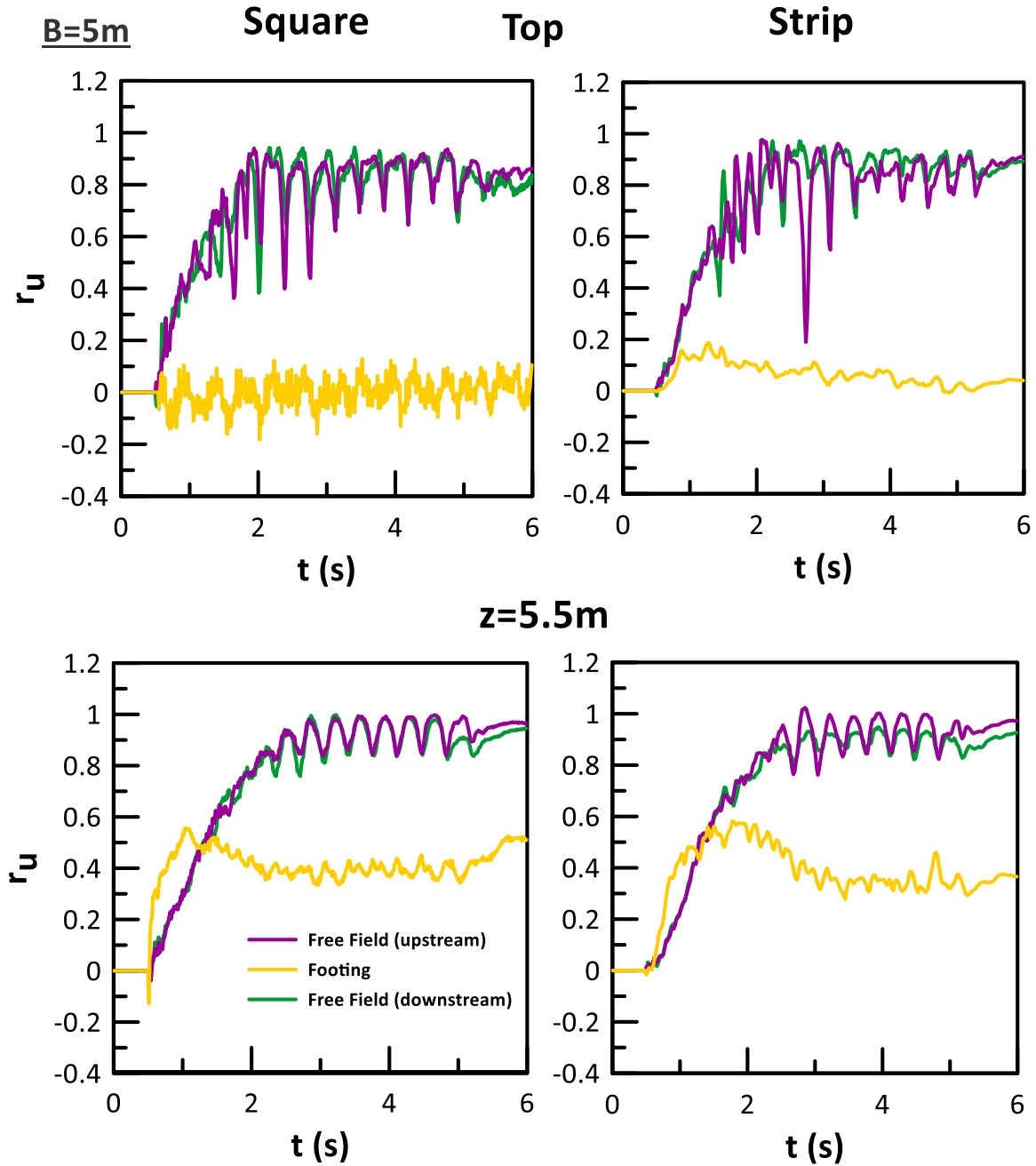


(γ)

**Σχήμα 4.13:** Κατανομή λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στο έδαφος για θεμέλιο με πλάτος  $B=5m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

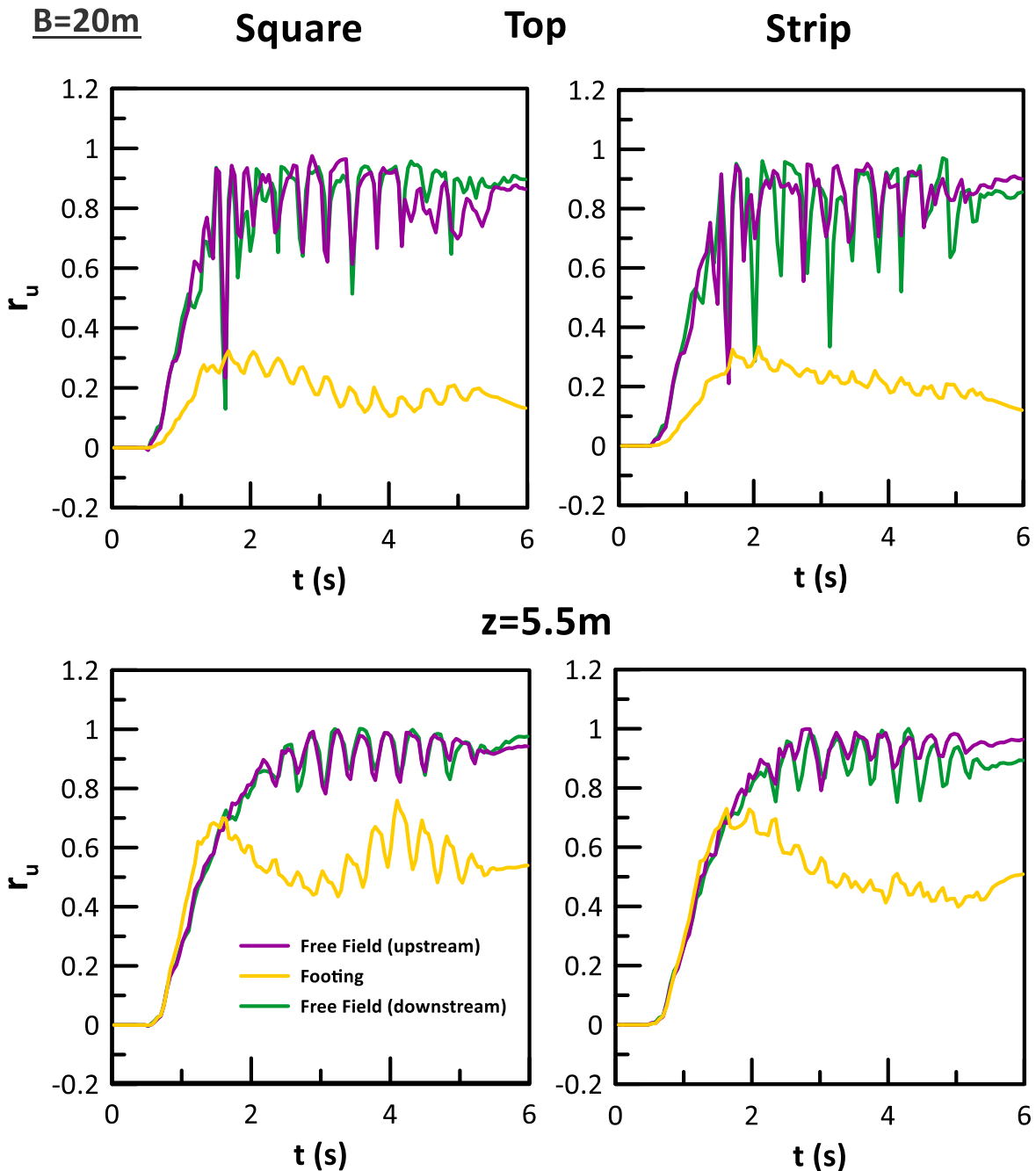


**Σχήμα 4.14:** Κατανομή λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στο έδαφος για θεμέλιο με πλάτος  $B=20m$  στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)



Σχήμα 4.15: Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  για πλάτος θεμελίου  $B=5m$  σε τρία σημεία στην επιφάνεια και σε βάθος  $5.5m$  για θεμέλιο σχήματος τετραγωνικού (αριστερά) και θεμελιολωρίδας (δεξιά)

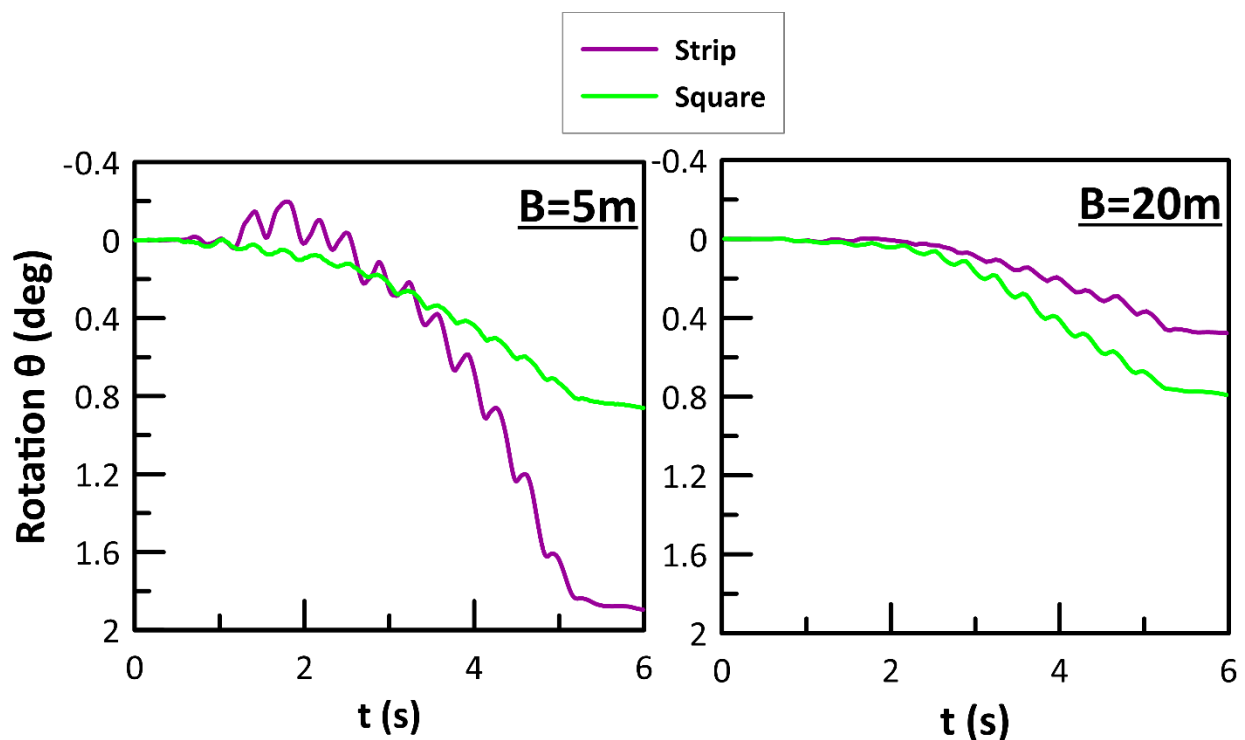




**Σχήμα 4.16:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  για πλάτος θεμελίου  $B=20m$  σε τρία σημεία στην επιφάνεια και σε βάθος  $5.5m$  για θεμέλιο σχήματος τετραγωνικού (αριστερά) και θεμελιολωρίδας (δεξιά)

Στροφή θεμελίων

Στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία στροφής (προς τα κατάντη) των θεμελίων πλάτους  $B = 5\text{m}$  (άνω) και  $B = 20\text{m}$  (κάτω), με σχήμα τετραγωνικό (square) και θεμελιολωρίδας (strip). Προκύπτει ότι η στροφή συσσωρεύεται με τους κύκλους διέγερσης και τουλάχιστον για τη διέγερση αναφοράς η τελική στροφή είναι μικρότερη ή ίση  $2^\circ$ , την κλίση του εδάφους. Το θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$  αποκτά μεγαλύτερες στροφές από το θεμέλιο πλάτους  $20\text{m}$ , αν και για τα τετραγωνικά θεμέλια η τελική τιμή στροφής είναι παρόμοια και για τα δύο πλάτη θεμελίου. Οι μικρότερες τιμές στροφής των θεμελίων πλάτους  $B = 20\text{m}$  είναι αναμενόμενες, καθώς οι τάσεις κάτω από αυτά αυξάνουν περισσότερο με αποτέλεσμα να αυξάνει περισσότερο η διατμητική αντοχή στο έδαφος θεμελίωσης. Το γεγονός ότι η επίδραση του σχήματος στη στροφή έχει ανάποδη επίδραση για θεμέλια πλάτους  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$  θέλει περαιτέρω διερεύνηση.



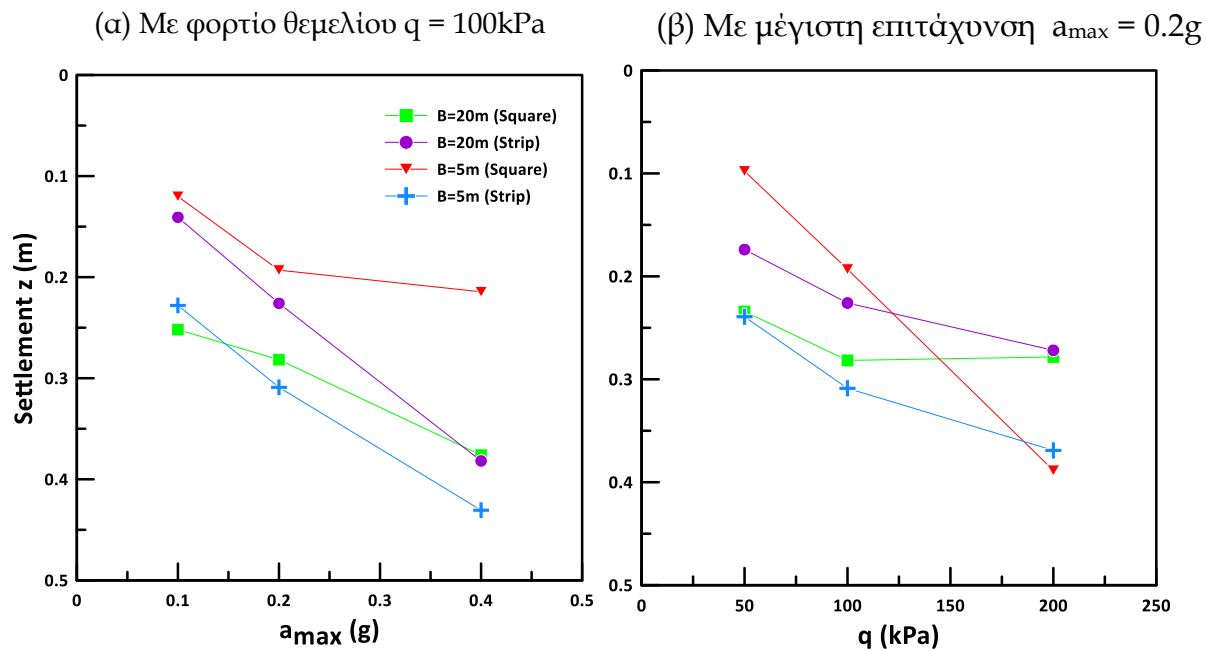
**Σχήμα 4.17:** Χρονοϊστορίες στροφής (προς τα κατάντη) θεμελίων πλάτους  $B=5\text{m}$  (αριστερά) και  $B=20\text{m}$  (δεξιά), με σχήμα τετραγωνικό (square) και θεμελιολωρίδας (strip)

#### 4.4. Επίδραση διέγερσης και φορτίου στην απόκριση θεμελίων

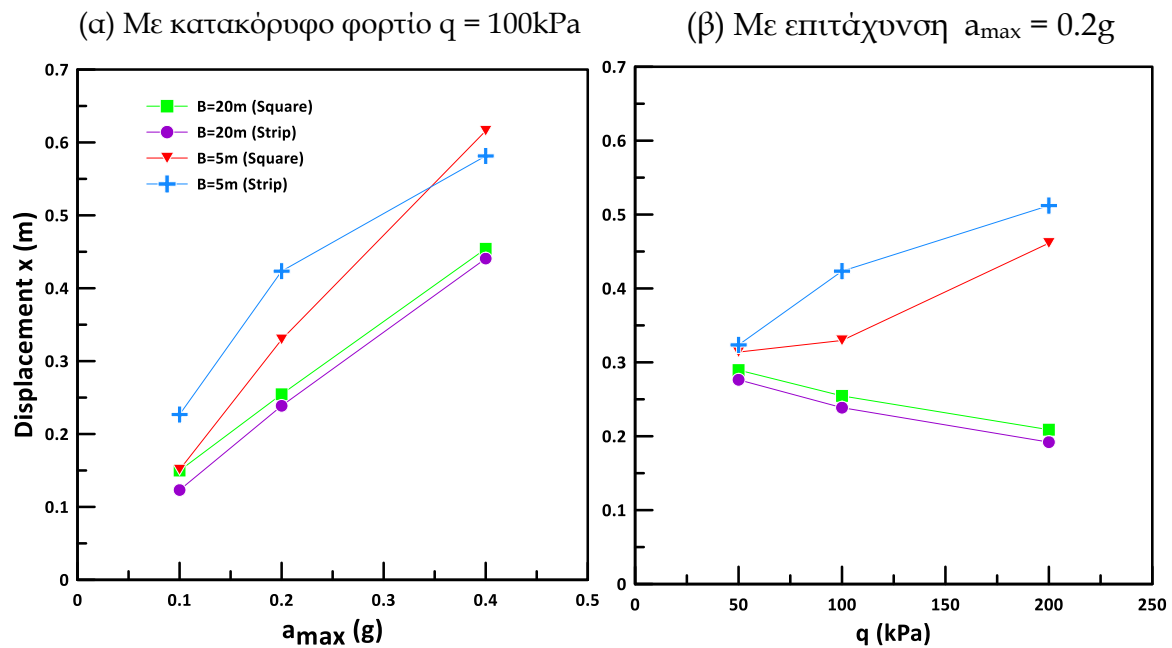
Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η τυπική απόκριση των θεμελίων διαφορετικού πλάτους και σχήματος σε καθεστώς οριζόντιας εξάπλωσης. Τα αποτελέσματα εκεί αφορούσαν διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max} = 0.2g$  και φορτίο θεμελίου  $q=100kPa$ . Στόχος της παρούσας παραγράφου είναι να εκτιμηθεί η επίδραση των τιμών των  $a_{max}$  και  $q$  στην απόκριση των θεμελίων σε όρους καθιζήσεων, οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών (προς τα κατόντη), χωρίς την αναλυτική παρουσίαση της προηγούμενης παραγράφου, δηλαδή χωρίς ισοκαμπύλες κατανομής των κατακόρυφων μετακινήσεων, του λόγου υπερπιέσεων, της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης ή/και χρονοϊστορίες αυτών.

Αρχικώς, στο **Σχήμα 4.18** και στα υποσχήματα  $\alpha$  και  $\beta$  παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{max}$  και του  $q$  στις τιμές των καθιζήσεων  $z_{disp}$  του θεμελίου. Διαφορετικές καμπύλες δίνουν τα αποτελέσματα για τα θεμέλια διαφορετικού πλάτους ( $B = 5m$  και  $20m$ ) και σχήματος (τετραγωνικού θεμελίου (square) και θεμελιολωρίδας (strip)). Από το σχήμα αυτό προκύπτει σαφώς η αυξητική επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ . Προκύπτει επίσης ότι η κατάταξη σε όρους καθιζήσεων των τεσσάρων συνδυασμών πλάτους και σχήματος θεμελίου που παρατηρήθηκε στην παράγραφο 4.3 για  $a_{max} = 0.2 g$  και  $q=100kPa$  δεν διατηρείται αναγκαστικά για άλλες τιμές της  $a_{max}$  και του  $q$ .

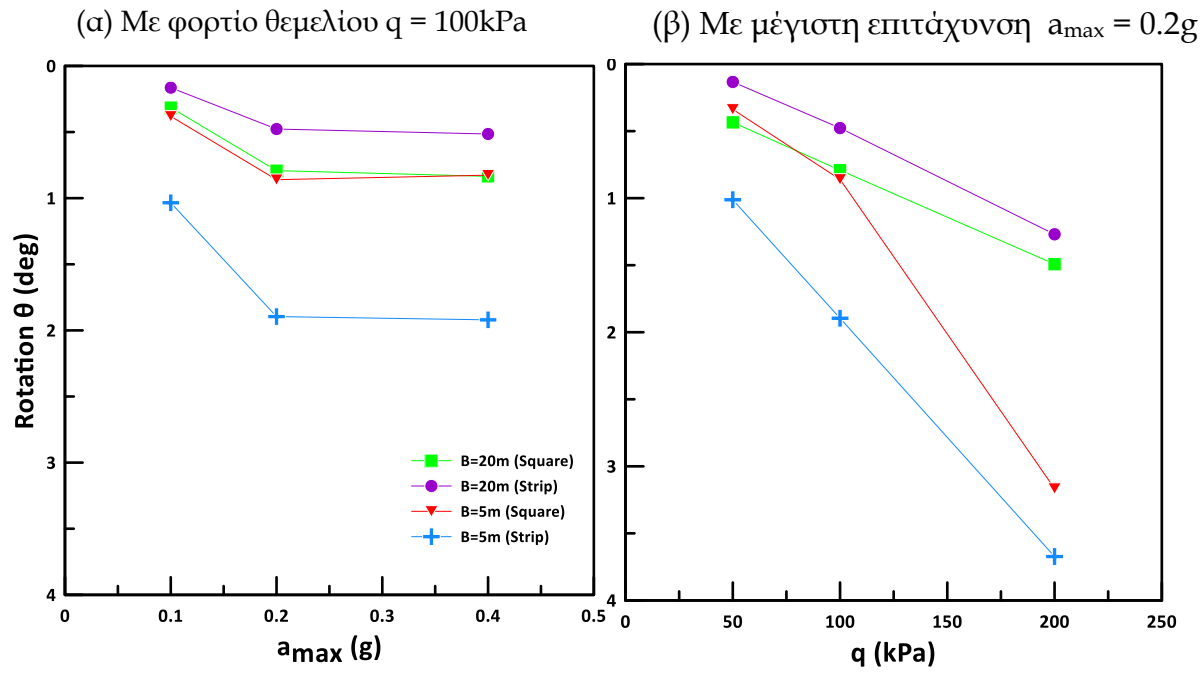
Στο **Σχήμα 4.19** και στα υποσχήματα  $\alpha$  και  $\beta$  παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{max}$  και του  $q$  στις τιμές της οριζόντιας μετακίνησης  $x$  του θεμελίου, στο μορφότυπο του **Σχήματος 4.18**. Από το σχήμα αυτό προκύπτει σαφώς η αυξητική επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , αλλά και το φορτίο θεμελίου  $q$  δείχνει να αυξάνει την οριζόντια μετακίνηση για το στενό θεμέλιο  $B = 5m$ , αντίθετα με ό,τι συμβαίνει για  $B = 20m$ . Αυτή η αύξηση της μετακίνησης  $x$  με το φορτίο  $q$  για θεμέλια  $B = 5m$  θέλει περαιτέρω διερεύνηση. Σε κάθε περίπτωση, τα θεμέλια πλάτους  $B = 5m$  εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές του  $x$  απ' ό,τι τα θεμέλια πλάτους  $B = 20m$ , σε συμφωνία με ό,τι παρατηρήθηκε στην παράγραφο 4.3 για  $a_{max} = 0.2g$  και  $q=100kPa$ .



Σχήμα 4.18: Καθιζήσεις (στο κέντρο) τετραγωνικών θεμελίων (square) και θεμελιολωρίδων (strip) πλάτους  $B=5\text{m}$  και  $20\text{m}$ , ως συνάρτηση: (α) της επιτάχυνσης  $a_{\max}$ , (β) του φορτίου  $q$ (kPa)



Σχήμα 4.19: Οριζόντια μετακίνηση τετραγωνικών θεμελίων (square) και θεμελιολωρίδων (strip) πλάτους  $B=5\text{m}$  και  $20\text{m}$ , ως συνάρτηση: (α) της επιτάχυνσης  $a_{\max}$ , (β) του φορτίου  $q$ (kPa)



**Σχήμα 4.20:** Στροφή (προς τα κατόντη) τετραγωνικών θεμελίων (square) και θεμελιολωρίδων (strip) πλάτους  $B=5\text{m}$  και  $20\text{m}$ , συνάρτηση: **(α)** της επιτάχυνσης  $a_{\max}$ , **(β)** του φορτίου  $q(\text{kPa})$

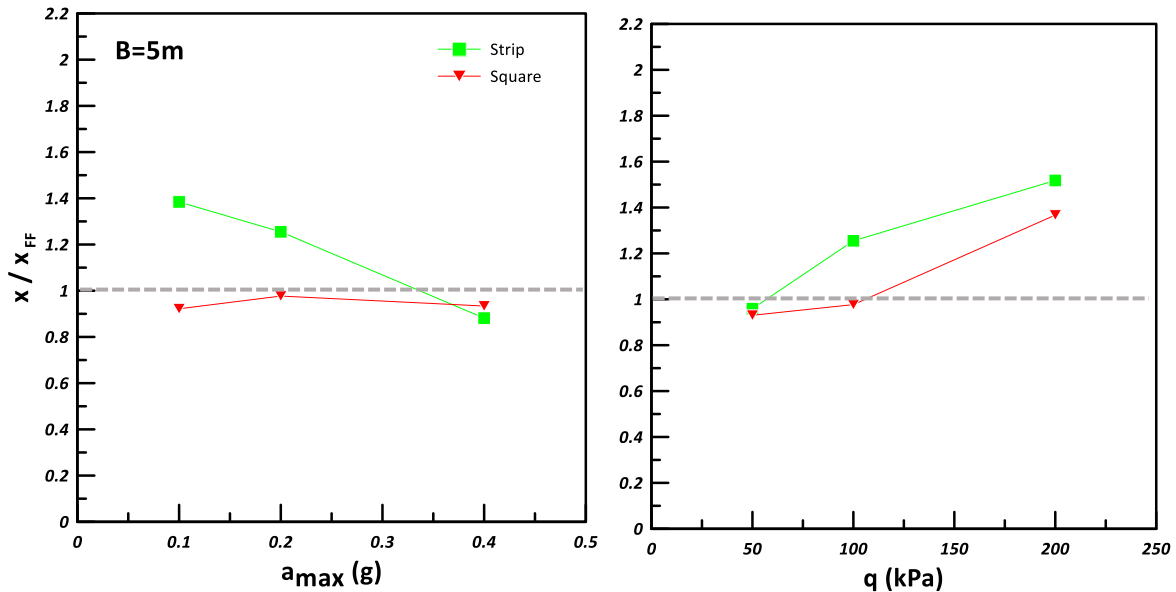
Στην συνέχεια, στο **Σχήμα 4.20** και στα υποσχήματα α και β παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{\max}$  και του  $q$  στις τιμές της στροφής (προς τα κατόντη) του θεμελίου, στο μορφότυπο που είχε το **Σχήμα 4.18** και το **Σχήμα 4.19**. Εδώ προκύπτει η έντονα αυξητική επίδραση του φορτίου  $q$  στη στροφή, και η εν γένει αυξητική επίδραση της  $a_{\max}$ , αν και οι τιμές για  $a_{\max} = 0.2g$  και  $0.4g$  είναι παρόμοιες ανά πλάτος και σχήμα θεμελίου. Σε κάθε περίπτωση, τα θεμέλια  $B = 5\text{m}$  εμφανίζουν μεγαλύτερες στροφές συγκριτικά με τα θεμέλια πλάτους  $B = 20\text{m}$ , σε συμφωνία με ό,τι παρατηρήθηκε στην παράγραφο 4.3 για  $a_{\max} = 0.2g$  και  $q=100\text{kPa}$ .

## 4.5. Οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο

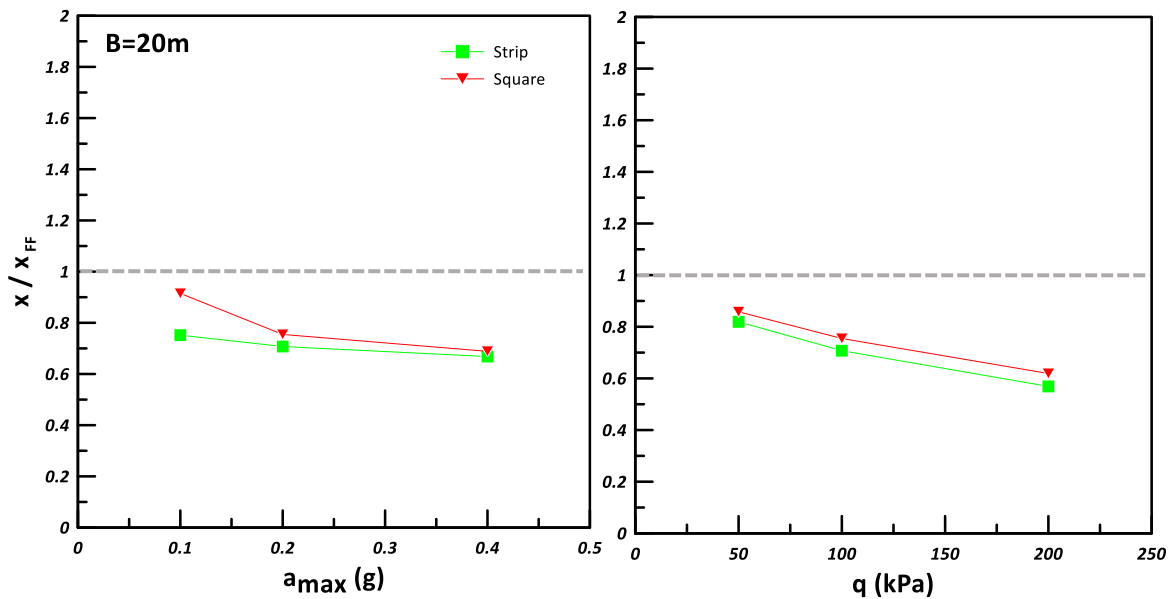
Στην ενότητα αυτή η έμφαση δίνεται στις οριζόντιες μετακινήσεις των θεμελίων  $x$ , συγκρίνοντάς τις με τις τιμές της οριζόντιας μετακίνησης στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ . Ο στόχος αυτής της διερεύνησης είναι να διαφανεί ποια η σχέση των δύο τιμών, καθώς η δεύτερη ( $x_{FF}$ ) μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά από σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. Youd et al. 2002, Valsamis et al. 2010). Διερευνάται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης θεμελίου  $x/x_{FF}$ .

Αρχικώς, στο **Σχήμα 4.21** και στα υποσχήματα  $\alpha$  και  $\beta$  παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{max}$  και του  $q$  στις τιμές του λόγου κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης  $x/x_{FF}$  του θεμελίου πλάτους  $B = 5m$ . Διαφορετικές καμπύλες δίνουν τα αποτελέσματα για τα θεμέλια διαφορετικού σχήματος (τετραγωνικού θεμελίου (square)) και θεμελιολωρίδας (strip)). Γενικώς, για  $B = 5m$  προκύπτουν τιμές  $x/x_{FF} = 0.9 - 1.5$ , με την  $a_{max}$  να επιδρά μειωτικά και το φορτίο  $q$  αυξητικά, ενώ γενικώς η θεμελιολωρίδα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές απ' ότι το τετραγωνικό θεμέλιο. Αυτές οι επιδράσεις υποδηλώνουν ότι για μεγάλες επιταχύνσεις ή μικρό φορτίο  $q$  δεν έχει σημασία το στενό θεμέλιο, το οποίο παρασύρεται ακριβώς όπως το έδαφος (οπότε  $x/x_{FF} \rightarrow 1$ ). Αντιθέτως, για μικρές επιταχύνσεις η ύπαρξη του στενού θεμελίου διαφοροποιεί την απόκριση. Αντίστοιχα, για μεγάλο φορτίο  $q$ , το έδαφος έχει και στατικά μεγάλες παραμορφώσεις υπό το στενό θεμέλιο, οπότε παρασύρεται πιο έντονα απ' ότι το ελεύθερο πεδίο.

Στο **Σχήμα 4.22** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα επίδρασης των  $a_{max}$  και  $q$  στην κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση  $x/x_{FF}$ , αλλά για πλάτος θεμελίου  $20m$ . Εδώ οι τιμές  $x/x_{FF} = 0.6 - 0.95$ , δηλαδή είναι μικρότερες απ' ότι για  $B = 5m$ , και πάντα μικρότερες από το 1.0. Δηλαδή το πλατύ θεμέλιο γενικώς οδηγεί σε απομείωση της  $x$ , σε σχέση με τη  $x_{FF}$ , με τις επιδράσεις των  $a_{max}$  και  $q$  να είναι ελαφρώς μειωτικές και τις διαφορές μεταξύ θεμελιολωρίδας και τετραγωνικού θεμελίου να είναι πολύ μικρές.



**Σχήμα 4.21:** Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις  $x$  τετραγωνικού θεμελίου (square) και θεμελιολωρίδας (strip) πλάτους  $B=5m$  προς εκείνες στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ , ως συνάρτηση : (α) της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , (β) το φορτίο του θεμελίου  $q(kPa)$



**Σχήμα 4.22:** Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις  $x$  τετραγωνικού θεμελίου (square) και θεμελιολωρίδας (strip) πλάτους  $B=20m$  προς εκείνες στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ , ως συνάρτηση : (α) της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , (β) το φορτίο του θεμελίου  $q(kPa)$

Από το **Σχήμα 4.21** και το **Σχήμα 4.22** συμπεραίνεται συνολικά ότι το πλάτος του θεμελίου είναι η πιο σημαντική παράμετρος του προβλήματος, καθώς καθορίζει το εύρος του λόγου  $x/x_{FF}$ . Με άλλα λόγια, για  $B = 20m$ , και ανεξαρτήτως σχήματος θεμελίου, διέγερσης

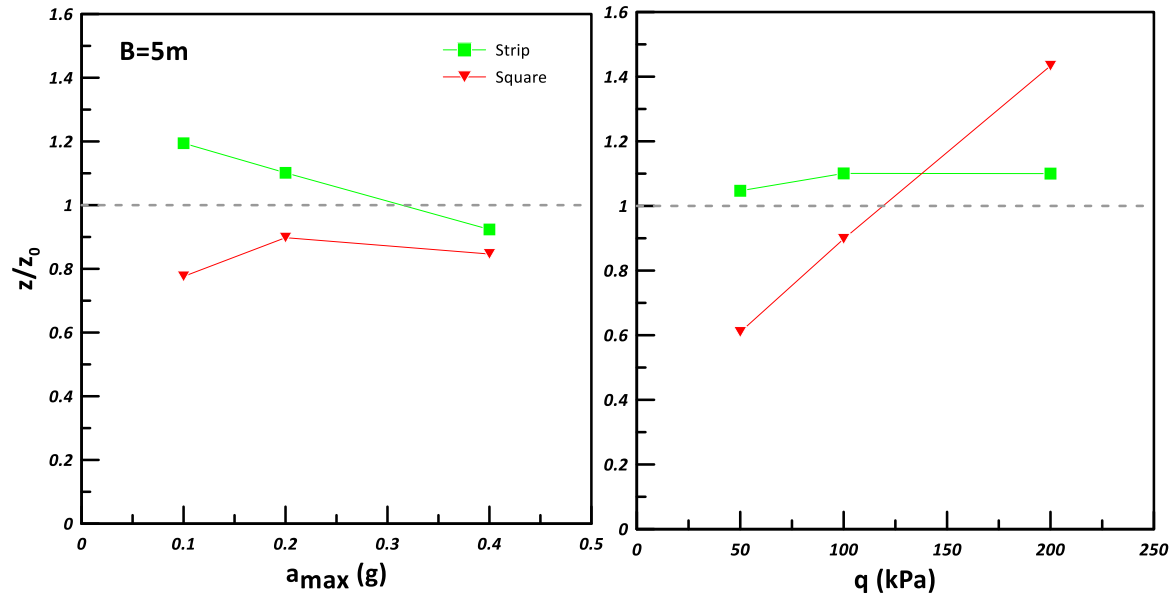
και φορτίου έχουμε τιμές  $x < x_{FF}$ , ενώ μόνο για πλάτος  $B = 5\text{m}$  και μεγάλα φορτία  $q$  μπορεί να προκύψει συστηματικά  $x > x_{FF}$ .

#### **4.6. Επίδραση κλίσης εδάφους στις μέσες καθιζήσεις θεμελίων**

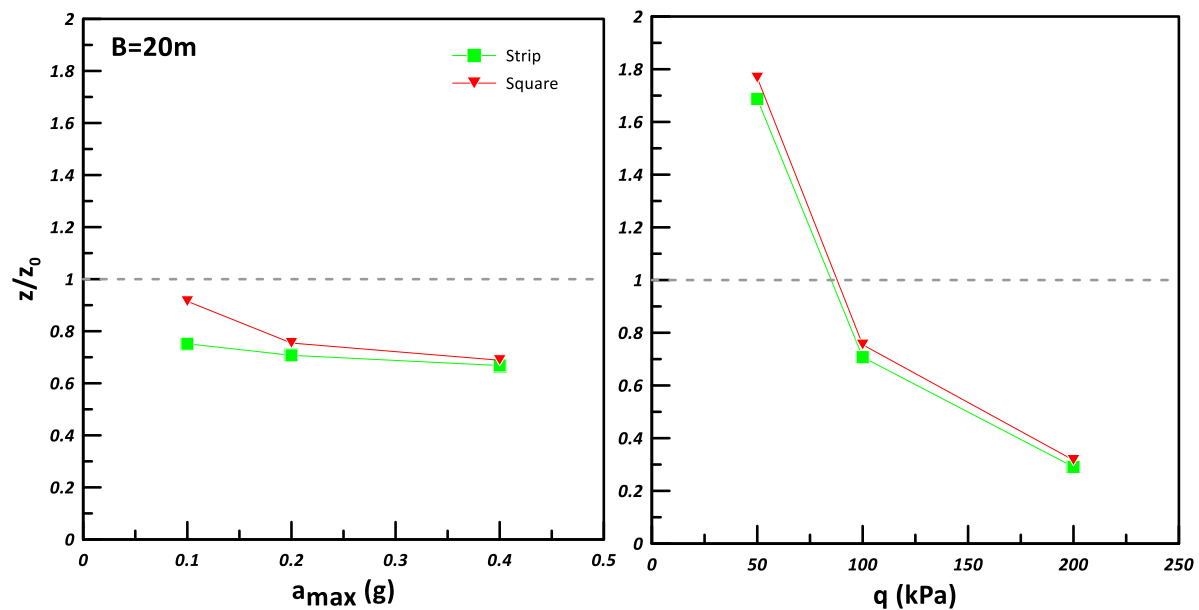
Στην ενότητα αυτή η έμφαση δίνεται στις μέσες καθιζήσεις των θεμελίων  $z$  σε εδάφη υπό κλίση  $i=2^\circ$ , συγκρίνοντας τις με τις τιμές των καθιζήσεων των ίδιων θεμελίων αν το έδαφος ήταν οριζόντιο (κλίση  $i=0^\circ$ ). Ο στόχος αυτής της διερεύνησης είναι να διαφανεί ποια η σχέση των δύο τιμών, καθώς η δεύτερη ( $z_0$ ) μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά από σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. Karamitros et al. 2013, Dimitriadi et al. 2018). Διερευνάται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{\max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης καθίζησης θεμελίου  $z/z_0$ .

Στο **Σχήμα 4.23** και στα υποσχήματα  $\alpha$  και  $\beta$  παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{\max}$  και του  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z/z_0$  του θεμελίου πλάτους  $B = 5\text{m}$ . Διαφορετικές καμπύλες δίνουν τα αποτελέσματα για τα θεμέλια διαφορετικού σχήματος (τετραγωνικού θεμελίου (square) και θεμελιολωρίδας (strip)). Γενικώς, για  $B = 5\text{m}$  προκύπτουν τιμές  $z/z_0 = 0.6 - 1.45$ , με την  $a_{\max}$  να επιδρά σχετικώς μειωτικά και το φορτίο  $q$  σχετικώς αυξητικά, ενώ γενικώς η θεμελιολωρίδα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές απ' ότι το τετραγωνικό θεμέλιο. Αυτές οι επιδράσεις υποδηλώνουν ότι τουλάχιστον για μεγάλες επιταχύνσεις δεν έχει τόσο σημασία η κλίση του εδάφους στην καθίζηση του στενού θεμελίου, ενώ αντίστοιχα για μεγάλο φορτίο  $q$ , η ύπαρξη της κλίσης του εδάφους λειτουργεί επαυξητικά στις καθιζήσεις του στενού θεμελίου. Σε κάθε περίπτωση, οι επιδράσεις των  $a_{\max}$  και  $q$  εξαρτώνται και από το σχήμα του στενού θεμελίου, οπότε δεν είναι ευχερής η εξαγωγή συμπερασμάτων γενικής χρήσης.





Σχήμα 4.23: Κανονικοποιημένες καθιζήσεις τετραγωνικού θεμελίου (square) και θεμελιολωρίδας (strip) πλάτους  $B=5m$  σε έδαφος υπό κλίση  $i=2^\circ$  προς εκείνες του ίδιου θεμελίου σε οριζόντιο έδαφος, ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , (β) το φορτίο του θεμελίου  $q(kPa)$



Σχήμα 4.24: Κανονικοποιημένες καθιζήσεις τετραγωνικού θεμελίου (square) και θεμελιολωρίδας (strip) πλάτους  $B=20m$  σε έδαφος υπό κλίση  $i=2^\circ$  προς εκείνες του ίδιου θεμελίου σε οριζόντιο έδαφος, ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , (β) το φορτίο του θεμελίου  $q(kPa)$

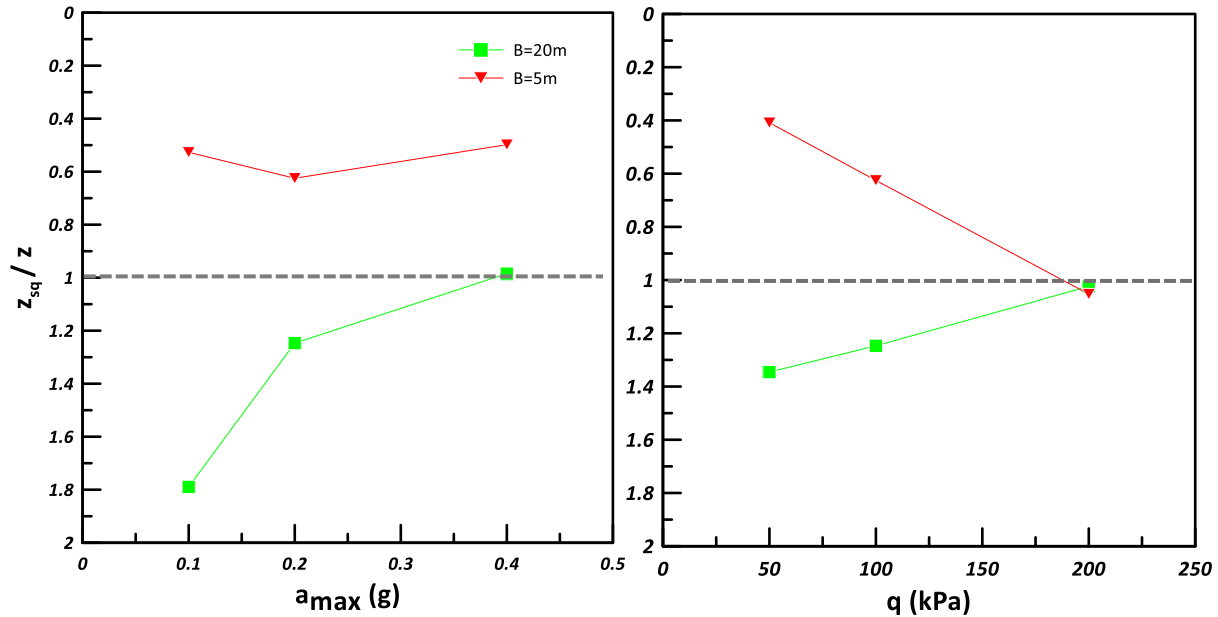
Στο **Σχήμα 4.24** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα επίδρασης των  $a_{max}$  και  $q$  στην κανονικοποιημένη καθίζηση  $z/z_0$ , αλλά για πλάτος θεμελίου 20m. Εδώ οι τιμές  $z/z_0 = 0.3 - 1.7$ , δηλαδή έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος απ' ό τι για  $B = 5m$ . Επίσης, προκύπτει συστηματικά μειωτική επίδραση των  $a_{max}$  και  $q$ , με το φορτίο  $q$  να αποδεικνύεται πολύ σημαντική παράμετρος στον καθορισμό της τιμής της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z/z_0$ . Το αντίθετο προκύπτει για το σχήμα του θεμελίου πλάτους  $B = 20m$ , το οποίο δεν παίζει κανένα ρόλο στην τιμή της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z/z_0$ , ανεξαρτήτως τιμής  $a_{max}$  και  $q$ .

Από το **Σχήμα 4.23** και το **Σχήμα 4.24** προκύπτει ότι η ύπαρξη ήπιας κλίσης συνήθως απομειώνει τις καθιζήσεις του θεμελίου πλάτους  $B = 20m$  σε αντίθεση με το θεμέλιο  $B = 5m$  στο οποίο προκύπτει αύξηση. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να βγει εύκολα συμπέρασμα καθώς το εύρος της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z/z_0$  είναι μεγάλο.

#### 4.7. Επίδραση σχήματος θεμελίου στη σεισμική απόκριση

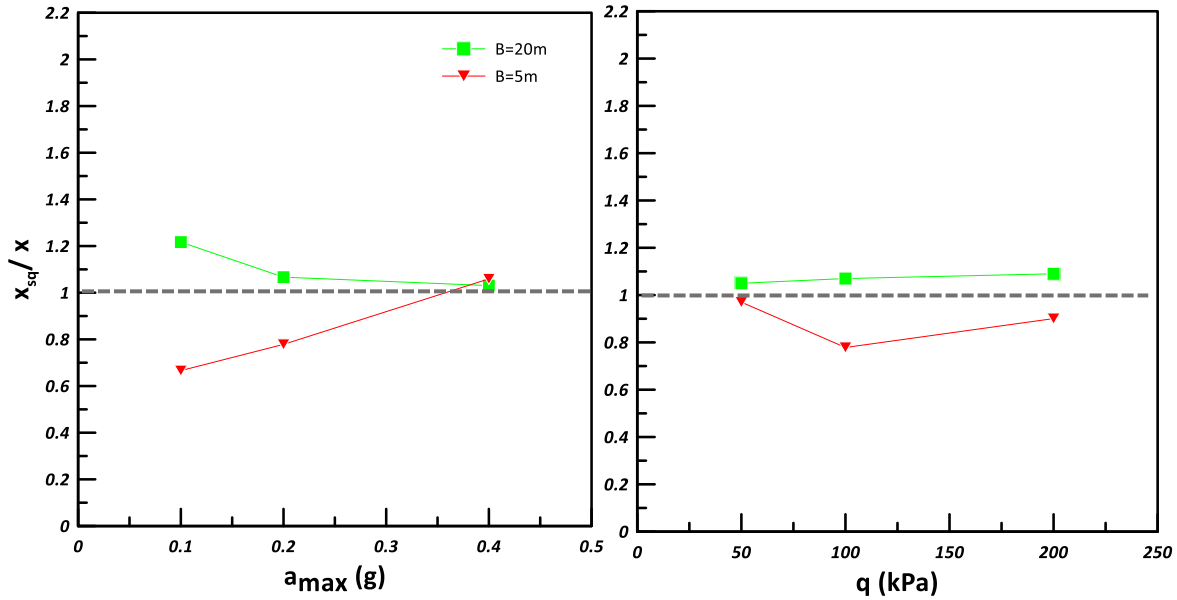
Τελός, για να γίνει κατανοητή η επίδραση του σχήματος της θεμελίωσης (θεμελιολωρίδα έναντι τετραγωνικού θεμελίου) στη σεισμική απόκριση, η έμφαση δόθηκε στον λόγο των (κατακόρυφων και οριζόντιων) μετατοπίσεων και στροφών του τετραγωνικού θεμελίου ως προς την αντίστοιχη τιμή της θεμελιολωρίδας ιδίου πλάτους, για την ίδια τιμή μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$  και φορτίου θεμελίου  $q$ . Οι τιμές των μεγεθών για τετραγωνικό θεμέλιο έχουν δείκτη  $s_q$ , που υποδηλώνει το τετραγωνικό σχήμα (square).

Αρχικώς, στο **Σχήμα 4.25** και στα υποσχήματα  $\alpha$  και  $\beta$  παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{max}$  και του  $q$  στις τιμές του λόγου καθίζησης  $z_{sq}/z$  του θεμελίου, ενώ διαφορετικές καμπύλες δίνουν τα αποτελέσματα για τα θεμέλια πλάτους  $B = 5m$  και  $20m$ . Αρχικώς προκύπτει ότι το πλάτος του θεμελίου παίζει σημαντικό ρόλο στην τιμή του λόγου καθιζήσεων  $z_{sq}/z$ , καθώς παίρνει τιμές μεγαλύτερες και μικρότερες του 1.0 για πλάτη θεμελίου  $B = 20m$  και  $B = 5m$ , αντίστοιχα. Συγκεκριμένα,  $z_{sq}/z = 1.0 - 1.8$  για  $B = 20m$  και  $z_{sq}/z = 0.4 - 1.0$  για  $B = 5m$ . Γενικώς προκύπτει ότι  $z_{sq}/z \rightarrow 1.0$  για μεγάλες τιμές επιτάχυνσης  $a_{max}$  και φορτίου  $q$ , με εξαίρεση την τιμή  $a_{max} = 0.4g$  για  $B = 5m$ .

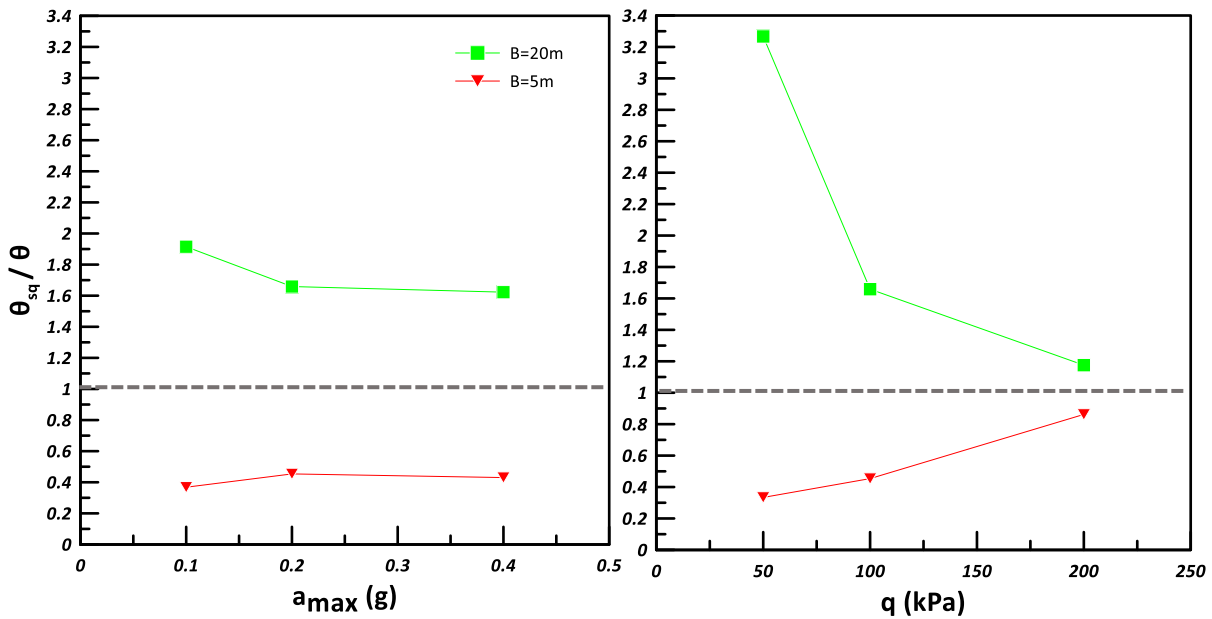


**Σχήμα 4.25:** Λόγος καθιζήσεων τετραγωνικού θεμελίου προς θεμελιολωρίδας ίδιου πλάτους  $B$ , ως συνάρτηση: **(α)** της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , **(β)** του φορτίο του θεμελίου  $q$ (kPa)

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.26** και στα υποσχήματα α και β παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{max}$  και του  $q$  στις τιμές του λόγου οριζόντιας μετακίνησης  $x_{sq}/x$  του θεμελίου, ενώ διαφορετικές καμπύλες δίνουν τα αποτελέσματα για τα θεμέλια πλάτους  $B = 5m$  και  $20m$ . Αρχικώς προκόπτει ότι το πλάτος του θεμελίου παίζει και πάλι σημαντικό ρόλο στην τιμή του λόγου καθιζήσεων  $x_{sq}/x$ , καθώς παίρνει τιμές μεγαλύτερες και μικρότερες του 1.0 για πλάτης θεμελίου  $B = 20m$  και  $B = 5m$ , αντίστοιχα. Συγκεκριμένα,  $x_{sq}/x = 1.0 - 1.2$  για  $B = 20m$  και  $x_{sq}/x = 0.7 - 1.0$  για  $B = 5m$ , δηλαδή το εύρος μεταβολής του λόγου  $x_{sq}/x$  είναι σημαντικά μικρότερο από εκείνο του λόγου  $z_{sq}/z$ . Επιπλέον, προκόπτει ότι η τιμή  $a_{max}$  είναι ελαφρώς σημαντικότερη από το φορτίο του θεμελίου  $q$  στο καθορισμό του λόγου  $x_{sq}/x$ , και ότι  $x_{sq}/x \rightarrow 1.0$  για μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης  $a_{max}$ .



Σχήμα 4.26: Λόγος οριζόντιων μετακινήσεων τετραγωνικού θεμελίου προς θεμελιολωρίδας ίδιου πλάτους  $B$ , ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου του θεμελίου  $q$ (kPa)



Σχήμα 4.27: Λόγος στροφών (προς τα κατόντη) τετραγωνικού θεμελίου προς θεμελιολωρίδας ίδιου πλάτους  $B$ , ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου του θεμελίου  $q$ (kPa)

Τέλος, στο **Σχήμα 4.27** και στα υποσχήματα α και β παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{\max}$  και του  $q$  στις τιμές του λόγου στροφών (προς τα κατόντη)  $\theta_{sq}/\theta$  του θεμελίου, ενώ διαφορετικές καμπύλες δίνουν τα αποτελέσματα για τα θεμέλια πλάτους  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$ . Όπως προκύπτει και για τις καθιζήσεις και τις οριζόντιες μετακινήσεις, το πλάτος του θεμελίου παίζει και πάλι σημαντικό ρόλο στην τιμή του λόγου στροφών  $\theta_{sq}/\theta$ , καθώς παίρνει τιμές μεγαλύτερες και μικρότερες του 1.0 για πλάτη θεμελίου  $B = 20\text{m}$  και  $B = 5\text{m}$ , αντίστοιχα. Συγκεκριμένα,  $\theta_{sq}/\theta = 1.2 - 3.3$  για  $B = 20\text{m}$  και  $\theta_{sq}/\theta = 0.35 - 0.9$  για  $B = 5\text{m}$ , δηλαδή το εύρος μεταβολής του λόγου στροφών  $\theta_{sq}/\theta$  είναι μεγαλύτερα ακόμη και από εκείνα του λόγου καθιζήσεως  $z_{sq}/z$ . Οι επιδράσεις των  $a_{\max}$  και  $q$  προκύπτουν μειωτικές, όπως συμβαίνει στις περισσότερες φορές και για τους λόγους  $z_{sq}/z$  και  $x_{sq}/x$ , χωρίς ωστόσο να προσεγγίζονται τιμές  $\theta_{sq}/\theta = 1.0$  για τα εύρη μεταβολής που διερευνήθηκαν εδώ.

## Κεφάλαιο 5

# Παραμετρική Διερεύνηση Απόκρισης Θεμελίων με Πλαστικά Στραγγιστήρια

### 5.1. Γενικά

Όπως έγινε φανερό από τις αναλύσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, σε υφιστάμενες κατασκευές θεμελιωμένες επιφανειακά σε ρευστοποιήσιμα εδάφη υπό κλίση προκύπτει μεγάλη ανάγκη λήψης μέτρων για την απομείωση, αν όχι την αποτροπή, των συνεπειών της ρευστοποίησης στο έδαφος θεμελίωσης. Προς τον σκοπό αυτό, στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζεται η τοπική ή γενικευμένη εφαρμογή στραγγιστηρίων στην περιοχή της θεμελίωσης ως μέσου βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης του υποκείμενου εδάφους, μέσω της στράγγισης των υπερπίεσεων πόρων που αυτά προσφέρουν στην περιοχή εφαρμογής. Τα πλαστικά στραγγιστήρια αποτονώνουν την υπερπίεση του νερού των πόρων μέσω της ευκολότερης και γρηγορότερης στράγγισης της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης. Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκαν δύο είδη εφαρμογής στραγγιστηρίων:

1. Εφαρμογή στραγγιστηρίων περιμετρικά του θεμελίου με αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας ισοδύναμης βελτιωμένης ζώνης πλάτους 0.5m, διατάξεις βελτίωσης εδάφους που θα αποκαλούνται στη συνέχεια ως «**Drains**»
2. Εφαρμογή στραγγιστηρίων σε όλη την επιφάνεια της εδαφικής στρώσης κάτω από το θεμέλιο, διατάξεις βελτίωσης εδάφους που θα αποκαλούνται στη συνέχεια ως «**Drains Full**»

Η εφαρμογή στραγγιστηρίων σε όλη την επιφάνεια της εδαφικής στρώσης κάτω από υφιστάμενο κτίριο είναι πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί στην πράξη, όμως εδώ εξετάζεται καθώς είναι η μέγιστη δυνατή βελτίωση με αυτήν την μεθοδολογία και θεωρείται ως ανάλυση (ή διάταξη) αναφοράς.

*Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά αναλύσεων για τη μελέτη της χρήσης στραγγιστηρίων ως μέσου βελτίωσης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης στη γειτονιά επιφανειακού θεμελίου*

Case No	Type	B(m)	q(kPa)	amax (g)	Te(s)	N	Improvement
24	square	5	100	0.2	0.35	14	Drains
25	strip	5	100	0.2	0.35	14	Drains
26	square	5	100	0.1	0.35	14	Drains
27	strip	5	100	0.1	0.35	14	Drains
28	square	5	100	0.4	0.35	14	Drains
29	strip	5	100	0.4	0.35	14	Drains
30	square	5	200	0.2	0.35	14	Drains
31	strip	5	200	0.2	0.35	14	Drains
32	square	5	50	0.2	0.35	14	Drains
33	strip	5	50	0.2	0.35	14	Drains
34	square	20	100	0.2	0.35	14	Drains
35	strip	20	100	0.2	0.35	14	Drains
36	strip	20	100	0.1	0.35	14	Drains
37	strip	20	100	0.4	0.35	14	Drains
38	strip	20	200	0.2	0.35	14	Drains
39	strip	20	50	0.2	0.35	14	Drains
40	square	5	100	0.2	0.35	14	Drains Full
41	strip	5	100	0.2	0.35	14	Drains Full
42	square	5	100	0.1	0.35	14	Drains Full
43	strip	5	100	0.1	0.35	14	Drains Full
44	square	5	100	0.4	0.35	14	Drains Full
45	strip	5	100	0.4	0.35	14	Drains Full
46	square	5	200	0.2	0.35	14	Drains Full
47	strip	5	200	0.2	0.35	14	Drains Full
48	square	5	50	0.2	0.35	14	Drains Full
49	strip	5	50	0.2	0.35	14	Drains Full
50	square	20	100	0.2	0.35	14	Drains Full
51	strip	20	100	0.2	0.35	14	Drains Full
52	strip	20	100	0.1	0.35	14	Drains Full
53	strip	20	100	0.4	0.35	14	Drains Full
54	strip	20	200	0.2	0.35	14	Drains Full
55	strip	20	50	0.2	0.35	14	Drains Full

Στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάλυση με την εφαρμογή των δύο διατάξεων πλαστικών στραγγιστηρίων, Drains και DrainsFull. Σημειώνεται ότι οι αναλύσεις του τετραγωνικού θεμελίου πλάτους

20m για περιμετρική και γενικευμένη τοποθέτηση στραγγιστηρίων πραγματοποιήθηκαν μόνο για τη βασική ανάλυση ( $a_{\max} = 0.2g$  και  $q = 100kPa$ ), λόγω του σημαντικού υπολογιστικού χρόνου που απαιτούσε η κάθε 3D ανάλυση.

## 5.2. Τυπική απόκριση θεμελίων με πλαστικά στραγγιστήρια

Για την κατανόηση της απόκρισης των κεντρικά φορτιζόμενων θεμελίων πλάτους  $B = 5$  m και  $B = 20$ m σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με ήπια κλίση που έχει βελτιωθεί με πλαστικά στραγγιστήρια, επιλέχθηκε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βασικής ανάλυσης με  $a_{\max} = 0.2g$  και  $q = 100kPa$  για να συγκριθεί με τα αποτελέσματα όταν η ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση με ήπια κλίση είναι μη-βελτιωμένη (βλ. Κεφάλαιο 4).

### Οριζόντιες μετακινήσεις στο έδαφος θεμελίωσης με πλαστικά στραγγιστήρια

Αρχικώς παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος κάρναβος της εδαφικής στρώσης μαζί με τις ισοκαμπύλες της οριζόντιας μετακίνησης στο τέλος της δόνησης της ανάλυσης αναφοράς, για τις δύο περιπτώσεις βελτίωσης.

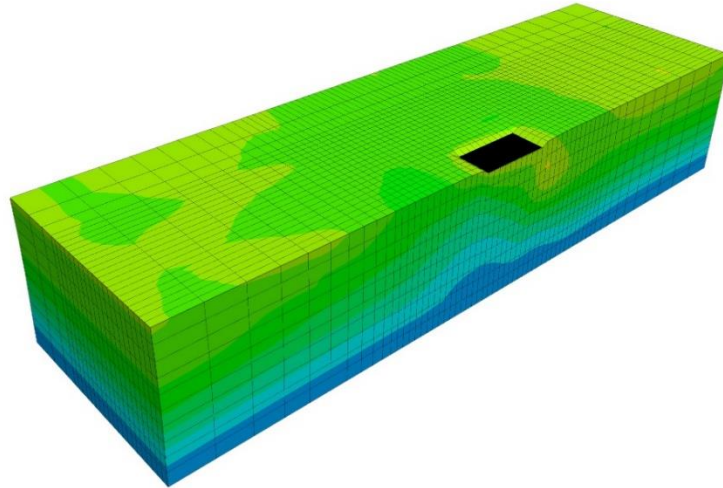
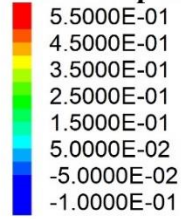
Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.1** και στο **Σχήμα 5.2** δίνονται τα ανωτέρω αποτελέσματα για το θεμέλιο πλάτους  $B = 5$ m, με τη χρήση των περιμετρικών στραγγιστηρίων (Drains) και του καννάβου στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο (DrainsFull), αντίστοιχα, ενώ στο **Σχήμα 5.3** και στο **Σχήμα 5.4** δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για πλάτος  $B = 20$ m. Σε κάθε σχήμα υπάρχουν τρία υποσχήματα που δίνουν τη σχετική πληροφορία για τις περιπτώσεις που το θεμέλιο είναι τετραγωνικό ( $\alpha, \beta$ ) και μορφής λωρίδας ( $\gamma$ ).

Όπως αναμένεται, μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις παρατηρούνται στην επιφάνεια της στρώσης και προς τα κατάντη, ενώ ανάντη είναι μικρότερες. Συγκρίνοντας τις τιμές των μετακινήσεων με εκείνες σε μη βελτιωμένη στρώση (βλ. Κεφάλαιο 4), προκύπτει ελαφρά βελτίωση με τα περιμετρικά στραγγιστήρια σε αντίθεση με τη βελτίωση με κάρναβο στραγγιστηρίων όπου οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι σημαντικά μειωμένες. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή των στραγγιστηρίων κάτω από το πλατύ θεμέλιο ( $B = 20$ m) εμφανίζει τις μικρότερες οριζόντιες μετακινήσεις, δηλαδή την πιο αποτελεσματική βελτίωση (**Σχήμα 5.4**).

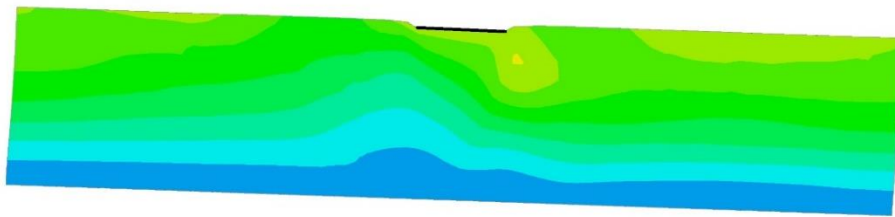


## Drains

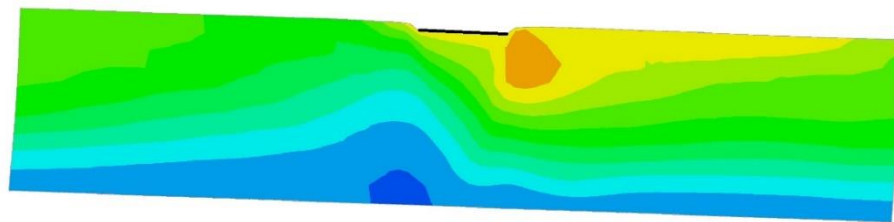
Zone X Displacement



(α)



(β)

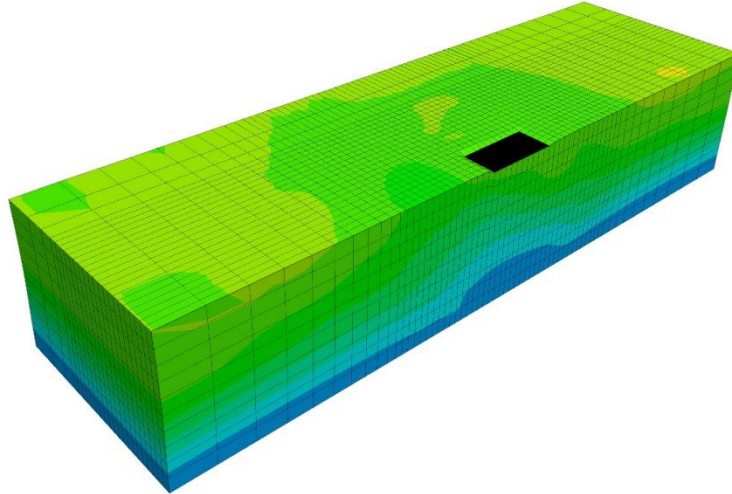
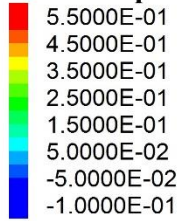


(γ)

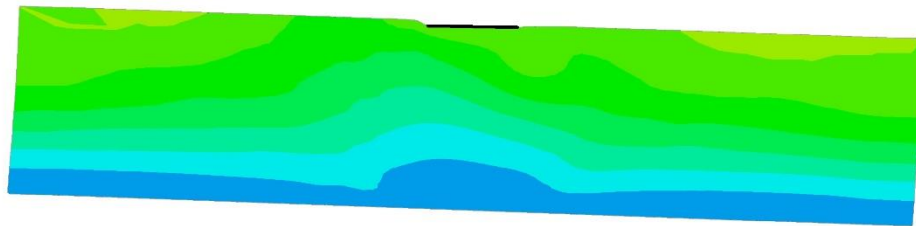
**Σχήμα 5.1:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## Drains Full

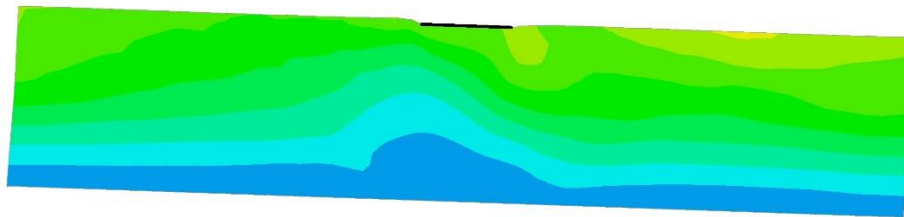
Zone X Displacement



(α)



(β)

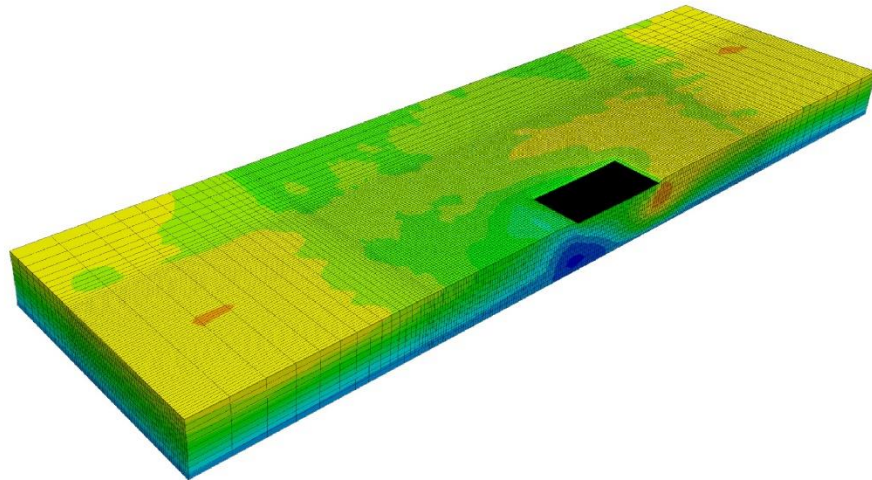
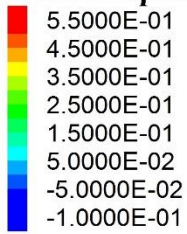


(γ)

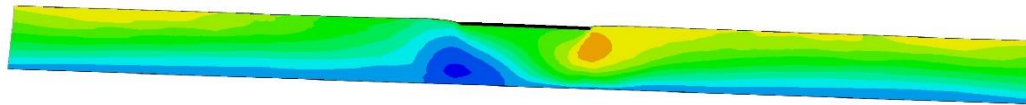
**Σχήμα 5.2:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων με κάρναβο στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο  $B=5m$  (DrainsFull), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## Drains

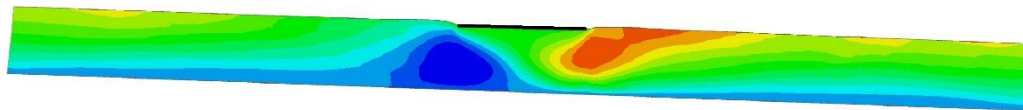
Zone X Displacement



(α)



(β)

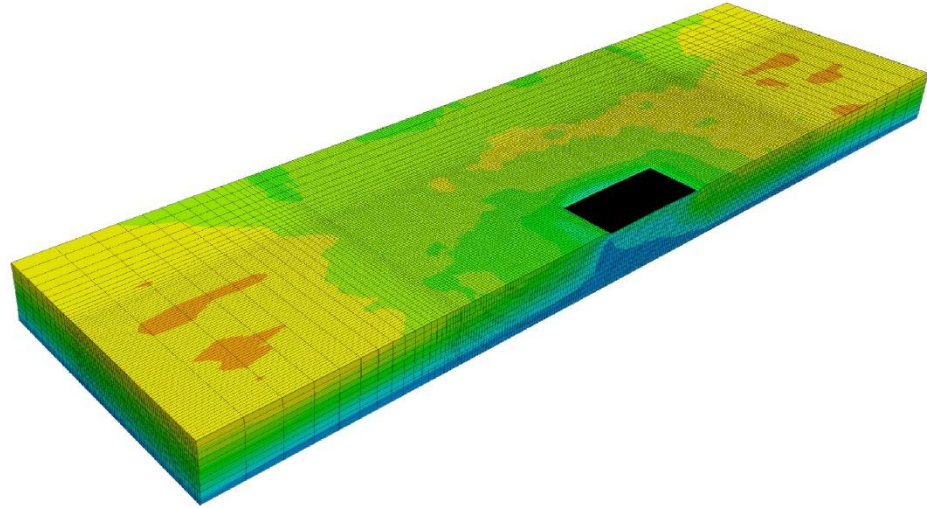
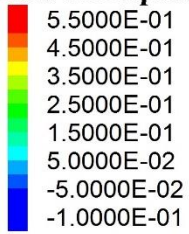


(γ)

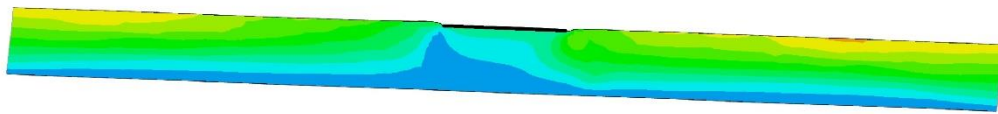
**Σχήμα 5.3:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## Drains Full

### Zone X Displacement



(α)



(β)

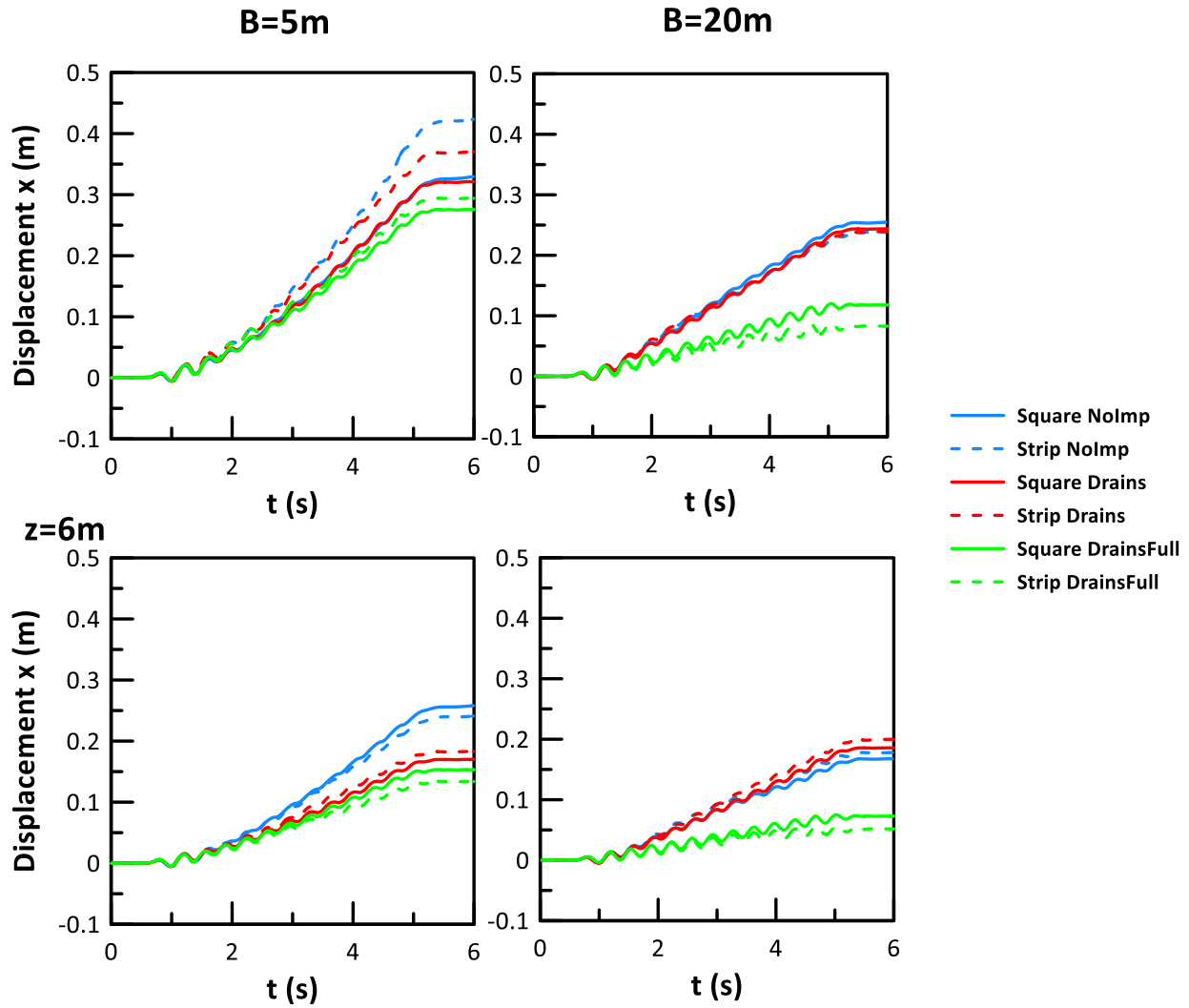


(γ)

**Σχήμα 5.4:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων με κάρναβο στραγγιστηρίων σε όλη την εδαφική στρώση κάτω από το θεμέλιο  $B=20m$  (DrainsFull), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

Πιο αναλυτικά, στο **Σχήμα 5.5** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων μετακινήσεων του κέντρου του θεμελίου (πάνω υπό-σχήματα) και ενός σημείου σε βάθος  $z = 6\text{m}$  στον άξονα του θεμελίου (κάτω υπό-σχήματα), στις περιπτώσεις μη-βελτίωσης του εδάφους (No Imp, από Κεφάλαιο 4), και μετά τη χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων (Drains & Drains Full). Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για πλάτη θεμελίου  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$  παρουσιάζονται στα αριστερά και δεξιά υπο-σχήματα, αντίστοιχα.

Με χρήση περιμετρικών στραγγιστηρίων (Drains, κόκκινες καμπύλες) προκύπτει από μηδενική έως μικρή απομείωση της οριζόντιας μετακίνησης. Συγκεκριμένα, η απομείωση είναι εμφανής για πλάτη θεμελίων  $B = 5\text{m}$ , ενώ για  $B = 20\text{m}$  δεν προκύπτει ουσιαστική βελτίωση σε σχέση με την περίπτωση μη-βελτίωσης (NoImp, γαλάζιες καμπύλες). Αντίθετα, ο κάναβος στραγγιστηρίων κάτω από όλο το θεμέλιο (Drains Full, πράσινες καμπύλες) απομειώνει σημαντικά την πλευρική εξάπλωση και στην θεμελιολωρίδα αλλά και στο τετραγωνικό θεμέλιο, κυρίως στο θεμέλιο πλάτους  $20\text{m}$ . Γενικώς, οι οριζόντιες μετατοπίσεις των θεμελίων είναι μεγαλύτερες για θεμελιολωρίδες απ' ότι για τετραγωνικά θεμέλια όταν το πλάτος είναι  $B = 5\text{m}$ , κι αυτό ανεξαρτήτως αν γίνεται χρήση στραγγιστηρίων ή όχι. Αντίθετα, όταν το πλάτος είναι  $B = 20\text{m}$ , οι οριζόντιες μετατοπίσεις των θεμελίων είναι μεγαλύτερες για τετραγωνικά θεμέλια απ' ότι για θεμελιολωρίδες, κι αυτό ισχύει και πάλι ανεξαρτήτως αν γίνεται χρήση στραγγιστηρίων ή όχι.



**Σχήμα 5.5:** Χρονοϊστορίες οριζόντιων μετακινήσεων στο κέντρο του θεμελίου και για βάθος  $z=6m$  κάτω από το κέντρο του θεμελίου πλάτους  $B=5m$  (αριστερά) και  $20m$  (δεξιά) σε βελτιωμένη στρώση με τις δύο διατάξεις στραγγιστηρίων (*Drains* και *DrainsFull*) για τις αναλύσεις αναφοράς, εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης (*NoImp*, από Κεφάλαιο 4).

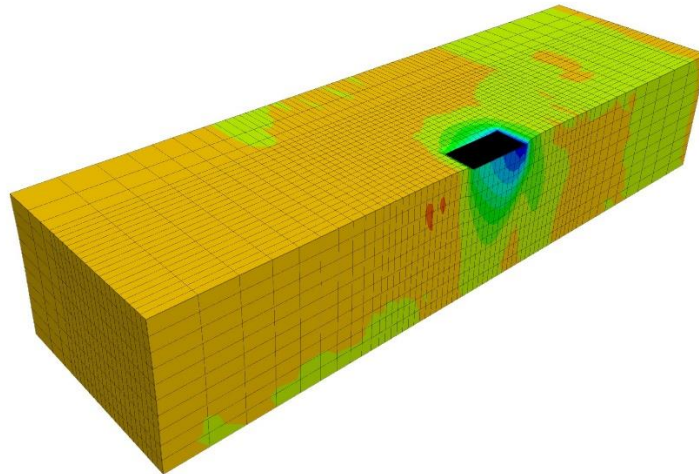
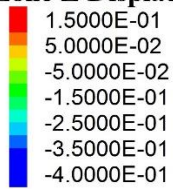
*Κατακόρυφες μετακινήσεις στο έδαφος θεμελίωσης με πλαστικά στραγγιστήρια*

Στο **Σχήμα 5.6** και στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται ο παραμορφωμένος κάρναβος και οι κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους στο τέλος της ανάλυσης αναφοράς για το θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$ , για την περίπτωση των περιμετρικών στραγγιστηρίων (Drains) και τον κάρναβο στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο (DrainsFull). Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.8** και στο **Σχήμα 5.9** δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για πλάτος θεμελίου  $B = 20\text{m}$ . Και πάλι τα υπο-σχήματα δίνουν τη σχετική πληροφορία ξεχωριστά για το τετραγωνικό θεμέλιο ( $\alpha, \beta$ ) και τη θεμελιοωρίδα ( $\gamma$ ).

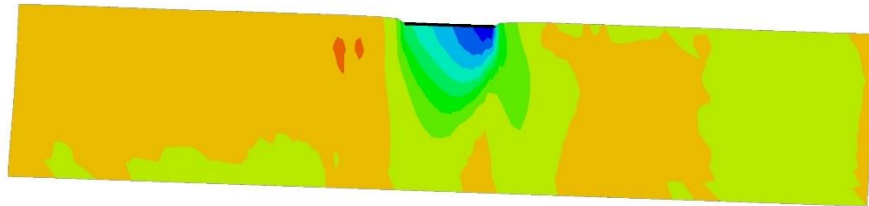
Όπως αναμένεται, μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις παρατηρούνται στη γειτονιά των θεμελίων, ενώ αυτές απομειώνονται με την απόσταση από το θεμέλιο. Συγκρίνοντας τις τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων με εκείνες σε μη βελτιωμένη στρώση (βλ. Κεφάλαιο 4), προκύπτει ελαφρά βελτίωση με τα περιμετρικά στραγγιστήρια σε αντίθεση με τη βελτίωση με κάρναβο στραγγιστηρίων όπου οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι σημαντικά μειωμένες. Αυτή η διαφορά στην αποδοτικότητα είναι πιο ξεκάθαρη για  $B = 20\text{m}$ , όπου εμφανίζεται ποσοστιαία η μεγαλύτερη απομείωση των κατακόρυφων μετακινήσεων. Οι διαφορές μεταξύ θεμελιοωρίδας και τετραγωνικού θεμελίου είναι αμελητέες για πλάτος θεμελίου  $B = 20\text{m}$ , αλλά υπαρκτές για πλάτος  $B = 5\text{m}$ .

## Drains

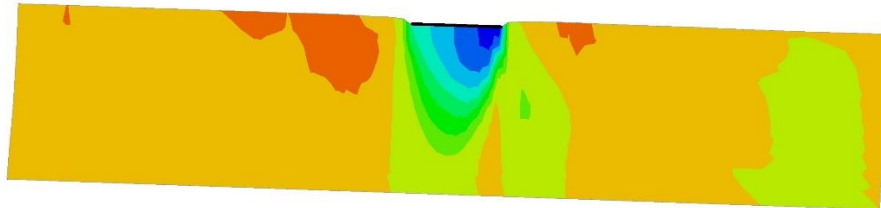
Zone Z Displacement



(α)



(β)



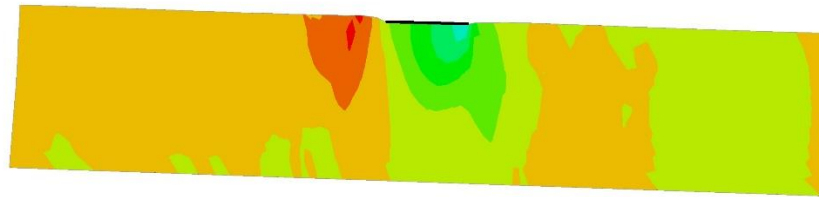
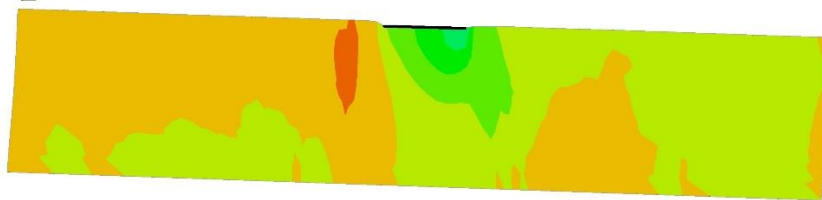
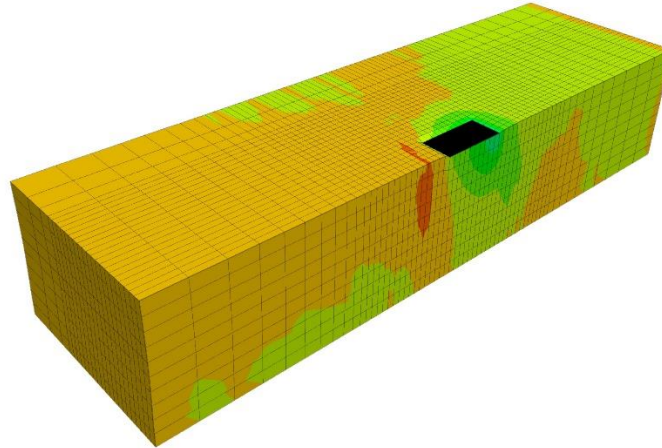
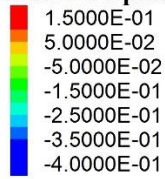
(γ)

**Σχήμα 5.6:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)



## Drains Full

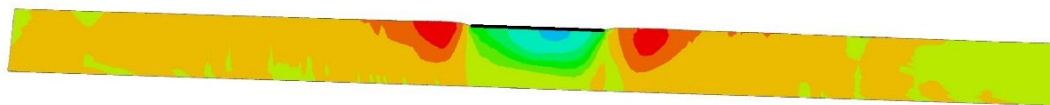
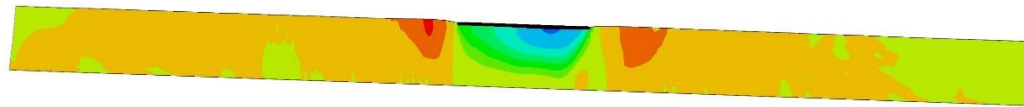
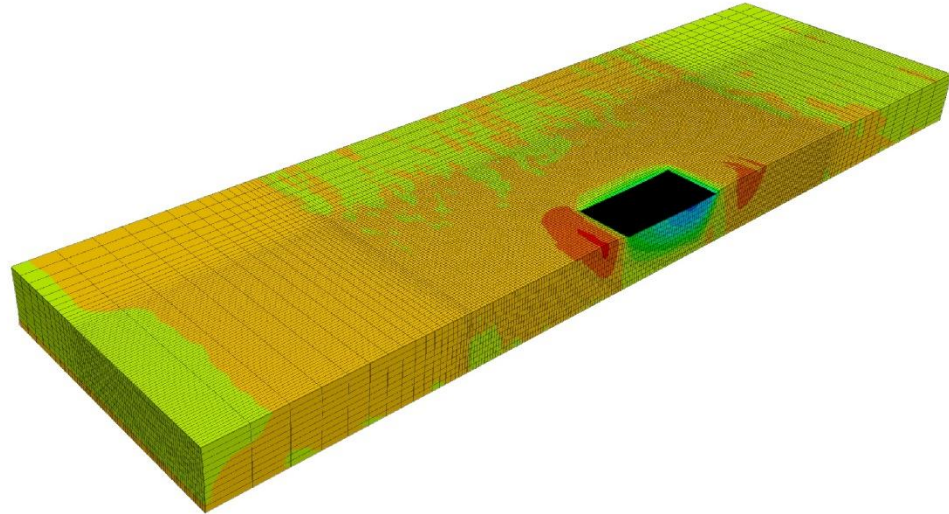
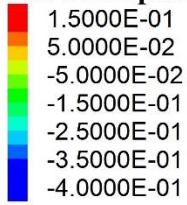
Zone Z Displacement



**Σχήμα 5.7:** Παραμορφωμένος κώνναβος και κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων με κώνναβο στραγγιστηρίων στρώση κάτω από το θεμέλιο  $B=5m$  (*DrainsFull*), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (*Strip*)

## Drains

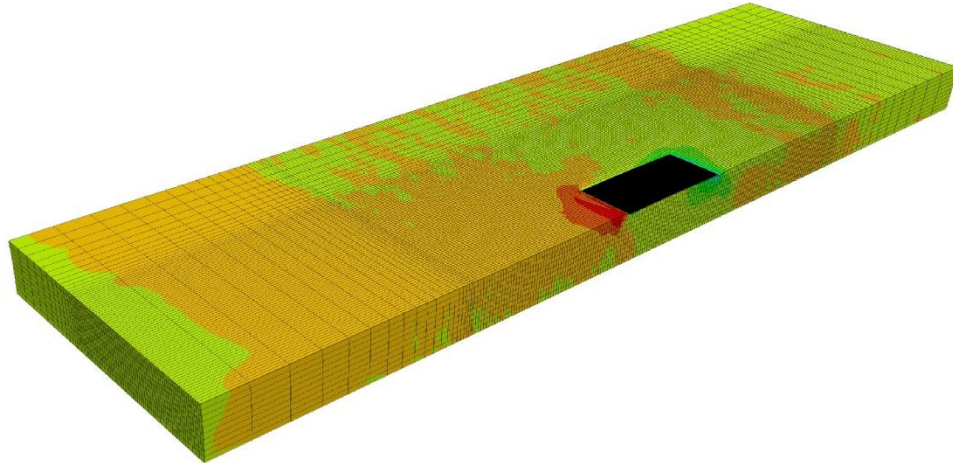
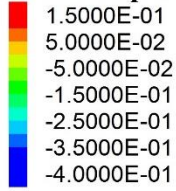
Zone Z Displacement



**Σχήμα 5.8:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## Drains Full

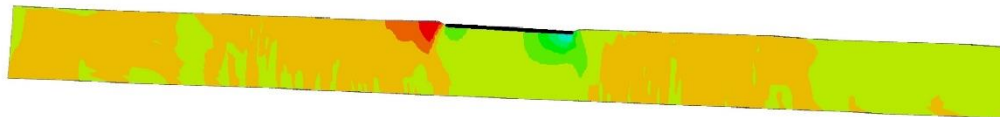
Zone Z Displacement



(α)



(β)

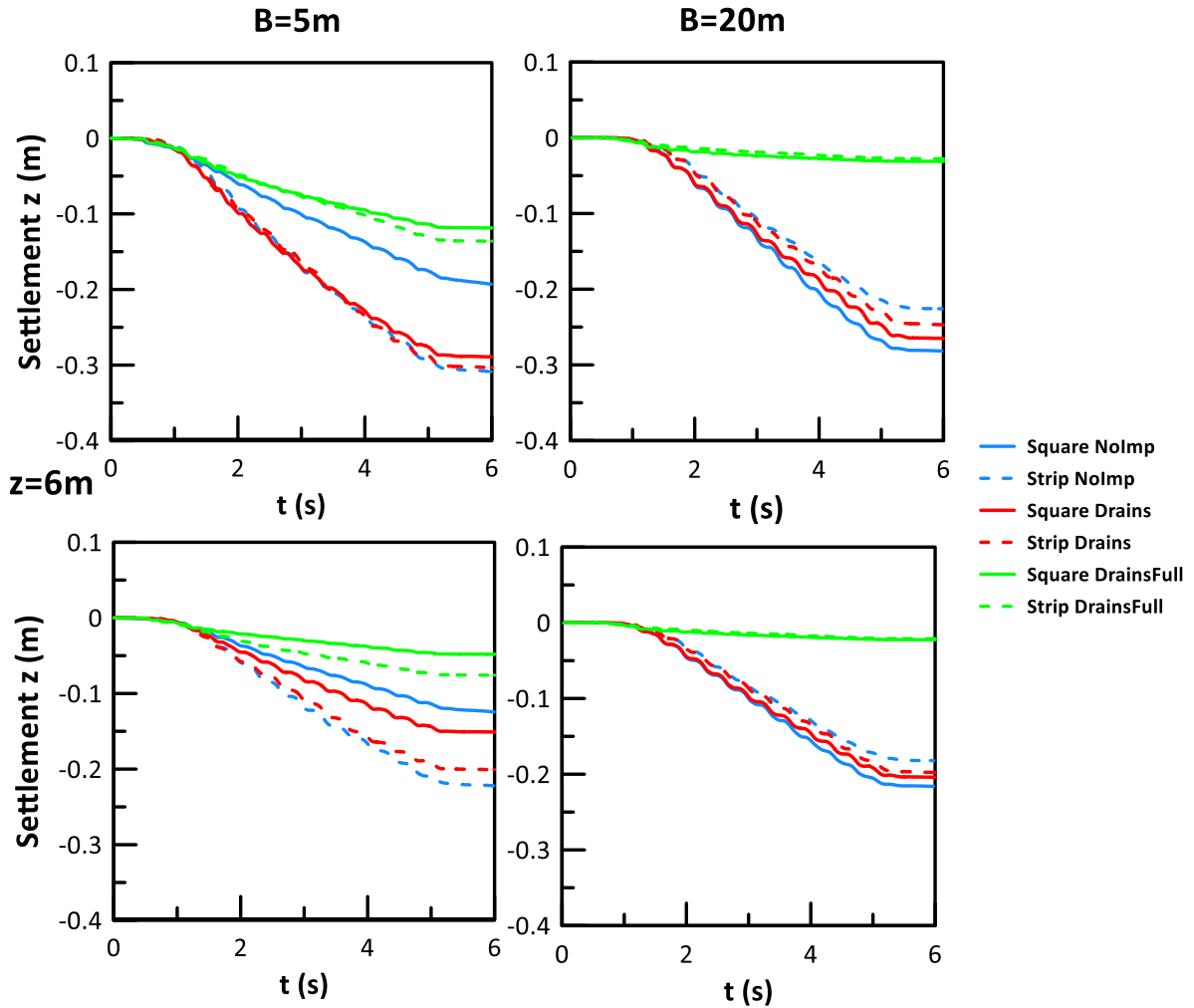


(γ)

**Σχήμα 5.9:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων με κάρναβο στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο  $B=20m$  (DrainsFull), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

Στο **Σχήμα 5.10** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων μετακινήσεων του κέντρου του θεμελίου (πάνω υπό-σχήματα) και ενός σημείου σε βάθος  $z=6\text{m}$  στον άξονα του θεμελίου (κάτω υπό-σχήματα), στις περιπτώσεις μη-βελτίωσης του εδάφους (NoImp, από Κεφάλαιο 4), και μετά τη χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων (Drains & DrainsFull). Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για πλάτη θεμελίου  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$  παρουσιάζονται στα αριστερά και δεξιά υποσχήματα, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται η χρήση περιμετρικών στραγγιστηρίων (Drains, κόκκινες καμπύλες) πρακτικά δεν απομειώνει τις καθιζήσεις του θεμελίου, σε αντιστοιχία με τις οριζόντιες μετατοπίσεις, ενώ μάλιστα για το τετραγωνικό θεμέλιο με πλάτος  $5\text{m}$  προκύπτει αύξηση (κάτι που χρήζει περαιτέρω διερεύνηση). Αντιθέτως, ο κάνναβος στραγγιστηρίων κάτω από όλο το θεμέλιο (DrainsFull, πράσινες καμπύλες) απομειώνει σημαντικά τις καθιζήσεις, και για τα δύο πλάτη θεμελίου, με πιο εμφανή τα οφέλη για  $B = 20\text{m}$ . Γενικώς, οι καθιζήσεις των θεμελίων είναι μεγαλύτερες για θεμελιολωρίδες απ' ότι για τετραγωνικά θεμέλια όταν το πλάτος είναι  $B = 5\text{m}$ , κι αυτό ανεξαρτήτως αν γίνεται χρήση στραγγιστηρίων ή όχι. Αντίθετα, όταν το πλάτος είναι  $B = 20\text{m}$ , οι καθιζήσεις των θεμελίων είναι μεγαλύτερες για τετραγωνικά θεμέλια απ' ότι για θεμελιολωρίδες, κι αυτό ισχύει και πάλι ανεξαρτήτως αν γίνεται χρήση στραγγιστηρίων ή όχι. Σημειώνεται ότι αυτή η αντίστιξη προκύπτει ποιοτικώς όμοια και για τις οριζόντιες μετατοπίσεις.



**Σχήμα 5.10:** Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων στο κέντρο του θεμελίου και για βάθος  $z=6m$  κάτω από το κέντρο των θεμελίων πλάτους  $B=5m$  (αριστερά) και  $20m$  (δεξιά) σε βελτιωμένη στρώση με τις δύο διατάξεις στραγγιστηρίων (*Drains* και *DrainsFull*) για τις αναδόσεις αναφοράς, εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης (*NoImp*, από Κεφάλαιο 4).

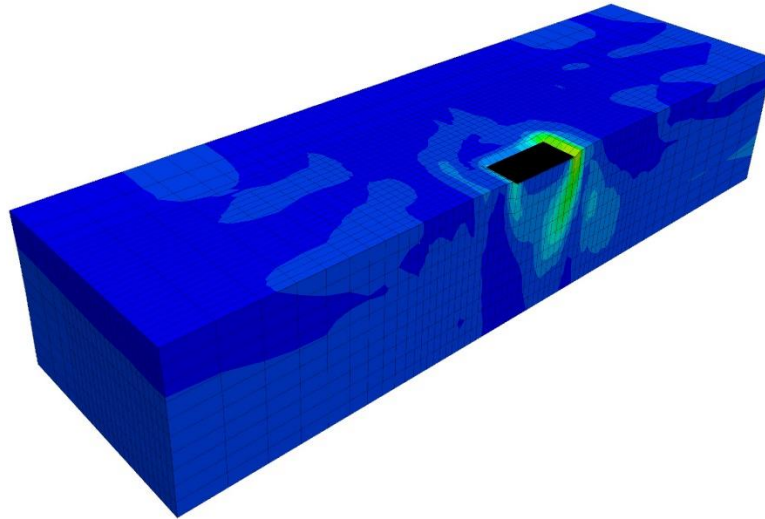
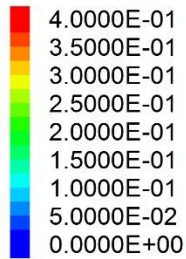
*Διατμητικές παραμορφώσεις στο έδαφος θεμελίωσης με πλαστικά στραγγιστήρια*

Στο **Σχήμα 5.11** και στο **Σχήμα 5.12** παρουσιάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους στο τέλος της ανάλυσης αναφοράς για το τετραγωνικό θεμέλιο και τη θεμελιολωρίδα πλάτους  $B = 5\text{m}$  για τις περιπτώσεις περιμετρικών στραγγιστηρίων (Drains) και κάνναβο στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο (DrainsFull). Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.13** και στο **Σχήμα 5.14** παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα για πλάτος θεμελίου  $B = 20\text{m}$ . Όπως και παραπάνω, τα υπο-σχήματα δίνουν τη σχετική πληροφορία ξεχωριστά για το τετραγωνικό θεμέλιο ( $\alpha, \beta$ ) και τη θεμελιολωρίδα ( $\gamma$ ).

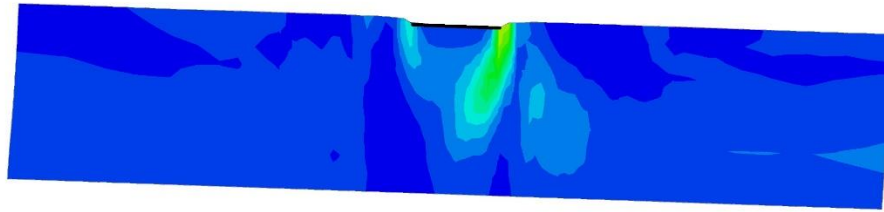
Σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διατμητικές παραμορφώσεις στο μη βελτιωμένο έδαφος θεμελίωσης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 (**Σχήμα 4.11** και **Σχήμα 4.12**), προκύπτει εν γένει μείωση των διατμητικών παραμορφώσεων κάτω από τα θεμέλια μετά την εφαρμογή στραγγιστηρίων. Ποιοτικά όμως, όλες οι παρατηρήσεις για τις ζώνες συσσώρευσης διατμητικών παραμορφώσεων που προκύπτουν για ρευστοποιήσιμη στρώση εμφανίζονται και μετά την εφαρμογή στραγγιστηρίων. Συγκεκριμένα, οι ζώνες αυτές είναι πιο αβαθείς κάτω από θεμέλια πλάτους  $B = 5\text{m}$ , έναντι εκείνων κάτω από θεμέλια πλάτους  $B = 20\text{m}$  όπου φτάνουν μέχρι το τέλος της εδαφικής στρώσης. Επιπλέον, οι ζώνες αυτές είναι πιο έντονες για θεμελιολωρίδα απ' ότι για τετραγωνικό θεμέλιο. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η ένταση των διατμητικών παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερη όταν εμφανίζονται μόνο περιμετρικά στραγγιστήρια, συγκριτικά με όταν εφαρμόζεται κάνναβος στραγγιστηρίων στο ίδιο θεμέλιο (ίδιου πλάτους και σχήματος).

## Drains

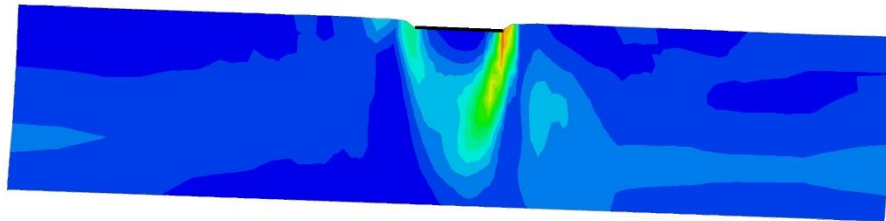
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)

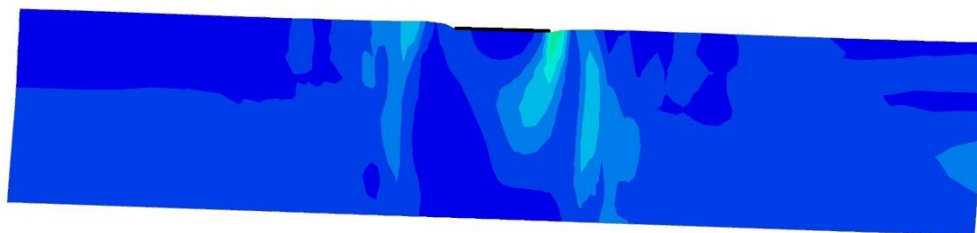
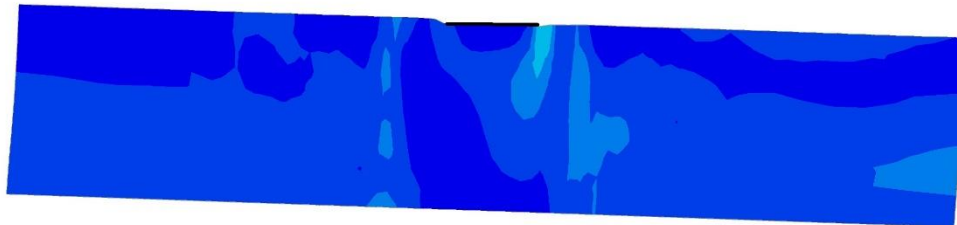
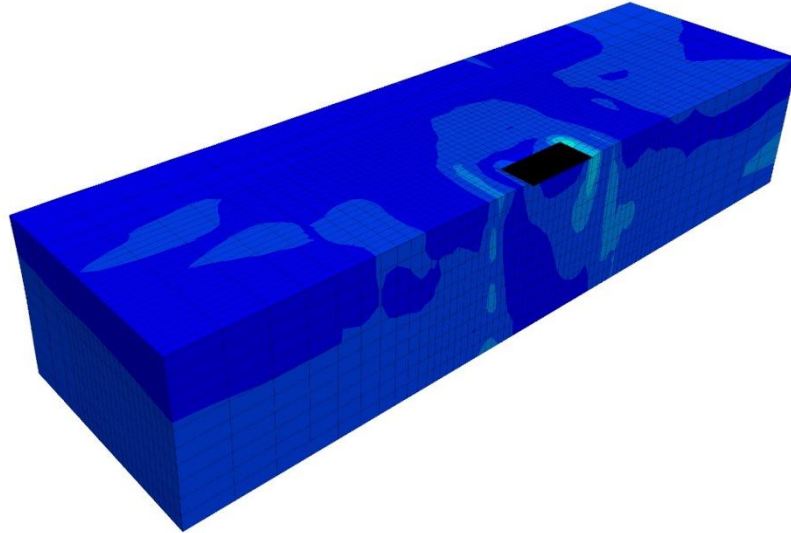
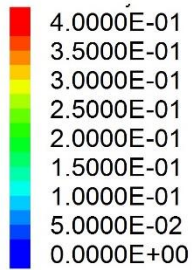


(γ)

**Σχήμα 5.11:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων στο έδαφος κάτω από θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## Drains Full

Zone Maximum Shear Strain Increment

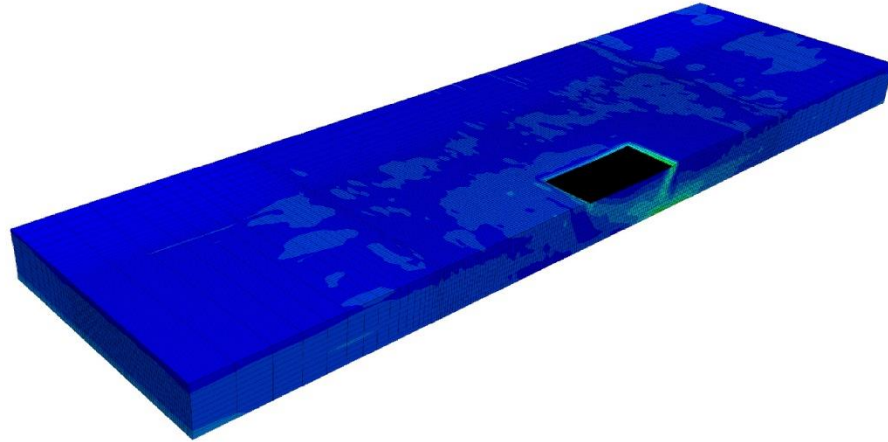
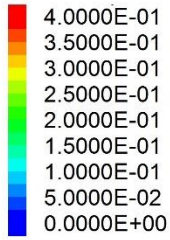


**Σχήμα 5.12:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων στο έδαφος με κάνναβο στραγγιστηρίων (*DrainsFull*) κάτω από θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (*Strip*)

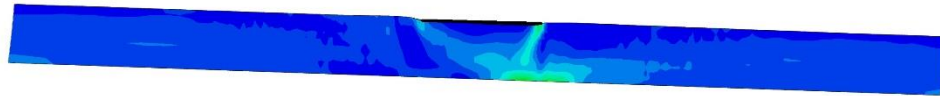


## Drains

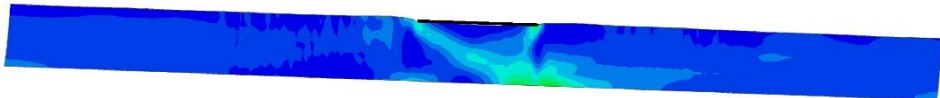
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)

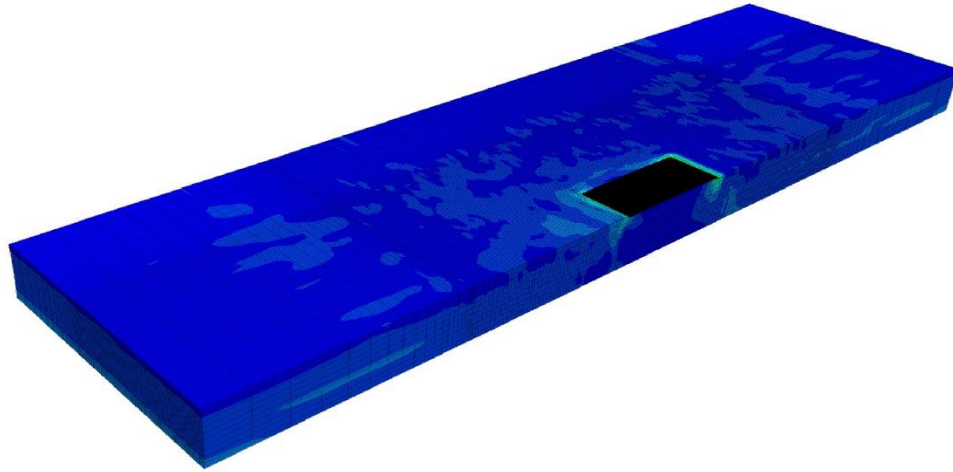
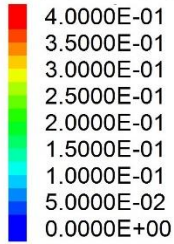


(γ)

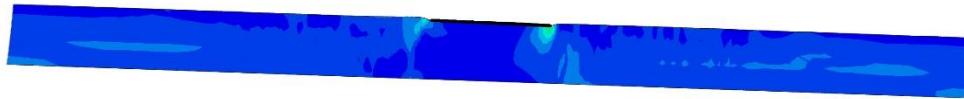
**Σχήμα 5.13:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων στο έδαφος κάτω από θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## Drains Full

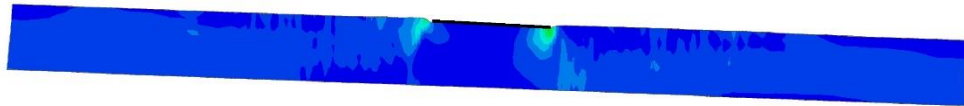
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 5.14:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων στο έδαφος με κάνναβο στραγγιστηρίων (*DrainsFull*) κάτω από θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (*Strip*)

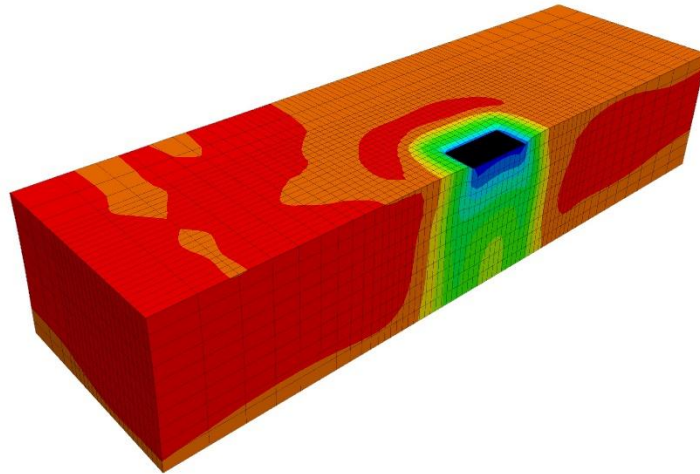
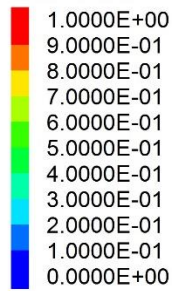
*Υπερπίεση πόρων στο έδαφος θεμελίωσης με πλαστικά στραγγιστήρια*

Στο **Σχήμα 5.15** και το **Σχήμα 5.16** παρουσιάζονται οι κατανομές του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στο τέλος της δόνησης αναφοράς στο έδαφος υπό θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$ , για τις περιπτώσεις εφαρμογής περιμετρικών στραγγιστηρίων (Drains) και καννάβου στραγγιστηρίων (DrainsFull), αντίστοιχα. Στη συνέχεια, στα **Σχήματα 5.17** και **5.18** δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα αλλά για πλάτος θεμελίου  $B = 20\text{m}$ . Κάθε σχήμα αποτελείται από τρία υπο-σχήματα που δίνουν τη σχετική πληροφορία ξεχωριστά για το τετραγωνικό θεμέλιο ( $\alpha, \beta$ ) και τη θεμελιοωρίδα ( $\gamma$ ).

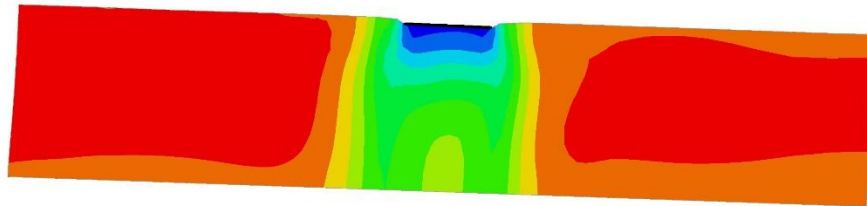
Συγκριτικά με το μη βελτιωμένο έδαφος (βλ. Κεφάλαιο 4), παρατηρείται ότι μόνο με τη χρήση καννάβου στραγγιστηρίων υπάρχει απομείωση του λόγου  $r_u$  κάτω από το θεμέλιο, η οποία είναι μικρή για θεμέλια με πλάτος  $B = 5\text{m}$  και πιο διακριτή για θεμέλια με πλάτος  $B = 20\text{m}$ . Αντιθέτως, η χρήση περιμετρικών στραγγιστηρίων δεν προσδίδει κάποια ουσιαστική μείωση του λόγου  $r_u$  συγκριτικά με τη μη-βελτιωμένη στρώση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατάντη του θεμελίου δεν προκύπτει διαφοροποίηση του λόγου  $r_u$  συγκριτικά με τη μη-βελτιωμένη στρώση. Από εκεί και πέρα, κοινό χαρακτηριστικό όλων των αναλύσεων είναι ότι ο λόγος  $r_u$  αυξάνει με το βάθος κάτω από το θεμέλιο (χωρίς όμως να προκύπτει ρευστοποίηση), δηλαδή παίρνει τις ελάχιστες τιμές του ακριβώς κάτω από αυτό.

## Drains

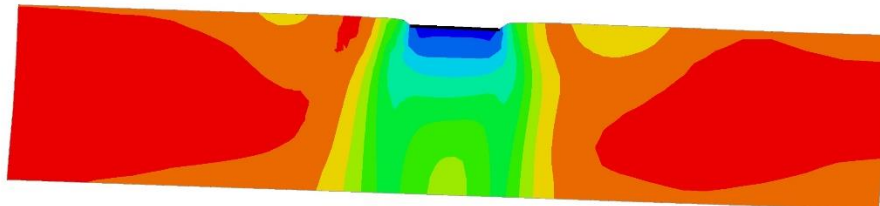
Zone Extra 2



(α)



(β)

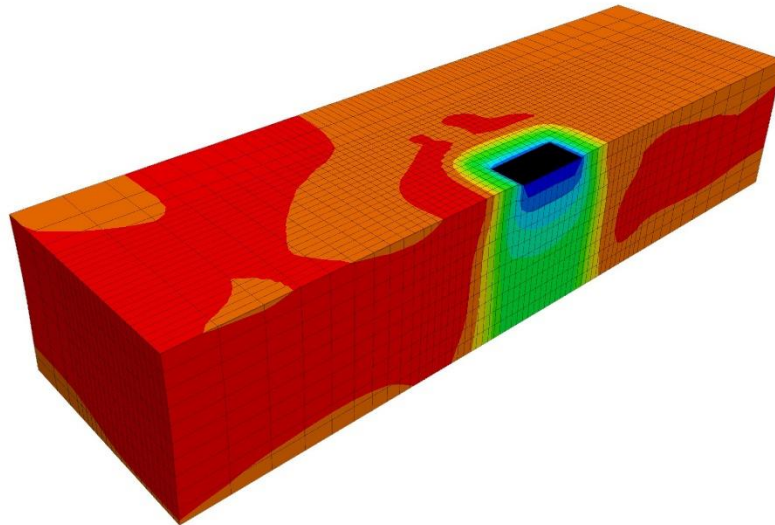
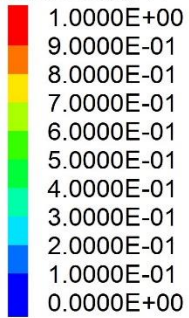


(γ)

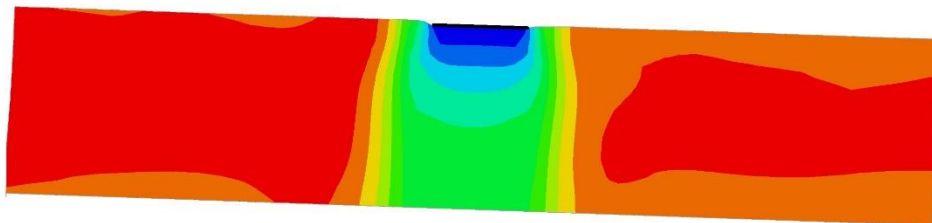
**Σχήμα 5.15:** Κατανομή λόγου υπερπλίσεων πόρων  $r_u$  στο έδαφος για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## Drains Full

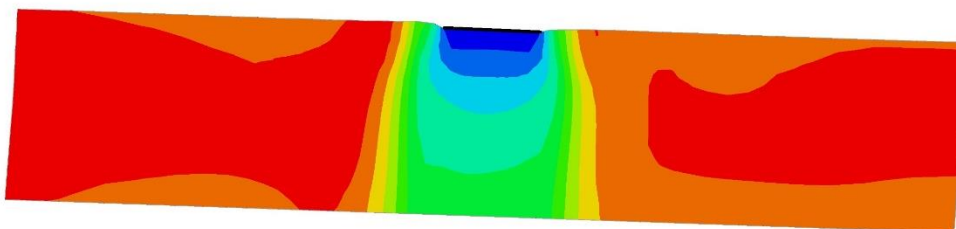
### Zone Extra 2



(α)



(β)

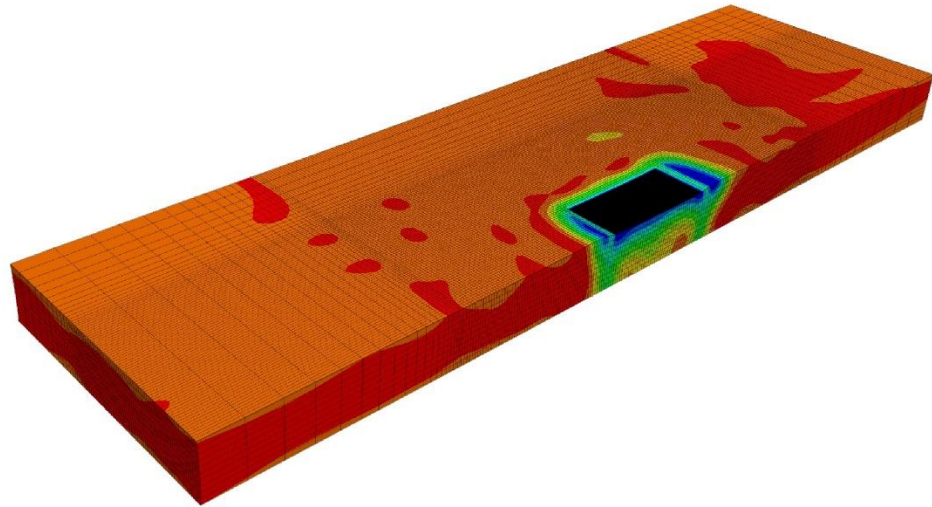
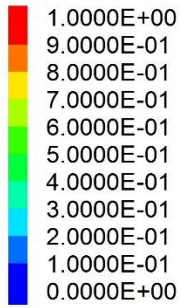


(γ)

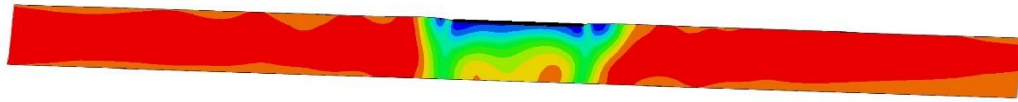
**Σχήμα 5.16:** Κατανομή λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στο έδαφος με κάρναβο στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο  $B=5m$  (*DrainsFull*), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): **(α)** ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), **(β)** τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), **(γ)** τομή για θεμελιολωρίδα (*Strip*)

## Drains

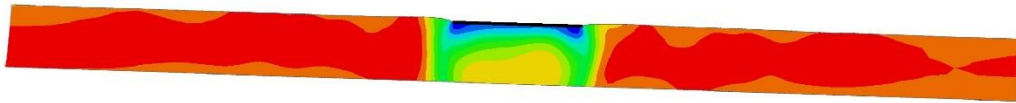
Zone Extra 2



(α)



(β)

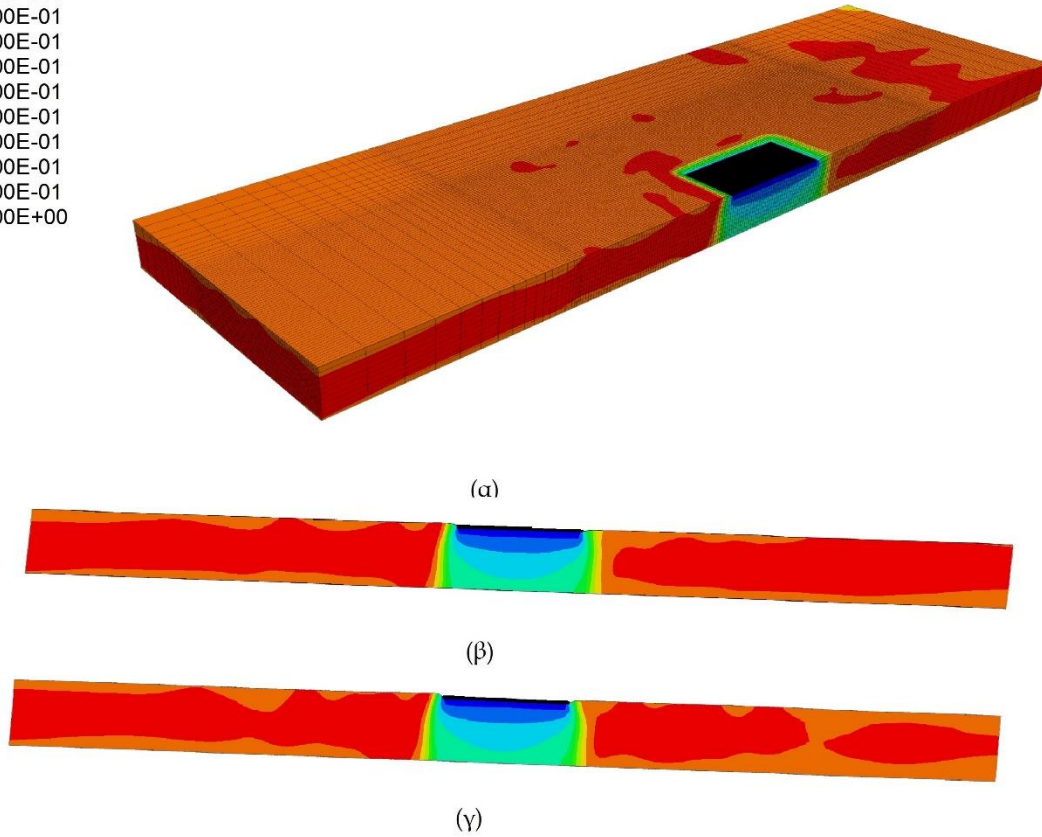
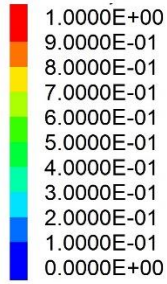


(γ)

**Σχήμα 5.17:** Κατανομή λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στο έδαφος για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

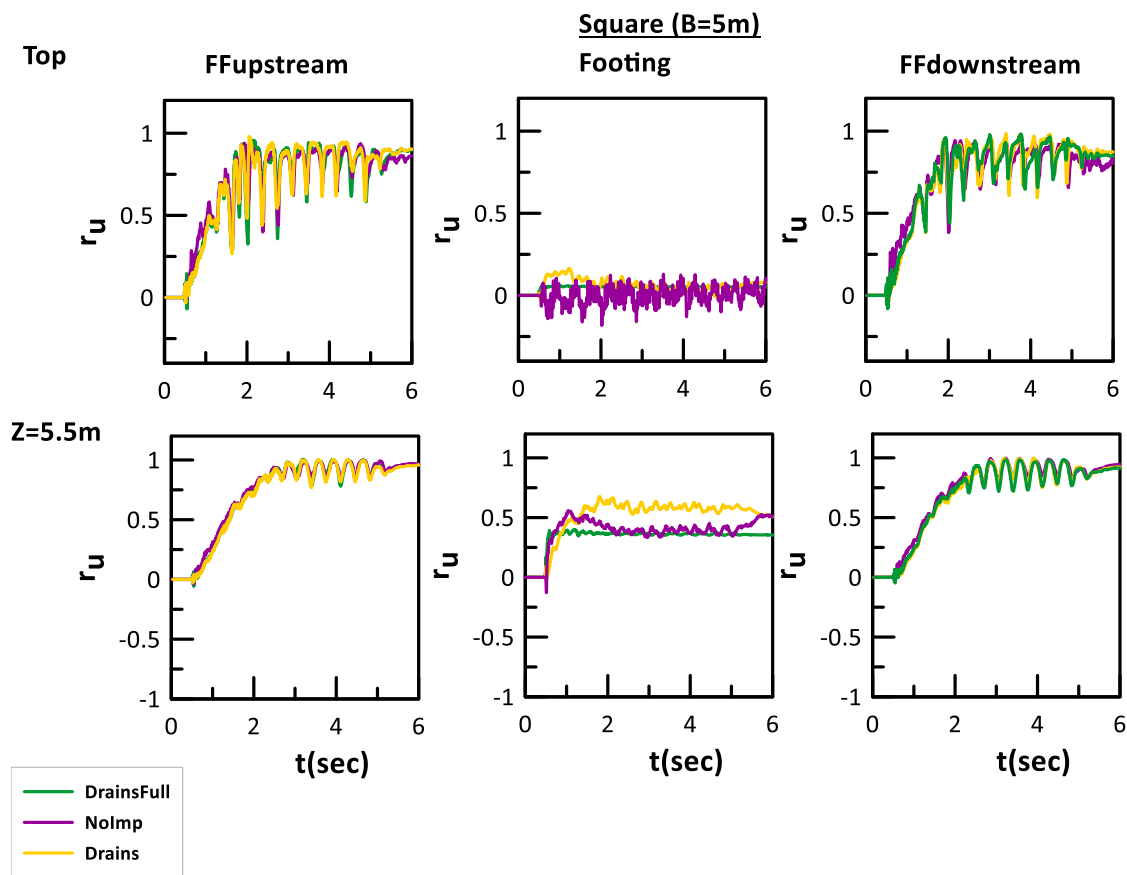
## Drains Full

### Zone Extra 2



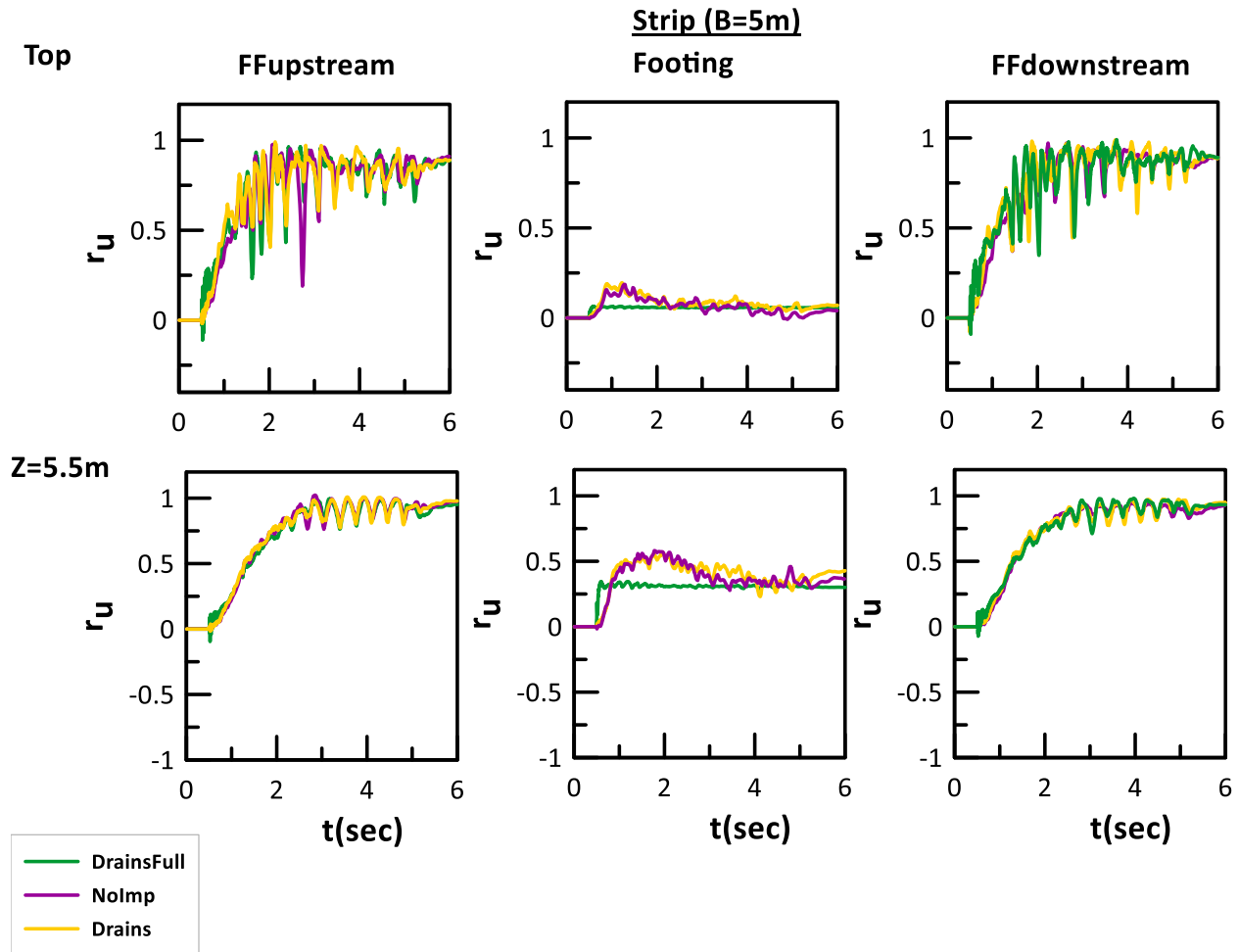
**Σχήμα 5.18:** Κατανομή λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στο έδαφος με κάρναβο στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο  $B=20m$  (*DrainsFull*), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (*Square*), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (*Strip*)

Στη συνέχεια, συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  σε διάφορα βάθη ανάντη (Free Field upstream), κατάντη (Free Field downstream) και κάτω από το θεμέλιο (Footing) στις περιπτώσεις μη-βελτιωμένης στρώσης (NoImp, από Κεφάλαιο 4) και μετά την εφαρμογή των δύο διατάξεων στραγγιστηρίων. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.19 και στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα πλάτους  $B = 5\text{m}$ , απ' όπου προκύπτει ότι τα περιμετρικά στραγγιστήρια δεν βοηθούν ουσιαστικά, και μόνο ο κένναβος στραγγιστηρίων δίνει μικρή αποτόνωση στην περιοχή ενδιαφέροντος (κάτω από το θεμέλιο). Αντιθέτως, η τοποθέτηση στραγγιστηρίων δεν επιδρά καθόλου στην απόκριση ανάντη και κατάντη.



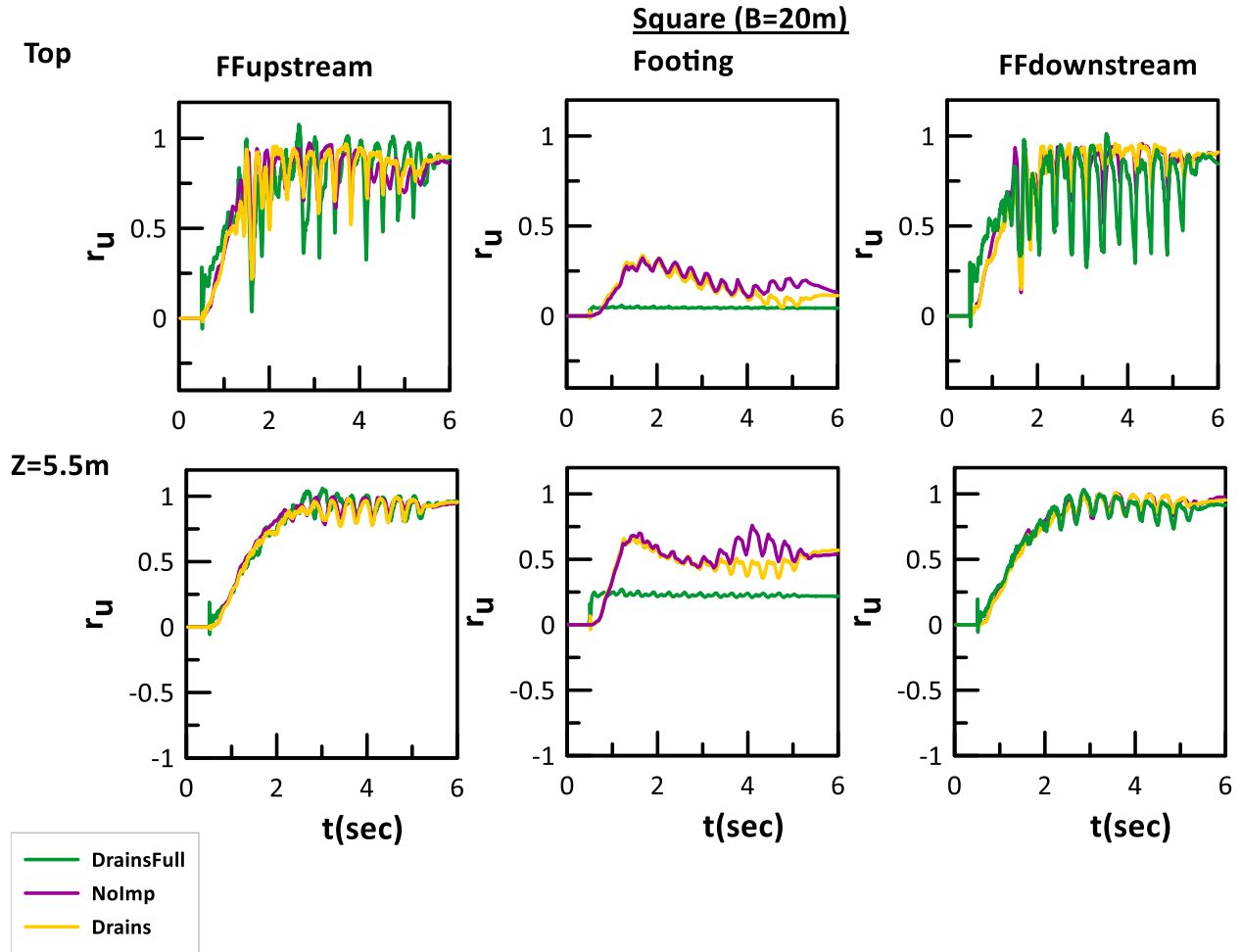
**Σχήμα 5.19:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος  $5.5\text{m}$  κάτω από τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=5\text{m}$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατάντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) και κένναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull).



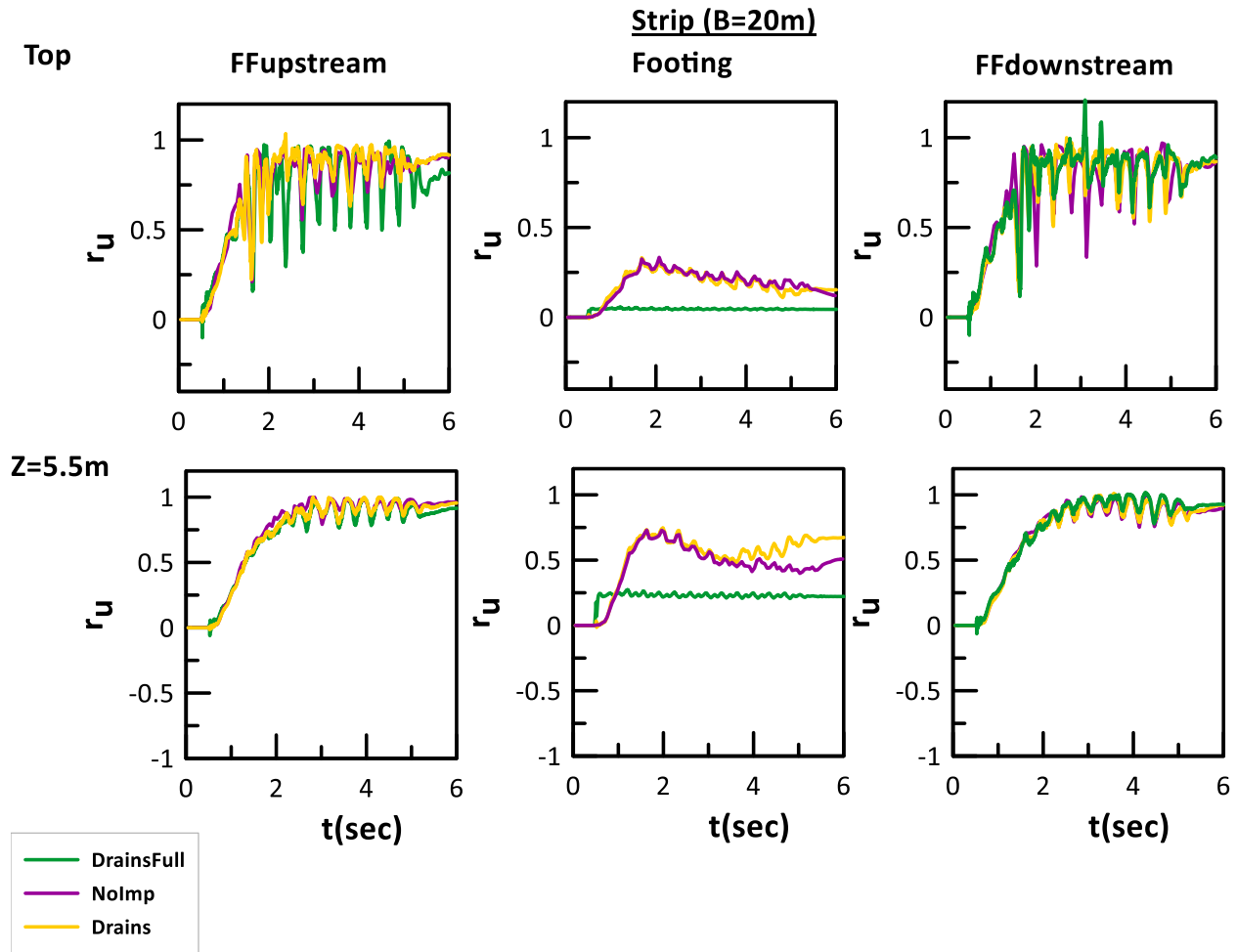


**Σχήμα 5.20:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος 5.5m κάτω από θεμελιολωρίδα πλάτους  $B=5m$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατόντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) και κάνναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull).

Στο **Σχήμα 5.21** και στο **Σχήμα 5.22** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες για το τετραγωνικό θεμέλιο και τη θεμελιολωρίδα πλάτους  $B = 20m$ . Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι η τοποθέτηση στραγγιστηρίων περιμετρικά του θεμελίου, δε διαφοροποίησε σημαντικά την ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων. Αντιθέτως, στην περίπτωση τοποθέτησης κάνναβου στραγγιστηρίων προκύπτει σημαντική αποτόνωση των υπερπίεσεων πόρων κάτω από το θεμέλιο, τόσο για την περίπτωση θεμελιολωρίδας όσο και για το τετραγωνικό θεμέλιο. Αντιθέτως, η τοποθέτηση στραγγιστηρίων δεν επιδρά καθόλου στην απόκριση ανάντη και κατόντη των θεμελίων πλάτους  $B = 20m$ .



**Σχήμα 5.21:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος 5.5m κάτω από τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατόντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) και κάνναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull).

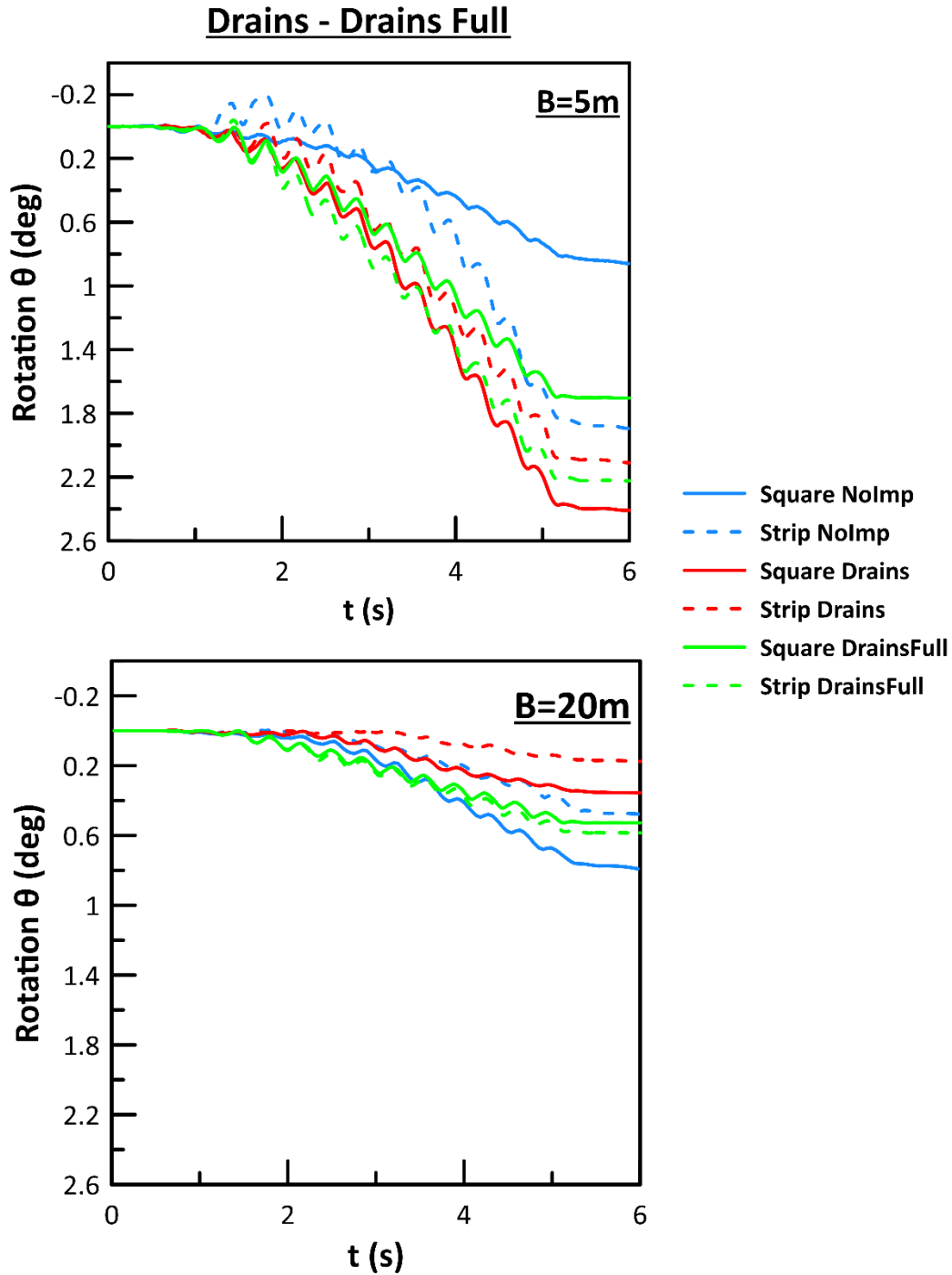


**Σχήμα 5.22:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος 5.5m κάτω από θεμελιολωρίδα πλάτους  $B=20m$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατόντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) και κάνναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull).

#### Στροφή θεμελίων με πλαστικά στραγγιστήρια

Στο **Σχήμα 5.23** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία στροφής των τετραγωνικών θεμελίων και της θεμελιολωρίδας πλάτους 5m και 20m, πριν τη βελτίωση (NoImp, από Κεφάλαιο 4) και για τις δύο διαφορετικές διατάξεις στραγγιστηρίων (Drains και DrainsFull). Υπενθυμίζεται ότι οι θετικές τιμές του άξονα  $\gamma$  αντιστοιχούν σε ωρολογιακές στροφές των θεμελίων πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$ . Η εικόνα των αναπτυσσόμενων στροφών διαφέρει αρκετά μεταξύ των δύο θεμελίων διαφορετικού πλάτους. Στη περίπτωση θεμελίου πλάτους  $B = 5m$ , οι στροφές είναι μεγάλες δηλαδή κυμαίνονται από  $0.8^\circ$  έως  $2.4^\circ$ , ενώ

αντιθέτως για το θεμέλιο πλάτους  $B = 20\text{m}$  οι στροφές είναι μικρότερες ή ίσες με  $0.8^\circ$ , καθώς κυμαίνονται από  $0.1^\circ$  έως  $0.8^\circ$ . Από εκεί και πέρα όμως, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ σχήματος θεμελίου και διάταξης στραγγιστηρίων για το πως επιδρούν αυτές οι παράμετροι στην τιμή των στροφών. Συγκεκριμένα, για πλάτος θεμελίου  $B = 5\text{m}$ , τα στραγγιστήρια αυξάνουν παραδόξως τις στροφές, και μάλιστα τα περιμετρικά στραγγιστήρια περισσότερο απ' ότι ο κένναβος στραγγιστηρίων. Αντιθέτως, για πλάτος θεμελίου  $B = 20\text{m}$ , τα στραγγιστήρια μειώνουν τις στροφές, αλλά πάλι τα περιμετρικά στραγγιστήρια έχουν εντονότερη επίδραση συγκριτικά με τον κένναβο στραγγιστηρίων. Σε σχέση με την επίδραση του σχήματος θεμελίου και πάλι δεν προκύπτει συστηματική επίδραση. Συνεπώς, η επίδραση των στραγγιστηρίων επί της στροφής των θεμελίων χρήζει περαιτέρω διερεύνηση.



**Σχήμα 5.23:** Χρονοϊστορίες στροφής (προς τα κατόντη) θεμελίων πλάτους  $B=5m$  (άνω) και  $B=20m$  (κάτω), με σχήμα τετραγωνικό (square) και θεμελιολωρίδας (strip) σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με τις δύο διατάξεις στραγγιστηρίων (Drains και DrainsFull).

### 5.3. Παραμετρική διερεύνηση απόκρισης θεμελίων με χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων

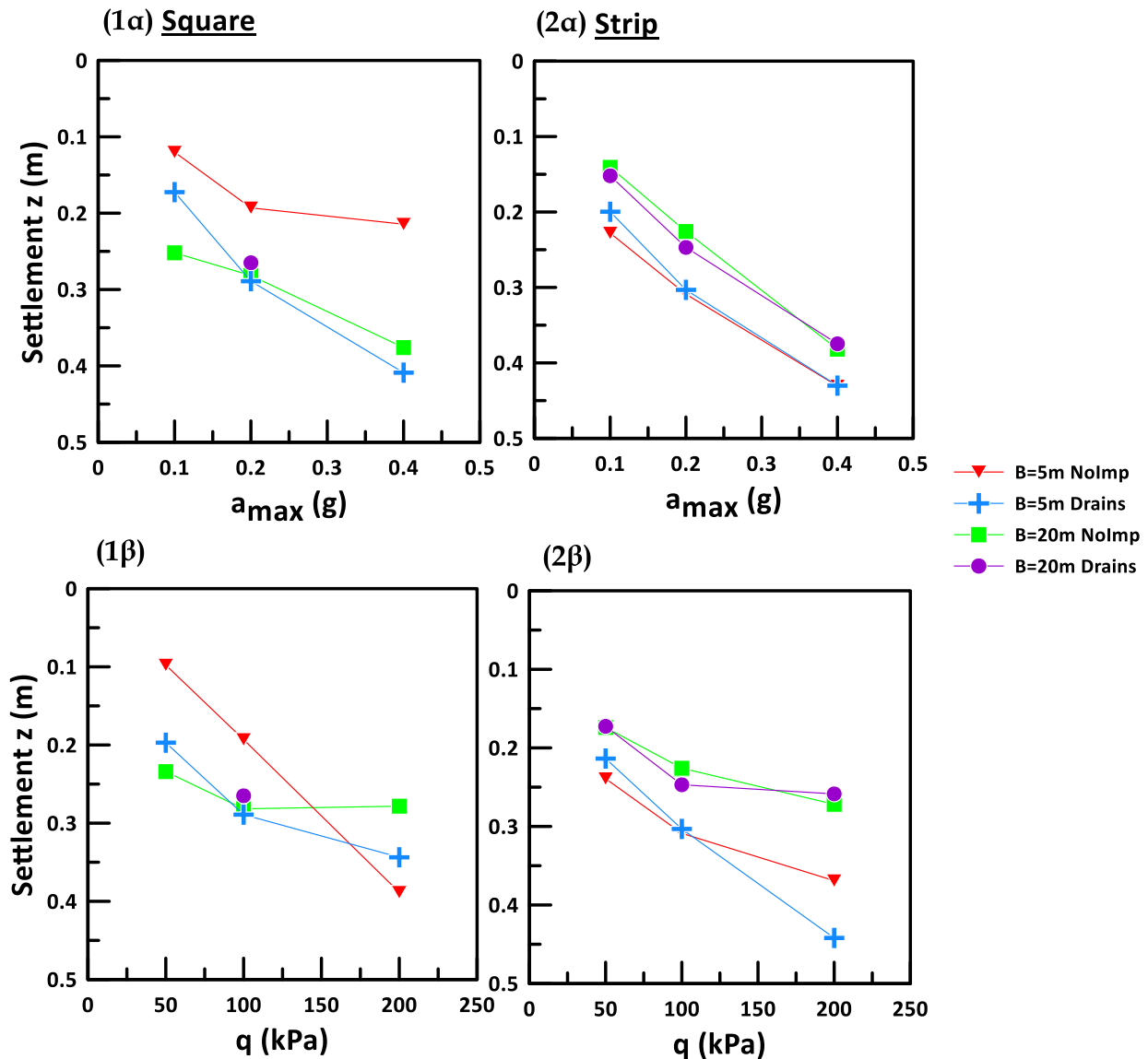
Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η τυπική απόκριση των θεμελίων διαφορετικού πλάτους  $B$  και σχήματος (τετραγωνικού και λωρίδας) σε καθεστώς οριζόντιας εξάπλωσης όταν το έδαφος έχει βελτιωθεί τοπικά με χρήση (πλαστικών) στραγγιστηρίων. Έτσι, όλες οι αναλύσεις αφορούσαν αρμονική διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max} = 0.2g$  και φορτίο θεμελίου  $q=100kPa$ . Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η επίδραση των τιμών των  $a_{max}$  και  $q$  στα συμπεράσματα που προέκυψαν για την απόκριση θεμελίων εδραζόμενων σε έδαφος που έχει βελτιωθεί τοπικά με στραγγιστήρια, συγκριτικά με την επίδραση τους σε μη-βελτιωμένο έδαφος, όπως έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 4.4.

Υπογραμμίζεται εδώ ότι αναλύσεις για τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B = 20m$  με περιμετρικά στραγγιστήρια και κάρναβο στραγγιστηρίων πραγματοποιήθηκαν μόνο για την βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$  και  $q=100kPa$ ), λόγω του σημαντικού υπολογιστικού χρόνου που απαιτούσε η κάθε ανάλυση.

#### Περιμετρικά Στραγγιστήρια (Drains)

Στο **Σχήμα 5.24** συνοψίζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για την καθίζηση του θεμελίου για την περίπτωση βελτίωσης μέσω περιμετρικών στραγγιστηρίων, εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης του εδάφους (από Κεφάλαιο 4). Τα άνω και κάτω υπο-σχήματα παρουσιάζουν την επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , αντίστοιχα, ενώ τα αριστερά και δεξιά υποσχήματα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα, αντίστοιχα. Τέλος, διαφορετικές καμπύλες σε όλα τα υπο-σχήματα ξεχωρίζουν τα πλάτη θεμελίου και το αν πρόκειται για μη-βελτιωμένη στρώση ή όχι. Συνολικά προκύπτει ότι οι καθιζήσεις αυξάνονται με αύξηση της τιμής των  $a_{max}$  και  $q$  για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ενώ διαπιστώνεται ότι η χρήση των πλαστικών στραγγιστηρίων προκάλεσε εν γένει αύξηση των καθιζήσεων στα τετραγωνικά θεμέλια

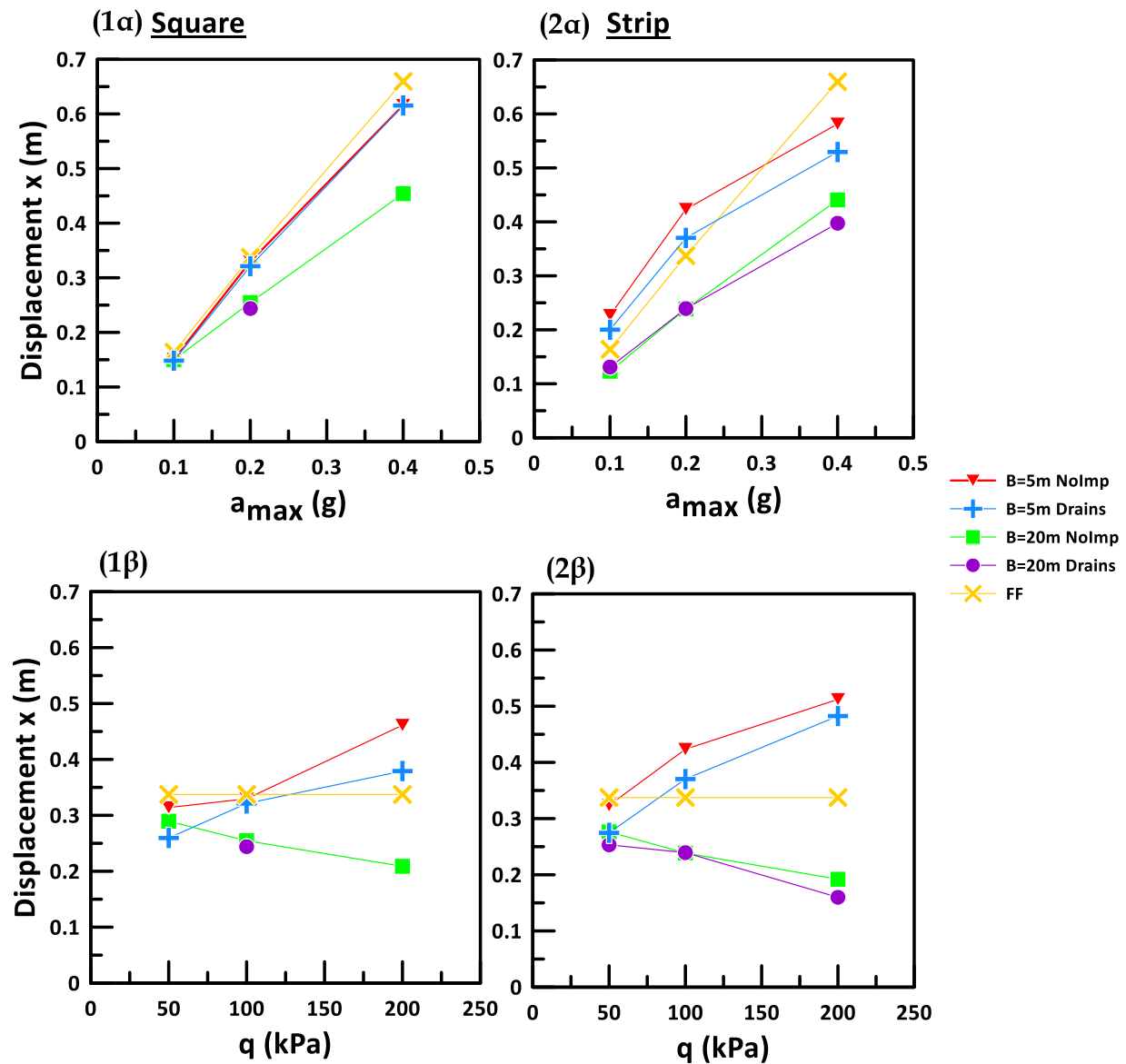
πλάτους 5m. Αντίθετα, στα θεμέλια πλάτους 20m η τοποθέτηση περιμετρικών στραγγιστηρίων δεν προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στις καθιζήσεις.



**Σχήμα 5.24:** Καθιζήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$  (kPa)

Στο **Σχήμα 5.25** συνοψίζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για την οριζόντια μετακίνηση του θεμελίου για την περίπτωση βελτίωσης μέσω περιμετρικών στραγγιστηρίων, εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης του εδάφους (από Κεφάλαιο 4). Τα άνω και κάτω υπο-σχήματα παρουσιάζουν την επίδραση της μέγιστη επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , αντίστοιχα, ενώ τα αριστερά και δεξιά υπο-σχήματα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα, αντίστοιχα. Τέλος, διαφορετικές καμπύλες σε όλα τα υπο-σχήματα ξεχωρίζουν τα πλάτη θεμελίου και το αν πρόκειται για μη-βελτιωμένη στρώση ή όχι, ενώ χάριν συγκρίσεως εμπεριέχονται και τα αποτελέσματα οριζόντιας μετακίνησης του ελεύθερου πεδίου.



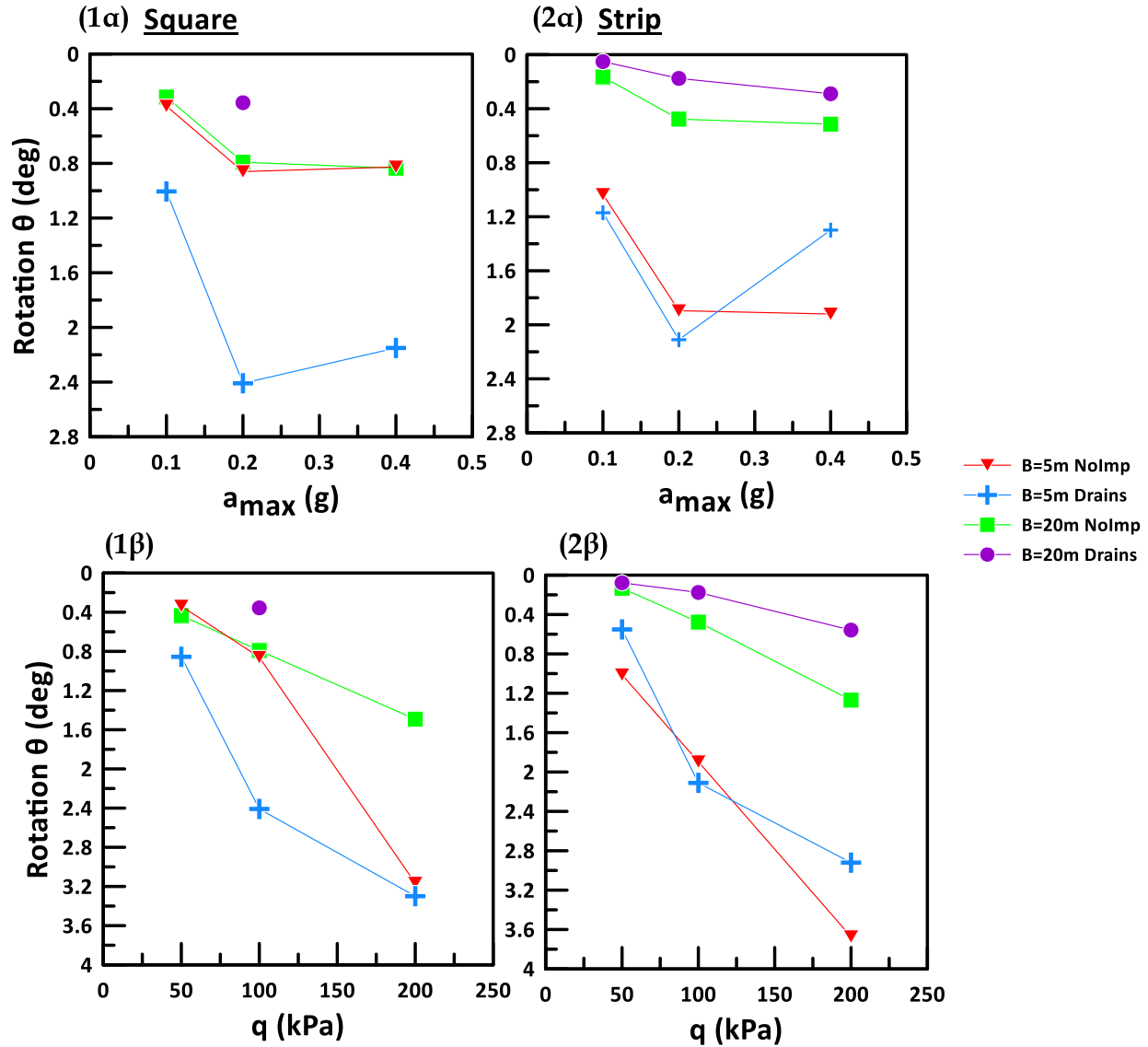


Σχήμα 5.25: Οριζόντιες μετακινήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$  (kPa)

Από το Σχήμα 5.25 προκύπτει ότι ανεξαρτήτως θεμελίου ή βελτίωσης με περιμετρικά στραγγιστήρια ή όχι, η μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}$  αυξάνει συστηματικά τις οριζόντιες μετακινήσεις. Το ίδιο συμβαίνει και για το φορτίο θεμελίου  $q$ , το οποίο αυξάνει τις οριζόντιες μετακινήσεις μόνο θεμελίων με πλάτος  $B = 5m$ , ενώ για τα πλατιά θεμέλια με

πλάτος  $B = 20\text{m}$  προκύπτει η αντίστροφη επίδραση. Από εκεί και πέρα, τα περιμετρικά στραγγιστήρια δείχνουν να απομειώνουν ελαφρά τις οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων πλάτους  $B = 5\text{m}$ , ενώ δείχνουν να μην επιδρούν στις οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων πλάτους  $B = 20\text{m}$ . Επιπλέον, τα τετραγωνικά θεμέλια δείχνουν να έχουν οριζόντιες μετακινήσεις μικρότερες ή ίσες με του ελεύθερου πεδίου, εκτός αν είναι έντονα φορτισμένα ( $q=200\text{kPa}$ ). Αντιθέτως, οι θεμελιολωρίδες με  $B = 5\text{m}$  εμφανίζουν τιμές συνήθως μεγαλύτερες του ελεύθερου πεδίου, και μόνο εκείνες με  $B = 20\text{m}$  εμφανίζει και πάλι τιμές μικρότερες.

Στο **Σχήμα 5.26** συνοψίζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για τη στροφή (προς τα κατάντη) του θεμελίου για την περίπτωση βελτίωσης μέσω περιμετρικών στραγγιστηρίων, εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης του εδάφους (από το Κεφάλαιο 4). Όπως και ανωτέρω, σε διαφορετικά υπο-σχήματα μελετάται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{\max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , ενώ διαχωρίζονται αντίστοιχα και τα αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα. Διαφορετικές καμπόλες σε όλα τα υπο-σχήματα ξεχωρίζουν τα πλάτη θεμελίου και το αν πρόκειται για μη-βελτιωμένη στρώση ή όχι. Από τις παραμετρικές αναλύσεις προκύπτει η σαφής αυξητική επίδραση του φορτίου θεμελίου  $q$ , που δείχνει πιο έντονη σε θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$ . Η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης είναι αδρά μόνο αυξητική επί της στροφής. Αυτό που είναι εμφανές είναι ότι τα θεμέλια πλάτους  $B = 5\text{m}$  εμφανίζουν σαφώς μεγαλύτερες στροφές από εκείνα με πλάτος  $B = 20\text{m}$ . Τα περιμετρικά στραγγιστήρια απομειώνουν τις στροφές ελαφρά αλλά συστηματικά μόνο σε θεμέλια με  $B = 20\text{m}$ . Αντιθέτως, για θεμέλια με  $B = 5\text{m}$  προκύπτει αύξηση των στροφών σε τετραγωνικά θεμέλια, ενώ σε αντίστοιχου πλάτους θεμελιολωρίδες, το αν υπάρχει αύξηση ή όχι της στροφής είναι συνάρτηση του φορτίου  $q$  και της επιτάχυνσης  $a_{\max}$ .

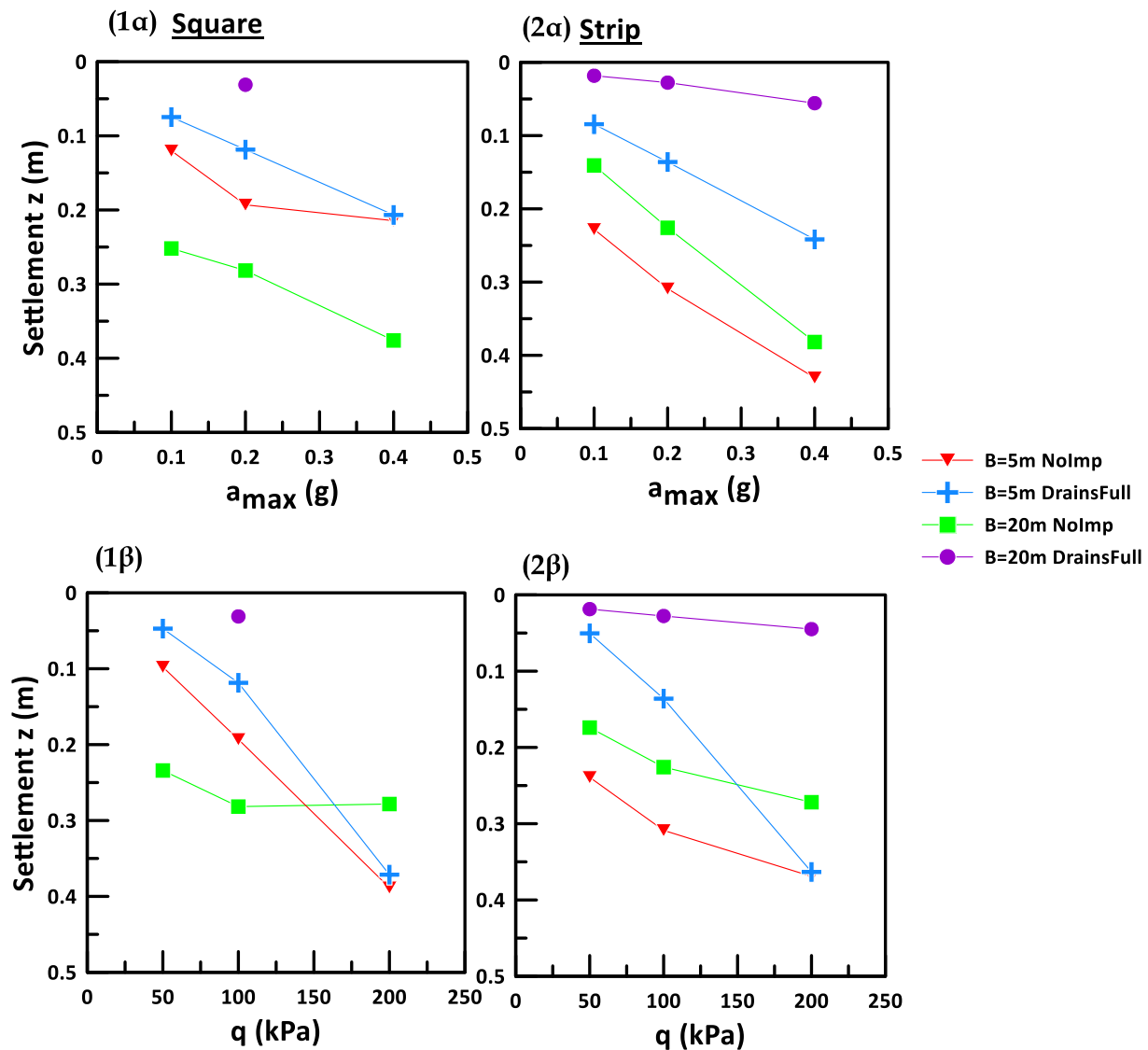


Σχήμα 5.26: Στροφή (προς τα κατόντη) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

### Κάνναβος στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο (Drains Full)

Η δεύτερη διάταξη στραγγιστηρίων που παρουσιάζεται σε σύγκριση με την περίπτωση της μη βελτιωμένης ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι η χρήση καννάβου στραγγιστηρίων σε όλη την επιφάνεια κάτω από τα θεμέλια (Drains Full).

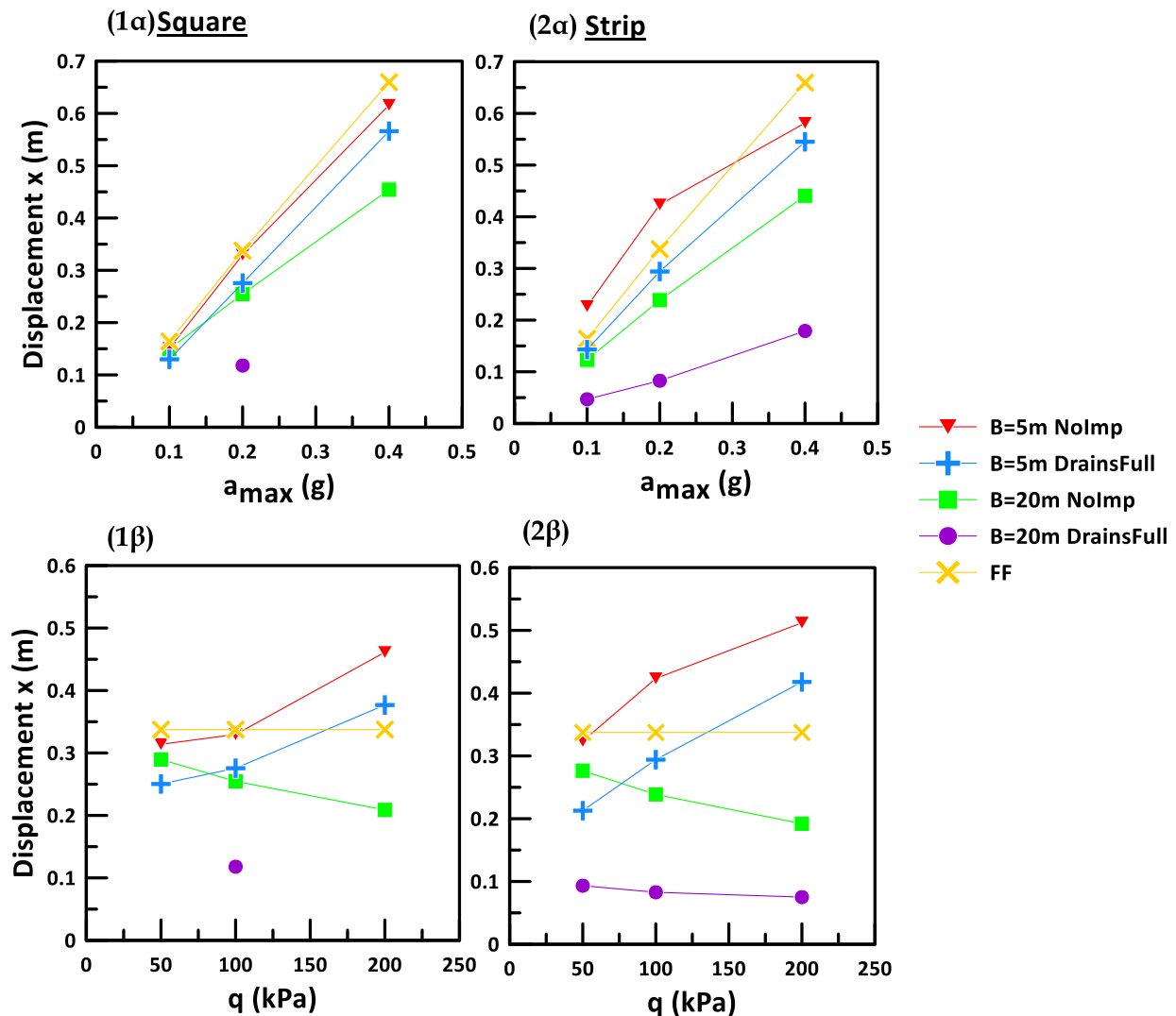
Στο **Σχήμα 5.27** παρουσιάζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$  στις καθιζήσεις του τετραγωνικού θεμελίου και της θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με και χωρίς τον κάνναβο στραγγιστηρίων, στο μορφότυπο του **Σχήματος 5.24**. Προκύπτει αυξητική επίδραση των  $a_{max}$  και  $q$  στις καθιζήσεις σε όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον προκύπτει ευεργετική μείωση των καθιζήσεων λόγω του καννάβου στραγγιστηρίων, με μόνη εξαίρεση τη στενή θεμελιολωρίδα ( $B = 5m$ ) με μεγάλο φορτίο  $q = 200kPa$ .



**Σχήμα 5.27:** Καθιζήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με κάνναβο στραγγιστηρίων κάτω από το θεμέλιο (DrainsFull), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$  (kPa)

Στο **Σχήμα 5.28** παρουσιάζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$  στην οριζόντια μετακίνηση του τετραγωνικού θεμελίου και της θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με και χωρίς τον κάνναβο στραγγιστηρίων, στο μορφότυπο του **Σχήματος 5.25**. Προκύπτει αυξητική επίδραση της  $a_{max}$  στις οριζόντιες μετακινήσεις, ενώ η επίδραση του  $q$  είναι αυξητική μόνο για  $B = 5m$ . Επιπλέον

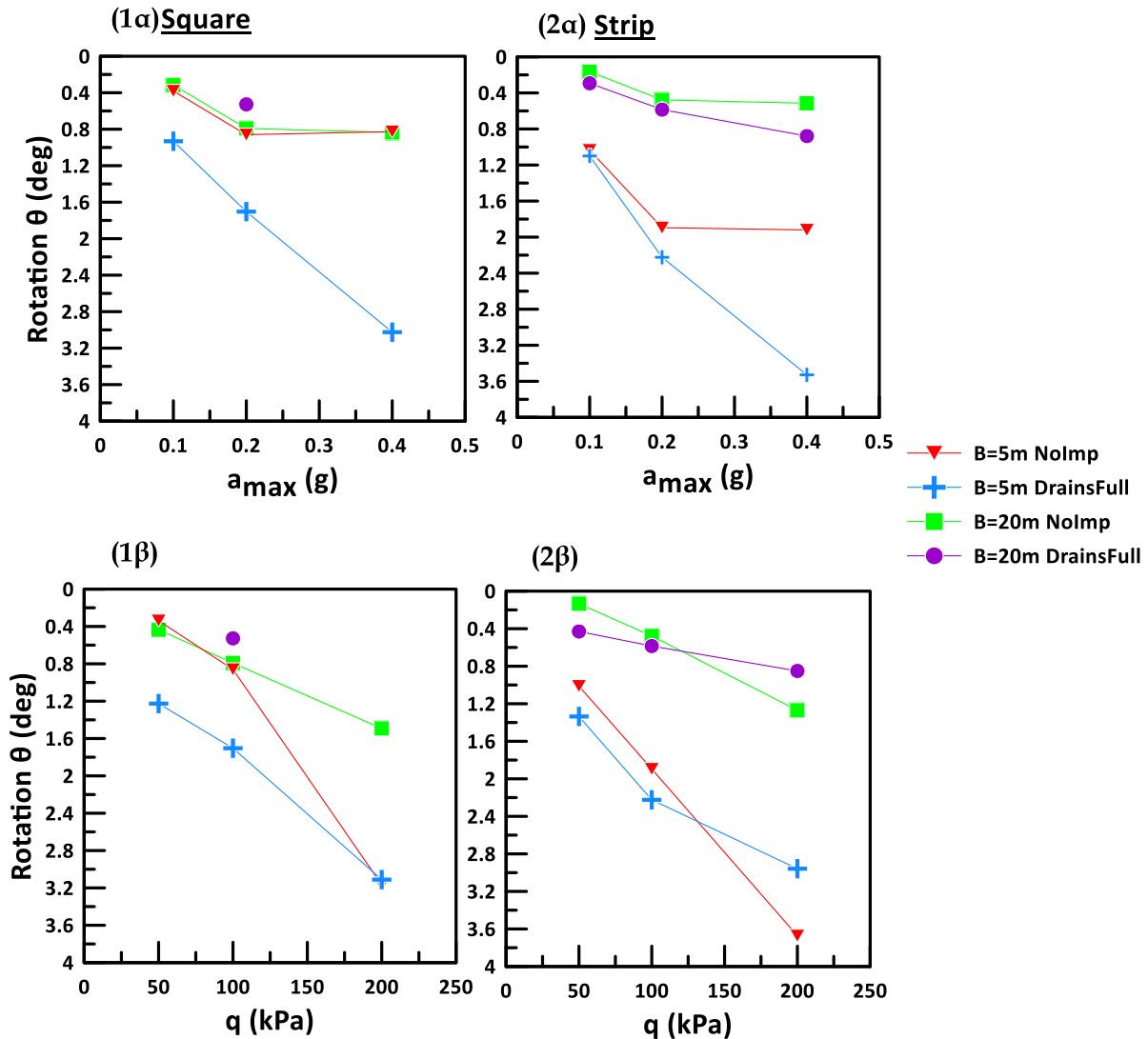
προκύπτει μείωση των οριζόντιων μετακινήσεων λόγω του καννάβου στραγγιστηρίων σε όλες τις περιπτώσεις, με τις μεγαλύτερες μειώσεις να προκύπτουν για  $B = 20m$ .



**Σχήμα 5.28:** Οριζόντιες μετακινήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με κάνναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$  (kPa)

Στο **Σχήμα 5.29** συνοψίζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$  στις στροφές (προς τα κατόντη) του τετραγωνικού θεμελίου και της θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με και χωρίς τον κάνναβο στραγγιστηρίων,

στο μορφότυπο του Σχήματος 5.26. Προκύπτει αυξητική επίδραση της  $a_{max}$  και του  $q$  στις στροφές του θεμελίου, ανεξαρτήτως πλάτους και σχήματος αυτού. Σε ό,τι αφορά στην επίδραση του καννάβου στραγγιστηρίων, αυτή δείχνει να αυξάνει τις στροφές, αλλά να διατηρεί τα θεμέλια  $B = 5m$  να έχουν μεγαλύτερες στροφές από εκείνα με  $B = 20m$ .



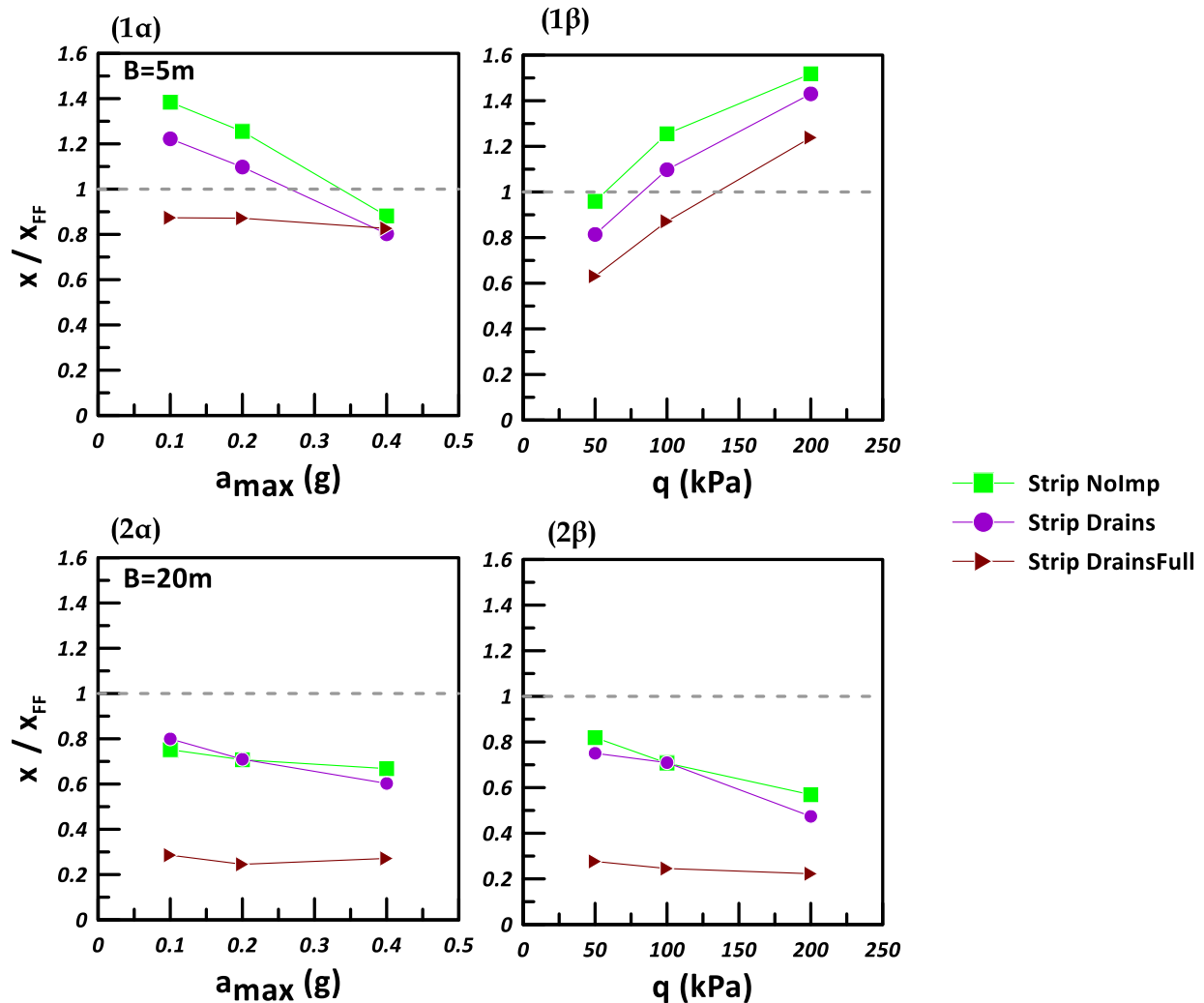
Σχήμα 5.29: Στροφή (προς τα κατόντη) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με καννάβο στραγγιστηρίων (DrainsFull), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q(kPa)$

## 5.4. Οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων με στραγγιστήρια σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο

Στην ενότητα αυτή η έμφαση δίνεται στις οριζόντιες μετακινήσεις των θεμελιολωρίδων  $x$  και τετραγωνικών θεμελίων  $x_{sq}$ , συγκρίνοντας τις με τις τιμές της οριζόντιας μετακίνησης στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ . Ο στόχος αυτής της διερεύνησης είναι να διαφανεί ποια η σχέση των δύο τιμών, καθώς η δεύτερη ( $x_{FF}$ ) μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά από σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. Youd et al. 2002, Valsamis et al. 2010). Διερευνάται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης θεμελίου  $x/x_{FF}$  και  $x_{sq}/x_{FF}$ , ενώ μελετάται και η επίδραση των δύο διατάξεων στραγγιστηρίων στην τιμή των δύο λόγων οριζοντίων μετακινήσεων.

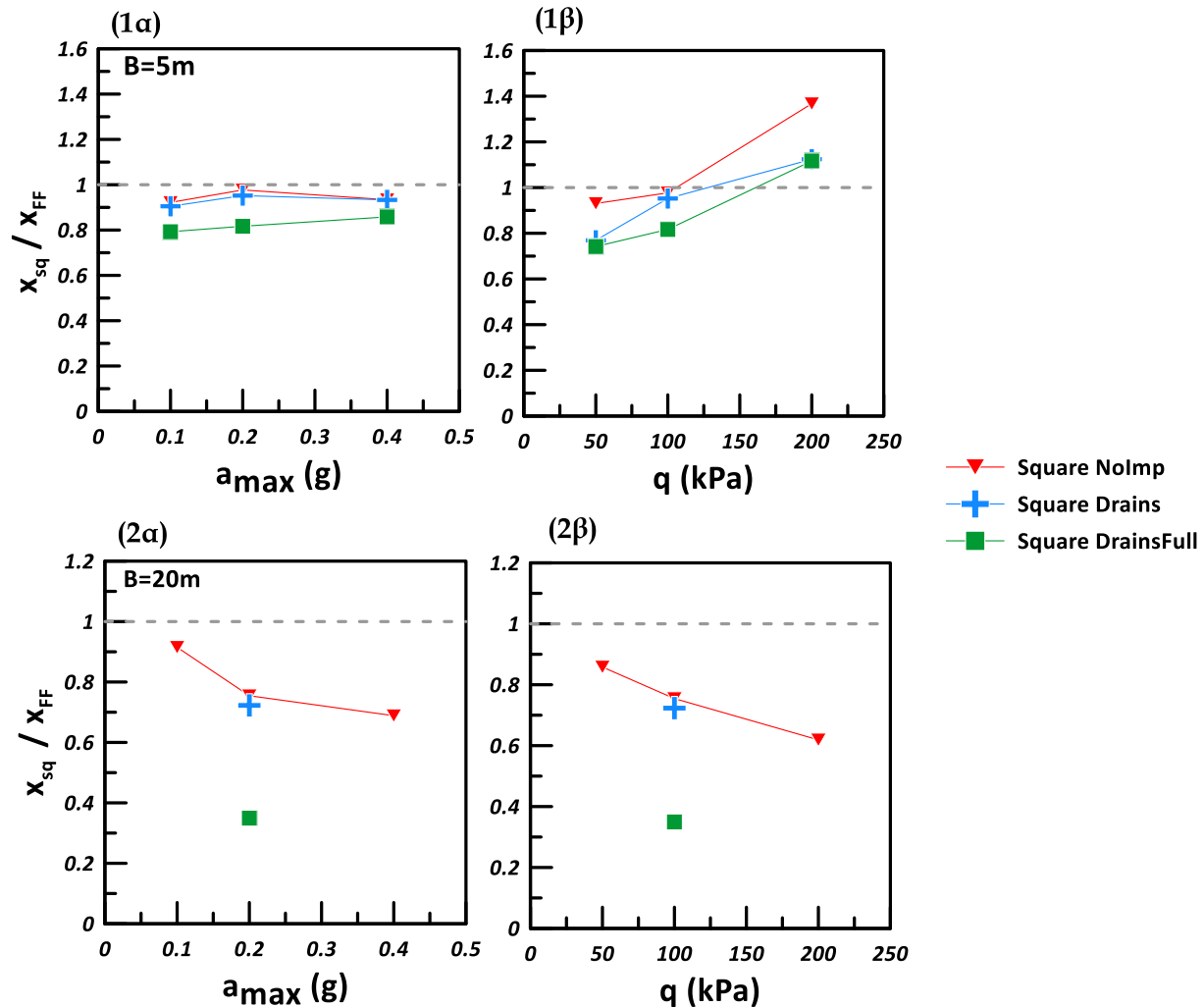
Αρχικώς, στο **Σχήμα 5.30** και στα υποσχήματα (1) και (2) παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της  $a_{max}$  και του  $q$  στις τιμές του λόγου κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης  $x/x_{FF}$  της θεμελιολωρίδας (strip) πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με τη χρήση των στραγγιστηρίων περιμετρικά (Drains) και σε κάνναβο (DrainsFull) κάτω από το θεμέλιο. Παρατηρείται ότι με τη χρήση των στραγγιστηρίων ανεξαρτήτως διάταξης διατηρείται ποιοτικά η επίδραση των  $a_{max}$  και  $q$  στις τιμές του λόγου  $x/x_{FF}$ , που προκύπτει για ρευστοποιήσιμη στρώση. Επίσης προκύπτει συστηματικά ότι ο κάνναβος στραγγιστηρίων λειτουργεί πολύ πιο ευεργητικά στην τιμή του λόγου  $x/x_{FF}$ , απ' ό τι τα περιμετρικά στραγγιστήρια, τα οποία δείχνουν να μην επηρεάζουν τις τιμές για  $B = 20m$ . Έτσι, ο κάνναβος στραγγιστηρίων οδηγεί γενικώς σε τιμές  $x/x_{FF} < 1$  εκτός από την περίπτωση θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  με φορτίο  $q = 200kPa$ . Ενδιαφέρον είναι επίσης ότι για  $B = 20m$  προκύπτουν τιμές  $x/x_{FF} < 1$  σε όλες τις περιπτώσεις, με τις ελάχιστες τιμές  $x/x_{FF} = 0.2 - 0.3$  να προκύπτουν για κάνναβο στραγγιστηρίων.





**Σχήμα 5.30:** Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις  $x$  θεμελιολωρίδας (1) πλάτους  $B=5m$ , (2) πλάτους  $B=20m$ , προς εκείνες στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ , σε μη βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με στραγγιστήρια περιμετρικά (Drains) και σε κάνναβο (DrainsFull) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

Στο **Σχήμα 5.31** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα επίδρασης των  $a_{max}$  και  $q$  στην κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση  $x_{sq}/x_{FF}$ , που αφορά σε τετραγωνικό θεμέλιο (square). Εδώ και πάλι παρατηρείται ότι με τη χρήση στραγγιστηρίων, ανεξαρτήτως διάταξης, διατηρείται ποιοτικά η επίδραση των  $a_{max}$  και  $q$  στις τιμές του λόγου  $x_{sq}/x_{FF}$ , που προκύπτει για ρευστοποιήσιμη στρώση, αν και δεν έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι αναλύσεις για  $B = 20m$  λόγω τεράστιου υπολογιστικού χρόνου.



**Σχήμα 5.31:** Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις  $x_{sq}$  τετραγωνικού θεμελίου (1) πλάτους  $B=5m$ , (2) πλάτους  $B=20m$ , προς εκείνες στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ , σε μη βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με στραγγιστήρια περιμετρικά (Drains) και σε κάνναβο (DrainsFull) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

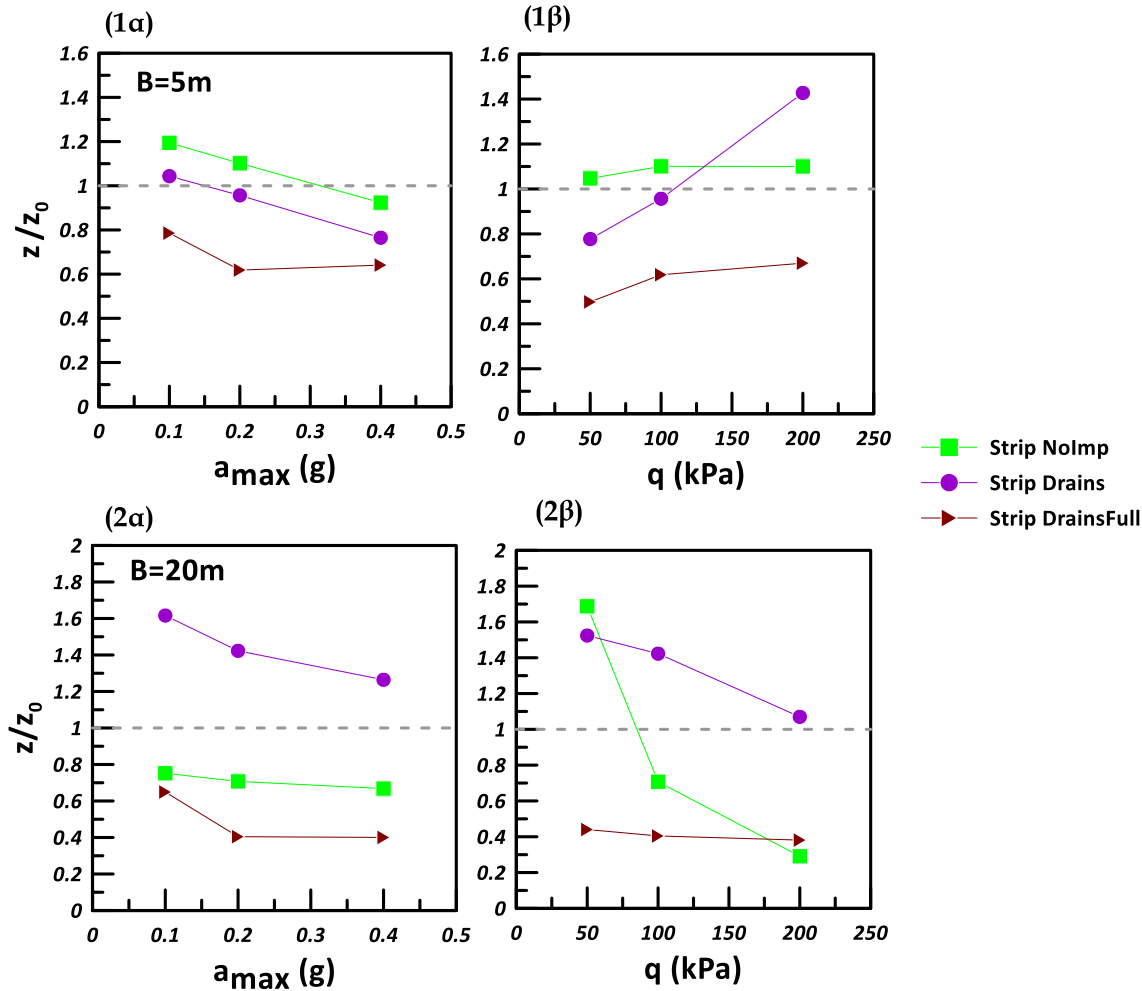
Επιπλέον, προκύπτει ξανά ότι ο κάνναβος στραγγιστηρίων λειτουργεί πιο ευεργετικά στην τιμή του λόγου  $x_{sq} / x_{FF}$ , απ' ό,τι τα περιμετρικά στραγγιστήρια, αλλά λιγότερο έντονα συγκριτικά με ό,τι παρατηρείται για το λόγο  $x / x_{FF}$  στις θεμελιολωρίδες. Αντίστοιχα επίσης τα περιμετρικά στραγγιστήρια δεν επηρεάζουν ουσιαστικά το λόγο  $x_{sq} / x_{FF}$ . Ποσοτικά όμως υπάρχουν διαφορές, καθώς όλες οι περιπτώσεις (με και χωρίς στραγγιστήρια) έχουν τιμές  $x_{sq} / x_{FF} < 1$ , εκτός από την περίπτωση τετραγωνικού θεμελίου

πλάτους  $B = 5\text{m}$  με φορτίο  $q = 200\text{ kPa}$  όπου ακόμη και ο κάρναβος στραγγιστηρίων δεν οδηγεί σε τιμή του λόγου μικρότερη από 1.0.

## 5.5. Επίδραση κλίσης εδάφους στην καθίζηση θεμελίων με πλαστικά στραγγιστήρια

Προκειμένου να διαπιστωθεί η επιρροή της ύπαρξης μικρής κλίσης στην αποτελεσματικότητα της βελτίωσης του εδάφους με στραγγιστήρια, εξετάστηκε ο λόγος των καθιζήσεων στο κέντρο του τετραγωνικού θεμελίου (Square)  $z_{sq}$  και της θεμελιολωρίδας (Strip)  $z$  μετά τη χρήση των στραγγιστηρίων σε εδαφική στρώση με κλίση  $i=2^\circ$ , ως προς τις αντίστοιχες καθιζήσεις των ίδιων θεμελίων  $z_{sq,0}$  και  $z_0$ , αντίστοιχα, όταν το έδαφος είναι οριζόντιο (κλίση  $i=0^\circ$ ) και έχει υποστεί την ίδια βελτίωση, όπως προέκυψαν από τη Γεωργάκη (2020).

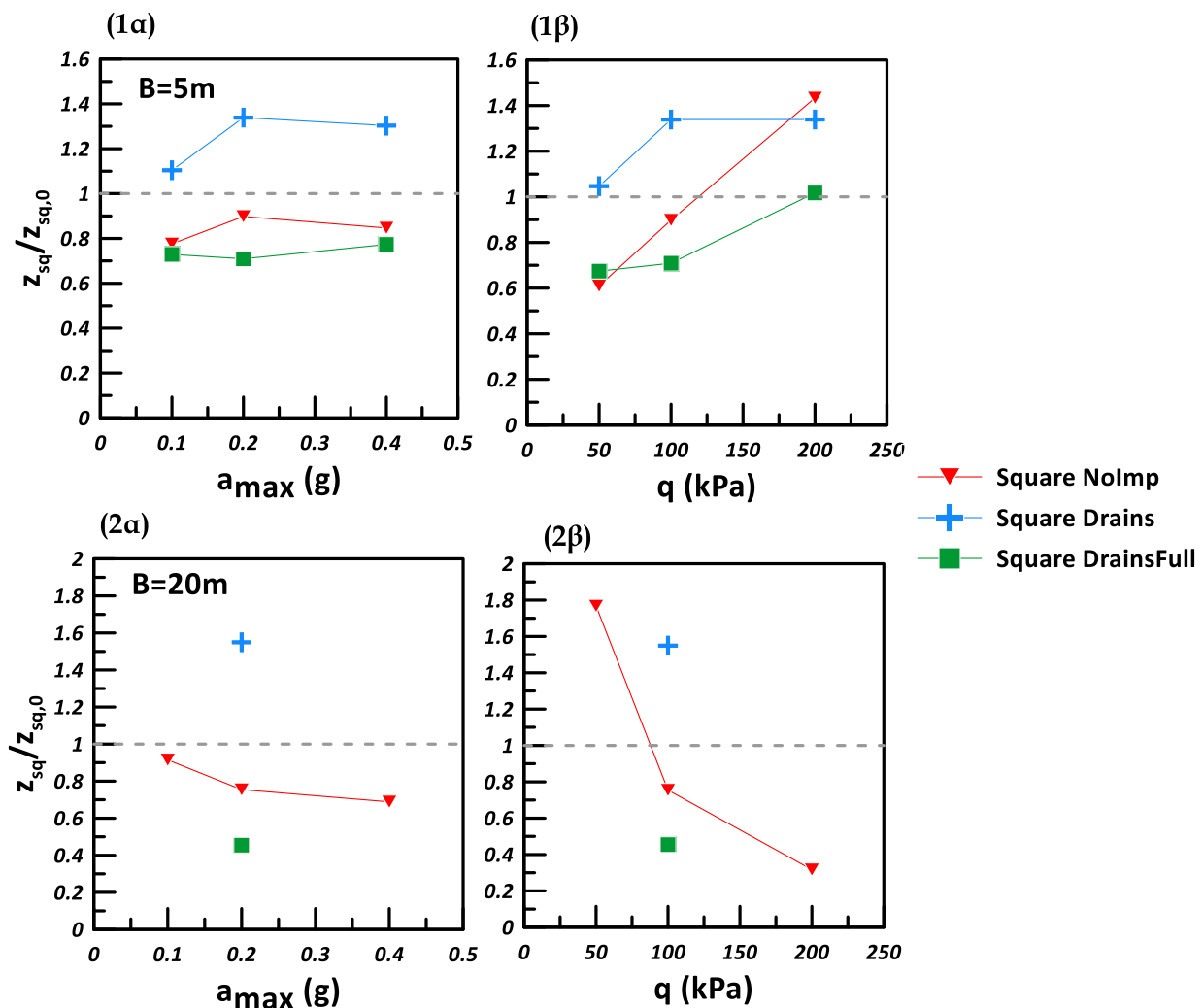
Στο **Σχήμα 5.32** και στα υπο-σχήματα (1) και (2) παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z/z_0$  της θεμελιολωρίδας (strip) για πλάτος  $B = 5\text{m}$  και  $B = 20\text{m}$ , αντίστοιχα. Προκύπτει ότι η επίδραση της επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου  $q$  στην κανονικοποιημένη καθίζηση  $z/z_0$  είναι μειωτική και αυξητική, αντίστοιχα, και αυτό ισχύει και για τα δύο πλάτη θεμελιολωρίδας και ανεξαρτήτως αν γίνεται χρήση στραγγιστηρίων ή όχι. Από εκεί και πέρα, στον κάρναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull), η τιμή της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z/z_0 = 0.4 - 0.8 < 1.0$ , δηλαδή αυτή η μέθοδος βελτίωσης δείχνει πιο αποτελεσματική στη μείωση των καθιζήσεων θεμελιολωρίδων όταν υπάρχει κλίση εδάφους  $i > 0$ . Αντιθέτως, τα περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) οδηγούν σε εύρος  $z/z_0 = 0.7 - 1.6$ , ένα εύρος λίγο μικρότερο από το εύρος  $z/z_0 = 0.3 - 1.7$  που αντιστοιχεί σε θεμελιολωρίδα επί ρευστοποιήσιμης στρώσης. Συνεπώς, η επίδραση της κλίσης του εδάφους στις καθιζήσεις θεμελιολωρίδων με περιμετρικά στραγγιστήρια εξαρτάται από το πλάτος της, αλλά και τις τιμές των  $a_{max}$  και  $q$ .



**Σχήμα 5.32:** Κανονικοποιημένες καθιζήσεις θεμελιολωρίδας  $z$  (1) πλάτους  $B=5m$ , (2) πλάτους  $20m$ , σε στρώση κλίσης  $i=2^\circ$ , προς εκείνες σε οριζόντιο έδαφος  $z_0$ , σε μη-βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με στραγγιστήρια περιμετρικά (Drains) και σε κάνναβο (DrainsFull) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , (β) το φορτίο του θεμελίου  $q$  (kPa)

Στο **Σχήμα 5.33** και στα υπο-σχήματα (1) και (2) παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης καθιζήσης  $z_{sq}/z_{sq,0}$  του τετραγωνικού θεμελίου (square) για πλάτος  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , αντίστοιχα. Για το τετραγωνικό θεμέλιο η επίδραση των στραγγιστηρίων είναι συστηματική, δηλαδή οι τιμές της  $z_{sq}/z_{sq,0}$  αυξάνουν για περιμετρικά στραγγιστήρια και μειώνονται για κάνναβο στραγγιστηρίων, συγκριτικά με την απόκριση των ίδιων θεμελίων επί ρευστοποιήσιμης στρώσης. Μάλιστα, το εύρος της

κανονικοποιημένης καθίζησης  $z_{sq}/z_{sq,0} = 0.45 - 1.0$  για κάνναβο στραγγιστηρίων, που δείχνει ότι αυτή η μέθοδος βελτίωσης είναι πιο αποτελεσματική στη μείωση των καθιζήσεων όταν υπάρχει κλίση του εδάφους, ποιοτικά όμοια με ό,τι παρατηρήθηκε για τις θεμελιολωρίδες. Αντιθέτως, το εύρος της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z_{sq}/z_{sq,0} = 1.1 - 1.6$  για περιμετρικά στραγγιστήρια, που δείχνει ότι αυτή η μέθοδος βελτίωσης είναι λιγότερο αποτελεσματική στη μείωση των καθιζήσεων όταν υπάρχει κλίση του εδάφους.

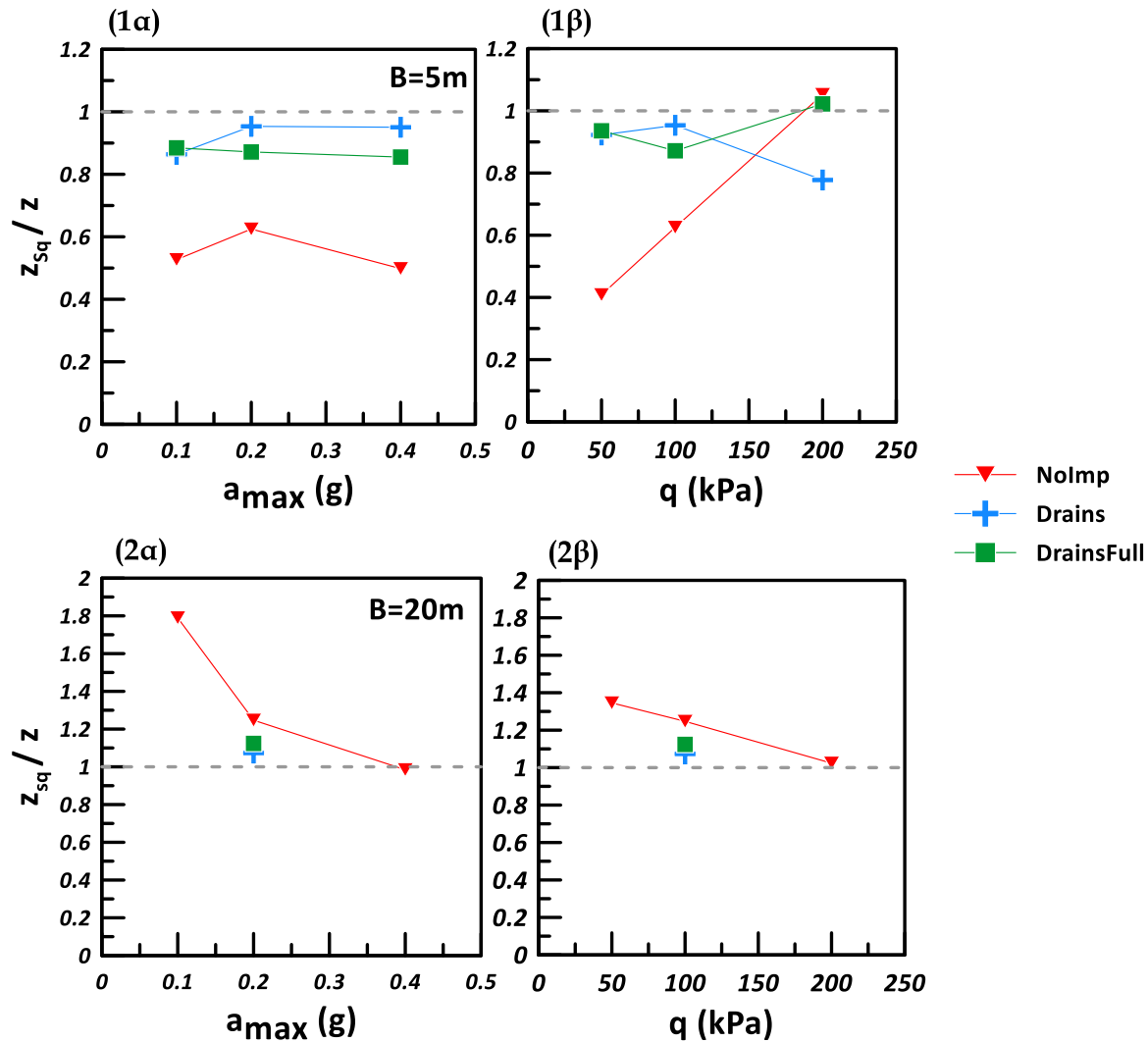


**Σχήμα 5.33:** Κανονικοποιημένες καθιζήσεις τετραγωνικού θεμελίου  $z_{sq}$  (1) πλάτους  $B=5m$ , (2) πλάτους  $20m$ , σε στρώση κλίσης  $i=2^\circ$ , προς εκείνες σε οριζόντιο έδαφος  $z_{sq,0}$ , σε μη-βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με στραγγιστήρια περιμετρικά (Drains) και σε κάνναβο (DrainsFull) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , (β) το φορτίο του θεμελίου  $q(kPa)$

## 5.6. Επίδραση σχήματος θεμελίου στη σεισμική απόκριση τους με πλαστικά στραγγιστήρια

Τέλος, για να γίνει κατανοητή η επίδραση του σχήματος της θεμελίωσης (θεμελιολωρίδα έναντι τετραγωνικού) στη σεισμική απόκριση μετά την εφαρμογή πλαστικών στραγγιστηρίων, η έμφαση δόθηκε στον λόγο των (κατακόρυφων και οριζόντιων) μετατοπίσεων και στροφών του τετραγωνικού θεμελίου ως προς την αντίστοιχη τιμή της θεμελιολωρίδας ίδιου πλάτους, για την ίδια τιμή μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$  και φορτίου θεμελίου  $q$ . Οι τιμές των μεγεθών για τετραγωνικό θεμέλιο έχουν δείκτη  $s_q$ , που υποδηλώνει το τετραγωνικό σχήμα (square). Χάριν σύγκρισης, θα γίνεται πάντα αναφορά στην τιμή των μεγεθών και στην περίπτωση μη-βελτίωσης (NoImp από το Κεφάλαιο 4).

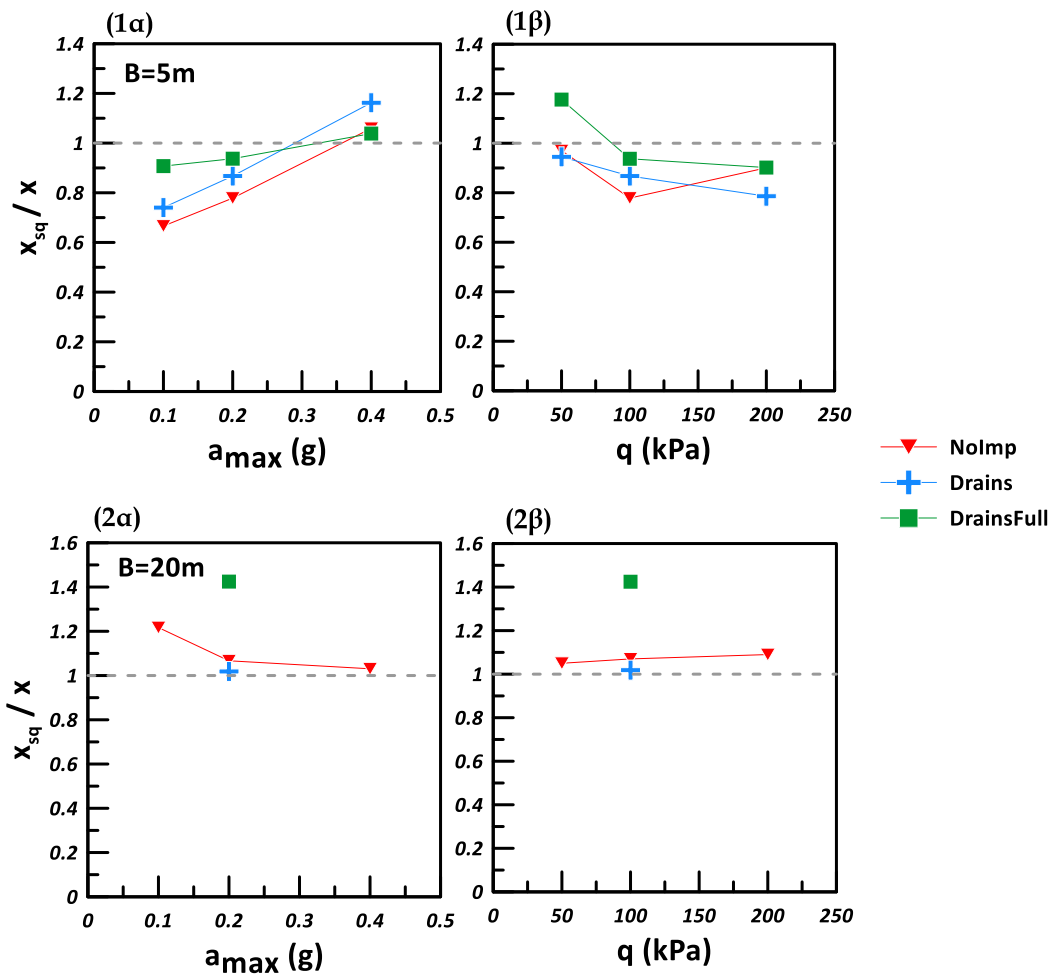
Αρχικώς, στο **Σχήμα 5.34** παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου καθίζησης  $z_{sq}/z$  για πλάτος θεμελίου  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με τα υποσχήματα να παρουσιάζουν ξεχωριστά (α) την επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και (β) το φορτίο θεμελίου  $q$ . Από τον λόγο των καθιζήσεων  $z_{sq}/z$  προκύπτει ότι το πλάτος του θεμελίου παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς παίρνει τιμές μεγαλύτερες και μικρότερες του 1.0 για πλάτη θεμελίου  $B = 20m$  και  $B = 5m$ , αντίστοιχα. Αρχικώς, για  $B = 5m$  η επίδραση των στραγγιστηρίων στις παραμέτρους της μέγιστης επιτάχυνση  $a_{max}$  και στο φορτίο θεμελίου  $q$  είναι αυξητική στον λόγο  $z_{sq}/z$  συγκριτικά με την απόκριση των ίδιων θεμελίων επί ρευστοποιήσιμης στρώσης (NoImp), εκτός από την περίπτωση φορτίου  $q = 200$  kPa όπου τα περιμετρικά στραγγιστήρια οδήγησαν σε τιμή του λόγου μικρότερη από 1.0. Συγκεκριμένα, η χρήση περιμετρικών στραγγιστηρίων (Drains) αντιστοιχεί σε τιμές  $z_{sq}/z = 0.8 - 0.95$  και ο κάνναβος στραγγιστηρίων (DrainsFull) σε τιμές  $z_{sq}/z = 0.85 - 1$ , αντίστοιχα. Αντιθέτως, για πλάτος θεμελίου 20m ο λόγος καθίζησης  $z_{sq}/z$  με τη χρήση στραγγιστηρίων είναι μικρότερος συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος και μάλιστα χωρίς να επηρεάζεται ουσιαστικά ο λόγος της καθίζησης με το είδος των στραγγιστηρίων, καθώς προκύπτει  $z_{sq}/z = 1.1$  και για τις δύο διατάξεις.



**Σχήμα 5.34:** Λόγος καθιζήσεων τετραγωνικού θεμελίου  $z_{sq}$  ως προς την θεμελιοωρίδα  $z$  **(1)** πλάτους  $B = 5\text{m}$ , **(2)** πλάτους  $B = 20\text{m}$ , σε ρευστοποιήσιμη στρώση με κλίση  $i=2^\circ$  και μετά τη βελτίωση της με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) και κάνναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull) ως συνάρτηση: **(α)** της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , **(β)** του φορτίου του θεμελίου  $q$  (kPa)

Στο **Σχήμα 5.35** και στα υποσχήματα (α) και (β) παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης  $x_{sq}/x$  του τετραγωνικού θεμελίου ως προς τη θεμελιοωρίδα πλάτους  $B = 5\text{m}$  και  $B = 20\text{m}$ , αντίστοιχα. Για το θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$ , προκύπτει ότι η επίδραση της επιτάχυνσης  $a_{max}$  είναι αυξητική στην κανονικοποιημένη τιμή  $x_{sq}/x$ , ενώ στο φορτίο του θεμελίου  $q$ , η επίδραση είναι μειωτική. Συγκεκριμένα,

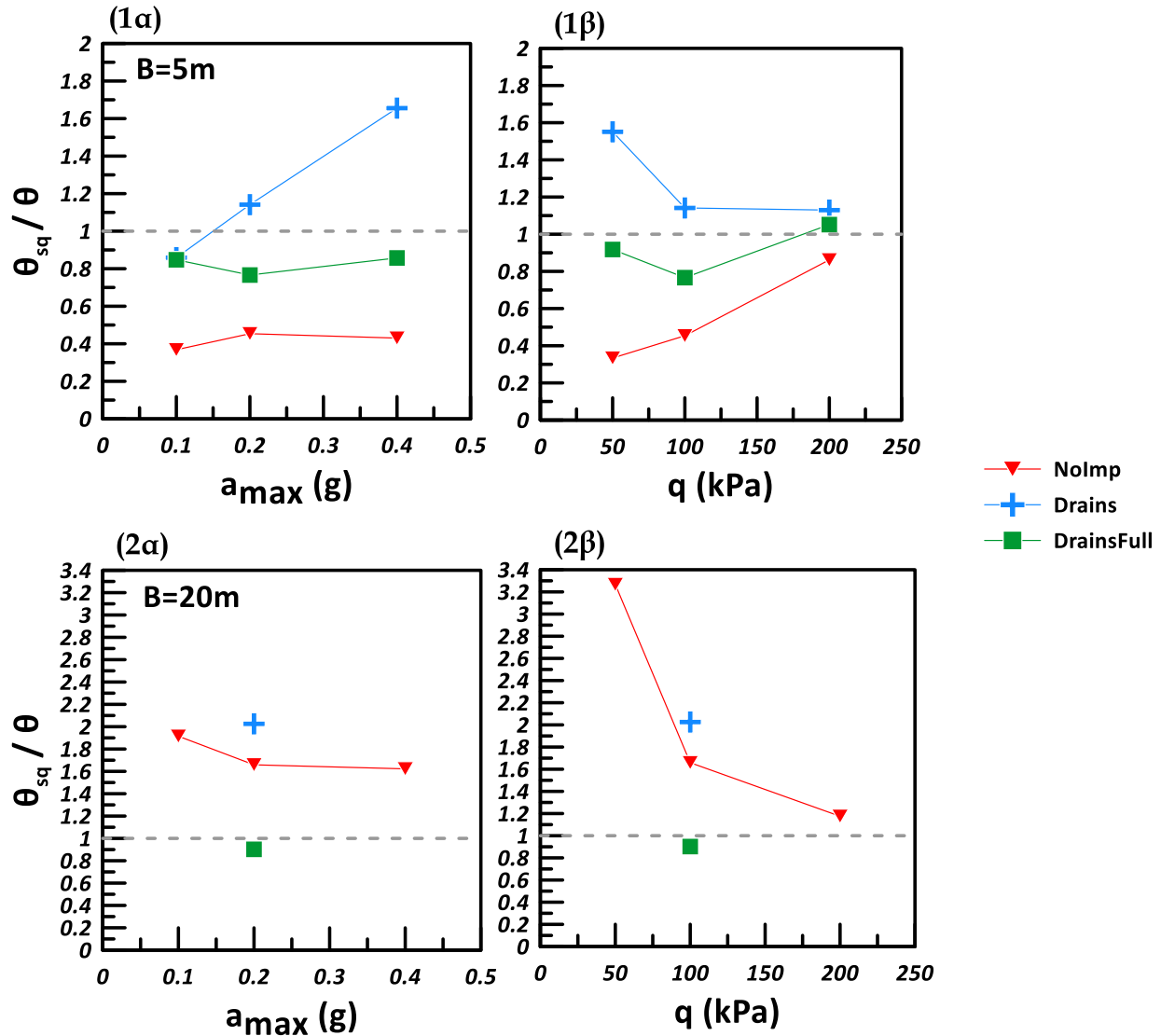
στον κάρναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull), η τιμή της κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης είναι  $x_{sq}/x = 0.9 - 1.2$ , ενώ τα περιμετρικά στραγγιστήρια δίνουν τιμή στον λόγο  $x_{sq}/x = 0.7 - 1.2$ . Αντίθετα για πλάτος θεμελίου  $B = 20m$ , η εφαρμογή κάρναβου στραγγιστηρίων έδωσε τιμή στον κανονικοποιημένη λόγο  $x_{sq}/x = 1.4$ , δηλαδή η χρήση κάρναβου στραγγιστηρίων μείωσε σημαντικά τις οριζόντιες μετακινήσεις συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος και πιο συγκεκριμένα τη θεμελιολωρίδα. Για την περίπτωση των περιμετρικών στραγγιστηρίων, δεν φαίνεται να επηρέασε σημαντική τον λόγο  $x_{sq}/x$ .



**Σχήμα 5.35:** Λόγος οριζόντιων μετακινήσεων τετραγωνικού θεμελίου  $x_{sq}$  ως προς την θεμελιολωρίδα  $x$  (1) πλάτους  $B = 5m$ , (2) πλάτους  $B = 20m$ , σε ρευστοποιήσιμη στρώση με κλίση  $i=2^\circ$  και μετά τη βελτίωση της με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) και κάρναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου του θεμελίου  $q(kPa)$



Τέλος, στο **Σχήμα 5.36** και στα υπο-σχήματα (1) και (2) παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης στροφής (προς τα κατόντη)  $\theta_{sq}/\theta$  τετραγωνικού θεμελίου ως προς τη θεμελιολωρίδα, για πλάτος  $B = 5m$  και  $B = 20m$ . Για το θεμέλιο πλάτους  $B = 5m$ , προκύπτει ,και για τις δύο παραμέτρους, αύξηση στον κανονικοποιημένο λόγο  $\theta_{sq}/\theta$  με τη χρήση στραγγιστηρίων και συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος (NoImp). Μάλιστα, το εύρος της κανονικοποιημένης στροφής  $\theta_{sq}/\theta = 0.8 - 1.1$  για κάρναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull) δείχνει ότι αυτή η μέθοδος βελτίωσης είναι πιο αποτελεσματική στη μείωση των στροφών του τετραγωνικού θεμελίου όταν υπάρχει κλίση του εδάφους, ενώ το εύρος  $\theta_{sq}/\theta = 0.8 - 1.7$  για περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) υποδηλώνει ότι η μέθοδος βελτίωσης είναι πιο αποτελεσματική μείωση των στροφών της θεμελιολωρίδας, αντίστοιχα. Όσον αφορά το θεμέλιο πλάτους  $B = 20m$ , αν και δεν έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι αναλύσεις λόγω του τεράστιου υπολογιστικού χρόνου, για την βασική ανάλυση προκύπτει ότι η χρήση κάρναβου στραγγιστηρίων δεν διαφοροποιεί σημαντικά τη βελτίωση μεταξύ τετραγωνικού θεμελίου και θεμελιολωρίδας καθώς ο κανονικοποιημένος λόγος είναι  $\theta_{sq}/\theta = 0.9$ , τιμή κοντά στη μονάδα. Αντιθέτως, η κανονικοποιημένη στροφή  $\theta_{sq}/\theta = 2$  για περιμετρικά στραγγιστήρια δείχνει την εντονότερη βελτίωση της θεμελιολωρίδας έναντι τετραγωνικού θεμελίου σε έδαφος με ήπια κλίση.



Σχήμα 5.36: Λόγος στροφών (προς τα κατόντη) τετραγωνικού θεμελίου  $\theta_{sq}$  ως προς την θεμελιολωρίδα  $\theta$  (1) πλάτους  $B = 5m$ , (2) πλάτους  $B = 20m$ , σε ρευστοποιήσιμη στρώση με κλίση  $i=2^\circ$  και μετά τη βελτίωση της με περιμετρικά στραγγιστήρια (Drains) και κάνναβο στραγγιστηρίων (DrainsFull) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου του θεμελίου  $q(kPa)$

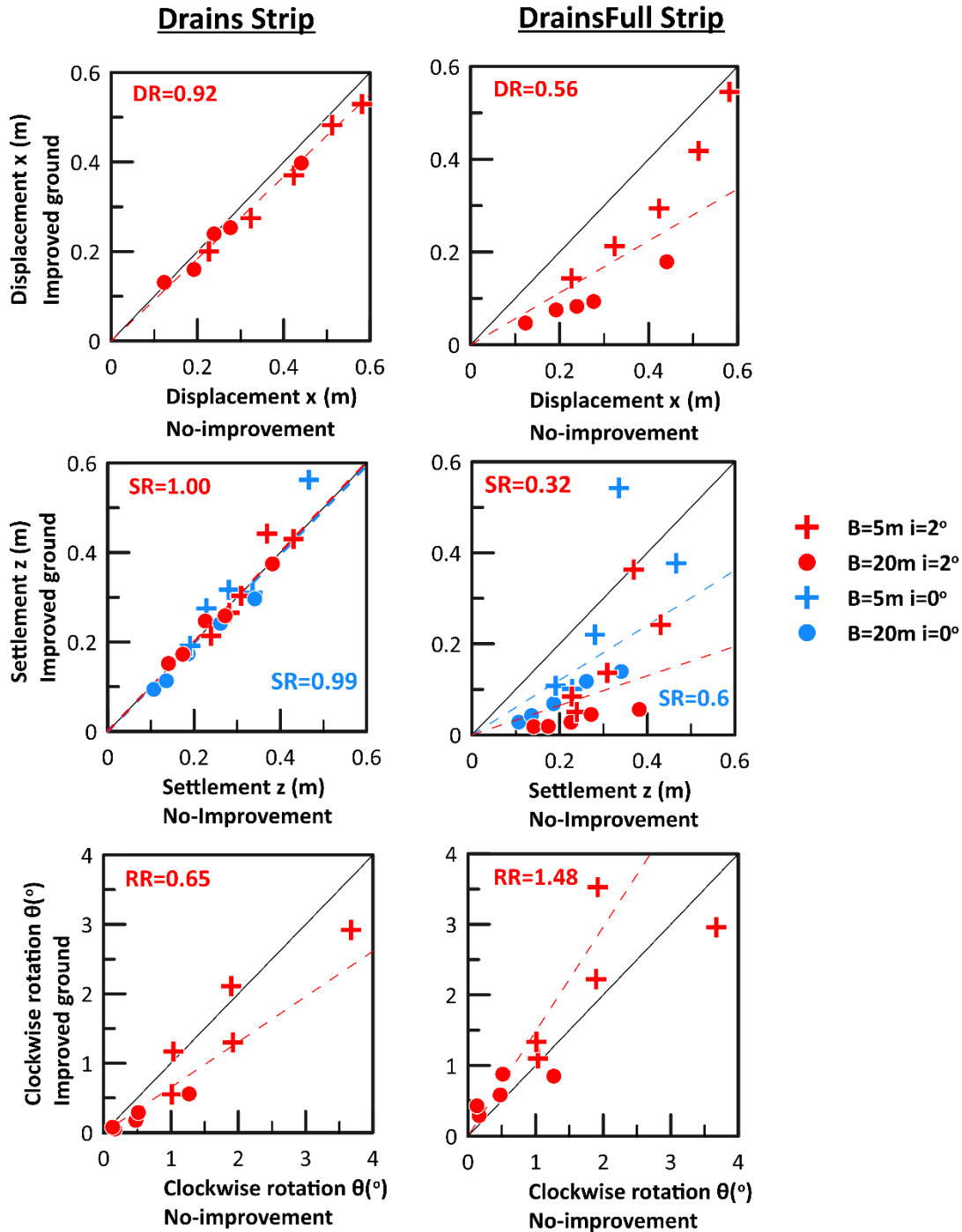
## 5.7. Αποδοτικότητα πλαστικών στραγγιστηρίων στη βελτίωση απόκρισης θεμελίου υπό οριζόντια εξάπλωση

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα της κάθε διάταξης στραγγιστηρίων στη βελτίωση της απόκρισης θεμελίου υπό οριζόντια εξάπλωση (λόγω ήπιας κλίσης  $i=2^\circ$ ), στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης της οριζόντιας μετατόπισης, της καθίζησης και της στροφής του κάθε θεμελίου πριν και μετά την κάθε διάταξη βελτίωσης. Ξεχωριστά υπο-σχήματα αφιερώνονται σε κάθε στοιχείο απόκρισης του θεμελίου, ενώ σε κάθε υπο-σχήμα διαφορετικά σύμβολα διαχωρίζουν τα θεμέλια διαφορετικού πλάτους. Ειδικά για τις καθιζήσεις, συμπεριλαμβάνονται αποτελέσματα και για την απόκριση των ιδίων θεμελίων όταν η ρευστοποιήσιμη στρώση είναι οριζόντια (για  $i=0^\circ$ ) από τη Γεωργάκη (2020). Σε κάθε υπο-σχήμα αποτιμάται ένα στοιχείο απόκρισης (οριζόντια μετατόπιση, καθίζηση, στροφή) για μια συγκεκριμένη διάταξη στραγγιστηρίων (περιμετρικά, κάρναβος) και ένα συγκεκριμένο σχήμα θεμελίου (τετραγωνικό, λωρίδα), και υπάρχει μια διαγώνιος γραμμή που αποτυπώνει ταύτιση της απόκρισης πριν και μετά τη βελτίωση. Τοποθετώντας στον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα κάθε υπο-σχήματος την απόκριση πριν και μετά τη βελτίωση, αντίστοιχα, κάθε σημείο κάτω από την διαγώνιο αντιστοιχεί σε ευμενή απομείωση της απόκρισης, ενώ οποιοδήποτε σημείο πάνω από τη διαγώνιο αντιστοιχεί σε μη-επιθυμητή αύξηση της απόκρισης. Επιπλέον, για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης της βελτίωσης για κάθε στοιχείο απόκρισης υπολογίζεται ένα αδιάστατο μέγεθος που ορίζεται ως ο λόγος της απόκρισης του θεμελίου μετά τη βελτίωση προς εκείνη του ίδιου θεμελίου σε μη-βελτιωμένο έδαφος. Συνεπώς, για την οριζόντια μετακίνηση ορίζεται ο λόγος **DR** (Displacement Ratio), για την καθίζηση ο λόγος **SR** (Settlement Ratio) και για την στροφή (προς τα κατάντη) του θεμελίου ο λόγος **RR** (Rotation Ratio).

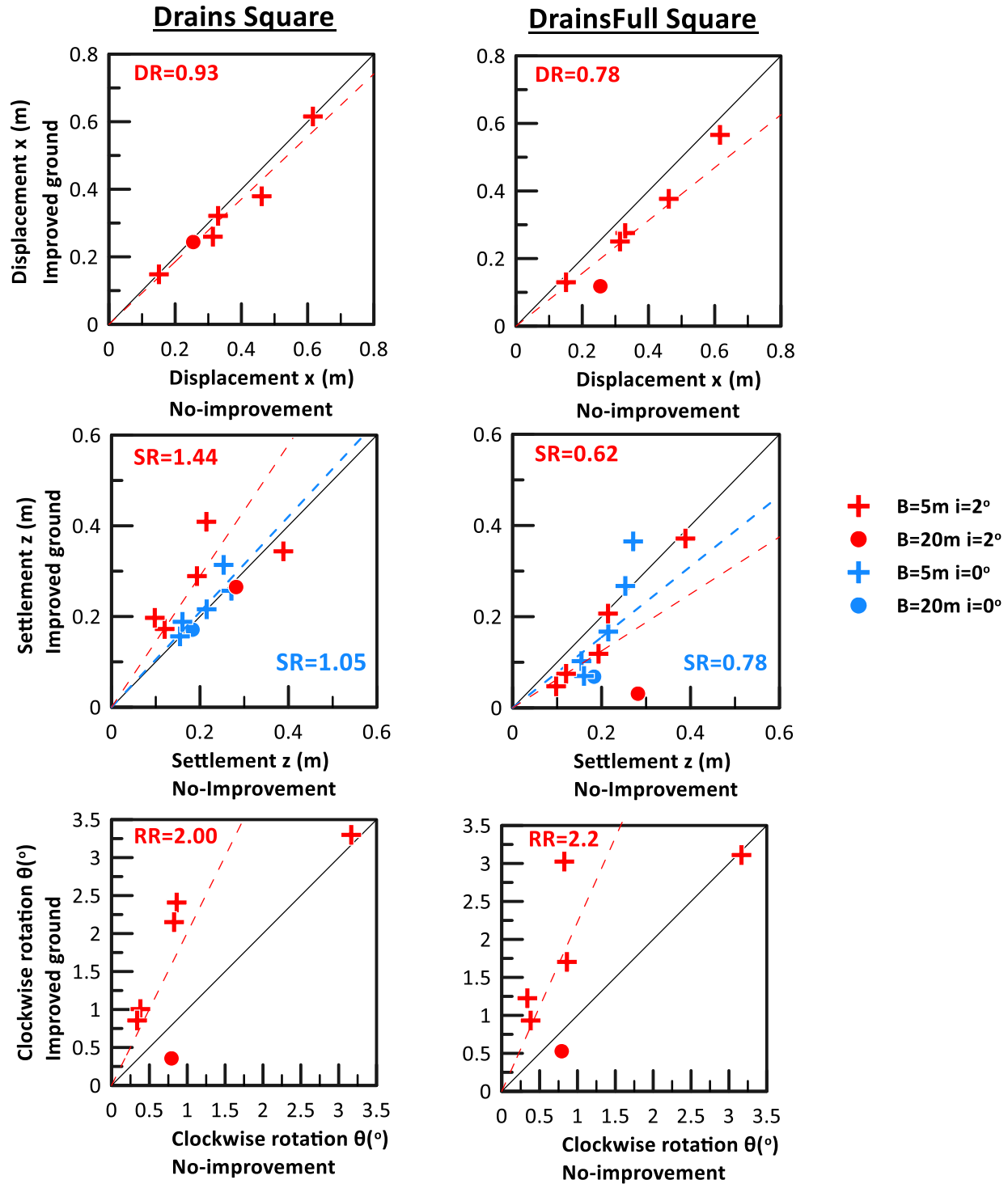
Στο **Σχήμα 5.37** παρουσιάζεται η απόδοση των δύο διατάξεων στραγγιστηρίων που εξετάστηκαν για την περίπτωση θεμελιολωρίδας. Συγκεκριμένα, τα 3 αριστερά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για τα περιμετρικά στραγγιστήρια, ενώ τα 3 δεξιά υπο-σχήματα εκείνη για κάρναβο στραγγιστηρίων. Μέσα σε κάθε υπο-σχήμα

παρουσιάζεται και η μέση τιμή των DR, SR και RR με διακεκομμένη γραμμή, η οποία μάλιστα αναφέρεται και ποσοτικά. Από το σχήμα αυτό, προκύπτει ότι η μέση αποδοτικότητα του καννάβου στραγγιστηρίων είναι μεγαλύτερη των περιμετρικών στραγγιστηρίων στην απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων ( $DR = 0.56$  έναντι  $0.92$ ) και των καθιζήσεων ( $SR = 0.32$  έναντι  $1.00$ ) των θεμελιολωρίδων. Όμως, προκύπτει αύξηση των (προς τα κατάντη) στροφών των θεμελιολωρίδων ( $RR = 1.48$  έναντι  $0.65$ ). Επιπλέον προκύπτει ότι ο κάνναβος στραγγιστηρίων είναι πιο αποδοτικός στη μείωση καθιζήσεων θεμελιολωρίδων όταν υπάρχει ήπια κλίση, απ' ότι όταν το έδαφος είναι οριζόντιο ( $SR = 0.32$  έναντι  $0.60$ ), ενώ δεν υπάρχει διαφοροποίηση στα περιμετρικά στραγγιστήρια: αδυνατούν να μειώσουν τις καθιζήσεις του ρευστοποιήσιμου εδάφους, είτε αυτό έχει ήπια κλίση είτε είναι οριζόντιο.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.38** παρουσιάζεται η απόδοση των δύο διατάξεων στραγγιστηρίων που εξετάστηκαν για την περίπτωση τετραγωνικών θεμελίων. Όπως και πριν, τα 3 αριστερά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για τα περιμετρικά στραγγιστήρια, ενώ τα 3 δεξιά υπο-σχήματα εκείνη για τον κάνναβο στραγγιστηρίων. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η μέση αποδοτικότητα του καννάβου στραγγιστηρίων είναι μεγαλύτερη των περιμετρικών στραγγιστηρίων στην απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων ( $DR = 0.78$  έναντι  $0.93$ ) των τετραγωνικών θεμελίων. Επιπλέον, ο κάνναβος στραγγιστηρίων αντιστρέφει τη μη-ευεργετική δράση των περιμετρικών στραγγιστηρίων στις καθιζήσεις ( $SR = 0.62$  έναντι  $1.44$ ) των τετραγωνικών θεμελίων. Όμως και πάλι προκύπτει αύξηση των (προς τα κατάντη) στροφών των τετραγωνικών θεμελίων, ακόμη μεγαλύτερη από εκείνη που δημιουργούν τα περιμετρικά θεμέλια ( $RR = 2.2$  έναντι  $2.0$ ). Επιπλέον προκύπτει ότι ο κάνναβος στραγγιστηρίων είναι πιο αποδοτικός στη μείωση καθιζήσεων τετραγωνικών θεμελίων όταν υπάρχει ήπια κλίση, απ' ότι όταν το έδαφος είναι οριζόντιο ( $SR = 0.62$  έναντι  $0.78$ ), ενώ αντιθέτως τα περιμετρικά στραγγιστήρια αυξάνουν παραπάνω τις καθιζήσεις τετραγωνικών θεμελίων όταν υπάρχει ήπια κλίση ( $SR = 1.44$  έναντι  $1.05$ ).



Σχήμα 5.37: Απόδοση διατάξεων πλαστικών στραγγιστηρίων, περιμετρικών (Drains, αριστερά) και καννάβου στραγγιστηρίων (DrainsFull, δεξιά) στη μείωση οριζόντιων μετακινήσεων (πάνω), καθιζήσεων (μέση) και (προς τα κατόντη) στροφών (κάτω) θεμελιολωρίδων πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  υπό αρμονικές διεγέρσεις με  $a_{max}=0.10-0.40g$  και φορτία θεμελίων  $q=50-200kPa$



Σχήμα 5.38: Αλόδοση διατάξεων πλαστικών στραγγιστηρίων, περιμετρικών (Drains, αριστερά) και καννάβου στραγγιστηρίων (DrainsFull, δεξιά) στη μείωση οριζόντιων μετακινήσεων (πάνω), καθιζήσεων (μέση) και (προς τα κατάντη) στροφών (κάτω) τετραγωνικών θεμελίων πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  υπό αρμονικές διεγέρσεις με  $a_{max}=0.10-0.40g$  και φορτία θεμελίων  $q=50-200kPa$

Συγκρίνοντας την απόδοση κάθε διάταξης πλαστικών στραγγιστηρίων για θεμελιολωρίδες και τετραγωνικά θεμέλια στα **Σχήματα 5.37** και **5.38** προκύπτει ότι τα περιμετρικά στραγγιστήρια απομειώνουν ελάχιστα τις οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων ( $DR = 0.92 - 0.93$ ), ενώ δεν αποδίδουν και μπορεί να αυξήσουν τις καθιζήσεις τους ( $SR = 1.00$  για λωρίδες έως  $1.44$  για τετραγωνικά). Στις στροφές η απόδοση εξαρτάται από το σχήμα του θεμελίου, καθώς τις αυξάνει στα τετραγωνικά ( $RR = 2.0$ ) ενώ καταφέρνει να τις μειώσει μόνο στις λωρίδες ( $RR = 0.65$ ). Υπογραμμίζεται ότι τα περιμετρικά στραγγιστήρια λειτουργούν χειρότερα σε ό,τι αφορά στις καθιζήσεις όταν υπάρχει ήπια κλίση, καθώς σε οριζόντιο έδαφος προκύπτει ελαφρά μόνο επαύξησή τους ( $SR = 0.99 - 1.05$ , έναντι  $SR = 1.00 - 1.44$ )

Αντίστοιχα, ο κάνναβος στραγγιστηρίων απομειώνει σαφώς τις οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων ( $DR = 0.56$  για λωρίδες έως  $0.78$  για τετραγωνικά), και ακόμη περισσότερο τις καθιζήσεις ( $SR = 0.32$  για λωρίδες έως  $0.62$  για τετραγωνικά). Αυτές οι καλές αποδόσεις έρχονται με τίμημα την αύξηση των στροφών προς τα κατόντη ( $RR = 1.48$  για λωρίδες έως  $2.2$  για τετραγωνικά). Επιπλέον, ο κάνναβος στραγγιστηρίων λειτουργεί καλύτερα σε ό,τι αφορά στις καθιζήσεις όταν υπάρχει ήπια κλίση, καθώς σε οριζόντιο έδαφος προκύπτει μικρότερη απομείωση ( $SR = 0.60 - 0.78$ , έναντι  $SR = 0.32 - 0.62$ ).

Συμπερασματικά, τα περιμετρικά στραγγιστήρια είναι εύκολα στην κατασκευή αλλά δεν προσφέρουν ουσιώδη βελτίωση της απόκρισης θεμελίων υπό συνθήκες οριζόντιας εξάπλωσης. Από την άλλη, ο κάνναβος στραγγιστηρίων είναι σαφώς πιο αποδοτικός στη μείωση οριζόντιων μετακινήσεων και καθιζήσεων θεμελίων, αλλά με τίμημα την αύξηση των προς τα κατόντη στροφών. Όμως, η κατασκευή σε υφιστάμενες κατασκευές είναι εξαιρετικά δυσχερής, αν όχι αδύνατη. Συνεπώς, η χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων με οποιαδήποτε διάταξη δεν αποτελεί μια δόκιμη επιλογή βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης σε συνθήκες οριζόντιας εξάπλωσης.

## Κεφάλαιο 6

# Παραμετρική Διερεύνηση Απόκρισης Θεμελίων με Περιμετρικά Τοιχία

### 6.1. Γενικά

Όπως αποδείχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η βελτίωση εδάφους σε υφιστάμενες κατασκευές με πλαστικά στραγγιστήρια δεν επαρκεί για να απομειώσει τις μετατοπίσεις (οριζόντια και κατακόρυφη) και τις στροφές του θεμελίου σε αποδεκτά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζεται η εφαρμογή τοιχίων (με διαφορετική στιβαρότητα και για διαφορετικά βάθη) περιμετρικά του θεμελίου ως μέσου βελτίωσης της σεισμικής απόκρισής του. Τα περιμετρικά τοιχία έχουν το προτέρημα να κατασκευάζονται με ευκολία και σε υπάρχουσες θεμελιώσεις, εφόσον η όποια επέμβαση γίνεται αποκλειστικά περιμετρικά. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις:

1. Εφαρμογή διαφραγματικού τοιχίου πλάτους 0.5m από οπλισμένο σκυρόδεμα (Retaining Walls) περιμετρικά του θεμελίου και σε όλο το βάθος της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης (μέχρι βάθος 10m), διατάξεις βελτίωσης εδάφους που θα αποκαλούνται στη συνέχεια «**RetWall Full**».
2. Εφαρμογή διαφραγματικού τοιχίου πλάτους 0.5m από οπλισμένο σκυρόδεμα (Retaining Walls) περιμετρικά του θεμελίου μέχρι το μέσο της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης (μέχρι βάθος 5m), διατάξεις βελτίωσης εδάφους που θα αποκαλούνται στη συνέχεια «**RetWall Half**»
3. Εφαρμογή τοιχίου από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους (Soil Mixing) πλάτους 0.5m περιμετρικά του θεμελίου και σε όλο το βάθος της ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης (μέχρι βάθος 10m), διατάξεις βελτίωσης εδάφους που θα αποκαλούνται στη συνέχεια «**SoilMixing Full**»

Όπως και στο Κεφάλαιο 5, εδώ τα αποτελέσματα των αναλύσεων θα συγκριθούν με τις αναλύσεις της μη-βελτιωμένης εδαφικής στρώσης με βάση τα αποτελέσματα του



Κεφαλαίο 4. Στον Πίνακα 6.1 συνοψίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάλυση που παρουσιάζεται για πρώτη φορά εδώ.

Πίνακας 6.1: Συνδυασμοί τιμών παραμέτρων στις αναλύσεις του παρόντος Κεφαλαίου

Case No	Type	B(m)	q(kPa)	amax (g)	Te(s)	N	Improvement
56	square	5	100	0.2	0.35	14	RetWall Full
57	strip	5	100	0.2	0.35	14	RetWall Full
58	square	5	100	0.1	0.35	14	RetWall Full
59	strip	5	100	0.1	0.35	14	RetWall Full
60	square	5	100	0.4	0.35	14	RetWall Full
61	strip	5	100	0.4	0.35	14	RetWall Full
62	square	5	200	0.2	0.35	14	RetWall Full
63	strip	5	200	0.2	0.35	14	RetWall Full
64	square	5	50	0.2	0.35	14	RetWall Full
65	strip	5	50	0.2	0.35	14	RetWall Full
66	square	20	100	0.2	0.35	14	RetWall Full
67	strip	20	100	0.2	0.35	14	RetWall Full
68	square	20	100	0.1	0.35	14	RetWall Full
69	strip	20	100	0.1	0.35	14	RetWall Full
70	square	20	100	0.4	0.35	14	RetWall Full
71	strip	20	100	0.4	0.35	14	RetWall Full
72	square	20	200	0.2	0.35	14	RetWall Full
73	strip	20	200	0.2	0.35	14	RetWall Full
74	square	20	50	0.2	0.35	14	RetWall Full
75	strip	20	50	0.2	0.35	14	RetWall Full
76	square	5	100	0.2	0.35	14	RetWall Half
77	strip	5	100	0.2	0.35	14	RetWall Half
78	square	5	100	0.1	0.35	14	RetWall Half
79	strip	5	100	0.1	0.35	14	RetWall Half
80	square	5	100	0.4	0.35	14	RetWall Half
81	strip	5	100	0.4	0.35	14	RetWall Half
82	square	5	200	0.2	0.35	14	RetWall Half
83	strip	5	200	0.2	0.35	14	RetWall Half
84	square	5	50	0.2	0.35	14	RetWall Half
85	strip	5	50	0.2	0.35	14	RetWall Half
86	square	20	100	0.2	0.35	14	RetWall Half
87	strip	20	100	0.2	0.35	14	RetWall Half
88	square	20	100	0.1	0.35	14	RetWall Half
89	strip	20	100	0.1	0.35	14	RetWall Half

90	square	20	100	0.4	0.35	14	RetWall Half
91	strip	20	100	0.4	0.35	14	RetWall Half
92	square	20	200	0.2	0.35	14	RetWall Half
93	strip	20	200	0.2	0.35	14	RetWall Half
94	square	20	50	0.2	0.35	14	RetWall Half
95	strip	20	50	0.2	0.35	14	RetWall Half
96	square	5	100	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
97	strip	5	100	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
98	square	5	100	0.1	0.35	14	SoilMixing Full
99	strip	5	100	0.1	0.35	14	SoilMixing Full
100	square	5	100	0.4	0.35	14	SoilMixing Full
101	strip	5	100	0.4	0.35	14	SoilMixing Full
102	square	5	200	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
103	strip	5	200	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
104	square	5	50	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
105	strip	5	50	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
106	square	20	100	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
107	strip	20	100	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
108	square	20	100	0.1	0.35	14	SoilMixing Full
109	strip	20	100	0.1	0.35	14	SoilMixing Full
110	square	20	100	0.4	0.35	14	SoilMixing Full
111	strip	20	100	0.4	0.35	14	SoilMixing Full
112	square	20	200	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
113	strip	20	200	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
114	square	20	50	0.2	0.35	14	SoilMixing Full
115	strip	20	50	0.2	0.35	14	SoilMixing Full

## 6.2. Τυπική απόκριση θεμελίων με περιμετρικά τοιχία

Αρχικώς παρουσιάζεται ξεχωριστά η απόκριση των κεντρικά φορτιζόμενων θεμελίων πλάτους  $B = 5\text{ m}$  και  $B = 20\text{ m}$  σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με ήπια κλίση που έχει βελτιωθεί με περιμετρικά τοιχία. Λόγω της πληθώρας των αναλύσεων επιλέχθηκε να παρουσιαστεί ο παραμορφωμένος κάρναβος καθώς και οι ισοκαμπύλες της οριζόντιας μετακίνησης και της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους υπό το θεμέλιο στην ανάλυση αναφοράς (με επιτάχυνση  $a_{\max} = 0.2g$  και φορτίο θεμελίου  $q = 100\text{ kPa}$ ) και να συγκριθεί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ίδιας στρώσης με ήπια κλίση αλλά χωρίς βελτίωση (βλ. Κεφάλαιο 4).

Οριζόντιες μετακινήσεις στο έδαφος θεμελίωσης με περιμετρικά τοιχία

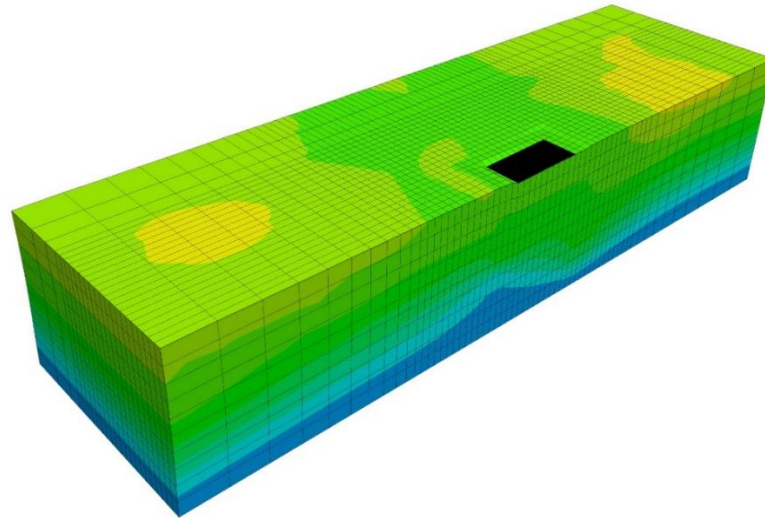
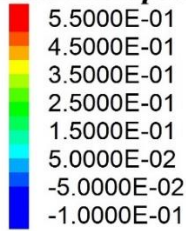
Αρχικώς παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος κάρναβος της εδαφικής στρώσης για την εφαρμογή περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων (RetWall) σε δύο διαφορετικά βάθη, αλλά και η εφαρμογή περιμετρικών αλληλοτεμνόμενων πασσάλων σε όλο το βάθος της στρώσης (SoilMixing Full), μαζί με τις ισοκαμπύλες της οριζόντιας μετακίνησης του θεμελίου πλάτους  $B = 5\text{m}$  και  $B = 20\text{m}$ , στο τέλος της δόνησης της ανάλυσης αναφοράς.

Έτσι, στο **Σχήμα 6.1**, στο **Σχήμα 6.2** και στο **Σχήμα 6.3** δίνονται τα ανωτέρω αποτελέσματα για το θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$ , με τη χρήση περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half), με τη χρήση περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης (RetWall Full) και την εφαρμογή περιμετρικών αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης (SoilMixing Full), αντίστοιχα. Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.4**, στο **Σχήμα 6.5** και στο **Σχήμα 6.6** δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για πλάτος θεμελίου  $B = 20\text{m}$ . Σε κάθε σχήμα υπάρχουν τρία υπο-σχήματα που δίνουν τη σχετική πληροφορία για τις περιπτώσεις που το θεμέλιο είναι τετραγωνικό ( $\alpha, \beta$ ) και μορφής λωρίδας ( $\gamma$ ).

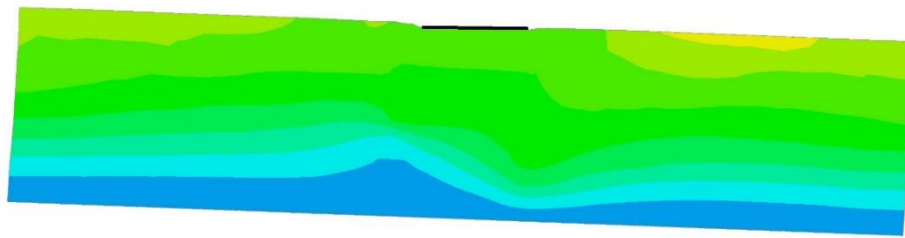
Συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος (βλ. Κεφάλαιο 4), προκύπτει ελαφρά βελτίωση με την εφαρμογή των περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half), σε αντίθεση με την περιμετρική τοποθέτηση των διαφραγματικών τοιχίων σε όλο το βάθος της στρώσης (RetWall Full) όπου υπάρχει σημαντική μείωση των οριζόντιων μετακινήσεων. Μικρότερη είναι η απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων με την εφαρμογή περιμετρικών αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης (SoilMixing Full), λόγω της συγκριτικά μειωμένης στιβαρότητας των τοιχίων αυτών. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή περιμετρικών τοιχίων σε όλο το πάχος της εδαφικής στρώσης κάτω από το θεμέλιο πλάτους  $B = 20\text{m}$  εμφανίζει τις μικρότερες οριζόντιες μετακινήσεις.

## RetWall Half

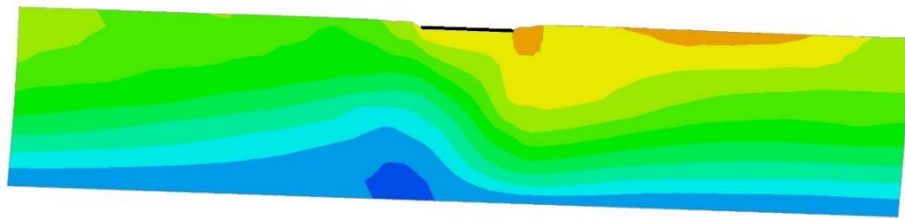
### Zone X Displacement



(α)



(β)

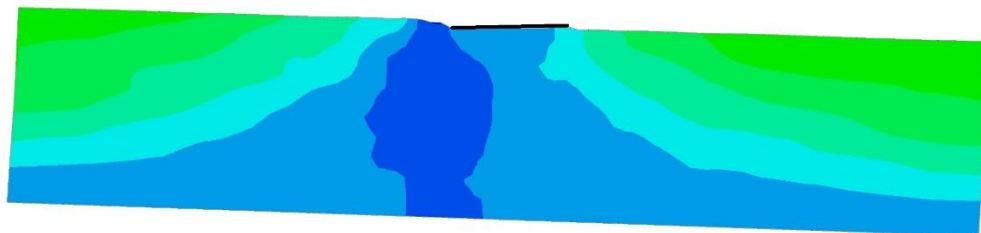
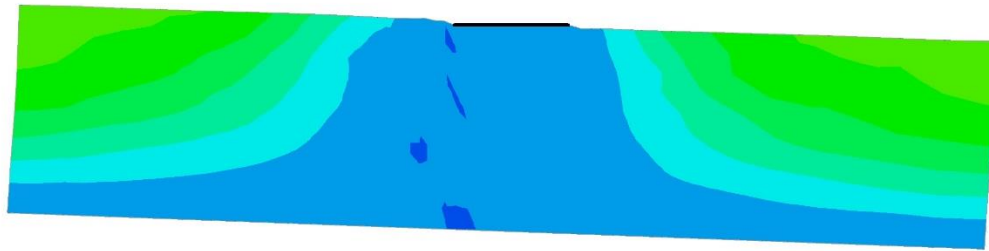
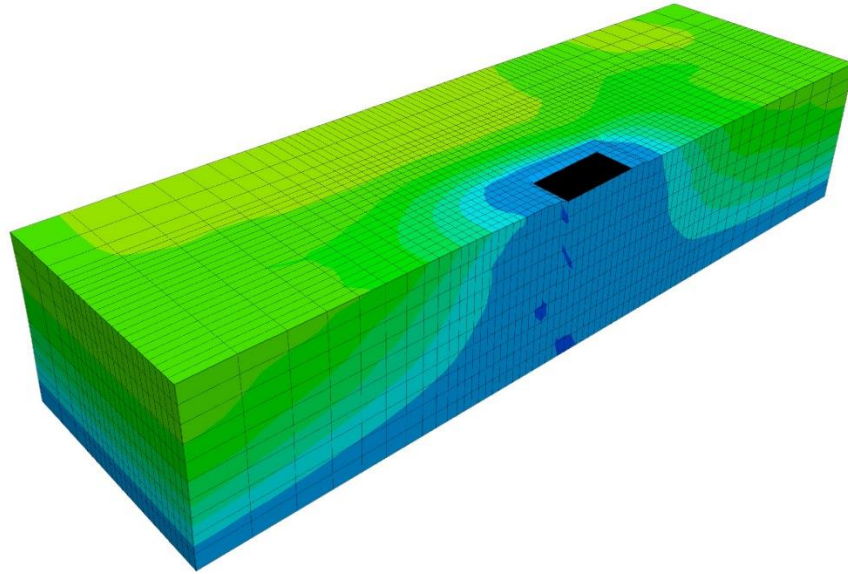
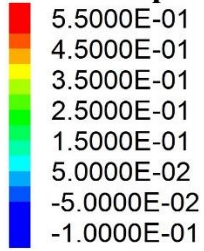


(γ)

**Σχήμα 6.1:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## RetWall Full

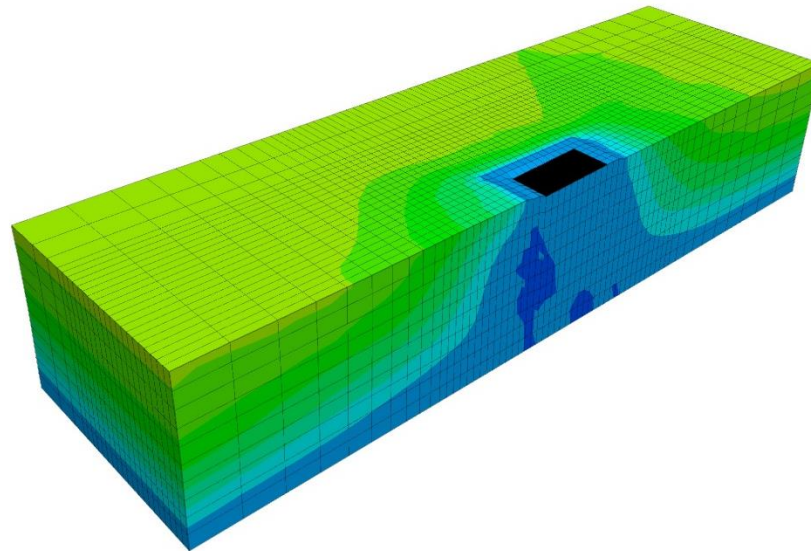
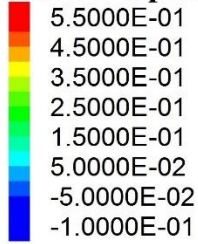
### Zone X Displacement



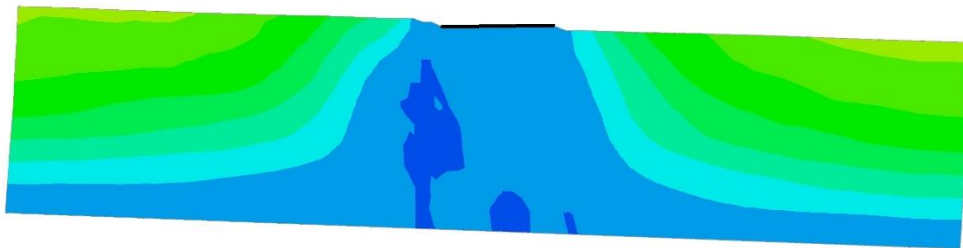
**Σχήμα 6.2:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## SoilMixing Full

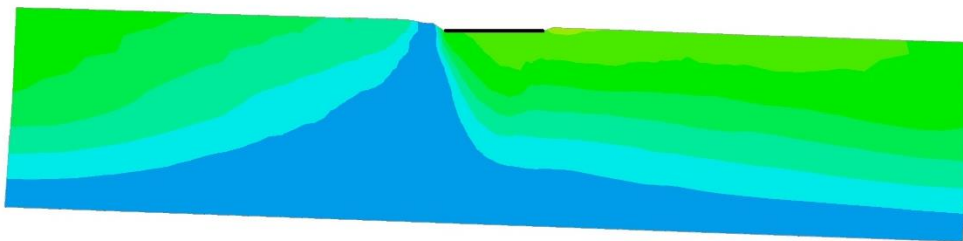
Zone X Displacement



(α)



(β)

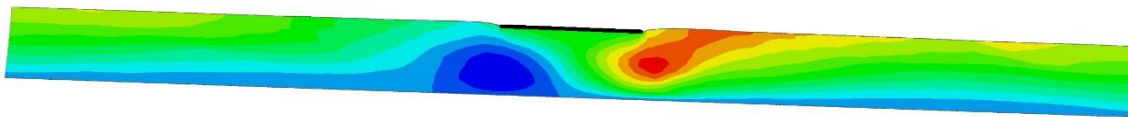
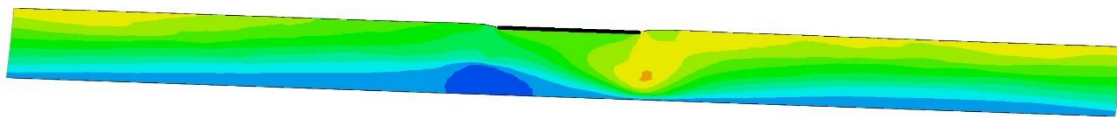
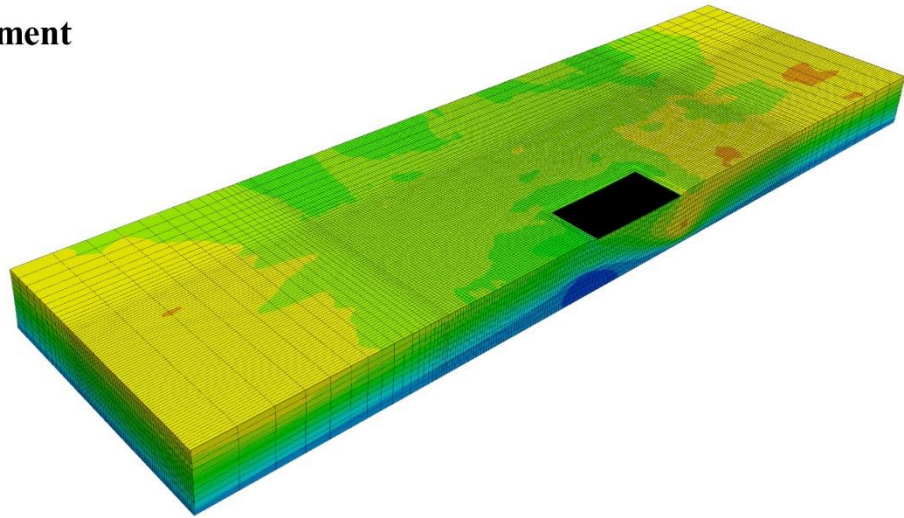
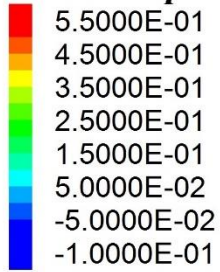


(γ)

**Σχήμα 6.3:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## RetWall Half

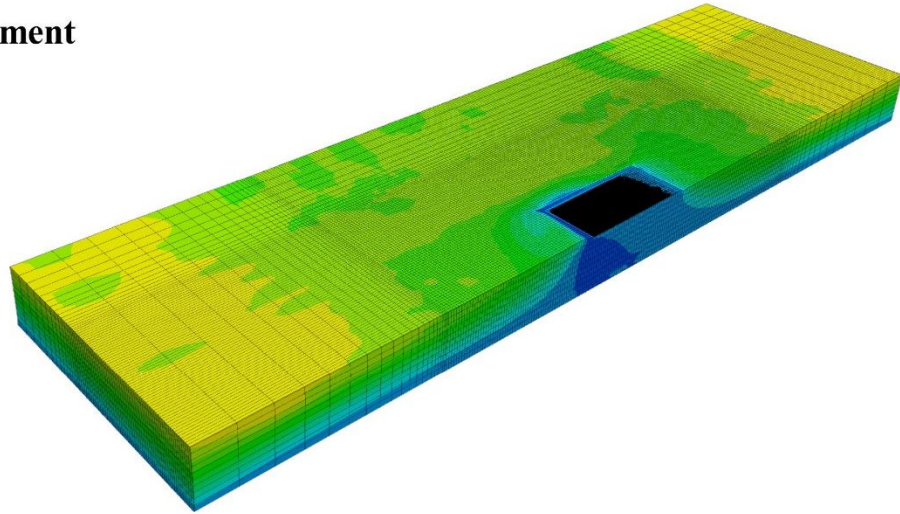
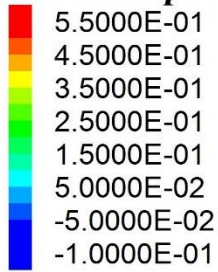
Zone X Displacement



**Σχήμα 6.4:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## RetWall Full

Zone X Displacement



(α)



(β)



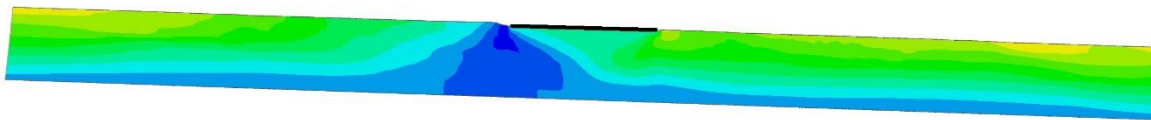
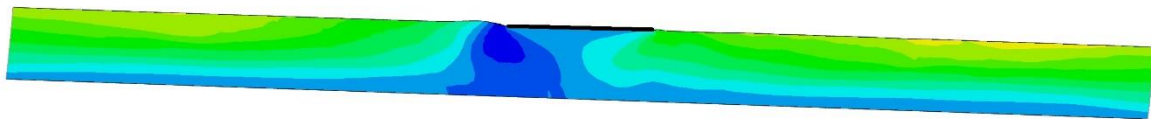
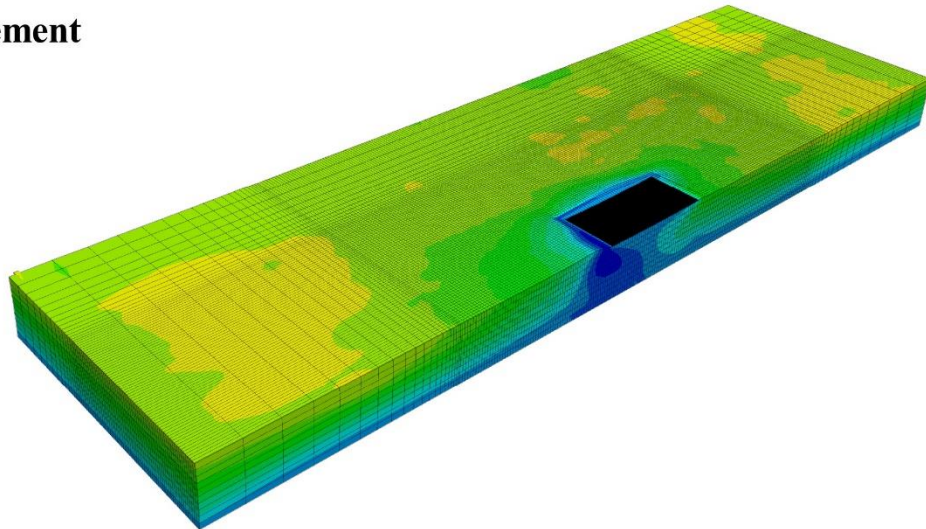
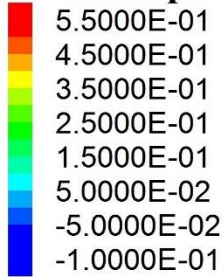
(γ)

**Σχήμα 6.5:** Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)



## SoilMixing Full

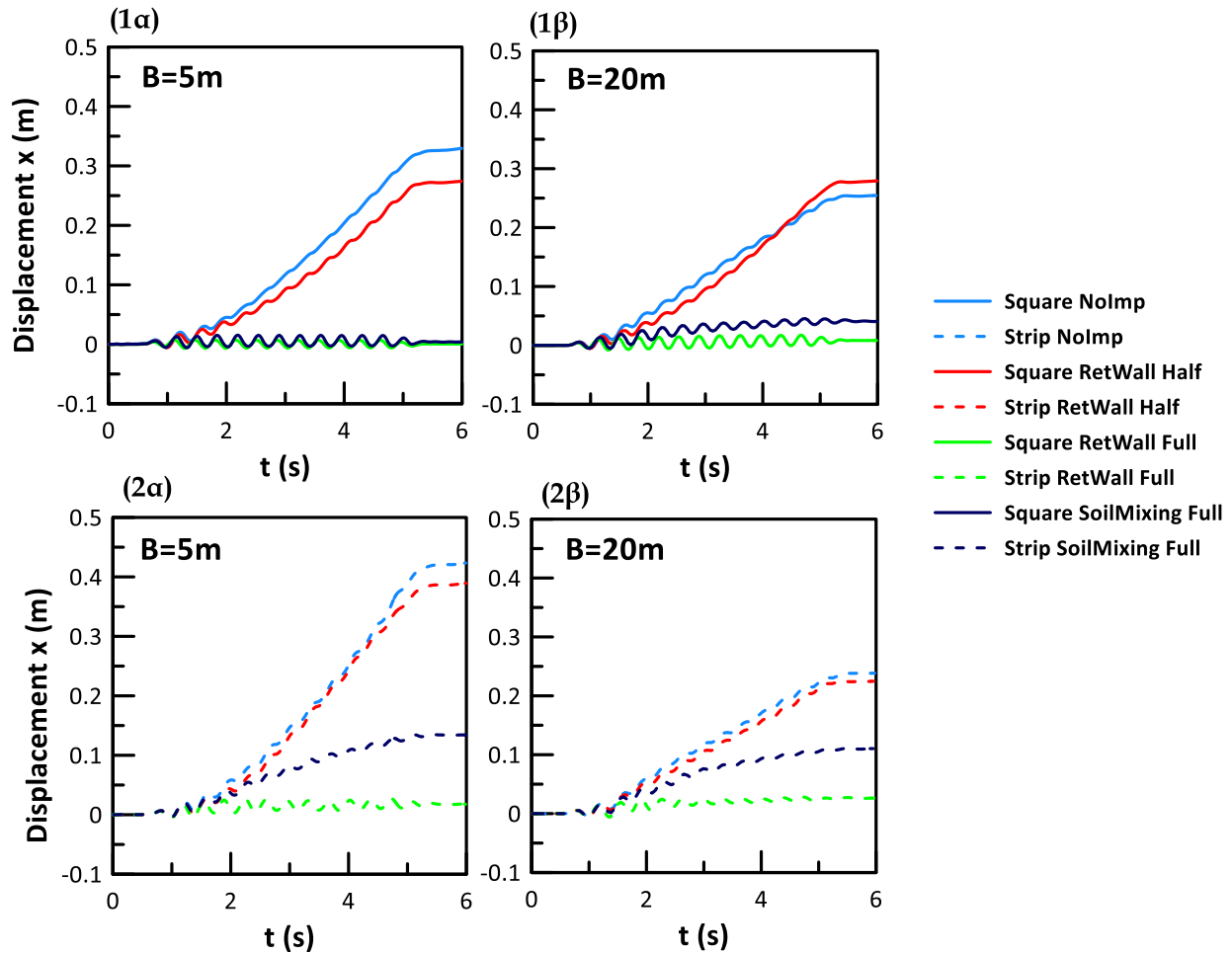
Zone X Displacement



Σχήμα 6.6: Παραμορφωμένος κάρναβος και κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

Στο **Σχήμα 6.7** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων μετακινήσεων του κέντρου του τετραγωνικού θεμελίου (άνω υπο-σχήματα) και της θεμελιολωρίδας (κάτω υπο-σχήματα), στις περιπτώσεις μη-βελτίωσης του εδάφους (NoImp, από Κεφάλαιο 4), και μετά τη τοποθέτηση περιμετρικών τοιχίων ( RetWall Half, RetWall Full & SoilMixing Full). Τα αποτελέσματα για πλάτη θεμελίου  $B = 5\text{m}$  και  $20\text{m}$  παρουσιάζονται στα αριστερά και δεξιά υπο-σχήματα, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται, η χρήση διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσον της εδαφικής στρώσης (RetWall Half, κόκκινες καμπύλες) προκαλούν μικρή απομείωση της οριζόντιας μετακίνησης σε σχέση με την περίπτωση μη-βελτίωσης (NoImp, γαλάζιες καμπύλες) και κυρίως για πλάτη θεμελίων  $B = 5\text{m}$ . Αντιθέτως, η εφαρμογή τοιχίου σε όλο το βάθος του ρευστοποιήσιμου στρώματος απομειώνει σημαντικά την οριζόντια εξάπλωση του τετραγωνικού θεμελίου και της θεμελιολωρίδας, και αυτό ισχύει και για διαφραγματικούς τοίχους (RetWall Full, πράσινες καμπύλες) όπου οι οριζόντιες μετακινήσεις πρακτικά μηδενίζονται, και για τοιχία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους (SoilMixing, μπλε σκούρες καμπύλες) όπου υπάρχει σημαντική απομείωση άνω του 60% σε όλες τις περιπτώσεις.

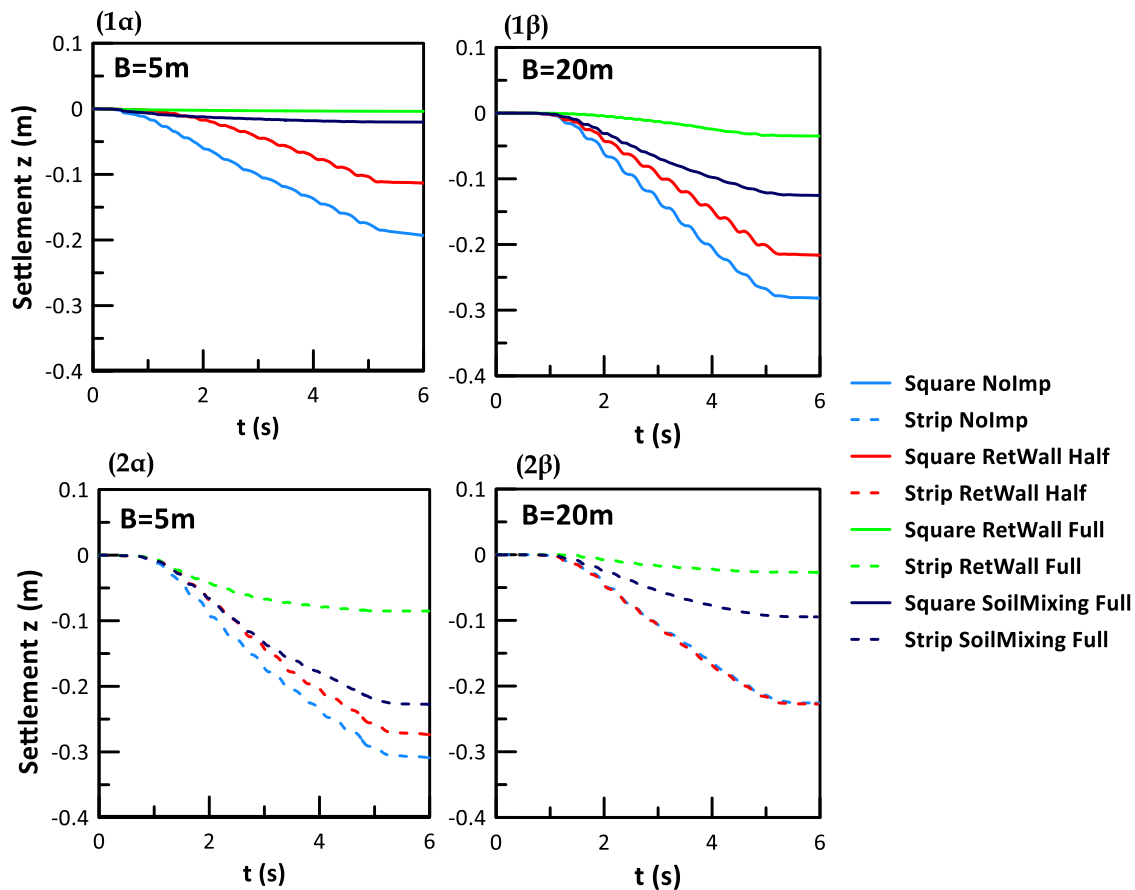


**Σχήμα 6.7:** Χρονοϊστορίες οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους κάτω από το κέντρο (1) τετραγωνικών θεμελίων (άνω) και (2) θεμελιολωρίδων (κάτω) πλάτους (α)  $B=5m$  και (β)  $B=20m$ , σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισιο του βάθους (RetWall Half), με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full) και περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full) για την ανάλυση αναφοράς.

Κατακόρυφες μετακινήσεις στο έδαφος θεμελίωσης με περιμετρικά τοιχεία

Στο **Σχήμα 6.8** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων μετακινήσεων στο κέντρο του τετραγωνικού θεμελίου (άνω υπο-σχήματα) και της θεμελιολωρίδας (κάτω υπο-σχήματα), στις περιπτώσεις μη-βελτίωσης του εδάφους (NoImp, από Κεφάλαιο 4), και μετά την τοποθέτηση περιμετρικών τοιχείων διαφόρων τύπων και βάθους ( RetWall Half, RetWall Full & SoilMixing Full).

Συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος (NoImp, γαλάζιες καμπύλες) προκύπτει ότι η χρήση περιμετρικών τοιχίων πλήρους βάθους απομειώνει σημαντικά τις καθιζήσεις των θεμελίων, με πιο αποδοτική την περίπτωση των διαφραγματικών τοιχίων (RetWall Full, πράσινες καμπύλες), έναντι της χρήσης αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων (SoilMixing Full, μπλε καμπύλες). Αντιθέτως, η χρήση τοιχίων που εκτείνονται μέχρι το μέσο της ρευστοποιήσιμης στρώσης (RetWall Half, κόκκινες καμπύλες) οδηγεί σε μικρή έως και μηδενική απομείωση των καθιζήσεων του θεμελίου. Η μικρότερη βελτίωση προκύπτει στην περίπτωση θεμελιολωρίδων μικρού πλάτους  $B = 5\text{m}$ .



**Σχήμα 6.8:** Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων στο κέντρο των (1) τετραγωνικών θεμελίων (άνω) και (2) θεμελιολωρίδων (κάτω) πλάτους (α)  $B=5\text{m}$  και (β)  $B=20\text{m}$ , σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full) και περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full) για την ανάλυση αναφοράς.

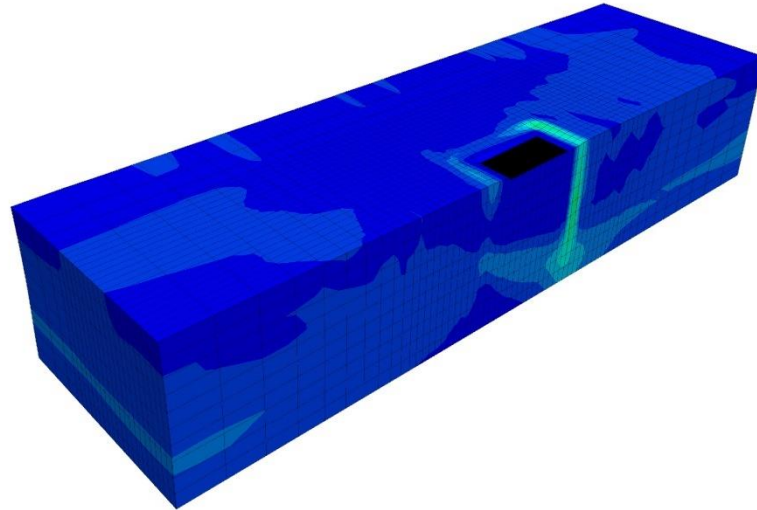
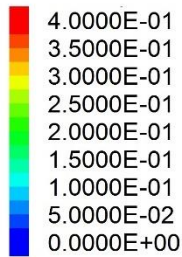
Διατμητικές παραμορφώσεις στο έδαφος θεμελίωσης με περιμετρικά τοιχία

Στο **Σχήμα 6.9**, στο **Σχήμα 6.10** και στο **Σχήμα 6.11** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους στο τέλος της ανάλυσης αναφοράς για θεμέλιο πλάτους  $B = 5\text{m}$ , για τις περιπτώσεις διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half), διαφραγματικών τοιχίων σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης (RetWall Full) και αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης (SoilMixing Full), αντίστοιχα. Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.12**, στο **Σχήμα 6.13** και στο **Σχήμα 6.14** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για πλάτος  $B = 20\text{m}$ . Σε κάθε σχήμα υπάρχουν τρία υπο-σχήματα και δίνουν τη σχετική πληροφορία για τις περιπτώσεις που το θεμέλιο είναι τετραγωνικό ( $\alpha, \beta$ ) και μορφής λωρίδας ( $\gamma$ ).

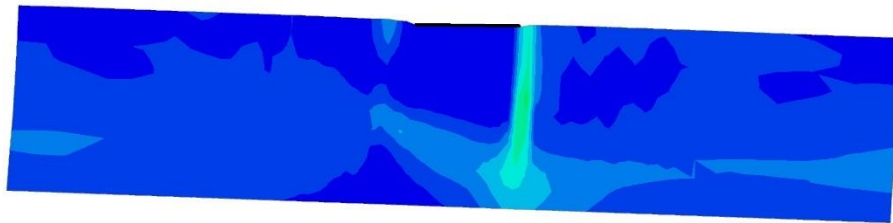
Συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος (βλ. Κεφάλαιο 4) προκύπτει ότι η τοποθέτηση τοιχίων περιμετρικά του θεμελίου και σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης απομειώνει σημαντικά τις συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο, ανεξαρτήτου πλάτους. Εξαιρέση σε αυτήν την περίπτωση βελτίωσης παρουσιάζει η θεμελιολωρίδα πλάτους  $B = 5\text{m}$  (**Σχήμα 6.11**( $\gamma$ )), όπου η χρήση αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων να μεν απομειώνει τις συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις, αλλά αρχίζει να διαμορφώνεται μια αστοχία μορφής «σφήνας» κάτω από το θεμέλιο. Γενικά, οι ζώνες συσσώρευσης διατμητικών παραμορφώσεων είναι πιο έντονες κάτω από θεμελιολωρίδα απ' ό,τι για τετραγωνικό θεμέλιο. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή διαφραγματικών τοιχίων έως το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half), όπου τα τοιχία εμποδίζουν την ανάπτυξη αστοχίας ακριβώς κάτω από το θεμέλιο μεν, αλλά την μετατοπίζουν πιο βαθειά συγκριτικά με τη μη-βελτιωμένη περίπτωση έδαφους όπου προκύπτει ακριβώς κάτω από το θεμέλιο (βλ. Κεφάλαιο 4).

## RetWall Half

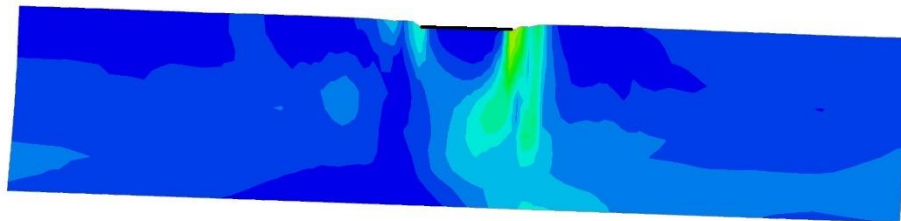
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)

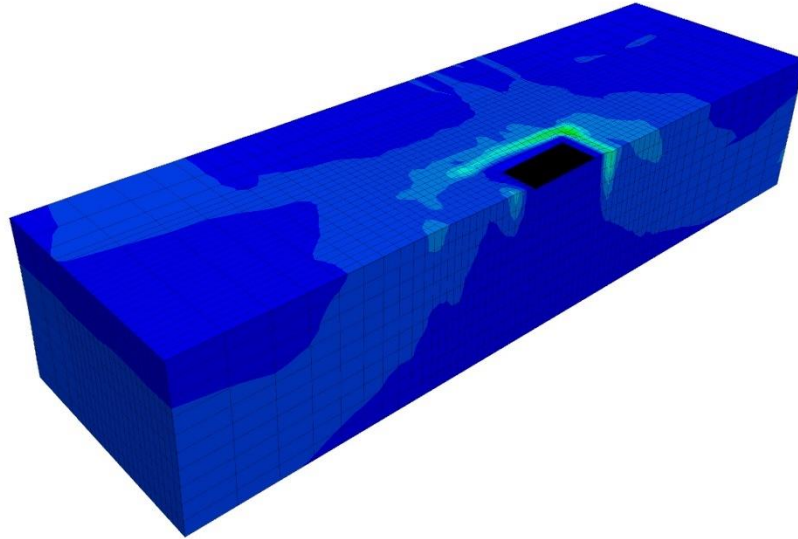
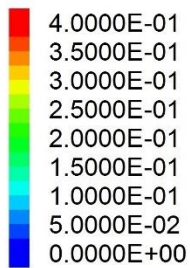


(γ)

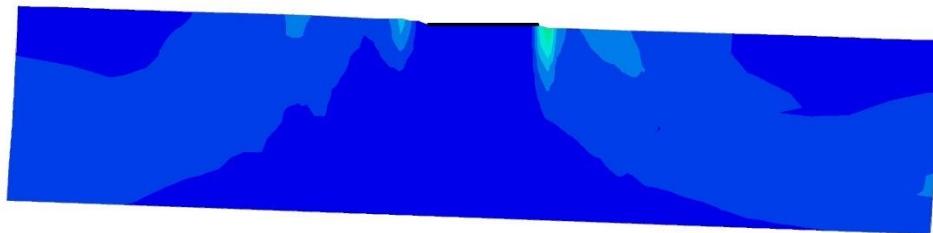
**Σχήμα 6.9:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## RetWall Full

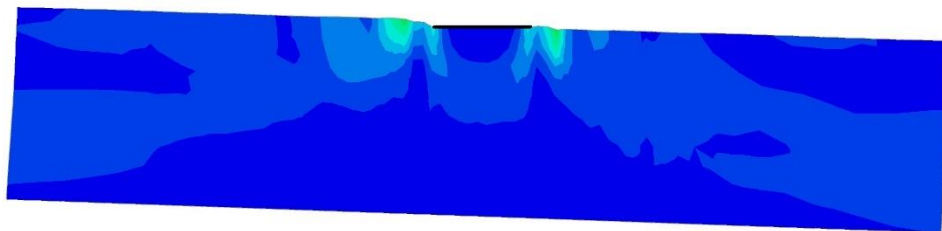
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)

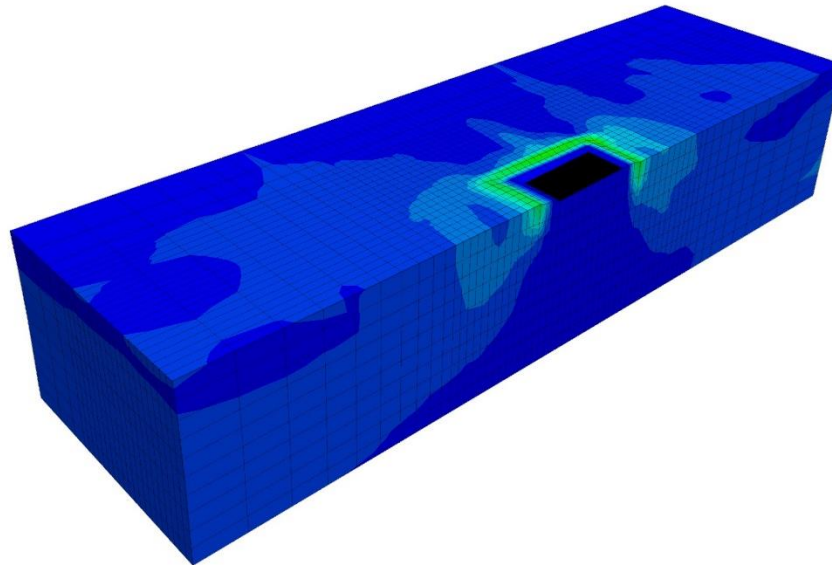
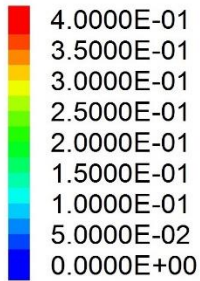


(γ)

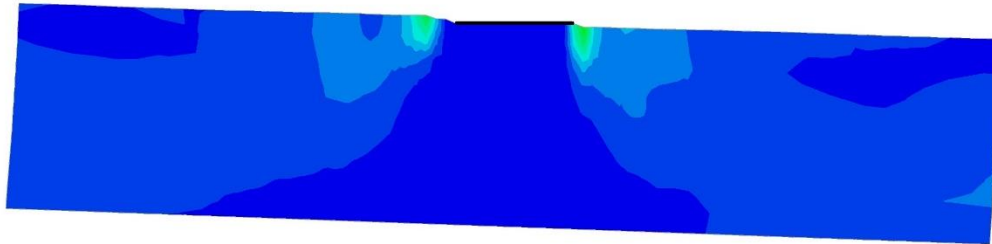
**Σχήμα 6.10:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## SoilMixing Full

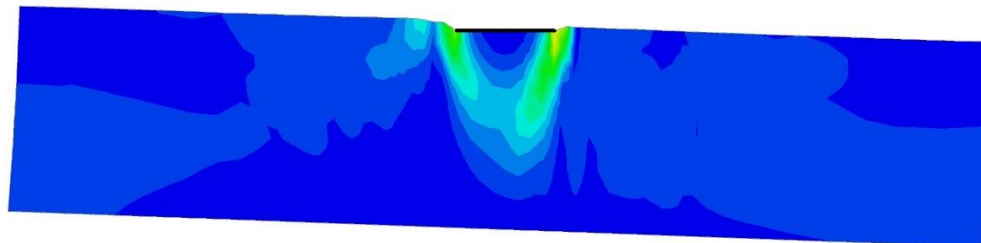
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)



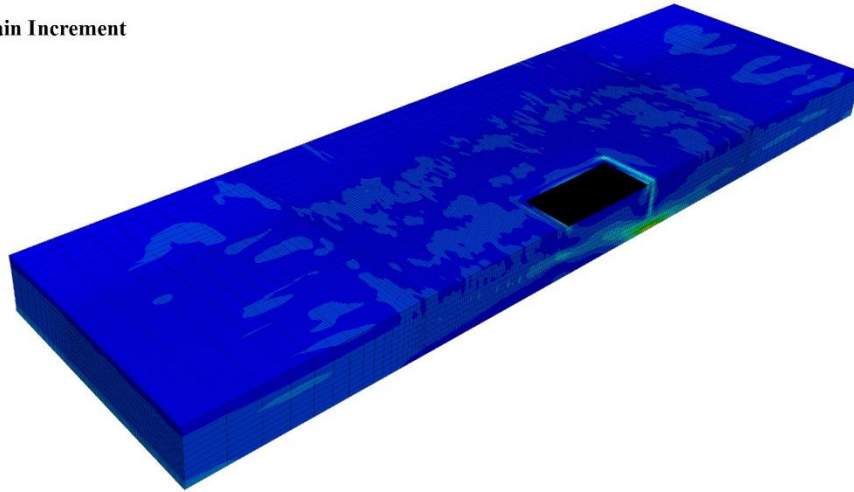
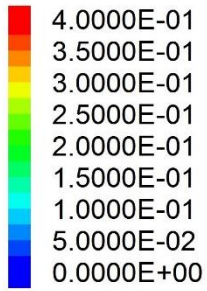
(γ)

**Σχήμα 6.11:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , με περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

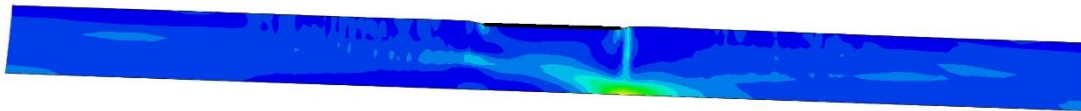


## RetWall Half

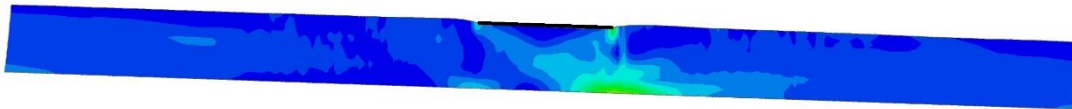
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)

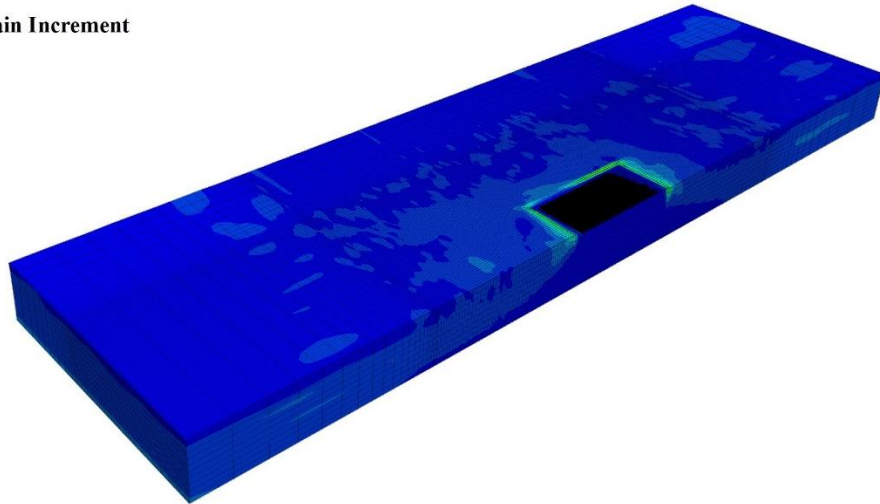
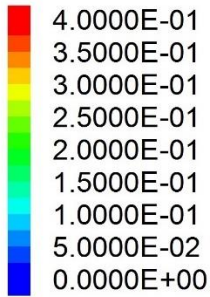


(γ)

**Σχήμα 6.12:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): **(α)** ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), **(β)** τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), **(γ)** τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## RetWall Full

Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)

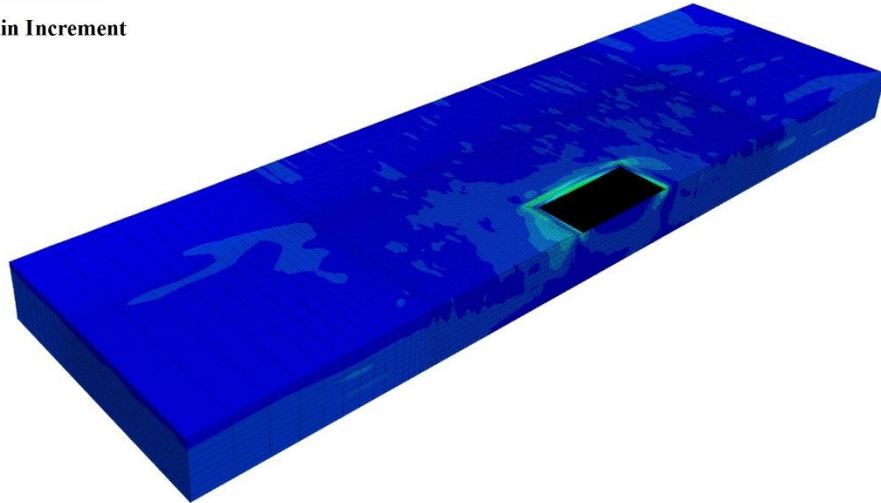
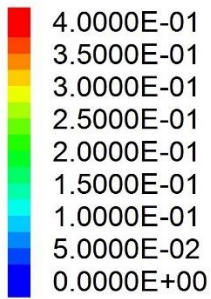


(γ)

**Σχήμα 6.13:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

## SoilMixing Full

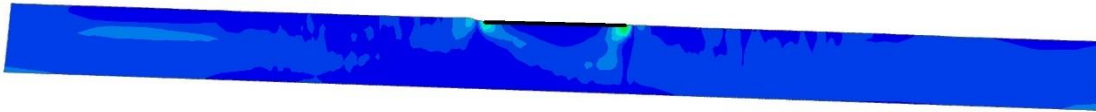
Zone Maximum Shear Strain Increment



(α)



(β)

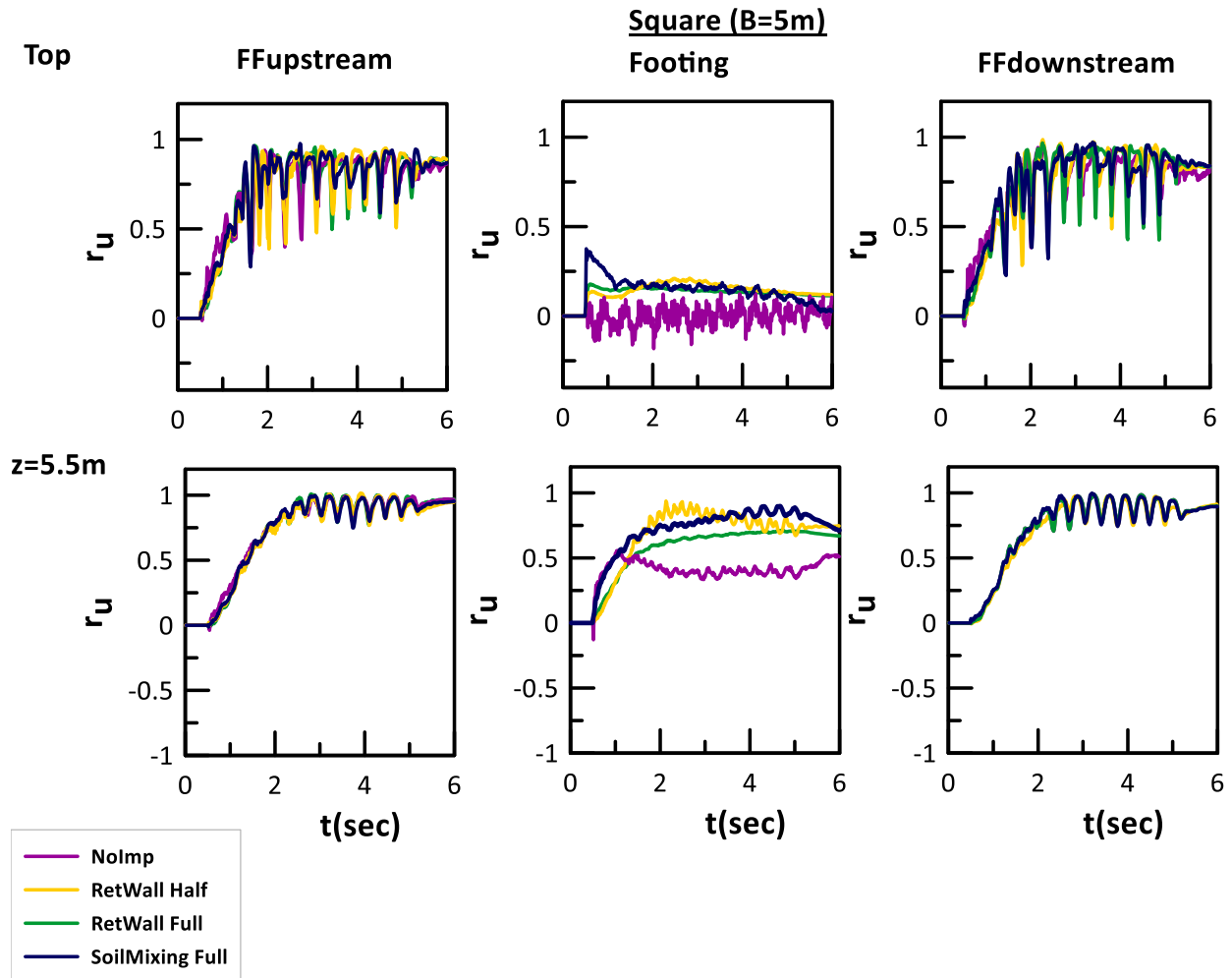


(γ)

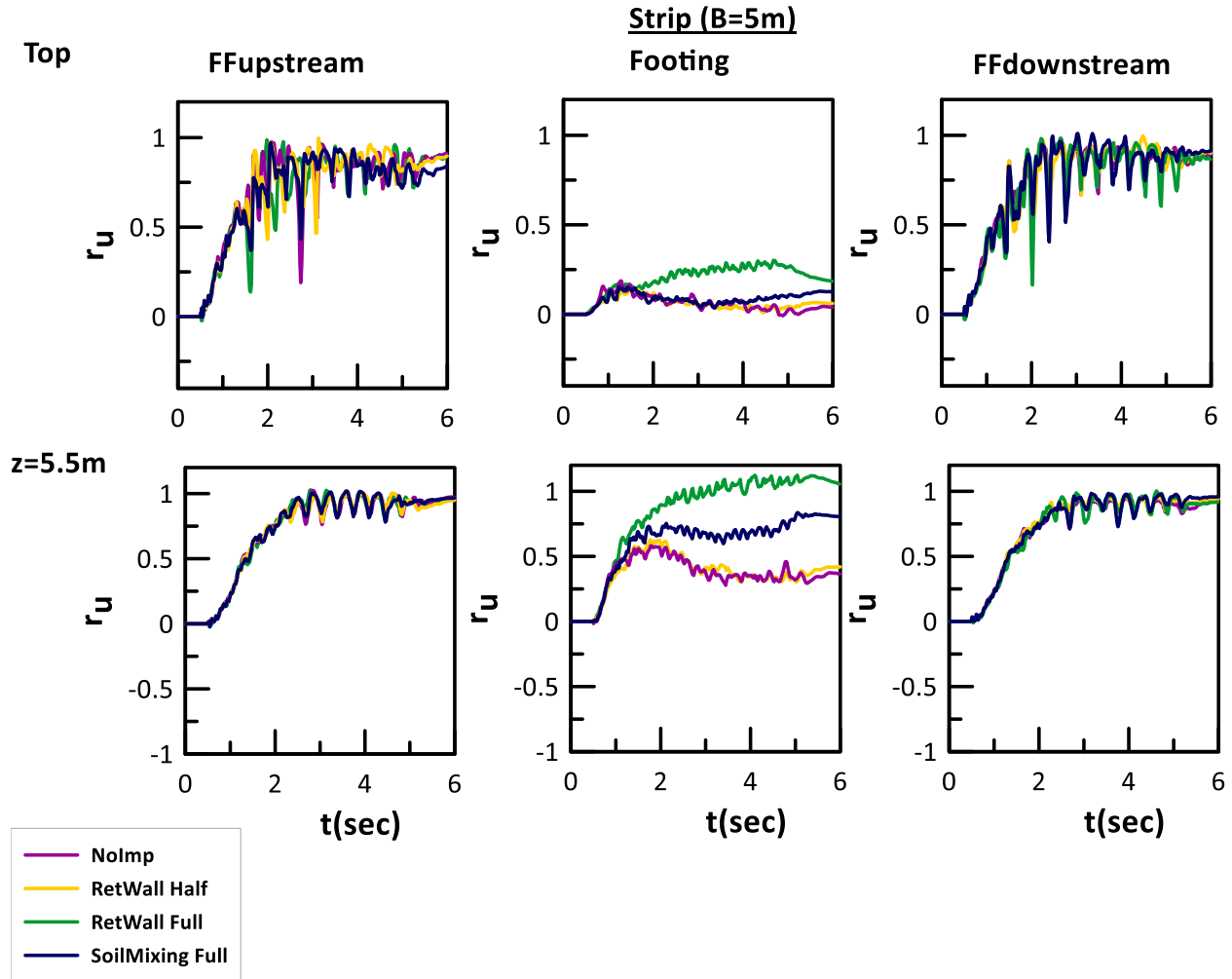
**Σχήμα 6.14:** Κατανομή μέγιστων διατμητικών παραμορφώσεων για θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , με περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full), στη βασική ανάλυση ( $a_{max}=0.2g$ ,  $q=100kPa$ ): (α) ισομετρική όψη για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (β) τομή για τετραγωνικό θεμέλιο (Square), (γ) τομή για θεμελιολωρίδα (Strip)

Υπερπίεση πόρων στο έδαφος θεμελίωσης με περιμετρικά τοιχία

Στο **Σχήμα 6.15** και στο **Σχήμα 6.16** παρουσιάζονται για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα πλάτους  $B = 5\text{m}$ , αντίστοιχα, οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπιέσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος  $z = 5.5\text{m}$  κάτω από το θεμέλιο (Footing), ανάντη (Free Field upstream) και κατάντη (Free Field downstream) αυτού, στις περιπτώσεις μη-βελτιωμένης στρώσης (NoImp, από Κεφάλαιο 4) και μετά την εφαρμογή περιμετρικών τοιχίων. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι η τοποθέτηση περιμετρικών τοιχίων δεν διαφοροποίησε σημαντικά τις υπερπιέσεις πόρων ανάντη και κατάντη του θεμελίου. Αντιθέτως, κάτω από την περιοχή του θεμελίου, η τοποθέτηση περιμετρικών τοιχίων ανεξαρτήτου βάθους δείχνει να αυξάνει τις υπερπιέσεις του νερού των πόρων συγκριτικά με τη μη-βελτιωμένη περίπτωση (NoImp), λόγω της παρεμπόδισης της στράγγισης που αυτά επιβάλλουν.

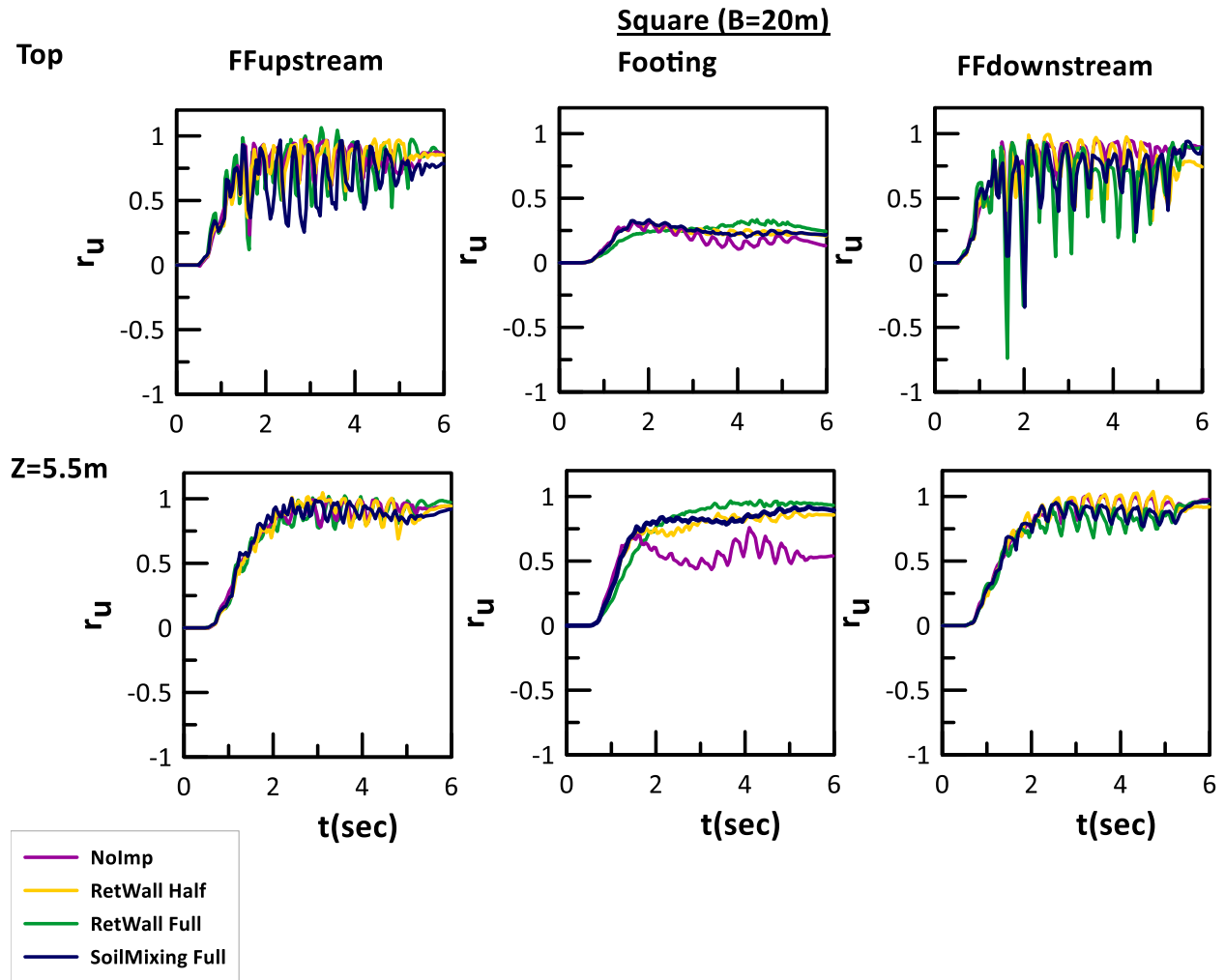


**Σχήμα 6.15:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος 5.5m κάτω από τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=5m$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατόντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full) και με τοιχεία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full)

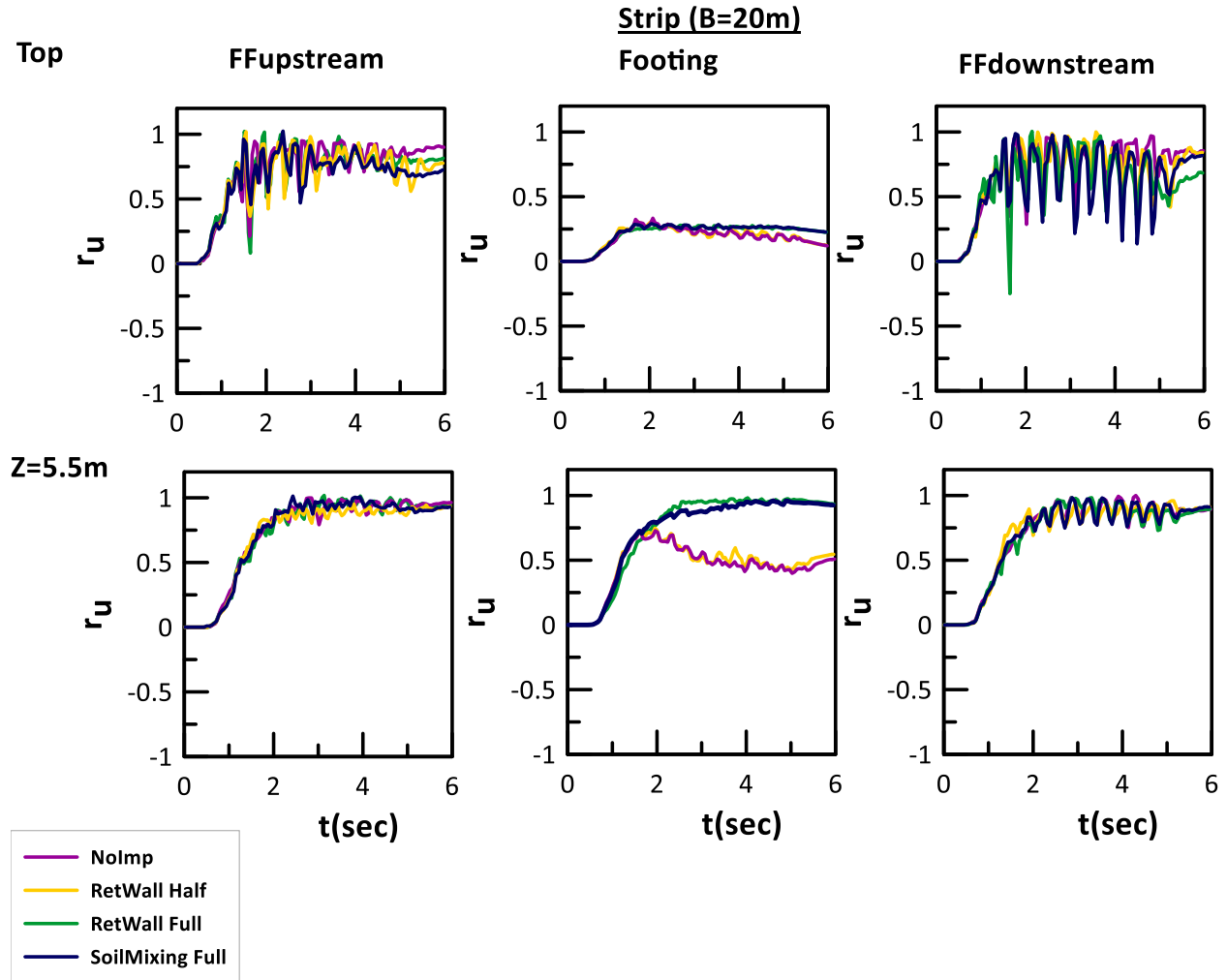


**Σχήμα 6.16:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος 5.5m κάτω από θεμελιολωρίδα πλάτους  $B=5m$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατάντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full) και με τοιχεία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full)

Στο **Σχήμα 6.17** και στο **Σχήμα 6.18** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για το τετραγωνικό θεμέλιο και τη θεμελιολωρίδα πλάτους  $B = 20m$ . Παρατηρείται και σε αυτή τη περίπτωση ότι η τοποθέτηση τοιχείων περιμετρικά του θεμελίου, δε διαφοροποίησε σημαντικά την ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων, παρά μόνο σε βάθος κάτω από το θεμέλιο όπου και πάλι παρατηρείται η επίδραση της παρεμπόδισης της στράγγισης που επιβάλλουν τα τοιχεία, αλλά όχι για τα τοιχεία μισού βάθους στη θεμελιολωρίδα όπου η απόκριση δείχνει παρόμοια με εκείνη της μη-βελτιωμένης στρώσης.



**Σχήμα 6.17:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος 5.5m κάτω από τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=20m$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατάντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full) και με τοίχια από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full)

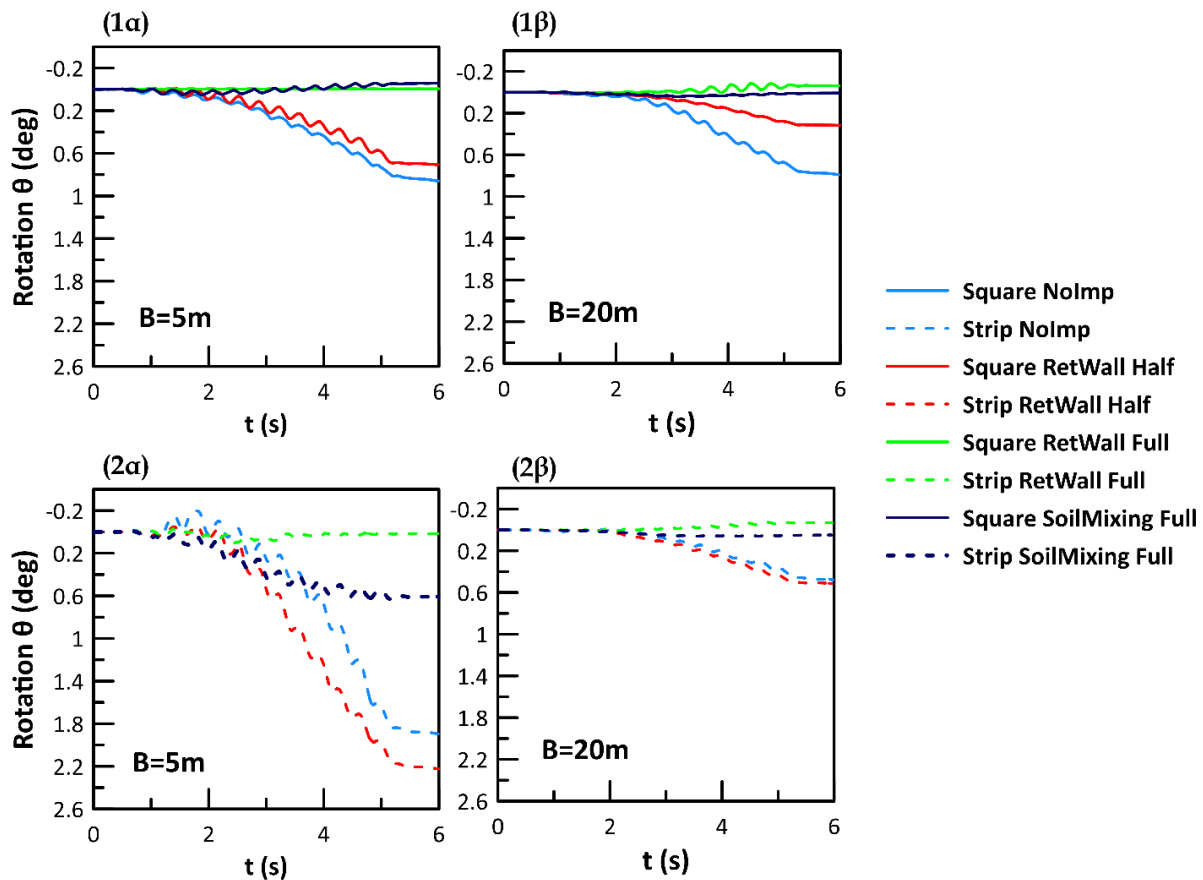


**Σχήμα 6.18:** Χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στην επιφάνεια και σε βάθος 5.5m κάτω από θεμελιολωρίδα πλάτους  $B=20m$ , αλλά και στο ελεύθερο πεδίο ανάντη και κατάντη αυτού, σε ρευστοποιήσιμη στρώση (NoImp), με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full) και με τοιχία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full)



Στροφή θεμελίων με περιμετρικά τοιχία

Στο **Σχήμα 6.19** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία στροφής των τετραγωνικών θεμελίων και της θεμελιολωρίδας πλάτους 5m και 20m, πριν τη βελτίωση (NoImp, από Κεφάλαιο 4) και για τις τρεις διατάξεις τοιχίων (RetWall Half, RetWall Full και SoilMixing Full). Υπενθυμίζεται ότι οι θετικές τιμές του άξονα  $y$  αντιστοιχούν σε στροφές των θεμελίων προς τα κατόντη πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$ . Η εφαρμογή περιμετρικών τοιχίων σε όλο το βάθος απομειώνει σημαντικά τις στροφές του θεμελίου, ανεξαρτήτως πλάτους του, με αποτελεσματικότερη την εφαρμογή του διαφραγματικού τοιχίου (RetWall Full, πράσινες καμπύλες) όπου πρακτικά μηδενίζονται οι στροφές. Αντίθετα η κατασκευή τοιχίων έως το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half, κόκκινες καμπύλες) δεν απομειώνει σημαντικά τις στροφές του θεμελίου σε καμία περίπτωση, ενώ ειδικά για τη θεμελιολωρίδα πλάτους  $B = 5m$  η στροφή ελαφρώς αυξάνει.



**Σχήμα 6.19:** Χρονοϊστορίες στροφής (προς τα κατόντη) **(1)** τετραγωνικών θεμελίων (άνω) και **(2)** θεμελιολωρίδων (κάτω) πλάτους **(α)**  $B=5m$  και **(β)**  $B=20m$ , σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους σε όλο το βάθος (RetWall Full) και περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους σε όλο το βάθος (SoilMixing Full) για την ανάλυση αναφοράς

### 6.3. Παραμετρική διερεύνηση απόκρισης θεμελίων με χρήση περιμετρικών τοιχείων

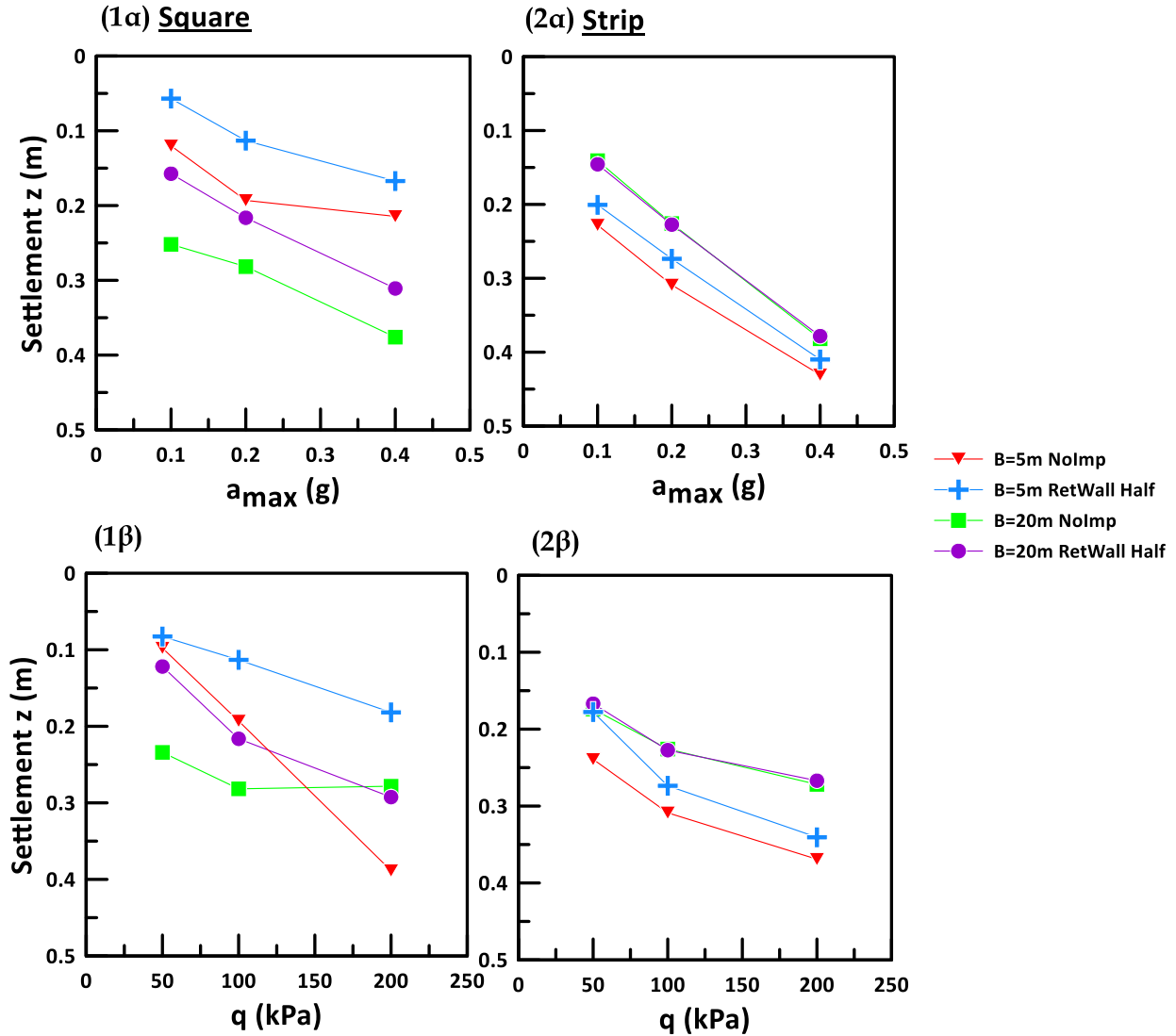
Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η τυπική απόκριση των θεμελίων διαφορετικού πλάτους  $B$  και σχήματος (τετραγωνικού και λωρίδας) σε καθεστώς οριζόντιας εξάπλωσης όταν το έδαφος έχει βελτιωθεί με χρήση περιμετρικών τοιχείων. Τα εν λόγω αποτελέσματα αφορούσαν διέγερση με μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.2g$  και φορτίο θεμελίου  $q=100kPa$ . Στην παρούσα παράγραφο, προκειμένου να μελετηθεί πληρέστερα η απόκριση θεμελίου εδραζόμενου σε έδαφος που έχει βελτιωθεί με περιμετρικά τοιχεία,

εξετάζεται η αντίστοιχη επίδραση των τιμών των  $a_{max}$  και  $q$  συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος και το ελεύθερο πεδίο, όπως έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 4.4.

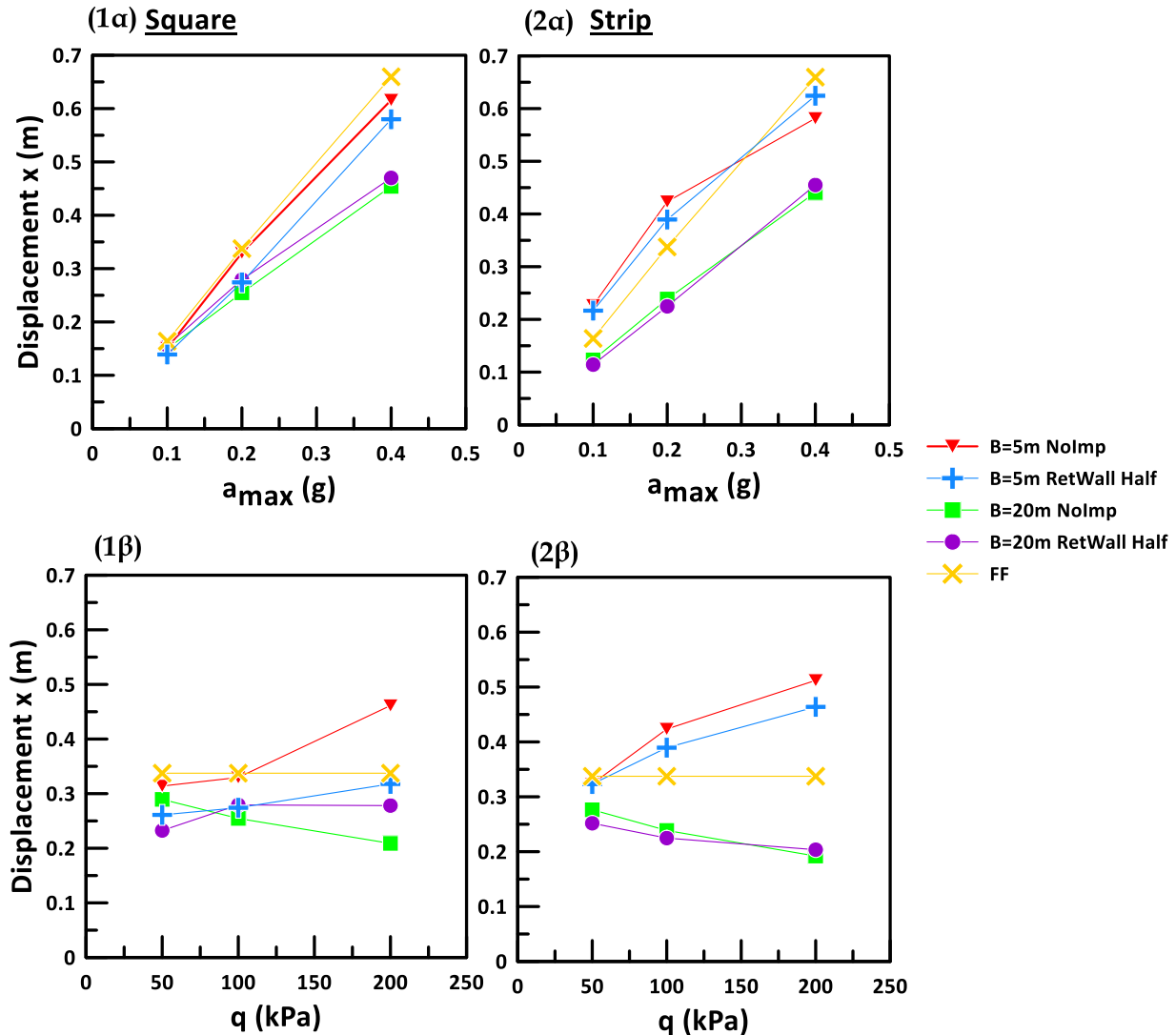
#### Περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half)

Η πρώτη μέθοδος βελτίωσης που παρουσιάζεται συγκριτικά με την περίπτωση της μη-βελτιωμένης ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι η εφαρμογή περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο (RetWall Half).

Αναλυτικότερα, στο **Σχήμα 6.20** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για την καθίζηση του θεμελίου για την περίπτωση βελτίωσης μέσω περιμετρικών τοιχίων μέχρι το μέσο του βάθους (RetWall Half), εν συγκρίσει με την περίπτωση του μη-βελτιωμένου εδάφους (NoImp από Κεφάλαιο 4). Τα άνω και κάτω υποσχήματα παρουσιάζουν την επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , αντίστοιχα, ενώ τα αριστερά και δεξιά υποσχήματα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα, ενώ με διαφορετικές καμπύλες συμβολίζονται τα διαφορετικά πλάτη θεμελίου. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι οι καθιζήσεις αυξάνονται με αύξηση της τιμής των  $a_{max}$  και  $q$  για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ενώ παρατηρείται ότι η εφαρμογή περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων στο ήμισυ του βάθους προκάλεσε εν γένει μικρή μείωση των καθιζήσεων στα τετραγωνικά θεμέλια. Αντίθετα, στις θεμελιολωρίδες η τοποθέτηση διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το ήμισυ του βάθους ουσιαστικά δεν απομειώνει τις καθιζήσεις.



Σχήμα 6.20: Καθιζήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$  (kPa)

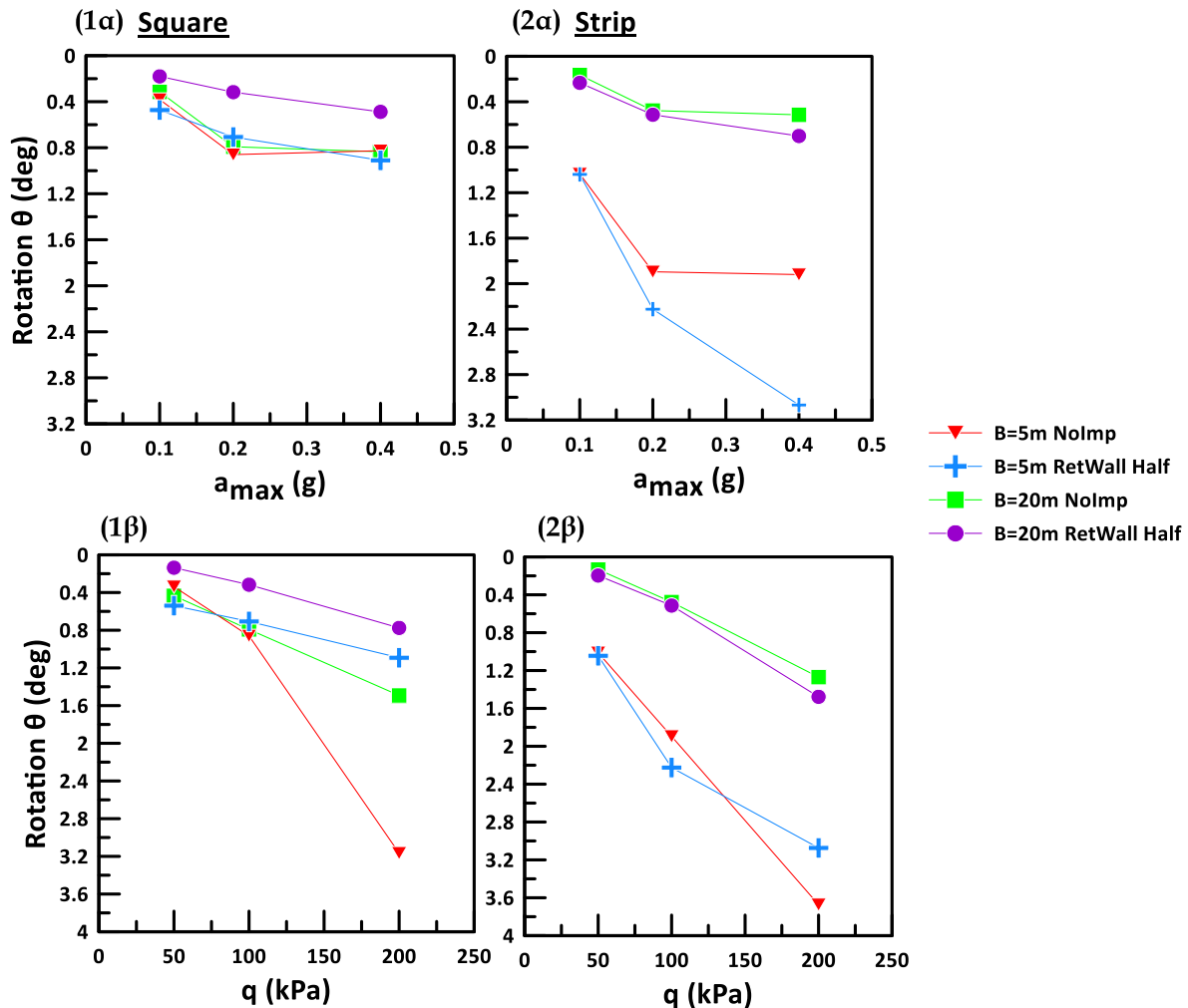


Σχήμα 6.21: Οριζόντιες μετακινήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q(kPa)$

Στο Σχήμα 6.21 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για την οριζόντια μετακίνηση του θεμελίου για την περίπτωση βελτίωσης μέσω διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης, εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης του εδάφους (NoImp) και του ελεύθερου πεδίου (FF). Τα άνω και κάτω υποσχήματα παρουσιάζουν την επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , αντίστοιχα, ενώ τα αριστερά και δεξιά υποσχήματα παρουσιάζουν τα

αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα. Ξεχωριστές καμπύλες χρησιμοποιούνται για κάθε πλάτος θεμελίου, ενώ χάριν σύγκρισης σε κάθε υπο-σχήμα εμπεριέχονται και τα αποτελέσματα της οριζόντιας μετακίνησης του ελεύθερου πεδίου. Προκύπτει ότι ανεξαρτήτως θεμελίου, η μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}$  και (λιγότερο) το φορτίο θεμελίου  $q$  αυξάνουν τις οριζόντιες μετακινήσεις του θεμελίου. Η βελτίωση του εδάφους με χρήση περιμετρικών διαφραγματικών τοιχείων έως το μέσο της εδαφικής στρώσης προκαλεί μικρή μείωση των οριζόντιων μετακινήσεων μόνο στα τετραγωνικά θεμέλια με πλάτος θεμελίου  $B = 5m$ , και πρακτικά δε βελτιώνει τη συμπεριφορά των θεμελίων για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Ένα πρόσθετο συμπέρασμα είναι ότι τα τετραγωνικά θεμέλια με  $B = 5m$  λόγω τοπικής αστοχίας ενδέχεται να μετακινηθούν ακόμα και περισσότερο απ' ό,τι το ελεύθερο πεδίο για την ίδια διέγερση.

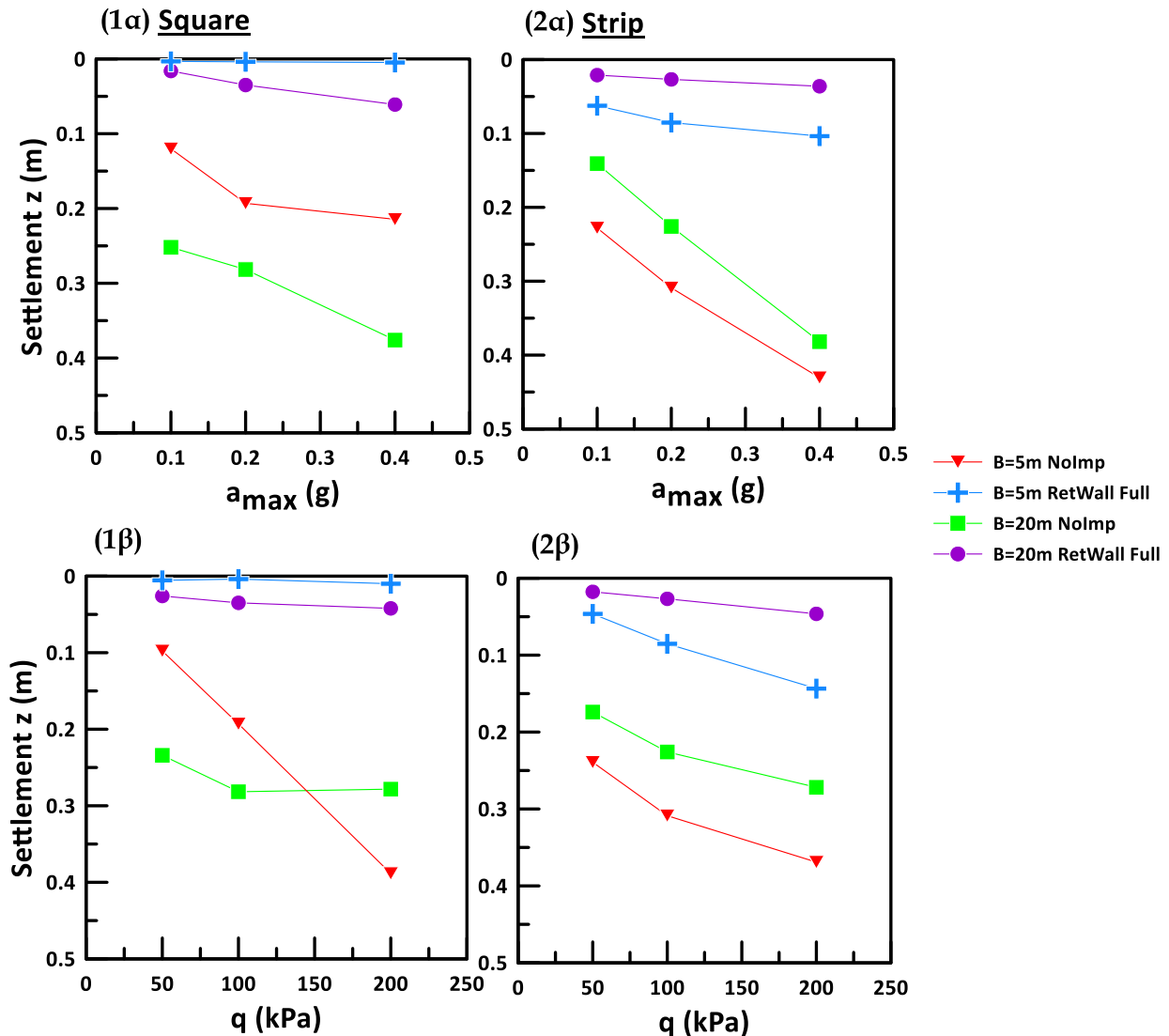
Στο **Σχήμα 6.22** παρουσιάζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις στροφές (προς τα κατάντη) του θεμελίου, όπου τα αριστερά και δεξιά υπο-σχήματα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα αντίστοιχα. Σε κάθε υπο-σχήμα υπάρχουν τέσσερις καμπύλες οι οποίες ξεχωρίζουν τα πλάτη του θεμελίου και το αν πρόκειται για μη-βελτιωμένη στρώση ή όχι. Από τις αναλύσεις προκύπτει, ότι τόσο η επιτάχυνση  $a_{max}$  όσο και το φορτίο  $q$  αυξάνουν τις στροφές των θεμελίων. Επιπλέον προκύπτει ότι η βελτίωση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους έως το μέσο της εδαφικής στρώσης υπό συνθήκες μπορεί να απομειώσει ελαφρά τις στροφές για θεμελιολωρίδες (κυρίως για  $B = 20m$ ), ενώ τις αυξάνει σε τετραγωνικά θεμέλια (κυρίως για  $B = 5m$ ).



Σχήμα 6.22: Στροφή (προς τα κατόντη) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

### Περιμετρικά διαφραγματικά τοιχεία πλήρους βάθους (RetWall Full)

Η δεύτερη μέθοδος βελτίωσης που παρουσιάζεται σε σύγκριση με την περίπτωση της μη βελτιωμένης ρευστοποιήσιμη στρώσης είναι η εφαρμογή περιμετρικών διαφραγματικών τοιχείων πλήρους βάθους (RetWall Full).



**Σχήμα 6.23:** Καθιζήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (*square*) και (2) θεμελιολωρίδων (*strip*), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (*NoImp*) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (*RetWall Full*), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

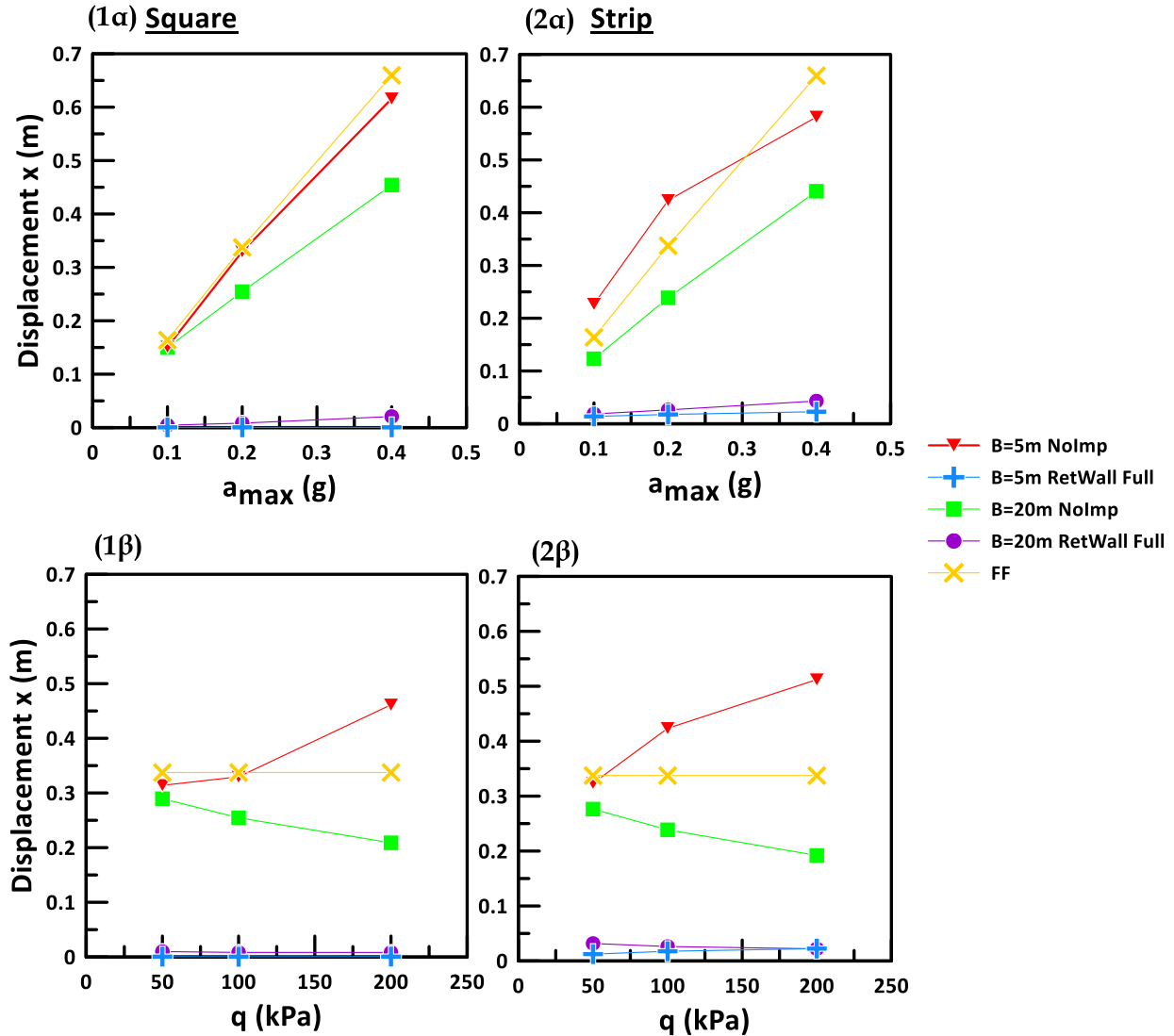
Στο Σχήμα 6.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για την καθίζηση του θεμελίου εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης του εδάφους (FF από Κεφάλαιο 4). Όπως και προηγουμένως, τα άνω και κάτω υπο-σχήματα παρουσιάζουν την επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , αντίστοιχα, ενώ τα αριστερά και δεξιά υποσχήματα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα



για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα. Σε κάθε υπο-σχήμα οι διαφορετικές καμπύλες δίνουν την αντίστοιχη πληροφορία για το πλάτος του θεμελίου καθώς και το αν πρόκειται για μη-βελτιωμένη στρώση ή όχι. Συνολικά προκύπτει ότι τα  $a_{max}$  και  $q$  αυξάνουν, εν γένει, τις καθιζήσεις σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης προκύπτει ότι οι καθιζήσεις πρακτικά μηδενίστηκαν ή έστω μειώθηκαν σημαντικά ( $<0.10m$ ) για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

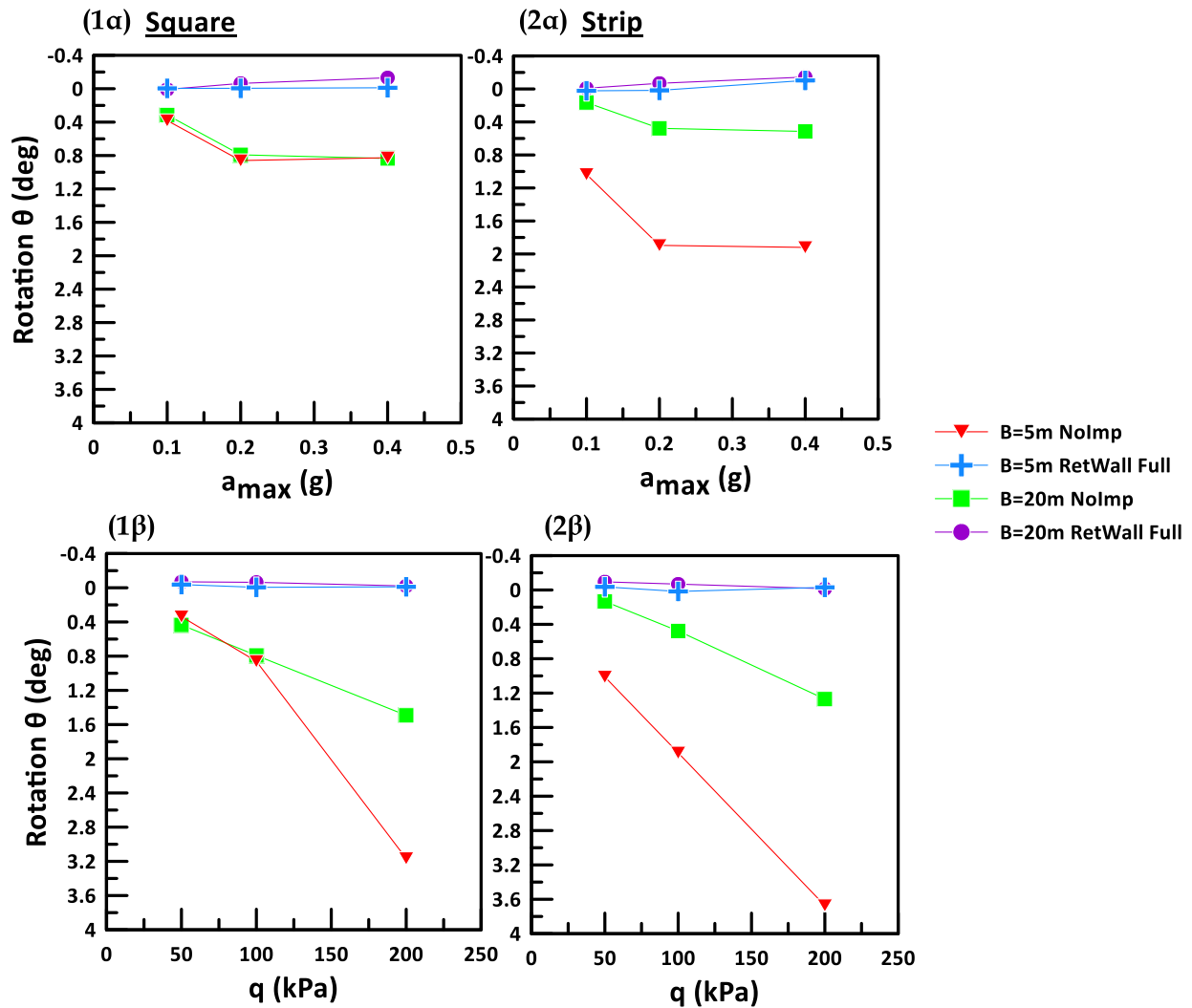
Στο **Σχήμα 6.24** παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις του θεμελίου για την περίπτωση βελτίωσης μέσω περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων πλήρους βάθους (RetWall Full), εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης του εδάφους (FF από Κεφάλαιο 4). Αντίστοιχα με πριν, τα άνω και κάτω υπο-σχήματα παρουσιάζουν την επίδραση της μέγιστη επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , ενώ τα αριστερά και δεξιά υπο-σχήματα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα. Τέλος, διαφορετικές καμπύλες σε όλα τα υπο-σχήματα ξεχωρίζουν τα πλάτη θεμελίου και το αν πρόκειται για μη-βελτιωμένη στρώση ή όχι, ενώ χάριν συγκρίσεως εμπεριέχονται και τα αποτελέσματα οριζόντιας μετακίνησης του ελεύθερου πεδίου. Από το σχήμα προκύπτει ότι σε όλες τις περιπτώσεις βελτίωσης που εξετάστηκαν, οι οριζόντιες μετακινήσεις έχουν πρακτικά μηδενιστεί, ανεξαρτήτως  $a_{max}$  και  $q$ .

Στο **Σχήμα 6.25** συνοψίζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για τη στροφή (προς τα κατάντη) του θεμελίου για την περίπτωση βελτίωσης μέσω περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων πλήρους βάθους (RetWall Full), εν συγκρίσει με την περίπτωση μη-βελτίωσης του εδάφους (FF από το Κεφάλαιο 4). Σε διαφορετικά υπο-σχήματα παρουσιάζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$ , ενώ διαχωρίζονται αντίστοιχα και τα αποτελέσματα για τετραγωνικό θεμέλιο και θεμελιολωρίδα.



**Σχήμα 6.24:** Οριζόντιες μετακινήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q(kPa)$

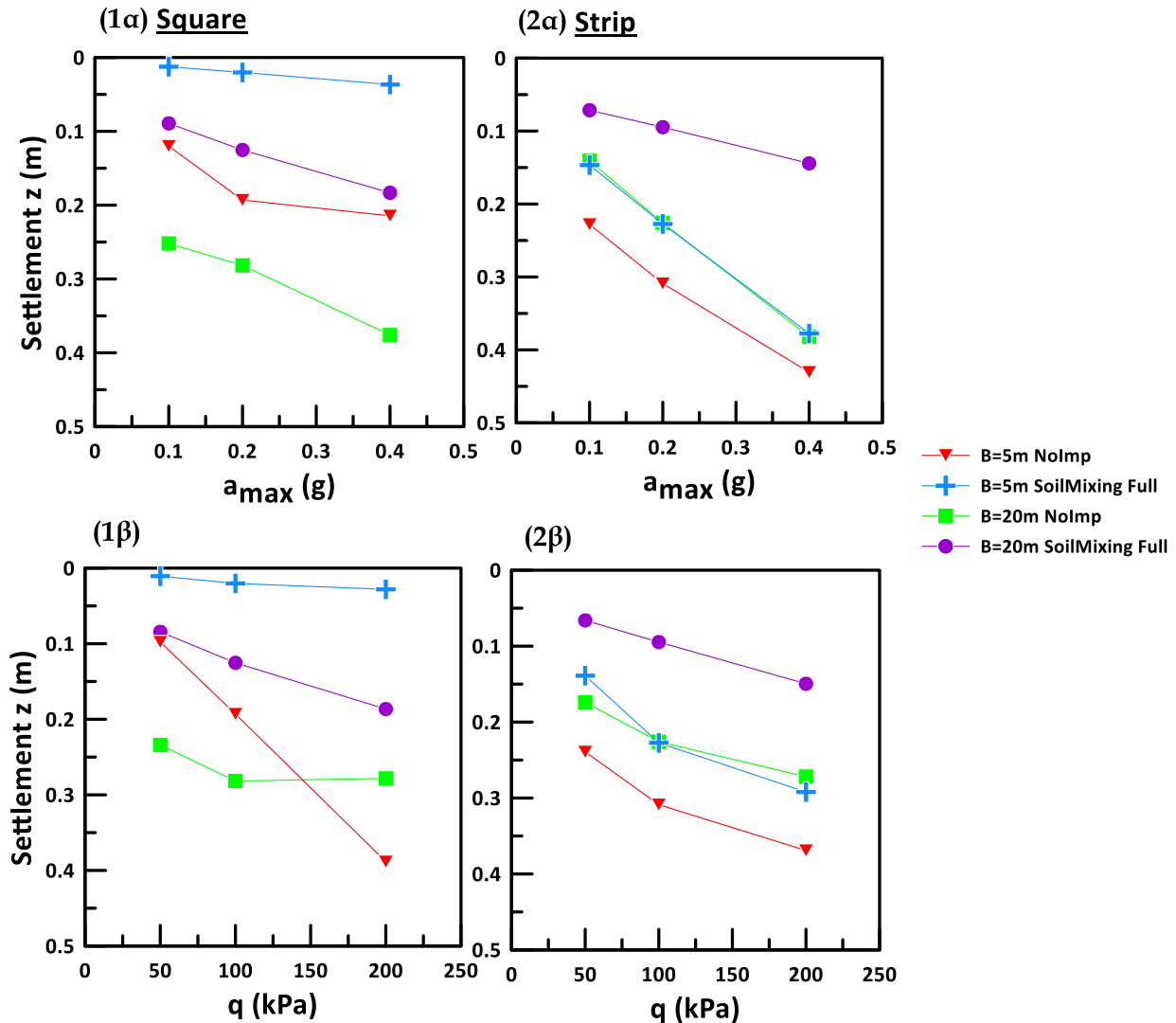
Τέλος, διαφορετικές καμπόλες σε όλα τα υπο-σχήματα ξεχωρίζουν τα πλάτη θεμελίου και το αν πρόκειται για μη-βελτιωμένη στρώση ή όχι. Από τις παραμετρικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.25** προκύπτει ότι η τοποθέτηση διαφραγματικών τοιχείων σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης πρακτικά μηδένισε τις στροφές των θεμελίων, καθώς και ανεξαρτήτως  $a_{max}$  και  $q$ .



Σχήμα 6.25: Στροφή (προς τα κατόντη) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$  (kPa)

Περιμετρικοί αλληλοτεμνόμενοι εδαφοπάσσαλοι πλήρους βάθους (SoilMixing Full)

Η τρίτη μέθοδος βελτίωσης που παρουσιάζεται σε σύγκριση με την περίπτωση της μη-βελτιωμένης ρευστοποιήσιμη στρώσης είναι η εφαρμογή περιμετρικών τοιχίων από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσλους πλήρους βάθους (RetWall Full).

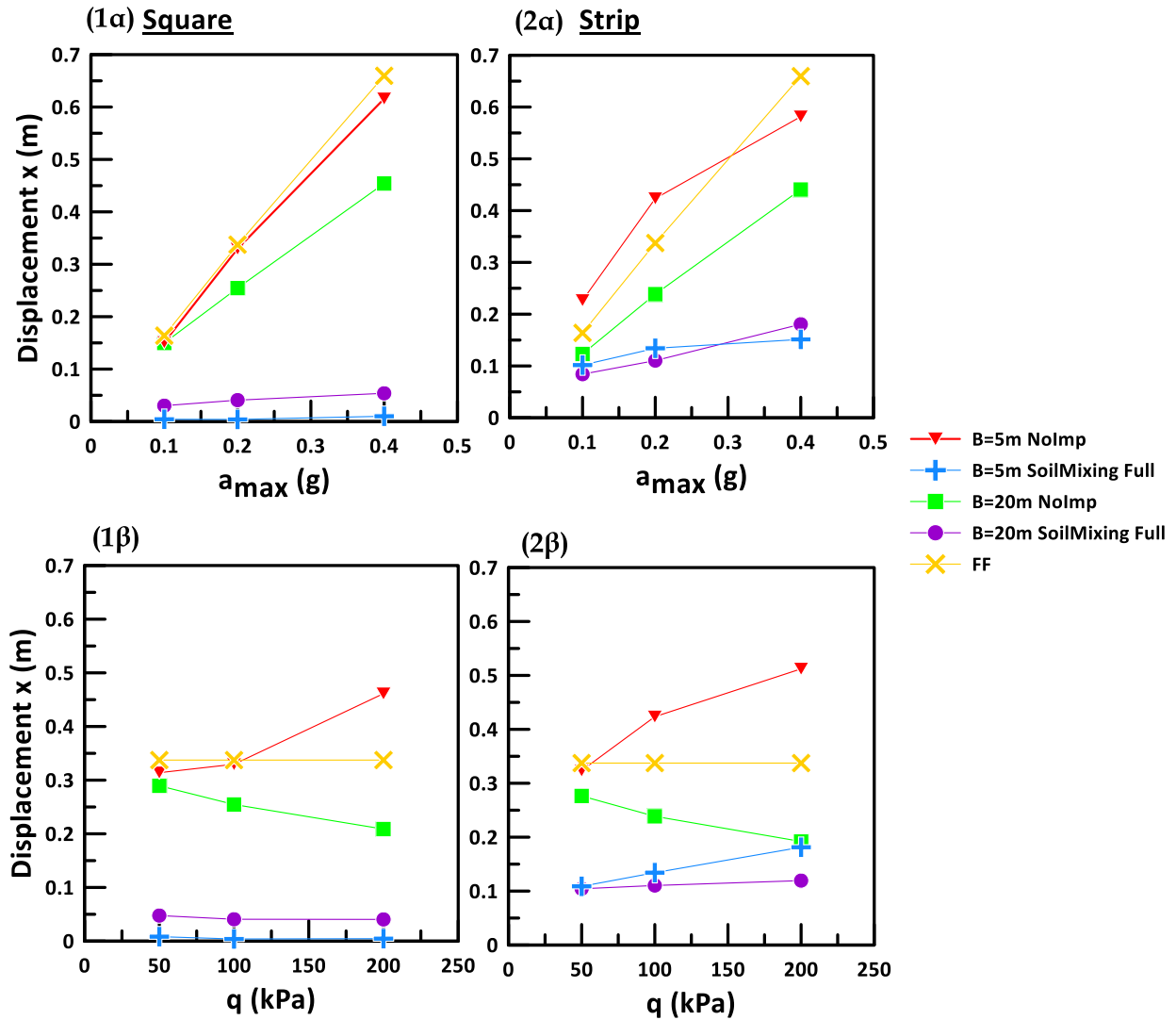


Σχήμα 6.26: Καθιζήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

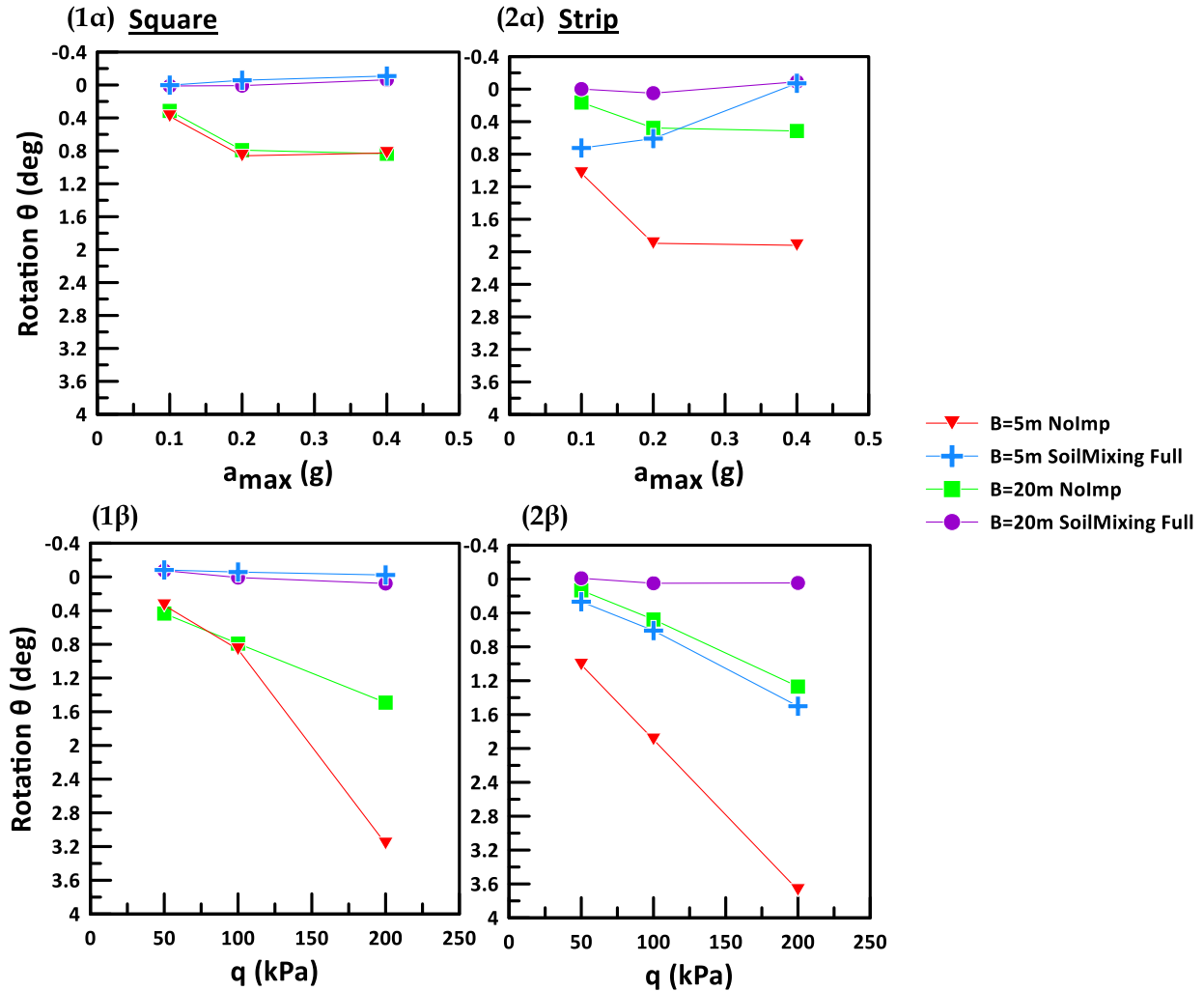
Στο **Σχήμα 6.26** συνοψίζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$  στις καθιζήσεις του τετραγωνικού θεμελίου και της θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με και χωρίς τη χρήση των αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων, στο μορφότυπο του **Σχήματος 6.23**. Προκύπτει ότι η χρήση αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων μειώνει σημαντικά, αλλά δε μηδενίζει τις καθιζήσεις.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.27** παρουσιάζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$  στην οριζόντια μετακίνηση του τετραγωνικού θεμελίου και της θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με και χωρίς τη χρήση των αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων, και αυτό στο μορφότυπο του **Σχήματος 6.24**. Και σε αυτή την περίπτωση βελτίωσης μειώνονται σημαντικά, αλλά δε μηδενίζονται πάντα, οι οριζόντιες μετατοπίσεις του θεμελίου για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν με τη μεγαλύτερη μείωση σε τετραγωνικά θεμέλια.

Τέλος, στο **Σχήμα 6.28** συνοψίζεται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου του θεμελίου  $q$  στις στροφές (προς τα κατόντη) του τετραγωνικού θεμελίου και της θεμελιολωρίδας πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  με και χωρίς τη χρήση των αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων, στο μορφότυπο του **Σχήματος 6.25**. Όπως συμβαίνει και με τις άλλες παραμέτρους σεισμικής απόκρισης του θεμελίου, η τοποθέτηση αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων μηδενίζει ή μειώνει σημαντικά τις στροφές των θεμελίων.



Σχήμα 6.27: Οριζόντιες μετακινήσεις (στο κέντρο) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q(kPa)$



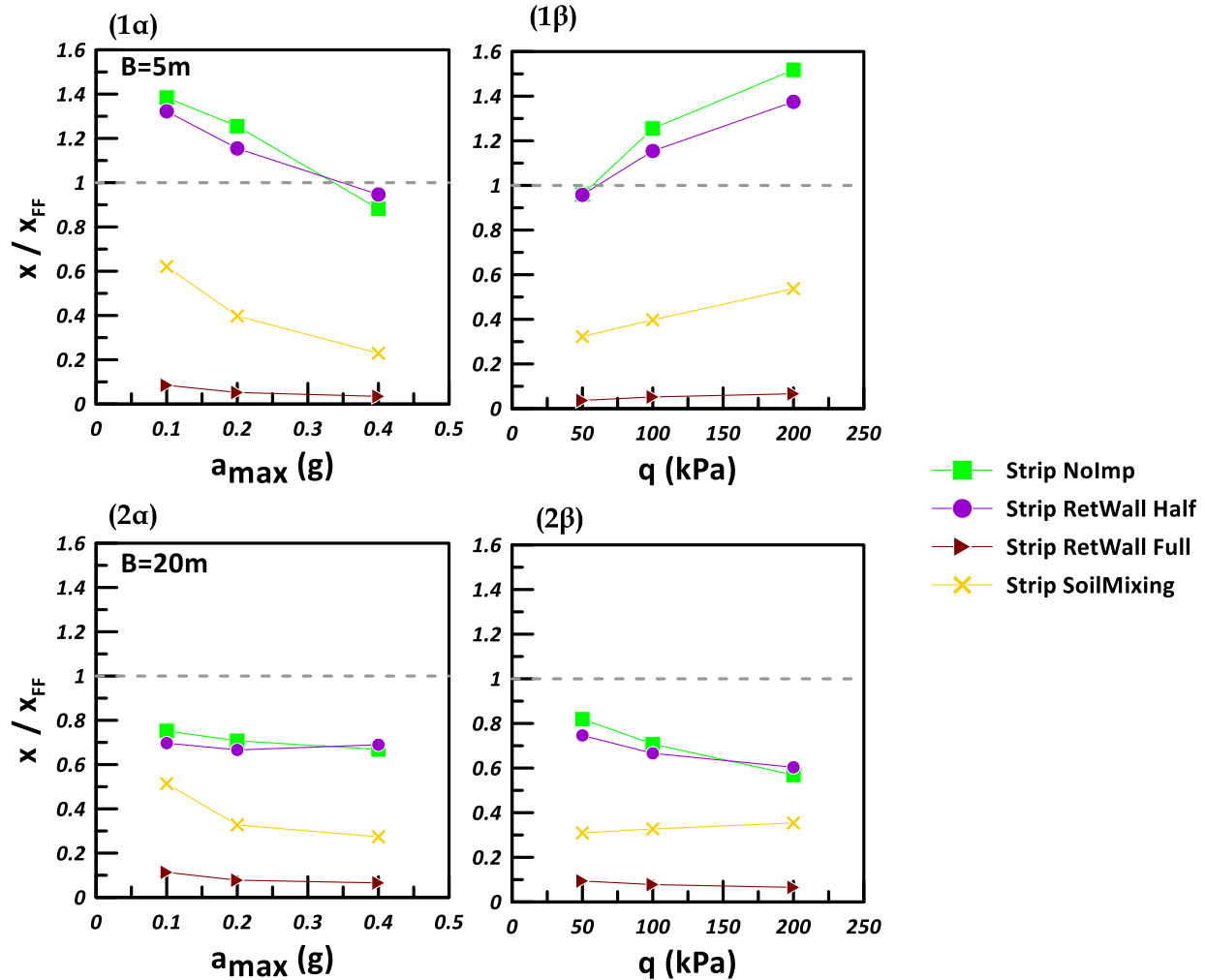
Σχήμα 6.28: Στροφές (προς τα κατόντη) (1) τετραγωνικών θεμελίων (square) και (2) θεμελιολωρίδων (strip), πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  σε μη βελτιωμένη στρώση (NoImp) και σε βελτιωμένη στρώση με περιμετρικούς αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q(kPa)$

## 6.4. Οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων με περιμετρικά τοιχία σε σύγκριση με το ελεύθερο πεδίο

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται οι τιμές της οριζόντιας μετακίνησης των θεμελιολωρίδων  $x$  και τετραγωνικών θεμελίων  $x_{sq}$  πριν και μετά τη βελτίωση με περιμετρικά τοιχία, ως προς τις τιμές της οριζόντιας μετακίνησης στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ . Ο στόχος αυτής της διερεύνησης είναι να διαφανεί ποια η σχέση των τιμών της μετατόπισης των θεμελίων, καθώς η μετατόπιση του εδάφους ( $x_{FF}$ ) μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά από σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. Youd et al. 2002, Valsamis et al. 2010). Συγκεκριμένα, διερευνάται η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης θεμελίου  $x/x_{FF}$  και  $x_{sq}/x_{FF}$ , ενώ μελετάται και η επίδραση των τριών μεθόδων βελτίωσης με περιμετρικά τοιχία στην τιμή των δύο λόγων οριζοντίων μετακινήσεων.

Αρχικώς, στο **Σχήμα 6.29** παρουσιάζεται ο λόγος της κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης  $x/x_{FF}$  της θεμελιολωρίδας (strip) πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$  μετά τη χρήση των περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων στο ήμισυ (RetWall Half) και το πλήρες βάθος (RetWall Full), καθώς και των περιμετρικών τοιχίων αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων πλήρους βάθους (SoilMixing Full). Σε κάθε υπο-σχήμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$ . Προκύπτει ότι η χρήση περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης δεν διαφοροποιεί σημαντικά τις τιμές του λόγου  $x/x_{FF}$  συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος (NoImp). Αντιθέτως, η χρήση περιμετρικών τοιχίων σε όλο το βάθος της εδαφικής στρώσης οδηγεί γενικώς σε τιμές  $x/x_{FF} < 1$ , με την βελτίωση των διαφραγματικών τοιχίων (πλήρους βάθους) σχεδόν να μηδενίζει τον λόγο  $x/x_{FF}$  σε όλες τις περιπτώσεις.

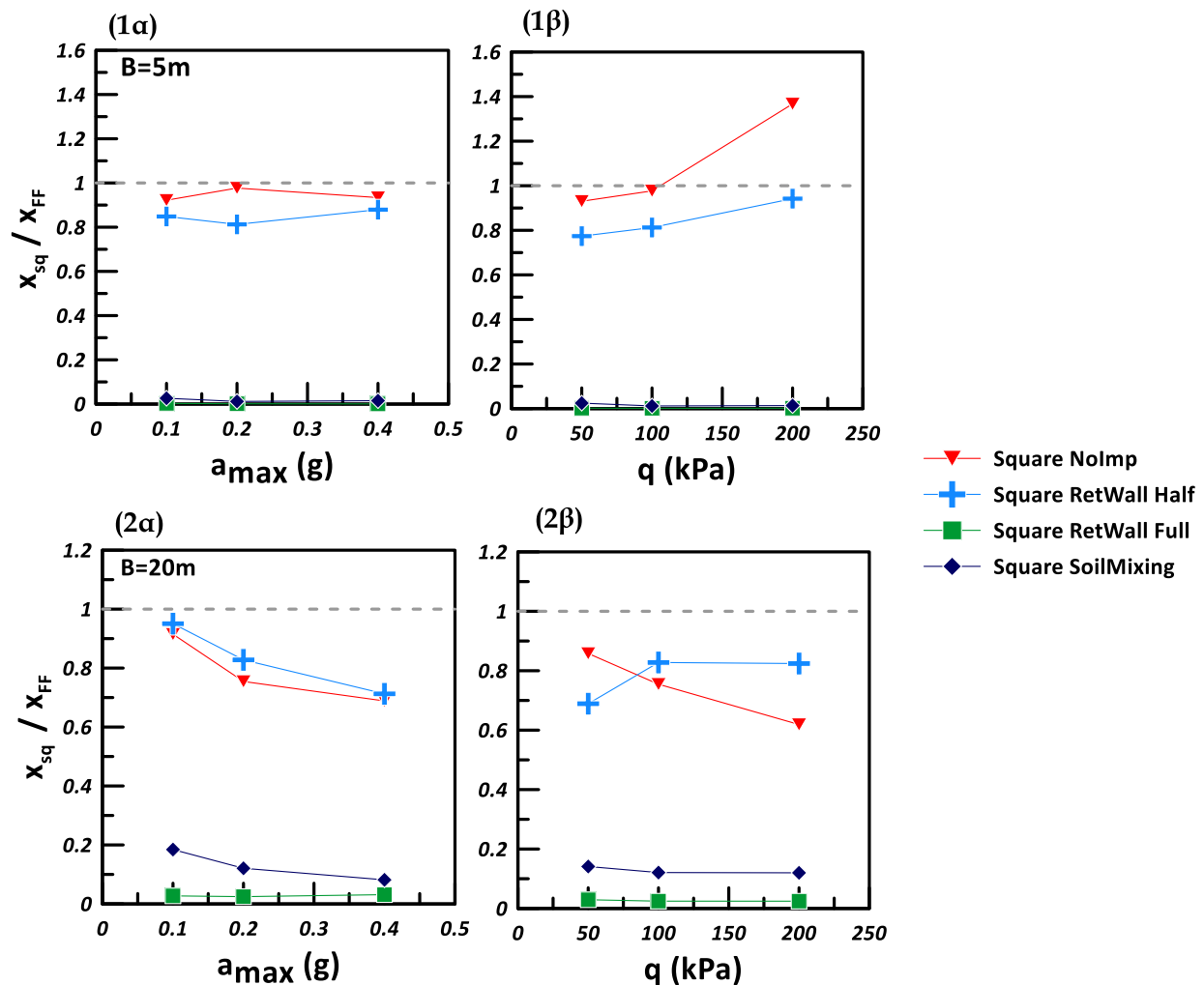




**Σχήμα 6.29:** Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις  $x$  θεμελιολωρίδας (1) πλάτους  $B=5m$ , (2) πλάτους  $B=20m$ , προς εκείνες στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ , σε μη βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full) και τοιχεία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

Στο **Σχήμα 6.30** μελετάται αντίστοιχα ο λόγος της κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης αλλά για το τετραγωνικό θεμέλιο  $x_{sq} / x_{FF}$ , στο μορφότυπο που έχει το **Σχημα 6.29**. Εδώ και πάλι παρατηρείται ότι με τη χρήση περιμετρικών διαφραγματικών τοιχείων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης δεν διαφοροποιούνται σημαντικά τα αποτελέσματα σε σύγκριση με το μη-βελτιωμένο έδαφος (NoImp), ενώ με τη χρήση περιμετρικών

τοιχίων πλήρους βάθους οι τιμές του λόγου  $x_{sq}/x_{FF}$  μειώνονται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση διαφραγματικών τοιχίων αλλά και τοιχίων αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων πλήρους βάθους μηδενίζει τον λόγο  $x_{sq}/x_{FF}$  σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από την περίπτωση τετραγωνικού θεμελίου πλάτους  $B = 20m$  όπου οι αλληλοτεμνόμενοι εδαφοπάσσαλοι έδωσαν τιμές  $x_{sq}/x_{FF} = 0.1-0.2$ .

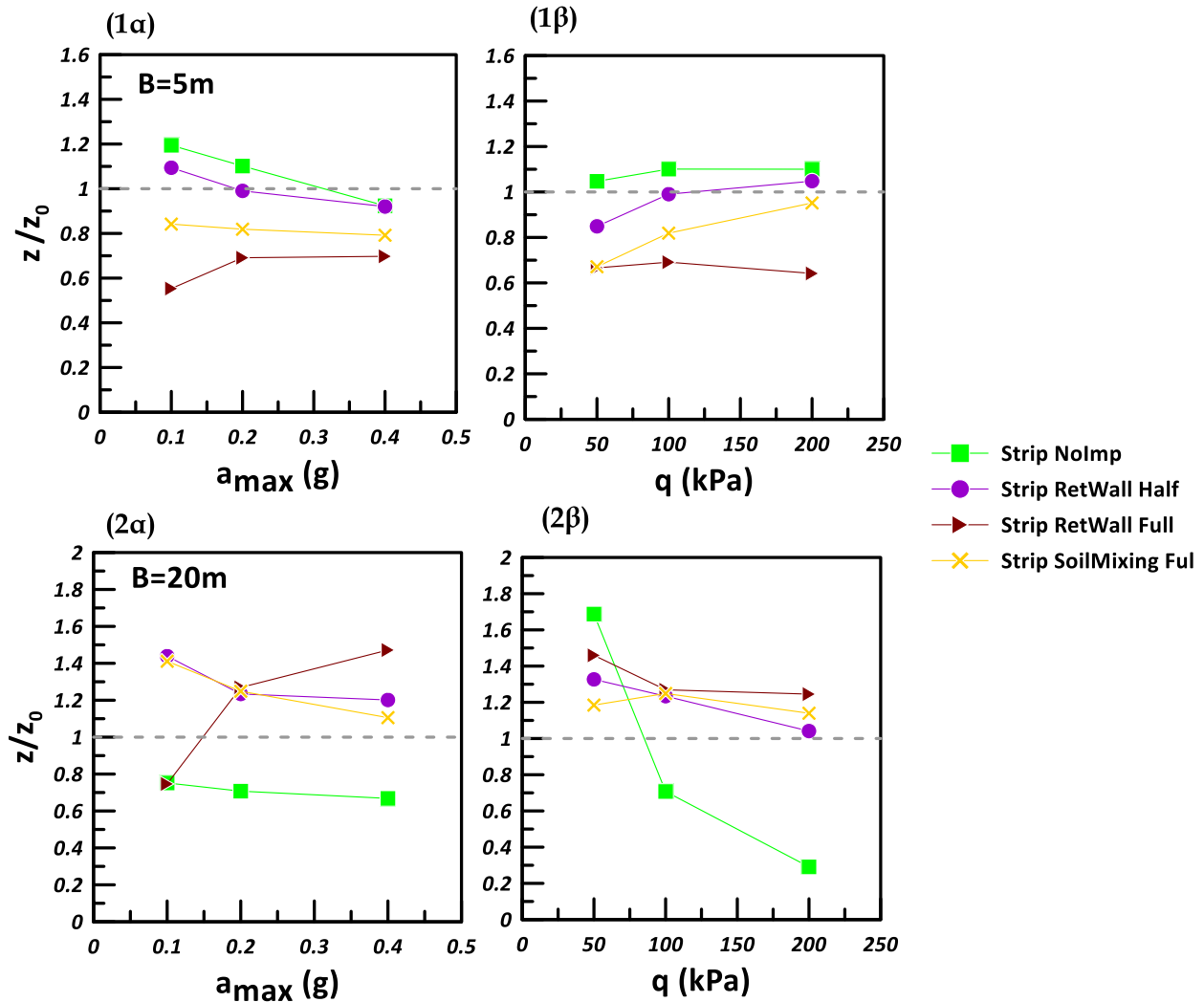


**Σχήμα 6.30:** Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις  $x_{sq}$  τετραγωνικού θεμελίου (1) πλάτους  $B=5m$ , (2) πλάτους  $B=20m$ , προς εκείνες στο ελεύθερο πεδίο  $x_{FF}$ , σε μη βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full) και τοιχεία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ (kPa)

## 6.5. Επίδραση κλίσης εδάφους στην καθίζηση θεμελίων με περιμετρικά τοιχία

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση της κλίσης εδάφους στο λόγο των καθιζήσεων, στο κέντρο του τετραγωνικού θεμελίου (Square)  $z_{sq}$  και της θεμελιολωρίδας (Strip)  $z$  μετά τη χρήση περιμετρικών τοιχίων σε εδαφική στρώση με κλίση  $i=2^\circ$ , ως προς τις αντίστοιχες καθιζήσεις των ίδιων θεμελίων  $z_{sq,0}$  και  $z_0$ , αντίστοιχα, όταν το έδαφος είναι οριζόντιο (κλίση  $i=0^\circ$ ) και έχει υποστεί την ίδια βελτίωση, όπως προέκυψαν από τη Γεωργάκη (2020).

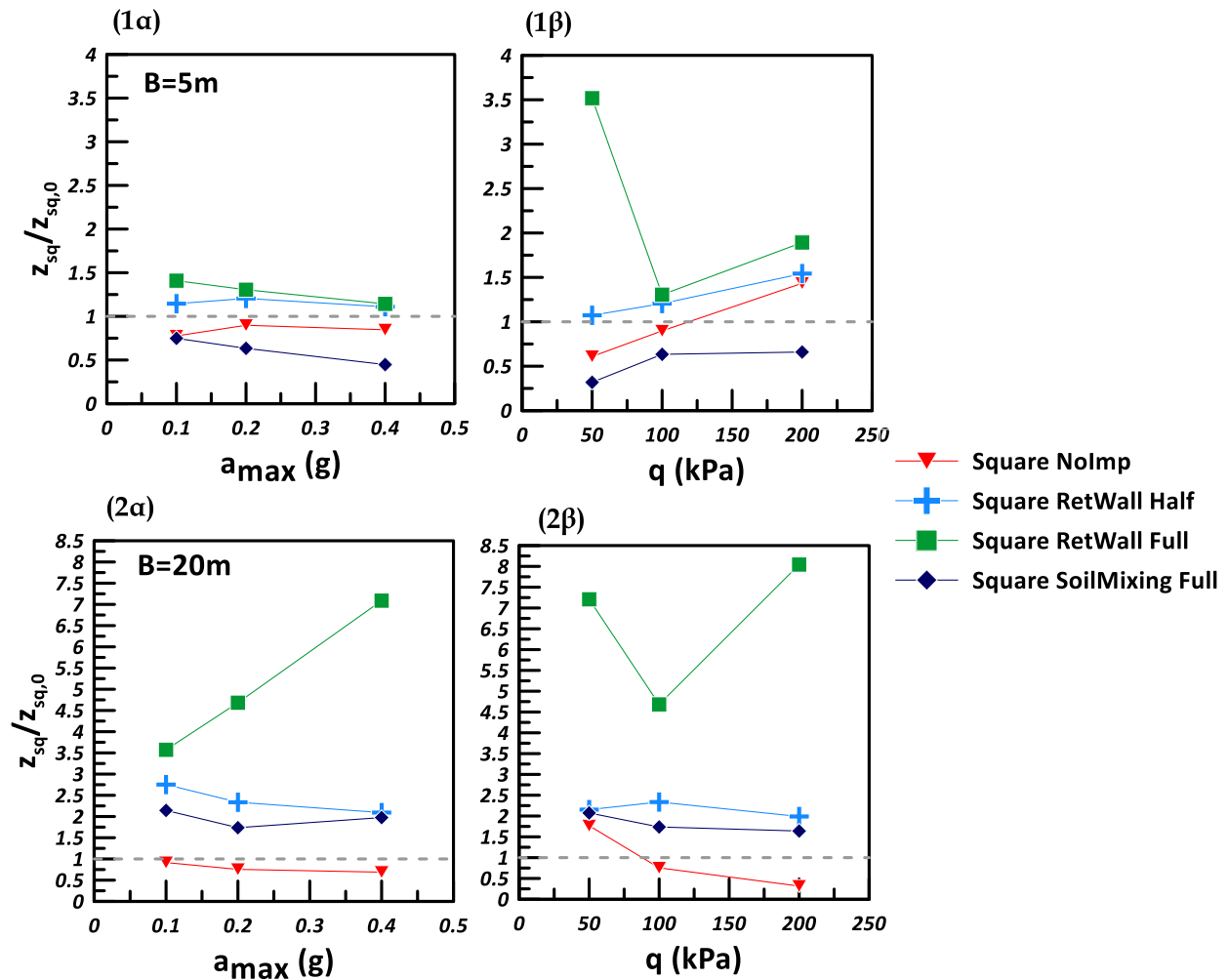
Στο **Σχήμα 6.31** και στα υπο-σχήματα (1) και (2) παρουσιάζονται ξεχωριστά οι επιδράσεις της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  στις τιμές της κανονικοποιημένης καθίζησης  $z/z_0$  της θεμελιολωρίδας (strip) για πλάτος  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , αντίστοιχα. Για το θεμέλιο πλάτους  $B = 5m$  προκύπτει ότι η επίδραση της επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου  $q$  στην κανονικοποιημένη καθίζηση  $z/z_0$  είναι μειωτική και αυξητική, αντίστοιχα, ενώ για το πλατύτερο θεμέλιο ( $B = 20m$ ), η επίδραση των παραμέτρων είναι κατά κύριο λόγο μειωτική. Πιο συγκεκριμένα, για τα τοιχία πλήρους βάθους (RetWall Full και SoilMixing Full) και για θεμέλια με πλάτος  $B = 5m$ , οι λόγοι  $z/z_0$  είναι μικρότεροι της μονάδας. Αυτό σημαίνει ότι, η μέθοδος βελτίωσης είναι πιο αποτελεσματική στη μείωση των καθιζήσεων θεμελιολωρίδων όταν είναι κεκλιμένο το έδαφος ( $i = 2^\circ$ ). Αντίθετα, για θεμέλια με πλάτος  $B = 20m$  οι λόγοι  $z/z_0$  είναι μεγαλύτεροι της μονάδας, δηλαδή η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική όταν είναι οριζόντιο το έδαφος ( $i = 0^\circ$ ). Δεδομένου ότι οι τιμές των καθιζήσεων είναι εν γένει μικρές, οι δύο μέθοδοι με τοιχία πλήρους βάθους έχουν περίπου την ίδια αποτελεσματικότητα ανεξαρτήτως της κλίσης εδάφους.



**Σχήμα 6.31:** Κανονικοποιημένες καθιζήσεις θεμελιολωρίδας  $z$  **(1)** πλάτους  $B=5m$ , **(2)** πλάτους  $20m$ , σε στρώση κλίσης  $i=2^\circ$ , προς εκείνες σε οριζόντιο έδαφος  $z_0$ , σε μη-βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full) και τοιχεία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full) ως συνάρτηση: **(α)** της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , **(β)** το φορτίο του θεμελίου  $q$ (kPa)

Στο **Σχήμα 6.32** μελετάται αντίστοιχα ο λόγος της κανονικοποιημένης καθιζήσης  $z_{sq}/z_{sq,0}$  για τα τετραγωνικά θεμέλια πλάτους  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , στο μορφότυπο που έχει το **Σχήμα 6.31**. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι ο λόγος  $z_{sq}/z_{sq,0}$  σε διαφραγματικούς τοίχους ανεξαρτήτου βάθους είναι εν γένει μεγαλύτερος της μονάδας,

δηλαδή οι μέθοδοι βελτίωσης είναι πιο αποτελεσματικοί στη μείωση των καθιζήσεων όταν δεν υπάρχει κλίση του εδάφους (όταν  $i=0^\circ$ ).



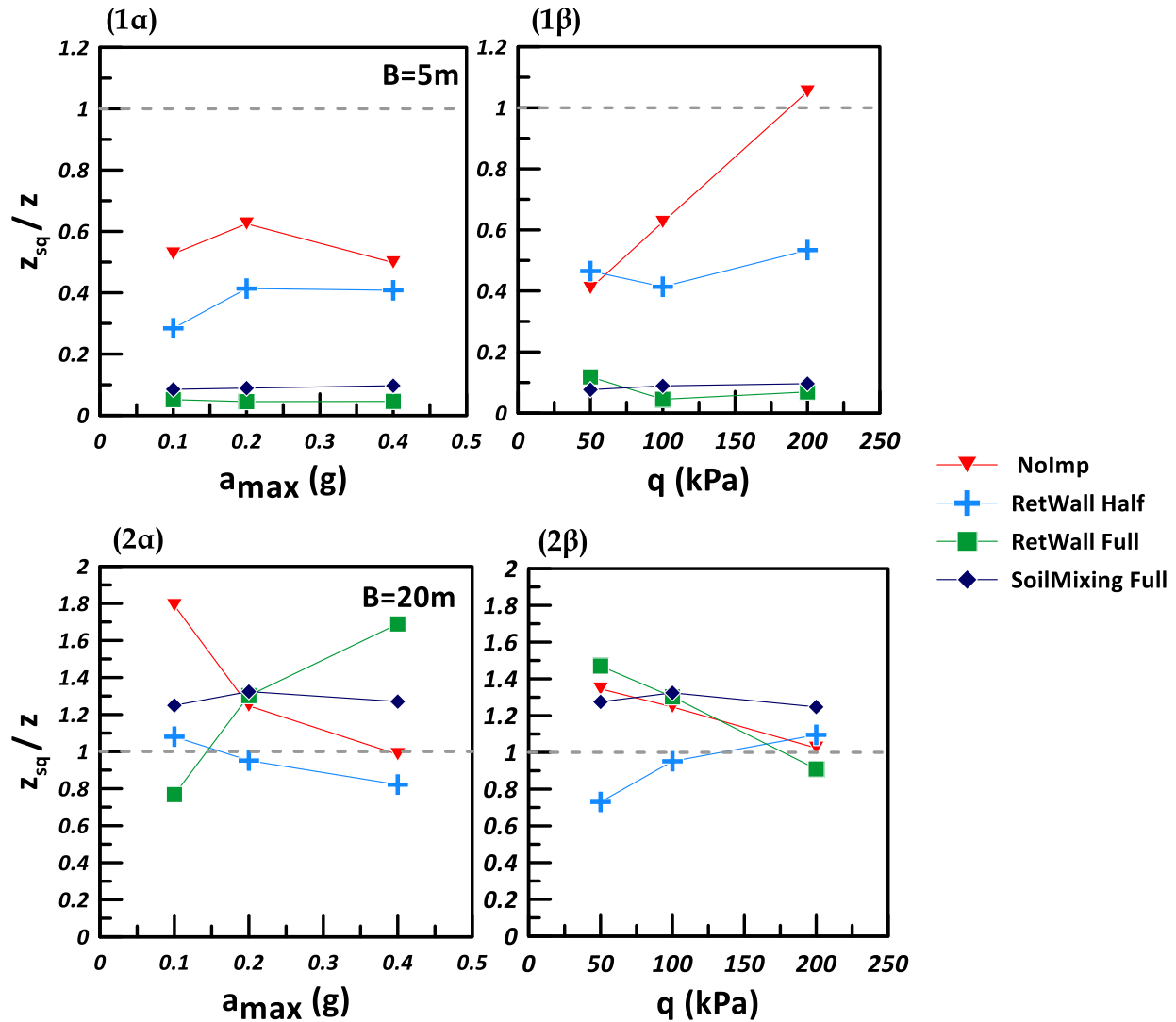
**Σχήμα 6.32:** Κανονικοποιημένες καθιζήσεις τετραγωνικού θεμελίου  $z_{sq}$  (1) πλάτους  $B=5m$ , (2) πλάτους  $20m$ , σε στρώση κλίσης  $i=2^\circ$ , προς εκείνες σε οριζόντιο έδαφος  $z_0$ , σε μη-βελτιωμένη στρώση και σε βελτιωμένη στρώση με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full) και τοίχια από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης  $a_{max}$ , (β) το φορτίο του θεμελίου  $q$ (kPa)

## 6.6. Επίδραση σχήματος θεμελίου στη σεισμική απόκριση τους με περιμετρικά τοιχία

Για να γίνει κατανοητή η επίδραση του σχήματος της θεμελίωσης (θεμελιολωρίδα έναντι τετραγωνικού) στη σεισμική απόκριση μετά την εφαρμογή περιμετρικών τοιχιών, υπολογίστηκε ο λόγος των (κατακόρυφων και οριζόντιων) μετατοπίσεων και στροφών του τετραγωνικού θεμελίου ως προς την αντίστοιχη τιμή της θεμελιολωρίδας ίδιου πλάτους, για την ίδια τιμή μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$  και φορτίου θεμελίου  $q$ . Οι τιμές των μεγεθών για τετραγωνικό θεμέλιο έχουν δείκτη  $s_q$ , που υποδηλώνει το τετραγωνικό σχήμα (square). Χάριν σύγκρισης, θα γίνεται πάντα αναφορά στην τιμή των μεγεθών και στην περίπτωση μη-βελτίωσης (NoImp από το Κεφάλαιο 4).

Στο **Σχήμα 6.33** παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου καθιζήσεων  $z_{sq}/z$  για πλάτος θεμελίου  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , με τα υποσχήματα να παρουσιάζουν ξεχωριστά την επίδραση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ . Προκύπτει ότι το πλάτος του θεμελίου παίζει σημαντικό ρόλο στον λόγο καθιζήσεων  $z_{sq}/z$ , καθώς παίρνει τιμές από 0.05 έως 1.05 για πλάτος θεμελίου  $B = 5m$ , ενώ για  $B = 20m$  οι τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες (από 0.7 έως 1.8). Επιπλέον, για  $B = 5m$ , οι τιμές του λόγου καθιζήσεων μικραίνουν όσο πιο αποτελεσματικά αποδεικνύονται τα τοιχία, αλλά δε συμβαίνει το ίδιο για  $B = 20m$ . Υπογραμμίζεται εδώ ότι η διαφοροποίηση αυτή έχει μικρή πρακτική σημασία, επειδή οι απόλυτες τιμές των καθιζήσεων στην περίπτωση τοποθέτησης τοιχίου πλήρους βάθους είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μικρές.

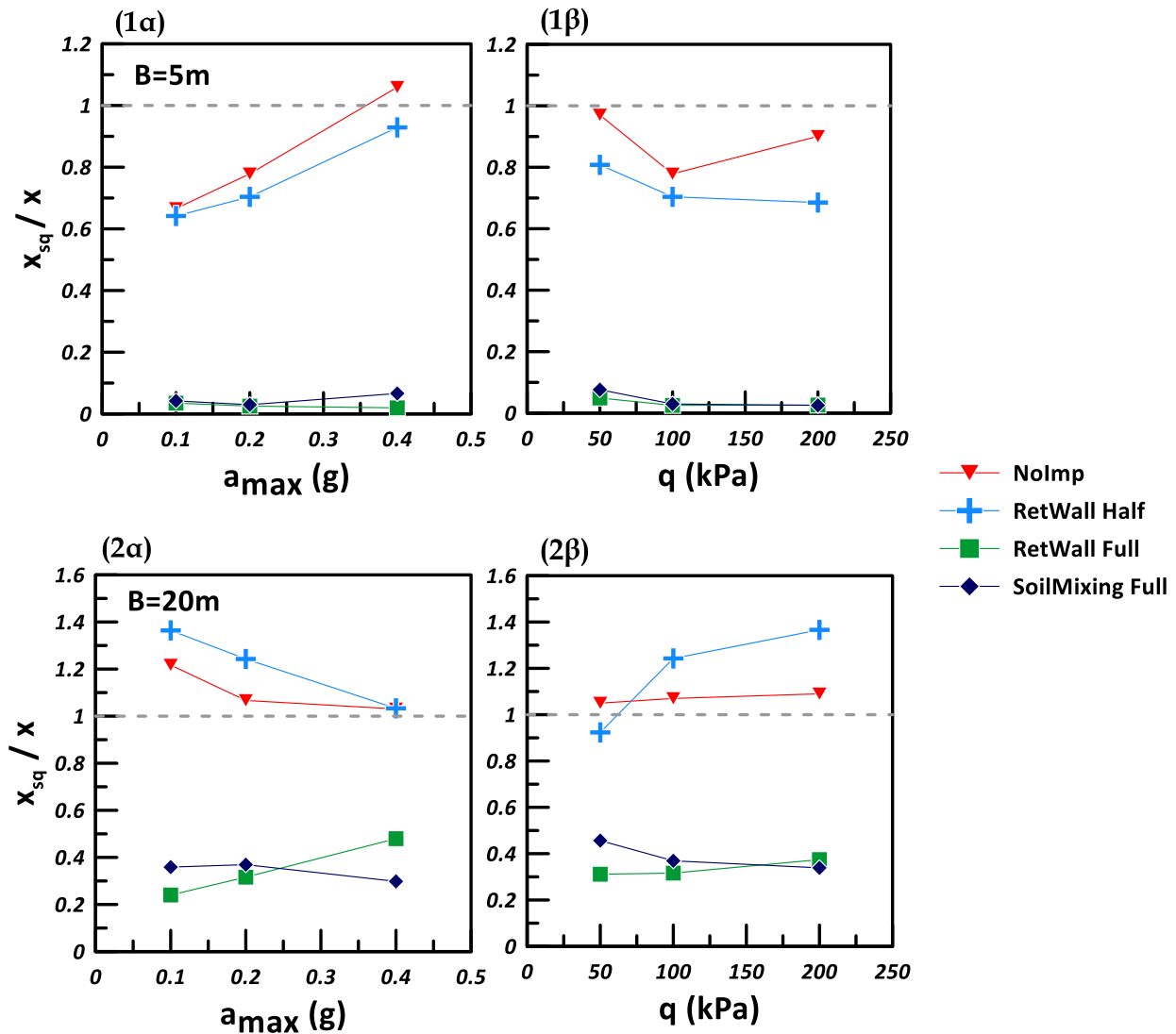
Στο **Σχήμα 6.34** παρουσιάζονται αντίστοιχα οι τιμές του λόγου των οριζόντιων μετακινήσεων του τετραγωνικού θεμελίου ως προς της θεμελιολωρίδας,  $x_{sq}/x$ , για πλάτος θεμελίου  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , με τα υποσχήματα να παρουσιάζουν ξεχωριστά (α) την επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και (β) του φορτίου θεμελίου  $q$ . Ανεξάρτητα από το μέγεθος του θεμελίου, προκύπτει μείωση στο κανονικοποιημένο λόγο  $x_{sq}/x$  με τη χρήση περιμετρικών τοιχιών πλήρους βάθους συγκριτικά με το μη-βελτιωμένο έδαφος (NoImp) και πιο συγκεκριμένα  $x_{sq}/x = 0 - 0.5$  και για τις δύο βελτιώσεις (RetWall Full και SoilMixing Full).



**Σχήμα 6.33:** Λόγος καθιζήσεων τετραγωνικού θεμελίου  $z_{sq}$  ως προς την θεμελιολωρίδα  $z$  (1) πλάτους  $B = 5m$ , (2) πλάτους  $B = 20m$ , σε ρευστοποιήσιμη στρώση με κλίση  $i=2^\circ$  και μετά τη βελτίωση της με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full) και τοιχεία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου του θεμελίου  $q$ (kPa)

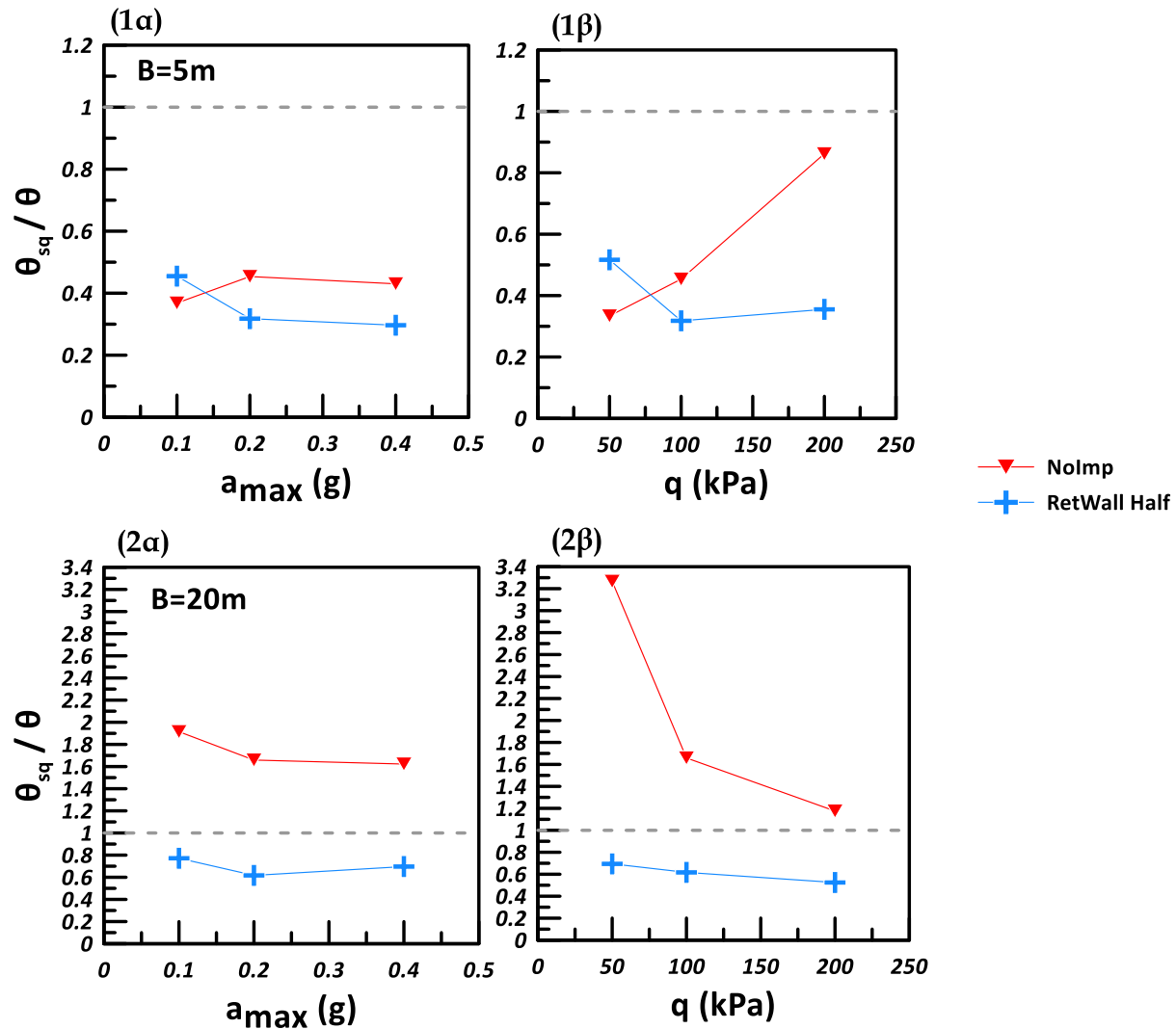
Αντιθέτως, η επίδραση των περιμετρικών διαφραγματικών τοιχείων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half) είναι μειωτική για πλάτος θεμελίου  $B = 5m$  με  $x_{sq}/x = 0.6 - 0.8$  και αυξητική για πλάτος θεμελίου  $B = 20m$ ,  $x_{sq}/x = 0.9 - 1.4$ , αλλά οι διαφορές

αυτές είναι μικρές. Η μεγάλη διαφοροποίηση στις τιμές του λόγου  $x_{sq}/x$  γίνεται από το αν χρησιμοποιούνται τοίχια βάθους 10m ή όχι.



**Σχήμα 6.34:** Λόγος οριζόντιων μετακινήσεων τετραγωνικού θεμελίου  $x_{sq}$  ως προς της θεμελιολωρίδας  $x$  (1) πλάτους  $B = 5m$ , (2) πλάτους  $B = 20m$ , σε ρευστοποίησημε στρώση με κλίση  $i=2^\circ$  και μετά τη βελτίωση της με διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), με διαφραγματικούς τοίχους πλήρους βάθους (RetWall Full) και τοίχια από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full) ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίο του θεμελίου  $q$ (kPa)





**Σχήμα 6.35:** Λόγος στροφών (προς τα κατόντη) τετραγωνικού θεμελίου  $\theta_{sq}$  ως προς της θεμελιολωρίδας  $\theta$  (1) πλάτους  $B = 5m$ , (2) πλάτους  $B = 20m$ , σε ρευστοποιημένη στρώση με κλίση  $i=2^\circ$  και μετά τη βελτίωση της με περιμετρικούς διαφραγματικούς τοίχους στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half), ως συνάρτηση: (α) της μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης  $a_{max}$ , (β) του φορτίου του θεμελίου  $q$ (kPa)

Στο **Σχήμα 6.35** παρουσιάζεται ο λόγος στροφών (προς τα κατόντη) τετραγωνικού θεμελίου  $\theta_{sq}$  ως προς της θεμελιολωρίδας  $\theta$  για πλάτος  $B = 5m$  και  $B = 20m$ , με κάθε υποσχήμα να παρουσιάζει ξεχωριστά τις επιδράσεις της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$ . Ο λόγος των στροφών  $\theta_{sq}/\theta$  για τις δύο μεθόδους βελτίωσης περιμετρικών τοιχείων πλήρους βάθους (RetWall Full και SoilMixing Full) παραλείπονται

καθώς η στροφή, ανεξαρτήτου σχήματος και μεγέθους θεμελίου, είναι περίπου ή ίση με το μηδέν και ο λόγος τους άνευ σημασίας. Για την περίπτωση εφαρμογής διαφραγματικού τοιχίου μέχρι το ήμισυ του βάθους (RetWall Half) από το σχήμα προκύπτει ότι η επίδραση της επιτάχυνσης  $a_{max}$  και του φορτίου θεμελίου  $q$  είναι μειωτική στον κανονικοποιημένο λόγο  $\theta_{sq}/\theta = 0.3 - 0.6$ .

## 6.7. Αποδοτικότητα περιμετρικών τοιχιών στη βελτίωση απόκρισης θεμελίου υπό οριζόντια εξάπλωση

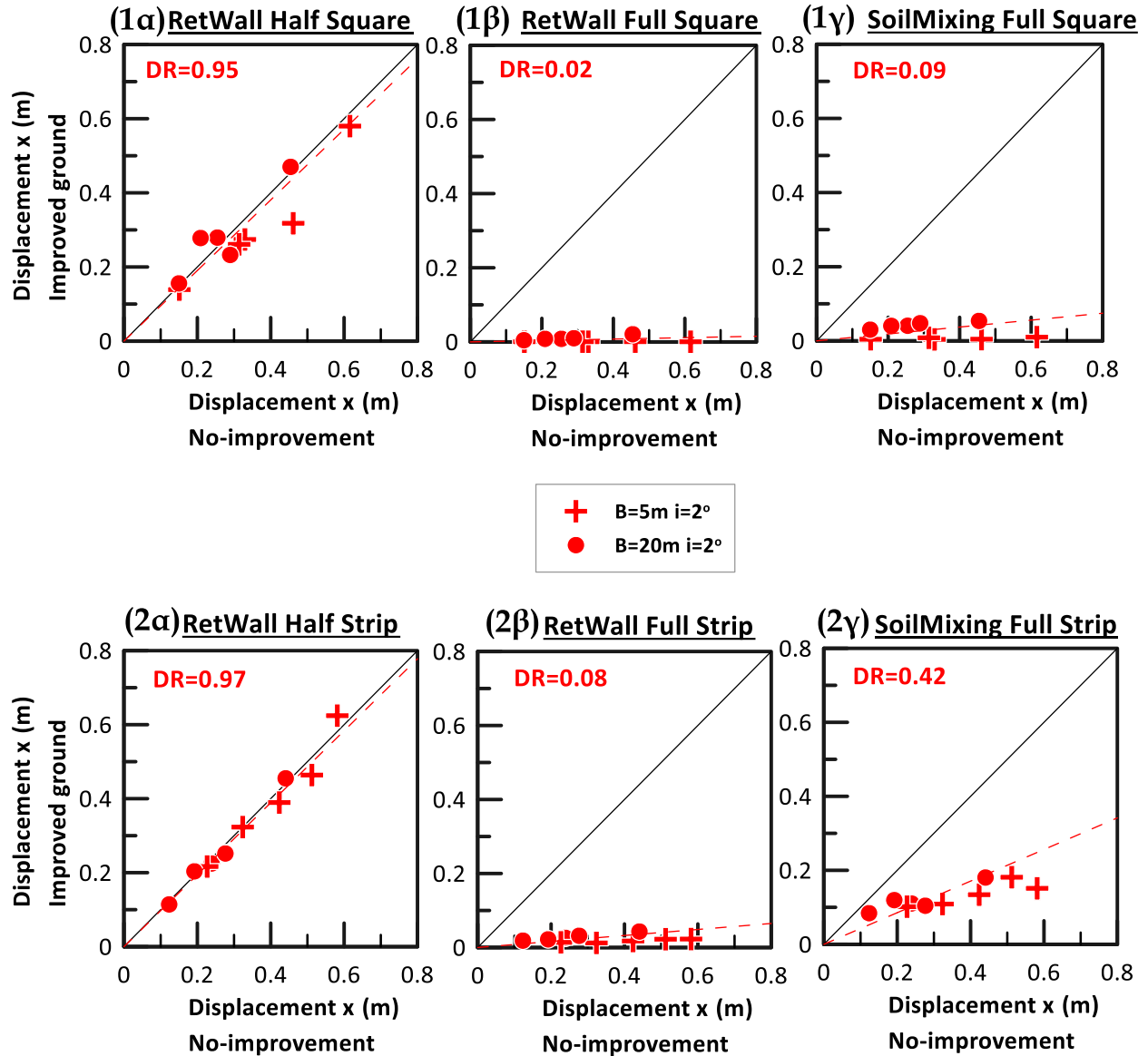
Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα της κάθε διάταξης τοιχιών στη βελτίωση απόκρισης θεμελίου υπό οριζόντια εξάπλωση (λόγω ήπιας κλίσης  $i=2^\circ$ ), παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης της οριζόντιας μετατόπισης, της καθίζησης και της στροφής (προς τα κατάντη) του κάθε θεμελίου πριν και μετά την κάθε διάταξη περιμετρικού τοιχίου. Σε κάθε σχήμα αποτιμάται ένα στοιχείο απόκρισης (οριζόντια μετατόπιση, καθίζηση, ή στροφή) με τα άνω και κάτω υπο-σχήματα να διαχωρίζουν τα αποτελέσματα ανά σχήμα θεμελίου (Τετραγωνικό (Square) άνω και Λωρίδα (Strip) κάτω), αντίστοιχα, ενώ σε κάθε υπο-σχήμα διαφορετικά σύμβολα διαχωρίζουν τα θεμέλια διαφορετικού πλάτους. Ειδικά για τις καθιζήσεις, συμπεριλαμβάνονται αποτελέσματα και για την απόκριση των ιδίων θεμελίων όταν η ρευστοποιήσιμη στρώση είναι οριζόντια (για  $i=0^\circ$ ) από τη Γεωργάκη (2020). Επομένως, τοποθετώντας στον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα κάθε υπο-σχήματος την απόκριση πριν και μετά τη βελτίωση, αντίστοιχα, κάθε σημείο κάτω από την διαγώνιο αντιστοιχεί σε ευμενή απομείωση της απόκρισης, ενώ οποιοδήποτε σημείο πάνω από τη διαγώνιο αντιστοιχεί σε μη-επιθυμητή αύξηση της απόκρισης.

Σε αντιστοιχία με το Κεφάλαιο 5, για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης κάθε διάταξης βελτίωσης, ξεχωριστά για κάθε στοιχείο απόκρισης υπολογίζεται ένα αδιάστατο μέγεθος που ορίζεται ως ο λόγος της απόκρισης του θεμελίου μετά τη βελτίωση προς εκείνη του ίδιου θεμελίου σε μη-βελτιωμένο έδαφος. Συνεπώς, για την οριζόντια μετακίνηση

ορίζεται ο λόγος **DR** (Displacement Ratio), για την καθίζηση ο λόγος **SR** (Settlement Ratio) και για την στροφή (προς τα κατόντη) του θεμελίου ο λόγος **RR** (Rotation Ratio).

Στο **Σχήμα 6.36** παρουσιάζεται η απόδοση των τριών διατάξεων περιμετρικών τοιχίων που εξετάστηκαν για την οριζόντια μετακίνηση. Συγκεκριμένα, τα δύο αριστερά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half), τα δύο μεσαία υπο-σχήματα την απόδοση για περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία πλήρους βάθους (RetWall Full), ενώ τα δύο δεξιά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για περιμετρικά τοιχία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full). Επίσης, μέσα σε κάθε υπο-σχήμα παρουσιάζεται και η μέση τιμή του DR με διακεκομμένη γραμμή, η οποία αναφέρεται και ποσοτικά.

Από το σχήμα προκύπτει ότι πιο αποδοτικό αποδεικνύεται το διαφραγματικό τοιχίο πλήρους βάθους, καθώς αυτό απομειώνει περισσότερο τις οριζόντιες μετακινήσεις με μέσο  $DR = 0.02$  για τετραγωνικό θεμέλιο, έναντι μέσου  $DR = 0.08$  για θεμελιολωρίδα, δηλαδή τιμές σχεδόν μηδενικές. Παρόμοια εικόνα προκύπτει και για τα τοιχία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους με τη βελτίωση του τετραγωνικού θεμελίου να είναι αποτελεσματικότερη από της θεμελιολωρίδας (μέσο  $DR = 0.09$  έναντι  $0.42$ ). Αντιθέτως, οι διατάξεις περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της ρευστοποιήσιμης στρώσης δεν βελτιώνουν την απόκριση του θεμελίου ως προς τις οριζόντιες μετατοπίσεις, καθώς τα μέσα  $DR = 0.95$  για τετραγωνικό θεμέλιο και  $DR = 0.97$  για θεμελιολωρίδα.

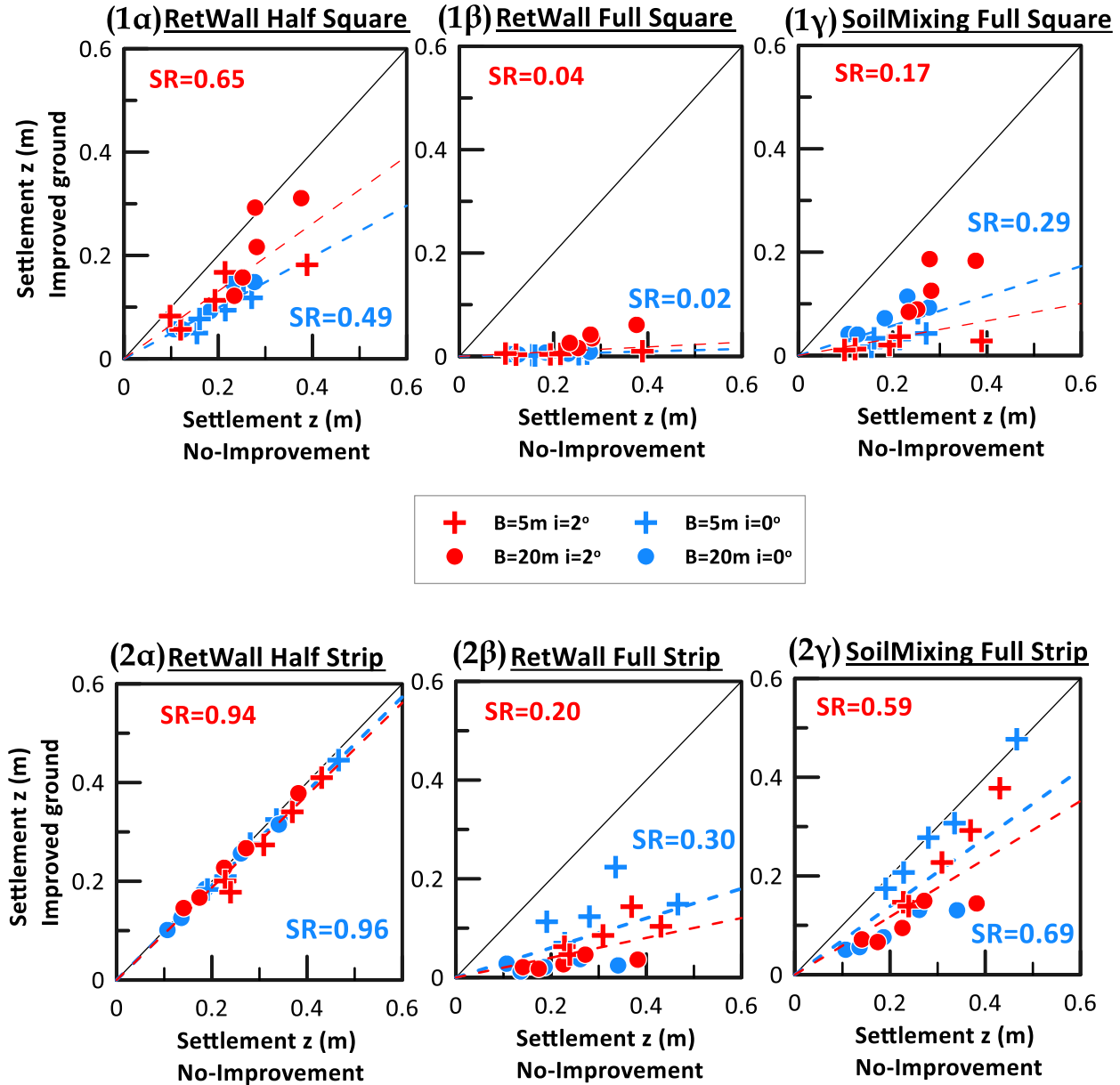


Σχήμα 6.36: Απόδοση περιμετρικών (α) διαφραγματικών τοιχίων στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half, αριστερά), (β) διαφραγματικών τοιχίων πλήρους βάθους (RetWall Full, μέση) και (γ) τοιχίων αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων πλήρους βάθους (SoilMixing Full, δεξιά), στη μείωση οριζόντιων μετακινήσεων (1) τετραγωνικών θεμελίων (2) θεμελιολωρίδων πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  υπό αρμονικές διεγέρσεις με  $a_{max}=0.10-0.40g$  και φορτία θεμελίων  $q=50-200kPa$

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6.37** παρουσιάζεται η απόδοση των τριών διατάξεων περιμετρικών τοιχίων που εξετάστηκαν στη μείωση των καθιζήσεων. Όπως και πριν, τα δύο αριστερά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half), τα δύο μεσαία υπο-σχήματα την απόδοση για περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία πλήρους βάθους (RetWall Full), ενώ τα δύο δεξιά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για περιμετρικά τοιχία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full). Σε κάθε υπο-σχήμα παρουσιάζεται και η μέση τιμή του SR με διακεκομμένη γραμμή.

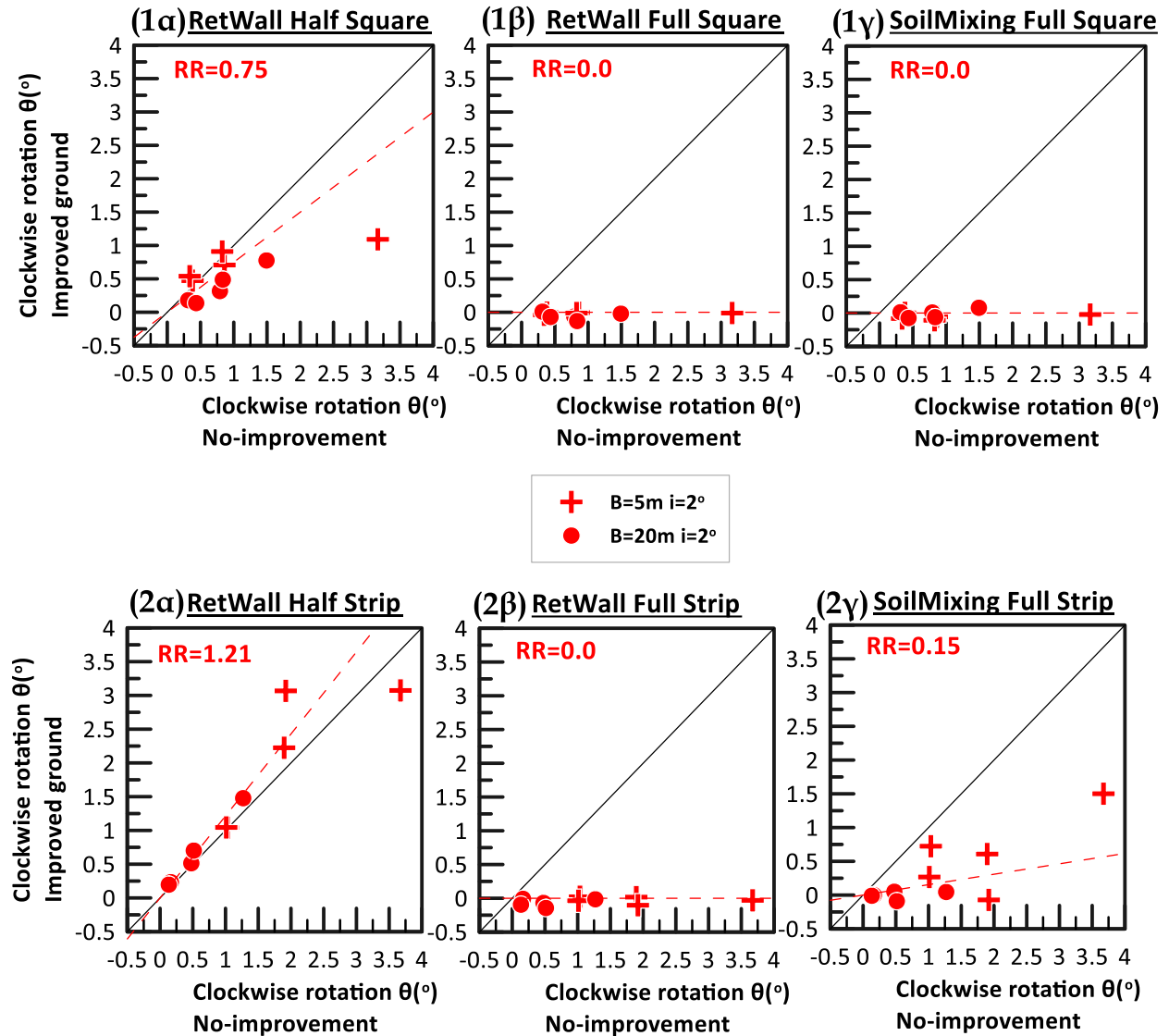
Παρατηρείται ότι στα τετραγωνικά θεμέλια οι διαφραγματικοί τοίχοι πλήρους βάθους απομειώνουν σημαντικά τις καθιζήσεις του θεμελίου και όταν υπάρχει κλίση ( $SR = 0.04$ ) αλλά και όταν το έδαφος είναι οριζόντιο ( $SR = 0.02$ ). Παρόμοια εικόνα προκύπτει και με τη χρήση αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων πλήρους βάθους με ελαφρώς μεγαλύτερη αποδοτικότητα όταν υπάρχει ήπια κλίση ( $SR = 0.17$ ) συγκριτικά με το οριζόντιο έδαφος ( $SR = 0.29$ ). Πολύ λιγότερο αποδοτική είναι η εφαρμογή διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης με μέσο συντελεστή  $SR = 0.65$ , ενώ προκύπτει ότι στο οριζόντιο έδαφος είναι σχετικά πιο αποτελεσματική με  $SR = 0.49$ .

Αντίστοιχα, για τις θεμελιολωρίδες δεν προκύπτει καμία βελτίωση με τη χρήση περιμετρικών διαφραγματικών τοιχίων μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης ( $SR = 0.94$  για έδαφος με ήπια κλίση και  $SR = 0.96$  για οριζόντιο έδαφος). Αντιθέτως, οι περιμετρικοί τοίχοι πλήρους βάθους απομειώνουν σημαντικά τις καθιζήσεις και είναι ελαφρώς πιο αποδοτικοί όταν υπάρχει ήπια κλίση, απ' ό,τι όταν το έδαφος είναι οριζόντιο. Συγκεκριμένα, για διαφραγματικό τοιχίο πλήρους βάθους προκύπτει μέσο  $SR = 0.20$  για έδαφος με ήπια κλίση και  $SR = 0.30$  για οριζόντιο έδαφος, ενώ για τοιχίο από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους το μέσο  $SR = 0.59$  για έδαφος με ήπια κλίση και  $SR = 0.69$  για οριζόντιο έδαφος.



**Σχήμα 6.37:** Απόδοση περιμετρικών (α) διαφραγματικών τοιχείων στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half, αριστερά), (β) διαφραγματικών τοιχείων πλήρους βάθους (RetWall Full, μέση) και (γ) τοιχείων αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων πλήρους βάθους (SoilMixing Full, δεξιά), στη μείωση καθιζήσεων (1) τετραγωνικών θεμελίων (2) θεμελιολωρίδων πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  υπό αρμονικές διεγέρσεις με  $a_{max}=0.10-0.40g$  και φορτία θεμελίων  $q=50-200kPa$

Τέλος, στο **Σχήμα 6.38** παρουσιάζεται η απόδοση των τριών διατάξεων περιμετρικών τοιχίων που εξετάστηκαν στη μείωση της στροφής (προς τα κατάντη) των τετραγωνικών θεμελίων και των θεμελιολωρίδων. Αντίστοιχα με πριν, τα δύο αριστερά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης (RetWall Half), τα δύο μεσαία υπο-σχήματα την απόδοση για περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία πλήρους βάθους (RetWall Full), ενώ τα δύο δεξιά υπο-σχήματα αποτυπώνουν την απόδοση για περιμετρικά τοιχία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους πλήρους βάθους (SoilMixing Full). Επίσης, σε κάθε υπο-σχήμα παρουσιάζεται η μέση τιμή του RR με διακεκομμένη γραμμή. Προκύπτει ότι η χρήση περιμετρικών τοιχίων πλήρους βάθους έχει ικανοποιητική απόδοση, με τα τετραγωνικά θεμέλια να μηδενίζουν τις στροφές τους, ενώ για τις θεμελιολωρίδες να προκύπτει μηδενισμός στροφών αν το τοιχίο είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και μείωση έως  $RR = 0.15$  αν κατασκευάζεται από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπάσσαλους. Επιπλέον παρατηρείται ότι τα περιμετρικά τοιχία μέχρι το μέσο της ρευστοποιήσιμης στρώσης δεν είναι το ίδιο αποδοτικά, καθώς απομειώνουν ελαφρώς τις στροφές στα τετραγωνικά θεμέλια (μέσο  $RR = 0.75$ ), ενώ αντίθετως στη θεμελιολωρίδα τις αυξάνει ελαφρώς (μέσο  $RR = 1.21$ ).



**Σχήμα 6.38:** Απόδοση περιμετρικών (α) διαφραγματικών τοιχίων στο ήμισυ του βάθους (RetWall Half, αριστερά), (β) διαφραγματικών τοιχίων πλήρους βάθους (RetWall Full, μέση) και (γ) τοιχίων από αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασάλων πλήρους βάθους (SoilMixing Full, δεξιά), στη μείωση (προς τα κατάντη) στροφών (1) τετραγωνικών θεμελίων (2) θεμελιολωρίδων πλάτους  $B=5m$  και  $20m$  υπό αρμονικές διεγέρσεις με  $a_{max}=0.10-0.40g$  και φορτία θεμελίων  $q=50-200kPa$

Συγκρίνοντας την απόδοση κάθε διάταξης περιμετρικών τοιχίων για θεμελιολωρίδα και τετραγωνικά θεμέλια προκύπτει ότι τα περιμετρικά διαφραγματικά τοιχεία μέχρι το μέσο της εδαφικής στρώσης συστηματικά δεν αποδίδουν στη μείωση των οριζόντιων και



κατακόρυφων μετακινήσεων ( $DR = 0.94 - 0.97$ ,  $SR = 0.49 - 0.96$ ), ενώ στις στροφές υπό συνθήκες έχουν έως και αρνητική επιρροή ( $RR = 0.75 - 1.25$ ).

Η εφαρμογή των περιμετρικών τοιχίων αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων απομειώνει τις οριζόντιες μετακινήσεις θεμελίων ( $DR = 0.09$  για τετραγωνικά έως  $DR = 0.42$  για λωρίδα) και τις καθιζήσεις θεμελίων ( $SR = 0.17$  για τετραγωνικά έως  $SR = 0.59$  για λωρίδα) και σχεδόν μηδενίζει τις στροφές του θεμελίου ( $RR = 0.0$  για τετραγωνικά έως  $RR = 0.15$  για λωρίδα).

Τέλος, προκύπτει ότι τα περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία πλήρους βάθους σχεδόν μηδενίζουν τις οριζόντιες ( $DR = 0.02$  για τετραγωνικά έως  $DR = 0.08$  για λωρίδα) και κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους ( $SR = 0.04$  για τετραγωνικά έως  $SR = 0.2$  για λωρίδα). Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στις στροφές του θεμελίου, όπου προκύπτει μηδενισμός των στροφών.

Συμπερασματικά, από τις αναλύσεις προκύπτει ότι οι διατάξεις περιμετρικών τοιχίων πλήρους βάθους είχαν τη μεγαλύτερη βελτίωση στην απόκριση του θεμελίου και πιο συγκεκριμένα με τα περιμετρικά διαφραγματικά τοιχία πλήρους βάθους καθώς οι συντελεστές  $DR$ ,  $SR$  και  $RR$  προσέγγισαν το μηδέν. Αν και η απόκριση και των δύο διατάξεων πλήρους βάθους είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, η χρήση τοιχίων από οπλισμένο σκυρόδεμα πλήρους βάθους είναι προτιμητέα. Επίσης, τα περιμετρικά τοιχία μικρότερου βάθους δεν αποτελούν μια δόκιμη επιλογή βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης σε συνθήκες οριζόντιας εξάπλωσης καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις δεν αποδίδουν. Τέλος, ένα ακόμη ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι η απόδοση όλων των ειδών τοιχίων είναι καλύτερη στα τετραγωνικά θεμέλια απ' ό τι στις θεμελιολωρίδες, και αυτό υπογραμμίζει τη σαφώς ευεργετική λειτουργία του εγκάρσιου τοιχίου στα τετραγωνικά θεμέλια που δεν υπάρχει στις θεμελιολωρίδες.

## Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα - Προτάσεις

### 7.1. Τελικά συμπεράσματα

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία είναι τα ακόλουθα:

#### Θεμέλια σε ρευστοποιήσιμο έδαφος (μη-βελτιωμένο)

- Η ήπια κλίση του εδάφους προκαλεί οριζόντια μετατόπιση του εδάφους, η οποία συμπαρασύρει εν μέρει και τα θεμέλια. Συγκεκριμένα, η οριζόντια μετατόπιση του θεμελίου προκύπτει πάντα μικρότερη από αυτή του ελεύθερου πεδίου στα πλατύτερα θεμέλια ( $B = 20\text{m}$ ), αλλά όχι πάντα στα στενότερα ( $B = 5\text{m}$ ) όπου μπορεί και να αυξηθεί συγκριτικά, ειδικά στις θεμελιολωρίδες. Η μεταβολή της οριζόντιας μετατόπισης στη γειτονιά των θεμελίων φθίνει με την απόσταση από αυτά.
- Κατά τη διάρκεια της οριζόντιας εξάπλωσης προκύπτουν και καθιζήσεις των θεμελίων. Συγκριτικά με τις καθιζήσεις που θα είχε το ίδιο θεμέλιο υπό την ίδια διέγερση αν η εδαφική στρώση ήταν οριζόντια, οι καθιζήσεις κατά την οριζόντια εξάπλωση προκύπτουν συνήθως μικρότερες στα πλατύτερα θεμέλια ( $B = 20\text{m}$ ), αλλά όχι πάντα στα στενότερα ( $B = 5\text{m}$ ) όπου μπορούν και να είναι συγκριτικά μεγαλύτερες, ειδικά στις θεμελιολωρίδες.
- Το σχήμα των θεμελίων (τετραγωνικό ή λωρίδα) παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκρισή τους υπό οριζόντια εξάπλωση. Συνοπτικά, οι οριζόντιες μετατοπίσεις, καθιζήσεις και στροφές τετραγωνικών θεμελίων προκύπτουν μικρότερες εκείνων των θεμελιολωρίδων όταν το πλάτος τους είναι μικρό ( $B = 5\text{m}$ ). Αντιθέτως, όταν το πλάτος των θεμελίων είναι μεγάλο ( $B = 20\text{m}$ ), οι οριζόντιες μετατοπίσεις, καθιζήσεις και στροφές τετραγωνικών θεμελίων προκύπτουν μεγαλύτερες εκείνων των θεμελιολωρίδων.

Θεμέλια με πλαστικά στραγγιστήρια

- Η εφαρμογή καννάβου στραγγιστηρίων απομειώνει τις οριζόντιες μετατοπίσεις θεμελίων (22% για τετραγωνικά έως 44% για λωρίδες), και ακόμη περισσότερο τις καθιζήσεις (38% για τετραγωνικά και έως 68% για λωρίδες), αλλά αυξάνει τις προς τα κατάντη στροφές (120% για τετραγωνικά και 48% για λωρίδες). Αντίθετα, η εφαρμογή περιμετρικών στραγγιστηρίων απομειώνει ελάχιστα τις οριζόντιες μετατοπίσεις θεμελίων (κατά 7 - 8%), αλλά δεν επηρεάζει ή και αυξάνει τις καθιζήσεις τους, ενώ έχει μη-συστηματική επίδραση στις στροφές (τις αυξάνει σε τετραγωνικά και τις μειώνει στις λωρίδες).
- Συνοπτικά, η εφαρμογή πλαστικών στραγγιστηρίων μειώνει τις οριζόντιες μετατοπίσεις και καθιζήσεις θεμελίων, αλλά αυξάνει, εν γένει, τις προς τα κατάντη στροφές αυτών. Ειδικότερα, η εφαρμογή καννάβου στραγγιστηρίων είναι περισσότερο αποτελεσματική από τα περιμετρικά στραγγιστήρια, καθώς μειώνει συγκριτικά περισσότερο τις οριζόντιες μετατοπίσεις και τις καθιζήσεις (ειδικά θεμελιολωρίδων), αλλά όχι και τις προς τα κατάντη στροφές τους. Όμως, η εφαρμογή καννάβου στραγγιστηρίων είναι πολύ δυσχερής, αν όχι αδύνατη, σε υφιστάμενες κατασκευές. Συνεπώς, η χρήση πλαστικών στραγγιστηρίων σε οποιαδήποτε διάταξη δεν κρίνεται αποτελεσματική μέθοδος βελτίωσης.

Θεμέλια με περιμετρικά τοιχία

- Η εφαρμογή τοιχίων σκυροδέματος μέχρι το ήμισυ του βάθους της ρευστοποιήσιμης στρώσης δεν προσφέρουν ουσιώδη βελτίωση στην απόκριση του θεμελίου. Συγκεκριμένα, οι οριζόντιες μετακινήσεις μειώνονται ελάχιστα (3 - 5%), οι καθιζήσεις ελαφρώς (6 - 35%), ενώ οι προς τα κατάντη στροφές μειώνονται στο τετραγωνικό θεμέλιο, αλλά αυξάνουν στη θεμελιολωρίδα.
- Αντίθετα, η εφαρμογή τοιχίων σκυροδέματος σε όλο το βάθος της ρευστοποιήσιμης είναι εξαιρετικά αποτελεσματική στη βελτίωση της απόκρισης του θεμελίου. Συγκεκριμένα, οι οριζόντιες μετατοπίσεις σχεδόν μηδενίζονται

(μείωση κατά 92 - 98%), όπως και οι προς τα κατάντη στροφές, ενώ και οι καθιζήσεις μειώνονται πολύ σημαντικά (κατά 80 - 96%).

- Ταυτόχρονα, η εφαρμογή τοιχίων από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους σε όλο το βάθος της ρευστοποιήσιμης στρώσης είναι αποτελεσματικότερη στη βελτίωση της απόκρισης του θεμελίου, αλλά συγκριτικά ελαφρώς λιγότερο απ' ό τι αν ο ίδιος τοίχος ήταν από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, οι οριζόντιες μετατοπίσεις μειώνονται σημαντικά (κατά 58 - 91%), όπως και οι καθιζήσεις (κατά 41 - 83%), ενώ προκύπτει σημαντική μείωση και στις προς τα κατάντη στροφές (κατά 85 - 100%).

Η ύπαρξη εγκάρσιου περιμετρικού τοιχίου στα τετραγωνικά θεμέλια λειτουργεί ευεργετικά, καθώς προκύπτει μεγαλύτερη βελτίωση στην απόκρισή τους συγκριτικά με τις θεμελιολωρίδες ίδιου πλάτους, κι αυτό ισχύει και για τους 3 δείκτες της απόκρισης (οριζόντιες μετατοπίσεις, καθιζήσεις και στροφές).

Συμπερασματικά, μόνο τα περιμετρικά τοιχία (διαφραγματικοί τοίχοι, τοιχία από αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους) σε όλο το βάθος της ρευστοποιήσιμης στρώσης εξασφαλίζουν σημαντική βελτίωση της απόκρισης των θεμελίων σε καθεστώς οριζόντιας εξάπλωσης. Αντιθέτως, περιμετρικά τοιχία περιορισμένου βάθους από οποιοδήποτε υλικό κατασκευής δεν κρίνονται ως αποτελεσματική μέθοδος βελτίωσης.

## 7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

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

- Εδώ έγινε έλεγχος της απόκρισης τετραγωνικών θεμελίων και θεμελιολωρίδων με  $B = 5m$  και  $20m$ , όπου η συμπεριφορά τους παρουσίασε σημαντική διαφοροποίηση. Συνεπώς, θα ήταν χρήσιμη η διερεύνηση της συμπεριφοράς θεμελιώσεων με ενδιάμεσες τιμές πλάτους, π.χ.  $B = 10m$  για ρευστοποιήσιμη στρώση ίσου πάχους.
- Για την επαλήθευση των μέχρι τώρα συμπερασμάτων, σημαντικός θα ήταν ο έλεγχος θεμελίων εδραζόμενων σε διαφορετικά πάχη ρευστοποιήσιμης άμμου. Η

(για τα ίδια θεμέλια), ή και ο έλεγχος θεμελίων όπου η ίδια ρευστοποιήσιμη στρώση βρίσκεται σε κάποιο μικρό βάθος, δηλαδή υπάρχει επιφανειακά μια ρευστοποιήσιμη στρώση.

- Ειδικά για τα περιμετρικά τοιχία που προκύπτουν ιδιαίτερα αποτελεσματικά προτείνεται μια λεπτομερέστερη ανάλυσή τους, με ακριβέστερη αριθμητική προσομοίωση του υλικού κατασκευής τους, καθώς και της διεπιφάνειας τους με το περιβάλλον ρευστοποιήσιμο έδαφος. Στόχος αυτής της ανάλυσης θα είναι η λεπτομερέστερη επιβεβαίωση (ή μη) των ήδη εκτελεσμένων αναλύσεων.

## Βιβλιογραφία

Adalier K., Elgamal A., Meneses J., Baez J. (2003). "Stone Columns as Liquefaction Countermeasure in Non-Plastic Silty Soils", *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 23, No 7, pp. 571-584.

Andrianopoulos KI, Papadimitriou AG, Bouckovalas GD. (2010). "Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geotechnical structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 10, pp. 895-911

Arulmoli, K., Muraleetharan, K., Hossain, M., & Fruth, L. (1992). "VELACS: Verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; laboratory testing - Soil Data Report", Technical Report Prepared for National Science Foundation, The Earth Technology Corporation, Irvine, CA.

Boulanger, R. W., Mejia, L., & Idriss, I. (1997). "Liquefaction at Moss Landing during Loma Prieta earthquake", Vol. 123 *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*.

Chaloulos Y. (2012): "Numerical investigation of pile response under liquefaction and ground lateral spreading" PhD thesis, School of Civil Engineering, NTUA

Cubrinovski M., Robinson K., Taylor M., Hughes M. (2012), "Lateral Spreading and its impacts in urban areas in the 2010-2011 Christchurch earthquakes", Article in *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, pp. 255-269

Dashti, S., Bray, J., Pestana, M., Riemer, M., & Wilson, D. (2010), "Mechanisms of Seismically Induced Settlement of Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 918-929.

Dimitrios Karamitros (2010): "Development of a Numerical Algorithm for The Dynamic Elastoplastic Analysis of Geotechnical Structures in Two and Three Dimensions", Diploma Thesis, School of Civil Engineering, NTUA

Georgaki E. (2020): "Effectiveness of methods mitigating seismic liquefaction under existing square structures on horizontal ground" Diploma Thesis, School of Civil Engineering, NTUA

Graham B. (2010), "Soil Mechanics - Principles and practice", Palgrave MacMillan, third edition

Itasca (2019), *FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions*, Ver. 6.0. Minneapolis: Itasca

- Kazakis G. (2020): "Efficiency of liquefaction mitigation methods under existing elongated structures on mildly inclined ground" Master Thesis, School of Civil Engineering, NTUA
- Marinucci A., Rathje E., Kano S., Kamai R., Conlee C., Howell R., Boulanger R., Gallagher P. (2008), "Certifuge Testing of Prefabricated Vertical Drains for Liquefaction Remediation", *Geotechnical Earthquake and Soil Dynamics IV*, pp. 1-10
- Mitrani H., Madabhushi S. (2012), "Rigid Containment Walls for Liquefaction Remediation". *Journal of Earthquake and Tsunami Vol.6, No.4* 1250017
- Olson S., Green R., Lasley S., Rathje E. (2011), "Documenting Liquefaction and Lateral Spreading Triggering by the 12 January 2010 Haiti Earthquake", *Article in Earthquake Spectra, Vol. 27*, pp.93-116
- Papadimitriou, A., & Bouckovalas, G. (2002), "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.22, No.3*, pp.191-204
- Paramasivam B., Dashti S., Liel A. (2018), "Influence of Prefabricated Vertical Drains on the Seismic Performance of Structures Founded on Liquefiable Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , Vol.144, No. 10, 04018070
- Valsamis A., Bouckovalas G., Papadimitriou A. (2010), "Parametric investigation of lateral spreading of gently sloping liquefied ground", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, pp. 490-508.
- Yoshimi, Y., & Tokimatsu, K. (1977), "Settlement of Buildings on saturated sand during earthquakes", *Soils and Foundations Vol. 17, No. 1*, pp.23-38
- Youd L., Hansen C., Bartlett S. (2002). Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering* 128 (12), pp.1007-1017