



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΝ ΥΠΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

ΒΑΣΙΛΙΚΗ Ι. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπων: **ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ**, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ – ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

.....

Βασιλική Ι. Εμμανουήλ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Copyright © Βασιλική Ι. Εμμανουήλ, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στην χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Επιβλέπων Καθηγητής

Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Εξεταστική Επιτροπή

Μιχαήλ Καββαδάς, Καθηγητής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αχιλλέας Παπαδημητρίου, Επίκουρος Καθηγητής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το τέλος εκπόνησης της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που με βοήθησαν σε όλο το διάστημα πραγματοποίησης της εργασίας.

Αρχικά, οφείλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, τον κ. Γεώργιο Μπουκοβάλα, Καθηγητή ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να συνεργαστώ με έναν αξιόλογο άνθρωπο και επιστήμονα, για την διερεύνηση ενός πολύ ενδιαφέροντος θέματος. Τον ευχαριστώ θερμά για το διαρκές ενδιαφέρον, την συνεχή και εξαιρετικά χρήσιμη καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια διερεύνησης του θέματος της παρούσας εργασίας. Επίσης, τον ευχαριστώ πολύ για την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές που μου πρόσφερε όλο αυτό το διάστημα.

Ακόμη, επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τους κ. Αλέξανδρο Βαλσαμή, κ. Γιάννη Τσιάπα, Διδάκτορες ΕΜΠ, κ. Ταξιαρχούλα Λημναίου και κ. Κωνσταντίνο Μπαζαίο, Υποψήφιους Διδάκτορες ΕΜΠ, για την μεγάλη προθυμία να μου προσφέρουν την βοήθειά τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη και βαθιά ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου, καθώς η διαρκής κατανόηση, συμπαράσταση και ενθάρρυνσή της, στάθηκαν πολύτιμη βοήθεια στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

Βασιλική Εμμανουήλ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	5
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7
1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ Naesgaard et al. (1998).....	9
2.1 ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	9
2.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	10
2.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	12
2.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΘΙΖΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ.....	16
2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ.....	18
2.6 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΚΥΡΙΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).....	21
3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (Karamitros et al., 2013a).....	21
3.1.1 Αριθμητική μεθοδολογία.....	22
3.1.2 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων.....	23
3.1.3 Συσσώρευση καθιζήσεων.....	27
3.1.4 Μείωση της φέρουσας ικανότητας μετά την σεισμική διέγερση.....	29
3.1.5 Επίδραση της αδράνειας της ανωδομής.....	30
3.1.6 Κύρια ευρήματα.....	31
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ (Karamitros et al., 2013b).....	33
3.2.1 Αριθμητική μεθοδολογία.....	33
3.2.2 Αξιολόγηση των σεισμικών καθιζήσεων.....	35
3.2.3 Δημιουργία γραφημάτων σχεδιασμού.....	39

3.2.4 Κύρια ευρήματα.....	41
3.2.5 Αξιολόγηση μεθοδολογίας.....	42
3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ (Karamitros et al., 2013c).....	44
3.3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	45
3.3.2 Χαρακτηριστική τιμή του "ενιαίου" λόγου υπερπίεσης πόρων U.....	47
3.3.3 Αναλυτικός υπολογισμός του "ενιαίου" λόγου υπερπίεσης πόρων U.....	50
3.3.4 Κρίσιμο πάχος της αργιλικής στρώσης.....	54
3.3.5 Κύρια ευρήματα.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	59
4.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ Naesgaard et al. (1998).....	59
4.2 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ.....	62
4.2.1 Συγκριτική παρουσίαση των παραμέτρων που καθορίζουν την προβλεπόμενη καθίζηση.....	63
4.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση της επιρροής των <u>ανεξάρτητων</u> μεταβλητών υπολογισμού της καθίζησης.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	74
5.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	75
5.1.1 Υπό μελέτη παράμετροι και σχέσεις υπολογισμού εδαφικών παραμέτρων.....	76
5.1.2 Βασική περίπτωση και παραμετρικές αναλύσεις.....	79
5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	81
5.2.1 Επίδραση μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης, α_{max}	83
5.2.2 Επίδραση πάχους αργιλικής στρώσης, H_{crust} (H_{crust}/B).....	88
5.2.3 Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, Z_{liq} (Z_{liq}/B).....	92
5.2.4 Επίδραση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργιλικής στρώσης, c_u	96
5.2.5 Επίδραση αρχικής σχετικής πυκνότητας ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, D_r	101
5.2.6 Επίδραση μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης, q	106
5.3 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	122
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	122
6.1.1 Ποιοτική σύγκριση των μεθόδων.....	122
6.1.2 Ποσοτική σύγκριση των μεθόδων.....	123
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	132

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση δύο μεθόδων πρόβλεψης της σεισμικής καθίζησης επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται σε μια συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου. Οι μέθοδοι που διερευνώνται είναι η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) και η μέθοδος των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).

Στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας ιδιόμορφες σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για την προσομοίωση του ρευστοποιημένου εδάφους, από τις οποίες προέκυψε γραφική (υπό μορφή διαγράμματος) συσχέτιση μεταξύ της καθίζησης της θεμελίωσης και του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα μετά την ρευστοποίηση F_s (ή X_s), ο οποίος υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μια απλή εξίσωση. Στην μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις, από τις οποίες προέκυψε μια απλοποιημένη αναλυτική μεθοδολογία, υπό μορφή αναλυτικών σχέσεων, για την εκτίμηση της μετασεισμικής μειωμένης φέρουσας ικανότητας $q_{ult,deg}$ επιμήκων και ορθογωνικών θεμελίων, και των αντίστοιχων σεισμικών καθιζήσεων ρ_{dyn} .

Και στις δύο μεθόδους, η προβλεπόμενη καθίζηση ρ συσχετίζεται με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση (F_s ή FS_{deg}), ο οποίος υπολογίζεται με βάση έναν σύνθετο μηχανισμό αστοχίας που συνίσταται από μια επιφάνεια διατμητικής αστοχίας εντός της αργιλικής στρώσης, η οποία διεισδύει εντός της βαθύτερης ρευστοποιημένης στρώσης άμμου. Οι δύο μέθοδοι υιοθετούν μια κοινή προσέγγιση όσον αφορά στην συμβολή του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της αργιλικής στρώσης, ενώ διαφοροποιούνται στην προσέγγιση υπολογισμού της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης λόγω της συμβολής του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της ρευστοποιημένης άμμου.

Για την συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων, σε πρώτο βήμα, αξιοποιήθηκε το διάγραμμα υπολογισμού της καθίζησης που παρέχει η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998), ώστε να διατυπωθούν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης που να εκφράζουν την εν λόγω μέθοδο. Με βάση πλέον τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, αρχικά, πραγματοποιήθηκε η ποιοτική σύγκριση των μεθόδων.

Στην συνέχεια, έγινε η ποσοτική σύγκριση των δύο μεθόδων, πραγματοποιώντας παραμετρικές αναλύσεις. Συγκεκριμένα, σε πρώτο βήμα, διερευνήθηκε η επίδραση των υπό μελέτη παραμέτρων στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας (F_s και FS_{deg}) και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Στην συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων, δημιουργήθηκαν γραφήματα σύγκρισης του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των δύο μεθόδων ($FS_{deg,Naesgaard} - FS_{deg,Karamitros}$), και γραφήματα σύγκρισης της προβλεπόμενης καθίζησης ($\rho_{stat,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$), από τα οποία προέκυψαν συμπεράσματα που αφορούν συνολικά στην σύγκριση των αντίστοιχων μεταβλητών μεταξύ των δύο μεθόδων.

ABSTRACT

In this thesis, a comparative assessment of two methods which predict the seismic settlement of shallow foundation on a cohesive clay crust over liquefiable sand soil is performed. The methods under investigation, are the method of Naesgaard et al. (1998) and the method of Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).

The method of Naesgaard et al. (1998) was developed on the basis of static and dynamic numerical analyses using stress-strain relationships for the liquefied soil, resulting in graphic (in the form of diagram) correlation between foundation settlement and post-liquefaction factor of safety against bearing failure F_s (or X_s), and a simple equation for the calculation of the above factor of safety. The method of Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) was developed on the basis of dynamic numerical analyses, resulting in a simplified analytical methodology, in the form of analytical equations, for the computation of the post-shaking degraded bearing capacity $q_{ult,deg}$ of strip and rectangle footings, and the corresponding seismic settlements ρ_{dyn} .

In both methods, the predicted settlement ρ is correlated with the post-liquefaction factor of safety against bearing failure (F_s or FS_{deg}), which is computed based on a composite failure mechanism. This composite failure mechanism consists of a punching shear failure within the clay crust, forcing failure to extend into the underlying liquefied sand layer. The two methods inherit a common approach regarding the contribution of the failure mechanism activated within the clay crust, while they follow different approaches to compute the degraded bearing capacity of foundation due to the contribution of the failure mechanism activated within the liquefied sand.

As a first step for the comparative assessment of the two methods, the diagram of settlement computation provided by the method of Naesgaard et al. (1998) was utilized, with the purpose of formulating analytical relations for the computation of settlement which express this method. Based on the analytical relations for the computation of settlement resulting from the two methods, initially, the qualitative comparison of the two methods was performed.

Subsequently, the quantitative comparison of the two methods was attained, performing parametric analyses. Particularly, firstly, the effect of problem parameters on values of factor of safety (F_s and FS_{deg}) and settlement ρ resulting from the two methods was investigated. Then, based on the results obtained from all parametric

analyses, graphs were made showing the comparison of factor of safety values between the two methods ($FS_{deg,Naesgaard} - FS_{deg,Karamitros}$), and the comparison of settlement values ($\rho_{stat,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$). From these graphs conclusions were extracted regarding the comparison of the respective variables between the two methods.

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα ρευστοποιήσιμα εδάφη ανήκουν στην κατηγορία των ακραίων εδαφικών συνθηκών με βάση τους σεισμικούς κώδικες, στα οποία η κατασκευή επιφανειακών θεμελιώσεων επιτρέπεται απαραίτητα μόνο μετά από ειδικές μελέτες και βελτίωση του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης που επιφέρει η ρευστοποίηση, συντελεί σε αστοχία σε φέρουσα ικανότητα μετά την σεισμική διέγερση και σε υπερβολική συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων. Έτσι, πρέπει να εξασφαλίζεται ασφαλής σχεδιασμός της θεμελίωσης μέσω της βελτίωσης του εδάφους, της αποστράγγισης ή της κατασκευής πασσάλων θεμελίωσης που μεταφέρουν τα φορτία σε βαθύτερες, μη ρευστοποιήσιμες στρώσεις. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί, ότι μια μη ρευστοποιήσιμη κρούστα εδάφους με επαρκές πάχος και διατμητική αντίσταση, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στην θεμελίωση και στο ρευστοποιήσιμο έδαφος, μπορεί να μετριάσει αποτελεσματικά τις επιβλαβείς συνέπειες της ρευστοποίησης και να οδηγήσει σε επαρκώς ασφαλή θεμελίωση και ικανοποιητική απόκριση της θεμελίωσης (Karamitros et al., 2013a).

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση δύο μεθόδων πρόβλεψης της σεισμικής καθίζησης επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται σε εδαφικό προφίλ που συνίσταται από μια απολύτως συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου. Οι μέθοδοι που διερευνώνται είναι η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) και η μέθοδος των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).

Η έρευνα των Naesgaard et al. (1998) επιδιώκει την ανάπτυξη μιας βελτιωμένης διαδικασίας για τον σχεδιασμό επιφανειακών θεμελιώσεων ελαφρών κτιρίων που εδράζονται υπό τις ανωτέρω συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας ιδιόμορφες σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για την προσομοίωση του ρευστοποιημένου εδάφους, από τις οποίες προέκυψε: (α) συσχέτιση μεταξύ της καθίζησης της θεμελίωσης και του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα μετά την ρευστοποίηση F_s (ή X_s), και (β) μια απλή σχέση υπολογισμού του ανωτέρω συντελεστή ασφαλείας. Με αυτό τον τρόπο διαπιστώθηκε, η ευμενής επιρροή της συνεκτικής εδαφικής κρούστας στην απόκριση

της θεμελίωσης, διότι συμβάλλει στην αύξηση της μετασεισμικής φέρουσας ικανότητάς της και την μείωση της σεισμικής καθίζησης.

Στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) διερευνήθηκε η σεισμική απόκριση επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται στο εν λόγω εδαφικό προφίλ. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις, αρχικά επιδιώκοντας την διερεύνηση των μηχανισμών που καθορίζουν την σεισμική απόκριση των υπό μελέτη θεμελιώσεων. Ακολούθως, προτάθηκε μια απλοποιημένη αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της μετασεισμικής μειωμένης φέρουσας ικανότητας $q_{ult,deg}$ επιμήκων και ορθογωνικών θεμελίων, και των αντίστοιχων σεισμικών καθιζήσεων ρ_{dyn} . Τελικά, διαπιστώθηκε και εδώ, ότι η ύπαρξη της μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης που υπάρχει φυσικά ή δημιουργείται τεχνητά, μετριάζει τα δυσμενή αποτελέσματα της ρευστοποίησης και επιτρέπει τον σχεδιασμό επιφανειακών θεμελιώσεων χωρίς την λήψη πρόσθετων βελτιωτικών μέτρων.

Και στις δύο μεθόδους, η προβλεπόμενη καθίζηση ρ συσχετίζεται με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση (F_s ή FS_{deg}), και ο εν λόγω συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται με βάση έναν σύνθετο μηχανισμό αστοχίας που συνίσταται από μια επιφάνεια διατμητικής αστοχίας εντός της αργιλικής στρώσης, η οποία διεισδύει εντός της βαθύτερης ρευστοποιημένης στρώσης άμμου. Οι δύο μέθοδοι υιοθετούν μια κοινή προσέγγιση όσον αφορά στην συνιστώσα του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της αργιλικής στρώσης. Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης λόγω αυτής της συνιστώσας, οι κοινές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u) και το πάχος της αργιλικής στρώσης (Z_c ή H).

Ωστόσο, οι δύο μέθοδοι διαφοροποιούνται όσον αφορά στην προσέγγιση υπολογισμού της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης λόγω της συνιστώσας του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της ρευστοποιημένης άμμου. Συγκεκριμένα, στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) η μειωμένη φέρουσα ικανότητα υπολογίστηκε, θέτοντας για την ρευστοποιημένη άμμο γωνία τριβής $\varphi = 0$ και συνοχή ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους ($c_u = \tau_{RES}$). Μια διαφορετική, περισσότερο σύνθετη μεθοδολογία, ακολουθήθηκε στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c). Σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε ένας "ενιαίος" λόγος υπερπίεσης πόρων $U = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,o}}$ που αναπτύσσεται σε όλη την ρευστοποιημένη στρώση, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε μετά για να υπολογιστεί μια μειωμένη γωνία τριβής φ_{deg} για την ρευστοποιημένη άμμο ως συνάρτηση της πραγματικής γωνίας τριβής φ .

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), οι οποίες αφορούν στην πρόβλεψη της σεισμικής καθίζησης επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται σε εδαφικό προφίλ που συνίσταται από μια απολύτως συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου.

Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας, σε πρώτο βήμα, αξιοποιήθηκε το διάγραμμα υπολογισμού της καθίζησης που παρέχει η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998), ώστε να διατυπωθούν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης που να εκφράζουν την στατική και την δυναμική ανάλυση της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998). Το πρώτο αυτό βήμα ήταν αναγκαίο για την συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων, δεδομένου ότι ο υπολογισμός των καθιζήσεων κατά Naesgaard et al. (1998) γίνεται με την βοήθεια διαγραμμάτων υπολογισμού και όχι αναλυτικών σχέσεων όπως στους Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).

Με βάση πλέον τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, αρχικά, πραγματοποιήθηκε η ποιοτική σύγκριση των μεθόδων, εντοπίζοντας σε καθεμιά τις παραμέτρους που καθορίζουν την προβλεπόμενη καθίζηση και πραγματοποιώντας ποιοτική διερεύνηση της επιρροής της κάθε παραμέτρου.

Στην συνέχεια, έγινε η ποσοτική σύγκριση των δύο μεθόδων πραγματοποιώντας παραμετρικές αναλύσεις. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που επιδρούν στην προβλεπόμενη καθίζηση των δύο μεθόδων, σε πρώτο βήμα, διερευνήθηκε η επίδραση της κάθε παραμέτρου στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας (F_s και FS_{deg}) και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Στην συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων, δημιουργήθηκαν γραφήματα σύγκρισης του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των δύο μεθόδων ($FS_{deg,Naesgaard} - FS_{deg,Karamitros}$), και γραφήματα σύγκρισης της προβλεπόμενης καθίζησης ($\rho_{stat,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$), από τα οποία προέκυψαν συμπεράσματα που αφορούν συνολικά στην σύγκριση των αντίστοιχων μεταβλητών μεταξύ των δύο μεθόδων.

1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία αποτελείται από έξι Κεφάλαια. Το *Κεφάλαιο 1* περιλαμβάνει την Εισαγωγή, στην οποία περιγράφεται το θέμα, ο σκοπός και η δομή της παρούσας εργασίας. Στα *Κεφάλαια 2 και 3* περιγράφονται οι μέθοδοι των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), αντίστοιχα. Στα *Κεφάλαια 4 και 5* πραγματοποιείται η ποιοτική και η ποσοτική σύγκριση αντίστοιχα των μεθόδων που διερευνώνται. Τέλος, στο *Κεφάλαιο 6* συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση του θέματος και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

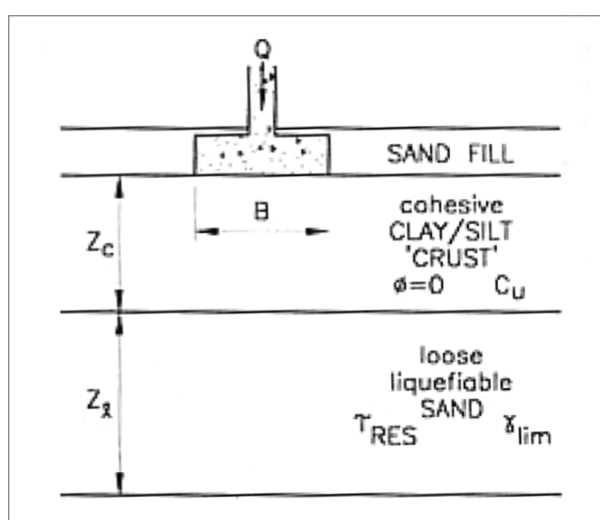
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ Naesgaard et al. (1998)

Σε πολλές σεισμογενείς περιοχές, ελαφρές κατασκευές συχνά εδράζονται σε μια συνεκτική (αργιλική ή ιλυώδη) εδαφική κρούστα υπερκείμενη χαλαρής άμμου, η οποία έχει την τάση να ρευστοποιείται κατά την διάρκεια ισχυρής σεισμικής διέγερσης. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η έρευνα των Naesgaard et al. (1998), η οποία επιδιώκει την ανάπτυξη μιας βελτιωμένης διαδικασίας για τον σχεδιασμό επιφανειακών θεμελιώσεων ελαφρών κτιρίων που εδράζονται υπό τις ανωτέρω συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας ιδιόμορφες σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για την προσομοίωση του ρευστοποιημένου εδάφους, από τις οποίες προέκυψε: (α) συσχέτιση μεταξύ της καθίζησης της θεμελίωσης και του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα μετά την ρευστοποίηση, και (β) μια απλή σχέση υπολογισμού του ανωτέρω συντελεστή ασφαλείας. Με αυτό τον τρόπο διαπιστώθηκε, η ευμενής επιρροή της συνεκτικής εδαφικής κρούστας στην απόκριση της θεμελίωσης, διότι συμβάλλει στην αύξηση της μετασεισμικής φέρουσας ικανότητάς της και την μείωση της σεισμικής καθίζησης.

2.1 ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Οι βασικές παράμετροι για τον σχεδιασμό της θεμελίωσης είναι, το επιτρεπόμενο φορτίο θεμελίωσης και η επιτρεπόμενη καθίζηση. Αυτές οι παράμετροι είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των εξής: διαστάσεις θεμελίου, πάχος και διατμητική αντοχή συνεκτικής κρούστας, παραμένουσα αντοχή, μέτρο διάτμησης και πάχος ρευστοποιημένης στρώσης, χαρακτηριστικά σεισμικής διέγερσης, χρονική έναρξη ρευστοποίησης, κλίση εδάφους, τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά, μετάδοση υπερπίεσης πόρων, στράγγιση. Η έρευνα των Naesgaard et al. (1998), αφορά σε συνεχή επιμήκη θεμέλια (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), τα οποία εδράζονται σε επίπεδο έδαφος, και το εδαφικό προφίλ συνίσταται από μια συνεκτική κρούστα υπερκείμενη μιας συνεχούς ρευστοποιημένης εδαφικής στρώσης (Σχήμα 2.1).

Με σκοπό την αξιολόγηση της απόκρισης της θεμελίωσης σε ρευστοποίηση, πραγματοποιήθηκαν τόσο στατικές όσο και δυναμικές αναλύσεις με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών *FLAC*, ο οποίος προσφέρεται για την ανάλυση ασταθών γεωτεχνικών καταστάσεων, όπως η ρευστοποίηση. Κατ' αυτό τον τρόπο, προέκυψε γραφική (υπό μορφή διαγράμματος) συσχέτιση μεταξύ της καθίζησης της θεμελίωσης και του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα μετά την ρευστοποίηση, ο οποίος υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μια απλή εξίσωση.



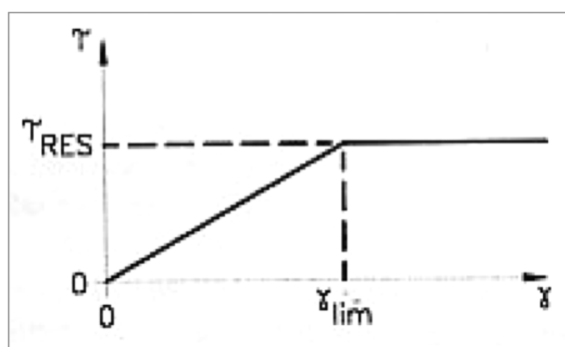
Σχήμα 2.1. Επιφανειακό θεμέλιο που εδράζεται σε συνεκτική κρούστα υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης χαλαρής άμμου

2.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στις στατικές αναλύσεις, εφαρμόστηκε η τάση έδρασης της θεμελίωσης στην επιφάνεια της αργιλικής κρούστας. Στην συνέχεια, προκλήθηκε ρευστοποίηση της χαλαρής άμμου που υπόκειται της αργιλικής κρούστας, θέτοντας τις τάσεις όπως σ' ένα βαρύ ρευστό, $\sigma_x = \sigma_y, \tau_{xy} = 0$. Επιπρόσθετα, η απόκριση μετά την ρευστοποίηση προσομοιώθηκε, μεταβάλλοντας το καταστατικό προσομοίωμα του εδάφους, από ένα ελαστοπλαστικό Mohr-Coulomb προσομοίωμα με $\varphi = 33^\circ, c_u = 0$, σ' ένα ελαστοπλαστικό προσομοίωμα με $\varphi = 0$ και συνοχή ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους ($c_u = \tau_{RES}$).

Το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για το ρευστοποιημένο έδαφος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Οι τιμές της παραμένουσας διατμητικής αντοχής (τ_{RES}), της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης (γ_{lim}), και του μέτρου διάτμησης του ρευστοποιημένου εδάφους ($G_L = \tau_{RES}/\gamma_{lim}$) που χρησιμοποιήθηκαν στην στατική ανάλυση, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

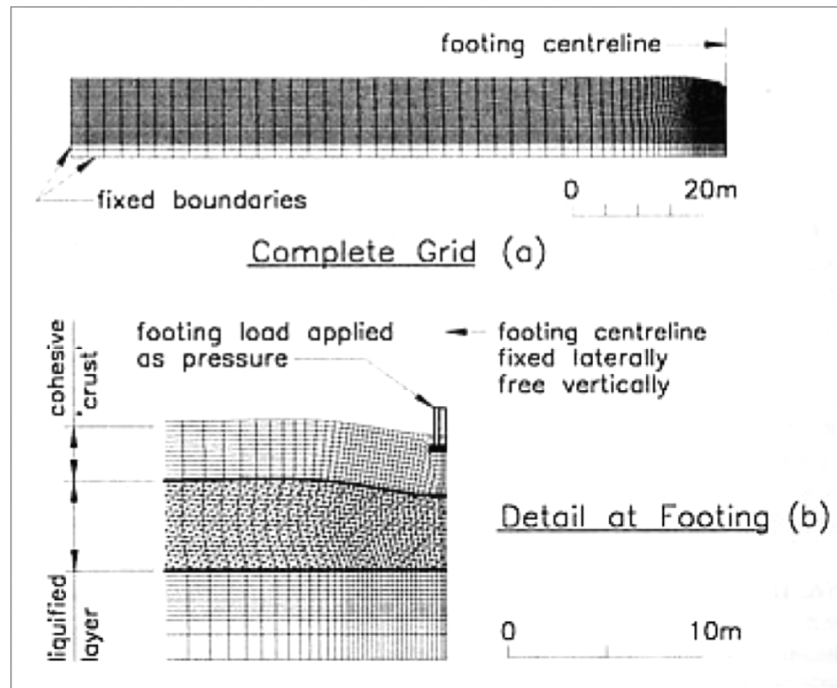
Ένα χαρακτηριστικό παραμορφωμένο πλέγμα (grid) εδάφους-θεμελίωσης που προέκυψε από την ανάλυση με τον κώδικα *FLAC* παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για το ακόλουθο εύρος τιμών των παραμέτρων: πλάτος θεμελίωσης 0.5 έως 3m, τάση έδρασης θεμελίωσης 50 έως 125kPa, πάχος αργιλικής κρούστας 0 έως 3m, διατμητική αντοχή κρούστας 25 έως 75kPa, πάχος ρευστοποιημένης στρώσης 1 έως 4.25m, παραμένουσα διατμητική αντοχή ρευστοποιημένης στρώσης 6.8 έως 91kPa, και μέτρο διάτμησης της ίδιας στρώσης 7.7 έως 577kPa.



Σχήμα 2.2. Σχέση τάσης-παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε για το ρευστοποιημένο έδαφος, στις στατικές αναλύσεις

Πίνακας 2.1. Τιμές των ιδιοτήτων του ρευστοποιημένου εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στην στατική ανάλυση

Residual Strength (kPa)	Limiting Shear Strain (%)	Shear modulus (kPa)	Representative $(N_1)_{\omega}$
6.8	89	7.7	5
16.2	50	32.4	10
38.5	28	137	15
91.6	16	577	20



Σχήμα 2.3. Πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην στατική ανάλυση, με χαρακτηριστικό παραμορφωμένο σχήμα

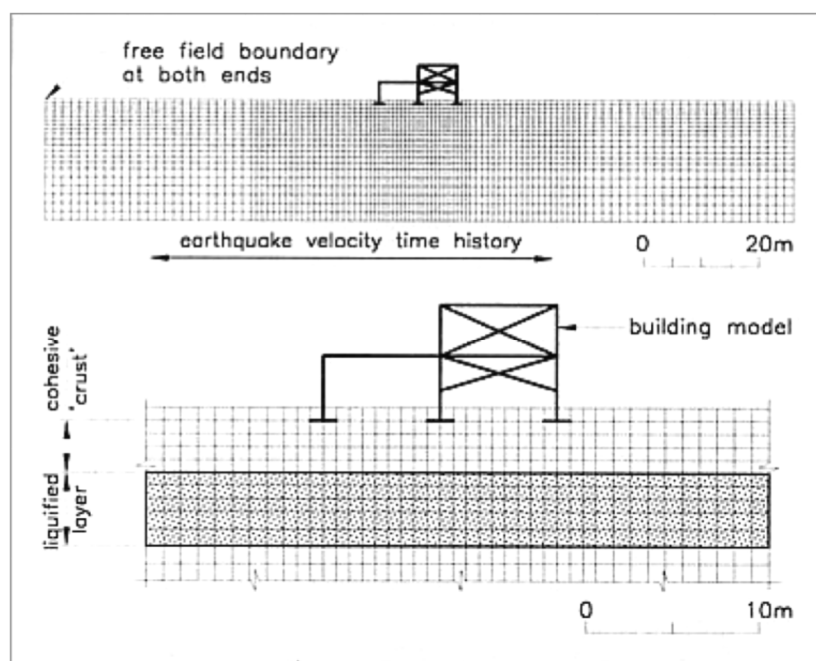
2.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στην δυναμική ανάλυση, ένα πλαισιωτό σύστημα κτιρίου (Σχήμα 2.4) υποβλήθηκε σε σεισμική διέγερση. Το φορτίο που φέρουν τα θεμέλια μεταβάλλονταν, τροποποιώντας την μάζα του κτιρίου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για το ακόλουθο εύρος τιμών των παραμέτρων: πλάτος θεμελίωσης 1.5 και 3m, πάχος αργιλικής κρούστας 0 έως 3m, διατμητική αντοχή κρούστας 25 και 50kPa, πάχος ρευστοποιημένης στρώσης 2.25 και 4.25m, παραμένουσα διατμητική αντοχή ρευστοποιημένης στρώσης 4 έως 20kPa, και μέτρο διάτμησης της ίδιας στρώσης 30 έως 133kPa. Η σεισμική διέγερση εισήχθη στην βάση του προσομοιώματος, ως χρονοϊστορία ταχύτητας (Σχήμα 2.5) και ήταν αντιπροσωπευτική μιας σεισμικής διέγερσης μεγέθους $M_w=7.0$ με μέγιστη επιτάχυνση 0.20g.

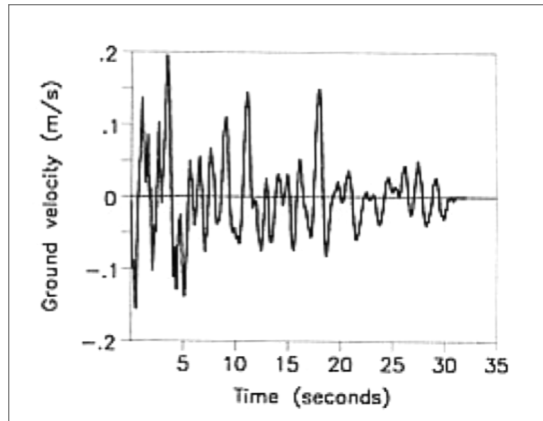
Όσον αφορά στην διαδικασία της ανάλυσης, αρχικά, επιτεύχθηκε στατική ισορροπία μεταξύ του εδάφους και του προσομοιώματος του κτιρίου, και στην συνέχεια, έγινε εισαγωγή της διέγερσης. Μετά από μια προεπιλεγμένη χρονική στιγμή (4.7 seconds) της ισχυρής διέγερσης, προκλήθηκε ρευστοποίηση θέτοντας τις

τάσεις όπως σ' ένα βαρύ ρευστό, και χρησιμοποιώντας σημαντικά μειωμένο μέτρο διάτμησης σε συνδυασμό με την παραμένουσα διατμητική αντοχή, για την προσομοίωση του ρευστοποιημένου εδάφους.

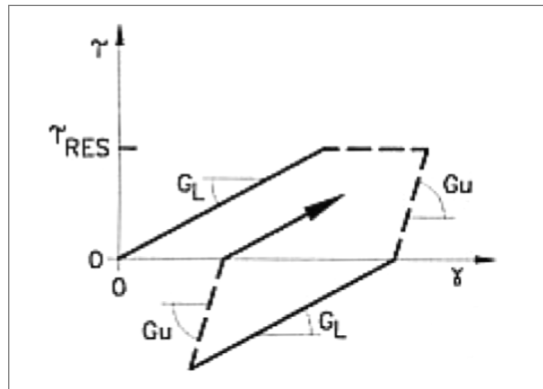
Για τις δυναμικές αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα *LINLIQ* (Σχήμα 2.6) που αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Οι τιμές του μέτρου διάτμησης για την αποφόρτιση-επαναφόρτιση του ρευστοποιημένου εδάφους, λήφθηκαν μεγαλύτερες απ' αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στις στατικές αναλύσεις, διότι αφορούν σε μεμονωμένους κύκλους αποφόρτισης-επαναφόρτισης, σε αντίθεση με τις στατικές αναλύσεις που αφορούν στην αθροιστική (συσσωρευμένη) παραμόρφωση. Το εύρος τιμών της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης λήφθηκε από 5 έως 30%, και η παραμένουσα διατμητική αντοχή από 4 έως 20kPa.



Σχήμα 2.4. Πλέγμα (grid) εδάφους και ανωδομής που χρησιμοποιήθηκε στις δυναμικές αναλύσεις



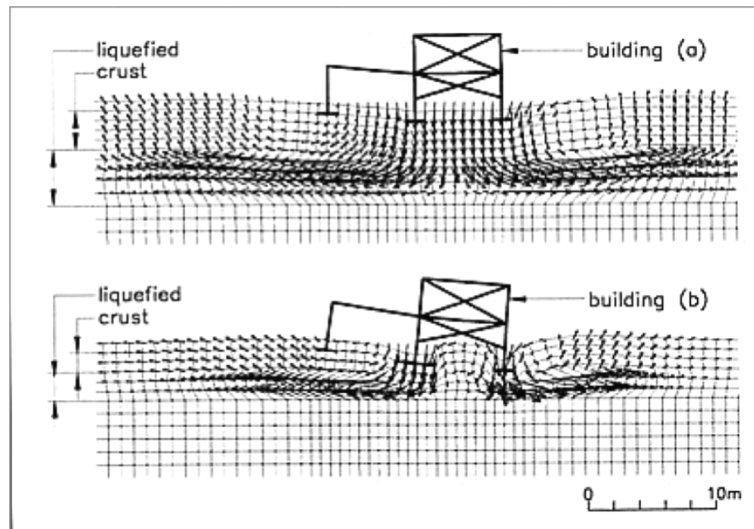
Σχήμα 2.5. Χρονοϊστορία ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση στις δυναμικές αναλύσεις



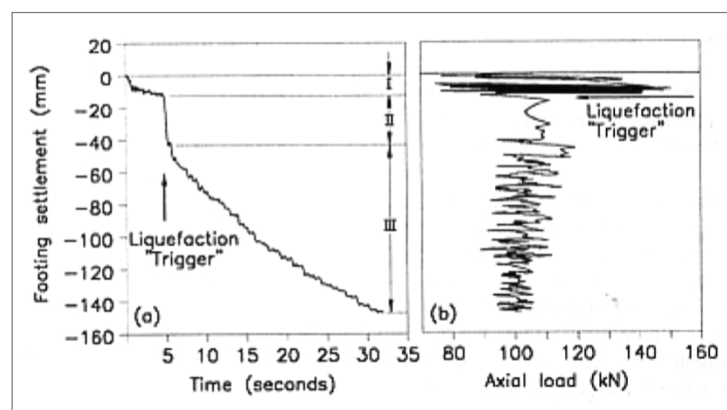
Σχήμα 2.6. Καταστατικό προσομοίωμα τάσης-παραμόρφωσης *LINLIQ*

Στα Σχήματα 2.7a και 2.7b, παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παραμορφωμένο πλέγμα (grid) εδαφικών στοιχείων στο τέλος της διέγερσης, για ένα κτίριο που εδράζεται σε μια μεγάλου πάχους και σε μια μικρού πάχους κρούστα, αντίστοιχα. Όσον αφορά στην εξέλιξη των σεισμικών καθιζήσεων της θεμελίωσης, διακρίνονται τρία στάδια, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8a. Το στάδιο I αφορά στην κατάσταση πριν την ρευστοποίηση, όπου η καθίζηση της θεμελίωσης λαμβάνει την μικρότερη τιμή. Το στάδιο II αφορά στην έναρξη της ρευστοποίησης, όπου παρατηρείται μια απότομη αύξηση της καθιζήσεως και τέλος, το στάδιο III αφορά στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων από την έναρξη της ρευστοποίησης μέχρι το τέλος της διέγερσης. Επιπλέον, στο Σχήμα 2.8b είναι αξιοσημείωτη η μείωση στο εύρος ταλάντωσης του αξονικού φορτίου, κατά την έναρξη και κατά την διάρκεια της

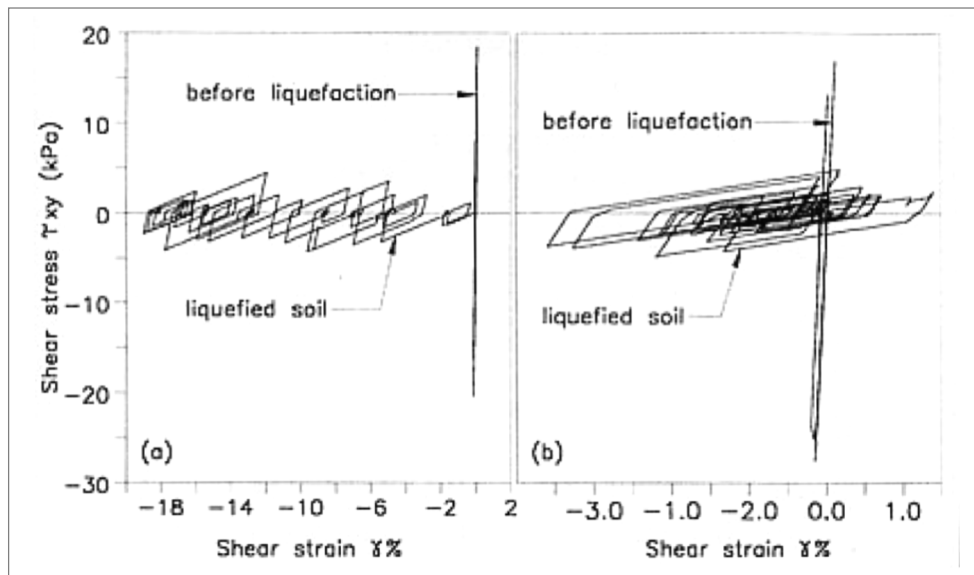
ρευστοποίησης. Τέλος, στα Σχήματα 2.9a και 2.9b παρουσιάζονται χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης του ρευστοποιημένου εδάφους, για ένα στοιχείο κοντά στην άκρη της ρευστοποιημένης στρώσης και για ένα στοιχείο κοντά στο κέντρο της, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.7. Χαρακτηριστικά πλέγματα στο τέλος της διέγερσης, για ένα κτίριο που εδράζεται σε μια **(a)** μεγάλου πάχους και **(b)** μικρού πάχους κρούστα



Σχήμα 2.8. Χαρακτηριστική εξέλιξη των σεισμικών καθιζήσεων της θεμελίωσης, ως προς **(a)** τον χρόνο και **(b)** το αξονικό φορτίο



Σχήμα 2.9. Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης του ρευστοποιημένου εδάφους, για ένα στοιχείο **(a)** κοντά στην άκρη της ρευστοποιημένης στρώσης και **(b)** κοντά στο κέντρο της

2.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΘΙΖΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

Ο απομειωμένος συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση F_s , υπολογίστηκε με βάση την Εξ. 2.1, και συσχετίστηκε με την καθίζηση της θεμελίωσης (Σχήμα 2.10).

$$F_s = [(2 \cdot Z_c \cdot c_u) + (5.14 \cdot \tau_{RES} \cdot B)] / Q_s \quad (2.1)$$

όπου: Z_c = πάχος συνεκτικής κρούστας, c_u = αστράγγιστη διατμητική αντοχή κρούστας, τ_{RES} = παραμένουσα διατμητική αντοχή ρευστοποιημένης στρώσης, B = πλάτος θεμελίωσης, και Q_s = φορτίο θεμελίωσης ανά μονάδα μήκους.

Στην Εξ. 2.1 δεν περιλαμβάνεται το πάχος και η δυσστησία της ρευστοποιημένης στρώσης, παράμετροι οι οποίες, επίσης επηρεάζουν την καθίζηση της θεμελίωσης. Για τον λόγο αυτό, η συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ασφαλείας F_s και της καθίζησης της θεμελίωσης βελτιώθηκε (Σχήμα 2.11), χρησιμοποιώντας στην

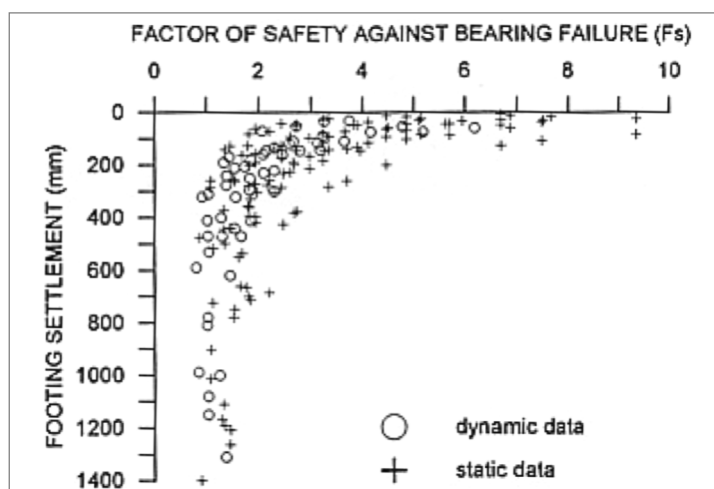
θέση του F_s των <<δείκτη φέρουσας ικανότητας>>, ο οποίος δίνεται από την εμπειρική Εξ. 2.2, ως εξής:

$$X_s = F_s / (Z_l^{1/2} \cdot \gamma_{lim}^{1/2} \cdot Q_s^{1/4}) \quad (2.2)$$

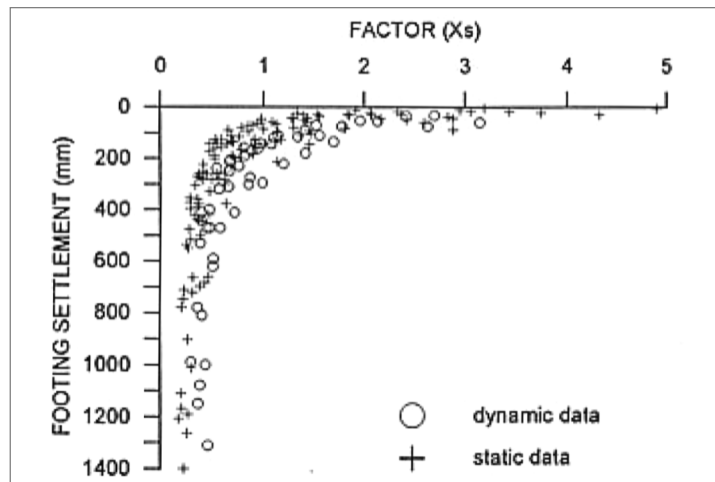
όπου: Z_l = πάχος ρευστοποιημένης στρώσης (σε m), γ_{lim} = οριακή διατμητική παραμόρφωση, και Q_s = φορτίο θεμελίωσης ανά μονάδα μήκους (σε kN/m).

Σημειώνεται, ότι οι ανωτέρω εξισώσεις αναφέρονται μόνο σε επίπεδο έδαφος, αστράγγιστη διατμητική αντοχή συνεκτικής κρούστας $c_u < 75kPa$, συνεχή επιμήκη θεμέλια και συνεχή ρευστοποιημένη στρώση. Επιπλέον, οι αναλύσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τις καθιζήσεις που προκαλούνται λόγω ογκομετρικής παραμόρφωσης μετά την ρευστοποίηση, ούτε την καθίζηση του εδάφους εξαιτίας της εκτόπισης της ρευστοποιημένης άμμου. Αυτές οι καθιζήσεις, θα ήταν πρόσθετες σε αυτές που υπολογίστηκαν στην παρούσα έρευνα.

Επιπλέον, από την έρευνα αυτή διαπιστώθηκε, ότι οι στατικές αναλύσεις, στις οποίες το μέτρο διάτμησης του ρευστοποιημένου εδάφους αντιπροσωπεύει την αθροιστική παραμόρφωση από την σεισμική διέγερση, παρείχαν παρόμοιες ποιοτικά, αλλά συστηματικά μικρότερες ποσοτικά τιμές καθίζησης της θεμελίωσης, σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν από τις δυναμικές αναλύσεις, όπου χρησιμοποιήθηκε ένα μεγαλύτερο μέτρο διάτμησης, αντιπροσωπευτικό των μεμονωμένων κύκλων.



Σχήμα 2.10. Συσχέτιση του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση F_s (Εξ. 2.1), με την καθίζηση της θεμελίωσης



Σχήμα 2.11. Συσχέτιση του συντελεστή μετά την ρευστοποίηση X_s (Εξ. 2.2), με την καθίζηση της θεμελίωσης

2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

Ο Kishida (1966), συσχέτισε τον βαθμό αστοχίας σε κτίρια ωπλισμένου σκυροδέματος από τον σεισμό στη Niigata (1964), με την καθίζηση και την κλίση που ανέπτυξαν τα κτίρια, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2. Συγκρίνοντας τα δεδομένα του Πίνακα 2.2, με την συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα και της καθίζησης της θεμελίωσης που προέκυψε από την παρούσα έρευνα (Σχήματα 2.10 και 2.11), διαπιστώνεται, ότι οι συντελεστές ασφαλείας πρέπει να είναι $F_s > 3.0$ και $X_s > 1.0$, ώστε η αστοχία των κτιρίων να είναι από μικρή έως ανύπαρκτη (slight, none στον Πίνακα 2.2). Όταν οι συντελεστές ασφαλείας μετά την ρευστοποίηση είναι $F_s < 3.0$ ή $X_s < 1.0$, η καθίζηση της θεμελίωσης αυξάνεται και μπορεί να λάβει υψηλές τιμές (intermediate, heavy στον Πίνακα 2.2).

Πίνακας 2.2. Συσχέτιση του βαθμού αστοχίας σε κτίρια ωπλισμένου σκυροδέματος από τον σεισμό στη Niigata (1964), με την καθίζηση και την κλίση που ανέπτυξαν τα κτίρια, με βάση την έρευνα του Kishida (1966) (παράθεση από Naesgaard et al., 1998)

Classification	Maximum Settlement (mm)	Tilting Angle (degrees)	Damage to foundations
I	0 to 200	0 to 0.3	None
II	200 to 500	0.3 to 1	Slight
III	500 to 1000	1 to 2.3	Intermediate
IV	> 1000	> 2.3	Heavy

2.6 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΚΥΡΙΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ

Στην έρευνα των Naesgaard et al. (1998) εξετάσθηκε για πρώτη φορά συστηματικά (από όσο γνωρίζουμε) η απόκριση επιφανειακών θεμελίων που εδράζονται σε μια συνεκτική κρούστα εδάφους, υπερκείμενη μιας ρευστοποιημένης εδαφικής στρώσης. Πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις, από τις οποίες, προέκυψε συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα μετά την ρευστοποίηση, και της καθίζησης της θεμελίωσης.

Συνολικά, η καθίζηση της θεμελίωσης εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους που αφορούν το υπέδαφος και την θεμελίωση:

Z_c = πάχος συνεκτικής κρούστας,

Z_l = πάχος ρευστοποιημένης στρώσης,

c_u = αστράγγιστη διατμητική αντοχή κρούστας,

τ_{RES} = παραμένουσα διατμητική αντοχή ρευστοποιημένης στρώσης,

γ_{lim} = οριακή διατμητική παραμόρφωση ρευστοποιημένης στρώσης,

B = πλάτος θεμελίωσης, και

Q_s = φορτίο θεμελίωσης ανά μονάδα μήκους.

Συγκρίνοντας την συσχέτιση που προέκυψε από την εν λόγω έρευνα, με τα δεδομένα του Kishida (1966) που αφορούν σε αστοχίες σε κτίρια ωπλισμένου σκυροδέματος από τον σεισμό στη Niigata (1964), διαπιστώθηκε, ότι ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να είναι $F_s > 3.0$, ώστε η αστοχία των κτιρίων να είναι από μικρή έως ανύπαρκτη.

Διευκρινίζεται, ότι η έρευνα των Naesgaard et al. (1998) αναφέρεται σε επιμήκη θεμέλια που εδράζονται σε μια συνεκτική κρούστα με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $c_u < 75kPa$, σε συνεχή ρευστοποιημένη στρώση και σε επίπεδο έδαφος. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη, ότι οι αναλύσεις δεν συμπεριλαμβάνουν τις καθιζήσεις που προκαλούνται λόγω ογκομετρικής παραμόρφωσης μετά την ρευστοποίηση, και την καθίζηση του εδάφους εξαιτίας της εκτόπισης της ρευστοποιημένης άμμου, αυτές οι καθιζήσεις, θα ήταν πρόσθετες σε αυτές που υπολογίστηκαν στην παρούσα έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), όπου διερευνήθηκε η σεισμική απόκριση επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται σε μια απεριόριστα εκτεταμένη και απολύτως συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση, υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις, αρχικά επιδιώκοντας την διερεύνηση των μηχανισμών που καθορίζουν την σεισμική απόκριση των υπό μελέτη θεμελιώσεων. Ακολούθως, προτάθηκε μια απλοποιημένη αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της μετασεισμικής μειωμένης φέρουσας ικανότητας επιμήκων και ορθογωνικών θεμελίων, και των αντίστοιχων σεισμικών καθιζήσεων. Τελικά, διαπιστώθηκε, ότι η ύπαρξη της μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης που υπάρχει φυσικά ή δημιουργείται τεχνητά, μετριάζει τα δυσμενή αποτελέσματα της ρευστοποίησης και επιτρέπει τον σχεδιασμό επιφανειακών θεμελιώσεων, χωρίς την λήψη πρόσθετων βελτιωτικών μέτρων (πασσάλων θεμελίωσης, συμπύκνωση του ρευστοποιήσιμου εδάφους, εγκατάσταση στραγγιστηρίων, κλπ.).

3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (Karamitros et al., 2013a)

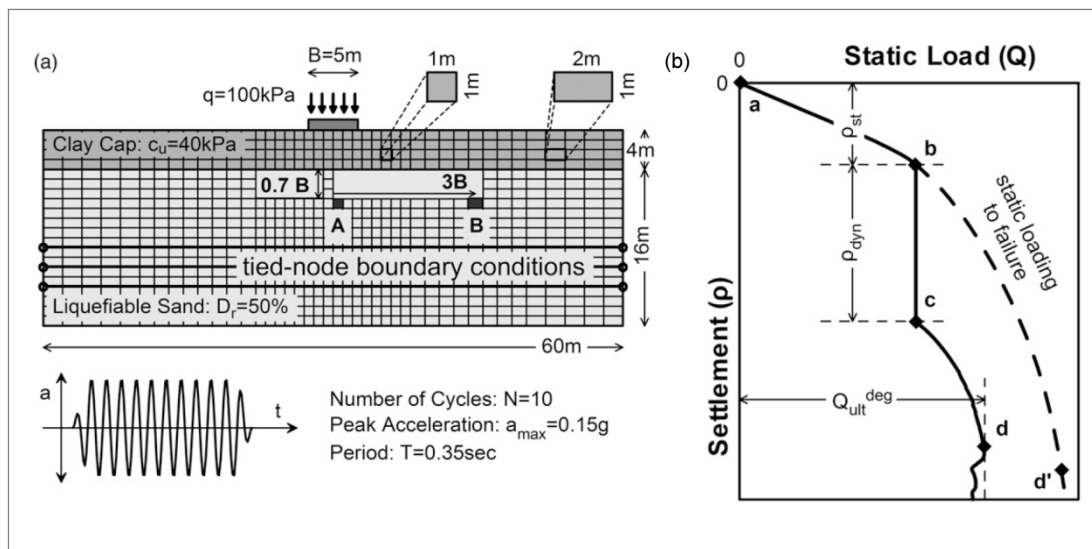
Στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a), διερευνώνται οι μηχανισμοί που καθορίζουν την απόκριση επιφανειακής θεμελίωσης μετά από ρευστοποίηση λόγω σεισμικής διέγερσης, για την περίπτωση όπου μια στρώση αργίλου διαχωρίζει την θεμελίωση από το ρευστοποιήσιμο έδαφος. Η ανάλυση της απόκρισης της θεμελίωσης πραγματοποιήθηκε με μη γραμμική δυναμική μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών και αξιολογήθηκε σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα και παρατηρήσεις στο πεδίο από την βιβλιογραφία. Διερευνήθηκε η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση, η συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων, η μείωση της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης σε στατική φόρτιση, και η επίπτωση της ρευστοποίησης στην αδρανειακή αλληλεπίδραση του εδάφους με την ανωδομή.

3.1.1 Αριθμητική μεθοδολογία

Η αριθμητική μεθοδολογία περιλαμβάνει την εφαρμογή του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-SAND που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, εντός του εμπορικού κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών *Fast Lagrangian analysis of continua (FLAC)*, με σκοπό την πρόβλεψη της συμπεριφοράς στοιχείων άμμου σε μονοτονική φόρτιση, ανακυκλιζόμενη φόρτιση και ρευστοποίηση. Στην έρευνα πραγματοποιήθηκε μια βασική αριθμητική ανάλυση και μια σειρά από 18 αναλύσεις για διαφορετικά χαρακτηριστικά εδάφους, εισαγόμενης διέγερσης και ανωδομής. Η διάταξη του αριθμητικού προσομοιώματος και οι υπό μελέτη παράμετροι για την βασική αριθμητική ανάλυση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1a. Η προσομοίωση της απόκρισης της στρώσης αργίλου έγινε χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, ενώ για την ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα NTUA-SAND.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι παράμετροι που διερευνήθηκαν έλαβαν τις ακόλουθες τιμές: μέση τάση έδρασης $q = 40 - 140kPa$, αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργίλου $c_u = 40 - 80kPa$, πάχος αργλικής κρούστας $H = 0.8 - 2.0B$. Προκειμένου να απομονωθούν οι συνέπειες της αδρανειακής αλληλεπίδρασης του εδάφους με την υπερκείμενη κατασκευή, η πλειονότητα των αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η μάζα της θεμελίωσης. Η μάζα αυτή ανακτήθηκε σε επόμενες αναλύσεις, λαμβάνοντας υπόψη μια άκαμπτη υπερκείμενη κατασκευή με λόγο ύψους/πλάτους $h/B = 0.2 - 1.6$ ($L = \infty$).

Οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρία στάδια, τα οποία παρουσιάζονται σχηματικά στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης του Σχήματος 3.1b. Στο 1^ο στάδιο (κλάδος a-b) το φορτίο της θεμελίωσης Q επιβλήθηκε στατικά. Στο 2^ο στάδιο (κλάδος b-c) επιβλήθηκε δυναμική φόρτιση (σεισμική διέγερση). Συγκεκριμένα, επιβλήθηκε μια αρμονική διέγερση στην βάση του προσομοιώματος και στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι παράμετροι της διέγερσης έλαβαν τιμές στο εύρος: $\alpha_{max} = 0.05 - 0.36g$, $T = 0.25 - 0.50sec$. Παράλληλα, λήφθηκε υπόψη η ροή του νερού στο έδαφος, προκειμένου να προσομοιωθούν οι επιπτώσεις από την εισαγόμενη διέγερση. Στο 3^ο στάδιο (κλάδος c-d) μετά το τέλος της διέγερσης, το στατικό φορτίο Q αυξάνονταν μέχρι την αστοχία. Έτσι παρατηρήθηκε ότι, εξαιτίας των μειωμένων ενεργών τάσεων της άμμου, η μετασεισμική φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης είναι μικρότερη σε σύγκριση με την φέρουσα ικανότητα πριν την διέγερση (κλάδος b-d').



Σχήμα 3.1. (a) Διάταξη του αριθμητικού προσομοιώματος και υπό μελέτη παράμετροι για την βασική αριθμητική ανάλυση, (b) καμπύλη φορτίου-μετακίνησης της θεμελίωσης

3.1.2 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται με συνεχή γραμμή οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσης πόρων για δύο διαφορετικά σημεία στην ρευστοποιημένη στρώση άμμου (Σχήμα 3.1a), όπως προέκυψαν από την βασική αριθμητική ανάλυση. Το σημείο A είναι κάτω από την θεμελίωση και το σημείο B είναι στο ελεύθερο πεδίο. Επιπλέον, στο Σχήμα 3.3a απεικονίζεται γραφικά η κατανομή στο έδαφος θεμελίωσης του λόγου υπερπίεσης πόρων στο τέλος της διέγερσης. Με βάση τα σχήματα αυτά διαπιστώνεται, ότι οι λόγοι υπερπίεσης πόρων στο ελεύθερο πεδίο γίνονται ίσοι με $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,o}} = 1.0$ ($\Delta u =$ υπερπίεση πόρων, $\sigma'_{v,o} =$ αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση), το οποίο σημαίνει, ότι το έδαφος ρευστοποιείται πλήρως. Ωστόσο, κάτω από την θεμελίωση παραμένουν μικρότεροι από 1.0, ενώ αυξάνονται με το βάθος και την απόσταση από τον άξονα της θεμελίωσης. Επιπλέον, παρατηρείται, ότι οι λόγοι υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση λαμβάνουν μέγιστη τιμή στα αρχικά στάδια της διέγερσης, παρουσιάζουν πτωτική πορεία μέχρι το τέλος της διέγερσης, και μετά αρχίζουν πάλι να αυξάνονται.

Στην ερμηνεία των ανωτέρω, συμβάλλουν οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων (σ_v, σ'_v), οριζόντιων (σ_h, σ'_h), διατμητικών (τ_{vh}) τάσεων και υπερπίεσεων πόρων (Δu) στα σημεία A και B που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4. Παρατηρείται, ότι οι υπερπίεσεις πόρων στα σημεία A και B είναι κατά προσέγγιση ίσες, δηλαδή $\Delta u_{foot,max} = \Delta u_{ff}$. Κατ' επέκταση αυτής της παρατήρησης, προκύπτει η σχέση (3.1) για την μέγιστη τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση ($r_{u,foot,max}$), η οποία ερμηνεύει επίσης, ότι οι λόγοι υπερπίεσης πόρων $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,o}}$ κάτω από την θεμελίωση παραμένουν μικρότεροι από 1.0.

$$r_{u,foot,max} = \frac{\Delta u_{foot,max}}{\sigma'_{v,o,foot}} = \frac{\Delta u_{ff}}{\sigma'_{v,o,ff} + \Delta \sigma_{v,foot}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta \sigma_{v,foot}}{\sigma'_{v,o,ff}}} \quad (3.1)$$

όπου:

$\Delta u_{foot,max}$ = η μέγιστη τιμή υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση,

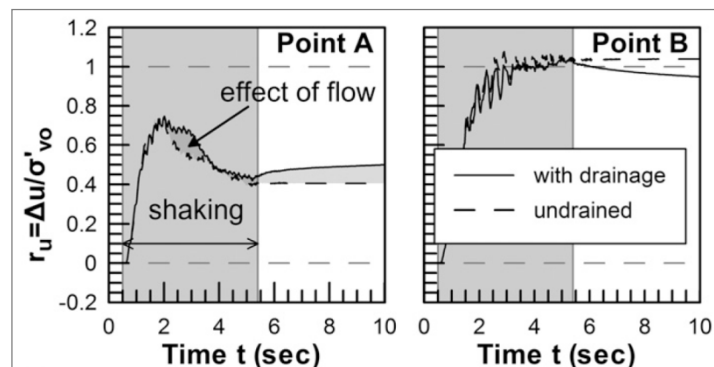
Δu_{ff} = η υπερπίεση πόρων στο ελεύθερο πεδίο,

$\sigma'_{v,o,foot}$ = αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση κάτω από την θεμελίωση,

$\sigma'_{v,o,ff}$ = αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση στο ελεύθερο πεδίο, και

$\Delta \sigma_{v,foot} = q$ = πρόσθετη κατακόρυφη τάση επιβαλλόμενη από την θεμελίωση.

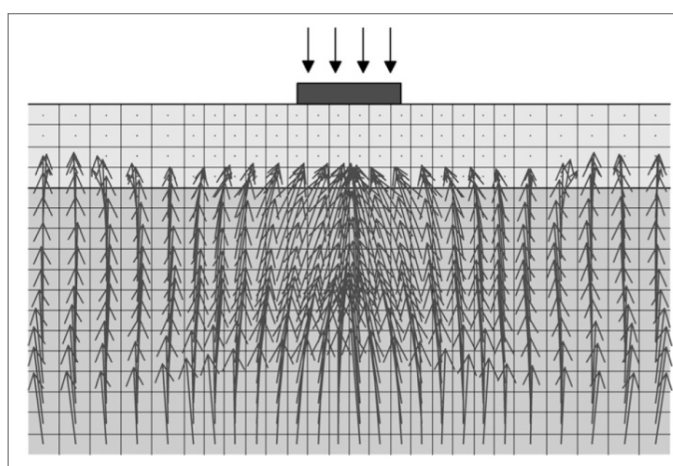
Τα αποτελέσματα εφαρμογής της σχέσης (3.1) παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.3b, απ' όπου προκύπτει ομοιότητα με τα αριθμητικά αποτελέσματα της βασικής ανάλυσης.



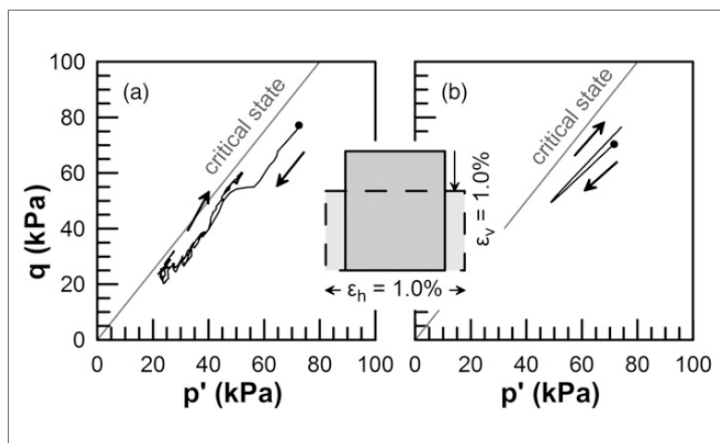
Σχήμα 3.2. Αριθμητική πρόβλεψη των χρονοϊστοριών του λόγου υπερπίεσης πόρων

Προκειμένου να ερμηνευθεί η μείωση της υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση κατά την διάρκεια της διέγερσης και η ακόλουθη αύξηση μετά το τέλος της διέγερσης (Σχήμα 3.2), στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα διανύσματα ροής του νερού στο έδαφος στο τέλος της διέγερσης που προέκυψαν από την βασική ανάλυση. Παρατηρείται, ότι ροή του νερού συμβαίνει με κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω και από την περιοχή γύρω από την θεμελίωση προς τον κεντρικό άξονα. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει τον σημαντικό ρόλο της ροής του νερού στο έδαφος μετά το τέλος της διέγερσης, ενώ, η μείωση της υπερπίεσης πόρων κατά την διάρκεια της διέγερσης αποδίδεται στην διαστολική συμπεριφορά του εδάφους κάτω από την θεμελίωση, η οποία προκαλείται από την καθίζηση της θεμελίωσης.

Στο Σχήμα 3.6α παρουσιάζεται η τελική παραμόρφωση και η διαδρομή των τάσεων $q-p'$ κατά την διάρκεια της διέγερσης (όπου $q = \sqrt{s_{ij}s_{ij}/2}$, $s_{ij} = \sigma'_{ij} - p'\delta_{ij}$, δ_{ij} είναι το δέλτα του Κρόνεκερ, και $p' = \sigma'_{kk}/3$) για το σημείο Α, που προκύπτει από την βασική αριθμητική ανάλυση. Παρατηρείται, ότι η διέγερση του εδάφους συντελεί στην ανάπτυξη μόνιμων κατακόρυφων θλιπτικών και οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων, $\varepsilon_v \approx 1\%$ και $\varepsilon_h \approx -1\%$ αντίστοιχα, ή διαφορετικά σε μια μόνιμη αποκλίνουσα παραμόρφωση $\varepsilon_v - \varepsilon_h \approx 2\%$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαστολή της άμμου και την ανάπτυξη αρνητικών υπερπίεσεων πόρων, οι οποίες ενεργούν αντίθετα στην τάση ανάπτυξης πίεσης πόρων λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.



Σχήμα 3.5. Διανύσματα ροής του νερού στο έδαφος στο τέλος της διέγερσης



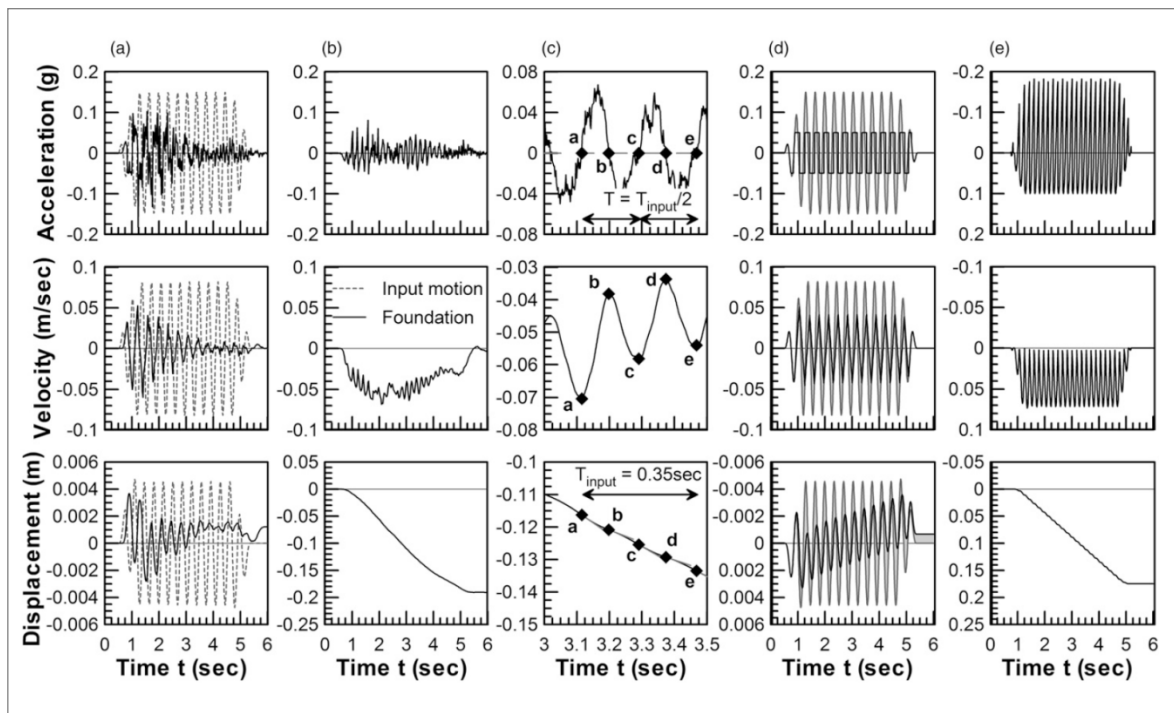
Σχήμα 3.6. Διαδρομή των τάσεων $q-p'$ για το σημείο A: **(a)** από την αριθμητική ανάλυση, **(b)** μετά από ισοδύναμη μονοτονική φόρτιση

3.1.3 Συσσώρευση καθιζήσεων

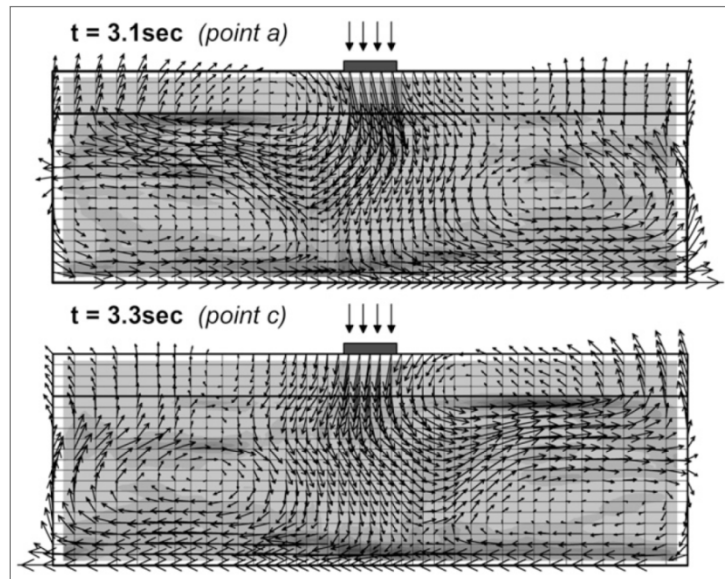
Προκειμένου να ερμηνευθεί ο μηχανισμός ανάπτυξης καθιζήσεων, στα Σχήματα 3.7(a και b) γίνεται σύγκριση της χρονοϊστορίας της διέγερσης της βασικής αριθμητικής ανάλυσης με τις χρονοϊστορίες της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της κίνησης της θεμελίωσης (σε όρους επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης). Όσον αφορά στην οριζόντια κίνηση (Σχήμα 3.7a), παρατηρείται, ότι η ρευστοποίηση οδηγεί σε σημαντική αποδυνάμωση της εισαγόμενης διέγερσης και σε μη ουσιώδη οριζόντια μετακίνηση. Εστιάζοντας στην κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης (Σχήμα 3.7b), παρατηρείται, ότι το πλάτος της κατακόρυφης επιτάχυνσης και ταχύτητας δεν μειώνεται με τον χρόνο, ενώ η δεσπόζουσα συχνότητά τους είναι δύο φορές υψηλότερη απ' αυτή της οριζόντιας συνιστώσας της κίνησης. Επιπλέον, για το μεγαλύτερο μέρος της διέγερσης, οι ταχύτητες κυμαίνονται γύρω από μια περίπου σταθερή τιμή, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μια γραμμική συσσώρευση των καθιζήσεων με τον χρόνο.

Η απόκριση της θεμελίωσης στην κατακόρυφη κίνηση παρουσιάζεται καλύτερα μέσω του Σχήματος 3.7c, το οποίο αποδίδει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ένα πλήρη κύκλο (a-d) της κατακόρυφης κίνησης της θεμελίωσης, και μέσω του Σχήματος 3.8, στο οποίο παρουσιάζονται τα διανύσματα της ταχύτητας της θεμελίωσης και του εδάφους στην αρχή (Point A) και στο μέσο (Point C) αυτού του κύκλου. Γίνεται αντιληπτό, ότι οι καθιζήσεις της θεμελίωσης αναπτύσσονται εξαιτίας κυρίως ενός μηχανισμού ολίσθησης σώματος τύπου Newmark, και δευτερευόντως

λόγω της συμπύκνωσης της άμμου. Συγκεκριμένα, στην αρχή του κύκλου (Point A), η βάση του προσομοιώματος κινείται προς τα δεξιά, ενώ η θεμελίωση κινείται εκτός φάσης με την βάση, διαμορφώνοντας έτσι, ένα μονόπλευρο μηχανισμό αστοχίας τύπου σφήνας προς τα αριστερά. Ως αποτέλεσμα του μηχανισμού αυτού, η θεμελίωση κινείται ελαφρώς προς τα αριστερά και καθιζάνει. Στο μέσο του κύκλου (Point C), η κίνηση της βάσης του προσομοιώματος αλλάζει κατεύθυνση, από τα δεξιά προς τα αριστερά, έχοντας ως αποτέλεσμα ο μηχανισμός αστοχίας τύπου σφήνας να κινηθεί προς την δεξιά πλευρά της θεμελίωσης. Σε αυτή την περίπτωση, η θεμελίωση κινείται ελαφρώς προς τα δεξιά και καθιζάνει. Επομένως, η αστοχία συμβαίνει δύο φορές κατά την διάρκεια ενός πλήρη κύκλου της κίνησης και κάθε φορά συνδυάζεται με μια κατακόρυφη κίνηση (καθίζηση) της θεμελίωσης.



Σχήμα 3.7. (a) Οριζόντιες και (b) κατακόρυφες χρονιοίστοριες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης της θεμελίωσης, (c) λεπτομέρειες της μεταβολής της επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης στην κατακόρυφη κίνηση. Αναλυτικές προβλέψεις των (d) οριζόντιων και (e) κατακόρυφων χρονιοιστοριών επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης χρησιμοποιώντας την θεωρία ολίσθησης σώματος Newmark



Σχήμα 3.8. Διανύσματα ταχύτητας και περιγράμματα (contours) διατμητικής παραμόρφωσης τις χρονικές στιγμές $t = 3.1\text{sec}$ και $t = 3.3\text{sec}$ της αριθμητικής ανάλυσης, δύο συμμετρικοί τρόποι αστοχίας που συντελούν στην συσσώρευση καθιζήσεων

3.1.4 Μείωση της φέρουσας ικανότητας μετά την σεισμική διέγερση

Προκειμένου να ερμηνευθεί ο μηχανισμός μείωσης της φέρουσας ικανότητας, στα Σχήματα 3.9 (a και b) παρουσιάζονται τα περιγράμματα (contours) διατμητικής παραμόρφωσης και τα διανύσματα της ταχύτητας στην αστοχία, για συνθήκες μη ρευστοποιημένου και ρευστοποιημένου εδάφους. Παρατηρείται, ότι για τη μη ρευστοποιημένη άμμο (Σχήμα 3.9a) η αστοχία αναμένεται να συμβεί εντός της στρώσης αργίλου, η οποία είναι σχετικά πιο μαλακή από την βαθύτερη στρώση άμμου. Αυτό, επιπλέον, υποστηρίζεται απ' το γεγονός ότι οι αριθμητικά υπολογισμένες τιμές της φέρουσας ικανότητας πριν την διέγερση συμφωνούσαν καλά με την θεωρητική τιμή:

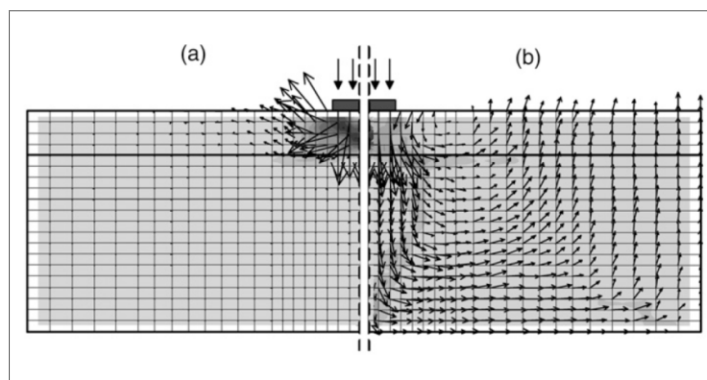
$$q_{ult,o} = (\pi + 2)c_u \quad (3.2)$$

Ωστόσο, ένας τελείως διαφορετικός μηχανισμός αστοχίας αναπτύσσεται στην περίπτωση της ρευστοποιημένης άμμου (Σχήμα 3.9b). Συγκεκριμένα, το θεμέλιο διεισδύει στην στρώση αργίλου, προκαλώντας την διείσδυση της επιφάνειας αστοχίας εντός της βαθύτερης ρευστοποιημένης στρώσης άμμου, της οποίας η διατμητική αντίσταση έχει μειωθεί. Έτσι, γίνεται φανερό, ότι η μειωμένη φέρουσα

ικανότητα της θεμελίωσης έχει δύο συνιστώσες. Η πρώτη προκαλείται από την στρώση αργίλου, και εκφράζεται ως:

$$q_{crust} = 2 \cdot c_u \cdot \frac{H}{B} \quad (3.3)$$

ενώ, η δεύτερη προκαλείται από την ρευστοποιημένη άμμο (q_{sand}) και μπορεί να υπολογιστεί είτε με προσέγγιση ολικών τάσεων, σε όρους παραμένουσας διατμητικής αντοχής της ρευστοποιημένης άμμου, είτε με προσέγγιση ενεργών τάσεων, χρησιμοποιώντας μια ισοδύναμη μειωμένη γωνία τριβής.



Σχήμα 3.9. Περιγράμματα (contours) διατμητικής παραμόρφωσης και διανύσματα ταχύτητας, που αφορούν στον μηχανισμό αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα **(a)** πριν την διέγερση και **(b)** μετά την διέγερση

3.1.5 Επίδραση της αδράνειας της ανωδομής

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της μάζας της ανωδομής, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της βασικής ανάλυσης με θεμέλιο χωρίς μάζα ($h/B = 0$), με τα αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων για άκαμπτη ορθογωνική ανωδομή με μη μηδενική μάζα ($h/B \neq 0$). Η σύγκριση έγινε με αναφορά στον λόγο υπερπίεσης πόρων r_u κάτω από την θεμελίωση (Point A στο Σχήμα 3.1a) στο τέλος της διέγερσης, τις σεισμικές καθιζήσεις ρ_{dyn} και την μειωμένη φέρουσα ικανότητα μετά την διέγερση $q_{ult,deg}$. Έτσι διαπιστώθηκε, ότι η θεώρηση ανωδομής με μάζα δεν είχε πρακτικά επίδραση στην προβλεπόμενη απόκριση, με τις νέες αριθμητικές προβλέψεις να αποκλίνουν από τις αρχικές της βασικής ανάλυσης λιγότερο από $\pm 5\%$.

Η διαπίστωση αυτή ερμηνεύεται λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 3.7a, όπου συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης της εισαγόμενης διέγερσης και της θεμελίωσης. Οι ακόλουθες δύο αιτίες ερμηνεύουν την αποδυνάμωση των επιταχύνσεων που καταλήγουν στην θεμελίωση:

- Η ρευστοποίηση της στρώσης άμμου συντελεί σε σημαντική μείωση της δυσκαμψίας της άμμου και μείωση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος, αποδυναμώνοντας έτσι την εισαγόμενη δυναμική φόρτιση, και
- Η ρευστοποίηση επίσης, ενεργοποιεί έναν μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος εμποδίζει περισσότερο την διάδοση της εισαγόμενης διέγερσης στην θεμελίωση.

Οι δύο αυτοί μηχανισμοί δρουν ως φυσική σεισμική μόνωση και ελαχιστοποιούν τις αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην ανωδομή, όπως επίσης, τις δρώσες οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις στην βάση της θεμελίωσης.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα, διαπιστώθηκαν για υψίσυχνες και μέσης συχνότητας διεγέρσεις, καθώς επίσης, για σχετικώς μεγάλου πάχους ρευστοποιήσιμα στρώματα. Συνεπώς, θα πρέπει να διερευνηθεί κατά πόσο ισχύουν σε περιπτώσεις μεγαλοπεριόδων παλμών καθώς και σε μικρού πάχους ρευστοποιήσιμες στρώσεις. Επιπλέον, οι μηχανισμοί σεισμικής μόνωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν σχετίζονται με κατακόρυφες σεισμικές κινήσεις, οι οποίες συνδέονται με τα κύματα P και όχι με τα διατμητικά κύματα S.

3.1.6 Κύρια ευρήματα

Τα κύρια ευρήματα της εν λόγω έρευνας, είναι τα ακόλουθα:

- *Μη ρευστοποιήσιμη εδαφική στρώση:* Η παρουσία της αποδείχθηκε εξαιρετικά ωφέλιμη στην συνολική απόκριση της θεμελίωσης. Οι σεισμικές καθιζήσεις μειώνονται σημαντικά και η μετασεισμική φέρουσα ικανότητα σε στατική φόρτιση αυξάνεται για μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και πάχος της μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης.
- *Ροή της υπερπίεσης πόρων στο έδαφος:* Συμβαίνει με κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω και από την περιοχή γύρω από την θεμελίωση προς τον κεντρικό άξονα. Ο ρόλος της είναι δευτερεύουσας σημασίας, διότι επηρεάζει κυρίως τις σχετικά μικρές καθιζήσεις που συνεχίζουν να αναπτύσσονται μετά το τέλος της διέγερσης.

- *Διαστολική συμπεριφορά του εδάφους λόγω καθίζησης:* Είναι σημαντική, διότι οδηγεί σε αρνητικές υπερπιέσεις πόρων κάτω από την θεμελίωση, οι οποίες μετά τα πρώτα στάδια της διέγερσης, ενεργούν αντίθετα στην τάση ανάπτυξης πίεσης πόρων λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, και συνεπώς, λειτουργεί ως σταθεροποιητικός μηχανισμός.
- *Σεισμικές καθιζήσεις:* Σχετίζονται με την διατμητική αστοχία του εδάφους θεμελίωσης, και συσσωρεύονται κατά την διάρκεια της διέγερσης εξαιτίας των αδρανειακών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο έδαφος θεμελίωσης, ακολουθώντας έναν μηχανισμό ολίσθησης σώματος τύπου Newmark. Επομένως, δεν μπορούν να προβλεφθούν χρησιμοποιώντας εμπειρικά γραφήματα, τα οποία έχουν αναπτυχθεί για καθιζήσεις στο ελεύθερο πεδίο.
- *Μείωση της φέρουσας ικανότητας σε στατική φόρτιση:* Είναι μια βραχυχρόνια, ωστόσο σοβαρή επίπτωση, η οποία ίσως γίνεται κρίσιμη για την απόκριση της θεμελίωσης, σε περιπτώσεις σχετικά μικρών σεισμικών καθιζήσεων. Για μεγάλες σεισμικές καθιζήσεις, αναμένεται διαστολή του εδάφους θεμελίωσης, ελαχιστοποιώντας έτσι την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους και ενισχύοντας την μετασεισμική φέρουσα ικανότητα.
- *Αδράνεια ανωδομής:* Φαίνεται, ότι δεν επηρεάζει την απόκριση της θεμελίωσης σε περιπτώσεις υψίσυχνων και μέσης συχνότητας διεγέρσεων, και για σχετικά μεγάλου πάχους ρευστοποιήσιμα στρώματα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, γίνεται φανερό, ότι είναι δυνατό να εξασφαλιστεί αποδεκτή απόκριση της θεμελίωσης, όσον αφορά στην ανάπτυξη μικρών καθιζήσεων και επαρκούς μετασεισμικής φέρουσας ικανότητας σε στατική φόρτιση, μέσω της παρουσίας μιας μεγάλου πάχους και διατμητικής αντίστασης μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης. Στην παρούσα έρευνα, λήφθηκε υπόψη μια φυσική στρώση αργίλου, ωστόσο, τα ίδια αποτελέσματα ίσως, μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας τεχνητές στρώσεις, οι οποίες δημιουργούνται με μια ορθώς σχεδιασμένη βελτίωση της ρευστοποιήσιμης στρώσης εδάφους.

3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ (Karamitros et al., 2013b)

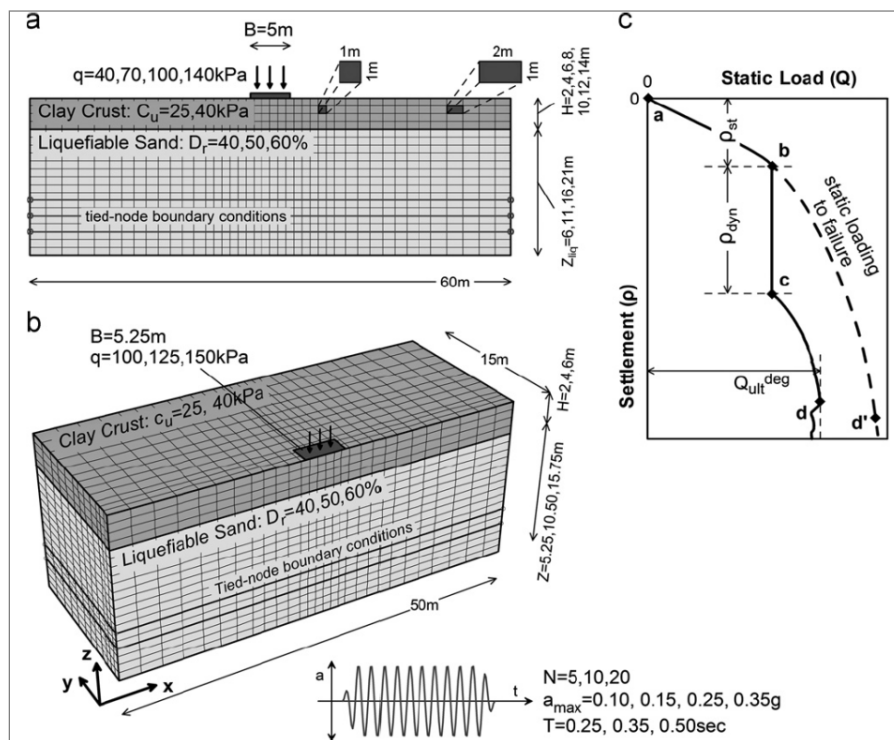
Στο άρθρο των Karamitros et al. (2013b), παρουσιάζεται μια απλοποιημένη αναλυτική μεθοδολογία για τον υπολογισμό των σεισμικών καθιζήσεων, επιμήκων (strip) και ορθογωνικών (rectangle) θεμελίων που εδράζονται σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με υπερκείμενη στρώση αργίλου. Η εν λόγω μεθοδολογία βασίστηκε σε αποτελέσματα παραμετρικών δυναμικών αριθμητικών αναλύσεων, και εμπεριέχει τον φυσικό μηχανισμό συσσώρευσης καθιζήσεων, ο οποίος συνδέεται με την αστοχία σε φέρουσα ικανότητα που συμβαίνει διαμέσου της στρώσης αργίλου και εκτείνεται εντός της ρευστοποιημένης στρώσης άμμου.

Πιο συγκεκριμένα, οι καθιζήσεις που προέρχονται από την ρευστοποίηση συσχετίστηκαν με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης και τον μειωμένο συντελεστή ασφαλείας σε στατική φόρτιση μετά την διέγερση, ενώ λήφθηκε επίσης υπόψη, το αποτέλεσμα της διαστολικής συμπεριφοράς του ρευστοποιημένου εδάφους. Οι αναλυτικές προβλέψεις αξιολογήθηκαν σε σχέση με παρατηρήσεις από μεγάλης κλίμακας πειράματα, καθώς επίσης, σε σχέση με παρατηρήσεις στο πεδίο από την πόλη Adapazarı της Τουρκίας, κατά την διάρκεια του σεισμού στην επαρχία Kocaeli το 1999. Τελικά, δημιουργήθηκαν γραφήματα για τον σχεδιασμό της θεμελίωσης βασισμένα στην απόκρισή της, για γρήγορη εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην πράξη.

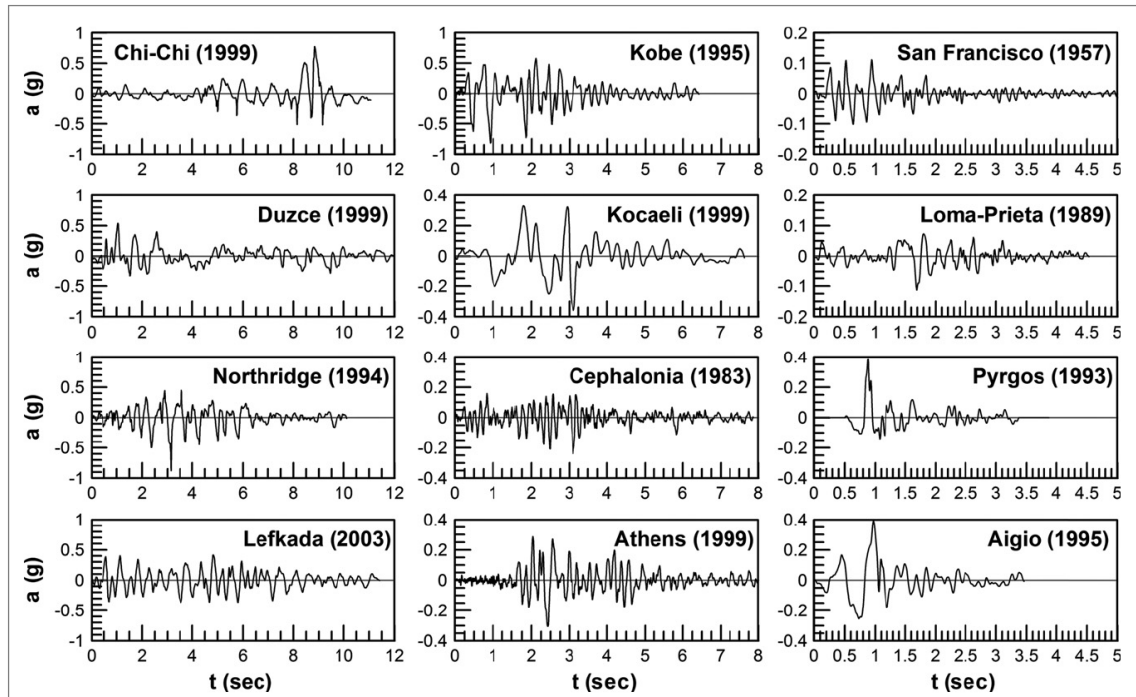
3.2.1 Αριθμητική μεθοδολογία

Η παρούσα έρευνα βασίστηκε σε 77 επιπλέον παραμετρικές αναλύσεις στις δύο διαστάσεις για τις επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις, και σε 32 αναλύσεις τριών διαστάσεων για τις τετραγωνικές (square) και ορθογωνικές (rectangular) θεμελιώσεις. Η διάταξη του αριθμητικού προσομοιώματος και το εύρος τιμών των υπό μελέτη παραμέτρων για τις 2-D και 3-D αριθμητικές αναλύσεις, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.10a και 3.10b, αντίστοιχα. Επιπλέον, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση της αναλογίας των διαστάσεων του θεμελίου L/B , πραγματοποιήθηκαν 6 αναλύσεις για $L/B = 1.67 - 5.00$ και $q = 125kPa$. Οι περισσότερες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν εισάγοντας στο προσομοίωμα μια αρμονική διέγερση, με χαρακτηριστικά των οποίων, το εύρος τιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν 12 παραμετρικές αναλύσεις με σεισμικές διεγέρσεις των οποίων οι καταγραφές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.11, οι οποίες κλιμακώθηκαν σε μια ενεργή επιτάχυνση $\alpha_{eff} = 0.15g$. Το εύρος τιμών της δεσπόζουσας περιόδου των σεισμικών διεγέρσεων, κυμαίνεται μεταξύ 0.15 και 0.65 sec. Τα προσομοιώματα της απόκρισης των στρώσεων αργίλου και άμμου, όπως επίσης τα τρία βήματα των αναλύσεων, περιγράφηκαν στην ενότητα 3.1.1 (Karamitros et al., 2013a).



Σχήμα 3.10. Αριθμητικό προσομοίωμα αναλύσεων και εύρος τιμών των παραμέτρων για τις (a) επιμήκεις και (b) ορθογωνικές θεμελιώσεις, (c) καμπύλη φορτίου-μετακίνησης της θεμελίωσης



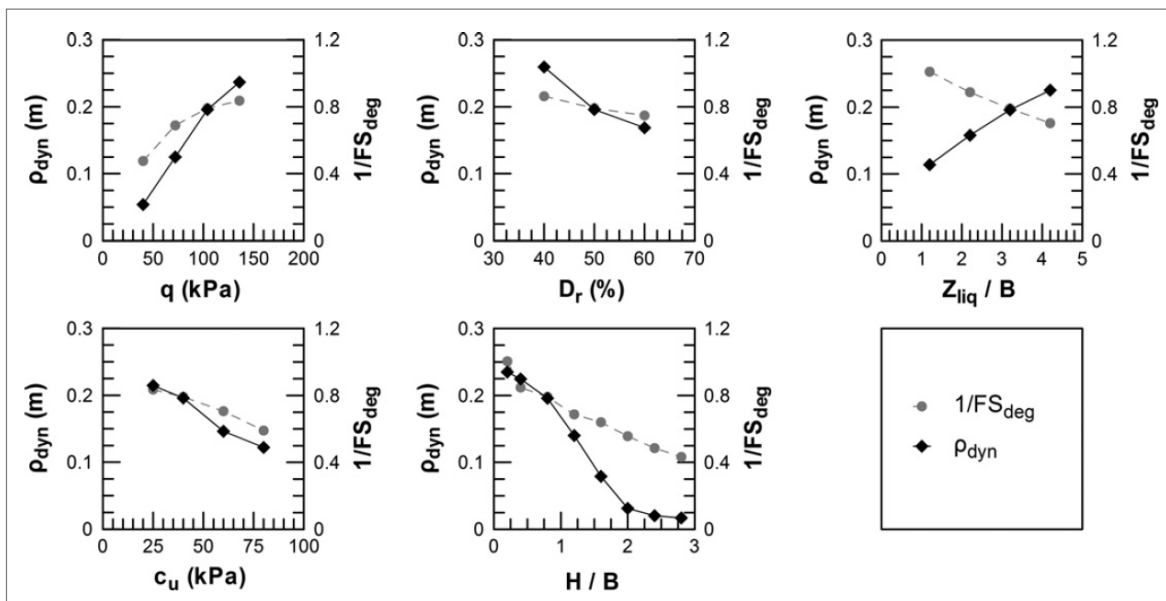
Σχήμα 3.11. Καταγραφές σεισμικών διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις

3.2.2 Αξιολόγηση των σεισμικών καθιζήσεων

Ως συνέχεια της ενότητας 3.1.3 στην οποία περιγράφηκε ο μηχανισμός συσσώρευσης σεισμικών καθιζήσεων, στην έρευνα αυτή, εντοπίζονται οι παράμετροι του προβλήματος, και διατυπώνεται μια αναλυτική σχέση υπολογισμού των σεισμικών καθιζήσεων. Οι παράμετροι του προβλήματος, που σχετίζονται με τον μηχανισμό ολίσθησης σώματος τύπου Newmark, είναι:

- Η φόρτιση και οι παράμετροι αντοχής, οι οποίες σχετίζονται με τον μηχανισμό αστοχίας που ενεργοποιείται, συγκεκριμένα: η μέση τάση έδρασης της θεμελίωσης q , το κανονικοποιημένο πάχος H/B και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u της αργιλικής στρώσης, καθώς επίσης, το κανονικοποιημένο πάχος Z_{liq}/B και η σχετική πυκνότητα D_r της βαθύτερης ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου.
- Τα χαρακτηριστικά της διέγερσης, τα οποία καθορίζουν το μέγεθος της καθίζησης όταν έχει ενεργοποιηθεί ο ανωτέρω μηχανισμός αστοχίας, συγκεκριμένα: η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης a_{max} , η μέγιστη ταχύτητα v_{max} (ή εναλλακτικά, η περίοδος της διέγερσης T) και ο αριθμός των σημαντικών κύκλων φόρτισης N .

Η επίδραση της πρώτης κατηγορίας των παραμέτρων στην σεισμική καθίζηση ρ_{dyn} , παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12, για την περίπτωση των επιμήκων (strip) θεμελιώσεων. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε γράφημα παρουσιάζεται η μεταβολή της ρ_{dyn} σε σχέση με μία από τις πέντε παραμέτρους, με τις υπόλοιπες παραμέτρους να λαμβάνουν τιμές $q = 100kPa$, $H/B = 0.8$, $c_u = 40kPa$, $D_r = 50\%$, $Z_{liq}/B = 3.2$, $a_{max} = 0.15g$, $T = 0.35sec$, $N = 10$. Χρησιμοποιώντας την ίδια μορφή, στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται επίσης, η επίδραση των ανωτέρω παραμέτρων στον λόγο $q/q_{ult,deg} = 1/FS_{deg}$. Η παράλληλη αυτή σύγκριση αποδεικνύει, ότι οι παράμετροι q , H/B , c_u , D_r έχουν ποιοτικά όμοια αποτελέσματα για την καθίζηση ρ_{dyn} και τον λόγο $1/FS_{deg}$. Επομένως, η καθίζηση ρ_{dyn} θα μπορούσε απευθείας να συσχετιστεί με την μεταβλητή $1/FS_{deg}$ παρά με τις ανωτέρω τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές του εδάφους και της θεμελίωσης, οδηγώντας έτσι σε μια απλούστερη έκφραση για τον υπολογισμό των καθιζήσεων. Η μεταβλητή Z_{liq}/B παρουσιάζει αντίθετη επιρροή στην καθίζηση ρ_{dyn} και στον λόγο $1/FS_{deg}$, και άρα, δεν μπορεί να απαλειφθεί. Όσον αφορά τέλος, στην επίδραση των παραμέτρων της δεύτερης κατηγορίας, οι καθιζήσεις της θεμελίωσης λήφθηκαν ανάλογες του όρου $a_{max}T^2N$, ο οποίος προκύπτει από την θεώρηση ολισθαίνοντος στερεού κατά Newmark.



Σχήμα 3.12. Επίδραση των παραμέτρων q , D_r , Z_{liq}/B , c_u , H/B στην καθίζηση ρ_{dyn} και τον λόγο $1/FS_{deg}$, για επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις

Βάσει των ανωτέρω παρατηρήσεων, οι τιμές της καθίζησης ρ_{dyn} από τις παραμετρικές αναλύσεις με αρμονική διέγερση κανονικοποιήθηκαν ως προς τον όρο $(\alpha_{max}T^2N)(Z_{liq}/B)^{1.5}$ και συσχετίστηκαν με τον λόγο $1/FS_{deg}$ (σημεία με μαύρο χρώμα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Έτσι, διατυπώθηκε τελικά η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$\rho_{dyn} = c\alpha_{max}T^2N \left(\frac{Z_{liq}}{B}\right)^{1.5} \left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3 \quad (3.4)$$

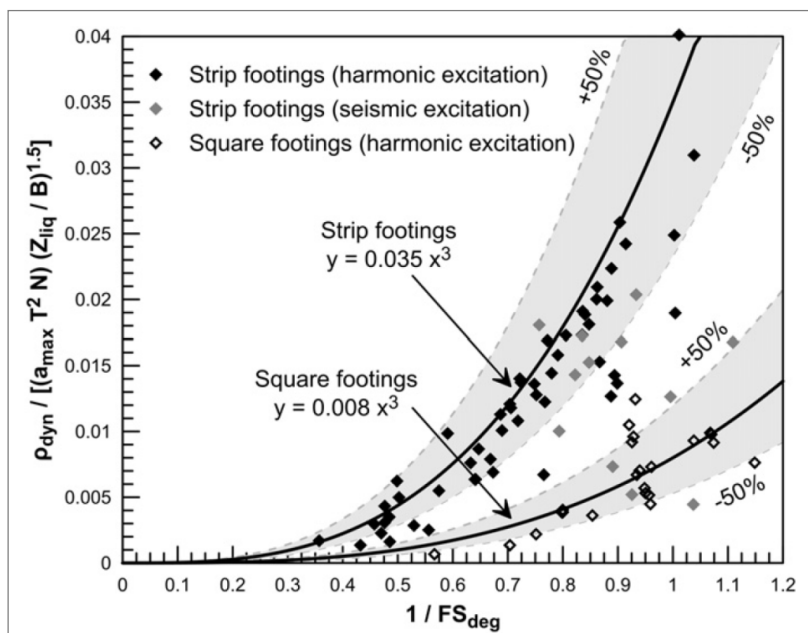
Ο συντελεστής c στην ανωτέρω Εξ. 3.4 είναι ίσος με 0.008 και 0.035 για τετραγωνικές (square) και επιμήκειες (strip) θεμελιώσεις. Για ενδιάμεσες τιμές του λόγου L/B , η τιμή του c μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από την σχέση (Σχήμα 3.14):

$$c = c' \left(1 + 1.65 \frac{L}{B}\right) \leq 11.65c', \quad \text{όπου } c' = 0.003 \quad (3.5)$$

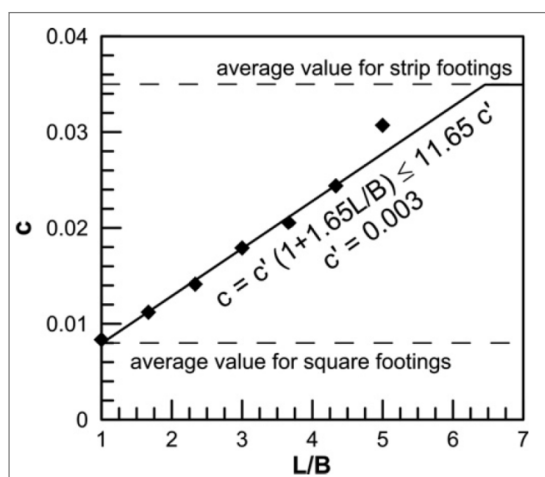
Ο όρος $\alpha_{max}T^2N$ στην Εξ. 3.4 μπορεί εναλλακτικά να εκφραστεί ως:

$$\alpha_{max}T^2N = \pi^2 \int_{t=0}^{N \cdot T} \frac{\alpha_{max}T}{2\pi} \left| \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right| dt = \pi^2 \int_{t=0}^{N \cdot T} |v(t)| dt \quad (3.6)$$

Έτσι, η Εξ. 3.4 μπορεί να γενικευθεί για κάθε εισαγόμενη διέγερση αντικαθιστώντας τον όρο $\alpha_{max}T^2N$ με $\pi^2 \int |v(t)| dt$, όπου $v(t)$ είναι η εισαγόμενη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Οι αριθμητικές προβλέψεις για τις σεισμικές διεγέρσεις που λήφθηκαν υπόψη στην έρευνα αυτή (Σχήμα 3.11), παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.13 (σημεία με γκρι χρώμα), μαζί με τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις με τις αρμονικές διεγέρσεις. Η συμφωνία με την Εξ. 3.4 παραμένει σταθερή, αν και η διασπορά αυξήθηκε λίγο σε σύγκριση με τις αρμονικές διεγέρσεις.



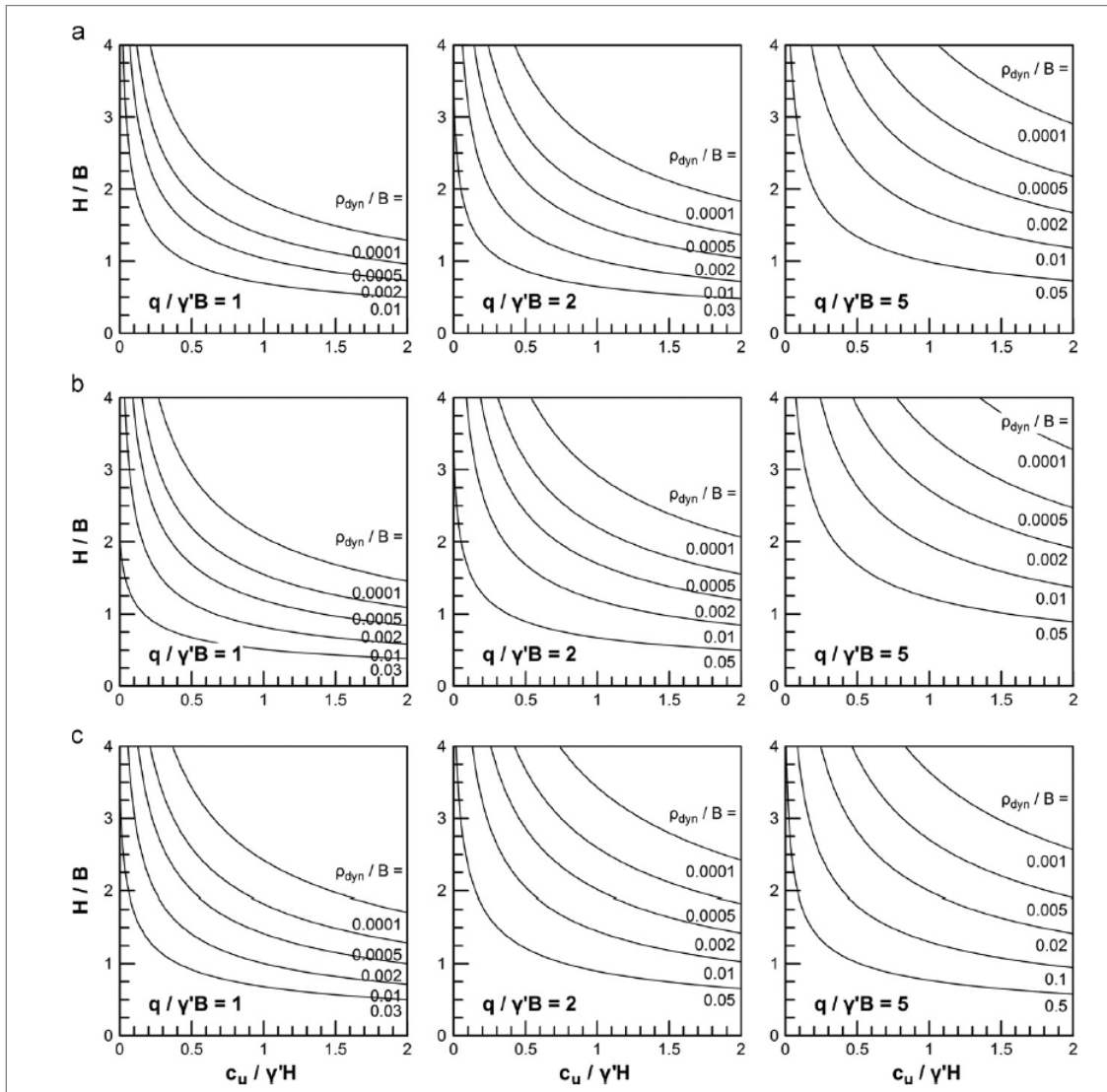
Σχήμα 3.13. Συσχέτιση των κανονικοποιημένων καθιζήσεων ρ_{dyn} με τον μειωμένο συντελεστή ασφαλείας FS_{deg}



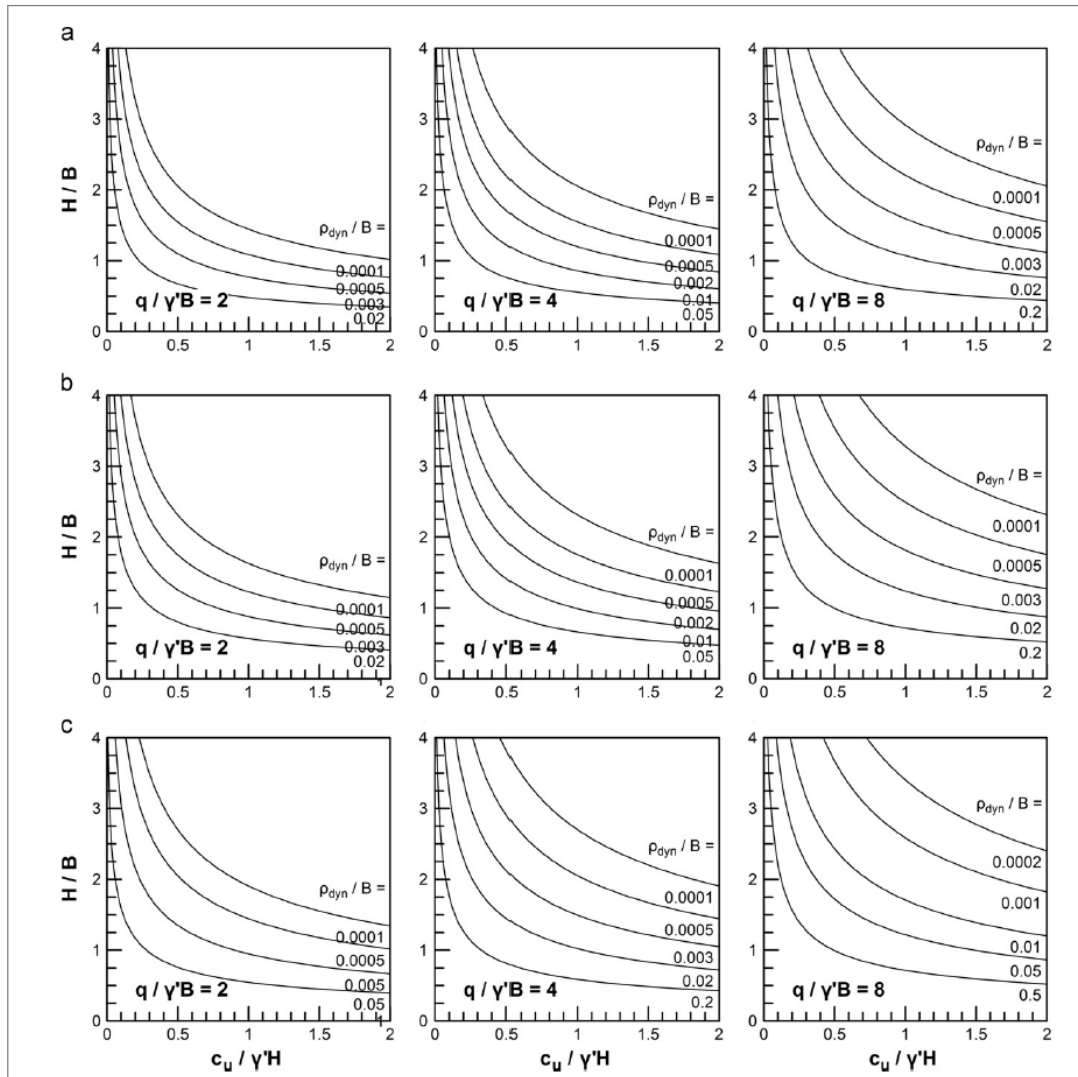
Σχήμα 3.14. Μεταβολή του συντελεστή c στην Εξ. 3.4 ως προς τον λόγο L/B

3.2.3 Δημιουργία γραφημάτων σχεδιασμού

Πέρα από την αναλυτική μεθοδολογία για τον υπολογισμό των σεισμικών καθιζήσεων, δημιουργήθηκαν γραφήματα σχεδιασμού για γρήγορες εφαρμογές της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην πράξη. Για τον σκοπό αυτό, οι παράμετροι του προβλήματος εκφράστηκαν αρχικά σε αδιάστατη μορφή. Συγκεκριμένα, ο λόγος της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn}/B συσχετίστηκε με τον λόγο της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης $q/\gamma'B$, το κανονικοποιημένο πάχος της αργλικής στρώσης H/B , τον λόγο της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργλικής στρώσης $c_u/\gamma'H$, και τον συνδυασμό της έντασης της σεισμικής διέγερσης με την έκταση της ρευστοποίησης που εκφράστηκε ως $\rho_o^* = (\alpha_{max}T^2N/B)(Z_{liq}/B)^{1.5}$. Σημειώνεται, ότι η αρχική γωνία τριβής φ_o της άμμου είναι επίσης μια παράμετρος του προβλήματος. Ωστόσο, για το αναμενόμενο εύρος τιμών για ρευστοποιήσιμες άμμους (π.χ. $\varphi_o = 32^\circ$ έως 38°), η επίδρασή της είναι σχετικά μικρή, και τα γραφήματα δημιουργήθηκαν για μια μέση τιμή $\varphi_o = 35^\circ$. Στα Σχήματα 3.15a, 3.15b και 3.15c παρουσιάζονται τα γραφήματα για επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις και $\rho_o^* = 1.0, 2.0, 5.0$, αντίστοιχα. Παρομοίως, τα γραφήματα για τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.16a, 3.16b και 3.16c.



Σχήμα 3.15. Γραφήματα για την εκτίμηση της καθίζησης ρ_{dyn} για **(a)** $\rho_o^* = 1.0$, **(b)** $\rho_o^* = 2.0$ και **(c)** $\rho_o^* = 5.0$ - Επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις



Σχήμα 3.16. Γραφήματα για την εκτίμηση της καθίζησης ρ_{dyn} για **(a)** $\rho_o^* = 1.0$, **(b)** $\rho_o^* = 2.0$ και **(c)** $\rho_o^* = 5.0$ - Τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις

3.2.4 Κύρια ευρήματα

Στην εν λόγω έρευνα, προτάθηκε μια απλοποιημένη μεθοδολογία για την εκτίμηση των σεισμικών καθιζήσεων, των επιμήκων (strip) και ορθογωνικών (rectangle) επιφανειακών θεμελιώσεων, οι οποίες εδράζονται σε μια σχετικά μεγάλου πάχους ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου με επιφανειακή στρώση αργίλου. Οι αναλυτικές εκφράσεις που διατυπώθηκαν, δεν ήταν απλώς το αποτέλεσμα στατιστικής επεξεργασίας αριθμητικών δεδομένων, αλλά διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να αντανakλούν τους φυσικούς μηχανισμούς συσσώρευσης καθιζήσεων.

Συνοπτικά, τα κύρια ευρήματα από την συγκεκριμένη έρευνα είναι τα ακόλουθα:

- Η σεισμική καθίζηση της θεμελίωσης, δεν είναι το αποτέλεσμα της συμπύκνωσης που σχετίζεται με την διάχυση της υπερπίεσης πόρων, αλλά οι καθιζήσεις συσσωρεύονται εξαιτίας της ανάπτυξης ενός μηχανισμού αστοχίας ολίσθησης σώματος τύπου Newmark.
- Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του εδάφους και του θεμελίου, οι σεισμικές καθιζήσεις σχετίζονται με τον μειωμένο συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} για την μετασεισμική φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης. Επιπλέον, σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής φόρτισης, συγκεκριμένα, την μέγιστη επιτάχυνση α_{max} , την μέγιστη ταχύτητα v_{max} (ή εναλλακτικά, την περίοδο της διέγερσης T) και τον αριθμό των σημαντικών κύκλων φόρτισης N .
- Οι καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης μειώνονται σημαντικά με αύξηση του πάχους και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης.
- Εξαιτίας της διαστολικότητας λόγω διάτμησης της ρευστοποιημένης άμμου, οι σεισμικές καθιζήσεις συνδέονται με τις υπερπίεσεις πόρων, οι οποίες με την σειρά τους εξαρτώνται από τις καθιζήσεις. Λόγω της ανωτέρω διπλής συσχέτισης μεταξύ των σεισμικών καθιζήσεων, των υπερπίεσεων πόρων και της αντίστοιχης φέρουσας ικανότητας σε στατική φόρτιση, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι επαναληπτική.

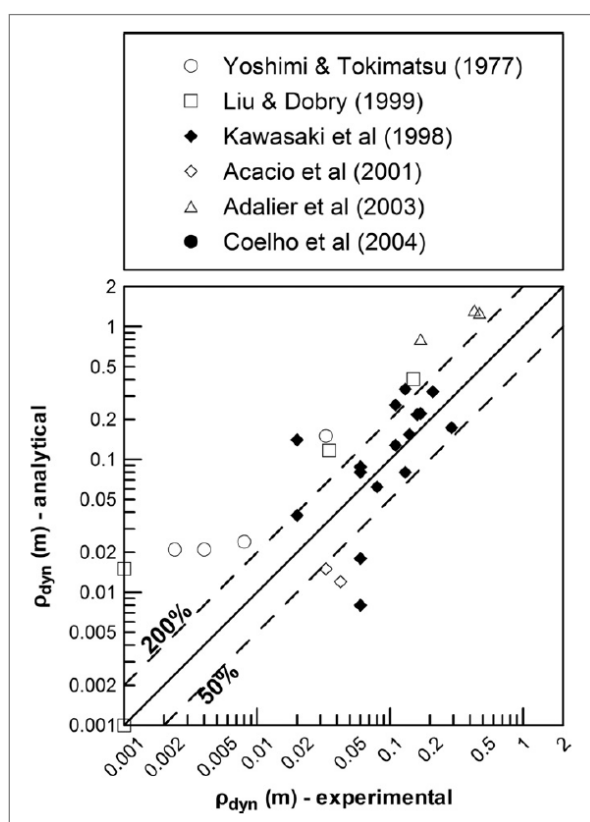
3.2.5 Αξιολόγηση μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολογήθηκε σε σύγκριση με αποτελέσματα από μεγάλο αριθμό σχετικών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας, καθώς επίσης, σε σύγκριση με παρατηρήσεις της απόκρισης επιφανειακών θεμελιώσεων στην πόλη Adapazari της Τουρκίας, κατά την διάρκεια του σεισμού στην επαρχία Kocaeli το 1999 μεγέθους $M=7.8$.

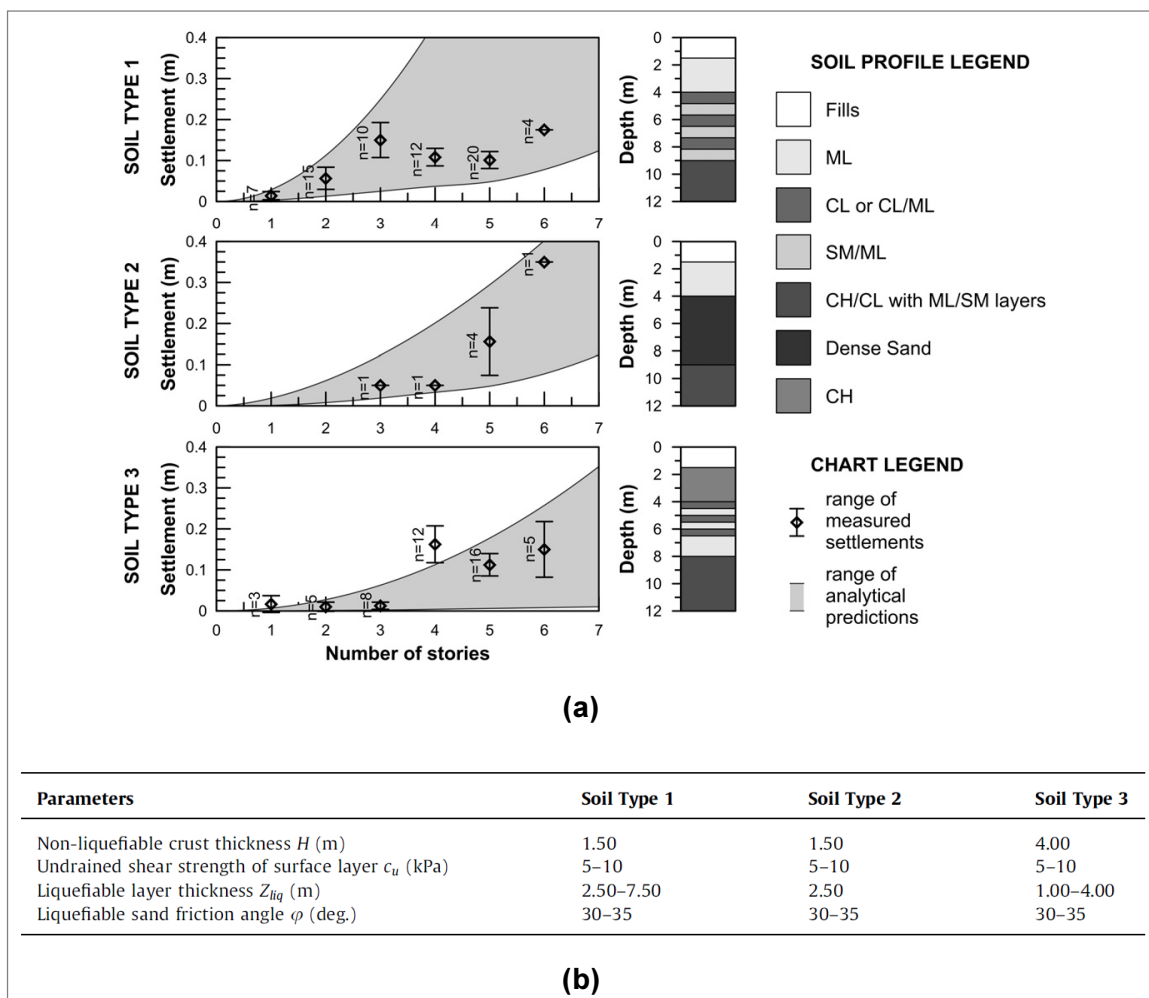
Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων, όπως επίσης, το σχετικό σφάλμα σε σχέση με τις καθιζήσεις που έχουν καταγραφεί. Παρατηρείται, ότι υπάρχει μια σταθερή συσχέτιση μεταξύ των αναλυτικών προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων, με την μεθοδολογία να είναι περίπου 30% συντηρητική κατά μέσο όρο, και το σχετικό σφάλμα να είναι μικρότερο από 100% για το 75% περίπου των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Επιπλέον, στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται το εύρος των αναλυτικών προβλέψεων με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία, σε σχέση με τις παρατηρήσεις καθιζήσεων στην πόλη Adapazari.

Είναι αξιοσημείωτη, η συνέπεια που παρατηρείται μεταξύ της τάσης που παρουσιάζουν οι παρατηρήσεις στο πεδίο και οι αναλυτικές προβλέψεις. Επιπλέον, η ποσοτική συμφωνία μεταξύ των δύο συνόλων δεδομένων είναι αρκετά ικανοποιητική, με το άνω όριο των αναλυτικών προβλέψεων να αποκλίνει μόνο 12% απ' όλες τις παρατηρήσεις στο πεδίο (2% για Soil Type 1, 1% για Soil Type 2 και 28% για Soil Type 3).

Συμπερασματικά, οι συγγραφείς τονίζουν, ότι ακόμη και αν η μεθοδολογία βασίζεται σε θεωρητικές έννοιες και αρχές, παραμένει εμπειρική. Επομένως, η εφαρμογή της θα πρέπει να ανταποκρίνεται στο εύρος των παραμέτρων που λήφθηκαν υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας είναι αυστηρώς σχετικά με μια απεριόριστα εκτεταμένη και απολύτως συνεκτική επιφανειακή στρώση, όπως επίσης, με μια ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου με επαρκές πάχος, η οποία αποδυναμώνει την σεισμική διέγερση που καταλήγει στο επίπεδο της θεμελίωσης.



Σχήμα 3.17. Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn}



Σχήμα 3.18. (a) Μεταβολή του εύρους των μετρημένων καθιζήσεων και των αντίστοιχων αναλυτικών προβλέψεων σε σχέση με τον αριθμό ορόφων, για κτίρια που εδράζονται στα εδαφικά προφίλ 1, 2 και 3 στην πόλη Adarazari, **(b)** Εύρος τιμών των παραμέτρων για τα τρία εδαφικά προφίλ

3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ (Karamitros et al., 2013c)

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων που προκαλείται λόγω σεισμικής διέγερσης και η επακόλουθη μείωση της διατμητικής αντοχής των ρευστοποιήσιμων εδαφών, συντελεί στην μείωση της φέρουσας ικανότητας και στην συσσώρευση καθιζήσεων των επιφανειακών θεμελιώσεων. Τα δύο αυτά δυσμενή αποτελέσματα χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη, με σκοπό να εξασφαλίζεται ένας λειτουργικά και στατικά βιώσιμος σχεδιασμός της θεμελίωσης.

Η έρευνα των Karamitros et al. (2013c), εστιάστηκε στην πρώτη επίπτωση, για την περίπτωση επιμήκων (strip) και ορθογωνικών (rectangle) θεμελιώσεων που εδράζονται σε μια βαθιά στρώση ρευστοποιήσιμου εδάφους με μια υπερκείμενη μικρότερου πάχους μη ρευστοποιήσιμη αργιλική στρώση. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε μια απλοποιημένη αναλυτική μεθοδολογία, η οποία βασίζεται στον σύνθετο μηχανισμό αστοχίας Meyerhof and Hanna (1978) και στην χρήση μιας μειωμένης γωνίας τριβής για την ρευστοποιημένη άμμο. Η μεθοδολογία επιβεβαιώθηκε και αξιολογήθηκε σε σχέση με παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις με την μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε η έννοια ενός κρίσιμου πάχους της αργιλικής στρώσης, πέραν του οποίου, η ρευστοποίηση του υποκείμενου εδάφους δεν επηρεάζει την φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης και κατ' επέκταση τις σεισμικές καθιζήσεις.

3.3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ο σύνθετος μηχανισμός αστοχίας Meyerhof and Hanna (1978) περιλαμβάνει διατμητική αστοχία διαμέσου της αργιλικής στρώσης, σε συνδυασμό με μια αστοχία μορφής σφήνας εντός της ρευστοποιημένης στρώσης άμμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19. Οι Cascone and Bouckovalas (1998) θεώρησαν, ότι ένας "ενιαίος" λόγος υπερπίεσης πόρων $U = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,o}}$ αναπτύσσεται σε όλη την ρευστοποιήσιμη στρώση, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε μετά, για να υπολογιστεί μια μειωμένη γωνία τριβής φ_{deg} για την ρευστοποιημένη άμμο, ως συνάρτηση της πραγματικής γωνίας τριβής φ :

$$\varphi_{deg} = \tan^{-1}[(1 - U)\tan\varphi] \quad (3.7)$$

Συνεπώς, εφαρμόστηκε ο σύνθετος μηχανισμός αστοχίας Meyerhof and Hanna, προκειμένου να υπολογιστεί η μειωμένη φέρουσα ικανότητα $q_{ult,deg}$, ως εξής:

$$q_{ult,deg} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2c_u \frac{H}{B} s - \gamma' H + \frac{1}{2} \gamma' B N_\gamma F_{\gamma s} + \gamma' H N_q F_{qs} \\ (\pi + 2)c_u F_{cs} \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

όπου: B = το πλάτος του θεμελίου, H = το πάχος της αργιλικής στρώσης, c_u = η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής στρώσης, και γ' = το ενεργό ειδικό βάρος, το οποίο λήφθηκε ίδιο για τις στρώσεις άμμου και αργίλου.

Σε αυτή την περίπτωση, οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας N_γ και N_q υπολογίζονται ως συναρτήσεις της μειωμένης γωνίας τριβής φ_{deg} :

$$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi_{deg} \quad (3.9\alpha)$$

$$N_q = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi_{deg}}{2}\right)e^{\pi\tan\varphi_{deg}} \quad (3.9\beta)$$

ενώ, οι συντελεστές σχήματος $F_{\gamma s}$, F_{qs} , F_{cs} και s υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις, ως συναρτήσεις του λόγου πλάτους προς μήκος της θεμελίωσης, B/L :

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4\frac{B}{L} \quad (3.10\alpha)$$

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L}\tan\varphi_{deg} \quad (3.10\beta)$$

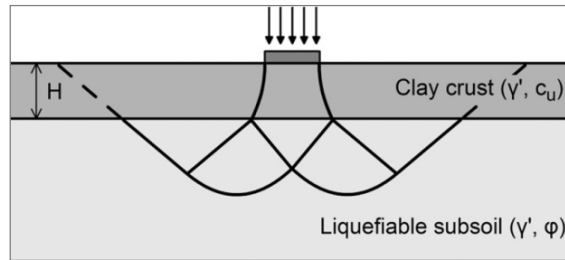
$$F_{cs} = 1 + \frac{1}{\pi+2}\frac{B}{L} \quad (3.10\gamma)$$

$$s = 1 + \frac{B}{L} \quad (3.10\delta)$$

Με σκοπό να απλοποιήσουν τους υπολογισμούς, οι Cascone and Bouckovalas (1998) εισήγαγαν τον μειωτικό συντελεστή ζ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μετασεισμικής μειωμένης φέρουσας ικανότητας $q_{ult,deg}$, κανονικοποιημένος ως προς την φέρουσα ικανότητα της αργιλικής στρώσης:

$$\zeta = \frac{q_{ult,deg}}{(\pi+2)c_u F_{cs}} \quad (3.11)$$

Στα Σχήματα 3.21 και 3.22 παρουσιάζονται διαγράμματα της μεταβολής του μειωτικού συντελεστή ζ σε σχέση με τον λόγο υπερπίεσης πόρων U . Οι Karamitros et al. (2013c) βασίστηκαν στο σκεπτικό των Cascone and Bouckovalas (1998) για τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας, και έδωσαν έμφαση στον υπολογισμό της αντιπροσωπευτικής τιμής του λόγου υπερπίεσης πόρων U , ο οποίος ελέγχει την απομείωση της γωνίας τριβής φ_{deg} (Εξ. 3.7).



Σχήμα 3.19. Σύνθετος μηχανισμός αστοχίας που προτάθηκε από τους Meyerhof and Hanna (1978)

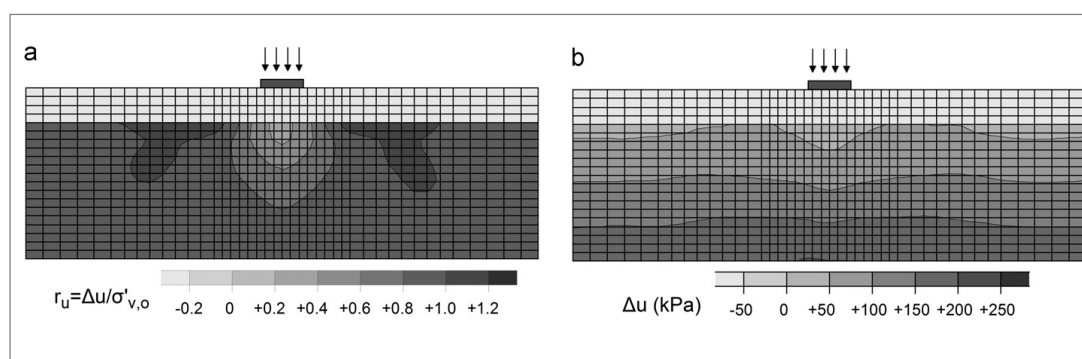
Όσον αφορά στην αριθμητική μεθοδολογία της έρευνας, για την διάταξη του προσομοιώματος, το εύρος τιμών των υπό μελέτη παραμέτρων για τις 2-D (επιμήκεις θεμελιώσεις) και 3-D (τετραγωνικές και ορθογωνικές θεμελιώσεις) αριθμητικές αναλύσεις, τα τρία βήματα των αναλύσεων και τα προσομοιώματα της απόκρισης των στρώσεων αργίλου και άμμου, ισχύουν τα ίδια που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.2.1 (Karamitros et al., 2013b).

3.3.2 Χαρακτηριστική τιμή του "ενιαίου" λόγου υπερπίεσης πόρων U

Με σκοπό την εκτίμηση του λόγου υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσεται σε όλη την ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου, στο Σχήμα 3.20a παρουσιάζονται οι καμπύλες των λόγων υπερπίεσης πόρων, στο τέλος της διέγερσης, από μια τυπική ανάλυση για επιμήκη (strip) θεμελίωση. Λήφθηκε υπόψη, ότι κάτω από την θεμελίωση διαμορφώνεται μια ενεργή ζώνη αστοχίας, η οποία ωθεί το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο σε παθητική αστοχία. Επομένως, για την αναλυτική λύση λήφθηκε υπόψη ένας σταθμισμένος μέσος όρος των λόγων υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση (U_{foot}) και στο ελεύθερο πεδίο (U_{ff}). Πιο συγκεκριμένα, για τις επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις, ο σταθμισμένος μέσος όρος λήφθηκε $U = (U_{foot} + U_{ff})/2$, ενώ, για τις τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις λήφθηκε $U = (U_{foot} + 2U_{ff})/3$. Για τις ορθογωνικές (rectangular) θεμελιώσεις πλάτους B και μήκους L , ο σταθμισμένος μέσος όρος υπολογίστηκε ως:

$$U = \frac{U_{foot} + (1 + (B/L))U_{ff}}{2 + (B/L)} \quad (3.12)$$

Επιπλέον, ο λόγος υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση U_{foot} , υπολογίστηκε σε μια περιοχή $1.5B \times 1.5B$ για τις επιμήκεις θεμελιώσεις, και σε μια περιοχή $B \times B \times B$ για τις τετραγωνικές θεμελιώσεις.

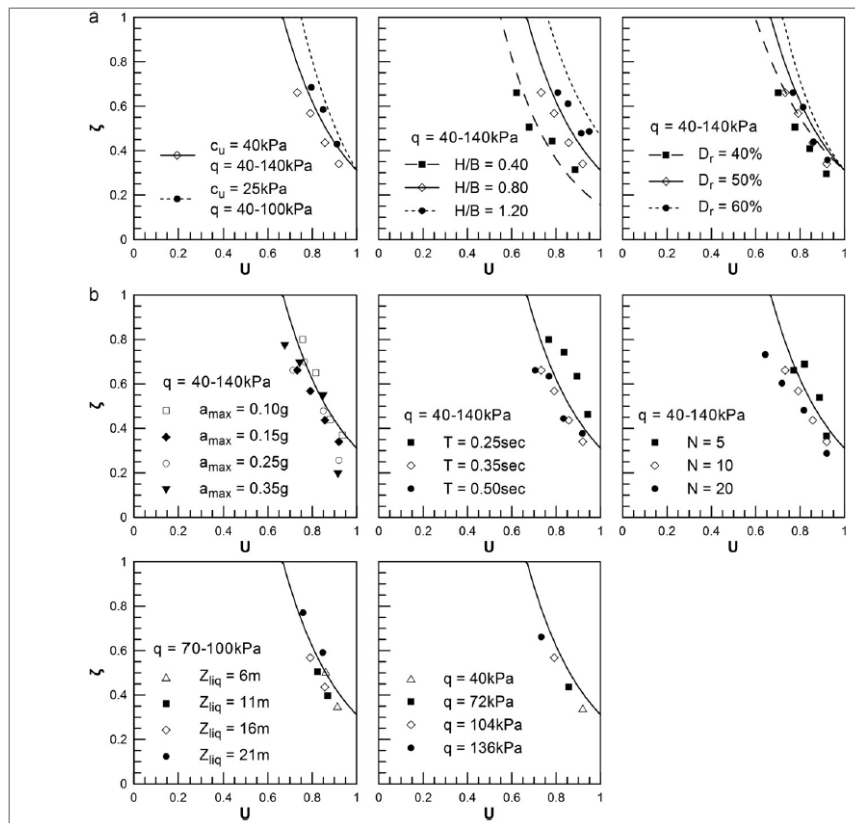


Σχήμα 3.20. Καμπύλες των **(a)** λόγων υπερπίεσης πόρων και **(b)** απόλυτων τιμών υπερπίεσης πόρων, για επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις

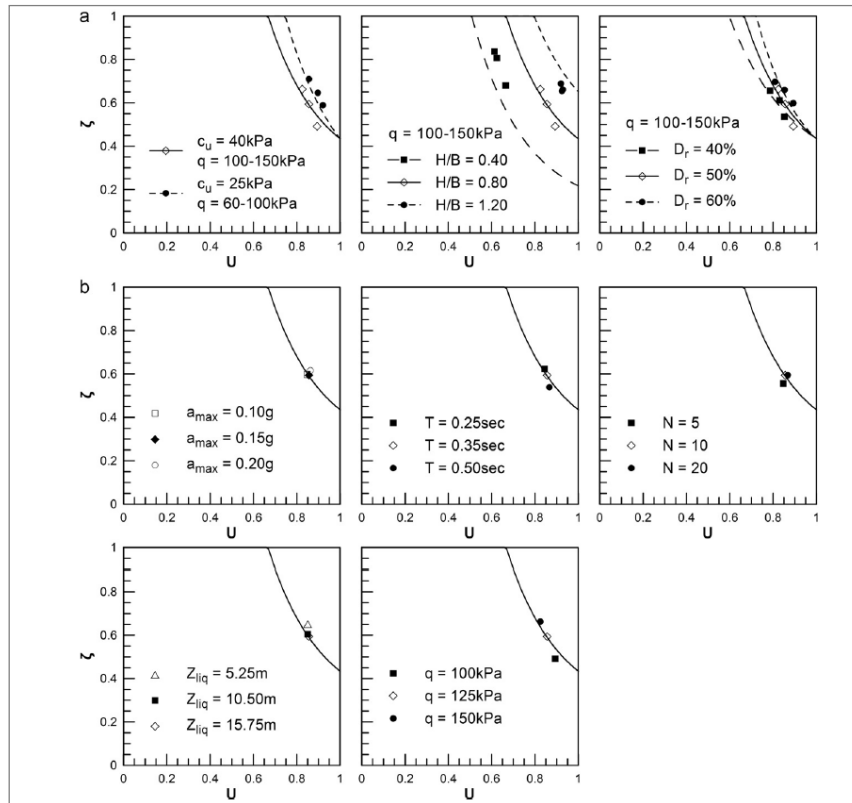
Στα Σχήματα 3.21 και 3.22 συγκρίνεται η αναλυτικά και αριθμητικά προβλεπόμενη μεταβολή του μειωτικού συντελεστή ζ , σε σχέση με τον ανωτέρω σταθμισμένο μέσο όρο του λόγου υπερπίεσης πόρων U , για τις επιμήκεις (strip) και τις τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις, αντίστοιχα. Οι παράμετροι, οι οποίες διαφοροποιούνταν σε κάθε σύγκριση, παρουσιάζονται στα αντίστοιχα γραφήματα, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι, οι οποίες παρέμειναν σταθερές, διατήρησαν τις τιμές αναφοράς $q = 104kPa$ (strip footings) ή $q = 125kPa$ (square footings), $c_u = 40kPa$, $Z_{liq} = 16m$, $D_r = 50\%$, $N = 10$, $a_{max} = 0.15$ και $T = 0.35sec$.

Εστιάζοντας αρχικά στα Σχήματα 3.21a και 3.22a, παρατηρείται, ότι οι αναλυτικές προβλέψεις (συνεχείς ή διακεκομμένες γραμμές) είναι σε καλή συμφωνία με τα αριθμητικά αποτελέσματα (δεδομένα σημείων), απεικονίζοντας με αρκετή ακρίβεια την επίδραση στον μειωτικό συντελεστή ζ του σταθμισμένου μέσου όρου του λόγου υπερπίεσης πόρων U , και των ανεξάρτητων παραμέτρων H/B , c_u και D_r . Μια παρόμοια καλή συμφωνία ανάμεσα στις αναλυτικές και αριθμητικές προβλέψεις παρατηρείται επίσης, στα Σχήματα 3.21b και 3.22b, που αναφέρονται στις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος q , Z_{liq} , N , a_{max} και T . Πιο συγκεκριμένα, όλες αυτές οι αριθμητικές προβλέψεις διαμορφώνουν στενές περιοχές, οι οποίες είναι αρκετά

καλά προσαρμοσμένες στην μοναδική $\zeta - U$ αναλυτική πρόβλεψη (μοναδική συνεχής γραμμή), η οποία αντιστοιχεί στις τιμές αναφοράς των H/B , c_u και D_r . Αυτή η παρατήρηση υποστηρίζει την θεωρητική υπόθεση, ότι οι ανωτέρω παράμετροι δεν εισάγονται άμεσα στον υπολογισμό της μειωμένης φέρουσας ικανότητας, αλλά έμμεσα, μέσω της επίδρασής τους στον σταθμισμένο μέσο όρο του λόγου υπερπίεσης πόρων U .



Σχήμα 3.21. Σύγκριση ανάμεσα στους προβλεπόμενους, αναλυτικά και αριθμητικά, συντελεστές μείωσης της φέρουσας ικανότητας ζ , για επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις



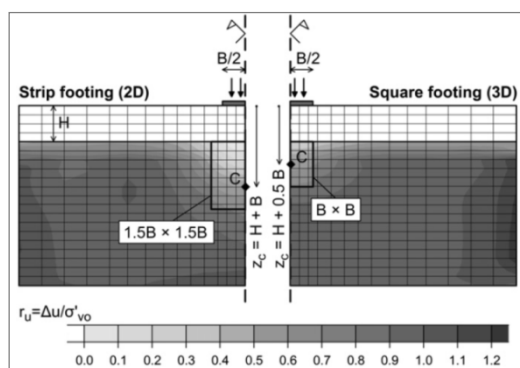
Σχήμα 3.22. Σύγκριση ανάμεσα στους προβλεπόμενους, αναλυτικά και αριθμητικά, συντελεστές μείωσης της φέρουσας ικανότητας ζ , για τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις

3.3.3 Αναλυτικός υπολογισμός του "ενιαίου" λόγου υπερπίεσης πόρων U

Τα προηγούμενα, επισημαίνουν την σημασία ενός ακριβούς υπολογισμού μιας ισοδύναμης ενιαίας τιμής του λόγου υπερπίεσης πόρων U , με συνιστώσες, την τιμή του λόγου στο ελεύθερο πεδίο U_{ff} , και την τιμή του λόγου U_{foot} σε μια περιοχή του ρευστοποιήσιμου εδάφους κάτω από την θεμελίωση. Ανάμεσα στις δύο αυτές συνιστώσες, η U_{ff} είναι η πιο εύκολη να υπολογιστεί, διότι λαμβάνοντας πλήρης ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο, ισχύει $U_{ff} \sim 1.00$. Προκειμένου να υπολογιστεί αναλυτικά ο λόγος U_{foot} , αρχικά εξετάστηκε πως μπορεί να συσχετιστεί με τον λόγο υπερπίεσης πόρων σ' ένα μοναδικό χαρακτηριστικό σημείο στον άξονα της θεμελίωσης (σημείο C στο Σχήμα 3.23). Διαπιστώθηκε έτσι, ότι μια βέλτιστη προσαρμογή επιτυγχάνεται για ένα χαρακτηριστικό σημείο σε βάθος $z_c = H + B$ για τις επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις, και σε βάθος $z_c = H + 0.5B$ για τις τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις. Περαιτέρω ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για

ορθγωνικές (rectangular) θεμελιώσεις με διαφορετικούς λόγους μήκους προς πλάτος L/B , απέδειξε, ότι το βάθος του χαρακτηριστικού σημείου δίνεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη γενικευμένη έκφραση:

$$z_c = H + \left[1.0 - 0.5 \left(\frac{B}{L} \right)^3 \right] B \quad (3.13)$$



Σχήμα 3.23. Περιοχή κάτω από την θεμελίωση, όπου υπολογίστηκε η μέση τιμή των λόγων υπερπίεσης πόρων, και βάθος z_c του χαρακτηριστικού σημείου που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του $U_{foot,c}$, για τις επιμήκεις (strip) και τις τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις

Ακολούθως, αναζητήθηκε μια απλοποιημένη διαδικασία για τον αναλυτικό υπολογισμό του λόγου υπερπίεσης πόρων σε αυτό το χαρακτηριστικό σημείο, χωρίς την ανάγκη λεπτομερούς αριθμητικής ανάλυσης. Μ' έναν προσεγγιστικό τρόπο, αυτό επιτεύχθηκε, εστιάζοντας στην κατανομή των υπερπίεσεων πόρων (Δu) στο έδαφος θεμελίωσης, παρά στους αντίστοιχους λόγους υπερπίεσης πόρων. Αυτό αιτιολογείται μέσω του Σχήματος 3.20b, στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή των υπερπίεσεων πόρων στο τέλος της διέγερσης, από μια τυπική αριθμητική ανάλυση για επιμήκεις θεμελιώσεις. Γίνεται φανερό ότι, σε αντίθεση με τους λόγους υπερπίεσης πόρων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.20a, οι τιμές της υπερπίεσης πόρων ποικίλλουν σχεδόν γραμμικά με το βάθος, ανάλογα με τις υπερπίεσεις πόρων στο ελεύθερο πεδίο. Με βάση αυτή την παρατήρηση, διατυπώθηκε η σχέση:

$$\Delta u_c = a \Delta u_{ff,c} \quad (3.14)$$

όπου, Δu_c είναι η υπερπίεση πόρων στο χαρακτηριστικό σημείο, ενώ $\Delta u_{ff,c}$ είναι η υπερπίεση πόρων στο ελεύθερο πεδίο, σε βάθος ίσο με z_c .

Θεωρώντας, ότι το έδαφος στο ελεύθερο πεδίο υφίσταται πλήρη ρευστοποίηση, η $\Delta u_{ff,c}$ είναι περίπου ίση με την γεωστατική κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_{vo,c}$ και συνεπώς, ο λόγος υπερπίεσης πόρων του χαρακτηριστικού σημείου, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$U_c = \frac{a\Delta u_{ff,c}}{\sigma'_{vo,c} + \Delta\sigma_{v,c}} = \frac{a\sigma'_{vo,c}}{\sigma'_{vo,c} + \Delta\sigma_{v,c}} = \frac{a}{1 + \frac{\Delta\sigma_{v,c}}{\sigma'_{vo,c}}} \quad (3.15)$$

όπου, $\Delta\sigma_{v,c}$ είναι η πρόσθετη κατακόρυφη τάση που επιβάλλεται στο χαρακτηριστικό σημείο από το φορτίο της θεμελίωσης. Είναι γνωστό, ότι η $\Delta u_{ff,c}$ είναι συνήθως λίγο μικρότερη από την $\sigma'_{vo,c}$. Στην περίπτωση αυτή, η Εξ. 3.15 υπερεκτιμά τους λόγους υπερπίεσης πόρων U_c κάτω από την θεμελίωση, και οδηγεί σε μια συντηρητική εκτίμηση του μειωμένου συντελεστή ασφαλείας.

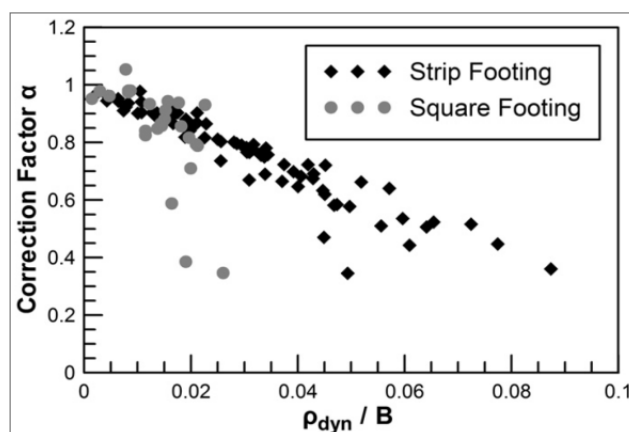
Επιπλέον, επισημαίνεται, ότι η ανωτέρω απλοποιημένη διαδικασία εισάγει την επίδραση της μέσης τάσης έδρασης της θεμελίωσης q στους λόγους υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσονται στο βαθύτερο ρευστοποιήσιμο έδαφος. Παρ' όλα αυτά, οι προηγούμενες συγκρίσεις των Σχημάτων 3.21b και 3.22b δείχνουν, ότι τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (N , a_{max} και T), όπως επίσης, το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου (Z_{liq}), επηρεάζουν επίσης το U . Επιπρόσθετα, αρκετές πειραματικές μελέτες προτείνουν, ότι οι μειωμένες υπερπίεσεις πόρων κάτω από την θεμελίωση, ίσως αποδίδονται στην διαστολική συμπεριφορά του υποκείμενου εδάφους εξαιτίας των σεισμικών καθιζήσεων και των συσχετιζόμενων διατμητικών παραμορφώσεων, οι οποίες συσσωρεύονται κάτω από σημαντικά μειωμένες τάσεις περίσφιγξης.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την έντονη εξάρτηση των σεισμικών καθιζήσεων από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης (N , a_{max} και T) και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου (Z_{liq}), ο διορθωτικός συντελεστής a στην Εξ. 3.15 συσχετίστηκε με την σεισμική καθίζηση ρ_{dyn} , κανονικοποιημένη ως προς το πλάτος B της θεμελίωσης. Η συσχέτιση αυτή, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.24. Παρατηρείται, ότι καθώς οι καθιζήσεις αυξάνονται, η διαστολική συμπεριφορά του εδάφους λόγω διάτμησης, συντελεί σε χαμηλότερες τιμές των λόγων υπερπίεσης πόρων στην περιοχή κάτω από την θεμελίωση, μειώνοντας έτσι, την τιμή του διορθωτικού συντελεστή a . Λαμβάνοντας υπόψη, ότι η μετασεισμική αστοχία σε στατική φόρτιση σχετίζεται με την μείωση της διατμητικής αντοχής του υποκείμενου εδάφους της θεμελίωσης λόγω ρευστοποίησης, αυτό σημαίνει, ότι η συσσώρευση των σεισμικών καθιζήσεων λειτουργεί ουσιαδώς ως ένας μηχανισμός σταθεροποίησης, σε σχέση με την μετασεισμική φέρουσα ικανότητα.

Με σκοπό να ποσοτικοποιηθούν τα ανωτέρω οφέλη της διαστολικής συμπεριφοράς του εδάφους στον λόγο υπερπίεσης πόρων, είναι απαραίτητη η ακριβής εκτίμηση των καθιζήσεων λόγω ρευστοποίησης. Εναλλακτικά, η επίδραση της διαστολικής συμπεριφοράς του εδάφους μπορεί να εξεταστεί συντηρητικά, θεωρώντας έναν διορθωτικό συντελεστή $a = 1$ στην Εξ. 3.15. Εκτός από την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τον υπολογισμό της ρ_{dyn} , αυτή η συντηρητική εκτίμηση δικαιολογείται, απ' το γεγονός ότι η διαστολική συμπεριφορά του εδάφους λόγω καθίζησης, ίσως ενεργοποιεί την ροή του νερού από τα μεγαλύτερα βάθη και από το ελεύθερο πεδίο προς την περιοχή κάτω από την θεμελίωση. Αυτός ο μηχανισμός, ο οποίος κυρίως εξαρτάται από την διαπερατότητα της άμμου και την διάρκεια της εισαγόμενης διέγερσης, λειτουργεί ως ένας φυσικός περιορισμός στην μείωση των λόγων υπερπίεσης πόρων.

Τέλος, στο γράφημα μεταβολής του διορθωτικού συντελεστή a σε σχέση με τον λόγο της καθίζησης ρ_{dyn}/B , παρατηρείται, ότι για σχετικά μικρούς λόγους καθίζησης $\rho_{dyn}/B < 0.02 - 0.04$ διακρίνεται ενιαία συσχέτιση $a - \rho_{dyn}/B$, ενώ για μεγαλύτερους λόγους καθίζησης, η μεταβολή του διορθωτικού συντελεστή a παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση, ανάλογα με το σχήμα της θεμελίωσης (τετραγωνική ή επιμήκης) και τον τύπο της διέγερσης (σεισμική ή αρμονική). Άρα, προτάθηκε η χρήση της γραμμικής σχέσης (3.16) για την ομάδα σημείων σε σχετικά μικρούς λόγους καθιζήσεων, και συντηρητικά, θεωρήθηκε μια ανώτατη τιμή $a = 0.80$ για μεγαλύτερους λόγους καθιζήσεων, όπου τα δεδομένα σημείων παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά (Karamitros et al., 2013b).

$$a = 1 - 6.0 \frac{\rho_{dyn}}{B} \geq 0.80 \quad (3.16)$$



Σχήμα 3.24. Μεταβολή του διορθωτικού συντελεστή a σε σχέση με την σεισμική καθίζηση ρ_{dyn} , κανονικοποιημένη ως προς το πλάτος της θεμελίωσης B

3.3.4 Κρίσιμο πάχος της αργιλικής στρώσης

Οι αναλυτικές σχέσεις για την εκτίμηση της μειωμένης φέρουσας ικανότητας δείχνουν, ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του λόγου του πάχους της αργιλικής στρώσης $(H/B)_{cr}$, πέραν της οποίας ο μειωμένος συντελεστής ασφαλείας παραμένει σταθερός. Σύμφωνα με την θεωρία Meyerhof and Hanna, ο λόγος $(H/B)_{cr}$ αντιστοιχεί στο πάχος της αργιλικής στρώσης, όπου η φέρουσα ικανότητα του σύνθετου μηχανισμού αστοχίας (Σχήμα 3.19) γίνεται ίση με αυτή ενός μηχανισμού αστοχίας μορφής σφήνας που αναπτύσσεται αποκλειστικά εντός της αργιλικής στρώσης. Επομένως, με βάση την Εξ. 3.8, ο συντελεστής ασφαλείας που αντιστοιχεί στον λόγο $(H/B)_{cr}$, είναι:

$$(FS_{deg})_{cr} = \frac{(\pi+2)c_u F_{cs}}{q} \quad (3.17)$$

Οι ανωτέρω αναλυτικές προβλέψεις επιβεβαιώνονται επίσης, απ' τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Στο Σχήμα 3.25 συγκρίνονται οι καμπύλες φορτίου-μετακίνησης που προέκυψαν από παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις τριών βημάτων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικά κανονικοποιημένα πάχη αργιλικής στρώσης $H/B = 0.4, 0.8, 1.2, 2.4$ και 2.8 . Οι αναλύσεις αναφέρονται σε επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις πλάτους $B = 5m$, και η μέση τάση έδρασης της θεμελίωσης είναι $q = 100kPa$. Σε όλες αυτές τις αναλύσεις, η ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου είχε πάχος $Z_{liq} = 16m$ και αρχική σχετική πυκνότητα $D_r = 50\%$, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής στρώσης ήταν $c_u = 40kPa$, ενώ η εισαγόμενη διέγερση ήταν αρμονική, με $N = 10$ κύκλους, μέγιστη επιτάχυνση $\alpha_{max} = 0.15g$ και περίοδο $T = 0.35sec$.

Παρατηρείται, ότι η αύξηση του λόγου H/B οδηγεί σε αύξηση της μετασεισμικής φέρουσας ικανότητας, ενώ για $H/B = 2.8$, η καμπύλη φορτίου-μετακίνησης γίνεται σχεδόν ίδια με αυτή που προκύπτει για την στατική φόρτιση. Προκειμένου να διερευνηθεί αυτή η απόκριση, στο Σχήμα 3.26 συγκρίνονται οι μετασεισμικοί μηχανισμοί αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα για λόγους $H/B = 0.4$ και 2.8 . Για $H/B = 0.4$ (Σχήμα 3.26a), αναπτύσσεται ένας σύνθετος μηχανισμός αστοχίας, ενώ, για $H/B = 2.8$ (Σχήμα 3.26b), όλος ο μηχανισμός αστοχίας αναπτύσσεται εντός της αργιλικής στρώσης, σύμφωνα με τις θεωρητικές προβλέψεις.

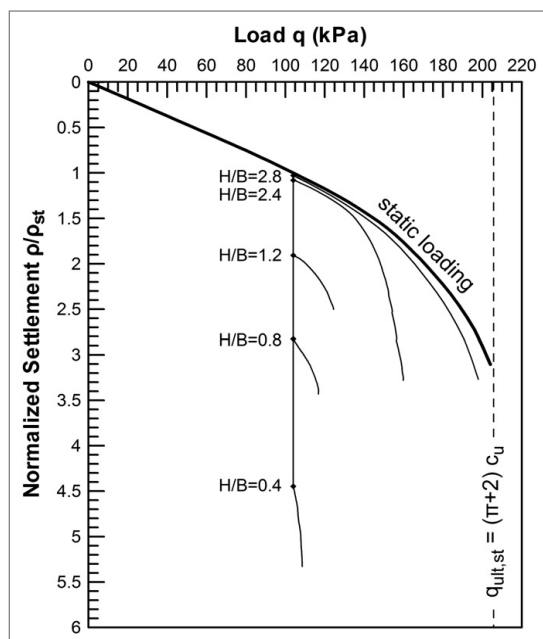
Εστιάζοντας στην κρίσιμη τιμή του λόγου $(H/B)_{cr}$ που ορίζει την μετάβαση από τον έναν μηχανισμό αστοχίας στον άλλο, στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζεται η

μεταβολή του λόγου σε σχέση με την αδιάστατη παράμετρο $q/q_{ult,clay}$ [$q_{ult,clay} = (\pi + 2)c_u F_{cs}$], για τις επιμήκειες (strip) και τις τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις, και για διάφορες τιμές της κανονικοποιημένης αντοχής της αργιλικής στρώσης $c_u/\gamma'H$ και της αρχικής γωνίας τριβής της άμμου φ_o . Παρατηρείται, ότι ο λόγος του κρίσιμου βάθους μειώνεται με αύξηση του φορτίου, εξαιτίας της επίδρασης της παρουσίας της θεμελίωσης στους λόγους υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσονται στην βαθύτερη ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου. Επιπλέον, εξαρτάται απ' το σχήμα της θεμελίωσης, ενώ οι παράμετροι φ_o και $c_u/\gamma'H$ έχουν σχετικά μικρή επίδραση.

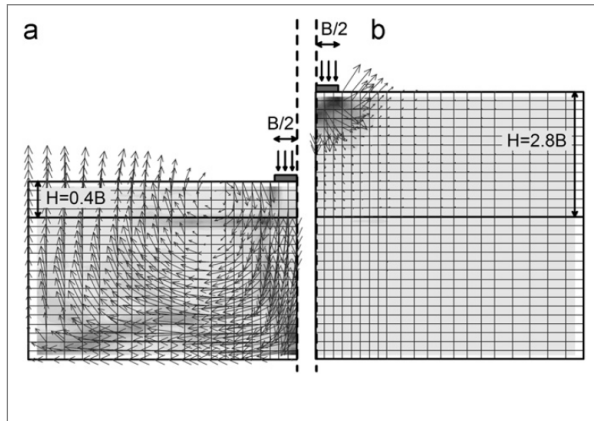
Σε όλες τις περιπτώσεις, ένα άνω όριο του κρίσιμου πάχους $(H/B)_{cr,max}$ αντιστοιχεί σε μηδενικό στατικό φορτίο της θεμελίωσης, οπότε η ρευστοποίηση στην βαθύτερη στρώση άμμου είναι πλήρης ($U_{foot} \sim 1$). Κάτω από αυτές τις συνθήκες, το κρίσιμο πάχος είναι ανεξάρτητο από τις παραμέτρους φ και $c_u/\gamma'H$, και αποτελεί μόνο συνάρτηση του λόγου πλάτους προς μήκος της θεμελίωσης B/L :

$$(H/B)_{cr,max} = \frac{\pi+2+(B/L)}{2(1+(B/L))} \quad (3.18)$$

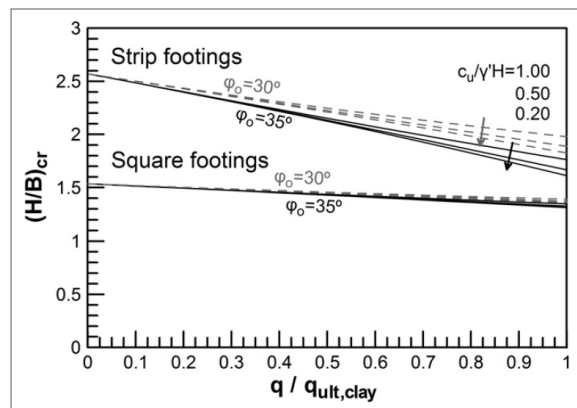
με εύρος τιμών από 2.57 έως 1.54, για τις επιμήκειες (strip) και τετράγωνα (square) θεμελιώσεις, αντίστοιχα. Για συνηθισμένες περιπτώσεις, όπου $q/q_{ult} \approx 0.5$, το ανωτέρω εύρος του $(H/B)_{cr}$ μειώνεται περίπου σε 2.20-1.40.



Σχήμα 3.25. Καμπύλες στατικής και μετασεισμικής φέρουσας τάσης q σε σχέση με την κανονικοποιημένη καθίζηση ρ/ρ_{st} , για διαφορετικούς λόγους πάχους αργιλικής στρώσης προς πλάτος θεμελίωσης H/B



Σχήμα 3.26. Περιγράμματα (contours) διατμητικής παραμόρφωσης και διανύσματα ταχύτητας που αντιστοιχούν στον μετασεισμικό μηχανισμό αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα, για λόγους πάχους αργιλικής στρώσης προς πλάτος θεμελίωσης H/B : **(a)** 0.4 και **(b)** 2.8



Σχήμα 3.27. Κανονικοποιημένο κρίσιμο βάθος $(H/B)_{cr}$

3.3.5 Κύρια ευρήματα

Στην εν λόγω έρευνα, παρουσιάστηκε μια απλοποιημένη αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της μετασεισμικής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων που εδράζονται σε ρευστοποιήσιμη άμμο με υπερκείμενη στρώση αργίλου. Προκειμένου να αποφευχθεί η έλλειψη σχετικών πειραματικών μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένας αριθμητικός αλγόριθμος, με τις ακόλουθες κύριες παραδοχές:

(α) Ο μετασεισμικός μηχανισμός αστοχίας μοιάζει πολύ με τον μηχανισμό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19, ο οποίος προτάθηκε από τους Meyerhof and Hanna για εδαφικούς σχηματισμούς που συνίστανται από αργιλική στρώση υπερκείμενη στρώσης άμμου.

- (β) Τα αποτελέσματα της ρευστοποίησης μπορούν να προσομοιωθούν επαρκώς, από τεχνητή μείωση της γωνίας τριβής της άμμου σε σχέση με τον "ενιαίο" λόγο υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση και στο ελεύθερο πεδίο.
- (γ) Ο υπολογισμός του "ενιαίου" λόγου υπερπίεσης πόρων αναφέρεται σ' ένα χαρακτηριστικό σημείο στον άξονα της θεμελίωσης, σε βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο κυμαίνεται ανάμεσα σε $H + B$ για τις επιμήκεις (strip) θεμελιώσεις και $H + 0.5B$ για τις τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις.
- (δ) Για να αποφευχθούν μη ρεαλιστικές προβλέψεις επισημαίνεται, ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην πράξη, θα πρέπει να περιορίζεται εντός του εύρους των κύριων παραμέτρων του προβλήματος, οι οποίες λήφθηκαν υπόψη για τις αριθμητικές αναλύσεις, συγκεκριμένα, $H/B = 0.4 - 2.8$, $c_u/\gamma'H = 0.3 - 2.0$ και $q/\gamma'B = 0.8 - 3.0$.

Βάσει των ανωτέρω, έγινε δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας του θεμελίου, και διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ αναλυτικών προβλέψεων και αριθμητικών αναλύσεων. Επιπλέον, διαπιστώθηκε, ότι υπάρχει ένα κρίσιμο πάχος της επιφανειακής στρώσης, πέρα από το οποίο, η ρευστοποίηση του υπεδάφους δεν μειώνει την φέρουσα ικανότητα σε στατική φόρτιση, σε σχέση με την αρχική τιμή της, πριν την σεισμική διέγερση. Το ανώτερο όριο του λόγου $(H/B)_{cr}$ κυμαίνεται ανάμεσα σε 2.57 και 1.54, για τις επιμήκεις (strip) και τις τετραγωνικές (square) θεμελιώσεις αντίστοιχα, ενώ η τιμή του για συντελεστές ασφαλείας περίπου 2.0, είναι ελαφρώς μειωμένη σ' ένα εύρος ανάμεσα σε 2.20 και 1.40.

Εκτός από τα ανωτέρω βασικά ευρήματα, ήταν επίσης αξιοσημείωτο ένα φαινομενικά παράδοξο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται, ότι η μετασεισμική μειωμένη φέρουσα ικανότητα αυξάνεται παράλληλα με την μέση τάση έδρασης της θεμελίωσης. Αυτό δικαιολογείται, απ' το ότι οι λόγοι υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση μειώνονται με την μέση τάση έδρασης που εφαρμόζεται και με τις καθιζήσεις της θεμελίωσης, εξαιτίας της διαστολικής συμπεριφοράς της ρευστοποιήσιμης άμμου λόγω διάτμησης. Γίνεται αντιληπτό, ότι αυτός είναι ένας μηχανισμός σταθεροποίησης, ο οποίος λειτουργεί ευμενώς για την συνολική απόκριση της θεμελίωσης, διότι επιβραδύνει την κατάρρευσή της.

Επιπλέον, επισημάνθηκε, ότι οι σεισμικές καθιζήσεις ίσως έχουν ένα πρόσθετο ωφέλιμο αποτέλεσμα στην μειωμένη φέρουσα ικανότητα, που εκφράζεται μέσω του διορθωτικού συντελεστή a στην Εξ. 3.15, για τον υπολογισμό των λόγων υπερπίεσης πόρων κάτω από την θεμελίωση. Ωστόσο, για να ληφθεί υπόψη αυτό το αποτέλεσμα, χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν οι διαθέσιμες εμπειρικές σχέσεις για τον

υπολογισμό της καθίζησης της θεμελίωσης λόγω ρευστοποίησης. Εναλλακτικά, η ανωτέρω επίδραση μπορεί να εξεταστεί συντηρητικά, προκειμένου να αποφευχθεί η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τον υπολογισμό της καθίζησης, όπως επίσης, η πιθανή επίδραση άλλων παραγόντων (π.χ. διαπερατότητα της άμμου).

Επισημαίνεται, ότι εξασφαλίζοντας μια αποδεκτή τιμή για τον μειωμένο συντελεστή ασφαλείας είναι μια αναγκαία, ωστόσο, όχι επαρκής συνθήκη για την αποδεκτή απόκριση της θεμελίωσης. Αυτό δικαιολογείται, διότι η ρευστοποίηση του υπεδάφους οδηγεί επίσης, σε σημαντική συσσώρευση καθιζήσεων, συντελώντας έτσι, σε λειτουργική ή ακόμη και κατασκευαστική αστοχία. Σε αυτό το σημείο, μια απλοποιημένη μεθοδολογία για την εκτίμηση των καθιζήσεων λόγω ρευστοποίησης έχει επίσης αναπτυχθεί, προκειμένου να συμπληρώσει την έρευνα που παρουσιάστηκε εδώ, σ' ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο σχεδιασμού της θεμελίωσης βασισμένο στην απόκρισή της.

Με βάση την μεθοδολογία των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), οι κύριες παράμετροι του υπεδάφους, της θεμελίωσης και σεισμικής διέγερσης που επιδρούν στην συσσώρευση καθιζήσεων, είναι οι ακόλουθες:

H = πάχος αργιλικής στρώσης,

Z_{liq} = πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου,

c_u = αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργιλικής στρώσης,

φ = αρχική γωνία τριβής ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου,

γ' = ενεργό ειδικό βάρος στρώσεων άμμου και αργίλου,

B = πλάτος θεμελίωσης,

L = μήκος θεμελίωσης,

q = μέση τάση έδρασης θεμελίωσης,

α_{max} = μέγιστη επιτάχυνση σεισμικής διέγερσης,

T = περίοδος σεισμικής διέγερσης,

N = αριθμός σημαντικών κύκλων φόρτισης σεισμικής διέγερσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται ποιοτική σύγκριση των μεθόδων πρόβλεψης της σεισμικής καθίζησης θεμελίωσης που περιγράφηκαν στα Κεφάλαια 2 και 3 (Naesgaard et al., 1998 - Karamitros et al., 2013a, 2013b, 2013c). Η ποσοτική σύγκριση των δύο μεθόδων γίνεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

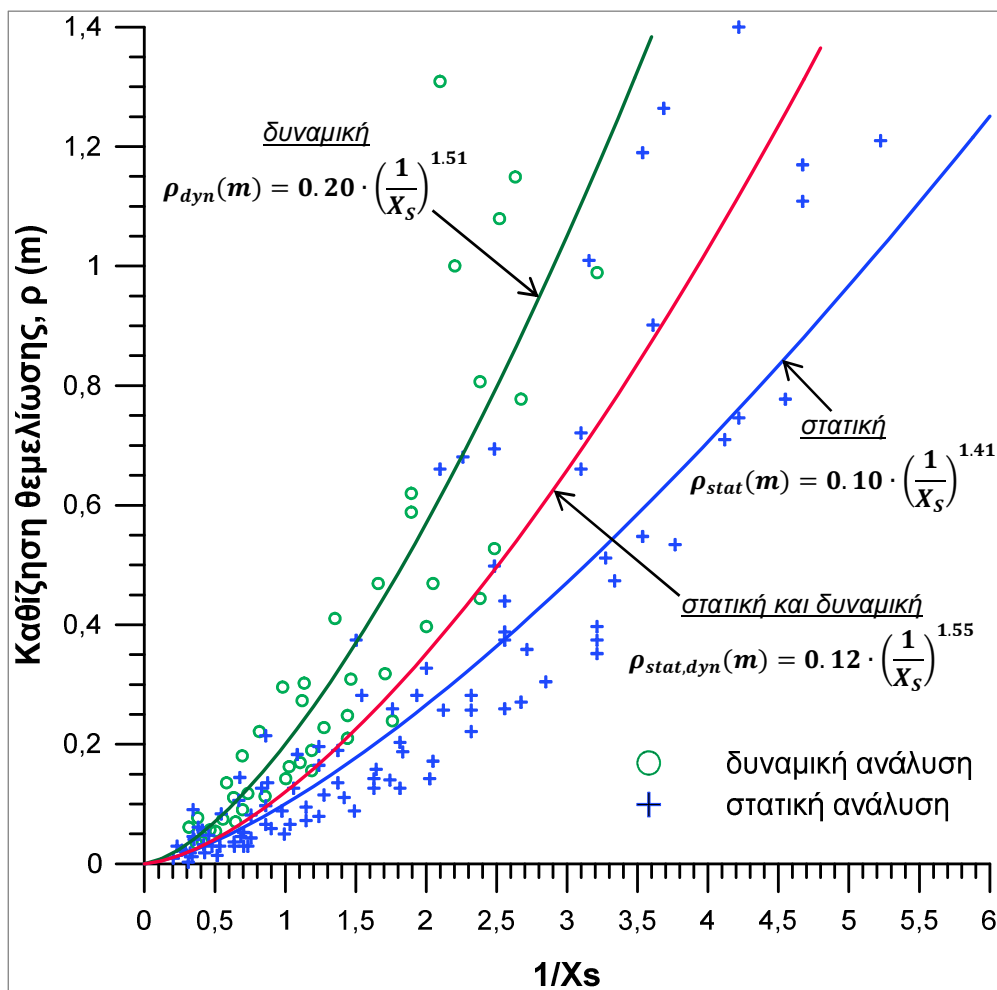
Αρχικά, επιδιώκεται η διατύπωση μιας αναλυτικής έκφρασης υπολογισμού της καθίζησης με βάση την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998), αξιοποιώντας το Σχήμα 2.11, όπου συσχετίζεται ο συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση X_s (Εξ. 2.2), με την καθίζηση της θεμελίωσης. Το πρώτο αυτό βήμα είναι αναγκαίο για την συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων δεδομένου ότι ο υπολογισμός των καθιζήσεων κατά Naesgaard et al. (1998) γίνεται με την βοήθεια διαγραμμάτων υπολογισμού και όχι αναλυτικών σχέσεων όπως στους Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c). Στην συνέχεια, γίνεται συνοπτική αναφορά στην σχέση υπολογισμού της σεισμικής καθίζησης θεμελίωσης με βάση την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) (Εξ. 3.4).

Με βάση πλέον τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, γίνεται αρχικά η ποιοτική σύγκριση των μεθόδων, εντοπίζοντας σε καθεμιά τις παραμέτρους που καθορίζουν την προβλεπόμενη καθίζηση και πραγματοποιώντας ποιοτική διερεύνηση της επιρροής της κάθε παραμέτρου.

4.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ Naesgaard et al. (1998)

Στην έρευνα των Naesgaard et al. (1998), η συσχέτιση της καθίζησης θεμελίωσης που εδράζεται σε μια συνεκτική εδαφική κρούστα υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση X_s (Εξ. 2.2), παρέχεται μέσω του Σχήματος 2.11. Το Σχήμα 2.11 αξιοποιήθηκε, προκειμένου να διατυπωθεί μια αναλυτική έκφραση για τον υπολογισμό της καθίζησης, που να εκφράζει την μέθοδο

της εν λόγω έρευνας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε καταγραφή των δύο συνόλων δεδομένων του σχήματος (στατική και δυναμική ανάλυση), ψηφιοποιώντας τα δεδομένα στο πρόγραμμα *Grapher 12*. Στην συνέχεια, τα δεδομένα που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση, αποδόθηκαν σε μορφή καθίζησης ρ (m) - συντελεστή $1/X_s$, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Συσχέτιση καθίζησης θεμελίωσης ρ (m) - συντελεστή $1/X_s$, με βάση τα δεδομένα από την ψηφιοποίηση του Σχήματος 2.11 της έρευνας των Naesgaard et al. (1998)

Στο Σχήμα 4.1 παρατηρείται, ότι οι καμπύλες που προσαρμόζονται στα δεδομένα του γραφήματος και εκφράζουν την τάση μεταβολής της καθίζησης $\rho (m)$ σε σχέση με τον συντελεστή $1/X_s$, έχουν την μορφή $\rho (m) = a \left(\frac{1}{X_s}\right)^\beta$ (a, β : σταθερές), η οποία με βάση την σχέση υπολογισμού του συντελεστή X_s (Εξ. 2.2), διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \rho (m) &= \alpha \cdot \left(\frac{1}{X_s}\right)^\beta \xrightarrow{\text{(Εξ.2.2)}} \\ \rho &= \alpha \cdot \left(\frac{Z_l^{1/2} \cdot \gamma_{lim}^{1/2} \cdot Q_s^{1/4}}{F_s}\right)^\beta \Rightarrow \\ \rho &= \alpha \cdot (Z_l^{1/2} \cdot \gamma_{lim}^{1/2} \cdot Q_s^{1/4})^\beta \cdot \left(\frac{1}{F_s}\right)^\beta \Rightarrow \\ \rho (m) &= \alpha \cdot Z_l^{\beta/2} \cdot \gamma_{lim}^{\beta/2} \cdot Q_s^{\beta/4} \cdot \left(\frac{1}{F_s}\right)^\beta \end{aligned} \quad (4.1)$$

όπου:

Z_l = πάχος ρευστοποιημένης στρώσης (σε m),

γ_{lim} = οριακή διατμητική παραμόρφωση (π.χ. $\gamma_{lim} = 0.89$ για οριακή διατμητική παραμόρφωση 89%),

Q_s = φορτίο θεμελίωσης ανά μονάδα μήκους (σε kN/m),

F_s = συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση (αδιάστατος), που υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. 2.1, και a, β = σταθερές.

Σημειώνεται, ότι η προβλεπόμενη καθίζηση σύμφωνα με την Εξ. 4.1 εξαρτάται από τις μονάδες των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην σχέση, και προκύπτει σε (m) , όταν οι παράμετροι τίθενται με τις μονάδες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα, και οι σταθερές a, β λαμβάνουν τις τιμές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 4.1.

Εφαρμόζοντας τις τιμές των σταθερών α, β (Σχήμα 4.1) στην γενική έκφραση υπολογισμού της καθίζησης (Εξ. 4.1), η σχέση υπολογισμού της καθίζησης για κάθε σύνολο δεδομένων, διαμορφώνεται ως εξής:

Στατική ανάλυση (κάτω όριο): $\rho_{stat}(m) = \alpha \cdot \left(\frac{1}{X_s}\right)^\beta$, όπου $\alpha = 0.10$, $\beta = 1.41$

$$\rho_{stat}(m) = 0.10 \cdot Z_l^{0.705} \cdot \gamma_{lim}^{0.705} \cdot Q_s^{0.353} \cdot \left(\frac{1}{F_s}\right)^{1.41} \quad (4.1\alpha)$$

Δυναμική ανάλυση (άνω όριο): $\rho_{dyn}(m) = \alpha \cdot \left(\frac{1}{X_s}\right)^\beta$, όπου $\alpha = 0.20$, $\beta = 1.51$

$$\rho_{dyn}(m) = 0.20 \cdot Z_l^{0.755} \cdot \gamma_{lim}^{0.755} \cdot Q_s^{0.378} \cdot \left(\frac{1}{F_s}\right)^{1.51} \quad (4.1\beta)$$

Στατική και Δυναμική ανάλυση (μέσος όρος): $\rho_{stat,dyn}(m) = \alpha \cdot \left(\frac{1}{X_s}\right)^\beta$, όπου

$\alpha = 0.12$, $\beta = 1.55$

$$\rho_{stat,dyn}(m) = 0.12 \cdot Z_l^{0.775} \cdot \gamma_{lim}^{0.775} \cdot Q_s^{0.388} \cdot \left(\frac{1}{F_s}\right)^{1.55} \quad (4.1\gamma)$$

4.2 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ

Προκειμένου να αξιολογηθούν συγκριτικά οι δύο μέθοδοι υπολογισμού της καθίζησης, στο σημείο αυτό γίνεται συνοπτική αναφορά στην σχέση υπολογισμού της σεισμικής καθίζησης θεμελίωσης που εδράζεται σε συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, με βάση την έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) (Εξ. 3.4). Η σχέση που προέκυψε στην εν λόγω έρευνα, διατυπώνεται εδώ με μια ισοδύναμη έκφραση:

$$\rho_{dyn} = c \cdot \alpha_{max} \cdot T^2 \cdot N \cdot \left(\frac{Z_{liq}}{B}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3 \xrightarrow{\alpha_{max}=v_{max} \cdot \frac{2\pi}{T}}$$

$$\rho_{dyn} = c \cdot 2\pi \cdot v_{max} \cdot t \cdot \left(\frac{Z_{liq}}{B}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3 \quad (4.2)$$

όπου:

$c = 0.008$ και 0.035 για τετραγωνικές (square) και επιμήκειες (strip) θεμελιώσεις, ενώ

για ενδιάμεσες τιμές του λόγου L/B , $c = c' \left(1 + 1.65 \frac{L}{B}\right) \leq 11.65c'$, όπου $c' = 0.003$,

α_{max} , T , N = η μέγιστη επιτάχυνση, η περίοδος και ο αριθμός των σημαντικών κύκλων φόρτισης της σεισμικής διέγερσης, αντίστοιχα,

v_{max} , t = η μέγιστη ταχύτητα και η χρονική διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, αντίστοιχα,

Z_{liq} = το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου,

B = το πλάτος θεμελίωσης, και

$FS_{deg} \left(= \frac{q_{ult,deg}}{q}\right)$ = ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση, που υπολογίζεται με βάση τον σύνθετο μηχανισμό αστοχίας Meyerhof and Hanna (1978) (Εξ. 3.8).

4.2.1 Συγκριτική παρουσίαση των παραμέτρων που καθορίζουν την προβλεπόμενη καθίζηση

Εδαφικό προφίλ και μηχανισμός συσσώρευσης καθιζήσεων. Η προβλεπόμενη καθίζηση σύμφωνα με τις δύο μεθόδους, αφορά στην σεισμική καθίζηση θεμελίωσης που εδράζεται σε μια απολύτως συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση, υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου.

Στην έρευνα των Naesgaard et al. (1998), πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για την προσομοίωση του ρευστοποιημένου εδάφους, απ' όπου προέκυψε συσχέτιση της καθιζήσης με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση.

Η προβλεπόμενη καθίζηση δεν λαμβάνει υπόψη τις καθιζήσεις που προκαλούνται λόγω ογκομετρικής παραμόρφωσης μετά την ρευστοποίηση, ούτε την καθίζηση του εδάφους εξαιτίας της εκτόπισης της ρευστοποιημένης άμμου. Αυτές οι καθιζήσεις, θα ήταν πρόσθετες σε αυτές που υπολογίστηκαν στην εν λόγω έρευνα. Σύμφωνα με την εν λόγω θεώρηση, ο βασικός παράγοντας που επιδρά στην συσσώρευση των καθιζήσεων είναι ο απομειωμένος συντελεστής ασφαλείας F_s της θεμελίωσης, αμέσως μετά το πέρας της δόνησης. Επιπλέον, διαπιστώνεται, ότι οι ακόλουθες κατηγορίες επιμέρους παραμέτρων επιδρούν έμμεσα (μέσω του F_s) ή άμεσα στην συσσώρευση των καθιζήσεων: (α) τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων (Z_c , Z_L , c_u , τ_{RES} , γ_{lim}), και (β) τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης (Q_s , B).

Με βάση την έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), η προβλεπόμενη καθίζηση αντανάκλα τον φυσικό μηχανισμό συσσώρευσης καθιζήσεων που σχετίζεται με την ανάπτυξη ενός μηχανισμού αστοχίας ολίσθησης σώματος τύπου Newmark, και δεν αποτελεί το αποτέλεσμα της συμπύκνωσης που σχετίζεται με την διάχυση της υπερπίεσης πόρων. Αυτός ο μηχανισμός συσσώρευσης σεισμικών καθιζήσεων, συντέλεσε επίσης στον εντοπισμό ως βασικής παραμέτρου του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} στο τέλος της δόνησης, μετά την εκδήλωση της ρευστοποίησης. Επιπλέον, οδήγησε στο συμπέρασμα, ότι οι επιμέρους παράμετροι που επιδρούν έμμεσα (μέσω του FS_{deg}) ή άμεσα στην συσσώρευση των καθιζήσεων, εντάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: (α) τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων (H , Z_{liq} , c_u , ϕ , γ'), (β) τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης (q , B , L), και (γ) τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (α_{max} , T , N ή v_{max} , t).

Συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση. Αξιολογώντας συγκριτικά τις σχέσεις υπολογισμού της καθιζήσης των δύο μεθόδων (Εξ. 4.1α-4.1γ και Εξ. 3.4, 4.2) παρατηρείται, ότι και στις δύο, (α) η καθίζηση συσχετίζεται με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση (F_s ή FS_{deg}), και (β) ο εν λόγω συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται με βάση έναν σύνθετο μηχανισμό αστοχίας που συνίσταται από μια επιφάνεια διατμητικής αστοχίας εντός της αργιλικής στρώσης, η οποία διεισδύει εντός της βαθύτερης ρευστοποιημένης στρώσης άμμου.

Οι δύο μέθοδοι υιοθετούν μια κοινή προσέγγιση όσον αφορά στην συνιστώσα του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της αργιλικής στρώσης. Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης λόγω αυτής της συνιστώσας, οι κοινές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8) η αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u) και το πάχος της αργιλικής στρώσης (Z_c ή H), η αύξηση των οποίων, συμβάλλει στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης και στην μείωση της σεισμικής καθίζησης.

Ωστόσο, οι δύο μέθοδοι διαφοροποιούνται όσον αφορά στην προσέγγιση υπολογισμού της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης λόγω της συνιστώσας του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της ρευστοποιημένης άμμου. Συγκεκριμένα, στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) η μειωμένη φέρουσα ικανότητα υπολογίστηκε, θέτοντας για την ρευστοποιημένη άμμο γωνία τριβής $\varphi = 0$ και συνοχή ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους ($c_u = \tau_{RES}$). Μια διαφορετική, περισσότερο σύνθετη μεθοδολογία, ακολουθήθηκε στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c). Σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε ένας "ενιαίος" λόγος υπερπίεσης πόρων $U = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,o}}$ που αναπτύσσεται σε όλη την ρευστοποιημένη στρώση, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε μετά, για να υπολογιστεί μια μειωμένη γωνία τριβής φ_{deg} για την ρευστοποιημένη άμμο, ως συνάρτηση της πραγματικής γωνίας τριβής φ .

Χαρακτηριστικά της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου. Στις σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης και των δύο μεθόδων, προβλέπεται αύξηση της καθίζησης με το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου.

Όσον αφορά στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998), η προβλεπόμενη καθίζηση συσχετίζεται επιπλέον, με την οριακή διατμητική παραμόρφωση γ_{lim} του ρευστοποιημένου εδάφους, η οποία αποτελεί παράμετρο που εκφράζει την δυσμηνσία της εδαφικής στρώσης. Επιπλέον, η απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης υπολογίζεται συναρτήσει της παραμένουσας διατμητικής αντοχής της ρευστοποιημένης άμμου τ_{RES} . Στην εν λόγω έρευνα, οι παράμετροι γ_{lim} και τ_{RES} συσχετίστηκαν με τον διορθωμένο αριθμό κρούσεων SPT, $(N_1)_{60}$ (βλ. Πίνακα 2.1). Τα δεδομένα του Πίνακα 2.1 αξιοποιήθηκαν, προκειμένου να διατυπωθούν οι σχέσεις υπολογισμού των γ_{lim} και τ_{RES} , συναρτήσει του αριθμού κρούσεων $(N_1)_{60}$, οι οποίες να εκφράζουν τις αναλύσεις των Naesgaard et al. (1998).

Η συσχέτιση των μεταβλητών τ_{RES} και $(N_1)_{60}$ διερευνήθηκε αξιοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 2.1, και παράλληλα, αξιολογήθηκε συγκριτικά με την αντίστοιχη συσχέτιση (υπό μορφή διαγράμματος) της έρευνας των Seed and Harder (1990) (Σχήμα 9.57, Kramer). Για τον λόγο αυτό, τα δεδομένα της έρευνας των Naesgaard et al. (1998) (Πίνακας 2.1) και το εύρος τιμών των δεδομένων της έρευνας των Seed and Harder (1990) (Σχήμα 9.57, Kramer) αποδόθηκαν σε κοινό διάγραμμα (Σχήμα 4.2), όπου διαπιστώθηκε, ότι υπάρχει μια σχέση που προσαρμόζεται ικανοποιητικά και στα δύο σύνολα δεδομένων, η οποία εκφράζεται ως ακολούθως:

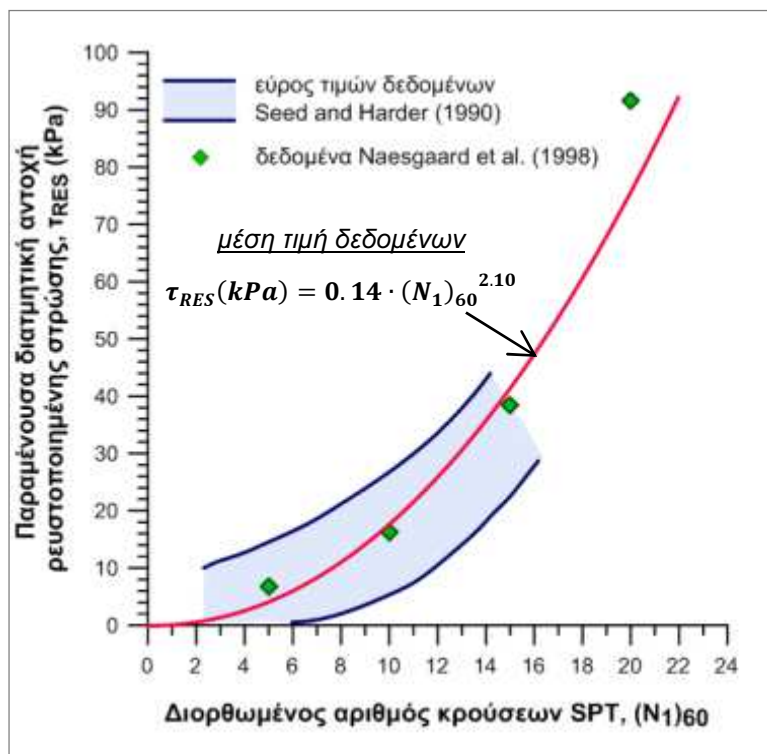
$$\tau_{RES}(kPa) = 0.14 \cdot (N_1)_{60}^{2.10} \quad (4.3)$$

Η συσχέτιση των μεταβλητών γ_{lim} και $(N_1)_{60}$ διερευνήθηκε, αξιοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 2.1. Η συσχέτιση που προέκυψε μεταξύ των δύο μεταβλητών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3 και εκφράζεται αναλυτικά ως ακολούθως:

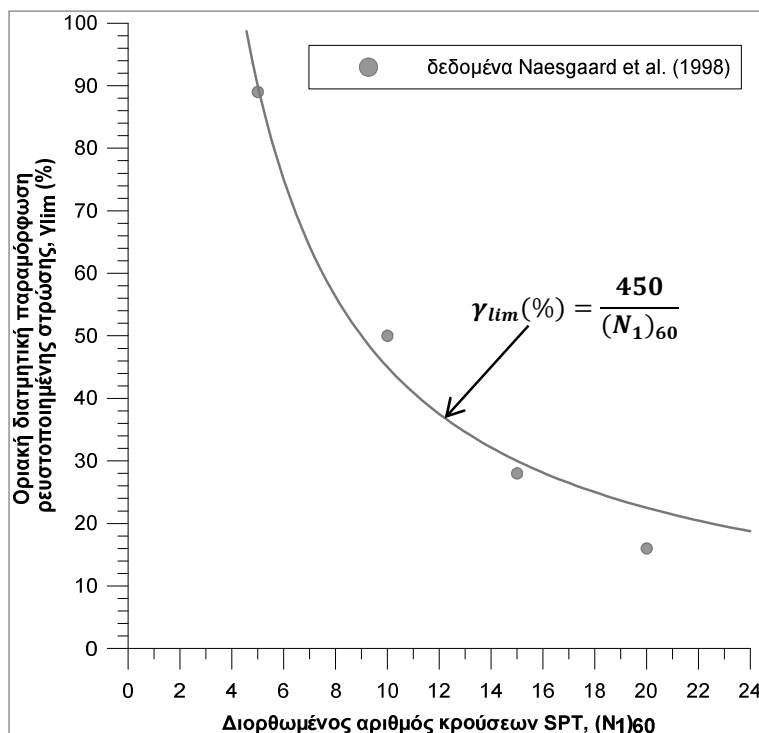
$$\gamma_{lim}(\%) = \frac{450}{(N_1)_{60}} \quad (4.4)$$

Στις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης με βάση την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου υπεισέρχονται έμμεσα, στον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας του εδάφους $q_{ult,deg}$ και τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} . Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της $q_{ult,deg}$ με βάση τον σύνθετο μηχανισμό αστοχίας Meyerhof and Hanna (1978) (Εξ. 3.8), χρησιμοποιήθηκε μια μειωμένη γωνία τριβής φ_{deg} για την ρευστοποιημένη άμμο, ως συνάρτηση της πραγματικής γωνίας τριβής φ , η οποία αποτελεί παράμετρο διατμητικής αντοχής της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου και εκφράζει ουσιαστικά, την ευεργετική επίδραση της σχετικής πυκνότητας του ρευστοποιήσιμου εδάφους στην συμπεριφορά (καθίζηση και φέρουσα ικανότητα) της θεμελίωσης.

Με βάση τις ανωτέρω παρατηρήσεις διαπιστώνεται ότι, αν και με διαφορετική προσέγγιση, οι προβλεπόμενες καθιζήσεις και των δύο μεθόδων λαμβάνουν υπόψη την διατμητική αντοχή της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου και κατ' επέκταση την αρχική (προ ρευστοποίησης) σχετική πυκνότητα.



Σχήμα 4.2. Συσχέτιση των μεταβλητών τ_{RES} (kPa) - $(N_1)_{60}$, με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 2.1 της έρευνας των Naesgaard et al. (1998), και σύγκριση με το εύρος τιμών των δεδομένων της έρευνας των Seed and Harder (1990) (Σχήμα 9.57, Kramer)



Σχήμα 4.3. Συσχέτιση των μεταβλητών γ_{lim} (%) - $(N_1)_{60}$, με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 2.1 της έρευνας των Naesgaard et al. (1998)

Φορτίο ανωδομής. Με βάση την έρευνα των Naesgaard et al. (1998), το φορτίο έδρασης της θεμελίωσης Q_s , συντελεί στην μείωση του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση X_s , και ισοδύναμα, στην αύξηση της προβλεπόμενης καθίζησης.

Όσον αφορά στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), η επιρροή της μέσης τάσης έδρασης της θεμελίωσης q υπεισέρχεται στην σχέση υπολογισμού της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} , μέσω του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση, FS_{deg} . Διαπιστώνεται και εδώ, ότι η μέση τάση έδρασης της θεμελίωσης q συντελεί στην αύξηση της προβλεπόμενης καθίζησης.

Χαρακτηριστικά σεισμικής διέγερσης. Στην έκφραση υπολογισμού της καθίζησης των Naesgaard et al. (1998) δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης, διότι οι δυναμικές αναλύσεις της εν λόγω έρευνας πραγματοποιήθηκαν, εισάγοντας στο προσομοίωμα εδάφους-κτιρίου μία μόνο διέγερση. Ωστόσο, οι συγγραφείς επισήμαναν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην προβλεπόμενη καθίζηση.

Οι Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) έλαβαν υπόψη την συμβολή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στον υπολογισμό της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} , διότι επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός αστοχίας ολίσθησης σώματος τύπου Newmark. Στην έκφραση υπολογισμού της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} που διατυπώθηκε στην εν λόγω έρευνα, η προβλεπόμενη καθίζηση λήφθηκε ανάλογη του όρου $\alpha_{max} \cdot T^2 \cdot N$, που ισοδυναμεί με τον όρο $2\pi \cdot v_{max} \cdot t$ (Εξ. 3.4, 4.2).

Σχήμα θεμελίωσης. Στην έρευνα των Naesgaard et al. (1998) οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο για επιμήκη θεμέλια, και συνεπώς, η προβλεπόμενη καθίζηση δεν λαμβάνει υπόψη την επιρροή του σχήματος του θεμελίου. Ωστόσο, λαμβάνει υπόψη την επιρροή του πλάτους του θεμελίου B .

Στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) διερευνήθηκε η επιρροή του σχήματος του θεμελίου, εξετάζοντας την απόκριση επιμήκων και ορθογωνικών θεμελίων. Το σχήμα του θεμελίου λήφθηκε υπόψη στον υπολογισμό της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση, και στην εκτίμηση της προβλεπόμενης καθίζησης, όπου η επιρροή του εκφράστηκε, μέσω της χρήσης του συντελεστή c .

4.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών υπολογισμού της καθίζησης

Από την παρουσίαση των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού της καθίζησης που προηγήθηκε, προκύπτει ότι οι μεθοδολογίες που εξετάζονται, παρουσιάζουν δύο <<ενδογενείς>> διαφορές, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ποιοτική σύγκριση της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών που επιχειρείται ακολούθως, καθώς και στην ποσοτική σύγκριση των δύο μεθόδων του επόμενου κεφαλαίου:

- (α) Η σχέση των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) έχει <<αδιάστατη>> μορφή (ανεξάρτητη μονάδων), σε αντίθεση με τις σχέσεις των Naesgaard et al. (1998), οι οποίες είναι απόλυτα εμπειρικές και ισχύουν για τις συγκεκριμένες μονάδες της κάθε παραμέτρου.
- (β) Η σχέση των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) περιλαμβάνει μόνον ανεξάρτητες μεταβλητές, σε αντίθεση με τις σχέσεις των Naesgaard et al. (1998), οι οποίες περιλαμβάνουν εξαρτημένες μεταβλητές (F_s και Q_s).

Λόγω των ανωτέρω, οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης των Naesgaard et al. (1998) (Εξ. 4.1) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) (Εξ. 3.4, 4.2) επαναδιατυπώθηκαν, αντικαθιστώντας το $F_s = \frac{Q_{ult,deg}}{Q_s}$ και $FS_{deg} = \frac{Q_{ult,deg}}{Q_s}$, αντίστοιχα. Έτσι, η σχέση των Naesgaard et al. (1998) (Εξ. 4.1) διατυπώνεται εναλλακτικά ως:

$$\rho (m) = \alpha \cdot Z_l^{\beta/2} \cdot \gamma_{lim}^{\beta/2} \cdot Q_s^{5\beta/4} \cdot Q_{ult,deg}^{-\beta} \quad (4.5)$$

όπου:

στατική ανάλυση (κάτω όριο): $\alpha = 0.10$, $\beta = 1.41$

δυναμική ανάλυση (άνω όριο): $\alpha = 0.20$, $\beta = 1.51$

στατική και δυναμική ανάλυση (μέσος όρος): $\alpha = 0.12$, $\beta = 1.55$

και οι σχέσεις των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) (Εξ. 3.4, 4.2), ως:

$$\rho_{dyn} = c \cdot \alpha_{max} \cdot T^2 \cdot N \cdot Z_{liq}^{1.5} \cdot B^{-1.5} \cdot Q_s^3 \cdot Q_{ult,deg}^{-3} \quad (4.6)$$

ή

$$\rho_{dyn} = c \cdot 2\pi \cdot v_{max} \cdot t \cdot Z_{liq}^{1.5} \cdot B^{-1.5} \cdot Q_s^3 \cdot Q_{ult,deg}^{-3} \quad (4.7)$$

Οι ανεξάρτητες παράμετροι που υπεισέρχονται στις ανωτέρω σχέσεις και οι τιμές των εκθετών τους, που ποσοτικοποιούν την σχετική επίδραση της κάθε παραμέτρου, συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.1.

Σημειώνεται, ότι στον Πίνακα 4.1 οι τιμές των εκθετών των παραμέτρων αποδίδονται με το πρόσημό τους, ώστε να παρουσιαστεί και ποιοτικά η επίδραση της κάθε παραμέτρου. Συγκεκριμένα, το σύμβολο (+) εκφράζει την συμβολή της παραμέτρου στην αύξηση της προβλεπόμενης καθίζησης, ενώ το σύμβολο (-) εκφράζει την συμβολή της παραμέτρου στην μείωση της προβλεπόμενης καθίζησης.

Πίνακας 4.1. Συγκριτική αξιολόγηση της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών υπολογισμού της καθίζησης

Ανεξάρτητη μεταβλητή	Naesgaard et al. (1998)			Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)
	Στατική ανάλυση (κάτω όριο)	Δυναμική ανάλυση (άνω όριο)	Στατική και Δυναμική ανάλυση (μέσος όρος)	Δυναμική ανάλυση
Q_s	1.763	1.888	1.938	3.0
$Q_{ult,deg}$	-1.41	-1.51	-1.55	-3.0
Z_l ή Z_{liq}	0.705	0.755	0.775	1.5
γ_{lim}	0.705	0.755	0.775	∅
B	0	0	0	-1.5
α_{max}	∅	∅	∅	1.0
T	∅	∅	∅	2.0
N	∅	∅	∅	1.0
$v_{max}^{(1)}$	∅	∅	∅	1.0
$t^{(1)}$	∅	∅	∅	1.0

(1) όταν χρησιμοποιούνται αντί των α_{max} , T και N

Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 4.1, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(α) Μέθοδος Naesgaard et al. (1998):

- Σε αυτή την μέθοδο, το φορτίο έδρασης της θεμελίωσης Q_s και η απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $Q_{ult,deg}$, αποτελούν τις βασικές μεταβλητές που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων. Μέσω της παρατήρησης αυτής, διαπιστώνεται η σημαντική συμβολή των χαρακτηριστικών των εδαφικών στρώσεων Z_c, c_u, τ_{RES} στον υπολογισμό της σεισμικής καθίζησης, οι οποίες υπεισέρχονται στον υπολογισμό της $Q_{ult,deg}$ (Εξ. 2.1).
- Η οριακή διατμητική παραμόρφωση γ_{lim} και το πάχος Z_l της ρευστοποιημένης στρώσης άμμου, με βάση τις τιμές των εκθετών τους, έχουν την ίδια ποσοτικά επίδραση στον υπολογισμό της προβλεπόμενης καθίζησης, και μικρότερη επίδραση σε σχέση με τις μεταβλητές Q_s και $Q_{ult,deg}$. Επισημαίνεται, ότι οι μεταβλητές αυτές εκφράζονται με διαφορετική μορφή στην Εξ. 4.5. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή γ_{lim} εκφράζεται σε αδιάστατη μορφή (π.χ. για οριακή διατμητική παραμόρφωση 50%, λαμβάνεται $\gamma_{lim} = 0.5$ στην Εξ. 4.5), ενώ το πάχος της ρευστοποιημένης στρώσης άμμου Z_l εισάγεται σε (m) στην Εξ. 4.5.
- Το πλάτος της θεμελίωσης B στην Εξ. 4.5 δεν υπεισέρχεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Ωστόσο, επηρεάζει έμμεσα την προβλεπόμενη καθίζηση, διότι υπεισέρχεται στον υπολογισμό της $Q_{ult,deg}$ (Εξ. 2.1).
- Επιπλέον, επισημαίνεται η παρουσία της σταθεράς α στην Εξ. 4.5, η οποία συμβάλλει στον υπολογισμό της προβλεπόμενης καθίζησης.
- Σε αυτή την μέθοδο, τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της σεισμικής καθίζησης.

(β) Μέθοδος Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

- Σε αυτή την μέθοδο, το φορτίο έδρασης της θεμελίωσης Q_s και η απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $Q_{ult,deg}$, αποτελούν τις βασικές μεταβλητές που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων, με ίδια ποσοτικά και διαφορετική ποιοτικά επιρροή. Μέσω της παρατήρησης αυτής, διαπιστώνεται η σημαντική συμβολή των χαρακτηριστικών των εδαφικών στρώσεων H, c_u, φ, γ' στον υπολογισμό της σεισμικής καθίζησης, οι οποίες υπεισέρχονται στον υπολογισμό της $q_{ult,deg}$ (Εξ. 3.8).
- Το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq} και το πλάτος της θεμελίωσης B , με βάση τις τιμές των εκθετών τους, έχουν την ίδια ποσοτικά και διαφορετική ποιοτικά συμβολή στην προβλεπόμενη καθίζηση, και η επιρροή τους είναι μικρότερη ποσοτικά σε σχέση με τις μεταβλητές Q_s και $Q_{ult,deg}$.
- Στην εν λόγω μέθοδο, λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων, με την προβλεπόμενη καθίζηση να είναι ανάλογη του όρου $\alpha_{max} \cdot T^2 \cdot N$, που ισοδυναμεί με τον όρο $2\pi \cdot v_{max} \cdot t$.
- Επιπλέον, επισημαίνεται η παρουσία της σταθεράς c στις Εξ. 4.6, 4.7, η οποία εκφράζει την επιρροή του σχήματος του θεμελίου και συμβάλλει στον υπολογισμό της προβλεπόμενης καθίζησης.

(γ) Σύγκριση μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

- Η επιρροή των βασικών μεταβλητών Q_s και $Q_{ult,deg}$ που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων στις δύο μεθόδους, προκύπτει σημαντικά μεγαλύτερη στην μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) σε σύγκριση με την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998).
- Επιπλέον, η επιρροή του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου (Z_l ή Z_{liq}) προκύπτει μεγαλύτερη στην μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) σε σύγκριση με την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998).

- Οι προβλεπόμενες καθιζήσεις και των δύο μεθόδων λαμβάνουν υπόψη την διατμητική αντοχή της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, με διαφορετική ωστόσο προσέγγιση. Συγκεκριμένα, στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) η προβλεπόμενη καθίζηση συσχετίζεται άμεσα με την οριακή διατμητική παραμόρφωση γ_{lim} του ρευστοποιημένου εδάφους, και έμμεσα με την παραμένουσα διατμητική αντοχή της ρευστοποιημένης άμμου τ_{RES} , η οποία υπεισέρχεται στον υπολογισμό της $Q_{ult,deg}$ (Εξ. 2.1).

Στην μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου δεν υπεισέρχονται άμεσα στον υπολογισμό της προβλεπόμενης καθίζησης. Η επιρροή τους λαμβάνεται έμμεσα υπόψη, στον υπολογισμό της $q_{ult,deg}$ (Εξ. 3.8), όπου χρησιμοποιείται μια μειωμένη γωνία τριβής φ_{deg} για την ρευστοποιημένη άμμο ως συνάρτηση της πραγματικής γωνίας τριβής φ .

- Το πλάτος της θεμελίωσης B υπεισέρχεται άμεσα στην σχέση υπολογισμού της καθίζησης της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), συμβάλλοντας στην μείωση της σεισμικής καθίζησης. Στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) επηρεάζει έμμεσα την προβλεπόμενη καθίζηση, μέσω της παρουσίας του στον υπολογισμό της $Q_{ult,deg}$ (Εξ. 2.1).
- Στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στον υπολογισμό της σεισμικής καθίζησης, σε αντίθεση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), όπου λαμβάνεται υπόψη η συμβολή τους στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται ποσοτική σύγκριση των μεθόδων πρόβλεψης της σεισμικής καθίζησης θεμελίωσης που περιγράφηκαν στα Κεφάλαια 2 και 3 (Naesgaard et al., 1998 - Karamitros et al., 2013a, 2013b, 2013c).

Στην έρευνα των Naesgaard et al. (1998) διερευνήθηκε η σεισμική απόκριση επιφανειακών θεμελίων που εδράζονται σε μια συνεκτική κρούστα υπερκείμενη μιας συνεχούς ρευστοποιημένης εδαφικής στρώσης. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις, από τις οποίες προέκυψε γραφική (υπό μορφή διαγράμματος) συσχέτιση μεταξύ της καθίζησης της θεμελίωσης ρ και του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα μετά την ρευστοποίηση F_s (Εξ. 2.1) [ή X_s (Εξ. 2.2)], ο οποίος υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μια απλή εξίσωση (Σχήματα 2.10 και 2.11).

Στο Κεφάλαιο 4 αξιοποιήθηκε το Σχήμα 2.11, ώστε να διατυπωθούν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης $\rho - 1/F_s$ που να εκφράζουν την στατική και την δυναμική ανάλυση της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998). Με βάση τις σχέσεις $\rho - 1/F_s$ που προέκυψαν (Εξ. 4.1α - 4.1γ), στις παραμετρικές αναλύσεις του παρόντος Κεφαλαίου υπολογίζεται η καθίζηση που προβλέπει η εν λόγω μέθοδος. Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 4 διατυπώθηκαν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της παραμένουσας διατμητικής αντοχής τ_{RES} (Εξ. 4.3) και της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{lim} (Εξ. 4.4) του ρευστοποιημένου εδάφους, οι οποίες στις παραμετρικές αναλύσεις του παρόντος Κεφαλαίου χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών ασφαλείας F_s και X_s .

Στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) διερευνήθηκε η σεισμική απόκριση επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται σε μια απεριόριστα εκτεταμένη και απολύτως συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις, από τις οποίες προέκυψε μια απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος για την εκτίμηση της μετασεισμικής μειωμένης φέρουσας ικανότητας επιμήκων και ορθογωνικών θεμελίων $q_{ult,deg} [FS_{deg}]$ (Εξ. 3.8), και των αντίστοιχων σεισμικών καθιζήσεων ρ_{dyn} (Εξ. 3.4).

Η ποσοτική σύγκριση των δύο μεθόδων αφορά, στην σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας F_s (Εξ. 2.1) και FS_{deg} (Εξ. 3.8), και στην σύγκριση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α - 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Για τον σκοπό αυτό, έγινε η σύνταξη και εφαρμογή των δύο αναλυτικών μεθόδων σε υπολογιστικά φύλλα *Excel*.

Η ποσοτική σύγκριση των δύο μεθόδων γίνεται, πραγματοποιώντας παραμετρικές αναλύσεις. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που επιδρούν στην προβλεπόμενη καθίζηση των δύο μεθόδων, σε πρώτο βήμα, διερευνάται η επίδραση της κάθε παραμέτρου στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας (F_s και FS_{deg}) και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Στην συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων, δημιουργούνται γραφήματα σύγκρισης του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των δύο μεθόδων ($FS_{deg,Naesgaard} - FS_{deg,Karamitros}$), και γραφήματα σύγκρισης της προβλεπόμενης καθίζησης ($\rho_{stat,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$), από τα οποία εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν συνολικά στην σύγκριση των αντίστοιχων μεταβλητών μεταξύ των δύο μεθόδων.

5.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό, περιγράφονται οι παραμετρικές αναλύσεις. Αρχικά, υπενθυμίζονται οι παράμετροι που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων στις δύο μεθόδους, των οποίων διερευνάται η επιρροή στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας (F_s και FS_{deg}) και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Στην συνέχεια, αναφέρονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών των εδαφικών παραμέτρων στις παραμετρικές αναλύσεις.

Η πραγματοποίηση των παραμετρικών αναλύσεων περιλαμβάνει αρχικά, τον ορισμό σταθερών τιμών αναφοράς για τις υπό μελέτη παραμέτρους σε όλες τις αναλύσεις (βασική περίπτωση). Στην συνέχεια, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των υπό μελέτη παραμέτρων στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας (F_s και FS_{deg}) και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ από τις δύο μεθόδους, σε κάθε ανάλυση μεταβάλλονται οι τιμές μιας παραμέτρου σε καθορισμένο εύρος τιμών.

5.1.1 Υπό μελέτη παράμετροι και σχέσεις υπολογισμού εδαφικών παραμέτρων

Στο σημείο αυτό, υπενθυμίζονται οι παράμετροι που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων στις δύο μεθόδους (Πίνακας 5.1), των οποίων διερευνάται η επιρροή στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας (F_s και $F_{S_{deg}}$) και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Στην 3^η στήλη του Πίνακα 5.1 ορίζονται ίδια σύμβολα για τις κοινές παραμέτρους που επιδρούν στην προβλεπόμενη καθίζηση ρ των δύο μεθόδων, τα οποία χρησιμοποιούνται στις παραμετρικές αναλύσεις.

Πίνακας 5.1. Παράμετροι που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων στις μεθόδους των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)

Παράμετροι που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων		
Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Συμβολισμός κοινών παραμέτρων στις παραμετρικές αναλύσεις
Πάχος αργιλικής στρώσης Z_c	Πάχος αργιλικής στρώσης H	Πάχος αργιλικής στρώσης H_{crust}
Πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_l	Πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq}	Πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq}
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργιλικής στρώσης c_u	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργιλικής στρώσης c_u	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργιλικής στρώσης c_u
Παραμένουσα διατμητική αντοχή ρευστοποιημένης στρώσης τ_{RES} [εξαρτάται από τον διορθωμένο αριθμό κρούσεων SPT, $(N_1)_{60}$]	Αρχική γωνία τριβής ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου φ [εξαρτάται από την αρχική (προ ρευστοποίησης) σχετική πυκνότητα D_r της στρώσης άμμου]	
Οριακή διατμητική παραμόρφωση ρευστοποιημένης στρώσης γ_{lim} [εξαρτάται από τον διορθωμένο αριθμό κρούσεων SPT, $(N_1)_{60}$]		
	Ενεργό ειδικό βάρος στρώσεων άμμου και αργίλου γ'	
Πλάτος θεμελίωσης B	Πλάτος θεμελίωσης B Μήκος θεμελίωσης L	Πλάτος θεμελίωσης B
Φορτίο θεμελίωσης ανά μονάδα μήκους Q_s	Μέση τάση έδρασης θεμελίωσης q	Φορτίο θεμελίωσης ανά μονάδα μήκους Q_s Μέση τάση έδρασης θεμελίωσης q
	Μέγιστη επιτάχυνση σεισμικής διέγερσης α_{max} Περίοδος σεισμικής διέγερσης T Αριθμός σημαντικών κύκλων φόρτισης σεισμικής διέγερσης N	

Σημείωση: Ο συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας σε φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση που συμβολίζεται διαφορετικά στις δύο μεθόδους (F_s και FS_{deg}), στις παραμετρικές αναλύσεις συμβολίζεται ως εξής: $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$.

Για τον υπολογισμό των τιμών των εδαφικών παραμέτρων στις παραμετρικές αναλύσεις, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργιλικής στρώσης, c_u (Skempton, 1957):

$$\frac{c_u}{\sigma'_{vo}} = [0.11 + 0.0037I_p(\%)]OCR^{0.80} \quad (5.1)$$

όπου:

σ'_{vo} = η κατακόρυφη ενεργός τάση,

I_p = ο δείκτης πλασιμότητας, και

OCR = ο λόγος προφόρτισης.

Στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο Κεφάλαιο αυτό, ο δείκτης πλασιμότητας λαμβάνει σταθερή τιμή $I_p = 35\%$. Επομένως, για τις παραμετρικές αναλύσεις του Κεφαλαίου αυτού, η Εξ. 5.1 διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{Για } I_p = 35\% : \quad \frac{c_u}{\sigma'_{vo}} = 0.24 \cdot OCR^{0.80} \quad (5.2)$$

- Αρχική (προ ρευστοποίησης) σχετική πυκνότητα στρώσης άμμου, D_r (Idriss and Boulanger, 2008):

$$D_r(\%) = \sqrt{\frac{(N_1)_{60,cs}}{46}} \cdot 100 \quad (5.3)$$

όπου:

$(N_1)_{60,cs}$ = ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT.

Στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο Κεφάλαιο αυτό, για τον υπολογισμό του διορθωμένου αριθμού κρούσεων SPT, $(N_1)_{60,cs}$, η Εξ. 5.3 διαμορφώνεται ως εξής:

$$(N_1)_{60,cs} = 46 \cdot \left(\frac{D_r\%}{100}\right)^2 \quad (5.4)$$

- Αρχική γωνία τριβής ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, φ :

Στην έρευνα των Hatanaka and Uchida (1996), προτάθηκε η ακόλουθη σχέση (Εξ. 5.5) για τον υπολογισμό της εσωτερικής γωνίας τριβής για αμμώδες έδαφος:

$$\varphi \text{ (deg)} = [20(N_1)_{60}]^{0.5} + 20 \quad (5.5)$$

όπου:

$(N_1)_{60}$ = ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT.

Στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο Κεφάλαιο αυτό, οι τιμές της αρχικής γωνίας τριβής της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου φ υπολογίζονται με βάση την ακόλουθη σχέση (Εξ. 5.6), της οποίας την πηγή από την οποία προέρχεται δεν γνωρίζουμε με βεβαιότητα και για τον λόγο αυτό δεν αναφέρουμε την πηγή της Εξ. 5.6:

$$\varphi \text{ (deg)} = [15.4(N_1)_{60}]^{0.5} + 20 \quad (5.6)$$

όπου:

$(N_1)_{60}$ = ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT.

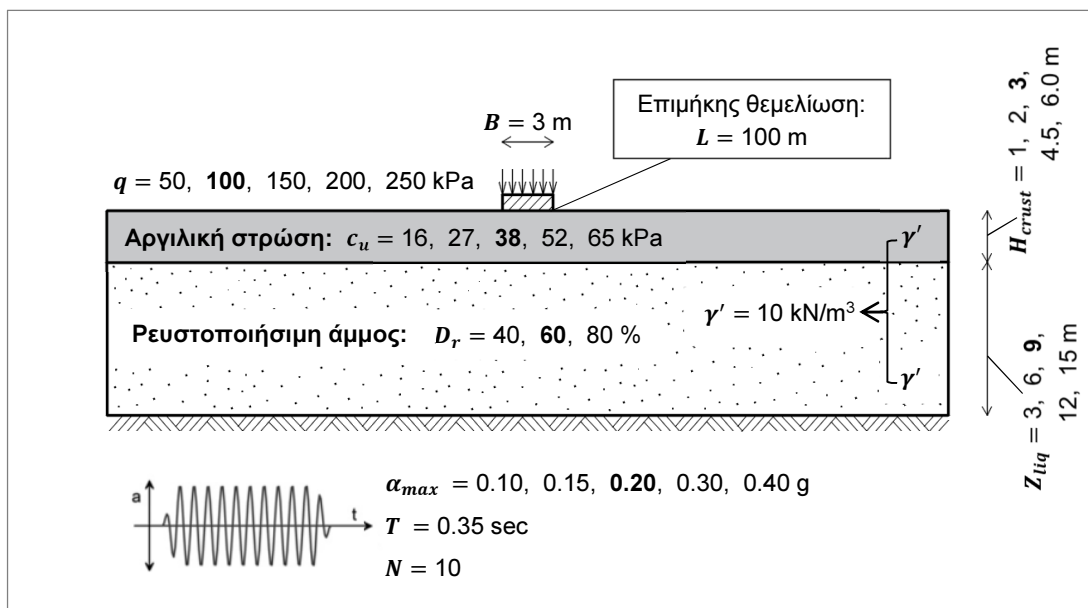
5.1.2 Βασική περίπτωση και παραμετρικές αναλύσεις

Αξιοποιώντας τις ανωτέρω σχέσεις (Εξ. 5.2, 5.4, 5.6), υπολογίστηκαν οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων στην βασική περίπτωση και τις παραμετρικές αναλύσεις. Η βασική περίπτωση περιλαμβάνει τον ορισμό των τιμών αναφοράς των υπό μελέτη παραμέτρων, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλες τις αναλύσεις. Σε κάθε ανάλυση που πραγματοποιείται, διερευνάται η επίδραση μίας παραμέτρου στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, μεταβάλλοντας τις τιμές της παραμέτρου σε καθορισμένο εύρος τιμών. Οι τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην βασική περίπτωση και τις παραμετρικές αναλύσεις, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Επιπλέον, το προσομοίωμα εδάφους-θεμελίου που χρησιμοποιείται στις παραμετρικές αναλύσεις και το εύρος τιμών των υπό μελέτη παραμέτρων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.

Πίνακας 5.2. Τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων στις παραμετρικές αναλύσεις

Παράμετροι	Βασική Περίπτωση	Παραμετρικές Αναλύσεις				
Πάχος αργιλικής στρώσης H_{crust} (m)	3	1	2	3	4.5	6
Κανονικοποιημένο πάχος H_{crust}/B	1	0.33	0.67	1.00	1.50	2.00
Πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq} (m)	9	3	6	9	12	15
Κανονικοποιημένο πάχος Z_{liq}/B	3	1	2	3	4	5
Λόγος προφόρτισης OCR	3	1	2	3	4.5	6
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργιλικής στρώσης c_u (kPa) ⁽¹⁾ (Εξ. 5.2)	38	16	27	38	52	65
Αρχική σχετική πυκνότητα ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r (%)	60	40	60	80		
Διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT $(N_1)_{60}$ (Εξ. 5.4)	17	7.5	17	29		
Αρχική γωνία τριβής ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου φ (deg) (Εξ. 5.6)	36	31	36	41		
Μέση τάση έδρασης θεμελίωσης q (kPa)	100	50	100	150	200	250
Μέγιστη επιτάχυνση σεισμικής διέγερσης α_{max} (g)	0.20	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
Ενεργό ειδικό βάρος στρώσεων άμμου και αργίλου γ' (kN/m ³)	10	<ul style="list-style-type: none"> Οι παράμετροι γ', B, L, T, N, λαμβάνουν σταθερή τιμή σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις, τις τιμές της βασικής περίπτωσης. Οι παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιούνται μόνο για επιμήκη θεμελίωση (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης). 				
Πλάτος θεμελίωσης B (m)	3					
Μήκος θεμελίωσης L (m)	100					
Περίοδος σεισμικής διέγερσης T (sec)	0.35					
Αριθμός σημαντικών κύκλων φόρτισης σεισμικής διέγερσης N	10					

(1) Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής στρώσης c_u υπολογίζεται για το μέσο της αργιλικής στρώσης στις παραμετρικές αναλύσεις.



Σχήμα 5.1. Προσομοίωμα εδάφους-θεμελίου και εύρος τιμών των υπό μελέτη παραμέτρων στις παραμετρικές αναλύσεις (επισημαίνονται με έντονο χρώμα οι τιμές των παραμέτρων στην βασική περίπτωση)

5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Στο υποκεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η παραμετρική σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).

Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις όπου διερευνάται η επίδραση των υπό μελέτη παραμέτρων στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8), και της σεισμικής καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α - 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} υπολογίζεται και στις δύο μεθόδους, με βάση έναν σύνθετο μηχανισμό αστοχίας που συνίσταται από μια επιφάνεια διατμητικής αστοχίας εντός της αργιλικής στρώσης, η οποία διεισδύει εντός της βαθύτερης ρευστοποιημένης στρώσης άμμου. Η σύγκριση της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ (Εξ. 3.4) γίνεται και με τις τρεις αναλυτικές εκφράσεις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$, $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ (Εξ. 4.1α - 4.1γ) που προέκυψαν αξιοποιώντας τα δεδομένα της στατικής και της δυναμικής ανάλυσης της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998).

Οι παραμετρικές αναλύσεις περιλαμβάνουν αρχικά, τον ορισμό σταθερών τιμών αναφοράς για τις υπό μελέτη παραμέτρους σε όλες τις αναλύσεις (βασική περίπτωση). Στην συνέχεια, σε κάθε ανάλυση που πραγματοποιείται, διερευνάται η επίδραση μίας παραμέτρου στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, μεταβάλλοντας τις τιμές της παραμέτρου σε καθορισμένο εύρος τιμών. Οι τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων στην βασική περίπτωση και το εύρος τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις παραμετρικές αναλύσεις, αναφέρθηκαν στα προηγούμενα (Πίνακας 5.2 και Σχήμα 5.1).

Με βάση τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, στην συνέχεια, υπολογίζονται οι λόγοι των αντίστοιχων μεταβλητών μεταξύ των δύο μεθόδων. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε ανάλυση, δημιουργούνται γραφήματα στα οποία παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ από τις δύο μεθόδους (και των λόγων των αντίστοιχων μεταβλητών μεταξύ των δύο μεθόδων), σε σχέση με την υπό μελέτη παράμετρο. Για κάθε παράμετρο που διερευνάται, εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν στην σύγκριση των FS_{deg} και ρ μεταξύ των δύο μεθόδων.

5.2.1 Επίδραση μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης, α_{max}

Η επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης α_{max} στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8) και της σεισμικής καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α, 4.1β, 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις μεθόδους των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.3 και στο Σχήμα 5.2. Η επίδραση της α_{max} στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.4 και στο Σχήμα 5.3. Στην βασική περίπτωση η τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης είναι $\alpha_{max} = 0.20g$. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις για την επίδραση της α_{max} :

Μέθοδος Naesgaard et al. (1998):

Στην μέθοδο αυτή, ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} δεν εξαρτάται από την α_{max} και λαμβάνει σταθερή τιμή, ίση με $FS_{deg} = 3.521$ (τιμή της βασικής περίπτωσης). Στην εν λόγω μέθοδο υπενθυμίζεται, ότι δεν λήφθηκε υπόψη η επιρροή της α_{max} στις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, και στο προσομοίωμα εδάφους-κτιρίου έγινε εισαγωγή μίας μόνο διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $\alpha_{max} = 0.20g$. Επομένως, η προβλεπόμενη καθίζηση ρ για την στατική (ρ_{stat}), την δυναμική (ρ_{dyn}) και την στατική-δυναμική ανάλυση ($\rho_{stat,dyn}$) δεν επηρεάζεται από την μεταβολή της α_{max} , και λαμβάνει σε όλο το εύρος των υπό διερεύνηση τιμών της α_{max} σταθερή τιμή, ίση με $\rho_{stat,Naesgaard} = 0.233m$, $\rho_{dyn,Naesgaard} = 0.496m$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} = 0.305m$ (τιμές της βασικής περίπτωσης).

Μέθοδος Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή παρατηρείται, ότι η σεισμική καθίζηση ρ_{dyn} αυξάνεται με την αύξηση της α_{max} , και σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων καθορίζεται από τον μηχανισμό ολίσθησης σώματος τύπου Newmark. Όσον αφορά στον συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} παρατηρείται, ότι για αύξηση της α_{max} από 0.10g σε 0.15g η τιμή του FS_{deg} αυξάνεται από 1.351 σε 1.375, αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει, διότι η αύξηση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} οδηγεί σε διαστολική συμπεριφορά του εδάφους λόγω διάτμησης και συνεπώς, σε χαμηλότερες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων στην περιοχή κάτω από την θεμελίωση, αυξάνοντας έτσι την απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$.

Επιπλέον παρατηρείται, ότι για τιμές της α_{max} από 0.15g έως 0.40g η τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} είναι σταθερή, ίση με $FS_{deg} = 1.375$. Αυτό συμβαίνει, διότι για τις τιμές της κανονικοποιημένης σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn}/B που προκύπτουν σε αυτό το εύρος τιμών της α_{max} , ο διορθωτικός συντελεστής a στο Σχήμα 3.24 λαμβάνει σταθερή τιμή ίση με $a = 0.80$, και συνεπώς, η απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$ λαμβάνει σταθερή τιμή σε αυτό το εύρος τιμών της α_{max} .

Σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Όσον αφορά στην σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρείται, ότι οι τιμές του FS_{deg} προκύπτουν μεγαλύτερες με βάση την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) σε σχέση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), και συγκεκριμένα, για την πλειονότητα των περιπτώσεων διερεύνησης της παραμέτρου α_{max} , ο λόγος τους προκύπτει $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 2.56$.

Όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, για την πλειονότητα των περιπτώσεων διερεύνησης της παραμέτρου α_{max} , η καθίζηση ρ προκύπτει μεγαλύτερη με βάση την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) σε σχέση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c). Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τις σεισμικές καθιζήσεις $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$, για $\alpha_{max} = 0.20g$ [τιμή της εισαγόμενης διέγερσης στις δυναμικές αναλύσεις των Naesgaard et al. (1998)] ο λόγος τους προκύπτει $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 2.90$.

Συγκρίνοντας την καθίζηση στατικής ανάλυσης $\rho_{stat,Naesgaard}$ με την σεισμική καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρατηρείται, ότι για τιμές της α_{max} μικρότερες περίπου από την τιμή 0.28g, η πρώτη παρουσιάζεται μεγαλύτερη από την δεύτερη, ενώ για μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης παρουσιάζεται το αντίθετο αποτέλεσμα. Για $\alpha_{max} = 0.20g$, ο λόγος των καθιζήσεων προκύπτει $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 1.36$.

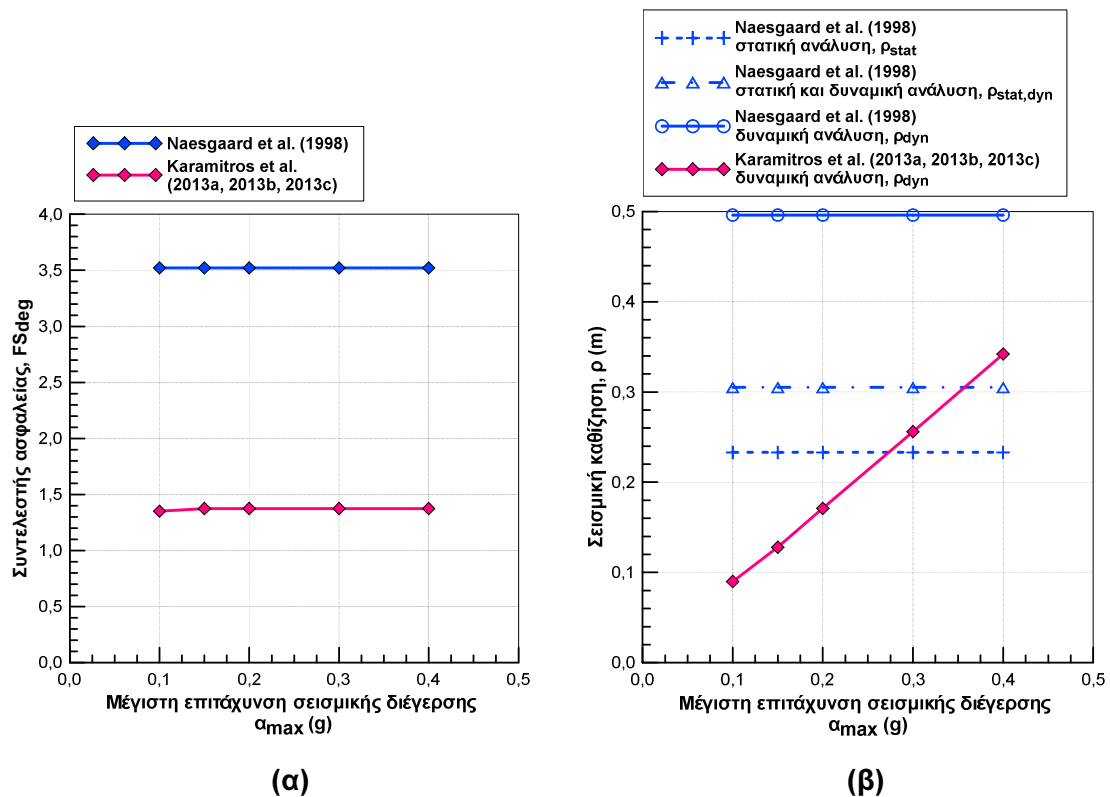
Συγκρίνοντας την καθίζηση στατικής και δυναμικής ανάλυσης $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ με την σεισμική καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρατηρείται, ότι για τιμές της α_{max} μικρότερες περίπου από την τιμή 0.35g, η πρώτη παρουσιάζεται μεγαλύτερη από την δεύτερη, ενώ για μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης παρουσιάζεται το αντίθετο αποτέλεσμα.

Για $\alpha_{max} = 0.20g$, ο λόγος των καθιζήσεων προκύπτει $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 1.78$.

Επισημαίνεται, ότι στις παραμετρικές αναλύσεις που αναφέρονται στα επόμενα και αφορούν στην διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων H_{crust} , Z_{liq} , c_u , D_r και q , λαμβάνεται $\alpha_{max} = 0.20g$ στον υπολογισμό της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} με βάση την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c). Η επιλογή της τιμής $\alpha_{max} = 0.20g$ έγινε, διότι είναι η τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης της εισαγόμενης διέγερσης στις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998). Επομένως, στις παραμετρικές αναλύσεις που αναφέρονται στα επόμενα και αφορούν στην διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων H_{crust} , Z_{liq} , c_u , D_r και q , η σύγκριση των σεισμικών καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ γίνεται για την ίδια τιμή μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης $\alpha_{max} = 0.20g$. Όσον αφορά στην σύγκριση των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$, η καθίζηση $\rho_{stat,Naesgaard}$ είναι ανεξάρτητη της α_{max} και συγκρίνεται με την σεισμική καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$, η οποία υπολογίζεται για $\alpha_{max} = 0.20g$.

Πίνακας 5.3. Επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης α_{max} , στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

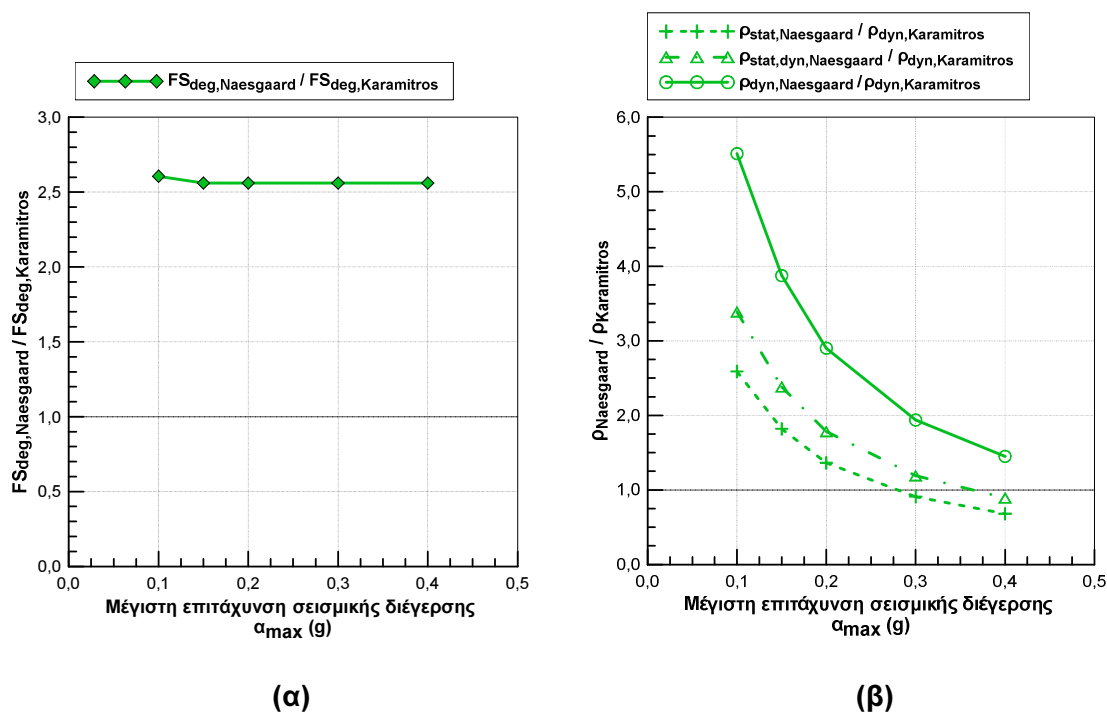
α_{max} (g)		0.10		0.15		0.20		0.30		0.40	
Μέθοδος		Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)
Συντελεστής ασφαλείας, FS_{deg}		3.521	1.351	3.521	1.375	3.521	1.375	3.521	1.375	3.521	1.375
(χ_s)		(0.548)		(0.548)		(0.548)		(0.548)		(0.548)	
Σεισμική καθίζηση, ρ (m)	Στατική ανάλυση, ρ_{stat} (m)	0.233		0.233		0.233		0.233		0.233	
	Δυναμική ανάλυση, ρ_{dyn} (m)	0.496	0.090	0.496	0.128	0.496	0.171	0.496	0.256	0.496	0.342
	Στατική και Δυναμική ανάλυση, $\rho_{stat,dyn}$ (m)	0.305		0.305		0.305		0.305		0.305	



Σχήμα 5.2. Επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης α_{max} , στις τιμές **(α)** του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

Πίνακας 5.4. Επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης α_{max} , στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

α_{max} (g)		0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
Λόγος συντελεστών ασφαλείας, $FS_{deg,Naesgaard}/FS_{deg,Karamitros}$		2.61	2.56	2.56	2.56	2.56
Λόγος σεισμικών καθιζήσεων, $\rho_{Naesgaard}/\rho_{Karamitros}$	$\rho_{stat,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	2.59	1.82	1.36	0.91	0.68
	$\rho_{dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	5.51	3.88	2.90	1.94	1.45
	$\rho_{stat,dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	3.39	2.38	1.78	1.19	0.89



Σχήμα 5.3. Επίδραση της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης α_{max} , στις τιμές του λόγου **(α)** των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

5.2.2 Επίδραση πάχους αργιλικής στρώσης, H_{crust} (H_{crust}/B)

Η επίδραση του πάχους της αργιλικής στρώσης H_{crust} (H_{crust}/B για $B = 3m$) στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8) και της σεισμικής καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α, 4.1β, 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις μεθόδους των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5 και στο Σχήμα 5.4. Η επίδραση του H_{crust} (H_{crust}/B) στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.6 και στο Σχήμα 5.5. Στην βασική περίπτωση η τιμή του πάχους της αργιλικής στρώσης είναι $H_{crust} = 3m$ ($H_{crust}/B = 1$ για $B = 3m$). Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις για την επίδραση του H_{crust} (H_{crust}/B):

Μέθοδος Naesgaard et al. (1998):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση του κανονικοποιημένου πάχους της αργιλικής στρώσης H_{crust}/B συντελεί στην αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και στην μείωση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ .

Μέθοδος Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση του κανονικοποιημένου πάχους της αργιλικής στρώσης H_{crust}/B συντελεί στην αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και στην μείωση των τιμών της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} . Για την μικρότερη υπό διερεύνηση τιμή του πάχους της αργιλικής στρώσης $H_{crust} = 1m$ ($H_{crust}/B = 0.33$) ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με $FS_{deg} = 0.727 < 1$ και η τιμή της σεισμικής καθίζησης λαμβάνει τιμή $\rho_{dyn} = 1.160m$.

Σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

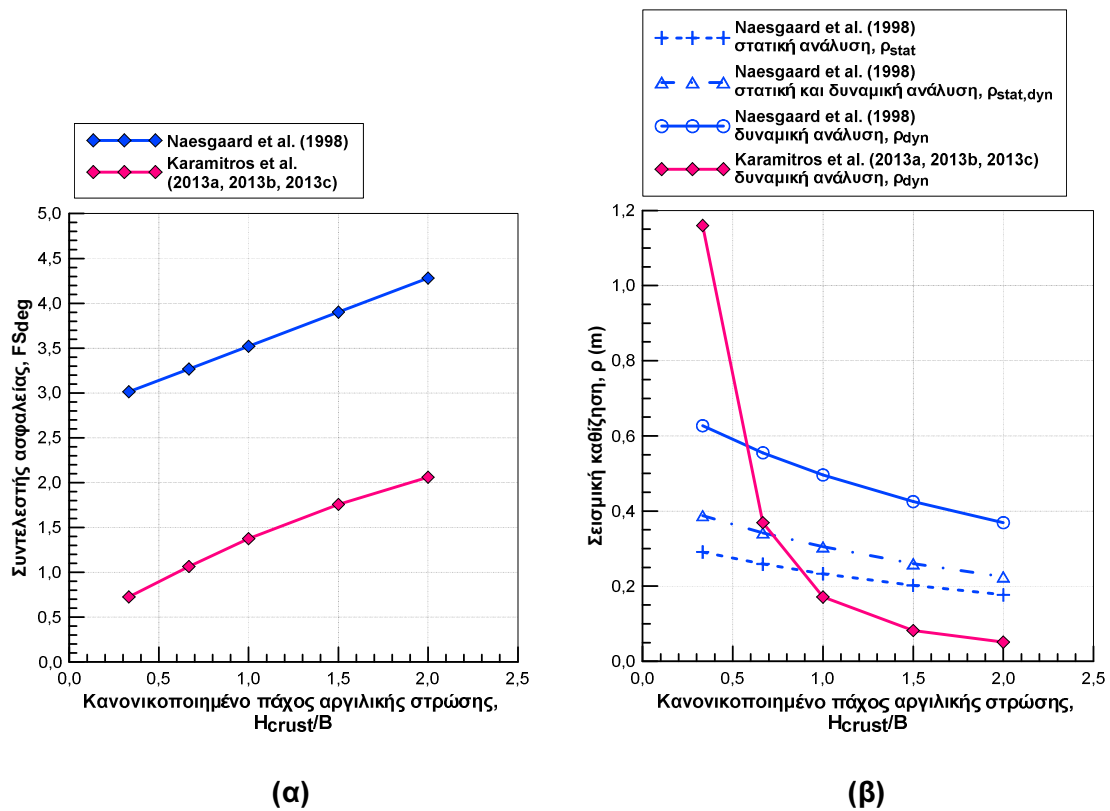
Όσον αφορά στην σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρείται, ότι οι τιμές του FS_{deg} προκύπτουν μεγαλύτερες με βάση την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) σε σχέση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), και συγκεκριμένα, για $H_{crust}/B = 0.33$ έως 2, ο λόγος τους προκύπτει $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 4.15$ έως 2.08, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, για την πλειονότητα των περιπτώσεων διερεύνησης της επίδρασης του H_{crust}/B παρατηρείται, ότι η μείωση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) είναι πιο έντονη συγκριτικά με την μείωση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998) για την ίδια μεταβολή της τιμής του H_{crust}/B , δηλαδή $\frac{\Delta\rho_{dyn,Karamitros}}{\Delta(H_{crust}/B)} > \frac{\Delta\rho_{Naesgaard}}{\Delta(H_{crust}/B)}$. Ισοδύναμα, για την πλειονότητα των περιπτώσεων διερεύνησης της επίδρασης του H_{crust}/B , η καμπύλη που εκφράζει την $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση από τις καμπύλες που εκφράζουν τις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$. Αυτή η έντονη διαφορά ωστόσο δεν παρατηρείται στην αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} για την ίδια μεταβολή του H_{crust}/B μεταξύ των δύο μεθόδων. Η εντονότερη μείωση της $\rho_{dyn,Karamitros}$ σε σύγκριση με τις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ για την ίδια μεταβολή της τιμής του H_{crust}/B , οφείλεται στην μεγαλύτερη επίδραση του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} στην πρώτη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, διότι σύμφωνα με την Εξ. 3.4 η $\rho_{dyn,Karamitros}$ εξαρτάται από τον όρο $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3$, ενώ σύμφωνα με τις Εξ. 4.1α, 4.1β και 4.1γ οι $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ εξαρτώνται από τους όρους $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.41}$, $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.51}$ και $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.55}$, αντίστοιχα.

Επιπλέον, όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρατηρείται, ότι για τιμές του H_{crust}/B μικρότερες περίπου της τιμής $H_{crust}/B \cong 0.6$, η σεισμική καθίζηση της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από τις τιμές της προβλεπόμενης καθίζησης ρ της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998). Για $H_{crust}/B = 0.33$ ο λόγος των καθιζήσεων ισούται με $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.25$ και $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.54$. Το αντίθετο αποτέλεσμα προκύπτει για τιμές του H_{crust}/B μεγαλύτερες περίπου της τιμής $H_{crust}/B \cong 0.9$. Για $H_{crust}/B = 2$ ο λόγος των καθιζήσεων ισούται με $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 3.47$ και $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 7.24$. Επίσης, παρατηρείται, ότι η καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ γίνεται ίση με τις καθιζήσεις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ για $H_{crust}/B \cong 0.9$, $H_{crust}/B \cong 0.6$, και $H_{crust}/B \cong 0.7$, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.5. Επίδραση του πάχους της αργιλικής στρώσης H_{crust} (H_{crust}/B για $B = 3m$), στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

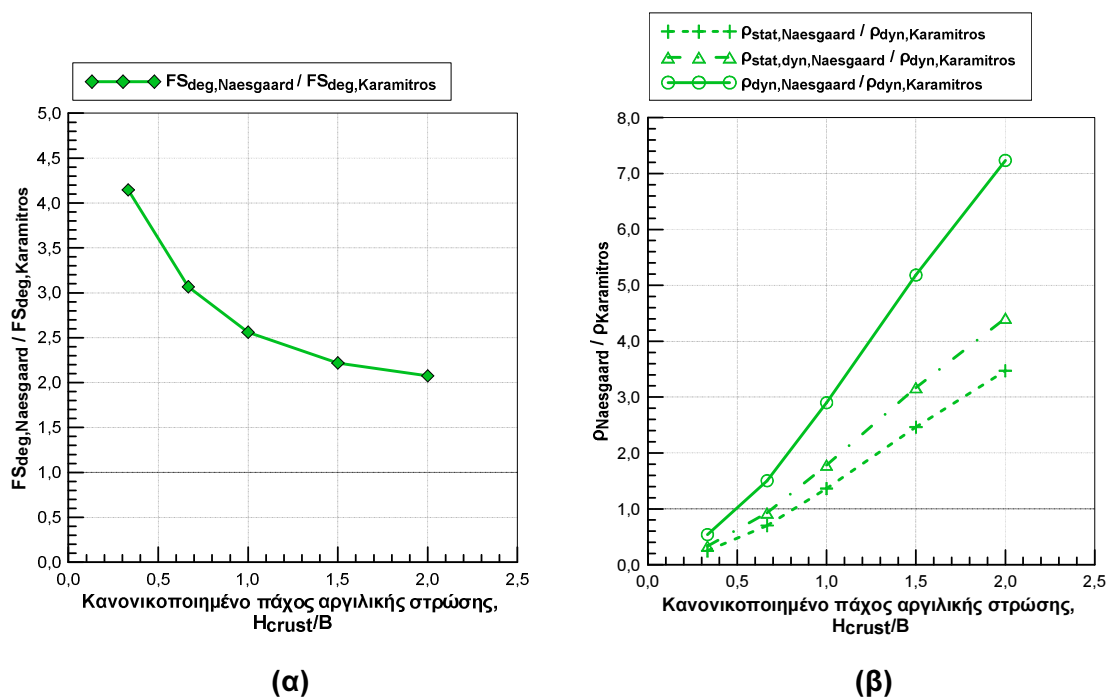
H_{crust} (m)		1.0		2.0		3.0		4.5		6.0	
H_{crust}/B		0.33		0.67		1		1.5		2	
Μέθοδος		Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)
Συντελεστής ασφαλείας, FS_{deg}		3.014	0.727	3.267	1.065	3.521	1.375	3.901	1.758	4.281	2.062
(X_s)		(0.469)		(0.509)		(0.548)		(0.607)		(0.666)	
Σεισμική καθίζηση, ρ (m)	Στατική ανάλυση, ρ_{stat} (m)	0.291		0.259		0.233		0.202		0.177	
	Δυναμική ανάλυση, ρ_{dyn} (m)	0.627	1.160	0.555	0.369	0.496	0.171	0.425	0.082	0.369	0.051
	Στατική και Δυναμική ανάλυση, $\rho_{stat,dyn}$ (m)	0.388		0.342		0.305		0.260		0.225	



Σχήμα 5.4. Επίδραση του κανονικοποιημένου πάχους της αργιλικής στρώσης H_{crust}/B (για $B = 3m$), στις τιμές **(α)** του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

Πίνακας 5.6. Επίδραση του πάχους της αργιλικής στρώσης H_{crust} (H_{crust}/B για $B = 3m$), στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

H_{crust} (m)		1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
H_{crust}/B		0.33	0.67	1	1.5	2
Λόγος συντελεστών ασφαλείας, $FS_{deg,Naesgaard}/FS_{deg,Karamitros}$		4.15	3.07	2.56	2.22	2.08
Λόγος σεισμικών καθιζήσεων, $\rho_{Naesgaard}/\rho_{Karamitros}$	$\rho_{stat,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	0.25	0.70	1.36	2.46	3.47
	$\rho_{dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	0.54	1.50	2.90	5.18	7.24
	$\rho_{stat,dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	0.33	0.93	1.78	3.17	4.41



Σχήμα 5.5. Επίδραση του κανονικοποιημένου πάχους της αργιλικής στρώσης H_{crust}/B (για $B = 3m$), στις τιμές του λόγου **(α)** των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

5.2.3 Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, Z_{liq} (Z_{liq}/B)

Η επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq} (Z_{liq}/B για $B = 3m$) στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8) και της σεισμικής καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α, 4.1β, 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις μεθόδους των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.7 και στο Σχήμα 5.6. Η επίδραση του Z_{liq} (Z_{liq}/B) στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.8 και στο Σχήμα 5.7. Στην βασική περίπτωση η τιμή του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου είναι $Z_{liq} = 9m$ ($Z_{liq}/B = 3$ για $B = 3m$). Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις για την επίδραση του Z_{liq} (Z_{liq}/B):

Μέθοδος Naesgaard et al. (1998):

Στην μέθοδο αυτή, ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} δεν εξαρτάται από το Z_{liq}/B και λαμβάνει σταθερή τιμή, ίση με $FS_{deg} = 3.521$ (τιμή της βασικής περίπτωσης). Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση του Z_{liq}/B επιφέρει αύξηση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ .

Μέθοδος Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή παρατηρείται, ότι η αύξηση του Z_{liq}/B επιφέρει αύξηση των τιμών της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} . Όσον αφορά στον συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} παρατηρείται, ότι για αύξηση του Z_{liq}/B από 1 σε 3 η τιμή του FS_{deg} αυξάνεται από 1.246 σε 1.375, αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει, διότι η αύξηση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} οδηγεί σε διαστολική συμπεριφορά του εδάφους λόγω διάτμησης και συνεπώς, σε χαμηλότερες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων στην περιοχή κάτω από την θεμελίωση, αυξάνοντας έτσι την απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$. Επιπλέον παρατηρείται, ότι για τιμές του Z_{liq}/B από 3 έως 5 η τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} είναι σταθερή, ίση με $FS_{deg} = 1.375$. Αυτό συμβαίνει, διότι για τις τιμές της κανονικοποιημένης σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn}/B που προκύπτουν σε αυτό το εύρος τιμών του Z_{liq}/B , ο διορθωτικός συντελεστής a στο Σχήμα 3.24 λαμβάνει σταθερή τιμή ίση με $a = 0.80$, και συνεπώς, η απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$ λαμβάνει σταθερή τιμή σε αυτό το εύρος τιμών του Z_{liq}/B .

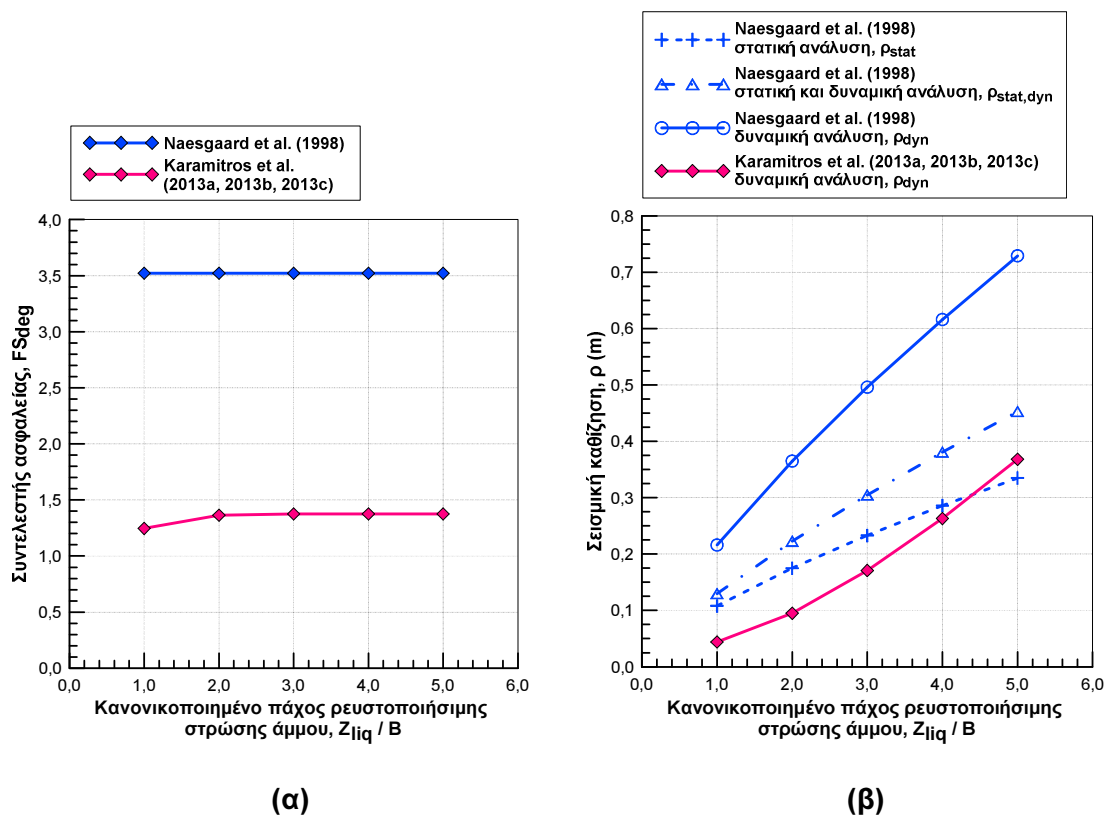
Σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Όσον αφορά στην σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρείται, ότι οι τιμές του FS_{deg} προκύπτουν μεγαλύτερες με βάση την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) σε σχέση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), και συγκεκριμένα, για $Z_{liq}/B = 1$ έως 5, ο λόγος τους προκύπτει $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 2.83$ έως 2.56, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρείται, ότι για όλες τις υπό διερεύνηση τιμές του Z_{liq}/B οι τιμές των καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ προκύπτουν μεγαλύτερες από τις τιμές της καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$. Όσον αφορά στην καθίζηση $\rho_{stat,Naesgaard}$, για την πλειονότητα των υπό διερεύνηση τιμών του Z_{liq}/B , προκύπτει μεγαλύτερη από την $\rho_{dyn,Karamitros}$, σε μία μόνο περίπτωση που αντιστοιχεί σε $Z_{liq}/B = 5$ συμβαίνει το αντίθετο. Για $Z_{liq}/B = 1$ έως 5, ο λόγος των καθιζήσεων λαμβάνει τιμές στο εύρος $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 2.45$ έως 0.91, $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 4.91$ έως 1.98, και $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 2.95$ έως 1.23, αντίστοιχα. Επιπλέον, παρατηρείται, ότι η καθίζηση $\rho_{stat,Naesgaard}$ γίνεται ίση με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ για $Z_{liq}/B \cong 4.2$.

Πίνακας 5.7. Επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq} (Z_{liq}/B για $B = 3m$), στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

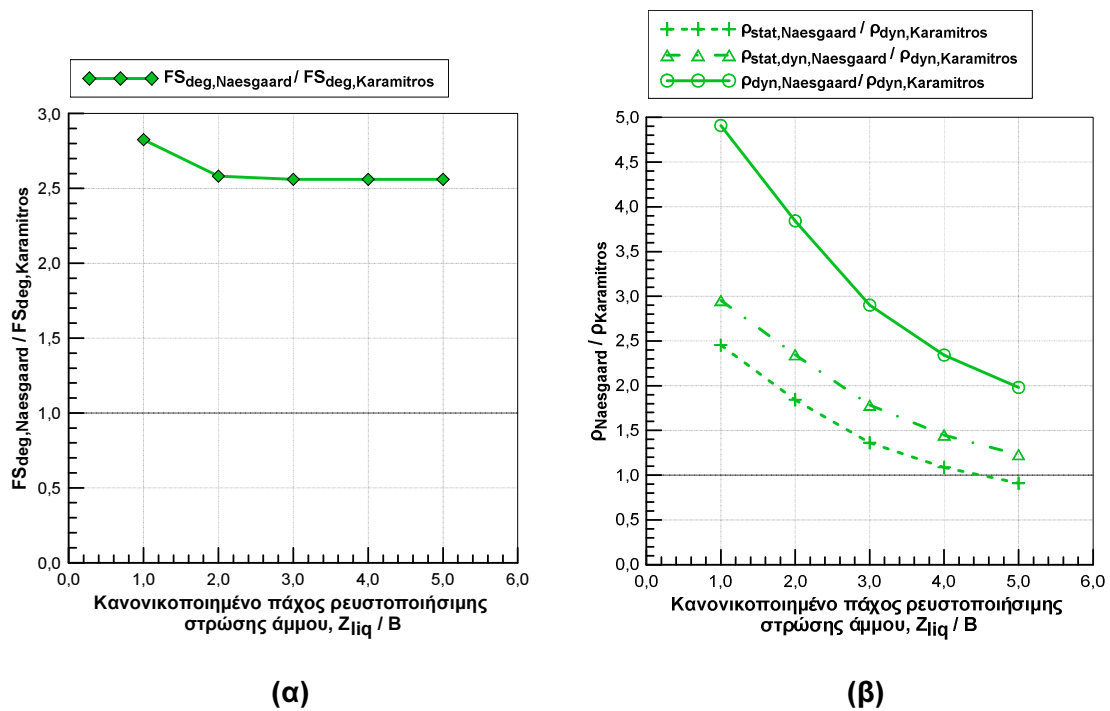
$Z_{liq} (m)$		3		6		9		12		15	
Z_{liq}/B		1		2		3		4		5	
Μέθοδος		Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)
Συντελεστής ασφαλείας, FS_{deg}		3.521	1.246	3.521	1.364	3.521	1.375	3.521	1.375	3.521	1.375
(X_s)		(0.949)		(0.671)		(0.548)		(0.475)		(0.425)	
Σεισμική καθίζηση, $\rho (m)$	Στατική ανάλυση, $\rho_{stat} (m)$	0.108		0.175		0.233		0.286		0.335	
	Δυναμική ανάλυση, $\rho_{dyn} (m)$	0.216	0.044	0.365	0.095	0.496	0.171	0.616	0.263	0.729	0.368
	Στατική και Δυναμική ανάλυση, $\rho_{stat,dyn} (m)$	0.130		0.223		0.305		0.381		0.453	



Σχήμα 5.6. Επίδραση του κανονικοποιημένου πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq}/B (για $B = 3m$), στις τιμές **(α)** του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

Πίνακας 5.8. Επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq} (Z_{liq}/B για $B = 3m$), στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

Z_{liq} (m)		3	6	9	12	15
Z_{liq}/B		1	2	3	4	5
Λόγος συντελεστών ασφαλείας, $FS_{deg,Naesgaard}/FS_{deg,Karamitros}$		2.83	2.58	2.56	2.56	2.56
Λόγος σεισμικών καθιζήσεων, $\rho_{Naesgaard}/\rho_{Karamitros}$	$\rho_{stat,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	2.45	1.84	1.36	1.09	0.91
	$\rho_{dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	4.91	3.84	2.90	2.34	1.98
	$\rho_{stat,dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	2.95	2.35	1.78	1.45	1.23



Σχήμα 5.7. Επίδραση του κανονικοποιημένου πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq}/B (για $B = 3m$), στις τιμές του λόγου **(α)** των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

5.2.4 Επίδραση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργιλικής στρώσης, c_u

Η επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης c_u στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8) και της σεισμικής καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α, 4.1β, 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις μεθόδους των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.9 και στο Σχήμα 5.8. Η επίδραση της c_u στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.10 και στο Σχήμα 5.9. Στην βασική περίπτωση η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης είναι $c_u = 38kPa$. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις για την επίδραση της c_u :

Μέθοδος Naesgaard et al. (1998):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης c_u συντελεί στην αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και στην μείωση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ .

Μέθοδος Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης c_u συντελεί στην αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και στην μείωση των τιμών της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} . Για την μικρότερη υπό διερεύνηση τιμή $c_u = 16kPa$ ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με $FS_{deg} = 0.922 < 1$ και η τιμή της σεισμικής καθίζησης λαμβάνει τιμή $\rho_{dyn} = 0.567m$.

Σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Όσον αφορά στην σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρείται, ότι οι τιμές του FS_{deg} προκύπτουν μεγαλύτερες με βάση την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) σε σχέση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), και συγκεκριμένα, για $c_u = 16$ έως $65kPa$, ο λόγος τους προκύπτει $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 3.34$ έως 2.19 , αντίστοιχα.

Επιπλέον, παρατηρείται, ότι η κλίση των καμπυλών που εκφράζουν τους συντελεστές ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$ παρουσιάζει πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων. Αυτό ερμηνεύεται λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} των δύο μεθόδων (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8). Ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} υπολογίζεται και στις δύο μεθόδους με βάση έναν σύνθετο μηχανισμό αστοχίας που συνίσταται από μια επιφάνεια διατμητικής αστοχίας εντός της αργιλικής στρώσης, η οποία διεισδύει εντός της βαθύτερης ρευστοποιημένης στρώσης άμμου. Οι δύο μέθοδοι υιοθετούν μια κοινή προσέγγιση όσον αφορά στην συνιστώσα του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της αργιλικής στρώσης, η οποία εκφράζεται με τον όρο $2c_u \frac{H_{crust}}{B}$, και στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} μεταβάλλεται συναρτήσει της c_u και η τιμή του όρου $2 \frac{H_{crust}}{B}$ είναι σταθερή.

Ωστόσο, οι δύο μέθοδοι διαφοροποιούνται όσον αφορά στην προσέγγιση υπολογισμού της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης λόγω της συνιστώσας του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της ρευστοποιημένης άμμου. Συγκεκριμένα, στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) η μειωμένη φέρουσα ικανότητα υπολογίστηκε, θέτοντας για την ρευστοποιημένη άμμο γωνία τριβής $\varphi = 0$ και συνοχή ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους ($c_u = \tau_{RES}$). Μια διαφορετική, περισσότερο σύνθετη μεθοδολογία, ακολουθήθηκε στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c). Σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε ένας "ενιαίος" λόγος υπερπίεσης πόρων $U = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,o}}$ που αναπτύσσεται σε όλη την ρευστοποιημένη στρώση, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε μετά, για να υπολογιστεί μια μειωμένη γωνία τριβής φ_{deg} για την ρευστοποιημένη άμμο, ως συνάρτηση της πραγματικής γωνίας τριβής φ . Οι όροι που εκφράζουν στις δύο μεθόδους την συνιστώσα του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της ρευστοποιημένης άμμου δεν εξαρτώνται από την c_u , της οποίας η τιμή μεταβάλλεται στην συγκεκριμένη περίπτωση.

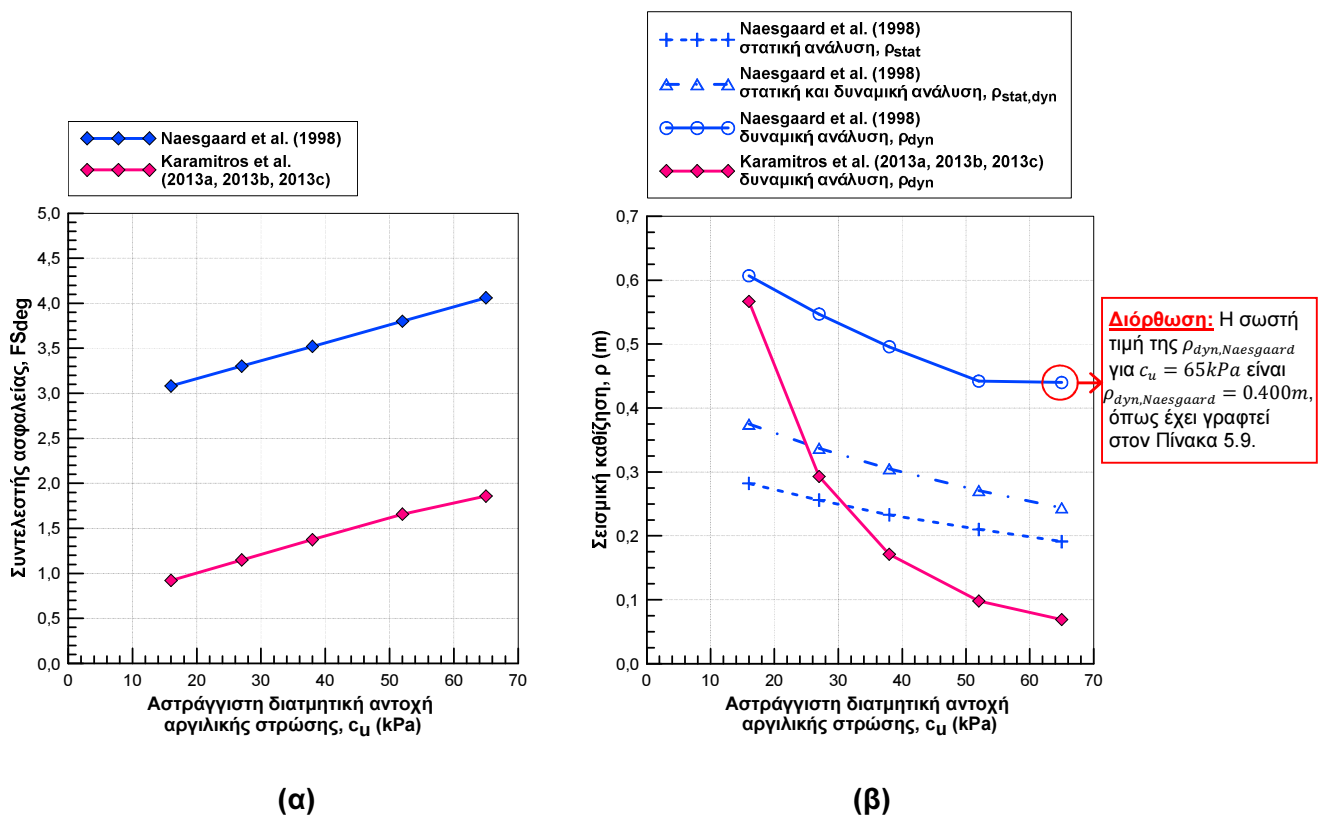
Όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, για την πλειονότητα των περιπτώσεων διερεύνησης της επίδρασης της c_u παρατηρείται, ότι η μείωση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) είναι πιο έντονη συγκριτικά με την μείωση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998) για την ίδια μεταβολή της τιμής της c_u , δηλαδή $\frac{\Delta \rho_{dyn,Karamitros}}{\Delta c_u} > \frac{\Delta \rho_{Naesgaard}}{\Delta c_u}$. Ισοδύναμα, για την πλειονότητα των περιπτώσεων διερεύνησης της επίδρασης της c_u , η καμπύλη

που εκφράζει την $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση από τις καμπύλες που εκφράζουν τις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$. Αυτή η έντονη διαφορά ωστόσο δεν παρατηρείται στην αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} για την ίδια μεταβολή της c_u μεταξύ των δύο μεθόδων, αντίθετα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κλίση των καμπυλών που εκφράζουν τους συντελεστές ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$ παρουσιάζει πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων. Η εντονότερη μείωση της $\rho_{dyn,Karamitros}$ σε σύγκριση με τις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ για την ίδια μεταβολή της τιμής της c_u παρατηρήθηκε και στην διερεύνηση της επίδρασης της παραμέτρου H_{crust}/B , και οφείλεται και για τις δύο παραμέτρους στον ίδιο λόγο. Ο λόγος που ερμηνεύει την παρατήρηση αυτή είναι, η μεγαλύτερη επίδραση του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} στην $\rho_{dyn,Karamitros}$ σε σύγκριση με τις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$, διότι σύμφωνα με την Εξ. 3.4 η $\rho_{dyn,Karamitros}$ εξαρτάται από τον όρο $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3$, ενώ σύμφωνα με τις Εξ. 4.1α, 4.1β και 4.1γ οι $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ εξαρτώνται από τους όρους $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.41}$, $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.51}$ και $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.55}$, αντίστοιχα.

Επιπλέον, όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρατηρείται, ότι σε όλο το εύρος τιμών της c_u η $\rho_{dyn,Naesgaard}$ είναι μεγαλύτερη από την $\rho_{dyn,Karamitros}$ και ο λόγος τους για $c_u = 16kPa$ έως $65kPa$ λαμβάνει τιμές στο εύρος $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 1.07$ έως 5.80 , αντίστοιχα. Συγκρίνοντας την $\rho_{stat,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρατηρείται, ότι για τιμές μικρότερες περίπου της $c_u \cong 31kPa$, η $\rho_{stat,Naesgaard}$ προκύπτει μικρότερη από την $\rho_{dyn,Karamitros}$, ενώ για τιμές μεγαλύτερες περίπου της $c_u \cong 31kPa$ συμβαίνει το αντίθετο. Για $c_u = 16kPa$ έως $65kPa$ ο λόγος των καθιζήσεων λαμβάνει τιμές στο εύρος $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.50$ έως 2.77 . Συγκρίνοντας την $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρατηρείται, ότι για τιμές μικρότερες περίπου της $c_u \cong 25kPa$, η $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ προκύπτει μικρότερη από την $\rho_{dyn,Karamitros}$, ενώ για τιμές μεγαλύτερες περίπου της $c_u \cong 25kPa$ συμβαίνει το αντίθετο. Για $c_u = 16kPa$ έως $65kPa$ ο λόγος των καθιζήσεων λαμβάνει τιμές στο εύρος $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.66$ έως 3.54 .

Πίνακας 5.9. Επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης c_u , στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

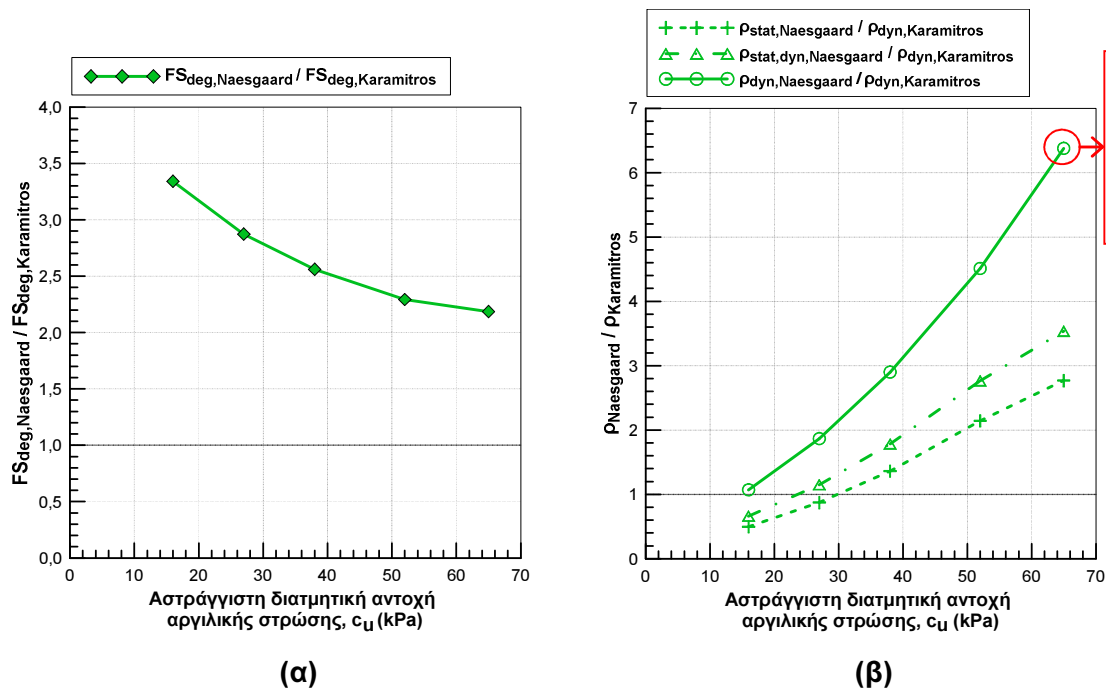
c_u (kPa)		16		27		38		52		65	
Μέθοδος		Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)
Συντελεστής ασφαλείας, FS_{deg}		3.081	0.922	3.301	1.149	3.521	1.375	3.801	1.658	4.061	1.858
(X_s)		(0.480)		(0.514)		(0.548)		(0.592)		(0.632)	
Σεισμική καθίζηση, ρ (m)	Στατική ανάλυση, ρ_{stat} (m)	0.282		0.256		0.233		0.210		0.191	
	Δυναμική ανάλυση, ρ_{dyn} (m)	0.607	0.567	0.547	0.293	0.496	0.171	0.442	0.098	0.400	0.069
	Στατική και Δυναμική ανάλυση, $\rho_{stat,dyn}$ (m)	0.375		0.337		0.305		0.271		0.244	



Σχήμα 5.8. Επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης c_u , στις τιμές **(α)** του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

Πίνακας 5.10. Επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης c_u , στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

c_u (kPa)		16	27	38	52	65
Λόγος συντελεστών ασφαλείας, $FS_{deg,Naesgaard}/FS_{deg,Karamitros}$		3.34	2.87	2.56	2.29	2.19
Λόγος σεισμικών καθιζήσεων, $\rho_{Naesgaard}/\rho_{Karamitros}$	$\rho_{stat,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	0.50	0.87	1.36	2.14	2.77
	$\rho_{dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	1.07	1.87	2.90	4.51	5.80
	$\rho_{stat,dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	0.66	1.15	1.78	2.77	3.54



Σχήμα 5.9. Επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης c_u , στις τιμές του λόγου **(α)** των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

5.2.5 Επίδραση αρχικής σχετικής πυκνότητας ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, D_r

Η επίδραση της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8) και της σεισμικής καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α, 4.1β, 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις μεθόδους των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.11 και στο Σχήμα 5.10. Η επίδραση της D_r στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.12 και στο Σχήμα 5.11. Στην βασική περίπτωση η τιμή της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου είναι $D_r = 60\%$. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις για την επίδραση της D_r :

Μέθοδος Naesgaard et al. (1998):

Η επίδραση της D_r στον υπολογισμό των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ με βάση την μέθοδο αυτή, εντοπίζεται στον υπολογισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής τ_{RES} και της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{lim} της ρευστοποιημένης στρώσης άμμου. Στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, η τ_{RES} υπολογίστηκε με βάση την Εξ. 4.3, και η γ_{lim} υπολογίστηκε με βάση την Εξ. 4.4. Επιπλέον, στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, οι τιμές του διορθωμένου αριθμού κρούσεων SPT, $(N_1)_{60}$ υπολογίστηκαν συναρτήσει της D_r με βάση την Εξ. 5.4.

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση της D_r συντελεί σε έντονη αύξηση των τιμών του FS_{deg} , και συγκεκριμένα, για αύξηση της D_r από 40% έως 80%, ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} αυξάνεται από 1.255 έως 9.235, αντίστοιχα. Επιπλέον, παρατηρείται, ότι η αύξηση της D_r συντελεί σε έντονη μείωση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ . Συγκεκριμένα, για $D_r = 40\%$ η προβλεπόμενη καθίζηση ρ λαμβάνει τιμές $\rho_{dyn,Naesgaard} = 4.366m$, $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} = 2.843m$, $\rho_{stat,Naesgaard} = 1.780m$, και για $D_r = 80\%$ οι τιμές της καθίζησης και των τριών αναλύσεων (στατική, δυναμική, και στατική-δυναμική ανάλυση) είναι μικρότερες από 10cm.

Μέθοδος Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Η επίδραση της D_r στον υπολογισμό των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} με βάση την μέθοδο αυτή, εκφράζεται μέσω της αρχικής γωνίας τριβής της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου φ . Στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, οι τιμές της αρχικής γωνίας τριβής της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου φ υπολογίστηκαν με βάση την Εξ. 5.6 και οι τιμές του διορθωμένου αριθμού κρούσεων SPT, $(N_1)_{60}$ υπολογίστηκαν συναρτήσει της D_r με βάση την Εξ. 5.4.

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση της D_r συντελεί σε αύξηση των τιμών του FS_{deg} , η οποία ωστόσο δεν είναι αξιόλογη. Επιπλέον, παρατηρείται, ότι η αύξηση της D_r συντελεί σε μείωση των τιμών της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} , και συγκεκριμένα, για αύξηση της D_r από 40% έως 80%, η σεισμική καθίζηση ρ_{dyn} μειώνεται από 0.239m έως 0.115m, αντίστοιχα.

Σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

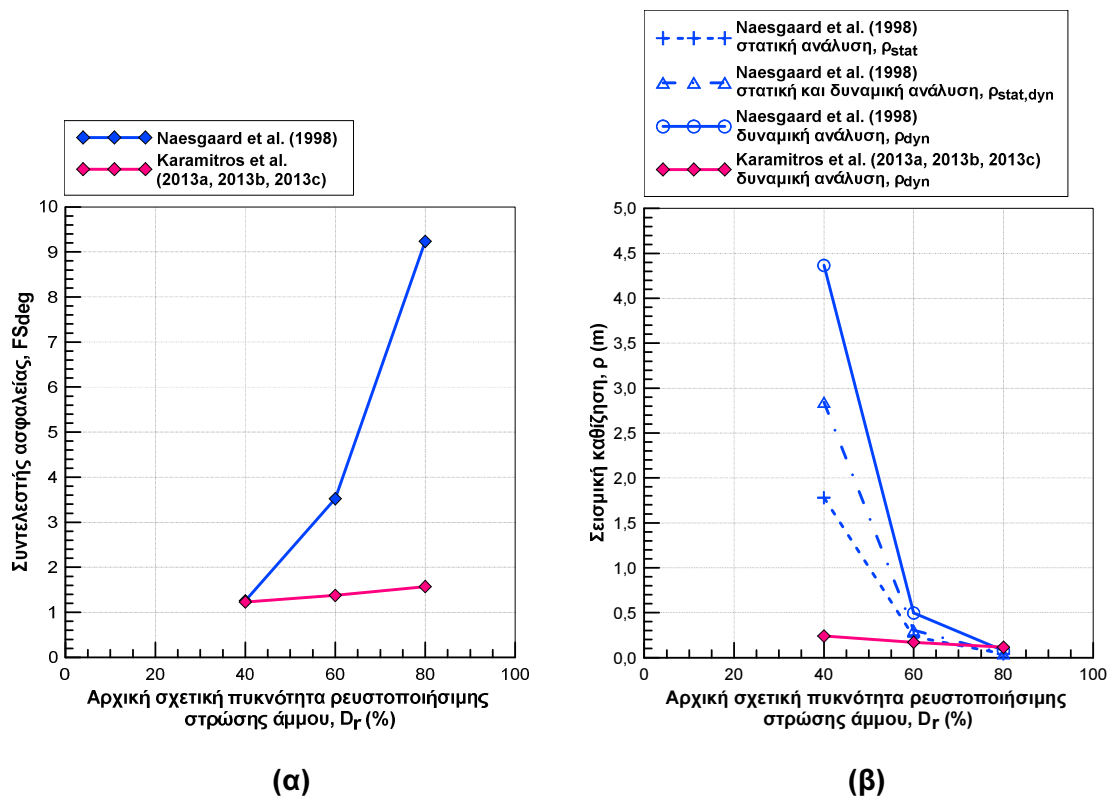
Όσον αφορά στην σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων, παρατηρείται, ότι για $D_r = 40\%$ παρουσιάζουν πολύ μικρή διαφορά, και συγκεκριμένα, λαμβάνουν τιμές $FS_{deg,Naesgaard} = 1.255$ και $FS_{deg,Karamitros} = 1.231$. Για αύξηση της D_r από 40% έως 80%, η αύξηση των τιμών του $FS_{deg,Naesgaard}$ είναι πιο έντονη σε σύγκριση με την αύξηση των τιμών του $FS_{deg,Karamitros}$, και συνεπώς, ο λόγος των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} των δύο μεθόδων αυξάνεται έντονα με την αύξηση της D_r . Για $D_r = 80\%$ ο λόγος των συντελεστών ασφαλείας λαμβάνει τιμή $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 5.88$.

Όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρατηρείται, ότι για αύξηση της D_r από 40% έως 80% η μείωση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998) είναι πιο έντονη σε σύγκριση με την μείωση των τιμών της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$, και συνεπώς, ο λόγος των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ των δύο μεθόδων μειώνεται έντονα με την αύξηση της D_r . Για $D_r = 40\%$ και 60% οι τιμές των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$, ενώ για $D_r = 80\%$ συμβαίνει το αντίθετο. Για $D_r = 40\%$ ο λόγος των καθιζήσεων λαμβάνει τιμή

$\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 7.45$ και $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 18.27$. Για $D_r = 80\%$ ο λόγος των καθιζήσεων λαμβάνει τιμή $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.36$ και $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.67$.

Πίνακας 5.11. Επίδραση της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r , στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

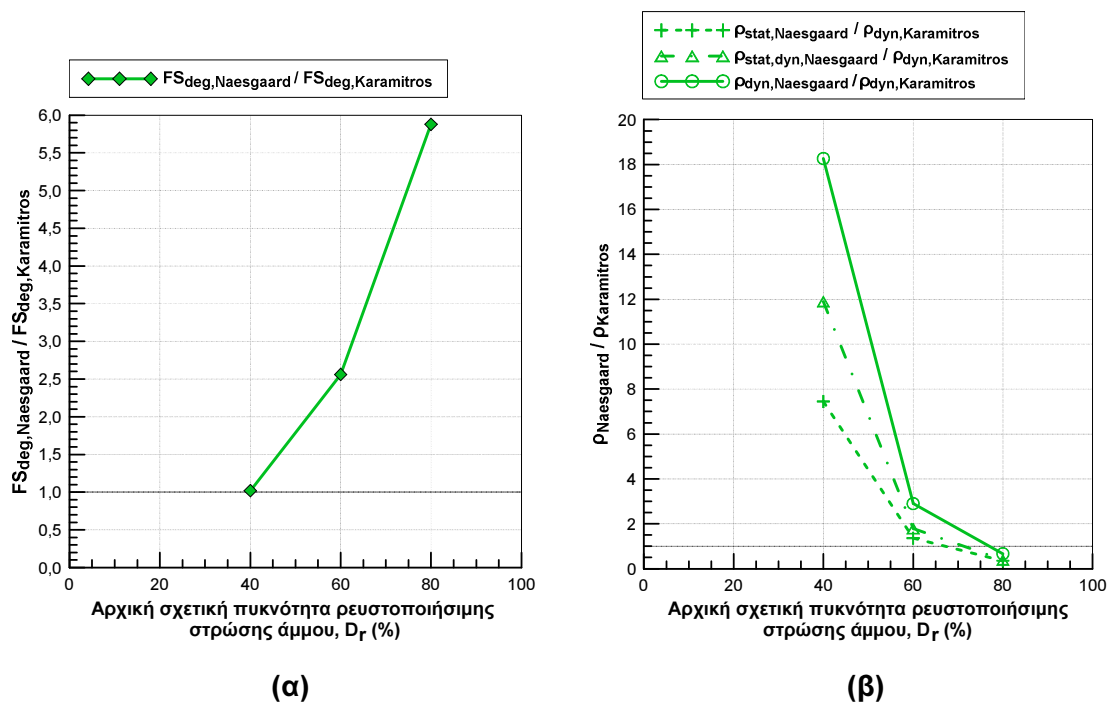
D_r (%)		40		60		80	
Μέθοδος		Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)
Συντελεστής ασφαλείας, FS_{deg}		1.255	1.231	3.521	1.375	9.235	1.571
(X_s)		(0.130)		(0.548)		(1.878)	
Σεισμική καθίζηση, ρ (m)	Στατική ανάλυση, $\rho_{stat}(m)$	1.780		0.233		0.041	
	Δυναμική ανάλυση, $\rho_{dyn}(m)$	4.366	0.239	0.496	0.171	0.077	0.115
	Στατική και Δυναμική ανάλυση, $\rho_{stat,dyn}(m)$	2.843		0.305		0.045	



Σχήμα 5.10. Επίδραση της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r , στις τιμές **(α)** του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

Πίνακας 5.12. Επίδραση της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r , στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

D_r (%)		40	60	80
Λόγος συντελεστών ασφαλείας, $FS_{deg,Naesgaard}/FS_{deg,Karamitros}$		1.02	2.56	5.88
Λόγος σεισμικών καθιζήσεων, $\rho_{Naesgaard}/\rho_{Karamitros}$	$\rho_{stat,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	7.45	1.36	0.36
	$\rho_{dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	18.27	2.90	0.67
	$\rho_{stat,dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	11.90	1.78	0.39



Σχήμα 5.11. Επίδραση της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r , στις τιμές του λόγου (α) των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και (β) των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

5.2.6 Επίδραση μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης, q

Η επίδραση της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1 και Εξ. 3.8) και της σεισμικής καθίζησης ρ (Εξ. 4.1α, 4.1β, 4.1γ και Εξ. 3.4) που προκύπτουν από τις μεθόδους των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.13 και στο Σχήμα 5.12. Η επίδραση της q στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.14 και στο Σχήμα 5.13. Στην βασική περίπτωση η τιμή της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης είναι $q = 100kPa$. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις για την επίδραση της q :

Μέθοδος Naesgaard et al. (1998):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση της q από 50kPa έως 250kPa επιφέρει έντονη μείωση του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} από 7.042 έως 1.408 αντίστοιχα, και έντονη αύξηση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ , η οποία για την δυναμική ανάλυση λαμβάνει τιμές από 0.134m έως 2.796m αντίστοιχα. Η σημαντική αύξηση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ με την αύξηση των τιμών της q , οφείλεται στην έντονη μείωση των τιμών του FS_{deg} και στην παρουσία του όρου $Q_s^{1/4}$ στον υπολογισμό του συντελεστή X_s (Εξ. 2.2).

Μέθοδος Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή, παρατηρείται, ότι η αύξηση της q επιφέρει μείωση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και αύξηση των τιμών της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} . Για τιμές της $q > 150kPa$ ο συντελεστής ασφαλείας λαμβάνει τιμές $FS_{deg} < 1$, και για $q = 250kPa$ η σεισμική καθίζηση λαμβάνει τιμή $\rho_{dyn} = 1.225m$.

Οι τιμές της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ εξαρτώνται από τον όρο $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3 = \left(\frac{q}{q_{ult,deg}}\right)^3$ και συνεπώς, η επίδραση της q είναι πολύ σημαντική στον υπολογισμό της $\rho_{dyn,Karamitros}$. Εξίσου σημαντική είναι η επίδραση της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$ στον υπολογισμό της $\rho_{dyn,Karamitros}$. Επισημαίνεται, ότι η μέση τάση έδρασης θεμελίωσης q συμβάλλει στην αύξηση της $q_{ult,deg}$, διότι η μέση τάση έδρασης που εφαρμόζεται

και η αύξηση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} που οδηγεί σε διαστολική συμπεριφορά του εδάφους λόγω διάτμησης, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων στην περιοχή κάτω από την θεμελίωση, αυξάνοντας έτσι την $q_{ult,deg}$. Η συμβολή της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q στην αύξηση της $q_{ult,deg}$ περιορίζει την εντονότερη μείωση των τιμών του FS_{deg} και την εντονότερη αύξηση των τιμών της $\rho_{dyn,Karamitros}$ με την αύξηση της q .

Σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c):

Όσον αφορά στην σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρείται, ότι σε όλο το εύρος των υπό διερεύνηση τιμών της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q , οι τιμές του $FS_{deg,Naesgaard}$ είναι μεγαλύτερες από τις τιμές του $FS_{deg,Karamitros}$. Επιπλέον, παρατηρείται, ότι για αύξηση της q από 50kPa έως 250kPa, η μείωση των τιμών του $FS_{deg,Naesgaard}$ είναι πιο έντονη από την μείωση των τιμών του $FS_{deg,Karamitros}$, και συνεπώς, η τιμή του λόγου των FS_{deg} των δύο μεθόδων μειώνεται με την αύξηση της q . Για αύξηση της q από 50kPa έως 250kPa, ο λόγος των FS_{deg} των δύο μεθόδων λαμβάνει τιμές από 3.30 έως 1.97, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην σύγκριση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων παρατηρείται, ότι σε όλο το εύρος των υπό διερεύνηση τιμών της q , οι καθιζήσεις $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές από την σεισμική καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$. Για αύξηση της q από 50kPa έως 250kPa, ο λόγος των καθιζήσεων $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ λαμβάνει τιμές από 2.91 έως 2.28, αντίστοιχα.

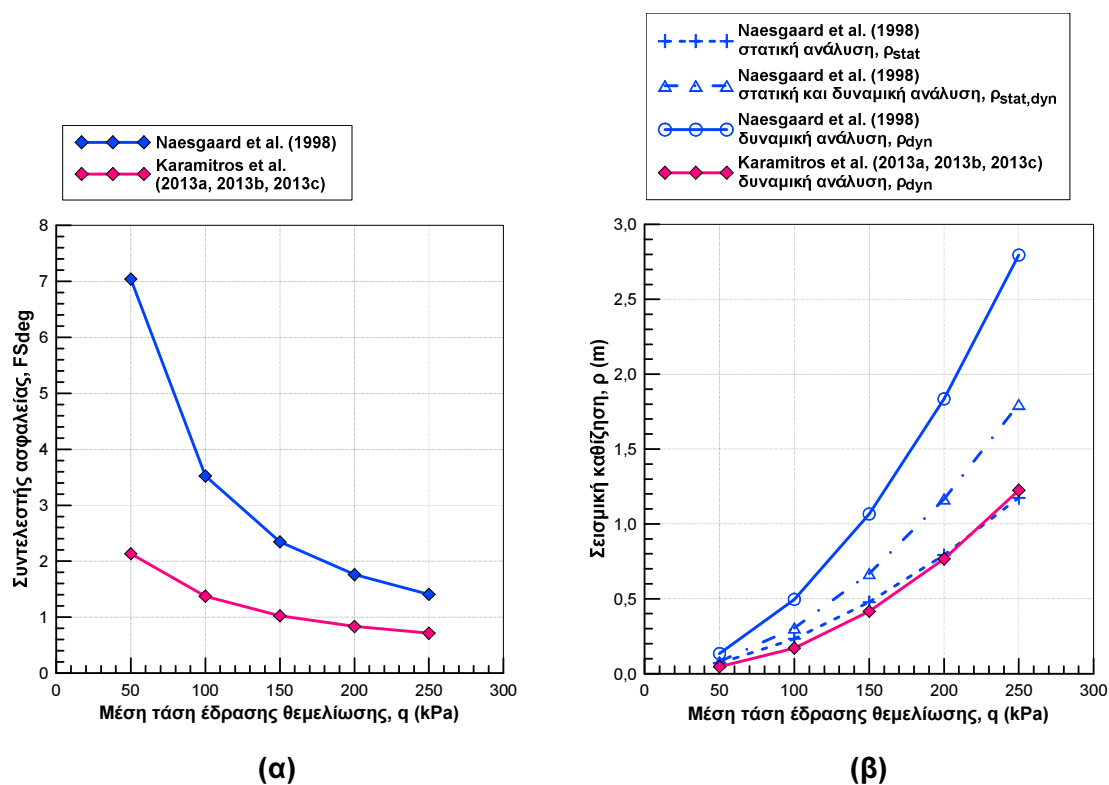
Συγκρίνοντας τις καθιζήσεις $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρατηρείται, ότι για τιμές της q από 50kPa έως περίπου 220kPa, η πρώτη λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από την δεύτερη, ενώ για τιμές της q μεγαλύτερες περίπου από 220kPa συμβαίνει το αντίθετο. Για $q = 50kPa$ και $200kPa$, οι τιμές των $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ παρουσιάζουν την μικρότερη διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες υπό διερεύνηση τιμές της q , η οποία είναι 2.3cm και 2.6cm, αντίστοιχα. Για αύξηση της q από 50kPa έως 250kPa, ο λόγος των καθιζήσεων $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ λαμβάνει τιμές από 1.50 έως 0.96.

Επισημαίνεται, ότι στην μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) η μέση τάση έδρασης θεμελίωσης q συμβάλλει στην αύξηση της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$, όπως

αναφέρθηκε παραπάνω, το οποίο περιορίζει την εντονότερη μείωση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας $FS_{deg,Karamitros}$ και την εντονότερη αύξηση των τιμών της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ με την αύξηση της q .

Πίνακας 5.13. Επίδραση της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q , στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

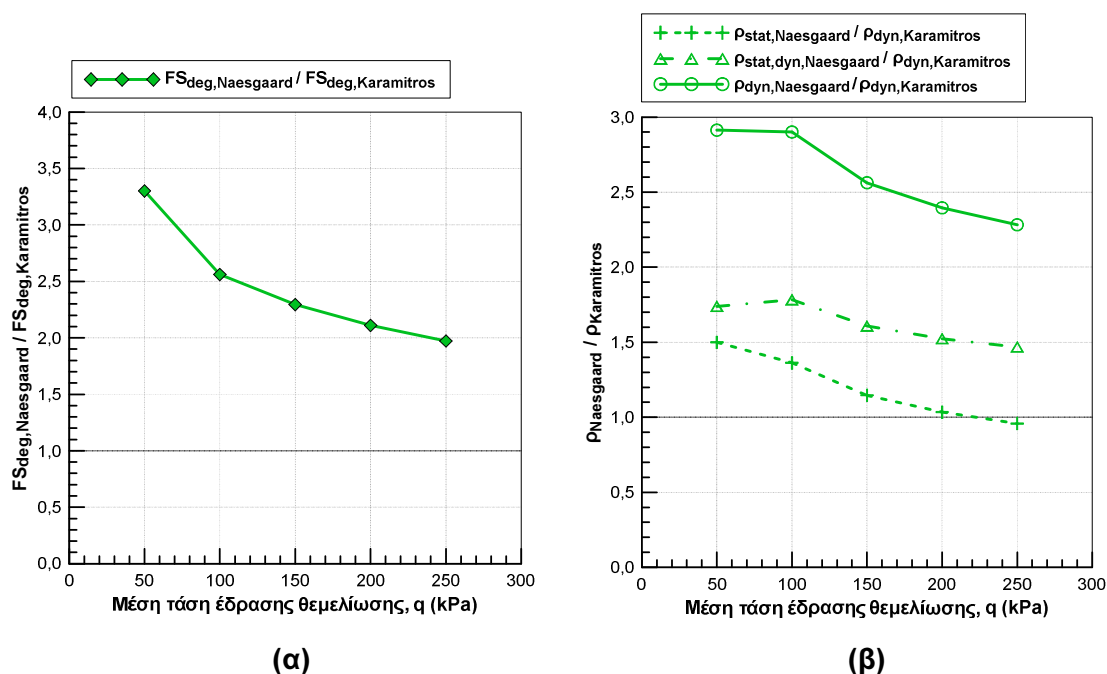
q (kPa)		50		100		150		200		250	
Μέθοδος		Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)	Naesgaard et al. (1998)	Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c)
Συντελεστής ασφαλείας, FS_{deg}		7.042	2.133	3.521	1.375	2.347	1.023	1.760	0.834	1.408	0.714
(X_s)		(1.304)		(0.548)		(0.330)		(0.230)		(0.174)	
Σεισμική καθίζηση, ρ (m)	Στατική ανάλυση, ρ_{stat} (m)	0.069		0.233		0.477		0.792		1.174	
	Δυναμική ανάλυση, ρ_{dyn} (m)	0.134	0.046	0.496	0.171	1.066	0.416	1.835	0.766	2.796	1.225
	Στατική και Δυναμική ανάλυση, $\rho_{stat,dyn}$ (m)	0.080		0.305		0.669		1.167		1.799	



Σχήμα 5.12. Επίδραση της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q , στις τιμές **(α)** του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** της σεισμικής καθίζησης ρ που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους

Πίνακας 5.14. Επίδραση της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q , στις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

q (kPa)		50	100	150	200	250
Λόγος συντελεστών ασφαλείας, $FS_{deg,Naesgaard}/FS_{deg,Karamitros}$		3.30	2.56	2.29	2.11	1.97
Λόγος σεισμικών καθιζήσεων, $\rho_{Naesgaard}/\rho_{Karamitros}$	$\rho_{stat,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	1.50	1.36	1.15	1.03	0.96
	$\rho_{dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	2.91	2.90	2.56	2.40	2.28
	$\rho_{stat,dyn,Naesgaard}/\rho_{dyn,Karamitros}$	1.74	1.78	1.61	1.52	1.47



Σχήμα 5.13. Επίδραση της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q , στις τιμές του λόγου **(α)** των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και **(β)** των σεισμικών καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων

5.3 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

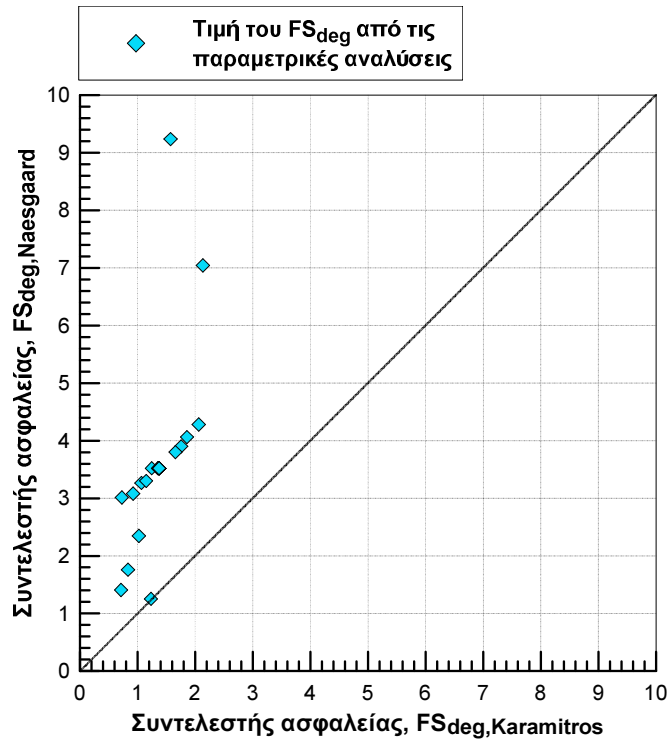
Στο υποκεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η συνολική σύγκριση των μεθόδων Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων, τα οποία παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 5.2. Συγκεκριμένα, με βάση τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων, δημιουργούνται γραφήματα σύγκρισης του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των δύο μεθόδων ($FS_{deg,Naesgaard} - FS_{deg,Karamitros}$), και γραφήματα σύγκρισης της προβλεπόμενης καθίζησης ($\rho_{stat,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$, $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} - \rho_{dyn,Karamitros}$). Με βάση τα γραφήματα αυτά, εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν στην συνολική σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων.

Επιπλέον, για καλύτερη εμποπτεία, ορίζονται τρεις περιοχές σύγκρισης των τιμών του λόγου των συντελεστών ασφαλείας FS_{deg} και των καθιζήσεων ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, οι οποίες είναι:

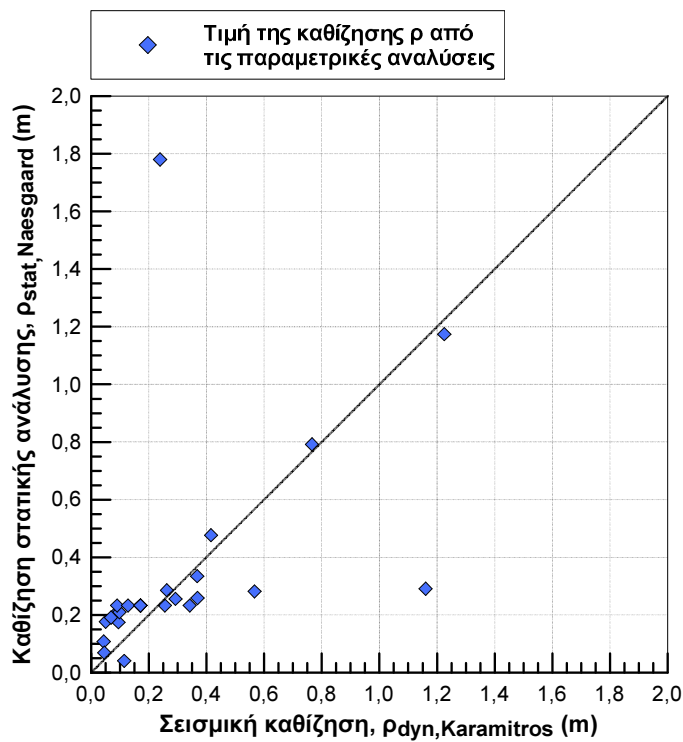
- i. $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} \geq 2.0$ ή $\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} \geq 2.0$: η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά τον FS_{deg} ή την ρ σε σύγκριση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c),
- ii. $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$ ή $\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} = 0.5 - 2.0$: επιτυγχάνεται καλή συμφωνία των τιμών του FS_{deg} ή της ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, και
- iii. $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} \leq 0.5$ ή $\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} \leq 0.5$: η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υποεκτιμά τον FS_{deg} ή την ρ σε σύγκριση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c),

και καταγράφεται το ποσοστό των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται σε αυτές τις τρεις περιοχές σύγκρισης, και οι τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια των περιοχών σύγκρισης.

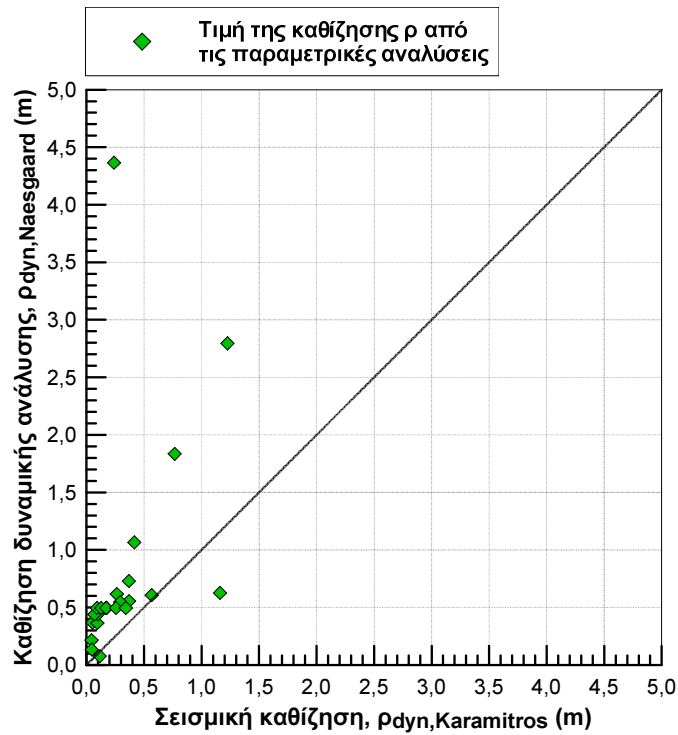
Η συνολική σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων, με βάση τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων, παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.14, 5.15, 5.16 και 5.17.



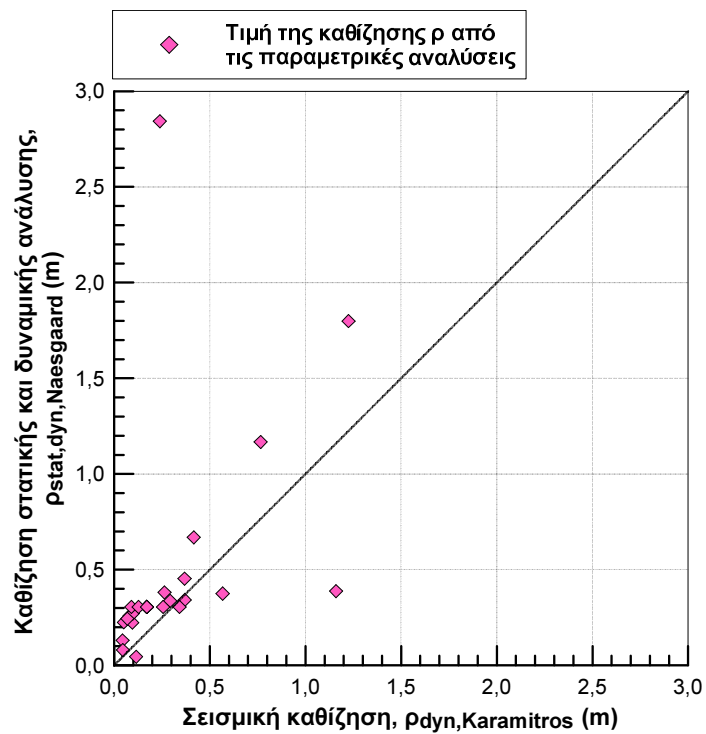
Σχήμα 5.14. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$



Σχήμα 5.15. Σύγκριση της καθίζησης στατικής ανάλυσης $\rho_{stat,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$



Σχήμα 5.16. Σύγκριση της καθίζησης δυναμικής ανάλυσης $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$



Σχήμα 5.17. Σύγκριση της καθίζησης στατικής και δυναμικής ανάλυσης $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$

Με βάση τα Σχήματα 5.14, 5.15, 5.16 και 5.17, γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις και εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν στην συνολική σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και της προβλεπόμενης καθίζησης ρ μεταξύ των δύο μεθόδων:

Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$

Η σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$ με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14.

Από το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων παρατηρείται, ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ είναι μεγαλύτερες από τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας $FS_{deg,Karamitros}$. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 1.255 (προκύπτει για $D_r = 40\%$) έως 9.235 (προκύπτει για $D_r = 80\%$). Για την πλειονότητα των παραμετρικών αναλύσεων οι τιμές του $FS_{deg,Naesgaard}$ προκύπτουν στο εύρος από 3.014 έως 4.281. Ο συντελεστής ασφαλείας $FS_{deg,Karamitros}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 0.727 (προκύπτει για $H_{crust} = 1m$ [$H_{crust}/B = 0.33$]) έως 2.133 (προκύπτει για $q = 50kPa$).

Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$ προκύπτει για $D_r = 80\%$, όπου ο συντελεστής ασφαλείας λαμβάνει τιμές ($FS_{deg,Naesgaard} = 9.235$, $FS_{deg,Karamitros} = 1.571$) και ο λόγος ισούται με $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 5.88$. Η μικρότερη τιμή του λόγου προκύπτει για $D_r = 40\%$, όπου ο συντελεστής ασφαλείας λαμβάνει τιμές ($FS_{deg,Naesgaard} = 1.255$, $FS_{deg,Karamitros} = 1.231$) και ο λόγος ισούται με $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 1.02$. Επιπρόσθετα στα παραπάνω, στο Σχήμα 5.14 εντοπίζεται ένα σημείο με υψηλή τιμή του $FS_{deg,Naesgaard} = 7.042$, το οποίο προκύπτει για $q = 50kPa$.

Στον Πίνακα 5.15 καταγράφεται το ποσοστό των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης που ορίστηκαν για τις τιμές του λόγου των συντελεστών ασφαλείας $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$, και οι τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$.

Πίνακας 5.15. Ποσοστό αποτελεσμάτων παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης των τιμών του λόγου των συντελεστών ασφαλείας $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$, και τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$

Όρια λόγου συντελεστών ασφαλείας, $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$		$\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} \geq 2.0$ [Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά τον FS_{deg} σε σύγκριση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]	$\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$ [Επιτυγχάνεται καλή συμφωνία των τιμών του FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων.]	$\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} \leq 0.5$ [Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υποεκτιμά τον FS_{deg} σε σύγκριση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]
Ποσοστό αποτελεσμάτων που ικανοποιούν τα όρια του λόγου $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$		96% (27/28)	4% (1/28)	0% (0/28)
Τιμές υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}}$	α_{max} (g)	0.10g έως 0.40g	—	—
	H_{crust} (m) (H_{crust}/B)	1m έως 6m (0.33 έως 2)	—	—
	Z_{liq} (m) (Z_{liq}/B)	3m έως 15m (1 έως 5)	—	—
	c_u (kPa)	16kPa έως 65kPa	—	—
	D_r (%)	60% και 80%	40%	—
	q (kPa)	50kPa έως 250kPa	—	—

Σύγκριση της καθίζησης στατικής ανάλυσης $\rho_{stat,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$. Η σύγκριση της καθίζησης στατικής ανάλυσης $\rho_{stat,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.15.

Επισημαίνεται, ότι στην βασική περίπτωση των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης έλαβαν τις τιμές $\alpha_{max} = 0.20g$, $T = 0.35sec$ και $N = 10$. Επομένως, στο Σχήμα 5.15 η σύγκριση γίνεται μεταξύ των τιμών της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ οι οποίες υπολογίστηκαν για τις ανωτέρω τιμές των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην βασική περίπτωση, και των τιμών της καθίζησης στατικής ανάλυσης $\rho_{stat,Naesgaard}$ οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης.

Στο Σχήμα 5.15 παρατηρείται, ότι για την πλειονότητα των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{stat,Naesgaard} > \rho_{dyn,Karamitros}$, και για τα υπόλοιπα δεδομένα ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{stat,Naesgaard} < \rho_{dyn,Karamitros}$. Η καθίζηση $\rho_{stat,Naesgaard}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 0.041m (προκύπτει για $D_r = 80\%$) έως 1.780m (προκύπτει για $D_r = 40\%$). Για την πλειονότητα των παραμετρικών αναλύσεων οι τιμές της $\rho_{stat,Naesgaard}$ προκύπτουν στο εύρος από 0.175m έως 0.335m. Η καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 0.044m (προκύπτει για $Z_{liq} = 3m$ [$Z_{liq}/B = 1$]) έως 1.225m (προκύπτει για $q = 250kPa$). Για την πλειονότητα των παραμετρικών αναλύσεων οι τιμές της $\rho_{dyn,Karamitros}$ προκύπτουν στο εύρος από 0.044m έως 0.416m.

Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ προκύπτει για $D_r = 40\%$, όπου η καθίζηση λαμβάνει τιμές ($\rho_{stat,Naesgaard} = 1.780m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 0.239m$) και ο λόγος ισούται με $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 7.45$. Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου $\frac{\rho_{dyn,Karamitros}}{\rho_{stat,Naesgaard}}$ προκύπτει για $H_{crust} = 1m$ ($H_{crust}/B = 0.33$), όπου η καθίζηση λαμβάνει τιμές ($\rho_{stat,Naesgaard} = 0.291m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 1.160m$) και ο λόγος ισούται με $\frac{\rho_{dyn,Karamitros}}{\rho_{stat,Naesgaard}} = 3.99$. Ο λόγος $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος $0.87 \leq \frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \leq 1.09$ για τις περιπτώσεις όπου καθεμία από τις υπό μελέτη παραμέτρους λαμβάνει τιμή $\alpha_{max} = 0.30g$, $Z_{liq} = 12m$ ($Z_{liq}/B = 4$), $Z_{liq} = 15m$ ($Z_{liq}/B = 5$), $c_u = 27kPa$, $q = 200kPa$, $q = 250kPa$, και οι υπόλοιπες παράμετροι λαμβάνουν τις τιμές της βασικής περίπτωσης.

Στον Πίνακα 5.16 καταγράφεται το ποσοστό των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης που ορίστηκαν για τις τιμές του λόγου των καθιζήσεων $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$, και οι τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$.

Πίνακας 5.16. Ποσοστό αποτελεσμάτων παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης των τιμών του λόγου των καθιζήσεων $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$, και τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$

Όρια λόγου καθιζήσεων, $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$		$\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \geq 2.0$	$\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$	$\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \leq 0.5$
		[Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά την ρ_{stat} , σε σύγκριση με την ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]	[Επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$.]	[Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υποεκτιμά την ρ_{stat} , σε σύγκριση με την ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]
Ποσοστό αποτελεσμάτων που ικανοποιούν τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$		25% (7/28)	64% (18/28)	11% (3/28)
Τιμές υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$	$\alpha_{max} (g)$	0.10g	0.15g έως 0.40g	—
	$H_{crust} (m)$ (H_{crust}/B)	4.5m και 6m (1.5 και 2)	2m και 3m (0.67 και 1)	1m (0.33)
	$Z_{liq} (m)$ (Z_{liq}/B)	3m (1)	6m έως 15m (2 έως 5)	—
	$c_u (kPa)$	52kPa και 65kPa	27kPa και 38kPa	16kPa
	$D_r (%)$	40%	60%	80%
	$q (kPa)$	—	50kPa έως 250kPa	—

Σύγκριση της καθίζησης δυναμικής ανάλυσης $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$. Η σύγκριση της καθίζησης δυναμικής ανάλυσης $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.16.

Επισημαίνεται, ότι στην βασική περίπτωση των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης έλαβαν τις τιμές $\alpha_{max} = 0.20g$, $T = 0.35sec$ και $N = 10$. Η επιλογή της τιμής $\alpha_{max} = 0.20g$ έγινε, διότι είναι η τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης της εισαγόμενης διέγερσης στις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998). Επομένως, στο Σχήμα 5.16 η σύγκριση γίνεται μεταξύ των τιμών της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ οι οποίες υπολογίστηκαν για τις ανωτέρω τιμές των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην βασική περίπτωση, και των τιμών της καθίζησης δυναμικής ανάλυσης $\rho_{dyn,Naesgaard}$ οι οποίες προέκυψαν για $\alpha_{max} = 0.20g$.

Στο Σχήμα 5.16 παρατηρείται, ότι για το σύνολο των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων εκτός από δύο περιπτώσεις, ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{dyn,Naesgaard} > \rho_{dyn,Karamitros}$. Οι δύο περιπτώσεις για τις οποίες ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{dyn,Karamitros} > \rho_{dyn,Naesgaard}$ αντιστοιχούν στις τιμές των παραμέτρων $H_{crust} = 1m$ ($H_{crust}/B = 0.33$) και $D_r = 80\%$. Επιπλέον, στο Σχήμα 5.16 παρατηρείται, ότι η καθίζηση $\rho_{dyn,Naesgaard}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 0.077m (προκύπτει για $D_r = 80\%$) έως 4.366m (προκύπτει για $D_r = 40\%$). Για την πλειονότητα των παραμετρικών αναλύσεων οι τιμές της $\rho_{dyn,Naesgaard}$ προκύπτουν στο εύρος από 0.365m έως 0.627m. Η καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 0.044m (προκύπτει για $Z_{liq} = 3m$ [$Z_{liq}/B = 1$]) έως 1.225m (προκύπτει για $q = 250kPa$). Για την πλειονότητα των παραμετρικών αναλύσεων οι τιμές της $\rho_{dyn,Karamitros}$ προκύπτουν στο εύρος από 0.044m έως 0.416m.

Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ προκύπτει για $D_r = 40\%$, όπου η καθίζηση λαμβάνει τιμές ($\rho_{dyn,Naesgaard} = 4.366m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 0.239m$) και ο λόγος ισούται με $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 18.27$. Ο λόγος $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ ισούται με $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 1.07$ για $c_u = 16kPa$, όπου η καθίζηση λαμβάνει τιμές ($\rho_{dyn,Naesgaard} = 0.607m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 0.567m$). Επιπρόσθετα στα παραπάνω, στο Σχήμα 5.16 εντοπίζεται ένα σημείο με υψηλές τιμές καθίζησης για τις δύο μεθόδους ($\rho_{dyn,Naesgaard} = 1.835m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 0.766m$), το οποίο προκύπτει για $q = 200kPa$.

Στον Πίνακα 5.17 καταγράφεται το ποσοστό των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης που ορίστηκαν για τις τιμές του λόγου των καθιζήσεων $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$, και οι τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$.

Πίνακας 5.17. Ποσοστό αποτελεσμάτων παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης των τιμών του λόγου των καθιζήσεων $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$, και τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$

Όρια λόγου καθιζήσεων, $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$		$\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \geq 2.0$	$\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$	$\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \leq 0.5$
		[Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά την ρ_{dyn} , σε σύγκριση με την ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]	[Επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$.]	[Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υποεκτιμά την ρ_{dyn} , σε σύγκριση με την ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]
Ποσοστό αποτελεσμάτων που ικανοποιούν τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$		75% (21/28)	25% (7/28)	0% (0/28)
Τιμές υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$	α_{max} (g)	0.10g έως 0.20g	0.30g και 0.40g	—
	H_{crust} (m) (H_{crust}/B)	3m έως 6m (1 έως 2)	1m και 2m (0.33 και 0.67)	—
	Z_{liq} (m) (Z_{liq}/B)	3m έως 15m (1 έως 5)	—	—
	c_u (kPa)	38kPa έως 65kPa	16kPa και 27kPa	—
	D_r (%)	40% και 60%	80%	—
	q (kPa)	50kPa έως 250kPa	—	—

Σύγκριση της καθίζησης στατικής και δυναμικής ανάλυσης $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$. Η σύγκριση της καθίζησης στατικής και δυναμικής ανάλυσης $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$ με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.17. Όσον αφορά στις τιμές των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης α_{max} , T , N για τις οποίες γίνεται σύγκριση των καθιζήσεων $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ στο Σχήμα 5.17, ισχύουν τα ίδια που αναφέρθηκαν παραπάνω για την σύγκριση των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$.

Στο Σχήμα 5.17 παρατηρείται, ότι για την πλειονότητα των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} > \rho_{dyn,Karamitros}$, και για τα υπόλοιπα δεδομένα ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} < \rho_{dyn,Karamitros}$. Η καθίζηση $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 0.045m (προκύπτει για $D_r = 80\%$) έως 2.843m (προκύπτει για $D_r = 40\%$). Για την πλειονότητα των παραμετρικών αναλύσεων οι τιμές της $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ προκύπτουν στο εύρος από 0.223m έως 0.453m. Η καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος από 0.044m (προκύπτει για $Z_{liq} = 3m$ [$Z_{liq}/B = 1$]) έως 1.225m (προκύπτει για $q = 250kPa$). Για την πλειονότητα των παραμετρικών αναλύσεων οι τιμές της $\rho_{dyn,Karamitros}$ προκύπτουν στο εύρος από 0.044m έως 0.416m.

Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ προκύπτει για $D_r = 40\%$, όπου η καθίζηση λαμβάνει τιμές ($\rho_{stat,dyn,Naesgaard} = 2.843m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 0.239m$) και ο λόγος ισούται με $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 11.90$. Η μεγαλύτερη τιμή του λόγου $\frac{\rho_{dyn,Karamitros}}{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}$ προκύπτει για $H_{crust} = 1m$ ($H_{crust}/B = 0.33$), όπου η καθίζηση λαμβάνει τιμές ($\rho_{stat,dyn,Naesgaard} = 0.388m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 1.160m$) και ο λόγος ισούται με $\frac{\rho_{dyn,Karamitros}}{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}} = 2.99$. Ο λόγος $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος $0.89 \leq \frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \leq 1.15$ για τις περιπτώσεις όπου καθεμία από τις υπό μελέτη παραμέτρους λαμβάνει τιμή $\alpha_{max} = 0.40g$, $H_{crust} = 2m$ ($H_{crust}/B = 0.67$), $c_u = 27kPa$, και οι υπόλοιπες παράμετροι λαμβάνουν τις τιμές της βασικής περίπτωσης. Επιπρόσθετα στα παραπάνω, στο Σχήμα 5.17 εντοπίζεται ένα σημείο με υψηλές τιμές καθίζησης για τις δύο μεθόδους ($\rho_{stat,dyn,Naesgaard} = 1.167m$, $\rho_{dyn,Karamitros} = 0.766m$), το οποίο προκύπτει για $q = 200kPa$.

Στον Πίνακα 5.18 καταγράφεται το ποσοστό των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης που ορίστηκαν για τις τιμές του λόγου των καθιζήσεων $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$, και οι τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$.

Πίνακας 5.18. Ποσοστό αποτελεσμάτων παραμετρικών αναλύσεων που βρίσκονται στις τρεις περιοχές σύγκρισης των τιμών του λόγου των καθιζήσεων $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$, και τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$.

		$\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \geq 2.0$	$\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$	$\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \leq 0.5$
		[Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά την $\rho_{stat,dyn}$ σε σύγκριση με την ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]	[Επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$.]	[Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υποεκτιμά την $\rho_{stat,dyn}$ σε σύγκριση με την ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c).]
Όρια λόγου καθιζήσεων, $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$				
Ποσοστό αποτελεσμάτων που ικανοποιούν τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$		32% (9/28)	61% (17/28)	7% (2/28)
Τιμές υπό μελέτη παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιούνται τα όρια του λόγου $\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}}$	α_{max} (g)	0.10g και 0.15g	0.20g έως 0.40g	—
	H_{crust} (m) (H_{crust}/B)	4.5m και 6m (1.5 και 2)	2m και 3m (0.67 και 1)	1m (0.33)
	Z_{liq} (m) (Z_{liq}/B)	3m και 6m (1 και 2)	9m έως 15m (3 έως 5)	—
	c_u (kPa)	52kPa και 65kPa	16kPa έως 38kPa	—
	D_r (%)	40%	60%	80%
	q (kPa)	—	50kPa έως 250kPa	—

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση δύο μεθόδων πρόβλεψης της σεισμικής καθίζησης επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται σε εδαφικό προφίλ που συνίσταται από μια απολύτως συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου. Οι μέθοδοι που διερευνώνται είναι η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) και η μέθοδος των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c). Στο Κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση του θέματος στην παρούσα εργασία και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1.1 Ποιοτική σύγκριση των μεθόδων

Τα κύρια ευρήματα που προέκυψαν από την ποιοτική σύγκριση των μεθόδων στην παρούσα εργασία (Κεφάλαιο 4), είναι τα ακόλουθα:

- *Η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) είναι απλοποιημένη σε σύγκριση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) όσον αφορά στον υπολογισμό της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης λόγω της συνιστώσας του μηχανισμού αστοχίας που ενεργοποιείται εντός της ρευστοποιημένης άμμου:*

Στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) η μειωμένη φέρουσα ικανότητα υπολογίστηκε, θέτοντας για την ρευστοποιημένη άμμο γωνία τριβής $\varphi = 0$ και συνοχή ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους ($c_u = \tau_{RES}$). Στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) ακολουθήθηκε μια διαφορετική, περισσότερο σύνθετη μεθοδολογία, όπου υπολογίστηκε ένας "ενιαίος" λόγος υπερπίεσης πόρων $U = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,0}}$ που αναπτύσσεται σε όλη την ρευστοποιημένη στρώση, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε μετά, για να υπολογιστεί μια μειωμένη γωνία τριβής φ_{deg} για την ρευστοποιημένη άμμο ως συνάρτηση της πραγματικής γωνίας τριβής φ .

- Η μέθοδος των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) είναι μεταγενέστερη και βελτιωμένη σε σύγκριση με την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998) όσον αφορά στις παραμέτρους που επιδρούν στην συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων:

Οι κοινές παράμετροι που λαμβάνουν υπόψη οι μέθοδοι των Naesgaard et al. (1998) και Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), οι οποίες αφορούν στο υπέδαφος και στην θεμελίωση, είναι:

- Πάχος αργιλικής στρώσης Z_c ή H ,
- Πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_l ή Z_{liq} ,
- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργιλικής στρώσης c_u ,
- Παράμετροι διατμητικής αντοχής ρευστοποιημένης άμμου:

Naesgaard et al. (1998): Παραμένουσα διατμητική αντοχή τ_{RES} και Οριακή διατμητική παραμόρφωση γ_{lim} ρευστοποιημένης στρώσης άμμου.

Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c): Αρχική γωνία τριβής ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου φ .

Επιπλέον, η μέθοδος των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) λαμβάνει υπόψη το ενεργό ειδικό βάρος των στρώσεων άμμου και αργίλου γ' .

- Πλάτος θεμελίωσης B , και
- Φορτίο θεμελίωσης ανά μονάδα μήκους Q_s ή Μέση τάση έδρασης θεμελίωσης q .

Η μέθοδος των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) είναι βελτιωμένη σε σύγκριση με την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998), διότι λαμβάνει υπόψη τις ακόλουθες πρόσθετες παραμέτρους, οι οποίες αφορούν στο σχήμα της θεμελίωσης και στα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης:

- Μήκος θεμελίωσης L , και
- Χαρακτηριστικά σεισμικής διέγερσης: Μέγιστη επιτάχυνση a_{max} , Περίοδος T , και Αριθμός σημαντικών κύκλων φόρτισης N .

6.1.2 Ποσοτική σύγκριση των μεθόδων

Στην ενότητα αυτή, περιγράφονται τα κύρια ευρήματα που προέκυψαν από την ποσοτική σύγκριση των μεθόδων στην παρούσα εργασία (Κεφάλαιο 5). Συγκεκριμένα, περιγράφονται τα κύρια ευρήματα που προέκυψαν από την παραμετρική και την συνολική σύγκριση των μεθόδων, και αναφέρονται οι παραδοχές που έγιναν κατά την εφαρμογή των δύο μεθόδων στην παρούσα εργασία.

Παραμετρική σύγκριση των μεθόδων. Τα κύρια ευρήματα που προέκυψαν από την παραμετρική σύγκριση των μεθόδων στην παρούσα εργασία, είναι:

- *Επίδραση μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης, α_{max} :*

Στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998), ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} δεν εξαρτάται από την μέγιστη επιτάχυνση σεισμικής διέγερσης α_{max} . Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι στις δυναμικές αναλύσεις της εν λόγω μεθόδου δεν λήφθηκε υπόψη η επιρροή της α_{max} και στο προσομοίωμα εδάφους-κτιρίου έγινε εισαγωγή μίας μόνο διέγερσης μέγιστης επιτάχυνσης $\alpha_{max} = 0.20g$, η προβλεπόμενη καθίζηση ρ για την στατική (ρ_{stat}), την δυναμική (ρ_{dyn}) και την στατική-δυναμική ανάλυση ($\rho_{stat,dyn}$) δεν επηρεάζεται από την μεταβολή της α_{max} και λαμβάνει σε όλο το εύρος των υπό διερεύνηση τιμών της α_{max} σταθερή τιμή.

Σύμφωνα με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), η αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης α_{max} επιφέρει αύξηση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} . Η αύξηση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} οδηγεί σε διαστολική συμπεριφορά του εδάφους λόγω διάτμησης και συνεπώς σε χαμηλότερες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων στην περιοχή κάτω από την θεμελίωση, αυξάνοντας έτσι την απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$ (FS_{deg}).

Γενικά, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} = 0.5 - 2.0$), για τιμές της α_{max} από 0.20g έως 0.40g.

- *Επίδραση πάχους αργιλικής στρώσης H_{crust} (H_{crust}/B), και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργιλικής στρώσης c_u :*

Σύμφωνα με τις δύο μεθόδους που διερευνώνται, η αύξηση του κανονικοποιημένου πάχους H_{crust}/B και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u της αργιλικής στρώσης, συμβάλλουν στην αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και στην μείωση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ .

Με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας, για την πλειονότητα των περιπτώσεων διερεύνησης της επίδρασης του H_{crust}/B ή της c_u προέκυψε, ότι η μείωση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) είναι πιο έντονη συγκριτικά με την

μείωση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ της μεθόδου των Naesgaard et al. (1998) για την ίδια μεταβολή της τιμής του H_{crust}/B ή της c_u αντίστοιχα, δηλαδή $\frac{\Delta\rho_{dyn,Karamitros}}{\Delta(H_{crust}/B)} > \frac{\Delta\rho_{Naesgaard}}{\Delta(H_{crust}/B)}$ ή $\frac{\Delta\rho_{dyn,Karamitros}}{\Delta c_u} > \frac{\Delta\rho_{Naesgaard}}{\Delta c_u}$. Η παρατήρηση αυτή οφείλεται στην μεγαλύτερη επίδραση του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} στην $\rho_{dyn,Karamitros}$ σε σύγκριση με τις $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$, διότι η $\rho_{dyn,Karamitros}$ εξαρτάται από τον όρο $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3$ (Εξ. 3.4), ενώ οι $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ εξαρτώνται από τους όρους $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.41}$, $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.51}$ και $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^{1.55}$ αντίστοιχα (Εξ. 4.1α, 4.1β και 4.1γ).

Γενικά, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} = 0.5 - 2.0$), για τιμές του H_{crust} από 1.5m έως 3m (H_{crust}/B από 0.5 έως 1.0), και για τιμές της c_u από 20kPa έως 40kPa. Επίσης, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$, για τιμές της c_u από 16kPa έως 27kPa.

- *Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, Z_{liq} (Z_{liq}/B):*

Στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998), ο συντελεστής ασφαλείας FS_{deg} δεν εξαρτάται από το κανονικοποιημένο πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq}/B . Η συμβολή του Z_{liq}/B εντοπίζεται στον υπολογισμό της προβλεπόμενης καθίζησης ρ , όπου η αύξηση του Z_{liq}/B επιφέρει αύξηση της καθίζησης ρ .

Σύμφωνα με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), η αύξηση του κανονικοποιημένου πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου Z_{liq}/B επιφέρει αύξηση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} . Όπως αναφέρθηκε και στην διερεύνηση της επίδρασης της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης α_{max} , η αύξηση της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} συντελεί στην αύξηση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$ (FS_{deg}).

Γενικά, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} = 0.5 - 2.0$), για τιμές του Z_{liq} από 7.5m έως 15m (Z_{liq}/B από 2.5 έως 5.0).

- Επίδραση αρχικής σχετικής πυκνότητας ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, D_r :

Με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας εφαρμόζοντας την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998), διαπιστώθηκε η αξιόλογη επίδραση της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r , η οποία συντελεί σε πολύ σημαντική αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και πολύ σημαντική μείωση των τιμών της προβλεπόμενης καθίζησης ρ .

Με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας εφαρμόζοντας την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρατηρήθηκε, ότι η αύξηση της αρχικής σχετικής πυκνότητας της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου D_r συντελεί σε αύξηση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} η οποία ωστόσο δεν είναι αξιόλογη, και σε μείωση των τιμών της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} .

Γενικά, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$ ($\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$), για τιμές της D_r από 40% έως 50%. Επίσης, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} = 0.5 - 2.0$) για $D_r = 60\%$, και μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ για $D_r = 80\%$.

- Επίδραση μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης, q :

Με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας εφαρμόζοντας την μέθοδο των Naesgaard et al. (1998), παρατηρήθηκε, ότι η αύξηση της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q επιφέρει έντονη μείωση του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και έντονη αύξηση της προβλεπόμενης καθίζησης ρ .

Με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας εφαρμόζοντας την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c), παρατηρήθηκε επίσης, ότι η αύξηση της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q επιφέρει μείωση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} και αύξηση των τιμών της σεισμικής καθίζησης ρ_{dyn} . Η σεισμική καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ (Εξ. 3.4) εξαρτάται από τον όρο $\left(\frac{1}{FS_{deg}}\right)^3 = \left(\frac{q}{q_{ult,deg}}\right)^3$ και συνεπώς, η επίδραση των q και $q_{ult,deg}$ είναι πολύ σημαντική στον υπολογισμό της $\rho_{dyn,Karamitros}$. Επισημαίνεται, ότι

η συμβολή της μέσης τάσης έδρασης θεμελίωσης q στην αύξηση της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης μετά την ρευστοποίηση $q_{ult,deg}$, περιορίζει την εντονότερη μείωση των τιμών του FS_{deg} και την εντονότερη αύξηση των τιμών της $\rho_{dyn,Karamitros}$, με την αύξηση της q .

Επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{Naesgaard}}{\rho_{Karamitros}} = 0.5 - 2.0$), σε όλο το εύρος των υπό διερεύνηση τιμών της q από 50kPa έως 250kPa.

Συνολική σύγκριση των μεθόδων. Τα κύρια ευρήματα που προέκυψαν από την συνολική σύγκριση των μεθόδων στην παρούσα εργασία, είναι:

- Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας $FS_{deg,Naesgaard}$ και $FS_{deg,Karamitros}$:

Για το 96% (27/28) των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά τον FS_{deg} σε σύγκριση με την μέθοδο των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) ($\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} \geq 2.0$). Η μόνη περίπτωση [4% (1/28)] όπου επιτυγχάνεται καλή συμφωνία των τιμών του FS_{deg} μεταξύ των δύο μεθόδων είναι για $D_r = 40\%$, όπου ο λόγος των συντελεστών ασφαλείας λαμβάνει τιμή $\frac{FS_{deg,Naesgaard}}{FS_{deg,Karamitros}} = 1.02$.

- Σύγκριση της καθίζησης στατικής ανάλυσης $\rho_{stat,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$:

Για την πλειονότητα των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{stat,Naesgaard} > \rho_{dyn,Karamitros}$. Συγκεκριμένα, για το 64% (18/28) των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$). Για το 25% (7/28) των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά την $\rho_{stat,Naesgaard}$ σε σύγκριση με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) ($\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \geq 2.0$), ενώ για το 11% (3/28) των αποτελεσμάτων συμβαίνει το αντίθετο ($\frac{\rho_{stat,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \leq 0.5$).

- Σύγκριση της καθίζησης δυναμικής ανάλυσης $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$:

Για το σύνολο των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων εκτός από δύο περιπτώσεις, ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{dyn,Naesgaard} > \rho_{dyn,Karamitros}$. Συγκεκριμένα, για το 75% (21/28) των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά την $\rho_{dyn,Naesgaard}$ σε σύγκριση με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) ($\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \geq 2.0$). Για το 25% (7/28) των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$).

- Σύγκριση της καθίζησης στατικής και δυναμικής ανάλυσης $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ και της σεισμικής καθίζησης $\rho_{dyn,Karamitros}$:

Για την πλειονότητα των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων ικανοποιείται η ανίσωση $\rho_{stat,dyn,Naesgaard} > \rho_{dyn,Karamitros}$. Συγκεκριμένα, για το 61% (17/28) των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, επιτυγχάνεται καλή συμφωνία μεταξύ των καθιζήσεων $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ ($\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} = 0.5 - 2.0$). Για το 32% (9/28) των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, η μέθοδος των Naesgaard et al. (1998) υπερεκτιμά την $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$ σε σύγκριση με την $\rho_{dyn,Karamitros}$ της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) ($\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \geq 2.0$), ενώ για το 7% (2/28) των αποτελεσμάτων συμβαίνει το αντίθετο ($\frac{\rho_{stat,dyn,Naesgaard}}{\rho_{dyn,Karamitros}} \leq 0.5$).

Παραδοχές των παραμετρικών αναλύσεων και παρατηρήσεις για την ποσοτική σύγκριση των μεθόδων. Η διαμόρφωση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας βασίστηκε σε ορισμένες παραδοχές που έγιναν στην παρούσα εργασία κατά την εφαρμογή των δύο μεθόδων, οι οποίες είναι:

- Στην βασική περίπτωση των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης έλαβαν τις τιμές $\alpha_{max} = 0.20g$, $T = 0.35sec$ και $N = 10$. Η επιλογή της τιμής $\alpha_{max} = 0.20g$ έγινε, διότι είναι η τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης της εισαγόμενης διέγερσης στις δυναμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998). Επομένως, στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας η σεισμική καθίζηση $\rho_{dyn,Karamitros}$ υπολογίστηκε για τις ανωτέρω τιμές των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην βασική περίπτωση, και συγκρίνεται με την καθίζηση στατικής ανάλυσης $\rho_{stat,Naesgaard}$ η οποία είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης α_{max} , T , N . Η σύγκριση των σεισμικών καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ γίνεται για την ίδια τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης $\alpha_{max} = 0.20g$. Η επιλογή των τιμών $T = 0.35sec$ και $N = 10$ για τον υπολογισμό της σεισμικής καθιζήσης $\rho_{dyn,Karamitros}$ στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας έγινε, λαμβάνοντας υπόψη πιθανές ρεαλιστικές τιμές αυτών των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης.
- Μία παραδοχή που έγινε στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, αφορά στον υπολογισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής τ_{RES} και της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{lim} της ρευστοποιημένης στρώσης, οι οποίες αποτελούν παραμέτρους που επιδρούν στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας FS_{deg} (Εξ. 2.1) και του συντελεστή X_s (Εξ. 2.2) στην μέθοδο των Naesgaard et al. (1998).

Οι παράμετροι τ_{RES} και γ_{lim} στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας υπολογίστηκαν με βάση τις Εξ. 4.3 και Εξ. 4.4 αντίστοιχα, οι οποίες προέκυψαν αξιοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 2.1 της έρευνας των Naesgaard et al. (1998) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην στατική ανάλυση της εν λόγω έρευνας. Στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας, οι Εξ. 4.3 και Εξ. 4.4 χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της προβλεπόμενης καθιζήσης της στατικής και της δυναμικής ανάλυσης, $\rho_{stat,Naesgaard}$, $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{stat,dyn,Naesgaard}$. Όμως, δεν είναι γνωστό εάν η συσχέτιση των δεδομένων του Πίνακα 2.1 χρησιμοποιήθηκε και στην δυναμική ανάλυση της έρευνας των Naesgaard et al. (1998). Συνεπώς, η χρήση των Εξ. 4.3 και Εξ. 4.4 για τον υπολογισμό της σεισμικής καθιζήσης $\rho_{dyn,Naesgaard}$ στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας, δεν είναι γνωστό εάν είναι μια ορθή παραδοχή.

Επιπλέον, για την σύγκριση των σεισμικών καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$, γίνεται η ακόλουθη παρατήρηση:

- Στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) διερευνήθηκε η συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων ρ_{dyn} επιφανειακής θεμελίωσης που εδράζεται σε μια απεριόριστα εκτεταμένη και απολύτως συνεκτική αργιλική επιφανειακή στρώση υπερκείμενη ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου.

Στην έρευνα των Naesgaard et al. (1998) διερευνήθηκε η συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων για συνεχή επιμήκη θεμέλια, τα οποία εδράζονται σε επίπεδο έδαφος και το εδαφικό προφίλ συνίσταται από μια συνεκτική κρούστα υπερκείμενη μιας συνεχούς ρευστοποιημένης εδαφικής στρώσης. Στην στατική ανάλυση της εν λόγω έρευνας εφαρμόστηκε η τάση έδρασης της θεμελίωσης στην επιφάνεια της αργιλικής κρούστας, και στην δυναμική ανάλυση ένα πλαισιωτό σύστημα κτιρίου υποβλήθηκε σε σεισμική διέγερση. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.7a και 2.7b, όπου παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παραμορφωμένο πλέγμα (grid) εδαφικών στοιχείων στο τέλος της διέγερσης για ένα κτίριο που εδράζεται σε μια μεγάλη πάχους και σε μια μικρού πάχους κρούστα, οι καθιζήσεις των θεμελίων του κτιρίου είναι διαφορετικές.

Η περίπτωση της επιφανειακής θεμελίωσης που διερευνήθηκε στην έρευνα των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) είναι διαφορετική από την περίπτωση του πλαισιωτού συστήματος κτιρίου που διερευνήθηκε στην δυναμική ανάλυση της έρευνας των Naesgaard et al. (1998). Η παρατήρηση αυτή γίνεται για την σύγκριση των σεισμικών καθιζήσεων $\rho_{dyn,Naesgaard}$ και $\rho_{dyn,Karamitros}$ που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Λαμβάνοντας υπόψη την διερεύνηση του θέματος στην παρούσα εργασία, γίνονται οι ακόλουθες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Προτείνεται η αναζήτηση ερευνών στις οποίες θα παρουσιάζονται πραγματικές περιπτώσεις της σεισμικής απόκρισης της θεμελίωσης κατασκευών που εδράζονται στο εδαφικό προφίλ που διερευνήθηκε στην παρούσα εργασία.

Με αυτό τον τρόπο, θα είναι δυνατή η σύγκριση των σεισμικών καθιζήσεων που προέκυψαν εφαρμόζοντας τις δύο μεθόδους στην ποσοτική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, με τις παρατηρήσεις της σεισμικής καθίζησης στο πεδίο. Επομένως, θα μπορεί να διαπιστωθεί κατά πόσο η προβλεπόμενη καθίζηση με βάση τις δύο μεθόδους προσεγγίζει τις παρατηρήσεις της σεισμικής καθίζησης στο πεδίο.

- Προτείνεται η σύγκριση της μεθόδου των Karamitros et al. (2013a, 2013b, 2013c) με αντίστοιχες μεταγενέστερες μεθόδους.
- Στις έρευνες που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, διερευνήθηκε η επίδραση της ρευστοποίησης λόγω σεισμικής διέγερσης στην φέρουσα ικανότητα και στην συσσώρευση καθιζήσεων μεμονωμένων θεμελίων. Μία πρόταση που γίνεται για περαιτέρω έρευνα, είναι η επίδραση της ρευστοποίησης λόγω σεισμικής διέγερσης στην απόκριση θεμελίων παρακείμενων κατασκευών.

- Cascone E. and Bouckovalas G.D. (1998),
«Seismic bearing capacity of footings on saturated sand with a clay cap»,
Proceedings of the 11th European conference in earthquake engineering.
- Hatanaka M. and Uchida A. (1996),
«Empirical Correlation Between Penetration Resistance and Internal
Friction Angle of Sandy Soils», *Soils and Foundations*, 36 (4), pp. 1-9.
- Idriss I.M. and Boulanger R. (2008),
«Soil Liquefaction During Earthquakes», EERI Monograph.
- Karamitros D.K., Bouckovalas G.D. and Chaloulos Y.K. (2013a),
«Insight into the Seismic Liquefaction Performance of Shallow
Foundations», *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental
Engineering*, 139 (4), *American Society of Civil Engineers (ASCE)*,
pp. 599-607.
- Karamitros D.K., Bouckovalas G.D. and Chaloulos Y.K. (2013b),
«Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay
crust», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, pp. 64-76.
- Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Chaloulos Y.K. and Andrianopoulos K.I. (2013c),
«Numerical analysis of liquefaction-induced bearing capacity degradation
of shallow foundations on a two-layered soil profile», *Soil Dynamics and
Earthquake Engineering*, 44, pp. 90-101.
- Kishida H. (1966),
«Damage to Reinforced Concrete Buildings in Niigata City with special
reference to foundation engineering», *Soils and Foundations*, 6 (1),
pp. 71-88.
- Kramer Steven L.,
«Geotechnical Earthquake Engineering», Prentice Hall,
ISBN 0-13-374943-6.
- Meyerhof G.G. and Hanna A.M. (1978),
«Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined
load», *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (4), pp. 565-72.
- Naesgaard E., Byrne P.M. and Ven Huizen G. (1998),
«Behaviour of light structures founded on soil 'crust' over liquefied
ground», *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*,
75 (1), pp. 422-433.

Skempton A.W. (1957),

«The Planning and Design of New Hongkong Airport», *Proceeding*, 7,
pp. 305 - 307, Institute of Civil Engineering, London.