



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ: “Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών”

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

MSc in “Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures”

**ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΕΡΟΥΣΑΣ
ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΘΕΜΕΛΙΟΥ
ΕΠΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Αργύρης-Σταύρος Αγγελής**

Επιβλέπων: Γ. Μπουκοβάλας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.



**IMPROVED COMPUTATION OF BEARING
CAPACITY & SETTLEMENTS OF FOOTING
ON LIQUEFIED SAND**

**MSc THESIS
Argyris-Stavros Angelis**

Supervisor: G. Bouckovalas, Professor N.T.U.A.

Μάρτιος / March 2015

Ευχαριστίες

Με την μεταπτυχιακή αυτή εργασία κλείνει ένας δεύτερος κύκλος σπουδών, συντομότερος αλλά εξίσου σημαντικός με τον πρώτο, στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Στο σημείο αυτό, πιστεύω ότι είναι η κατάλληλη στιγμή και θέση για να ευχαριστήσω όσους συνετέλεσαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της.

Κατ' αρχάς οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Μπουκοβάλα, επιβλέποντα της εργασίας μου. Μετά την συνεργασία μας στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας πριν περίπου 1.5 χρόνο, η συμβολή του ήταν και πάλι καθοριστική στα εμπόδια που ανέκυπταν. Μπορεί οι συναντήσεις μας να ήταν λιγότερες, αλλά πάντοτε εποικοδομητικές και κυρίως μου έδιναν δύναμη για να συνεχίσω την εργασιά.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Γιάννη Τσιάπα και Κωνσταντίνο Μπαζαίο για την φιλοξενία στο γραφείο. Η παρέα τους έκανε τις ώρες δουλειάς να περνούν ευχάριστα. Επιθυμώ να ευχαριστήσω εγκαρδίως και τον μεταδιδαστορικό ερευνητή Γιάννη Χαλούλο για τη γενικότερη συμβολή του στις 3-Δ αναλύσεις και την αμέριστη βοήθειά του.

Πολύ σημαντική ήταν η βοήθεια της διδάκτορος Βασιλικής Δημητριάδη, η οποία ήταν πλάι μου σε κάθε βήμα της εργασίας. Την ευχαριστώ ιδιαίτερα για τον χρόνο που αφιέρωσε και την καθοδήγηση καθ' όλη αυτήν την περίοδο.

Τελευταίο και μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένειά μου. Η συνολική υποστήριξή τους στις σπουδές μου και στη ζωή μου γενικότερα, παίζει καταλυτικό ρόλο.

Αργύρης Αγγελής (Υπερ-νέος)

Περίληψη

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες η θεμελίωση κατασκευών σε ρευστοποιήσιμα εδάφη με επιφανειακή θεμελίωση είναι εφικτή, αφού προηγουμένως πραγματοποιηθεί βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης σε συγκεκριμένο πάχος και πλάτος γύρω από το θεμέλιο. Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της **Β. Δημητριάδη (2014)** εξετάστηκε η ανωτέρω επιλογή θεμελίωσης με την πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων και την ακόλουθη διατύπωση μια απλοποιημένης μεθοδολογίας σχεδιασμού. Σύμφωνα με αυτήν, η σεισμική απόκριση της θεμελίωσης αποτιμάται τόσο σε όρους σεισμικών καθιζήσεων όσο και ως προς την μετασεισμική απομειωμένη φέρουσα ικανότητα.

Από τη διερεύνηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων των αναλύσεων, στην παρούσα εργασία, προέκυψε ότι ο υπολογισμός της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ήταν επηρεασμένος από τις θεωρούμενες συνοριακές συνθήκες κατά τη φάση της μετασεισμικής φόρτισης του θεμελίου. Πιο συγκεκριμένα, η διατήρηση των συνοριακών συνθηκών των συζευγμένων κόμβων (tied node boundary conditions) κατά το στάδιο της σταδιακής αύξησης του φορτίου του θεμελίου q μετά το τέλος της διέγερσης και έως την αστοχία, είχε ως αποτέλεσμα την πρόβλεψη μικρότερων τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας.

Με δεδομένη την ανωτέρω επιρροή των συνοριακών συνθηκών στον προσδιορισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας των αριθμητικών αναλύσεων, **στόχος** της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η επανεξέταση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, ο υπολογισμός των «πραγματικών» τιμών της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας και τέλος η αναθεώρηση των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού.

Για τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας χρησιμοποιήθηκε το υπερβολικής μορφής προσομοίωμα φορτίου-μετατόπισης, για τα αρχικά στάδια της μετα-σεισμικής καμπύλης των αριθμητικών αναλύσεων. Με βάση αυτές τις τιμές, πραγματοποιήθηκε εκ νέου **στατιστική επεξεργασία** και προέκυψαν οι ακόλουθες αναθεωρημένες αναλυτικές και εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού τόσο της δυναμικής καθιζήσης όσο και του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας:

2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας

- Καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση

$$\rho_{dyn} = 0.015 \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^{0.5} \cdot \left[1 + 0.15 \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^5\right] \quad (1)$$

- Καθίζηση για περιορισμένη βελτίωση

$$\frac{\rho_{dyn}}{\rho_{dyn}^{inf}} = 1/1 - \exp\left[-1.05 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.30}\right] \quad (2)$$

- Συντελεστής ασφαλείας για περιορισμένη βελτίωση

$$\frac{F.S.deg}{F.S.deg}^{inf} = 1 - \exp\left[-0.65 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.14}\right] \quad (3)$$

3-Δ αναλύσεις ορθογωνικού θεμελίου

- Καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση

$$\rho_{dyn} = c \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^{0.5} \cdot \left[1 + 0.15 \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^5\right] \quad (4)$$

$$c = 0.011 \cdot \left(1 + 0.067 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 0.015 \quad (4.1)$$

- Καθίζηση για περιορισμένη βελτίωση

$$\frac{\rho_{dyn}}{\rho_{dyn}^{inf}} = 1/1 - \exp\left[-c_{imp1} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.30}\right] \quad (5)$$

$$c_{imp1} = 0.485 \cdot \left(1 + 0.26 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 1.05 \quad (5.1)$$

- Συντελεστής ασφαλείας για περιορισμένη βελτίωση

$$\frac{F.S.deg}{F.S.deg}^{inf} = 1 - \exp\left[-c_{imp2} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B}\right)^{0.14}\right] \quad (6)$$

$$c_{imp2} = 0.4 \cdot \left(1 + 0.125 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 0.65 \quad (6.1)$$

Οι αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό της καθίζησης για περιορισμένη βελτίωση (2, 5 και 5.1) είναι ίδιες μ' αυτές που παρουσιάστηκαν από την Δημητριάδη (2014), καθώς προέκυψαν από στατιστική επεξεργασία των τιμών των καθιζήσεων, οι οποίες δεν μεταβλήθηκαν απ' την παρούσα εργασία. Οι νέες αναθεωρημένες αναλυτικές σχέσεις που προτείνονται βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα αριθμητικά αποτελέσματα τόσο για τις 2-Δ όσο και για τις 3-Δ αναλύσεις. Μάλιστα, όπως παρουσιάζεται στους πίνακες που ακολουθούν, οι αναθεωρημένες σχέσεις

έχουν σε όλες τις περιπτώσεις χαμηλότερη τιμή όσον αφορά την τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος.

$$\text{σχ. σφάλμα} = \frac{(\text{εκτιμώμενη} - \text{αριθμητική}) \text{ τιμή}}{\text{αριθμητική τιμή}}$$

Πίνακας I: Τυπική απόκλιση σχ. σφάλματος για τις σχέσεις (2-Δ).

2-Δ	Τυπική Απόκλιση Σχ. Σφάλματος	
	Αναθεωρημένη Σχέση	Παλαιά Σχέση
$\rho_{\text{dyn-F.S.deg}}$	14%	21%
$\rho_{\text{dyn}} - L_{\text{imp}}$	7%	7%
$F.S.\text{deg} - L_{\text{imp}}$	18%	23%

Πίνακας II: Τυπική απόκλιση σχ. σφάλματος για τις σχέσεις (3-Δ).

3-Δ	Τυπική Απόκλιση Σχ. Σφάλματος	
	Αναθεωρημένη Σχέση	Παλαιά Σχέση
$\rho_{\text{dyn-F.S.deg}}$	18%	23%
$\rho_{\text{dyn}} - L_{\text{imp}}$	5%	5%
$F.S.\text{deg} - L_{\text{imp}}$	7%	25%

Abstract

Based on recent studies, use of shallow foundations on liquefiable soils is permitted only after appropriate ground improvement is performed in specific dimensions (depth and width) around the foundation. In her PhD thesis, **V. Dimitriadi (2014)** examined the above foundation scheme through the execution of numerical analyses and the development of a related design methodology. In the particular methodology, seismic response of the foundation is evaluated both in terms of seismic settlement accumulation as well as of the post-shaking degraded bearing capacity.

In the present thesis, the close examination of the above numerical results resulted in the observation that the evaluation of the post-shaking degraded bearing capacity was influenced by the considered boundary conditions during the load increase of the foundation post-shaking. More specifically, the preservation of the tied-node boundary conditions during the post-shaking phase resulted in the prediction of lower values of degraded bearing capacity.

Given the influence of the type of boundary conditions explained above, the present thesis **aims** in the re-evaluation of the numerically predicted degraded bearing capacity and the re-examination of the associated analytical expressions for the evaluation of the seismic settlements and degraded Factor of Safety.

The degraded bearing capacity was re-evaluated employing a hyperbolic function between the displacement and imposed load. Based on the revised values of degraded bearing capacity the **statistical processing** of the numerical results was repeated in order to come up with new analytical expressions for the prediction of the seismic induced settlements and the post-shaking degraded factor of safety.

Hence, the analytical expressions for strip and rectangular footings are as follows:

Strip footings (2-D analyses)

- Settlements for conditions of “infinite” ground improvement

$$\rho_{dyn} = 0.015 \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^{0.5} \cdot \left[1 + 0.15 \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^5\right] \quad (1)$$

- Settlements for conditions of limited ground improvement

$$\frac{\rho_{dyn}}{\rho_{dyn}^{inf}} = 1/1 - \exp \left[-1.05 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{0.30} \right] \quad (2)$$

- Effect of ground improvement dimensions on the ratio of Degraded Factor of Safety for limited over that for “infinite” conditions.

$$\frac{F.S.deg}{F.S.deg^{inf}} = 1 - \exp \left[-0.65 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{0.14} \right] \quad (3)$$

Rectangular / Square footings (3-D analyses)

- Settlements for conditions of “infinite” ground improvement

$$\rho_{dyn} = c \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg} \right)^{0.5} \cdot \left[1 + 0.15 \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg} \right)^5 \right] \quad (4)$$

$$c = 0.011 \cdot \left(1 + 0.067 \cdot \frac{L}{B} \right) \leq 0.015 \quad (4.1)$$

- Settlements for conditions of limited ground improvement

$$\frac{\rho_{dyn}}{\rho_{dyn}^{inf}} = 1/1 - \exp \left[-c_{imp1} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{0.30} \right] \quad (5)$$

$$c_{imp1} = 0.485 \cdot \left(1 + 0.26 \cdot \frac{L}{B} \right) \leq 1.05 \quad (5.1)$$

- Effect of ground improvement dimensions on the ratio of Degraded Factor of Safety for limited over that for “infinite” conditions.

$$\frac{F.S.deg}{F.S.deg^{inf}} = 1 - \exp \left[-c_{imp2} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B} \right)^{0.14} \right] \quad (6)$$

$$c_{imp2} = 0.4 \cdot \left(1 + 0.125 \cdot \frac{L}{B} \right) \leq 0.65 \quad (6.1)$$

The above analytical expressions for settlements for conditions of limited improvement (2, 5 and 5.1) are the same as the ones presented by **Dimitriadi (2014)**, as they resulted after the statistical processing of the numerical predictions of settlements, which did not change in the present study. The new revised analytical expressions proposed herein are in satisfactory agreement with the numerical results both for the 2-D as well as the 3-D numerical predictions. As summarized in the following tables, the revised analytical predictions systematically present a lower standard deviation in the relative error. Relative error is defined as follows:

$$rel.error = \frac{(analytical - numerical) prediction}{numerical prediction}$$

Table I: Standard deviation of relative error 2-D expressions.

2-D	Standard deviation of rel. error	
	Revised expression	Old expression
$\rho_{\text{dyn-F.S.deg}}$	14%	21%
$\rho_{\text{dyn}} - L_{\text{imp}}$	7%	7%
$\text{F.S.deg} - L_{\text{imp}}$	18%	23%

Table II: Standard deviation of relative error 3-D expressions.

3-D	Standard deviation of rel. error	
	Revised expression	Old expression
$\rho_{\text{dyn-F.S.deg}}$	18%	23%
$\rho_{\text{dyn}} - L_{\text{imp}}$	5%	5%
$\text{F.S.deg} - L_{\text{imp}}$	7%	25%

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Abstract	vii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος	1
1.2 Σκοπός Μεταπτυχιακής Εργασίας	4
1.3 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας	5
Κεφάλαιο 2: Υπολογισμός Οριακού Φορτίου με το Υπερβολικό Μοντέλο ...	7
2.1 Γενικά	7
2.2 Υπολογισμός οριακού φορτίου ($q_{ult,deg}$) με το υπερβολικό μοντέλο	7
2.3 Κατηγορίες αριθμητικών αναλύσεων που εξετάστηκαν με βάση το υπερβολικό μοντέλο	16
2.4 Συμπεράσματα	27
Κεφάλαιο 3: Σύγκριση τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο με τις αριθμητικές προβλέψεις	29
3.1 Γενικά	29
3.2 Αξιολόγηση απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hyp}$) για διδιάστατες αναλύσεις με «άπειρη» βελτίωση	29
3.3 Αξιολόγηση απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hyp}$) για διδιάστατες αναλύσεις με περιορισμένη βελτίωση	31

3.4	Αξιολόγηση απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hYP}$) για τρι- διάστατες αναλύσεις	33	
3.5	Σχολιασμός / Συμπεράσματα	36	
Κεφάλαιο 4: Βελτιωμένες σχέσεις υπολογισμού: 2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας			37
4.1	Γενικά	37	
4.2	Αναλυτική έκφραση κατά Newmark	37	
4.3	Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στις δυναμικές καθιζήσεις για θεμελιολωρίδες (2-Δ)	46	
4.4	Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας για θεμελιολωρίδες (2-Δ)	52	
4.5	Συμπεράσματα	58	
Κεφάλαιο 5: Βελτιωμένες σχέσεις υπολογισμού: 3-Δ αναλύσεις ορθογωνικού θεμελίου			61
5.1	Γενικά	61	
5.2	Επίδραση διαστάσεων θεμελίου στις καθιζήσεις - «Απείρως» εκτεινόμενη βελτίωση	61	
5.3	Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στις δυναμικές καθιζήσεις για ορθογωνικά θεμέλια	65	
5.4	Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας για ορθογωνικά θεμέλια	71	
5.5	Συμπεράσματα	75	
Κεφάλαιο 6: Τελικά Συμπεράσματα και Προτάσεις			79
6.1	Τελικά Συμπεράσματα	79	
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	80	

Βιβλιογραφία81

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Πρόσφατες πειραματικές [Liu & Dobry (1997), Dashti et al. (2010), Adalier et al. (2003)] και αριθμητικές έρευνες [Karamitros et al. (2013), Shahir & Pak (2009), Δημητριάδη (2014)] έχουν υποδείξει την δυνατότητα έδρασης επιφανειακών θεμελιώσεων σε ρευστοποιήσιμα εδάφη υπό την προϋπόθεση ύπαρξης μιας επιφανειακής μη-ρευστοποιήσιμης στρώσης ικανών διαστάσεων και επαρκούς διατμητικής αντοχής. Η εν λόγω στρώση μπορεί να αποτελείται από φυσικές (μη-ρευστοποιήσιμες) αργιλικής σύστασης αποθέσεις, ή να έχει προέλθει από τη βελτίωση της ρευστοποιήσιμης άμμου με βαθιά δονητική συμπύκνωση και χαλικοπασσάλους. Στη δεύτερη περίπτωση, οι διαστάσεις της βελτιωμένης ζώνης (πλάτος και πάχος) γύρω από το θεμέλιο αποτελούν παράμετρο του προβλήματος, καθώς χρειάζεται να προσδιοριστούν. Σε κάθε περίπτωση, η σεισμική απόκριση της επιφανειακής θεμελίωσης αποτιμάται σε όρους αναπτυσσόμενων σεισμικών καθιζήσεων όσο και σε όρους φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης.

Η εκτίμηση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης, αμέσως μετά το πέρας της διέγερσης, προϋποθέτει την προηγούμενη κατανόηση του αναπτυσσόμενου μηχανισμού αστοχίας της θεμελίωσης. Προς αυτή την κατεύθυνση, κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στους τρεις κυρίαρχους τύπους αστοχίας επιφανειακών θεμελιώσεων υπό στατικές συνθήκες. Στο **Σχήμα 1.1** συνοψίζονται οι συγκεκριμένες μορφές των μηχανισμών αστοχίας, ήτοι ο μηχανισμός γενικευμένης διατμητικής αστοχίας (general shear failure), ο μηχανισμός τοπικής διατμητικής αστοχίας (local shear failure), καθώς και ο μηχανισμός διάτρησης εντός του εδάφους θεμελίωσης (punching shear failure). Στο ίδιο σχήμα, αποδίδονται οι τυπικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για κάθε έναν από τους ανωτέρω μηχανισμούς.

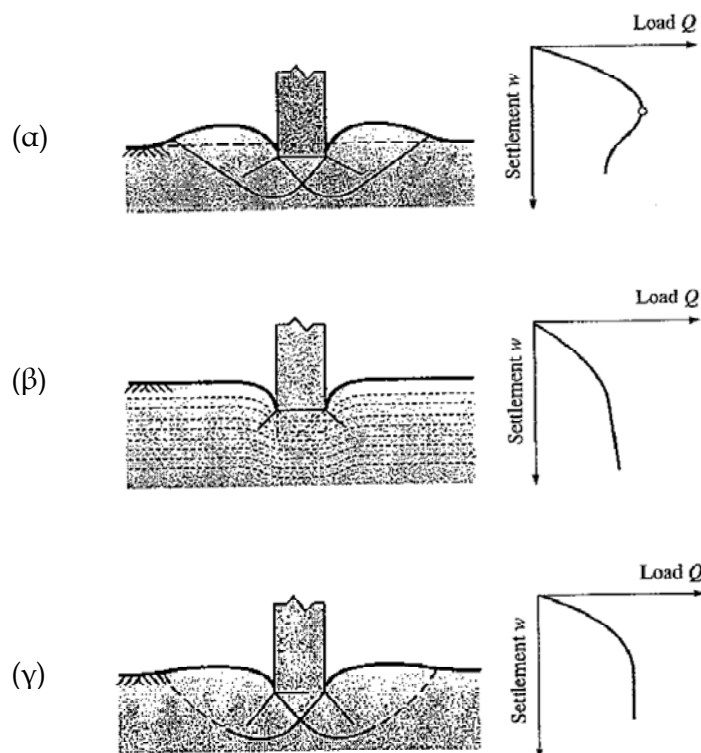
Γενικευμένη διατμητική αστοχία (general shear failure). Εντοπίζεται σε περιπτώσεις ασυμπίεστων και σχετικά σκληρών εδαφικών σχηματισμών, καθώς και σε γρήγορα φορτιζόμενες κανονικά στερεοποιημένες αργίλους υπό αστράγγιστες

συνθήκες. Όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 1.1(α)**, η συγκεκριμένη επιφάνεια αστοχίας είναι σαφώς ορισμένη, με σημαντική πλευρική διόγκωση του εδάφους θεμελίωσης να προκαλείται, είτε μονόπλευρα, είτε εκατέρωθεν του θεμελίου. Συχνά, παρατηρείται στροφή του θεμελίου, ενώ από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης η αστοχία επέρχεται απότομα.

Διάτρηση του θεμελίου εντός του εδάφους θεμελίωσης (punching shear failure).

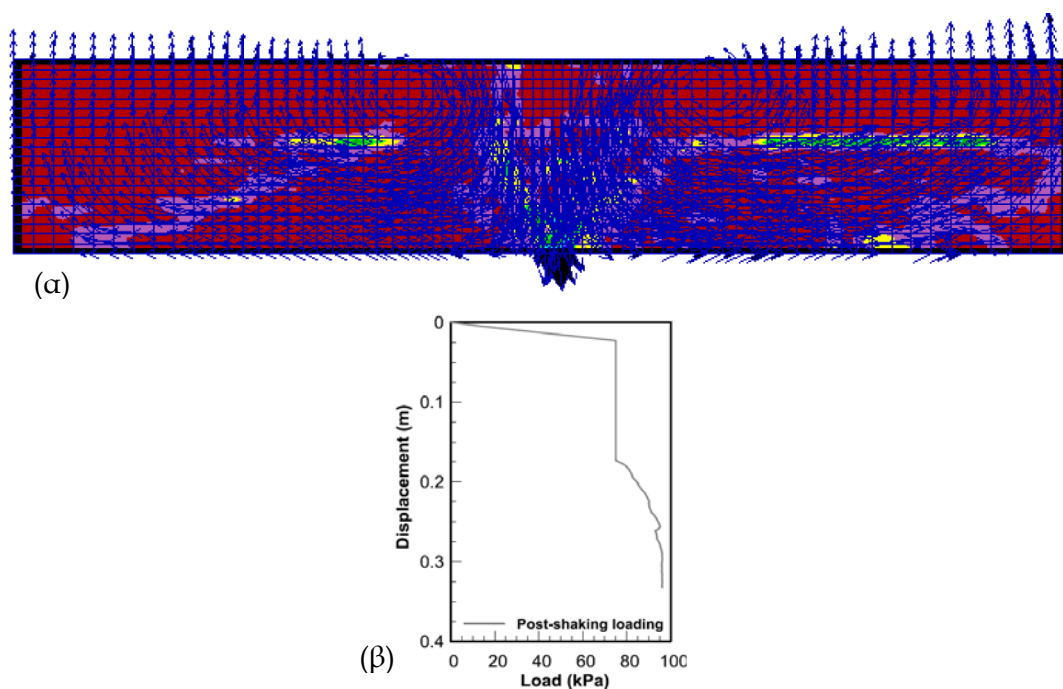
Ο εν λόγω μηχανισμός αναπτύσσεται ιδιαίτερα στην περίπτωση δι-στρωτων εδαφικών προφίλ, αποτελούμενων από μια λεπτή, επιφανειακή στρώση ανθεκτικού εδάφους (πυκνής άμμου/σιφρής αργίλου) και μιας υποκείμενης στρώσης χαλαρού, ασθενέστερου εδάφους. Παρατηρείται συσσώρευση σημαντικών καθιζήσεων, με μικρή έως και αμελητέα πλευρική διόγκωση του εδάφους. Ο ρυθμός ανάπτυξης του μηχανισμού αυτού είναι αρκετά πιο αργός σε σχέση με το μηχανισμό γενικευμένης διατμητικής αστοχίας, όπως παρατηρείται και από το **Σχήμα 1.1(β)**.

Τοπική διατμητική αστοχία (local shear failure). Αποτελεί μια ενδιάμεση μορφή μηχανισμού αστοχίας, με σαφώς ορισμένη επιφάνεια αστοχίας κάτω από τη θεμελίωση, η οποία δεν μεταδίδεται έως την εδαφική επιφάνεια.



Σχήμα 1.1: Τυπικές μορφές αστοχίας επιφανειακού θεμελίου (α) γενικευμένη διατμητική, (β) διάτρηση του θεμελίου εντός του εδάφους και (γ) τοπική διατμητική και οι αντίστοιχες καμπύλες φορτίου - μετατόπισης (Vesic, 1973).

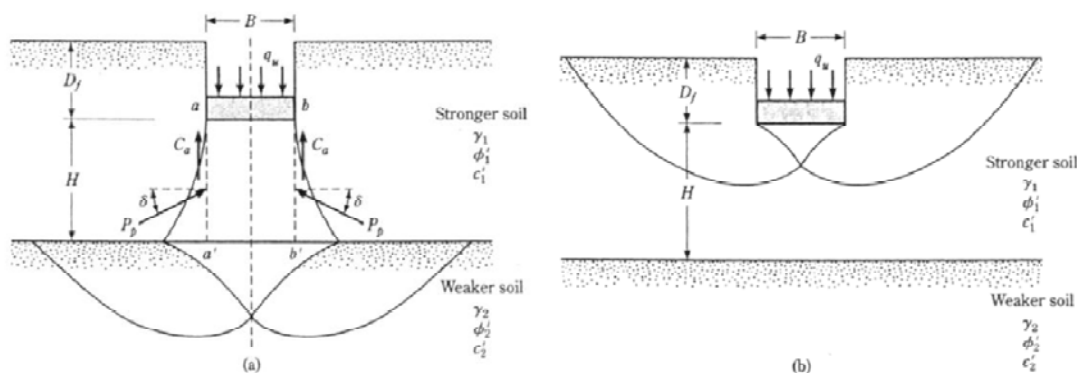
Υπό συνθήκες ρευστοποίησης, η διερεύνηση του αναπτυσσόμενου μηχανισμού αστοχίας επιφανειακών θεμελιώσεων, εδραζόμενων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με προηγούμενη βελτίωση του εδάφους, έχει πραγματοποιηθεί αριθμητικά, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της **B. Δημητριάδη (2014)**. Οι παραδοχές της αριθμητικής μεθοδολογίας καθώς και τα στάδια των αριθμητικών αναλύσεων, επεξηγούνται αναλυτικά στο κείμενο της διατριβής, επομένως δεν επαναλαμβάνονται στην παρούσα εισαγωγή. Ωστόσο, τυπικά αποτελέσματα του αναπτυσσόμενου μηχανισμού αστοχίας, καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη φορτίου - μετατόπισης από τις αριθμητικές αναλύσεις, παρατίθενται στο **Σχήμα 1.2**. Από τη σύγκριση των **Σχημάτων 1.1** και **1.2** προκύπτει ότι υπό συνθήκες ρευστοποίησης, αναπτύσσεται ένας μηχανισμός διάτρησης του θεμελίου εντός του μερικώς ρευστοποιημένου βελτιωμένου εδάφους, ενώ εντός του ρευστοποιημένου εδάφους αναπτύσσεται ένας μηχανισμός τοπικής διατμητικής αστοχίας.



Σχήμα 1.2: (α) Αναπτυσσόμενος μηχανισμός αστοχίας και (β) η αντίστοιχη καμπύλη φορτίου - μετατόπισης αριθμητικής ανάλυσης (**Δημητριάδη, 2014**).

Στα πλαίσια της ίδιας διατριβής, η εκτίμηση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης, βασίστηκε στην αναλυτική σχέση των **Meyerhof & Hanna (1978)**, η οποία τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να περιγράφει τις ιδιαίτερες συνθήκες του

προβλήματος. Υπενθυμίζεται ότι η εν λόγω αναλυτική σχέση αφορά επιφανειακές θεμελιώσεις επί δι-στρωτων εδαφικών σχηματισμών, ενώ προβλέπει την ανάπτυξη ενός μηχανισμού αστοχίας, ο οποίος καθορίζεται από το πάχος της επιφανειακής στρώσης και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.3**. Έτσι, για μικρές τιμές του πάχους βελτίωσης αναπτύσσεται ένας μηχανισμός διάτρησης της θεμελίωσης εντός του υποκείμενου ρευστοποιημένου εδάφους - punching shear failure - ενώ σε περιπτώσεις αυξημένου πάχους, ο μηχανισμός αστοχίας αναπτύσσεται εξ' ολοκλήρου εντός της βελτιωμένης ζώνης.



Σχήμα 1.3: Φέρουσα Ικανότητα επιφανειακών λωριδωτών θεμελιώσεων σε δίστρωτο εδαφικό προφίλ (Meyerhof & Hanna, 1978).

1.2 Σκοπός Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διαπιστώθηκε ότι κατά την επανεξέταση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, και τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο, η αριθμητικώς υπολογιζόμενη τιμή ήταν μικρότερη από την αναλυτικώς προσδιοριζόμενη. Από τη διερεύνηση των αριθμητικών αναλύσεων προέκυψε ότι αυτό οφειλόταν στις θεωρούμενες συνοριακές συνθήκες κατά τη φάση της μετασεισμικής φόρτισης του θεμελίου. Πιο συγκεκριμένα, η διατήρηση των συνοριακών συνθηκών των συζευγμένων κόμβων (tied node boundary conditions) κατά το στάδιο της σταδιακής αύξησης του φορτίου του θεμελίου q μετά το τέλος της διέγερσης και έως την αστοχία, είχε ως αποτέλεσμα την πρόβλεψη μικρότερων τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας.

Με δεδομένη την ανωτέρω επιρροή των συνοριακών συνθηκών στον προσδιορισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας των αριθμητικών αναλύσεων, σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η επανεξέταση των αριθμητικών

αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, επανεξετάστηκαν τα αποτελέσματα από τα ακόλουθα τρία σετ αναλύσεων: (i) θεμελιολωρίδας εδραζόμενης σε «άπειρος» εκτεινόμενη βελτιωμένη στρώση, (ii) θεμελιολωρίδας εδραζόμενης σε βελτιωμένη στρώση «πεπερασμένου» πλάτους εκατέρωθεν αυτής, (περιπτώσεις 2-Δ αριθμητικών αναλύσεων) και (iii) ορθογωνικού θεμελίου εδραζόμενου σε βελτιωμένο έδαφος (περιπτώσεις 3-Δ αριθμητικών αναλύσεων). Το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση είναι η έκφραση της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης με βάση το υπερβολικό μοντέλο. Με δεδομένη την εν λόγω καμπύλη, ακολουθεί ο προσδιορισμός της «πραγματικής» απομειωμένης φέρουσας ικανότητας της αριθμητικής ανάλυσης και στη συνέχεια η επανεξέταση των προτεινόμενων αναλυτικών σχέσεων της αριθμητικής μεθοδολογίας.

1.3 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται η προσαρμογή του υπερβολικού μοντέλου στις πραγματοποιηθείσες αριθμητικές αναλύσεις, με σκοπό τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας. Επίσης παρουσιάζονται συνοπτικά οι κατηγορίες των αριθμητικών αναλύσεων οι οποίες εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας το υπερβολικό μοντέλο.

Στο **Κεφάλαιο 3** συγκρίνονται οι νέες τιμές της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας, οι οποίες προέκυψαν από την θεώρηση του υπερβολικού μοντέλου, με τις αριθμητικές προβλέψεις. Η σύγκριση πραγματοποιείται για όλες τις κατηγορίες αριθμητικών αναλύσεων που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.

Στο **Κεφάλαιο 4**, οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των δυναμικών καθιζήσεων και της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας για τις περιπτώσεις θεμελιολωρίδας επανεξετάζονται. Μέσω κατάλληλης στατιστικής επεξεργασίας προκύπτουν αναθεωρημένες αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η αναθεώρηση των αντίστοιχων αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού για περιπτώσεις ορθογωνικών θεμελίων. Οι εν λόγω αναλυτικές εκφράσεις αφορούν τόσο συνθήκες «άπειρης» εδαφικής βελτίωσης όσο

και τις συνήθειες περιπτώσεις στην πράξη περιπτώσεις εδαφικής βελτίωσης πεπερασμένων διαστάσεων.

Τέλος στο **Κεφάλαιο 6**, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Υπολογισμός Οριακού Φορτίου με το Υπερβολικό Μοντέλο

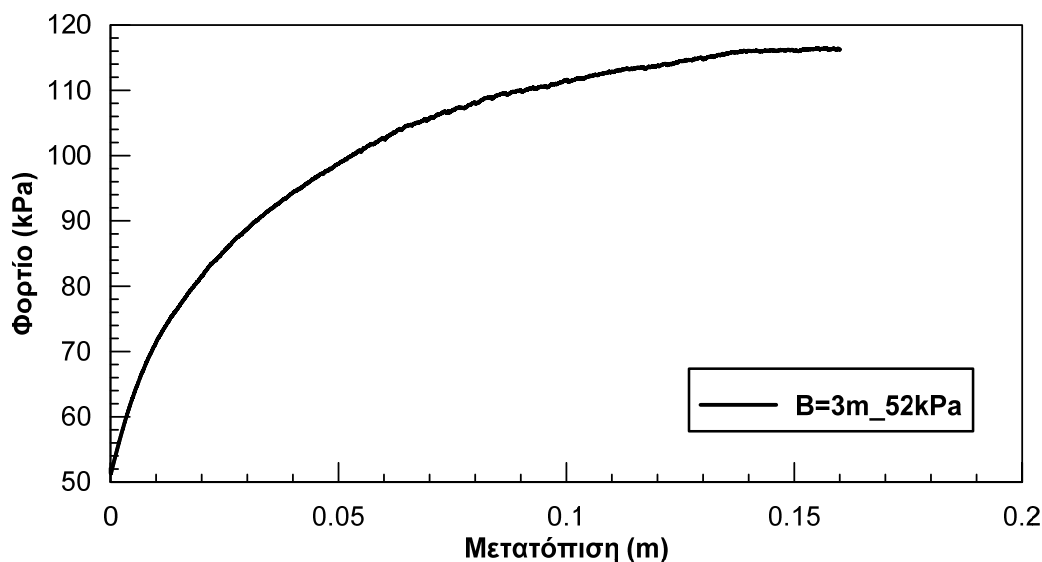
2.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η προσαρμογή του Υπερβολικού Μοντέλου για τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ρευστοποιημένου εδάφους με προηγούμενη μερική βελτίωση. Για την πραγματοποίηση του συνόλου των αριθμητικών αναλύσεων σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC v5.0 (Itasca, 2005) ενώ όπως αναφέρεται και στη συνέχεια, η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης τετραγωνικών και ορθογωνικών θεμελίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του κώδικα FLAC 3D v4.0. Συνολικά, οι αριθμητικές αναλύσεις κατηγοριοποιούνται σε 3 Ομάδες (I, ΙΙΑ και ΙΙΒ) ανάλογα με τη μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης και σχολιάζονται οι βασικότερες διαφορές τους.

2.2 Υπολογισμός οριακού φορτίου ($q_{ult,deg}$) με το υπερβολικό μοντέλο.

Ο όρος οριακό φορτίο ($q_{ult,deg}$) αναφέρεται στην απομειωμένη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης, αμέσως μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης και ενώ το έδαφος τελεί υπό καθεστώς ρευστοποίησης. Στις πραγματοποιηθείσες αριθμητικές αναλύσεις, η εν λόγω τιμή προκύπτει όταν μετά το τέλος της διέγερσης, διατηρώντας σταθερές τις υπερπιέσεις πόρων, αυξάνεται σταδιακά το στατικό φορτίο q , έως την εκδήλωση αστοχίας. Αυτό επιτυγχάνεται αναστέλλοντας την υδατική ροή και θέτοντας μια μικρή τιμή στο μέτρο συμπίεσης του νερού (μείωση από $2 \cdot 10^6$ σε 1kPa) ώστε να μην μεταβάλλονται οι υπερπιέσεις πόρων από την επιβολή επιπλέον εξωτερικού φορτίου. Στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζεται η αριθμητικώς υπολογιζόμενη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όπως προκύπτει κατά την ανωτέρω φάση φόρτισης για την περίπτωση θεμελιολωρίδας πλάτους $B=3\text{m}$ και αρχικής τάσης έδρασης $q_0=52\text{kPa}$.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τις παραδοχές της αριθμητικής μεθοδολογίας και την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων περιέχονται στη διδακτορική διατριβή της **Β. Δημητριάδη (2014)**.



Σχήμα 2.1: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για την περίπτωση πλάτος θεμελίου $B=3\text{m}$ και αρχικής κατακόρυφης τάσης $q_0=52\text{kPa}$.

Στην παρούσα εργασία, ο επαναπροσδιορισμός του οριακού φορτίου ($q_{ult,deg}$) βασίστηκε στην παρακάτω διαδικασία:

- Έγινε η υπόθεση ότι η μη γραμμική μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης μπορεί να προσεγγιστεί από μια υπερβολική σχέση με εξίσωση:

$$q = \frac{w}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{w}{q_{ult,deg}}} \quad (2.1)$$

όπου q η κατακόρυφη τάση για βύθιση w , k_{ini} η αρχική δυσκαμψία και $q_{ult,deg}$ το οριακό φορτίο. Στην περίπτωση μας, η κατακόρυφη τάση q αντιστοιχεί στο αυξανόμενο φορτίο q και η βύθιση w στην συσσωρευόμενη μετατόπιση.

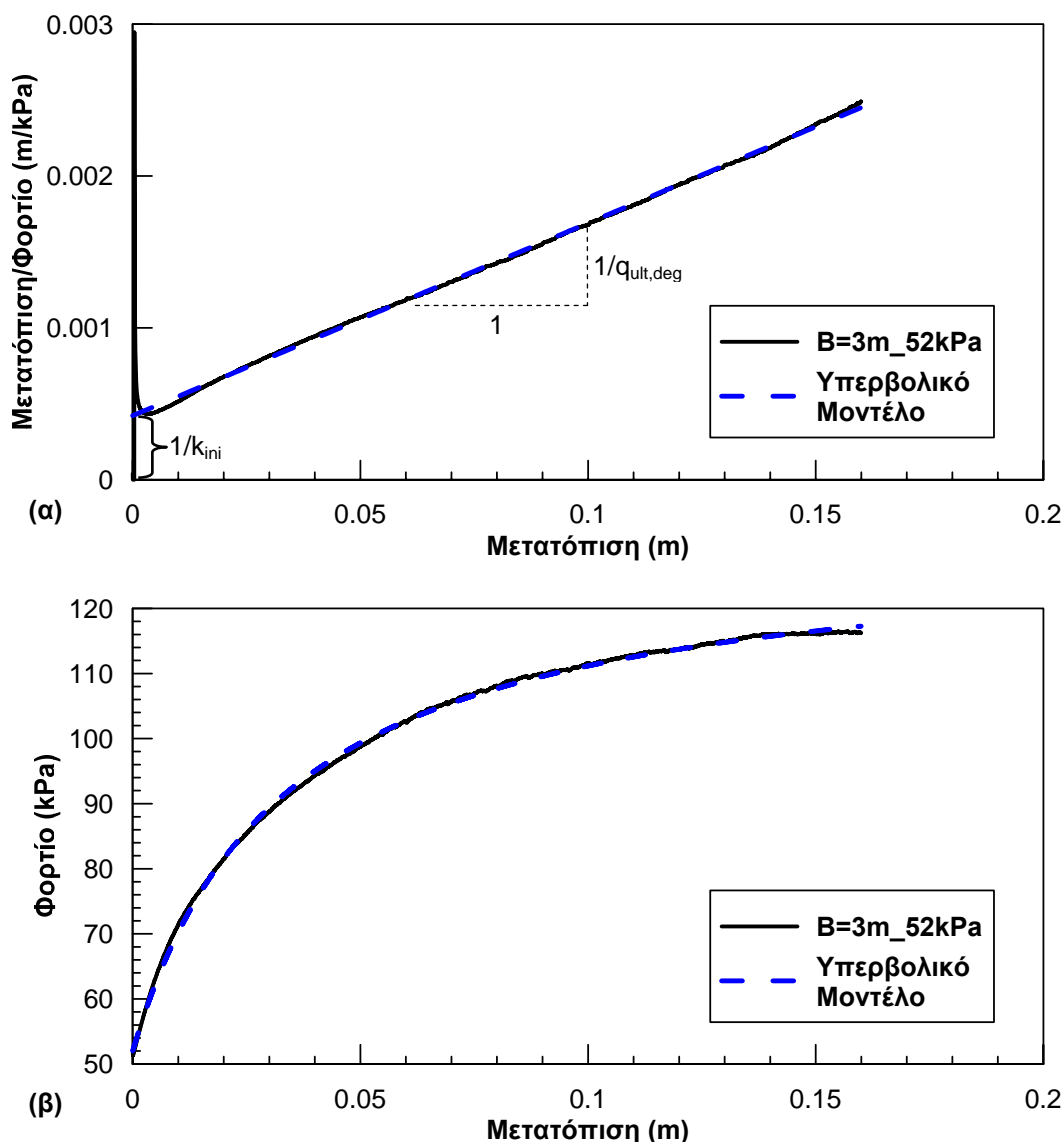
- Λύνοντας την **Εξίσωση 2.1** ως προς το λόγο βύθισης w προς κατακόρυφη τάση q , αυτή λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{w}{q} = \frac{1}{k_{ini}} + \left(\frac{1}{q_{ult,deg}} \right) \cdot w \quad (2.2)$$

Στο σύστημα συντεταγμένων με οριζόντιο άξονα w (m) και κατακόρυφο w/q (m/KPa), η **Εξίσωση 2.2** αντιστοιχεί σε ευθεία με κλίση $1/q$ και σημείο τομής με τον

κατακόρυφο άξονα το $1/k_{ini}$. Από τα δύο αυτά χαρακτηριστικά της προκύπτουσας ευθείας το ενδιαφέρον της εργασίας επικεντρώνεται στο μέγεθος q , το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί στην απομειωμένη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου και θα αναφέρεται ακολούθως ως $q_{ult,deg}$. Προς επαλήθευση της προσέγγισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με μια καμπύλη υπερβολικής μορφής, για τις τιμές των k_{ini} και $q_{ult,deg}$ που προκύπτουν αναλυτικά, κατασκευάζεται η υπερβολική καμπύλη, η οποία ακολούθως παρουσιάζεται μαζί με τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.2** για την περίπτωση που προαναφέρθηκε ($B=3m, q_0=52kPa$). Και στα δύο διαγράμματα, τα αριθμητικά αποτελέσματα φαίνονται με τη συνεχή μαύρη γραμμή ενώ η αναλυτική πρόβλεψη με διακεκομμένη μπλε γραμμή. Η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με την αναλυτική πρόβλεψη με βάση το υπερβολικό μοντέλο προκύπτει αρκετά ικανοποιητική τόσο στη μορφή της καμπύλης, όσο και σε όρους οριακού φορτίου ($q_{ult,deg}$).



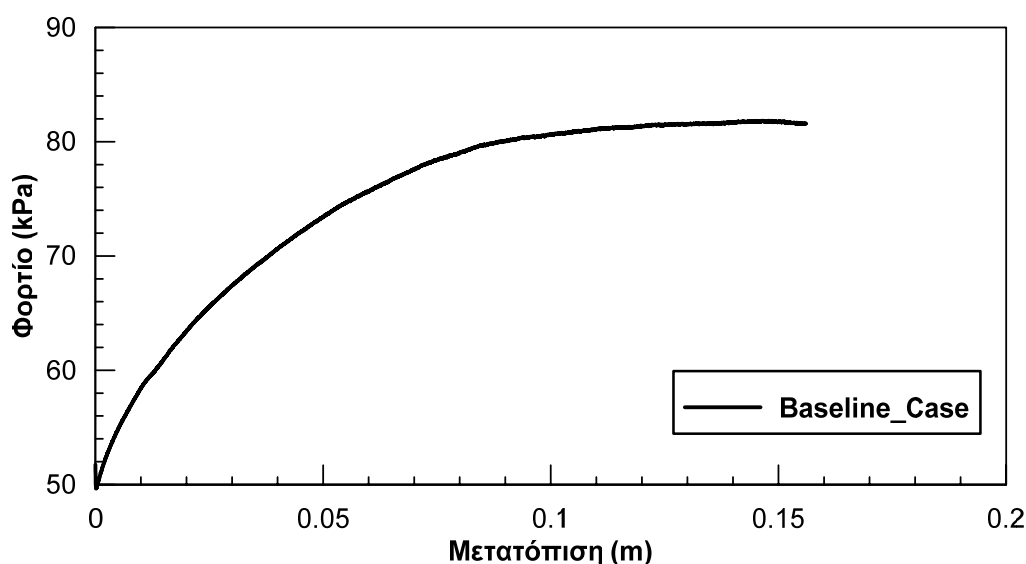
Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός των παραμέτρων k_{ini} και $q_{ult,deg}$ προσεγγίζοντας την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με μια σχέση υπερβολικής μορφής (α) σε όρους $w/q-w$ και (β) σε όρους $q-w$ για την περίπτωση $B=3m_{q_0}=52kPa$.

Η παραπάνω μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, η οποία κατά την προσαρμογή της με βάση το υπερβολικό μοντέλο παρουσιάζει μια σταθερή κλίση και συνακόλουθα μία τιμή οριακού φορτίου ($q_{ult,deg}$), δεν προκόπτει σε όλες ανεξαιρέτως τις αριθμητικές αναλύσεις. Αντίθετα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων παρατηρείται αλλαγή της αρχικής κλίσης με την αύξηση της μετατόπισης. Έτσι, σε ορισμένες περιπτώσεις η κλίση αυξάνεται (το οριακό φορτίο δηλαδή μειώνεται) με την αύξηση της μετατόπισης, ενώ σε άλλες περιπτώσεις μειώνεται, επηρεάζοντας αντιστρόφως ανάλογα το προκείμενο οριακό φορτίο $q_{ult,deg}$.

Έτσι, για την καλύτερη εupoπεία των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται, οι αναλύσεις οι οποίες παρουσιάζουν σταθερή κλίση (της ευθείας του υπερβολικού μοντέλου) κατηγοριοποιούνται στην Ομάδα I, ενώ οι υπόλοιπες στις Ομάδες ΙΑ και ΙΒ όπως αναλύεται στη συνέχεια.

- **Κατηγορία ΙΑ**

Στην κατηγορία ΙΑ περιλαμβάνονται οι περιπτώσεις στις οποίες η κλίση της καμπύλης του υπερβολικού μοντέλου αυξάνει με την αύξηση της μετατόπισης (το οριακό φορτίο, δηλαδή μειώνεται). Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την περίπτωση αναφοράς των παραμετρικών αναλύσεων, με πλάτος θεμελιολωρίδας $B=5\text{m}$, τάση έδρασης $q_0=52\text{kPa}$ και πάχος βελτιωμένης ζώνης $H_{\text{imp}}=4\text{m}$. Στο **Σχήμα 2.4** παρουσιάζεται η προσέγγιση της ίδιας καμπύλης με βάση το υπερβολικό μοντέλο.

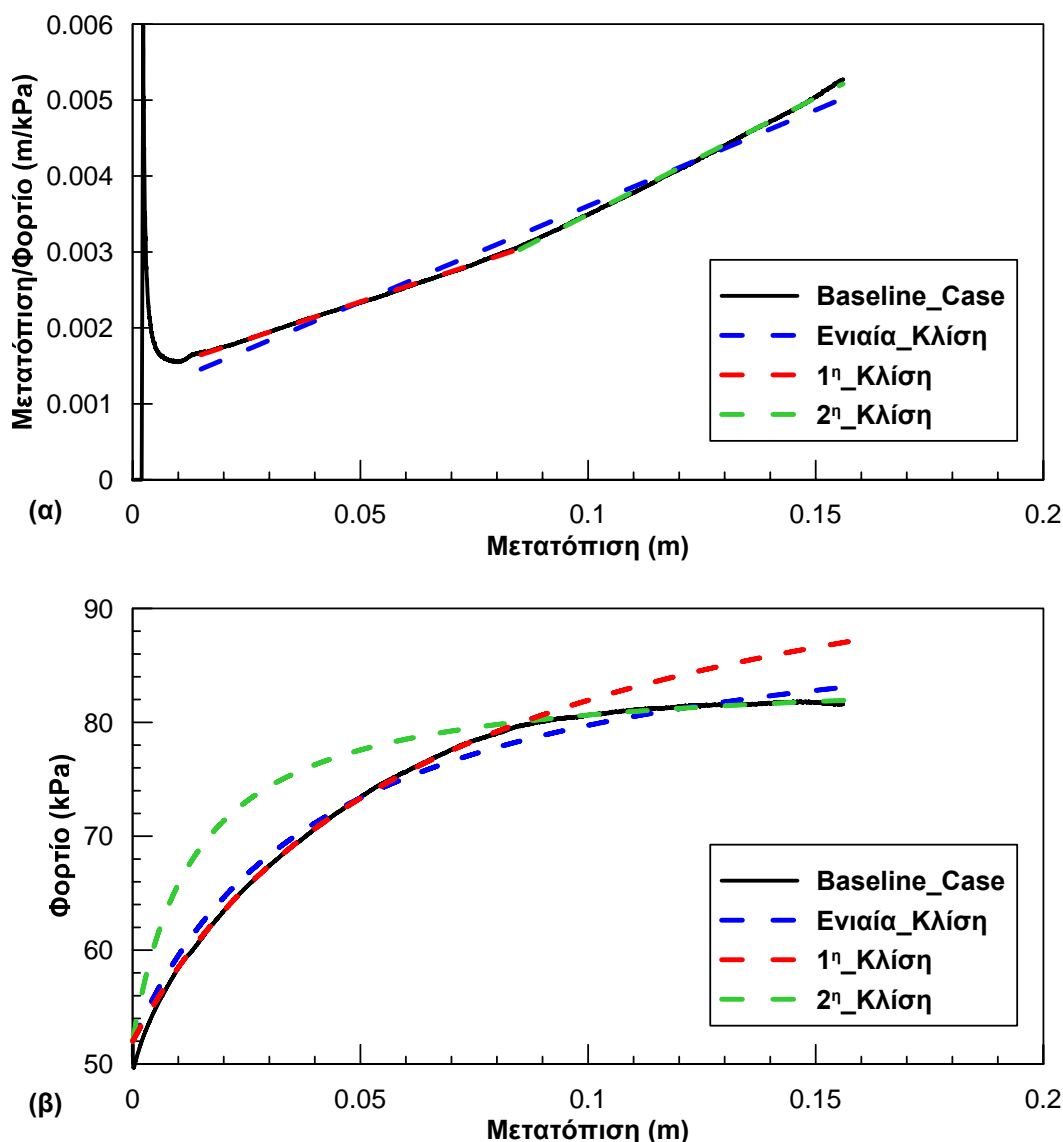


Σχήμα 2.3: Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης για την περίπτωση αναφοράς της παραμετρικής διερεύνησης.

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 2.4(α)** με μαύρη συνεχή γραμμή παρουσιάζεται η περίπτωση αναφοράς σε σύστημα συντεταγμένων μετατόπισης w στον οριζόντιο άξονα και λόγου μετατόπισης/φορτίου (w/q , m/KPa) στον κατακόρυφο. Εάν εφαρμόσουμε την γραμμική πλέον **Σχέση 2.2** σε όλο το εύρος των διαθέσιμων αριθμητικών αποτελεσμάτων (μπλε διακεκομμένη γραμμή) παρατηρούμε ότι αυτή τέμνει την μαύρη γραμμή, δηλαδή η κλίση μεταβάλλεται (εδώ αυξάνει) και συνακόλουθα και το οριακό φορτίο αλλάζει (εδώ μειώνεται). Για το λόγο αυτό,

εφαρμόζουμε δύο ακόμη φορές την **Σχέση 2.2** (κόκκινη και πράσινη διακεκομμένη γραμμή) σε δύο διαστήματα μετατοπίσεων ($\delta = 0.02$ έως 0.085m και $\delta = 0.085\text{m}$ έως 0.16m) και προσεγγίζουμε, με τα δύο αυτά ευθύγραμμα τμήματα, καλύτερα την μορφή της καμπύλης των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Το σημείο αλλαγής κλίσης θα αποκαλείται εφεξής δ_0 .

Στο **Σχήμα 2.4(β)** συγκρίνονται οι τρεις καμπύλες που προκύπτουν από τη θεώρηση του υπερβολικού μοντέλου (διακεκομμένες γραμμές) με την απόκριση που προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση (συνεχής γραμμή), σε όρους φορτίου-μετατόπισης. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή, η οποία προκύπτει από τη θεώρηση μιας ευθείας ενιαίας κλίσης (**Σχήμα 2.4(α)**), παρατηρούμε ότι δεν ακολουθεί σε κανένα διάστημα μετακινήσεων την μορφή της αριθμητικώς προκύπτουσας καμπύλης (μαύρη γραμμή), παρόλο που συμφωνεί με τα αριθμητικά αποτελέσματα ως προς το τελικό οριακό φορτίο. Η διάκριση δύο τμημάτων με διαφορετική κλίση το καθένα στο **Σχήμα 2.4(α)**, οδηγεί στη λήψη δύο αντίστοιχων καμπυλών στο **Σχήμα 2.4(β)**, οι οποίες παρουσιάζονται με κόκκινη και πράσινη διακεκομμένη γραμμή. Έτσι, για τιμές μετατοπίσεων έως 0.085m , [σημείο όπου μεταβάλλεται η κλίση (**Σχήμα 2.4(α)**), η αναλυτικώς υπολογιζόμενη καμπύλη ταυτίζεται πρακτικά με την μαύρη γραμμή (αριθμητικά αποτελέσματα). Για τιμές μετατοπίσεων μεγαλύτερες των 0.085m , η καμπύλη που προκύπτει με βάση τη δεύτερη κλίση είναι αυτή που περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αριθμητικά αποτελέσματα και προβλέπει αρκετά ικανοποιητικά το οριακό φορτίο. Η πλειονότητα των αριθμητικών αναλύσεων προέκυψε ότι περιγράφονται καλύτερα με βάση τη ανωτέρω διαδικασία και επομένως εντάχθησαν στην κατηγορία ΠΑ.

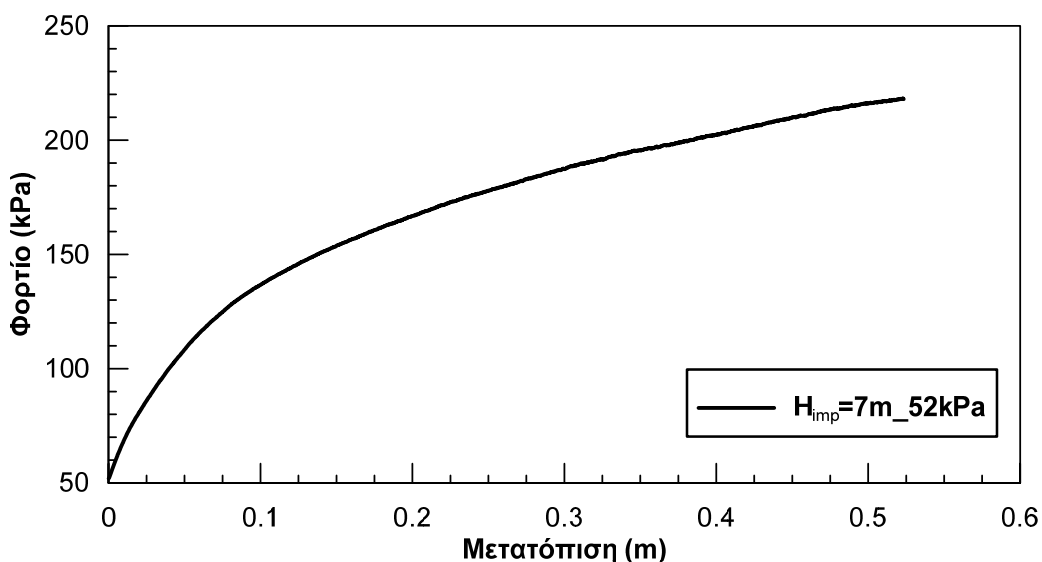


Σχήμα 2.4: Προσδιορισμός της παραμέτρου $q_{ult,deg}$ προσεγγίζοντας την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με μια υπερβολική σχέση (α) σε όρους $w/q-w$ και (β) σε όρους $q-w$ για την περίπτωση αναφοράς της παραμετρικής διερεύνησης.

- **Κατηγορία ΙΙΒ**

Στην κατηγορία ΙΙΒ περιλαμβάνονται οι περιπτώσεις στις οποίες η κλίση της καμπύλης του υπερβολικού μοντέλου μειώνεται με την αύξηση της μετατόπισης (το οριακό φορτίο, δηλαδή αυξάνεται). Στο **Σχήμα 2.5** παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για την περίπτωση πάχους βελτίωσης $H_{imp}=7m$ και κατακόρυφης αρχικής τάσης $q_0=52kPa$. Στο **Σχήμα 2.6** παρουσιάζεται η προσέγγιση της ίδιας καμπύλης με βάση το υπερβολικό μοντέλο.

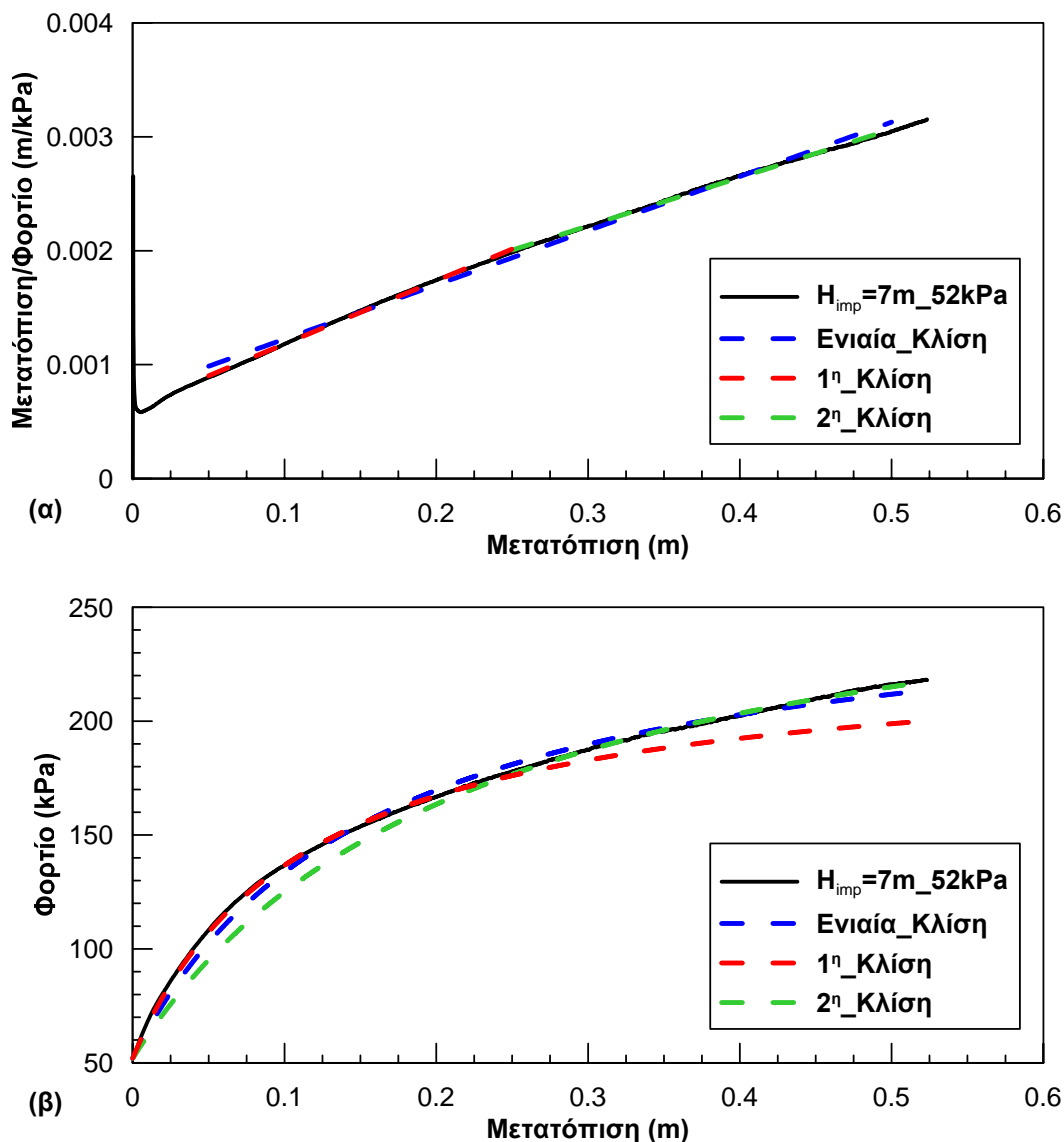
Στο **Σχήμα 2.6(α)** με μαύρη συνεχή γραμμή παρουσιάζεται η περίπτωση πάχους βελτίωσης $H_{imp}=7m$ και κατακόρυφης αρχικής τάσης $q_0=52kPa$ σε σύστημα συντεταγμένων μετατόπιση w στον οριζόντιο άξονα και λόγου μετατόπισης/φορτίου (w/q , m/KPa) στον κατακόρυφο. Εάν εφαρμόσουμε την γραμμική πλέον **Σχέση 2.2** σε όλο το εύρος των διαθέσιμων αριθμητικών αποτελεσμάτων (μπλε διακεκομμένη γραμμή) παρατηρούμε ότι αυτή τέμνει την μαύρη γραμμή, δηλαδή η κλίση μεταβάλλεται (εδώ μειώνεται) και συνακόλουθα και το οριακό φορτίο αλλάζει (εδώ αυξάνεται). Για το λόγο αυτό, εφαρμόζουμε δύο ακόμη φορές την **Σχέση 2.2** (κόκκινη και πράσινη διακεκομμένη γραμμή) σε δύο διαστήματα μετατοπίσεων ($\delta = 0.05$ έως $0.25m$ και $\delta = 0.25m$ έως $0.5m$) και προσεγγίζουμε, με τα δύο αυτά ευθύγραμμα τμήματα, καλύτερα την μορφή της καταγεγραμμένης καμπύλης.



Σχήμα 2.5: Καμπύλη Φορτίου-Μετακίνησης για την περίπτωση πάχους βελτίωσης $H_{imp}=7m$ και αρχικής κατακόρυφης τάσης $q_0=52kPa$.

Στο **Σχήμα 2.6(β)** συγκρίνονται οι τρεις καμπύλες που προκύπτουν από τη θεώρηση του υπερβολικού μοντέλου (διακεκομμένες γραμμές) με την απόκριση που προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση (συνεχής γραμμή), σε όρους φορτίου-μετατόπισης. Η μπλε διακεκομμένη, η οποία προκύπτει από τη θεώρηση μιας ευθείας ενιαίας κλίσης (**Σχήμα 2.6(α)**), παρατηρούμε ότι δεν ακολουθεί σε κανένα διάστημα μετακινήσεων την μορφή της αριθμητικώς προκύπτουσας καμπύλης (μαύρη γραμμή), παρόλο που συμφωνεί με τα αριθμητικά αποτελέσματα ως προς το τελικό οριακό φορτίο. Η διάκριση δύο τμημάτων με διαφορετική κλίση το καθένα **Σχήμα 2.6(α)**, οδηγεί στη λήψη δύο ακόμα καμπυλών στο **Σχήμα 2.6(β)**, οι οποίες παρουσιάζονται με κόκκινη και πράσινη διακεκομμένη γραμμή. Έτσι, για τιμές μετατοπίσεων έως $0.25m$, η

αναλυτικώς υπολογιζόμενη καμπύλη ταυτίζεται πρακτικά με την μαύρη γραμμή (αριθμητικά αποτελέσματα). Για τιμές μετατοπίσεων μεγαλύτερες των 0.25m, η καμπύλη που προκύπτει με βάση την δεύτερη κλίση είναι αυτή που περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αριθμητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 2.6: Προσδιορισμός της παραμέτρου $q_{ult,deg}$ προσεγγίζοντας την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με μια υπερβολική σχέση (α) σε όρους $w/q-w$ και (β) σε όρους $q-w$ για την περίπτωση $H_{imp}=7m$ και αρχικής κατακόρυφης τάσης $q_0=52kPa$.

2.3 Κατηγορίες αριθμητικών αναλύσεων που εξετάστηκαν με βάση το υπερβολικό μοντέλο.

Για την απλοποίηση του προβλήματος και την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων της παραμετρικής διερεύνησης που είχε πραγματοποιηθεί, οι αριθμητικές αναλύσεις χωρίστηκαν σε 3 Ομάδες. Οι δύο πρώτες Ομάδες, αφορούν την περίπτωση θεμελιολωρίδας σε δύο διαστάσεις με «άπειρη» και περιορισμένη εδαφική βελτίωση, και για την πραγματοποίησή τους χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC v5.0 (Itasca, 2005). Η τρίτη ομάδα αριθμητικών αναλύσεων, αφορά τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης τετραγωνικών και ορθογωνικών θεμελίων με διάφορες διαστάσεις εδαφικής βελτίωσης και πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του κώδικα FLAC 3Dv4.0.

Θεμελιολωρίδα με «άπειρη» βελτίωση (2-D)._ Οι παράμετροι του εξεταζόμενου προβλήματος χωρίστηκαν σε 2 βασικές κατηγορίες:

- **Παράμετροι φόρτισης και αντοχής.**_ Αυτές οι παράμετροι σχετίζονται με τον αναπτυσσόμενο μηχανισμό αστοχίας και περιλαμβάνουν: **(i)** την τάση της θεμελίωσης q , **(ii)** τα χαρακτηριστικά της βελτιωμένης κρούστας και κυρίως το κανονικοποιημένο, ως προς το πλάτος της θεμελίωσης, πάχος (H_{imp}/B), τη γωνία τριβής $\phi_{improved}$, η οποία εκφράζεται μέσω της σχετικής πυκνότητας της βελτιωμένης κρούστας ($D_{r,imp}$) καθώς και **(iii)** τις ιδιότητες της ρευστοποιήσιμης στρώσης, όπως το κανονικοποιημένο, ως προς το πλάτος θεμελίωσης, πάχος (Z_{liq}/B) και την αρχική σχετική πυκνότητα $D_{r,o}$.
- **Παράμετροι Διέγερσης.**_ Αυτές οι παράμετροι ελέγχουν το μέγεθος της αναπτυσσόμενης δυναμικής καθίζησης και περιλαμβάνουν: **(i)** τη μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης (a_{max}), **(ii)** τη δεσπόζουσα περίοδο της (T) και τέλος **(iii)** τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (N).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές των ανωτέρω παραμέτρων φόρτισης, αντοχής και διέγερσης, οι οποίες θεωρήθηκαν στην παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος. Η επιρροή της κάθε παραμέτρου εξετάστηκε ξεχωριστά, ενώ οι υπόλοιπες λάμβαναν την τιμή στην παρένθεση, που ήταν και η τιμή αναφοράς.

- Μέση επιβαλλόμενη τάση θεμελίωσης $q=52, 60, 70, 75, 80, 90, 100, 110\text{kPa}$ (52,100kPa).

- Σχετική πυκνότητα ρευστοποιήσιμης άμμου $D_{r,o}=35, 45, 55, 65\%$ (45%) με αντίστοιχη μεταβολή των ιδιοτήτων της βελτιωμένης ζώνης.
- Σχετική πυκνότητα ρευστοποιήσιμης άμμου $D_{r,o} = 35, 45, 55, 65\%$ με σταθερές ιδιότητες της βελτιωμένης ζώνης ($D_{r,imp}=82\%$).
- Πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $Z_{liq}=6, 8, 10, 12, 14, 16\text{m}$ (16m).
- Βάθος εφαρμογής της βελτίωσης $H_{imp}=4, 5, 6, 7 \text{ \& } 8\text{m}$ (4m).
- Πλάτος θεμελίωσης $B=3, 5, 7, 9\text{m}$ (5m).
- Μέγιστη επιτάχυνση, στη βάση της διάταξης $a_{max}=0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35\text{g}$ (0.15g).
- Αριθμός κύκλων αρμονικής διέγερσης $N=5, 10, 12, 15$ (10).
- Περίοδος διέγερσης $T=0.15, 0.20, 0.25, 0.35, 0.50\text{sec}$ (0.35sec).
- Μέγιστη τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων στη βελτιωμένη κρούστα $r_{u,max}=0.15, 0.20, 0.30, 0.40$ (0.40).
- Διαπερατότητα ρευστοποιήσιμης άμμου $k_{sand} = 6.6*10^{-5}, 6.6*10^{-6}, 1.0*10^{-5}, 1.0*10^{-4}\text{m/sec}$ ($6.6*10^{-5}\text{m/sec}$).

Στον **Πίνακα 2.1**, που ακολουθεί, συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αριθμητικών αναλύσεων για την προσομοίωση θεμελιολωρίδας με «άπειρη» εδαφική βελτίωση.

Πίνακας 2.1: Βασικά δεδομένα παραμετρικών αναλύσεων με «άπειρη» βελτίωση.

No	Analysis Name	q (kPa)	$D_{r,o}$ (%)	Z_{liq} (m)	$r_{u,max}$	H_{imp} (m)	B (m)	$a_{max}(g)$	T	N	k_{eq} ($\cdot 10^{-4} m/s$)	$D_{r,imp}$ (%)	L_{imp} (m)
1	q=52kPa	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
2	q=60kPa	60	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
3	q=70kPa	70	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
4	q=75kPa	75	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
5	q=80kPa	80	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
6	q=90kPa	90	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
7	q=100kPa	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
8	$D_{r,o}$ (%)=35	52	35	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
9	$D_{r,o}$ (%)=55	52	55	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
10	$D_{r,o}$ (%)=65	52	65	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
11	Z_{liq} =14m	52	45	14	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
12	Z_{liq} =12m	52	45	12	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
13	Z_{liq} =10m	52	45	10	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
14	Z_{liq} =8m	52	45	8	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
15	Z_{liq} =6m	52	45	6	0.4	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
16	$r_{u,max}$ =0.30 (α_s =0.09)	52	45	16	0.3	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
17	$r_{u,max}$ =0.20 (α_s =0.175)	52	45	16	0.2	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
18	$r_{u,max}$ =0.15 (α_s =0.20)	52	45	16	0.15	4	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
19	H_{imp} .-5	52	45	15	0.4	5	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
20	H_{imp} .-6	52	45	14	0.4	6	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
21	H_{imp} .-7	52	45	13	0.4	7	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
22	H_{imp} .-8	52	45	12	0.4	8	5	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
23	B=3m	52	45	16	0.4	4	3	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
24	B=7m	52	45	16	0.4	4	7	1.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
25	B=9m	52	45	16	0.4	4	9	2.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
26	B=3m	52	45	16	0.4	5	3	0.15	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
27	a_{max} =0.10g	52	45	16	0.4	4	5	0.10	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
28	a_{max} =0.20g	52	45	16	0.4	4	5	0.2	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
29	a_{max} =0.25g	52	45	16	0.4	4	5	0.25	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
30	a_{max} =0.30g	52	45	16	0.4	4	5	0.30	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
31	a_{max} =0.35g	52	45	16	0.4	4	5	0.35	0.35	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
32	T=0.15sec	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.15	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
33	T=0.25sec	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.20	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
34	T=0.50sec	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.25	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
35	T=0.50sec	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.50	10	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
36	N=5 cycl.	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	5	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
37	N=12 cycl.	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	12	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.
38	N=15 cycl.	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	15	$f(\alpha_s)$	$f(\alpha_s)$	inf.

Πίνακας 2.1(συνέχεια): Βασικά δεδομένα παραμετρικών αναλύσεων με «άπειρη» βελτίωση.

	Analysis Name	q (kPa)	D _{r,o} (%)	Z _{liq} (m)	r _{u,max}	H _{imp.} (m)	B (m)	a _{max} (g)	T	10	k _{eq.} (m/sec)	D _{r,jmp} (%)	L _{imp.} (m)
39	D _{r,o-ind} = 35%	52	35	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
40	D _{r,o-ind} = 45%	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
41	D _{r,o-ind} = 55%	52	55	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
42	D _{r,o-ind} = 65%	52	65	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
43	k _{sand} =6.6*10 ⁻⁶ m/s (α _s = 0.23)	52	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	3.09	86	inf.
44	k _{sand} =1*10 ⁻⁵ m/s (α _s = 0.2)	52	35	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	4.08	82	inf.
45	k _{sand} =1*10 ⁻⁴ m/s (α _s = 0.06)	52	55	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	12.9	58	inf.
46	D _{r_o} (%)=35	100	35	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
47	D _{r_o} (%)=55	100	55	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
48	D _{r_o} (%)=65	100	65	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
49	Z _{liq} =10m	100	45	10	0.4	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
50	Z _{liq} =8m	100	45	8	0.4	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
51	Z _{liq} =6m	100	45	6	0.4	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
52	r _{u,max} =0.30	100	45	16	0.3	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
53	r _{u,max} =0.20	100	45	16	0.2	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
54	r _{u,max} =0.15	100	45	16	0.15	4	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
55	H _{imp.} -5	100	45	15	0.4	5	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
56	H _{imp.} -6	100	45	14	0.4	6	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
57	H _{imp.} -7	100	45	13	0.4	7	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
58	H _{imp.} -8	100	45	12	0.4	8	5	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
59	B=3m	100	45	16	0.4	4	3	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
60	B=3m_H _{imp} =5m	100	45	15	0.4	5	3	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
61	B=3m_H _{imp} =6m	100	45	14	0.4	6	3	0.15	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
62	a _{max} =0.10g	100	45	16	0.4	4	5	0.10	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
63	a _{max} =0.25g	100	45	16	0.4	4	5	0.25	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
64	a _{max} =0.35g	100	45	16	0.4	4	5	0.35	0.35	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
65	T=0.15sec	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.15	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
66	T=0.25sec	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.25	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
67	T=0.50sec	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.50	10	f(α _s)	f(α _s)	inf.
68	N=5 cycl.	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	5	f(α _s)	f(α _s)	inf.
69	N=12 cycl.	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	12	f(α _s)	f(α _s)	inf.
70	N=15 cycl.	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	15	f(α _s)	f(α _s)	inf.
71	D _{r,o-ind} = 35%	100	35	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
72	D _{r,o-ind} = 45%	100	45	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
73	D _{r,o-ind} = 55%	100	55	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
74	D _{r,o-ind} = 65%	100	65	16	0.4	4	5	0.15	0.35	10	10.87	82	inf.
75	H _{imp.} -6	124	45	14	0.4	6	5	0.15	0.35	11	f(α _s)	f(α _s)	inf.
76	H _{imp.} -6	152	45	14	0.4	6	5	0.15	0.35	12	f(α _s)	f(α _s)	inf.
77	H _{imp.} -6	176	45	14	0.4	6	5	0.15	0.35	13	f(α _s)	f(α _s)	inf.
78	H _{imp.} -6	200	45	14	0.4	6	5	0.15	0.35	14	f(α _s)	f(α _s)	inf.
79	H _{imp.} -8	152	45	14	0.4	8	5	0.15	0.35	15	f(α _s)	f(α _s)	inf.
80	H _{imp.} -8	200	45	14	0.4	8	5	0.15	0.35	16	f(α _s)	f(α _s)	inf.
81	H _{imp.} -8	250	45	14	0.4	8	5	0.15	0.35	17	f(α _s)	f(α _s)	inf.
82	H _{imp.} -8	300	45	14	0.4	8	5	0.15	0.35	18	f(α _s)	f(α _s)	inf.

Θεμελιολωρίδα με περιορισμένη βελτίωση (2-D). Σ' αυτήν την Ομάδα αναλύσεων εξετάζεται η επιρροή της πλευρικής έκτασης της βελτίωσης σε λωριδωτό θεμέλιο η οποία επέβαλλε μέση κατακόρυφη τάση ίση με 52 kPa ($q_0=52\text{kPa}$). Η επιρροή της πλευρικής έκτασης της βελτίωσης εξετάστηκε συνολικά σε 12 περιπτώσεις (12 Cases), όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον **Πίνακα 2.2**. Η ομάδα αναλύσεων 1 (Case 1) αντιστοιχεί στην περίπτωση αναφοράς του προβλήματος με «άπειρη» βελτίωση με τις τιμές των βασικών παραμέτρων του προβλήματος να συνοψίζονται στον **Πίνακα 2.2**. Σε κάθε ομάδα αναλύσεων (Case) το εύρος βελτίωσης μειωνόταν σταδιακά από όλο το εύρος του καννάβου έως την ελάχιστη τιμή του L_{imp} .

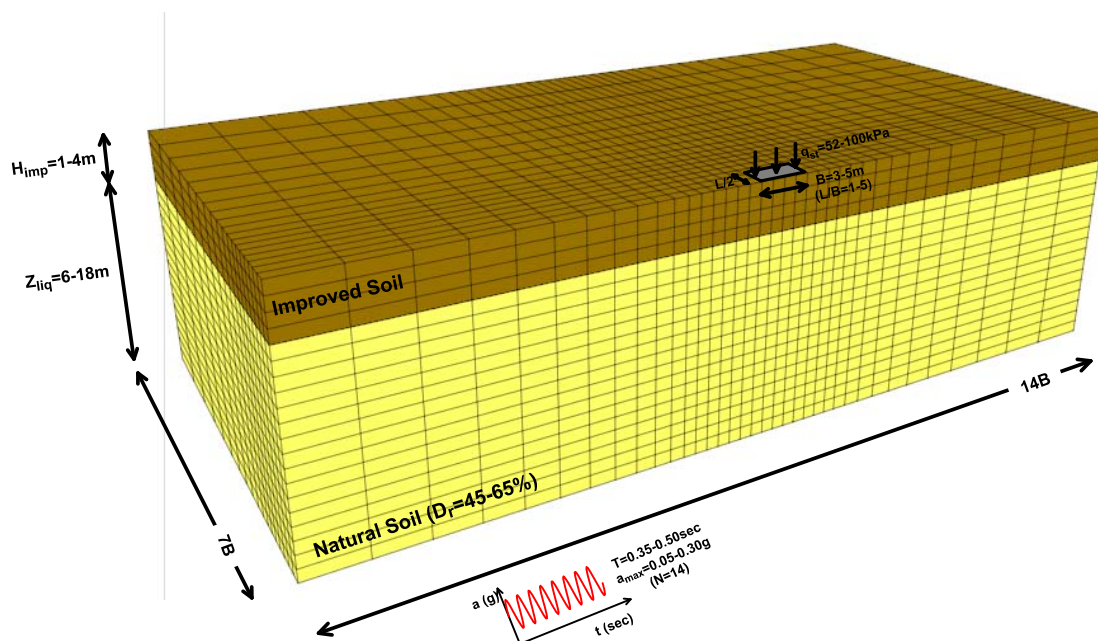
Πίνακας 2.2: Βασικά δεδομένα παραμετρικών αναλύσεων με περιορισμένη βελτίωση

CASE No.	No.	q _o (kPa)	B (m)	Dr _o (%)	a _s	Dr _{imp} (%)	H _{imp} (m)	Z _{liq} (m)	H _{natural} (m)	a _{max} (g)	N	T (sec)	L _{imp} (m)	L _{imp} /B
1	1	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	106	21.20
	2	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	98	19.60
	3	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	86	17.20
	4	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	74	14.80
	5	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	66	13.20
	6	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	60	12.00
	7	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	51	10.20
	8	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	39	7.80
	9	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	27	5.40
	10	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	10	2.00
	11	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	6	1.20
2	12	52	3	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	63	21.00
	13	52	3	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	51	17.00
	14	52	3	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	37	12.33
	15	52	3	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	22	7.30
	16	52	3	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	12	4.00
	17	52	3	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.35	4	1.30
3	18	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	106	21.20
	19	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	98	19.60
	20	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	86	17.20
	21	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	74	14.80
	22	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	66	13.20
	23	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	60	12.00
	24	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	51	10.20
	25	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	39	7.80
	26	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	27	5.40
	27	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	10	2.00
28	52	5	55	0.08	70	4	16	20	0.15	10	0.35	6	1.20	
4	29	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	106	21.20
	30	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	98	19.60
	31	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	86	17.20
	32	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	74	14.80
	33	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	66	13.20
	34	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	51	10.20
	35	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	27	5.40
	36	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	10	2.00
	37	52	5	45	0.07	60	4	8	12	0.15	10	0.35	6	1.20
5	38	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	106	21.20
	39	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	98	19.60
	40	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	86	17.20
	41	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	74	14.80
	42	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	66	13.20
	43	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	51	10.20
	44	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	27	5.40
	45	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	10	2.00
	46	52	5	45	0.07	60	4	12	16	0.15	10	0.35	6	1.20
6	47	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	106	21.20
	48	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	98	19.60
	49	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	86	17.20
	50	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	74	14.80
	51	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	66	13.20
	52	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	60	12.00
	53	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	51	10.20
	54	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	39	7.80
	55	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	27	5.40
	56	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	10	2.00
	57	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.3	10	0.35	6	1.20

Πίνακας 2.2(συνέχεια): Βασικά δεδομένα παραμετρικών αναλύσεων με περιορισμένη βελτίωση.

CASE No.	No.	q _o (kPa)	B (m)	Dr _o (%)	a _s	Dr _{imp} (%)	H _{imp} (m)	Z _{liq} (m)	H _{natural} (m)	a _{max} (g)	N	T (sec)	L _{imp} (m)	L _{imp} /B
7	58	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	106	21.20
	59	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	98	19.60
	60	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	86	17.20
	61	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	74	14.80
	62	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	66	13.20
	63	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	51	10.20
	64	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	27	5.40
	65	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	10	2.00
	66	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	5	0.35	6	1.20
8	67	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	106	21.20
	68	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	98	19.60
	69	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	86	17.20
	70	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	74	14.80
	71	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	66	13.20
	72	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	60	12.00
	73	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	51	10.20
	74	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	39	7.80
	75	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	27	5.40
	76	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	10	2.00
	77	52	5	45	0.07	60	4	16	20	0.15	10	0.5	6	1.20
9	78	52	5	45	0.07	60	6	14	20	0.15	10	0.35	106	21.20
	79	52	5	45	0.07	60	6	14	20	0.15	10	0.35	74	14.80
	80	52	5	45	0.07	60	6	14	20	0.15	10	0.35	66	13.20
	81	52	5	45	0.07	60	6	14	20	0.15	10	0.35	51	10.20
	82	52	5	45	0.07	60	6	14	20	0.15	10	0.35	27	5.40
	83	52	5	45	0.07	60	6	14	20	0.15	10	0.35	10	2.00
	84	52	5	45	0.07	60	6	14	20	0.15	10	0.35	6	1.20
	10	85	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	124
86		52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	100	20.00
87		52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	76	15.20
88		52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	67	13.40
89		52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	49	9.80
90		52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	28	5.60
91		52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	10	2.00
92		52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.15	10	0.35	6	1.20
11	93	52	5	45	0.115	68	6	14	20	0.3	10	0.35	106	21.20
	94	52	5	45	0.115	68	6	14	20	0.3	10	0.35	74	14.80
	95	52	5	45	0.115	68	6	14	20	0.3	10	0.35	66	13.20
	96	52	5	45	0.115	68	6	14	20	0.3	10	0.35	51	10.20
	97	52	5	45	0.115	68	6	14	20	0.3	10	0.35	27	5.40
	98	52	5	45	0.115	68	6	14	20	0.3	10	0.35	10	2.00
	99	52	5	45	0.115	68	6	14	20	0.3	10	0.35	6	1.20
12	100	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	124	24.80
	101	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	100	20.00
	102	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	76	15.20
	103	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	67	13.40
	104	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	49	9.80
	105	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	28	5.60
	106	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	10	2.00
	107	52	5	45	0.13	72	8	12	20	0.3	10	0.35	6	1.20

Ορθογωνικά θεμέλια (3-D). Για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαστάσεων της θεμελίωσης στο εξεταζόμενο πρόβλημα πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Όπως και προηγουμένως, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με «άπειρη» αλλά και περιορισμένη εδαφική βελτίωση. Όλες οι τρισδιάστατες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την ίδια αριθμητική μεθοδολογία με τις αντίστοιχες δισδιάστατες, με τη μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκε η τρισδιάστατη έκδοση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC (FLAC3D v4.0).



Σχήμα 2.7: Χρησιμοποιούμενος κάρναβος των τρισδιάστατων αναλύσεων και το εύρος των κυριότερων παραμέτρων που εξετάστηκαν.

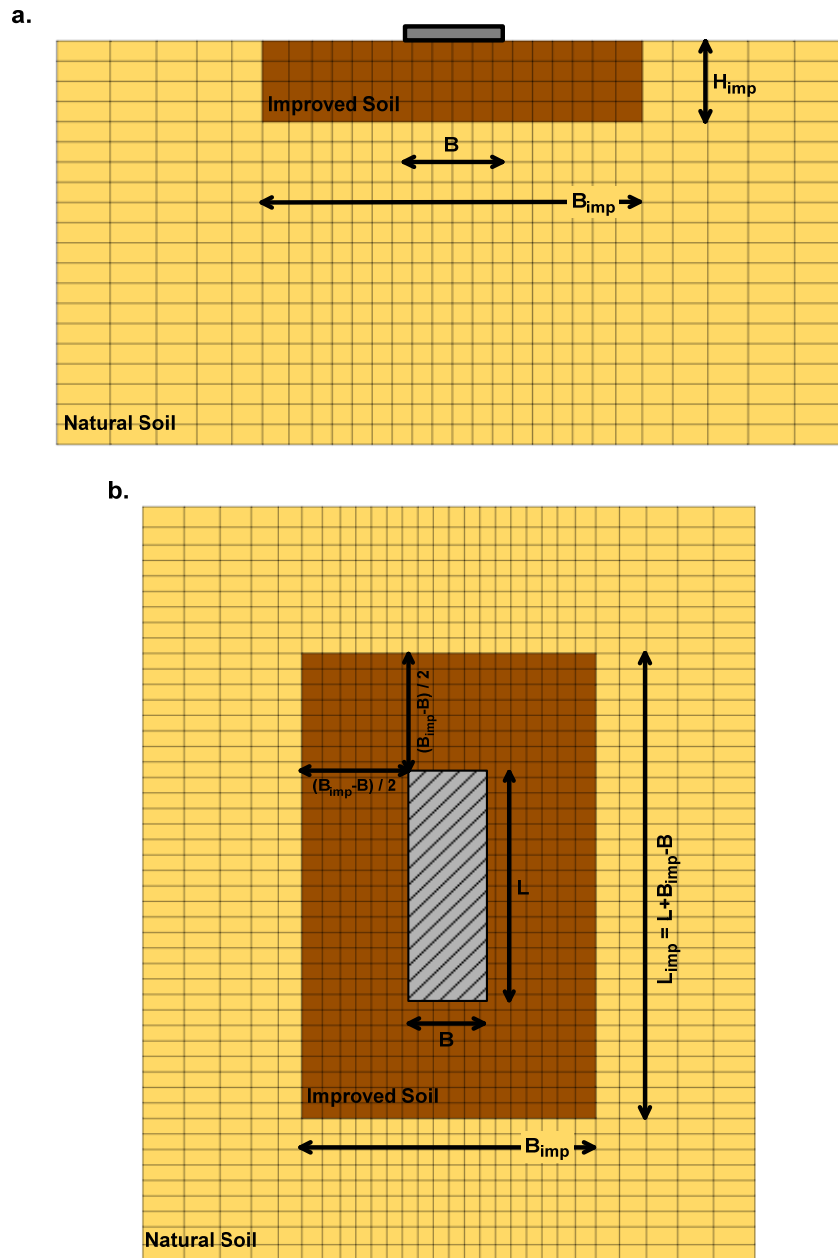
Στο **Σχήμα 2.7** παρουσιάζεται ο χρησιμοποιούμενος κάρναβος των αριθμητικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, ένα ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους και μήκους $B \times L$ ($L \geq B$), υπό κατακόρυφη αρχική τάση q_{st} , εδράζεται στην επιφάνεια ρευστοποιήσιμης άμμου Nevada, η οποία έχει βελτιωθεί επιφανειακά σε πάχος H_{imp} . Στη βάση της διάταξης, όπως και στις δισδιάστατες αναλύσεις, επιβάλλεται αρμονική διέγερση πλάτους a_{max} , περιόδου T και N κύκλων.

Στον **Πίνακα 2.3** συνοψίζονται τα κυριότερα δεδομένα των τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με «άπειρη» την έκταση της βελτιωμένης ζώνης. Με γκρι χρώμα σημειώνονται κάθε φορά οι παράμετροι και οι τιμές που διαφοροποιούνται σε σχέση με την ανάλυση αναφοράς ($\alpha/\alpha: 1$).

Πίνακας 2.3: Βασικά δεδομένα 3-διάστατων αναλύσεων με «άπειρη» βελτίωση.

α/α	D_r (%)	q (kPa)	B (m)	L (m)	H_{imp} (m)	Z_{liq} (m)	T (sec)	a_{max} (g)	N
1	45	52	5	5	2	18	0.35	0.15	10
2	45	75	5	5	2	18	0.35	0.15	10
3	45	100	5	5	2	18	0.35	0.15	10
4	65	52	5	5	2	18	0.35	0.15	10
5	65	100	5	5	2	18	0.35	0.15	10
6	45	52	5	5	1	18	0.35	0.15	10
7	45	52	5	5	3	18	0.35	0.15	10
8	65	52	5	5	3	18	0.35	0.15	10
9	45	52	5	5	4	18	0.35	0.15	10
10	65	52	5	5	4	18	0.35	0.15	10
11	65	100	5	5	4	18	0.35	0.15	10
12	45	52	3	3	2	18	0.35	0.15	10
13	45	52	3	3	4	18	0.35	0.15	10
14	65	52	3	3	2	18	0.35	0.15	10
15	45	52	5	5	2	18	0.35	0.05	10
16	45	52	5	5	2	18	0.35	0.30	10
17	45	52	5	5	2	18	0.35	0.15	5
18	45	52	5	5	2	18	0.50	0.15	10
19	45	52	5	5	2	6	0.35	0.15	10
20	45	52	5	5	2	12	0.35	0.15	10
21	45	52	5	9	2	18	0.35	0.15	10
22	45	52	5	9	4	18	0.35	0.15	10
23	65	52	5	9	2	18	0.35	0.15	10
24	45	100	5	9	2	18	0.35	0.15	10
25	65	52	5	9	4	18	0.35	0.15	10
26	45	52	5	15	2	18	0.35	0.15	10
27	45	52	5	15	4	18	0.35	0.15	10
28	65	52	5	15	2	18	0.35	0.15	10
29	45	100	5	15	2	18	0.35	0.15	10
30	65	52	5	15	4	18	0.35	0.15	10
31	45	52	5	21	2	18	0.35	0.15	10
32	45	52	5	21	4	18	0.35	0.15	10
33	65	52	5	21	2	18	0.35	0.15	10
34	45	100	5	21	2	18	0.35	0.15	10
35	65	52	5	21	4	18	0.35	0.15	10
36	45	52	5	25	2	18	0.35	0.15	10
37	45	52	5	25	4	18	0.35	0.15	10
38	65	52	5	25	2	18	0.35	0.15	10
39	45	100	5	25	2	18	0.35	0.15	10
40	45	52	5	25	2	18	0.35	0.15	10
41	65	52	5	25	4	18	0.35	0.15	10

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαστάσεων της βελτίωσης στη σεισμική απόκριση του θεμελίου, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με πεπερασμένες διαστάσεις βελτιωμένης ζώνης. Έτσι, για το ορθογωνικό θεμέλιο διαστάσεων $L \times B$ (μήκος \times πλάτος), η βελτιωμένη ζώνη ορίστηκε σε όρους πάχους H_{imp} , μήκους L_{imp} και πλάτους B_{imp} . Η γεωμετρία της βελτίωσης απεικονίζεται καλύτερα στο **Σχήμα 2.8** (τόσο σε όψη όσο και σε κάτοψη).



Σχήμα 2.8: Γεωμετρία της βελτιωμένης ζώνης για ορθογωνικό θεμέλιο με λόγο μήκους προς πλάτος $L/B=3.0$: (a) σε πλάγια όψη και (b) σε κάτοψη.

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με περιορισμένη εδαφική βελτίωση.

Πίνακας 2.4: Βασικά δεδομένα 3-διάστατων αναλύσεων με περιορισμένη βελτίωση.

α/α	B (m)	L (m)	H_{imp} (m)	Z_{liq} (m)	B_{imp} (m)
1-5	5	5	2	18	6
					10
					20
					30
					40
6-10	5	5	4	16	6
					10
					20
					30
					40
11-15	5	9	2	18	6
					10
					20
					30
					40
16-20	5	9	4	16	6
					10
					20
					30
					40
21-25	5	15	2	18	6
					10
					20
					30
					40
26-30	5	15	4	16	6
					10
					20
					30
					40
31-36	5	21	2	18	6
					10
					20
					30
					40
37-42	5	21	4	16	6
					10
					20
					30
					40
					50

2.4 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ο τρόπος επεξεργασίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων με βάση το υπερβολικό μοντέλο για την περιγραφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης. Με βάση τη μορφή της προκύπτουσας καμπύλης, οι αριθμητικές αναλύσεις χωρίστηκαν σε τρεις (3) Ομάδες (I, ΙΑ και ΙΒ). Η βασικότερη διαφορά ανάμεσα στις τρεις κατηγορίες είναι η κλίση της **Εξίσωσης 2.2**, η οποία στις αναλύσεις της Ομάδας:

- **I**: παραμένει σταθερή (το οριακό φορτίο είναι σταθερό).
- **ΙΑ**: αυξάνεται (το οριακό φορτίο μειώνεται).
- **ΙΒ**: μειώνεται (το οριακό φορτίο αυξάνεται).

Ο υπολογισμός της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με το υπερβολικό μοντέλο πραγματοποιήθηκε για τρία διαφορετικά σεντ αναλύσεων:

- 2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας με «άπειρη» βελτίωση
- 2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας με περιορισμένη βελτίωση
- 3-Δ αναλύσεις ορθογωνικού θεμελίου με «άπειρη» και περιορισμένη βελτίωση

Κεφάλαιο 3

Σύγκριση τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο με τις αριθμητικές προβλέψεις

3.1 Γενικά

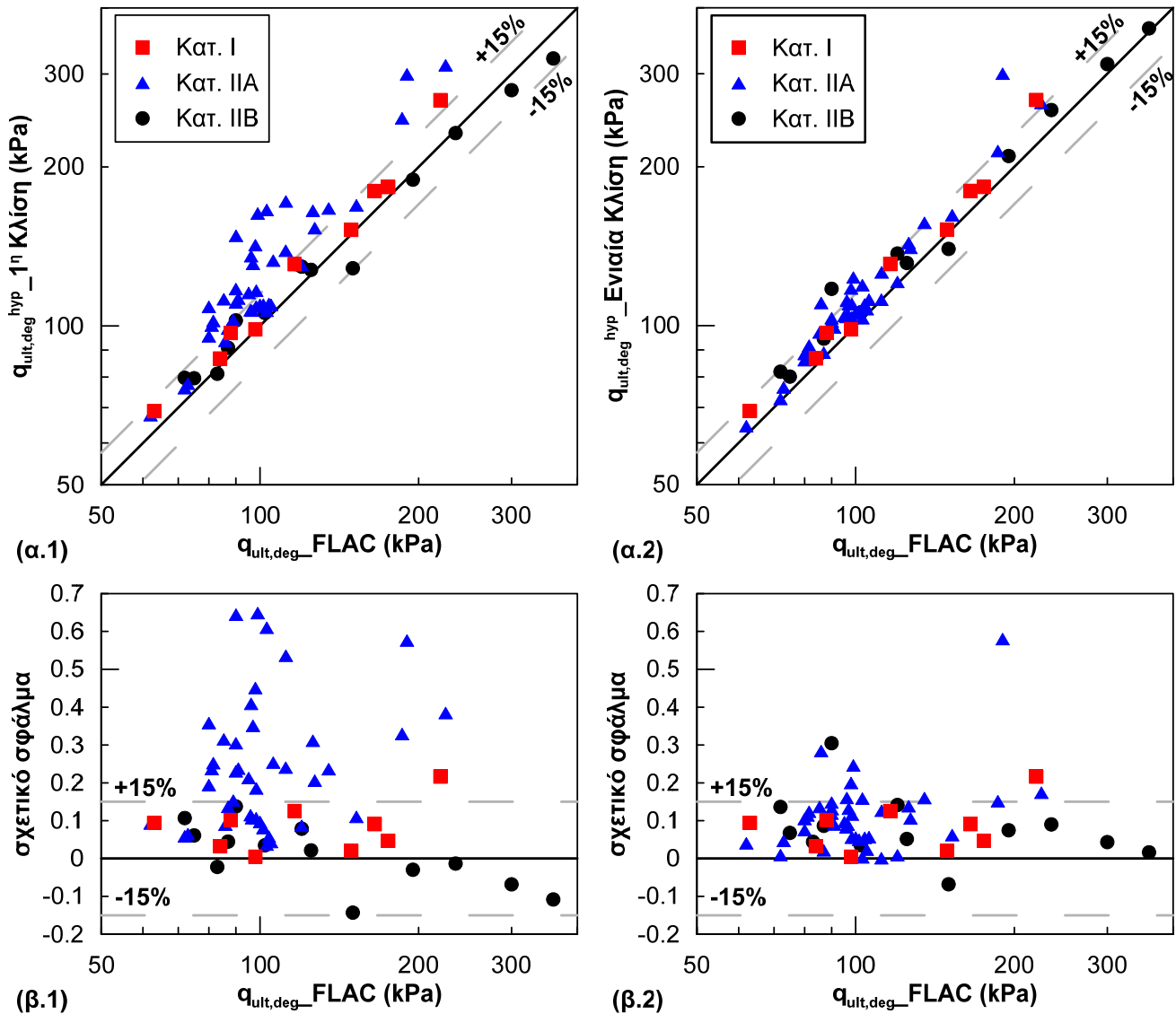
Μετά την επεξεργασία των αριθμητικών αναλύσεων, με βάση την προσέγγιση της υπερβολικής μορφής της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, οι νέες τιμές της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας που προέκυψαν ($q_{ult,deg}^{hyp}$) συγκρίνονται με τις αριθμητικές προβλέψεις (q_{ult,deg_FLAC}). Η αξιολόγηση αυτή πραγματοποιείται για όλες τις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο.

3.2 Αξιολόγηση απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hyp}$) για δισδιάστατες αναλύσεις με «άπειρη» βελτίωση.

Στο **Σχήμα 3.1** συγκρίνονται οι τιμές της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hyp}$) όπως αυτές προέκυψαν από την 1^η και την Ενιαία κλίση κατά την εφαρμογή του υπερβολικού μοντέλου, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, με τις αριθμητικές προβλέψεις (q_{ult,deg_FLAC}) για τις αναλύσεις με «άπειρη» βελτίωση. Η σύγκριση γίνεται τόσο σε (α) απόλυτες τιμές όσο και σε όρους (β) σχετικού σφάλματος. Όπως παρατηρούμε, σε όλες τις περιπτώσεις (με εξαίρεση ορισμένες αναλύσεις της Κατηγορίας IIΒ) οι νέες τιμές της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας προκύπτουν μεγαλύτερες από τις αριθμητικές προβλέψεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη θεώρηση του υπερβολικού μοντέλου το οριακό φορτίο ορίζεται για άπειρη μετατόπιση ενώ στις διαθέσιμες αναλύσεις η μετατόπιση ήταν προφανώς πεπερασμένη. Με βάση αυτήν την διαπίστωση προκύπτει ότι για τις αναλύσεις Κατηγορίας I (κόκκινα τετραγώνια) οι προκύπτουσες τιμές της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο δεν διαφοροποιούνται σημαντικά σε σχέση με τις αριθμητικές προβλέψεις. Εξάλλου, στις αναλύσεις Κατηγορίας I παρατηρείται μία Ενιαία κλίση η οποία εξηγεί την ανωτέρω εικόνα.

Κεφάλαιο 3: Σύγκριση τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο με τις αριθμητικές προβλέψεις

Αντίθετα, αυτό δεν συμβαίνει για τις αναλύσεις Κατηγορίας ΙΙΑ (μπλε τριγωνάκια), στις οποίες η απομειωμένη φέρουσα ικανότητα, σύμφωνα με την κλίση του πρώτου τμήματος της ευθείας του υπερβολικού μοντέλου (βλ. Σχήμα 2.4) διαφέρει σημαντικά από την αριθμητική πρόβλεψη ενώ παρουσιάζει και μεγάλη διασπορά ($\pm 17\%$). Ωστόσο, εάν θεωρήσουμε την Ενιαία Κλίση (Σχήμα 3.1(2)) παρατηρούμε ότι το σύνολο των σημείων Κατηγορίας ΙΙΑ συγκεντρώνονται γύρω από την διαγώνιο και μάλιστα παρατηρείται και σημαντικότερα μικρότερη διασπορά ($\pm 10\%$).



Σχήμα 3.1: Σύγκριση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο $q_{ult,deg}^{hyp}$, όπως προκύπτει από την 1^η κλίση (1) και την ενιαία κλίση (2), με τις αριθμητικές προβλέψεις q_{ult,deg_FLAC} σε όρους (α) απόλυτης τιμής (kPa) και (β) σχετικού σφάλματος για τις διοδιάστατες περιπτώσεις «άπειρης» βελτίωσης.

3.3 Αξιολόγηση απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hyp}$) για διοδιάστατες αναλύσεις με περιορισμένη βελτίωση.

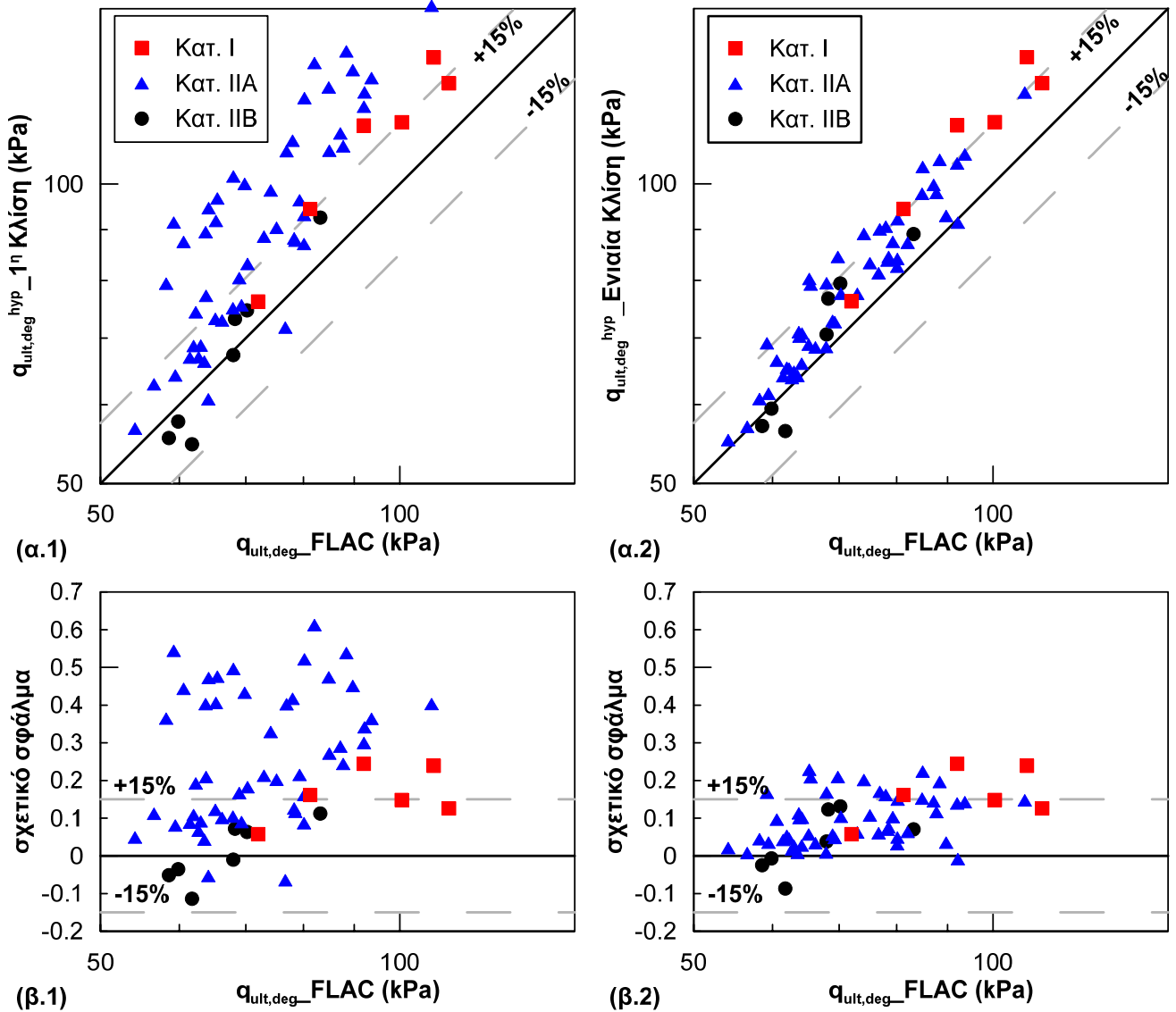
Για την αξιολόγηση των τιμών της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας για τις διοδιάστατες αναλύσεις με περιορισμένη εδαφική βελτίωση παρουσιάζεται, στο **Σχήμα 3.2** η σύγκριση με τις αριθμητικές προβλέψεις. Πιο συγκεκριμένα, στα αριστερά διαγράμματα (1) συγκρίνονται οι τιμές της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας που προκύπτουν από την 1^η κλίση, με τις αριθμητικές προβλέψεις (q_{ult,deg_FLAC}), τόσο σε (α) 1-1 σύγκριση, όσο και (β) σε όρους σχετικού σφάλματος. Αντίστοιχα είναι και τα δεξιά διαγράμματα (2) με τη μόνη διαφορά ότι για τον προσδιορισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας έχει χρησιμοποιηθεί η ενιαία κλίση, σύμφωνα με το υπερβολικό μοντέλο.

Για τις αναλύσεις Κατηγορίας I (κόκκινα τετραγωνάκια) παρατηρούμε ότι η θεώρηση του υπερβολικού μοντέλου προβλέπει αρκετά ικανοποιητικά το αριθμητικά υπολογιζόμενο φορτίο με τάση υπερεκτίμησής του (περίπου 10%), ενώ η διασπορά είναι μικρή ($\pm 7\%$). Οι παραπάνω διαπιστώσεις ισχύουν ανεξάρτητα από τη θεώρηση 1^{ης} ή ενιαίας κλίσης, αφού σ' αυτές τις αναλύσεις (Κατ. I) οι υπολογιζόμενες τιμές απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ταυτίζονται.

Για τις αναλύσεις Κατηγορίας IIΑ (μπλε τριγωνάκια) η σύγκριση των προκυπτόντων φορτίων είναι αρκετά ικανοποιητική μόνο για την θεώρηση ενιαίας κλίσης του υπερβολικού μοντέλου (**Σχήμα 3.2(2)**) (διασπορά: $\pm 7\%$). Αντίθετα, οι αντίστοιχες τιμές σύμφωνα με την κλίση του πρώτου τμήματος της ευθείας του υπερβολικού μοντέλου, διαφοροποιούνται αρκετά από τις αριθμητικές προβλέψεις, κάτι το οποίο αποτυπώνεται και στη σημαντική διασπορά του σχετικού σφάλματος ($\pm 17\%$).

Τέλος, στις αναλύσεις Κατηγορίας IIΒ (μαύρα κυκλάκια) οι τιμές απομειωμένης φέρουσας ικανότητας, σύμφωνα με το υπερβολικό μοντέλο ($q_{ult,deg}^{hyp}$) βρίσκονται σε συμφωνία με τις αριθμητικές προβλέψεις, καθώς δεν παρατηρούνται μεγάλες τιμές σχετικού σφάλματος.

Κεφάλαιο 3: Σύγκριση τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο με τις αριθμητικές προβλέψεις



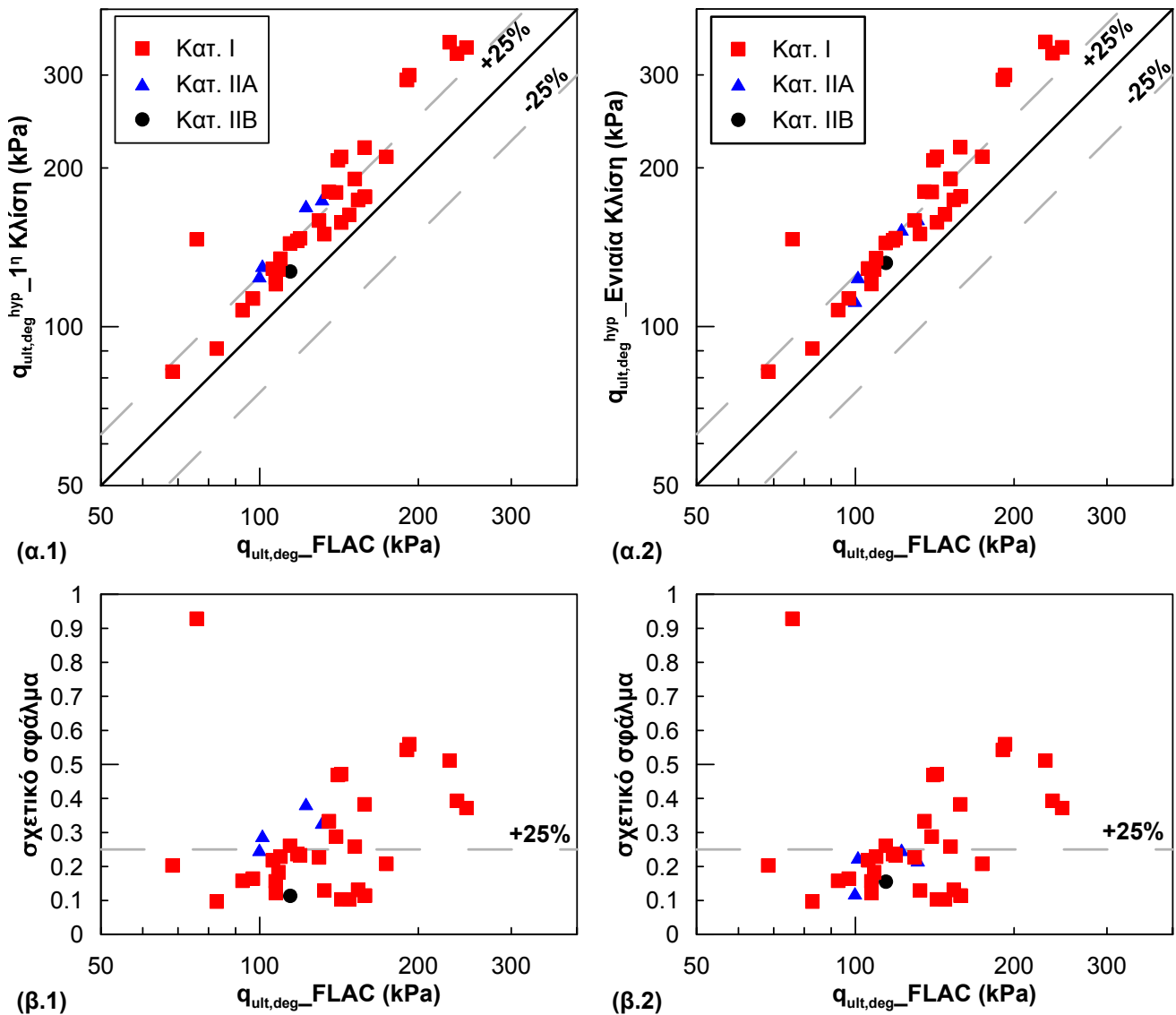
Σχήμα 3.2: Σύγκριση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο $q_{ult,deg}^{hyp}$, όπως προκύπτει από την 1^η κλίση (1) και την ενιαία κλίση (2), με τις αριθμητικές προβλέψεις q_{ult,deg_FLAC} σε όρους (α) απόλυτης τιμής (kPa) και (β) σχετικού σφάλματος για τις διαδιάστατες περιπτώσεις περιορισμένης βελτίωσης.

3.4 Αξιολόγηση απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hyp}$) για τρι-διάστατες αναλύσεις.

Στα Σχήματα 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των τιμών της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο με τις αριθμητικές προβλέψεις των 3-Δ αναλύσεων, για «άπειρη» και περιορισμένη εδαφική βελτίωση αντίστοιχα. Αξίζει να σχολιαστεί ότι σε σχέση με τις διδιάστατες αναλύσεις, οι τρισδιάστατες ήταν αριθμητικά περισσότερο ευσταθείς και με ομαλότερη απόκριση σε όρους φορτίου-μετατόπισης. Έτσι, κατά την προσαρμογή της εξίσωσης 2.2 στα αριθμητικά αποτελέσματα δεν παρουσιάστηκε, στην πλειονότητα των αναλύσεων, μεταβολή της κλίσης με την αύξηση της μετατόπισης. Γι' αυτό οι περισσότερες από τις τρισδιάστατες αναλύσεις ανήκουν στην Κατηγορία I (ενιαία σταθερή κλίση) όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα σχήματα (κόκκινα τετραγώνια).

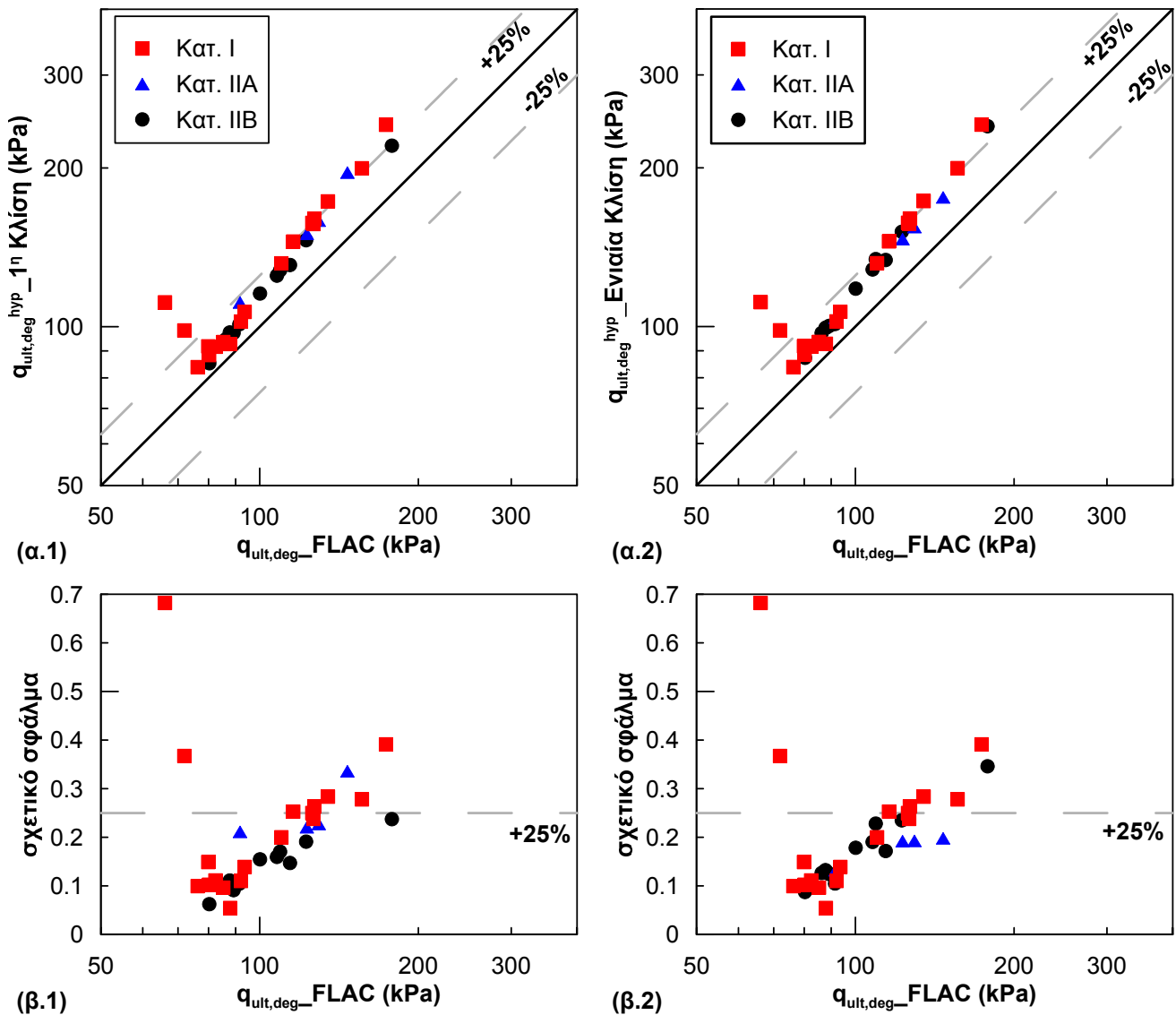
Σημαντική είναι επίσης η παρατήρηση ότι σ' όλες τις τρισδιάστατες αναλύσεις ορθογωνικών θεμελίων που παρουσιάζονται, η μέγιστη μετατόπιση στην οποία υποβλήθηκε το θεμέλιο ήταν τα 10cm. Αντίθετα στις διδιάστατες αναλύσεις, που προηγήθηκαν, η μετατόπιση ήταν αρκετά μεγαλύτερη και αυξανόταν μέχρις ότου η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης να οριζοντιωθεί (δηλαδή μικρή αύξηση του φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μεγάλη αύξηση της μετατόπισης). Ο περιορισμός της μέγιστης μετατόπισης, στις τρισδιάστατες αναλύσεις, εξηγεί γιατί η αριθμητικώς υπολογιζόμενη απομειωμένη φέρουσα ικανότητα (q_{ult,deg_FLAC}) είναι συστηματικά μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές με βάση το υπερβολικό μοντέλο ($q_{ult,deg}^{hyp}$).

Κεφάλαιο 3: Σύγκριση τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο με τις αριθμητικές προβλέψεις



Σχήμα 3.3: Σύγκριση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο $q_{ult,deg}^{hyp}$, όπως προκύπτει από την 1^η κλίση (1) και την ενιαία κλίση (2), με τις αριθμητικές προβλέψεις q_{ult,deg_FLAC} σε όρους (α) απόλυτης τιμής (kPa) και (β) σχετικού σφάλματος για τις τριοδιάστατες περιπτώσεις «άπειρης» βελτίωσης.

Κεφάλαιο 3: Σύγκριση τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο με τις αριθμητικές προβλέψεις



Σχήμα 3.4: Σύγκριση της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με βάση το υπερβολικό μοντέλο $q_{ult,deg}^{hyp}$, όπως προκύπτει από την 1^η κλίση (1) και την ενιαία κλίση (2), με τις αριθμητικές προβλέψεις q_{ult,deg_FLAC} σε όρους (α) απόλυτης τιμής (kPa) και (β) σχετικού σφάλματος για τις τριοδιάστατες περιπτώσεις περιορισμένης βελτίωσης.

3.5 Σχολιασμός/ Συμπεράσματα

Η θεώρηση της υπερβολικής μορφής της καμπύλης φορτίου - μετατόπισης εξετάστηκε ως προς την ορθότητά της στο Κεφάλαιο αυτό, με τη σύγκριση των νέων τιμών απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ($q_{ult,deg}^{hyp}$) με τις αριθμητικές προβλέψεις (q_{ult,deg_FLAC}). Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν, η υπόθεση ενιαίας κλίσης του υπερβολικού μοντέλου έχει σαν αποτέλεσμα οι προκύπτουσες τιμές απομειωμένης φέρουσας ικανότητας να είναι συγκρίσιμες με τις αριθμητικές προβλέψεις. Αυτό οφείλεται στη θεώρηση μέρους της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης μετά το σημείο αλλαγής κλίσης για τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας. Συνεπώς, οι υπολογιζόμενες τιμές είναι σε ένα βαθμό επηρεασμένες από τον τρόπο προσομοίωσης της μετασεισμικής απόκρισης του θεμελίου.

Αυτή η συμφωνία των οριακών τιμών διαφοροποιείται εάν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας η τιμή που προκύπτει από την κλίση του πρώτου τμήματος της καμπύλης.

Σημαντική είναι και η παρατήρηση ότι οι ίδιες διαπιστώσεις ισχύουν για τις αναλύσεις τόσο με «άπειρη» αλλά και με περιορισμένη βελτίωση, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι οι διαστάσεις της βελτιωμένης ζώνης δεν επιδρούν στον προσδιορισμό της τιμής της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας, όπως αυτή προκύπτει από την κλίση του πρώτου τμήματος της ευθείας του υπερβολικού μοντέλου ($q_{ult,deg}^{hyp_1η}$ Κλίση).

Η σύγκριση των τιμών της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας με τις αριθμητικές προβλέψεις, οδήγησε στη διαπίστωση ότι η αριθμητικώς υπολογιζόμενη απομειωμένη φέρουσα ικανότητα ήταν μικρότερη από την πραγματική. Αυτό οφείλεται στη διατήρηση των συνοριακών συνθηκών των συζευγμένων κόμβων (tied node boundary conditions) κατά το στάδιο της σταδιακής αύξησης του φορτίου του θεμελίου q μετά το τέλος της διέγερσης και έως την αστοχία. Πλέον, με τις νέες τιμές που προέκυψαν από την **κλίση του πρώτου τμήματος** της ευθείας του υπερβολικού μοντέλου, οι αναλυτικές σχέσεις της αριθμητικής μεθοδολογίας σχεδιασμού επιφανειακών θεμελιώσεων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος επανεξετάζονται στα επόμενα Κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα επαναδιατυπώνονται: (i) η συσχέτιση δυναμικής καθίζησης - απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας και (ii) οι αναλυτικές σχέσεις της επιρροής, της έκτασης της βελτίωσης στα παραπάνω μεγέθη.

Κεφάλαιο 4

Βελτιωμένες σχέσεις υπολογισμού: 2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας

4.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αριθμητικών αναλύσεων θεμελιολωρίδας (2-Δ). Αρχικά, παρουσιάζεται η επίδραση των διαφορετικών παραμέτρων του προβλήματος στις δυναμικές καθιζήσεις και τον απομειωμένο μετα-σεισμικό συντελεστή ασφαλείας. Στη συνέχεια, επιχειρείται η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στις δυναμικές καθιζήσεις και εξάγονται νέες αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό αυτών. Στο τέλος του Κεφαλαίου επαναδιατυπώνονται οι αναλυτικές σχέσεις για την επίδραση των διαστάσεων της βελτιωμένης ζώνης στα δύο εξεταζόμενα μεγέθη.

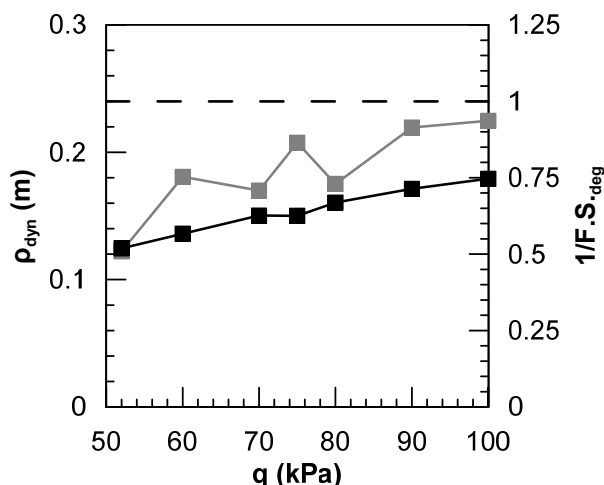
4.2 Αναλυτική έκφραση κατά Newmark.

Από την συστηματική εξέταση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, μαζί με παρατηρήσεις από σχετικά πειράματα σε φυγοκεντριστή και σε σεισμική τράπεζα, καταδεικνύεται ότι η εξέλιξη των δυναμικών καθιζήσεων δεν είναι αποτέλεσμα της συμπόκνωσης της άμμου, λόγω της δόνησης που προκαλείται από το σεισμό, αλλά της ενεργοποίησης ενός μηχανισμού αστοχίας τύπου ολισθαίνοντος στερεού κατά Newmark. Σύμφωνα με αυτόν, η καθίζηση συσσωρεύεται κάθε φορά που η επιβαλλόμενη επιτάχυνση υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός μηχανισμού αστοχίας πρισματικής μορφής. Ο εν λόγω μηχανισμός αποδεικνύεται ότι αναπτύσσεται δύο φορές κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου φόρτισης, σε κάθε πλευρά του θεμελίου. Η σύνδεση των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων με έναν τέτοιο μηχανισμό αστοχίας, μπορεί να οδηγήσει στη συσχέτιση των καθιζήσεων με τον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η επίδραση κάθε ομάδας παραμέτρων (παράμετροι φόρτισης, διέγερσης, γεωμετρίας και εδαφικών ιδιοτήτων) τόσο στην καθίζηση της θεμελίωσης (ρ_{dyn}) όσο και στην αντίστροφη τιμή του απομειωμένου συντελεστή

ασφαλείας ($F.S._{deg}$), με βάση τις τιμές της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας όπως αυτές προκύπτουν από την **1^η Κλίση**, κατά τη θεώρηση του υπερβολικού μοντέλου.

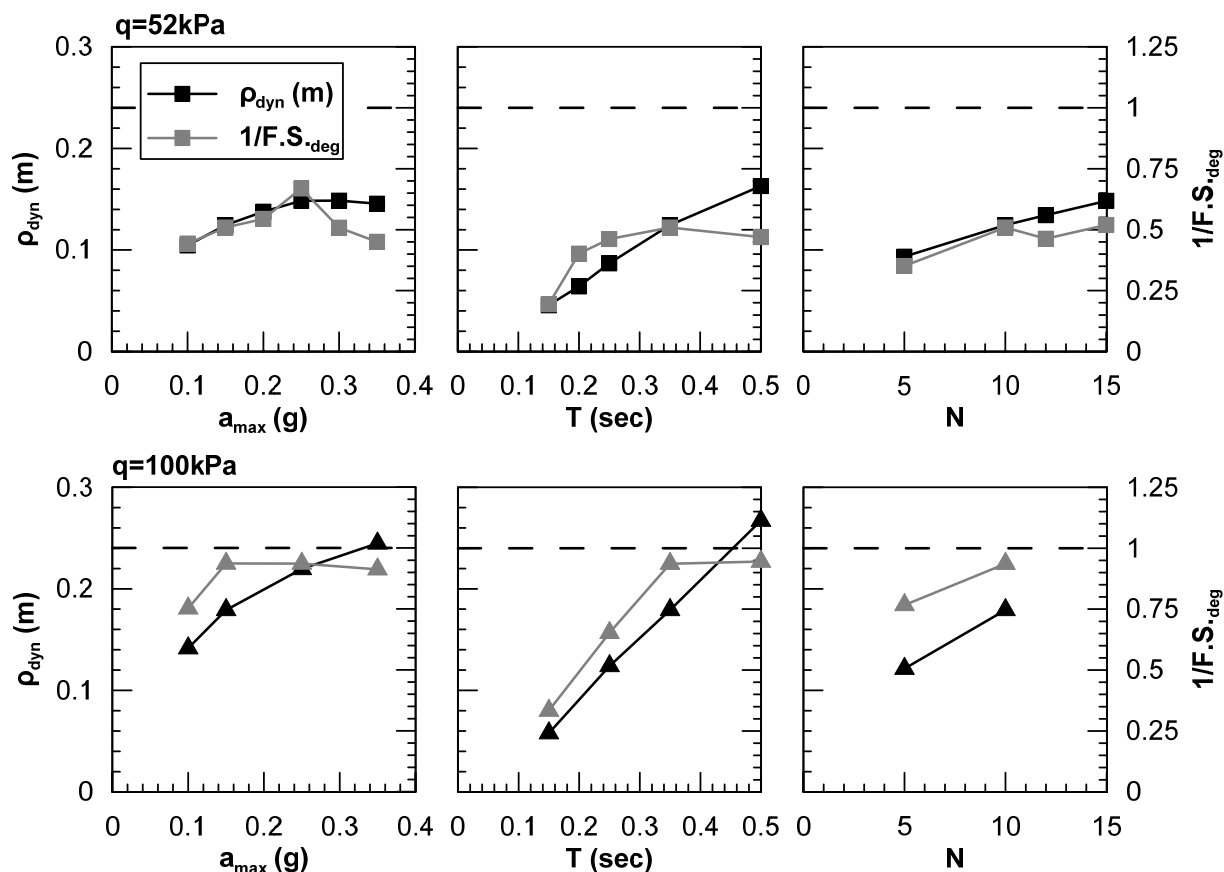
Στο **Σχήμα 4.1** φαίνεται η επίδραση της αρχικά επιβαλλόμενης τάσης θεμελίωσης στην καθίζηση και τον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τάσης αυξάνεται η δυναμική καθίζηση (μαύρη γραμμή) που αναπτύσσεται με περίπου γραμμική μορφή, ενώ αντίστοιχα μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας (γκρι γραμμή).

Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζεται η επιρροή των παραμέτρων διέγερσης που περιγράφησαν προηγουμένως (a_{max} , T και N), για τις δύο τάσεις αναφοράς $q=52\text{kPa}$ και 100kPa . Όπως διακρίνεται, οι παράμετροι αυτοί ελέγχουν κυρίως το μέγεθος της δυναμικής καθίζησης και σε μικρότερο βαθμό την απομειωμένη φέρουσα ικανότητα.



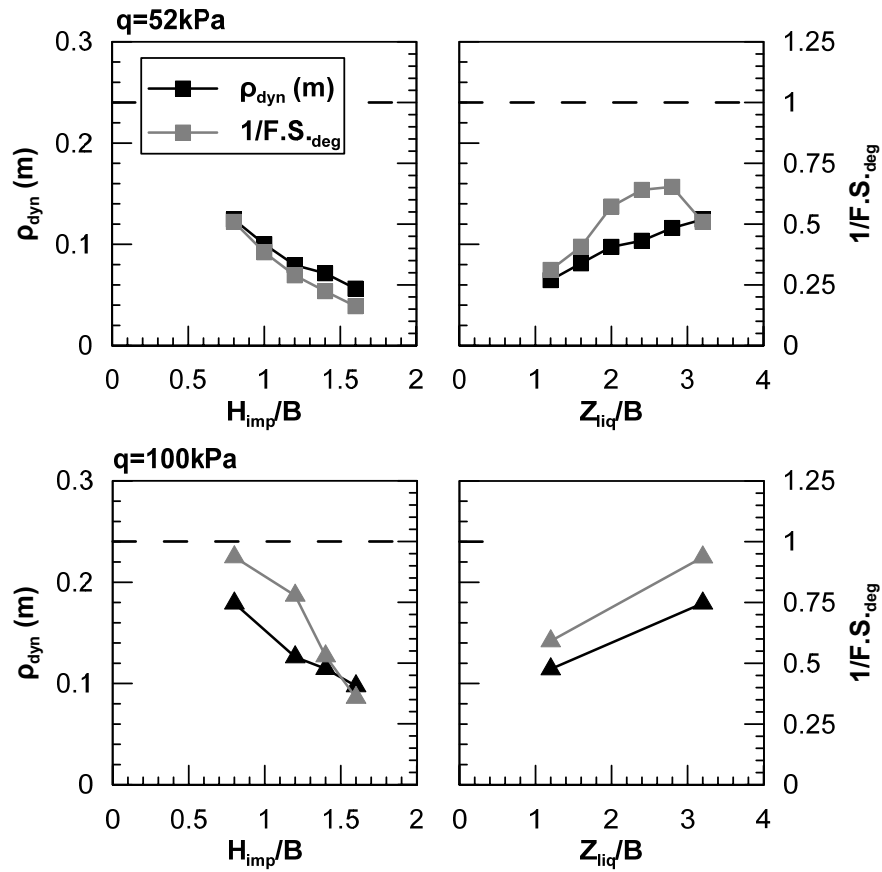
Σχήμα 4.1: Επίδραση της τάσης έδρασης q , στις δυναμικές καθιζήσεις (ρ_{dyn}) και τον αντίστροφο του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας ($1/F.S._{deg}$).

Στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζεται η επιρροή των παραμέτρων γεωμετρίας του προβλήματος, ήτοι του πάχους βελτίωσης H_{imp} και του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης Z_{liq} , κανονικοποιημένα ως προς το πλάτος θεμελίωσης B , για τις ίδιες τιμές τάσης έδρασης.

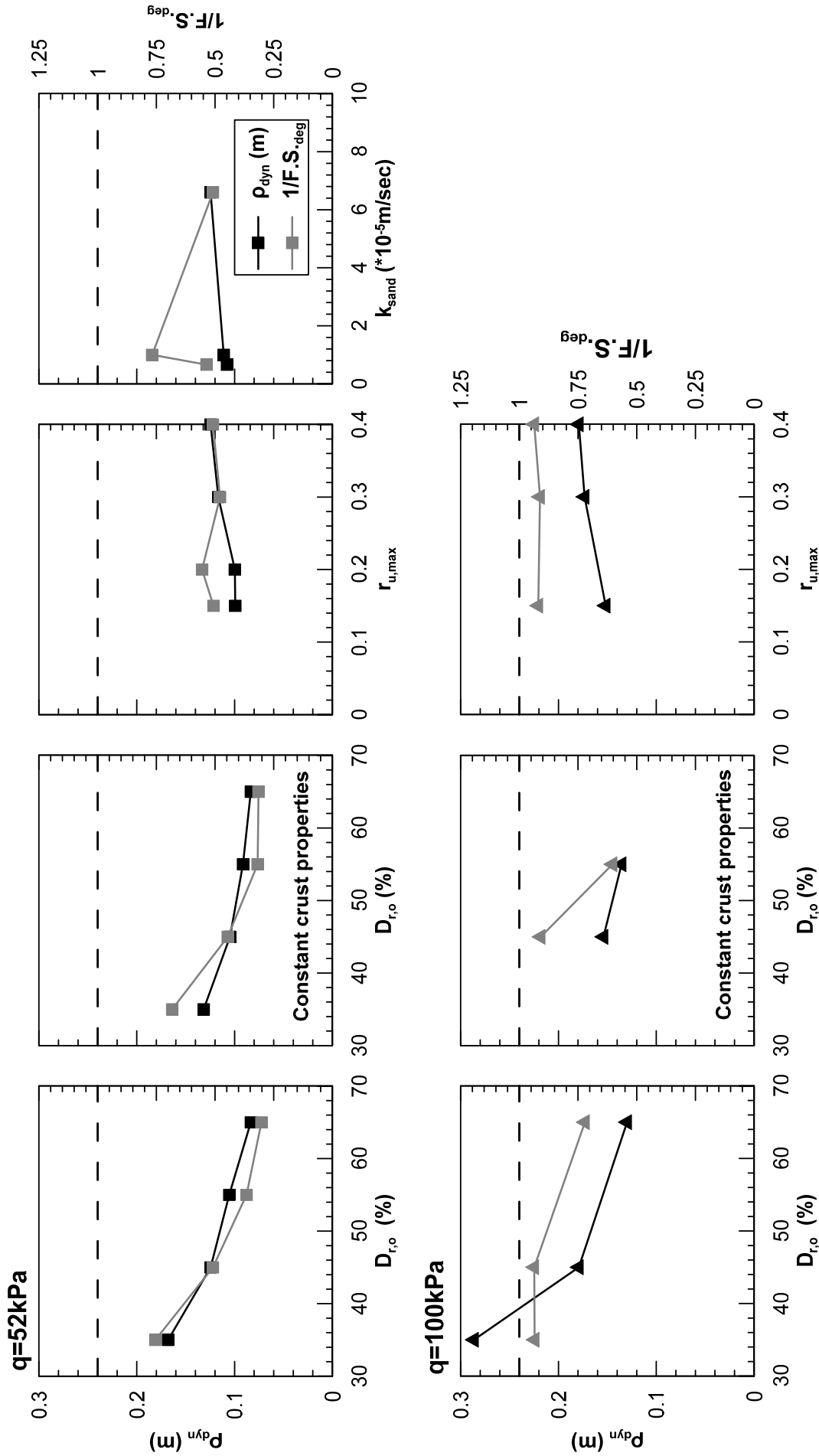


Σχήμα 4.2: Επιρροή των παραμέτρων διέγερσης, στις δυναμικές καθιζήσεις ρ_{dyn} (με μαύρο) και στο αντίστροφο του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας $1/F.S.^{deg}$ (με γκρι), για τις δύο στάθμες φόρτισης ($q=52kPa$ και $100kPa$).

Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζεται η επιρροή των εδαφικών χαρακτηριστικών στις καθιζήσεις και τον αντίστροφο του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας. Συγκεκριμένα, γίνεται σαφές ότι παράγοντες όπως η διαπερατότητα της άμμου (k_{sand}) και ο μέγιστος λόγος υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσεται στην βελτιωμένη κρούστα ($r_{u,max}$) έχουν μόνο μικρή έως αμελητέα επίδραση τόσο στην καθίζηση όσο και στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας. Για την επιρροή της σχετικής αρχικής πυκνότητας της άμμου ($D_{r,o}$), φαίνεται ότι η επίδρασή της είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η κατακόρυφη επιβαλλόμενη τάση θεμελίωσης.



Σχήμα 4.3: Επιρροή των παραμέτρων γεωμετρίας της διάταξης, στις δυναμικές καθιζήσεις ρ_{dyn} (με μαύρο) και στο αντίστροφο του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας $1/F.S.^{\text{deg}}$ (με γκρι), για τις δύο στάθμες φόρτισης ($q=52\text{kPa}$ και 100kPa).



Σχήμα 4.4: Επιρροή των εδαφικών ιδιοτήτων, στις δυναμικές καθιζήσεις ρ_{dyn} (με μάρκο) και στο αντίστροφο του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας $1/F.S.^{deg}$ (με γκρι), για τις δύο στάθμες φόρτισης ($q=52\text{kPa}$ και 100kPa).

Η παράλληλη παρουσίαση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στις δυναμικές καθιζήσεις και στη απομειωμένη φέρουσα ικανότητα, κατέδειξε ότι η αρχική κατακόρυφη τάση q καθώς και τα γεωμετρικά και εδαφικά χαρακτηριστικά έχουν την ίδια επιρροή στα δύο εξεταζόμενα μεγέθη (ρ_{dyn} και $1/F.S.deg$). Έτσι, ο υπολογισμός της αναπτυσσόμενης καθιζήσης μπορεί να γίνει ως συνάρτηση της τιμής οριακού φορτίου, μειώνοντας τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών του προβλήματος.

Για τις περιπτώσεις αρμονικής φόρτισης, ο μηχανισμός αστοχίας ολισθαίνοντος στερεού οδηγεί σε συσσώρευση μετατοπίσεων, οι οποίες είναι ανάλογες με την εξίσωση (4.1):

$$\frac{v_{max}^2}{a_{max}} N = a_{max} T^2 N \quad (4.1)$$

Όπου:

v_{max} : μέγιστη ταχύτητα της διέγερσης [m/s]

a_{max} : μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης [m/s²]

T : περίοδος της διέγερσης [sec]

N : αριθμός των κύκλων της διέγερσης

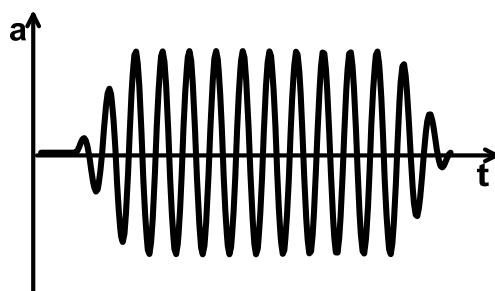
Η εξίσωση (4.1) μπορεί να μετασχηματιστεί στην (4.2):

$$a_{max} T^2 N = \pi^2 \int_{t=0}^{t=N \cdot T} |v(t)| dt \quad (4.2)$$

Όπου:

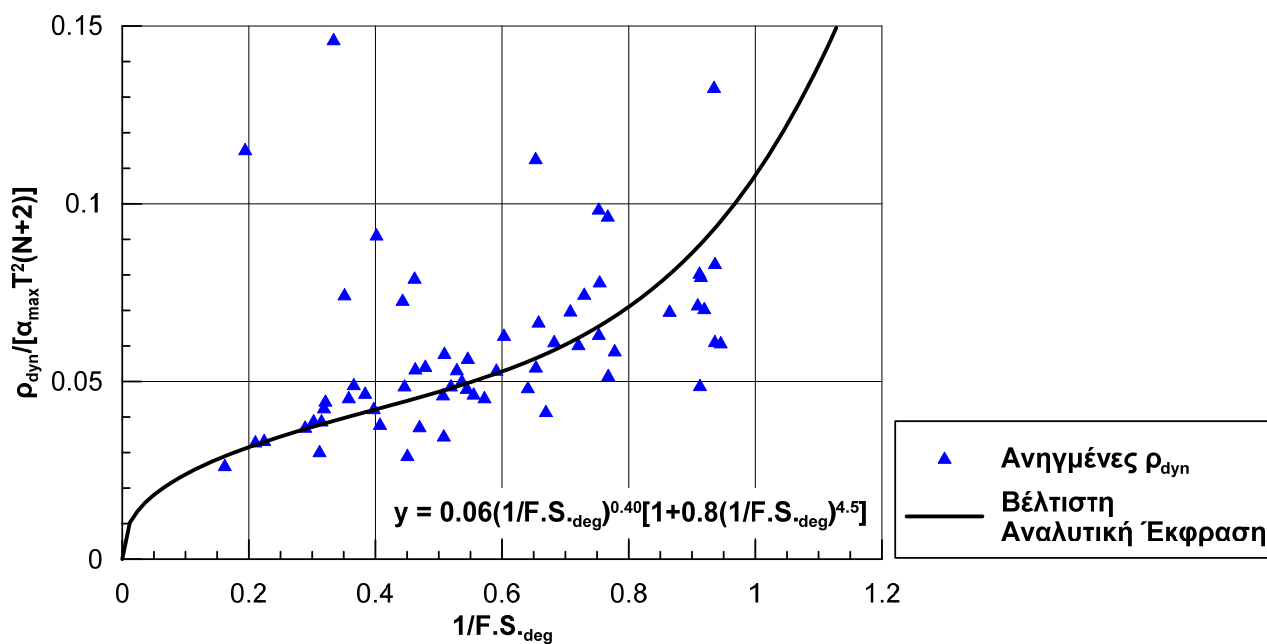
$v(t)$: η χρονοϊστορία της ταχύτητα της διέγερσης [m/s]

Η αριθμητική ολοκλήρωση της χρονοϊστορίας των ταχυτήτων, στις πραγματοποιηθείσες αριθμητικές αναλύσεις, βρέθηκε ίση με την ποσότητα $a_{max} T^2 (N+2)$, όπου N ο αριθμός των βασικών κύκλων της αρμονικής φόρτισης. Ο τελικός αριθμός $(N+2)$ είναι προσαυξημένος κατά 2 για να συμπεριλάβει και τους μεταβατικούς κύκλους στην αρχή και στο τέλος της διέγερσης (βλ. Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Χρονοϊστορία επιβαλλόμενης επιτάχυνσης στη βάση του προσομοιώματος.

Για την στατιστική επεξεργασία, οι αριθμητικές τιμές της δυναμικής καθίζησης (ρ_{dyn}) κανονικοποιήθηκαν αρχικά ως προς τον όρο $a_{max}T^2(N+2)$. Στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται συναρτήσεις του αντίστροφου απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας ($1/F.S_{deg}$), όπως προέκυψε με βάση τη θεώρηση του υπερβολικού μοντέλου. Στο **Σχήμα 4.6** φαίνεται επίσης και η μορφή της εξίσωσης που περιγράφει καλύτερα τη συσχέτιση των δύο μεγεθών.



Σχήμα 4.6: Συσχέτιση των ανηγμένων καθιζήσεων ρ_{dyn} με το $1/F.S_{deg}$, κατά Newmark.

Όπως εύκολα παρατηρείται υπάρχει μεγάλη διασπορά των αριθμητικών δεδομένων και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση της εδαφικής στήλης στη συσσώρευση των καθιζήσεων, κατά τη μετάδοση της διέγερσης από τη βάση στην εδαφική επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των χαρακτηριστικών της

διέγερσης που χρησιμοποιούνται (v_{max} , a_{max} , T) δεν αντιστοιχούν στην εδαφική επιφάνεια όπου συσσωρεύονται οι καθιζήσεις, αλλά στη βάση της διέγερσης. Για το λόγο αυτό, στην προηγούμενη αναλυτική σχέση εισάγεται και η περίοδος της εδαφικής στήλης T_{soil} , όπως περιγράφεται από την εξίσωση (4.3).

$$T_{soil} = \frac{4H_{crust}}{V_{S,crust}} + \frac{4H_{sand}}{V_{S,sand}} \quad (4.3)$$

Όπου:

$$V_S = \sqrt{G_{max}/\rho}: \text{η ταχύτητα διατμητικού κύματος [m/s]}$$

$$\text{και } G_{max} = 600 \frac{p_{atm}}{0.3+0.7e^2} \sqrt{\frac{p}{p_{atm}}} \quad (\text{Hardin, 1978}) \quad (4.4)$$

με e : δείκτης πόρων της άμμου

p_{atm} =100kPa η ατμοσφαιρική πίεση

p : η μέση ενεργός τάση (kPa) στο μέσον κάθε στρώσης (βελτιωμένης και φυσικής)

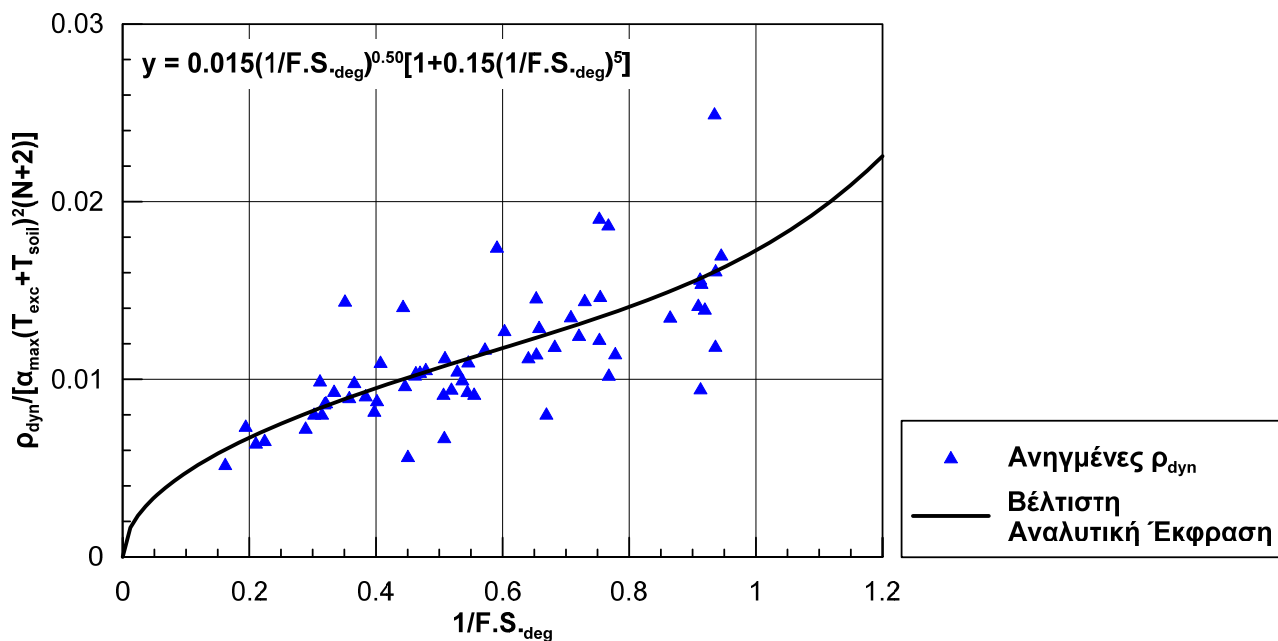
Συνεπώς, η εξίσωση που συσχετίζει τις δυναμικές καθιζήσεις με την αντίστροφη τιμή του συντελεστή ασφαλείας επαναδιατυπώθηκε, εισάγοντας την ιδιοπερίοδο της εδαφικής στήλης ως ακολούθως:

$$\rho_{dyn} = c_1 \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + a \cdot T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^{c_2} \cdot \left[1 + c_3 \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^{c_4}\right] \quad (4.5)$$

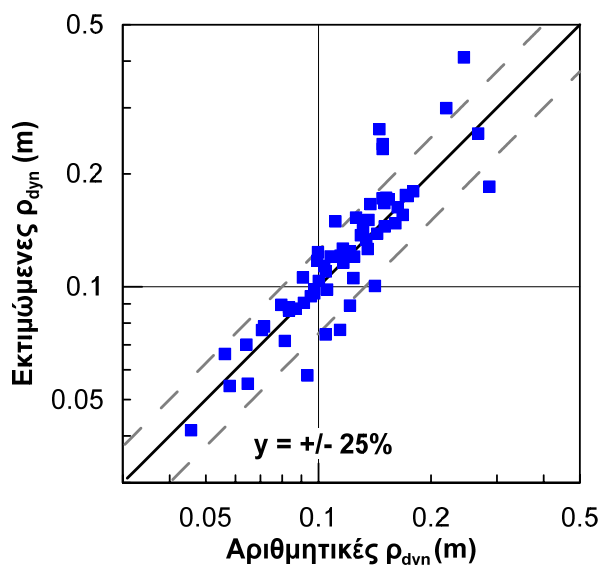
Για τον προσδιορισμό των σταθερών όρων της εξίσωσης (4.5) πραγματοποιήθηκε μια στατιστική ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με το λογισμικό STATISTICA 7 (StatSoft). Οι τιμές των σταθερών όρων που προέκυψαν ήταν $c_1=0.015$, $c_2=0.50$, $c_3=0.15$, $c_4=5$ και $a=1$. Οι αντίστοιχες τιμές των σταθερών όρων της εξίσωσης 4.5, που παρουσιάστηκαν στην διδακτορική διατριβή της **Β. Δημητριάδη (2014)** ήταν $c_1=0.019$, $c_2=0.45$, $c_3=0.25$, $c_4=4.5$ και $a=0.633$.

Στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες τιμές καθιζήσης, συναρτήσει των αντιστρόφων τιμών απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας. Επίσης, στο διάγραμμα έχει σχεδιαστεί και η προτεινόμενη αναλυτική σχέση που προέκυψε από την στατιστική επεξεργασία. Σε σχέση με προηγούμενως παρατηρούμε τη μείωση της διασποράς των αποτελεσμάτων, ως αποτέλεσμα της επιρροής της εδαφικής ιδιοπεριόδου. Στα **Σχήματα 4.8** και **4.9** που ακολουθούν, παρουσιάζεται η ένα προς

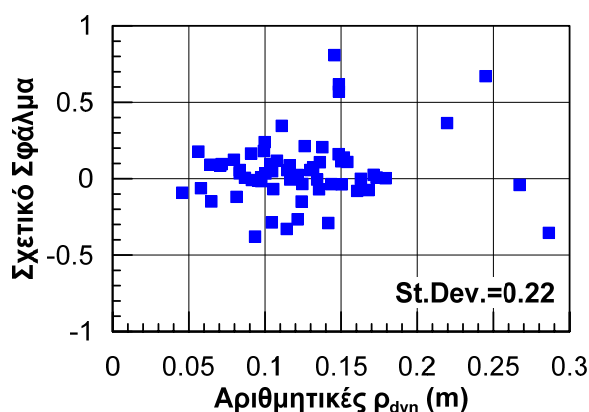
ένα σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών και των αναλυτικών προβλέψεων καθώς και το σχετικό σφάλμα μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων, εφαρμόζοντας τη Σχέση 4.5. Παρατηρούμε ότι υπάρχει καλή σύγκριση των αποτελεσμάτων, με το 80% των εκτιμώμενων τιμών να απέχει λιγότερο από 25% (κατ' απόλυτη τιμή) από τις αριθμητικές προβλέψεις. Η ακρίβεια της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης επιβεβαιώνεται και από τη τιμή της διασποράς η οποία προκύπτει ίση με $\pm 22\%$ σ' όλο το εύρος των δεδομένων.



Σχήμα 4.7: Συσχέτιση των ανηγμένων καθιζήσεων ρ_{dyn} με τον αντίστροφο του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας $1/F.S_{deg}$, μετά την ενσωμάτωση της θεμελιώδους ιδιοπερίοδου της εδαφικής στήλης T_{soil} .



Σχήμα 4.8: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και αναλυτικά εκτιμώμενων τιμών καθιζήσεων.



Σχήμα 4.9: Σχετικό Σφάλμα μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων συναρτήσει των αριθμητικών προβλέψεων (ρ_{dyn}).

4.3 Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στις δυναμικές καθιζήσεις για θεμελιολωρίδες (2-Δ).

Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαστάσεων της βελτιωμένης ζώνης στις δυναμικές καθιζήσεις, είχε πραγματοποιηθεί στατιστική επεξεργασία των αριθμητικών τιμών των καθιζήσεων. Οι τιμές αυτές δεν είναι επηρεασμένες από τις συννοριακές συνθήκες του εξεταζόμενου προβλήματος, όπως αντίθετα συμβαίνει με την απομειωμένη φέρουσα ικανότητα. Επομένως, η αναλυτική σχέση για τις δυναμικές καθιζήσεις παραμένει ίδια, όπως είχε παρουσιαστεί στην διδακτορική διατριβή της Δημητριάδη (2014). Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν

συνοπτικά τα κυριότερα βήματα της στατιστικής επεξεργασίας που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή της αναλυτικής σχέσης.

Στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων (B , $D_{r,o}$, Z_{liq} , a_{max} , N , T , H_{imp}) στις δυναμικές καθιζήσεις, κανονικοποιημένες ως προς την καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση ($\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$), σε σχέση με το εύρος βελτίωσης ανηγμένο ως προς το πλάτος θεμελίου (L_{imp}/B). Σε κάθε διάγραμμα τα σημεία με μαύρο χρώμα αντιστοιχούν στις αναλύσεις της περίπτωσης αναφοράς της παραμετρικής διερεύνησης (Case 1, **Πίνακας 2.2**). Με βάση το σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι με εξαίρεση το πάχος βελτίωσης (H_{imp}), οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν μικρή έως αμελητέα επίδραση, στην μεταβολή του λόγου $\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$ με το λόγο L_{imp}/B . Για το λόγο αυτό τα μεγέθη L_{imp} και H_{imp} , κανονικοποιημένα ως προς το πλάτος θεμελίου (B) χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή μιας αναλυτικής σχέσης. Από τη μορφή των δεδομένων που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.10**, σε δι-λογαριθμικό σύστημα αξόνων, η επίδραση του λόγου L_{imp}/B μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά από την εκθετική σχέση:

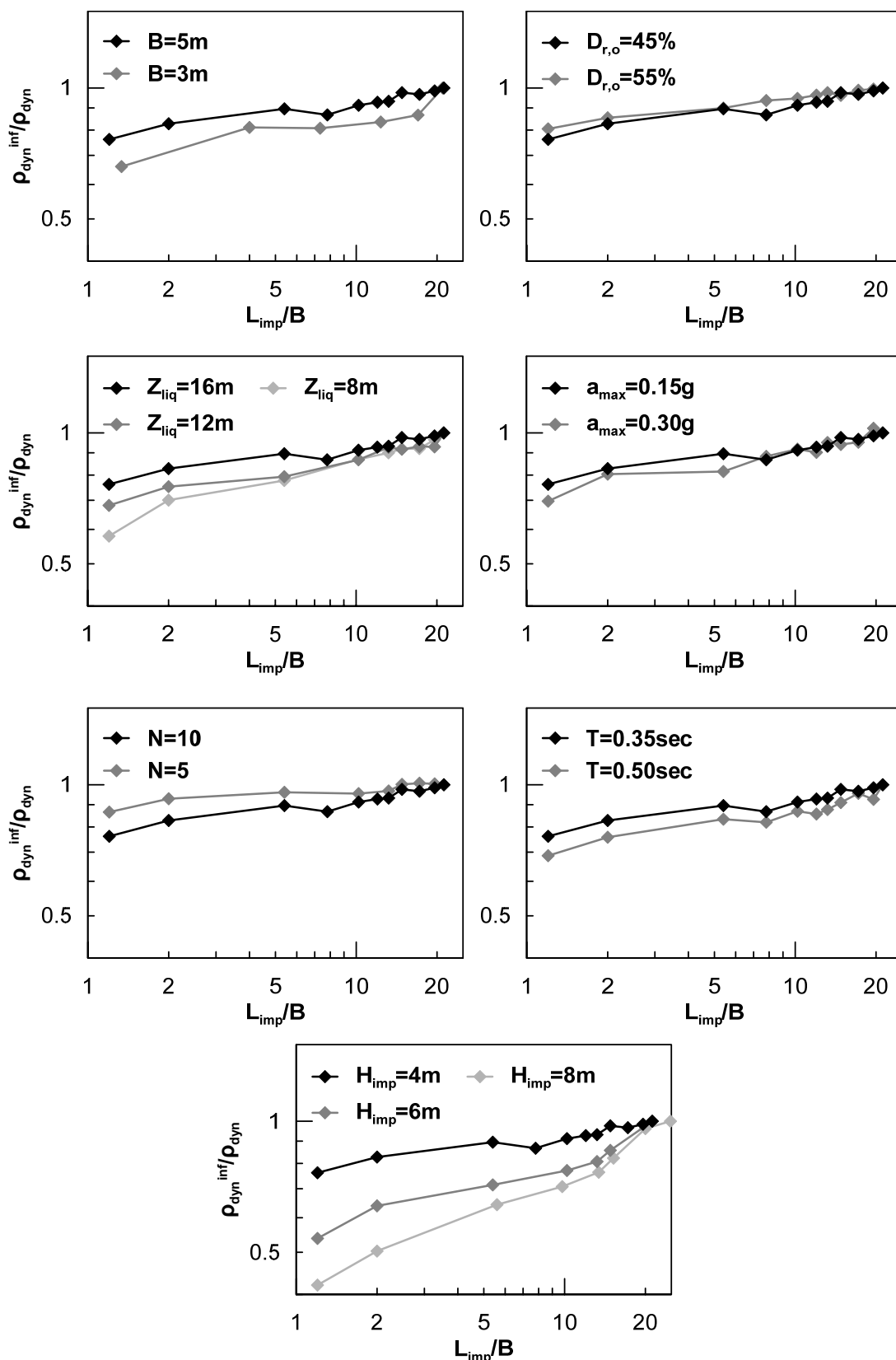
$$\frac{\rho_{dyn}^{inf}}{\rho_{dyn}} = 1 - \exp \left[-C_1 \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{C_2} \right] \quad (4.6)$$

Για τον υπολογισμό των δύο άγνωστων συντελεστών C_1 και C_2 η **Σχέση 4.6** αρχικά μετασχηματίζεται ως εξής:

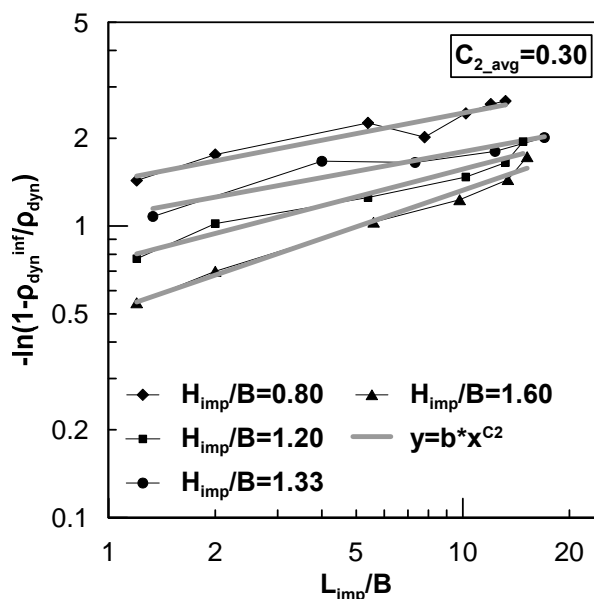
$$-\ln \left(1 - \frac{\rho_{dyn}^{inf}}{\rho_{dyn}} \right) = C_1 \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{C_2} \quad (4.7)$$

και σχεδιάζεται ως ευθεία γραμμή σε δι-λογαριθμικό σύστημα αξόνων.

Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζεται η συσχέτιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, με βάση τη **Σχέση 4.7** σε δι-λογαριθμικό διάγραμμα, για τέσσερις (4) ομάδες αναλύσεων με διαφορετικές τιμές του λόγου H_{imp}/B και κοινές τις υπόλοιπες παραμέτρους της ανάλυσης. Παρατηρείται ότι όλες οι ομάδες αποτελεσμάτων προσεγγίζονται ικανοποιητικά από μια ευθεία γραμμή (γκρι), γεγονός που αποδεικνύει την ορθότητα της εκθετικής σχέσης που επελέγη για την έκφραση της επίδρασης του λόγου (L_{imp}/B).



Σχήμα 4.10: Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στις δυναμικές καθιζήσεις κανονικοποιημένες ως προς την καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση ($\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$) σε σχέση με το εύρος βελτίωσης ανηγμένο ως προς το πλάτος θεμελίου (L_{imp}/B).

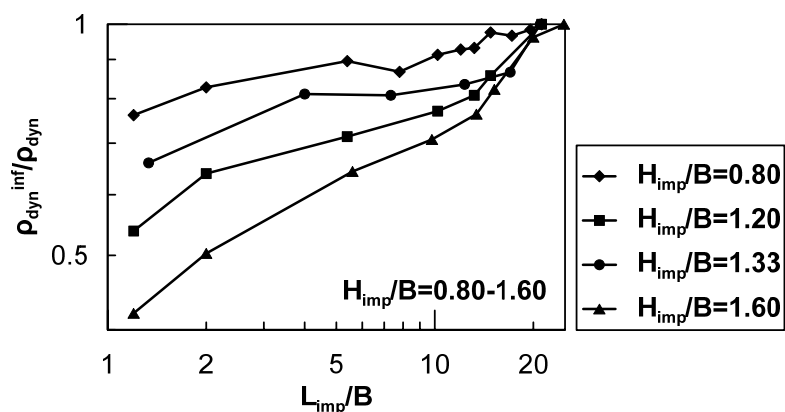


Σχήμα 4.11: Συσχέτιση της ποσότητας $-\ln(1-\rho_{dyn,inf}/\rho_{dyn})$ με το εύρος βελτίωσης (L_{imp}/B) σε δι-λογαριθμικό διάγραμμα για τέσσερις περιπτώσεις.

Με βάση το διάγραμμα του **Σχήματος 4.11** καθώς και τη **Σχέση 4.7** εξάγονται σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με τους συντελεστές C_1 και C_2 . Αρχικά, για τον συντελεστή C_1 , προκύπτει ότι ισούται με την τιμή του $-\ln(1-\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn})$ για εύρος βελτίωσης ίσο με το πλάτος του θεμελίου ($L_{imp}/B=1$) και αυξάνεται όσο ο λόγος H_{imp}/B μειώνεται. Μάλιστα κορυφώνεται σε μεγάλο εύρος τιμών, καθώς λαμβάνει τιμές από 0.5 για $H_{imp}/B=1.60$ μέχρι περίπου 1.4 για $H_{imp}/B=0.80$. Αντίθετα, ο συντελεστής C_2 αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας γραμμής στο **Σχήμα 4.11** για κάθε ομάδα αναλύσεων. Η διακύμανσή του είναι μικρότερη και οι τιμές του αυξάνονται με την αύξηση του λόγου H_{imp}/B . Με βάση αυτήν την παρατήρηση για τον συντελεστή C_2 θεωρήθηκε η μέση τιμή $C_{2,avg}=0.30$. Έτσι ο συντελεστής C_1 μπορεί πλέον να υπολογιστεί από την **Σχέση (4.8)**:

$$C_1 = \frac{-\ln\left(1 - \frac{\rho_{dyn}^{inf}}{\rho_{dyn}}\right)}{\left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.30}} \quad (4.8)$$

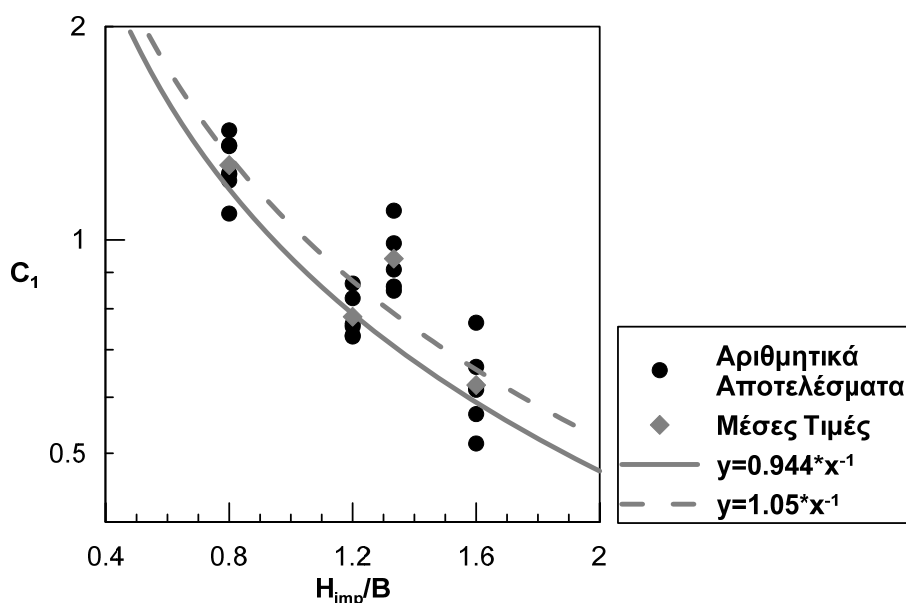
Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζεται η επίδραση του λόγου H_{imp}/B στο λόγο $\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$ για διάφορες τιμές του ανηγμένου εύρους βελτίωσης (L_{imp}/B). Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει ο λόγος H_{imp}/B τόσο μεγαλύτερη γίνεται η επίδραση του εύρους βελτίωσης στις δυναμικές καθιζήσεις. Για αυτό το λόγο ο συντελεστής C_1 θα εκφραστεί ως συνάρτηση του κανονικοποιημένου πάχους βελτίωσης (H_{imp}/B).



Σχήμα 4.12: Επίδραση του πάχους βελτίωσης κανονικοποιημένου με το πλάτος θεμελίου (H_{imp}/B) στις ανηγμένες καθιζήσεις ($\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$) για διάφορες τιμές του ανηγμένου εύρους βελτίωσης (L_{imp}/B) σε δι-λογαριθμικό διάγραμμα.

Στο **Σχήμα 4.13** παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα, σύμφωνα με την εφαρμογή της **Σχέσης 4.8** για τέσσερις περιπτώσεις, συνάρτησις του ανηγμένου πάχους βελτίωσης (H_{imp}/B). Στο διάγραμμα επίσης έχουν σημειωθεί με γκρι σύμβολα οι μέσες τιμές των αριθμητικών αποτελεσμάτων για κάθε τιμή του λόγου H_{imp}/B . Η καλύτερη συσχέτιση ανάμεσα στον συντελεστή C_1 και το λόγο H_{imp}/B έχει σχεδιαστεί με γκρι γραμμή και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$C_1 = 0.944 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1} \quad (4.9)$$

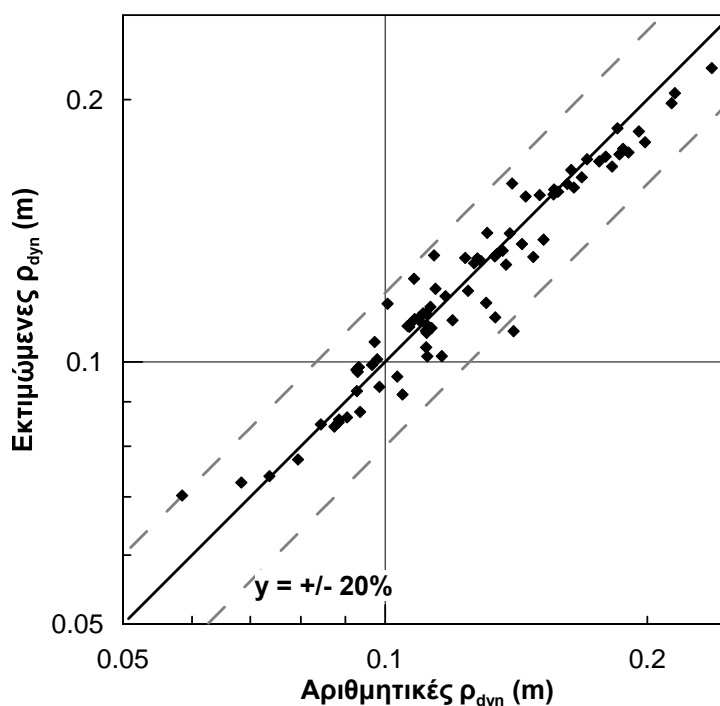


Σχήμα 4.13: Συντελεστής C_1 συνάρτησις του πάχους βελτίωσης (H_{imp}/B) για τέσσερις περιπτώσεις.

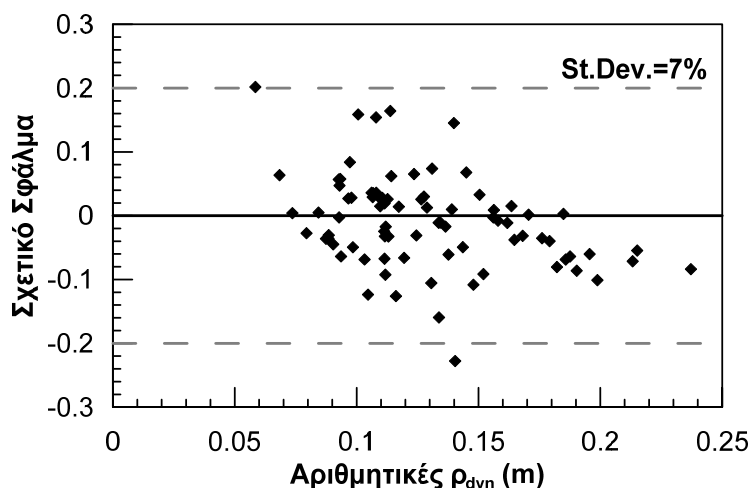
Στο τελευταίο βήμα της στατιστικής επεξεργασίας των αναλύσεων θεμελιολωρίδας με περιορισμένη βελτίωση, ποσοτικοποιήθηκε η επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων του προβλήματος ($D_{r,o}$, Z_{liq} , a_{max} , N και T), οι οποίες όπως προαναφέρθηκε έχουν μόνο μικρή επιρροή. Η επίδραση λοιπόν αυτών των παραμέτρων, ενσωματώθηκε στον σταθερό όρο της **Εξίσωσης 4.9** (0.944), ο οποίος έλαβε τελικά την τιμή 1.05. Η **Εξίσωση 4.10** αποτελεί την τελική αναλυτική προτεινόμενη έκφραση.

$$\frac{\rho_{dyn}^{inf}}{\rho_{dyn}} = 1 - \exp \left[-1.05 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{0.30} \right] \quad (4.10)$$

Η ακρίβεια της προτεινόμενης σχέσης αποτιμάται στα **Σχήματα 4.14** και **4.15**, με την σύγκριση των αναλυτικών εκτιμήσεων με τις αριθμητικές προβλέψεις τόσο 1-1 όσο και σε όρους σχετικού σφάλματος. Στα σχήματα αυτά, οι εκτιμώμενες καθιζήσεις των αναλύσεων με περιορισμένη βελτίωση, έχουν υπολογιστεί με εφαρμογή της **Σχέσης 4.10** και θεωρώντας ως καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση (ρ_{dyn}^{inf}) την αριθμητική της τιμή, η οποία είχε υπολογιστεί. Όπως παρατηρείται, η σύγκριση είναι αρκετά ικανοποιητική, με την πλειονότητα των προβλέψεων να έχει σχετικό σφάλμα μικρότερο του $\pm 20\%$, ενώ η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος είναι $\pm 7\%$.



Σχήμα 4.14: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και αναλυτικά εκτιμώμενων τιμών καθιζήσεων για θεμελιολωρίδα με περιορισμένη βελτίωση.



Σχήμα 4.15: Σχετικό σφάλμα μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων συναρτήσει των αριθμητικών προβλέψεων (ρ_{dyn}) για θεμελιολωρίδα με περιορισμένη βελτίωση.

4.4 Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας για θεμελιολωρίδες (2-Δ).

Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαστάσεων της βελτιωμένης ζώνης στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως και για τις δυναμικές καθιζήσεις. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα κυριότερα βήματα της στατιστικής επεξεργασίας που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή της αναλυτικής σχέσης.

Στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων (B , $D_{r,or}$, Z_{liq} , a_{max} , N , T , H_{imp}) στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας, κανονικοποιημένο ως προς τον συντελεστή ασφαλείας για «άπειρη» βελτίωση ($F.S._{deg}/ F.S._{deg}^{inf}$), σε σχέση με το εύρος βελτίωσης ανηγμένο ως προς το πλάτος θεμελίου (L_{imp}/B). Σε κάθε διάγραμμα τα σημεία με μαύρο χρώμα αντιστοιχούν στις αναλύσεις της περίπτωσης αναφοράς της παραμετρικής διερεύνησης (Case 1, **Πίνακας 2.2**). Με βάση το σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι με εξαίρεση το πάχος βελτίωσης (H_{imp}), οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν μικρή έως αμελητέα επίδραση, στην μεταβολή του λόγου $F.S._{deg}/ F.S._{deg}^{inf}$ με το λόγο L_{imp}/B . Για το λόγο αυτό τα μεγέθη L_{imp} και H_{imp} , κανονικοποιημένα ως προς το πλάτος θεμελίου (B) χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή μιας αναλυτικής σχέσης. Από την παρακάτω επεξεργασία, αποκλείστηκαν οι αναλύσεις της περίπτωσης $B=3m$,

αφού σε ορισμένες αναλύσεις περιορισμένης βελτίωσης ο λόγος $F.S._{deg}/F.S._{deg}^{inf}$ ξεπερνούσε την μονάδα, κάτι το οποίο δεν είναι αποδεκτό.

Από τη μορφή των δεδομένων που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.16**, σε δι-λογαριθμικό σύστημα αξόνων, η επίδραση του λόγου L_{imp}/B μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά από την εκθετική σχέση:

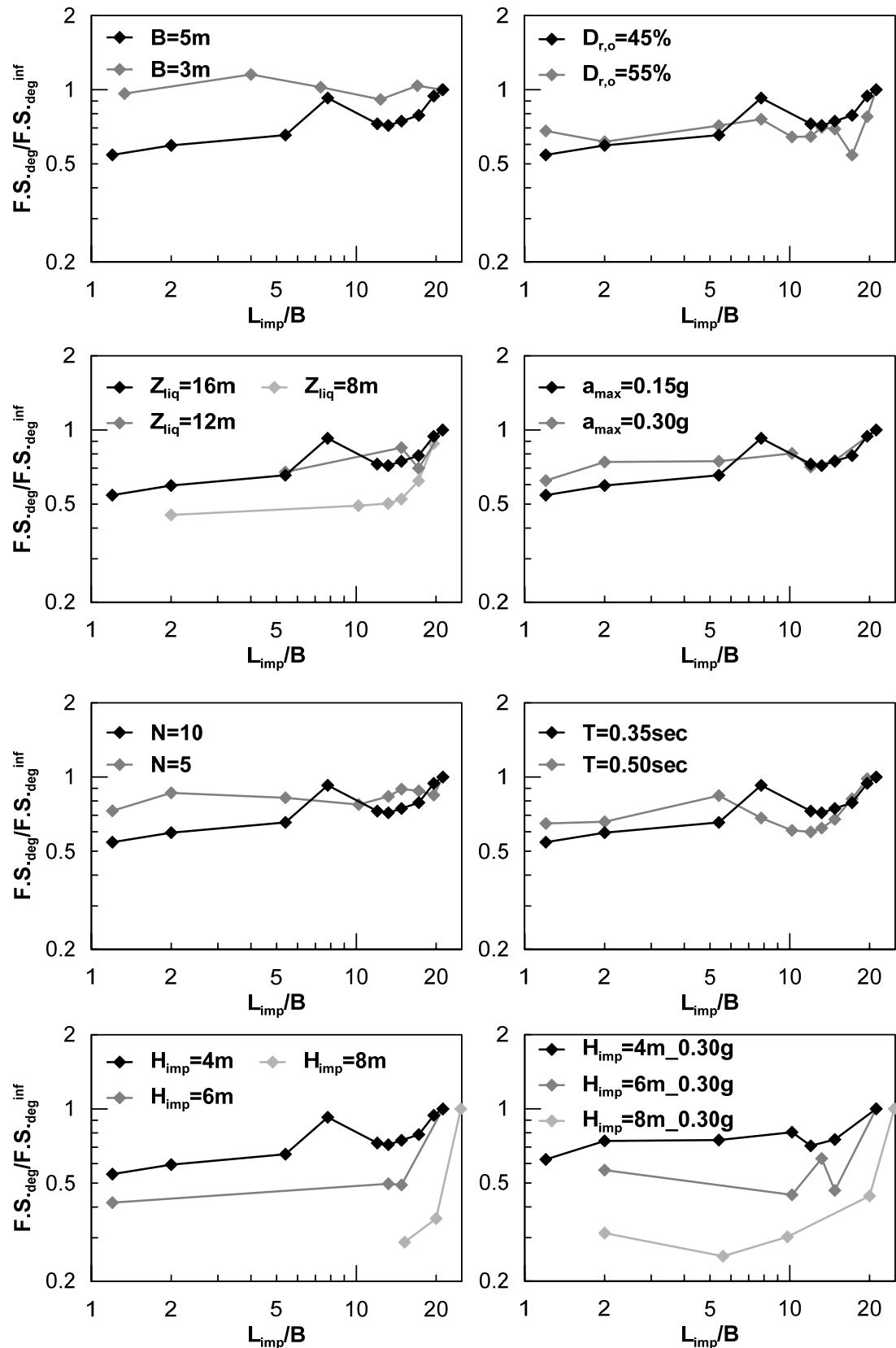
$$\frac{F.S._{deg}}{F.S._{deg}^{inf}} = 1 - \exp \left[-C_1 \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{C_2} \right] \quad (4.11)$$

Για τον υπολογισμό των δύο άγνωστων συντελεστών C_1 και C_2 η **Σχέση 4.11** αρχικά μετασχηματίζεται ως εξής:

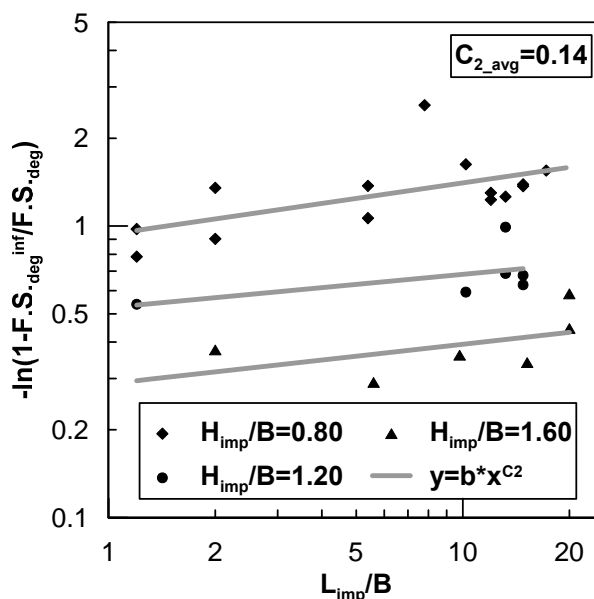
$$-\ln \left(1 - \frac{F.S._{deg}}{F.S._{deg}^{inf}} \right) = C_1 \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B} \right)^{C_2} \quad (4.12)$$

και σχεδιάζεται ως ευθεία γραμμή σε δι-λογαριθμικό σύστημα αξόνων.

Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζεται η συσχέτιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, με βάση τη **Σχέση 4.12** σε δι-λογαριθμικό διάγραμμα, για τρεις (3) διαφορετικές τιμές του λόγου H_{imp}/B . Σε κάθε τιμή του λόγου H_{imp}/B έχουν προστεθεί και οι αναλύσεις με διαφορετική τιμή του $a_{max}=0.30g$ για να αυξηθεί ο αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων. Παρατηρείται ότι όλες οι ομάδες αποτελεσμάτων προσεγγίζονται ικανοποιητικά από μια ευθεία γραμμή (γκρι), γεγονός που αποδεικνύει την ορθότητα της εκθετικής σχέσης που επελέγη για την έκφραση της επίδρασης του λόγου (L_{imp}/B).



Σχήμα 4.16: Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας κανονικοποιημένος ως προς τον συντελεστή ασφαλείας για «άπειρη» βελτίωση ($F.S._{deg} / F.S._{deg}^{inf}$) σε σχέση με το εύρος βελτίωσης ανηγμένο ως προς το πλάτος θεμελίου (L_{imp}/B).



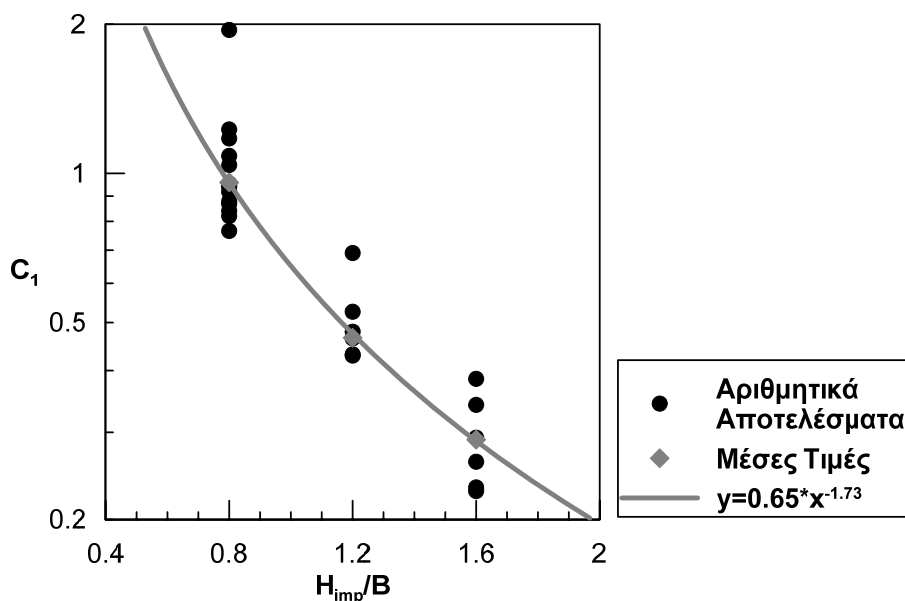
Σχήμα 4.17: Συσχέτιση της ποσότητας $-\ln(1-F.S._{deg}/F.S._{deg}^{inf})$ με το εύρος βελτίωσης (L_{imp}/B) σε δι-λογαριθμικό διάγραμμα για τρεις περιπτώσεις.

Με βάση το διάγραμμα του **Σχήματος 4.17** καθώς και τη **Σχέση 4.12** εξάγονται σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με τους συντελεστές C_1 και C_2 . Αρχικά, για τον συντελεστή C_1 , προκύπτει ότι ισούται με την τιμή του $-\ln(1-F.S._{deg}/F.S._{deg}^{inf})$ για πλάτος βελτίωσης ίσο με το πλάτος του θεμελίου ($L_{imp}/B=1$) και αυξάνεται όσο ο λόγος H_{imp}/B μειώνεται. Μάλιστα κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος τιμών, καθώς λαμβάνει τιμές από 0.3 για $H_{imp}/B=1.60$ μέχρι περίπου 0.9 για $H_{imp}/B=0.80$. Αντίθετα, ο συντελεστής C_2 αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας γραμμής στο **Σχήμα 4.17** για κάθε ομάδα αναλύσεων. Η διακύμανσή του είναι μικρότερη και έτσι για τον συντελεστή C_2 θεωρήθηκε η μέση τιμή $C_{2_avg}=0.14$. Πλέον, ο συντελεστής C_1 μπορεί πλέον να υπολογιστεί από την **Σχέση (4.13)**:

$$C_1 = \frac{-\ln\left(1 - \frac{F.S._{deg}}{F.S._{deg}^{inf}}\right)}{\left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.14}} \quad (4.13)$$

Στο **Σχήμα 4.18** παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα, σύμφωνα με την εφαρμογή της **Σχέσης 4.13** για τρεις περιπτώσεις, συναρτήσει του ανηγμένου πάχους βελτίωσης (H_{imp}/B). Στο διάγραμμα επίσης έχουν σημειωθεί με γκρι σύμβολα οι μέσες τιμές των αριθμητικών αποτελεσμάτων για κάθε τιμή του λόγου H_{imp}/B . Η καλύτερη συσχέτιση ανάμεσα στον συντελεστή C_1 και το λόγο H_{imp}/B έχει σχεδιαστεί με γκρι γραμμή και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$C_1 = 0.65 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1.73} \quad (4.14)$$

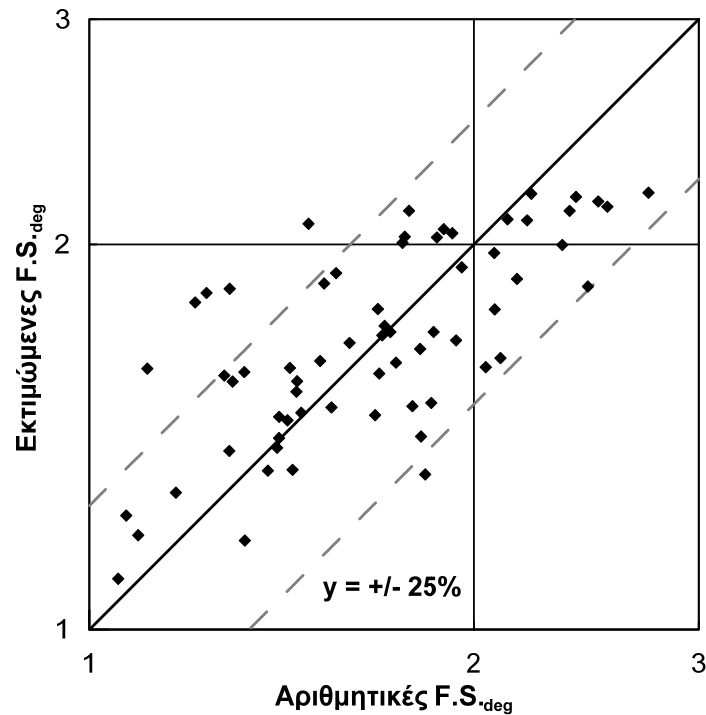


Σχήμα 4.18: Συντελεστής C_1 συναρτήσει του πάχους βελτίωσης (H_{imp}/B) για τρεις περιπτώσεις.

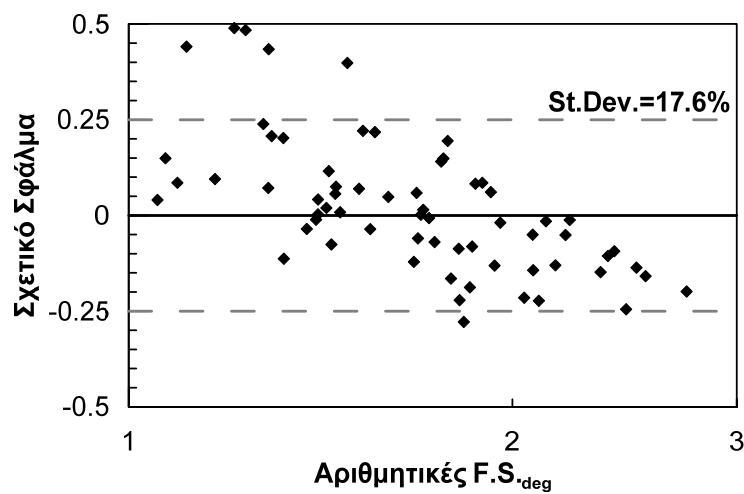
Ενσωματώνοντας πλέον τον συντελεστή C_1 στην αρχική έκφραση (εξ. 4.11) προκύπτει η τελική προτεινόμενη σχέση για την επίδραση των διαστάσεων της βελτιωμένης ζώνης στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας:

$$\frac{F.S._{deg}}{F.S._{deg}^{inf}} = 1 - \exp \left[-0.65 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.14} \right] \quad (4.15)$$

Η ακρίβεια της προτεινόμενης σχέσης αποτιμάται στα **Σχήματα 4.19** και **4.20**, με την σύγκριση των αναλυτικών εκτιμήσεων με τις αριθμητικές προβλέψεις τόσο 1-1 όσο και σε όρους σχετικού σφάλματος. Στα σχήματα αυτά, οι εκτιμώμενες τιμές του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας των αναλύσεων με περιορισμένη βελτίωση, έχουν υπολογιστεί με εφαρμογή της **Σχέσης 4.15** και θεωρώντας ως συντελεστή ασφαλείας για «άπειρη» βελτίωση ($F.S._{deg}^{inf}$) την αριθμητική τιμή, η οποία είχε υπολογιστεί. Όπως παρατηρείται, η σύγκριση είναι ικανοποιητική, με την πλειονότητα των προβλέψεων να έχει σχετικό σφάλμα μικρότερο του $\pm 25\%$, ενώ η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος είναι $\pm 17.6\%$.



Σχήμα 4.19: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και αναλυτικά εκτιμώμενων τιμών απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας για θεμελιωρίδα με περιορισμένη βελτίωση.



Σχήμα 4.20: Σχετικό σφάλμα μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων συναρτήσει των αριθμητικών προβλέψεων (F.S._{deg}) για θεμελιωρίδα με περιορισμένη βελτίωση.

4.5 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τις αριθμητικές αναλύσεις θεμελιολωρίδας (2-Δ). Από την παρουσίαση των επιδράσεων των διαφόρων παραμέτρων, στις δυναμικές καθιζήσεις και στην απομειωμένη φέρουσα ικανότητα, έγινε σαφές ότι αναπτύσσεται ένας μηχανισμός αστοχίας τύπου ολισθαίνοντος στερεού κατά Newmark. Η σύνδεση των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων με έναν τέτοιο μηχανισμό αστοχίας, κατέστησε εφικτή τη συσχέτιση των καθιζήσεων με τον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας, σύμφωνα με την αναθεωρημένη **Εξίσωση (4.5)**:

$$\rho_{dyn} = 0.015 \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^{0.5} \cdot \left[1 + 0.15 \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^5\right] \quad (4.5)$$

Η επίδραση των διαστάσεων της βελτιωμένης ζώνης στην αναλυτική έκφραση υπολογισμού των καθιζήσεων παρέμεινε σταθερή, αφού δεν διαφοροποιήθηκαν οι τιμές του λόγου $\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$. Αντίθετα, για την αναλυτική σχέση υπολογισμού του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιήθηκε νέα στατιστική επεξεργασία. Οι αναθεωρημένες αναλυτικές σχέσεις είναι οι ακόλουθες:

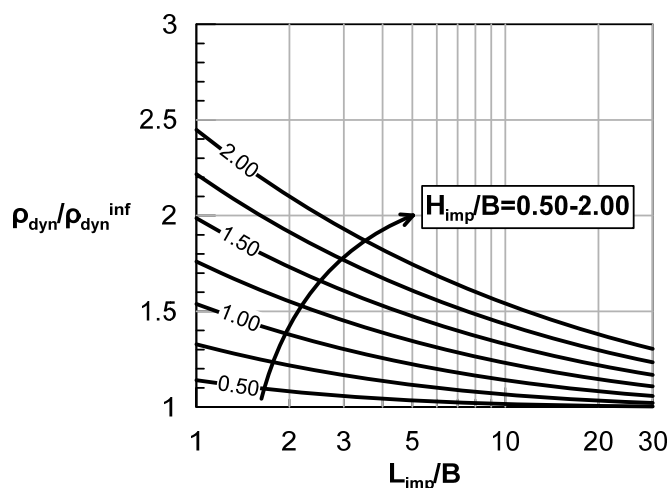
Δυναμικές καθιζήσεις:

$$\frac{\rho_{dyn}}{\rho_{dyn}^{inf}} = 1/1 - \exp \left[-1.05 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.30} \right] \quad (4.10)$$

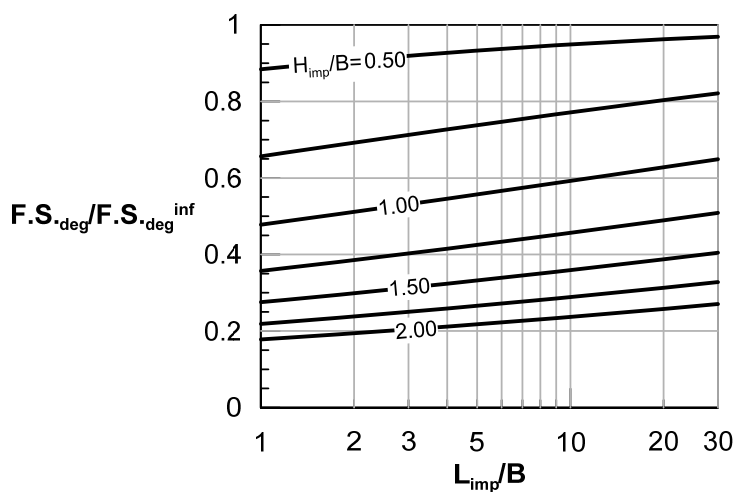
Απομειωμένος Συντελεστής Ασφαλείας:

$$\frac{F.S.deg}{F.S.deg^{inf}} = 1 - \exp \left[-0.65 \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{L_{imp}}{B}\right)^{0.14} \right] \quad (4.15)$$

Οι παραπάνω αναλυτικές εκφράσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια σε διαγράμματα σχεδιασμού για διάφορες τιμές του ανηγμένου πάχους ($H_{imp}/B=0.50-2.00$) και του ανηγμένου πλάτους ($L_{imp}/B=1-30$) βελτίωσης.



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα σχεδιασμού δυναμική καθίζησης, κανονικοποιημένης ως προς την καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση σε σχέση με το πλάτος βελτίωσης για διάφορες τιμές του λόγου πάχους βελτίωσης προς πλάτος θεμελίου.



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα σχεδιασμού απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας, κανονικοποιημένου ως προς τον συντελεστή για «άπειρη» βελτίωση σε σχέση με το πλάτος βελτίωσης για διάφορες τιμές του λόγου πάχους βελτίωσης προς πλάτος θεμελίου.

Κεφάλαιο 5

Βελτιωμένες σχέσεις υπολογισμού: 3-Δ αναλύσεις ορθογωνικού θεμελίου

5.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αριθμητικών αναλύσεων ορθογωνικών θεμελίων (3-Δ). Σε συνέχεια της επεξεργασίας των (2-Δ) αναλύσεων θεμελιολωρίδας, επιχειρείται η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαστάσεων του θεμελίου στις δυναμικές καθιζήσεις και στην απομειωμένη φέρουσα ικανότητα. Τελικά εξάγονται αναλυτικές σχέσεις για τη συσχέτιση καθιζήσης-απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας καθώς και για την επιρροή της έκτασης της εδαφικής βελτίωσης στα δύο αυτά μεγέθη.

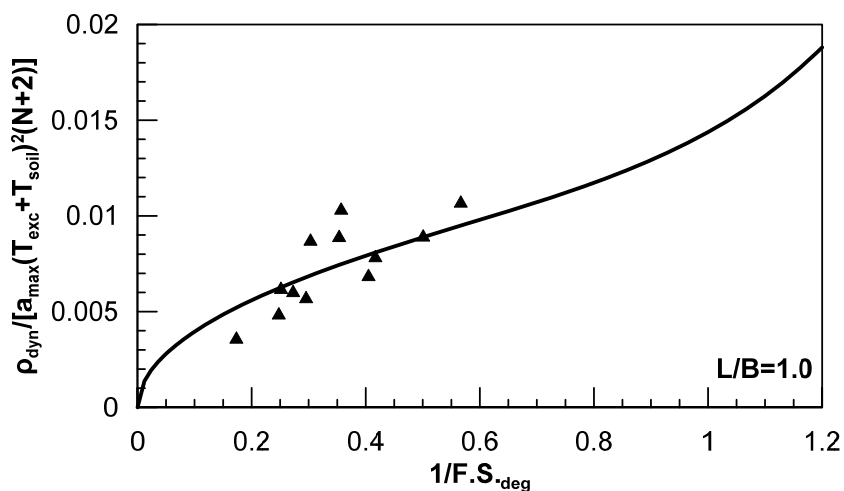
5.2 Επίδραση διαστάσεων θεμελίου στις καθιζήσεις - «Απείρωσ» εκτεινόμενη βελτίωση.

Ομοίως με τις περιπτώσεις θεμελιολωρίδας (2-Δ), υπό συνθήκες «απείρωσ» εκτεινόμενης βελτίωσης, στις 3-Δ αριθμητικές αναλύσεις ορθογωνικών θεμελίων η συσσώρευση των δυναμικών καθιζήσεων μπορεί να συσχετιστεί με τα χαρακτηριστικά της διέγερσης, καθώς και με την αντίστροφη τιμή του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας ($1/F.S._{deg}$) (κατά Newmark), μέσω της κάτωθι αναλυτικής σχέσης:

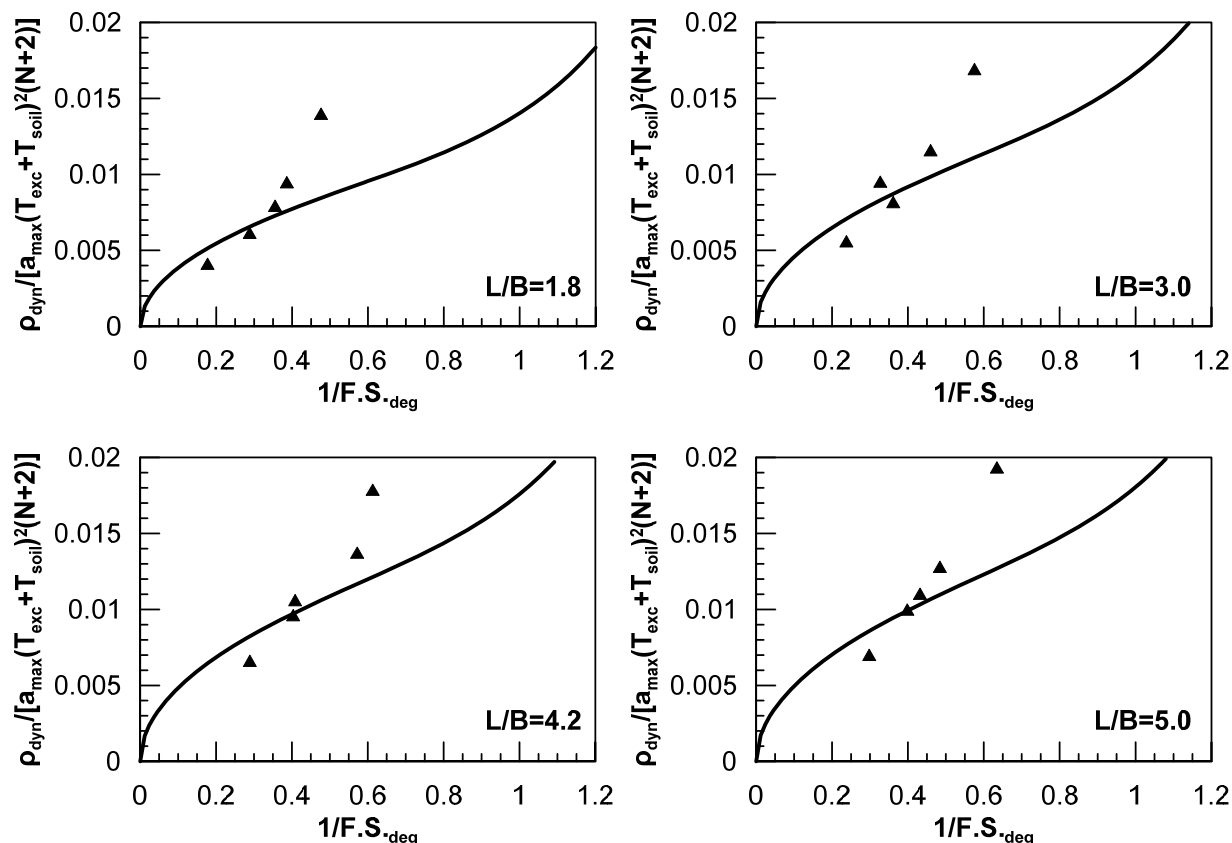
$$\rho_{dyn} = c \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S._{deg}}\right)^{0.5} \cdot \left[1 + 0.15 \cdot \left(\frac{1}{F.S._{deg}}\right)^5\right] \quad (5.1)$$

Όπου c , σταθερά η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις του θεμελίου και πιο συγκεκριμένα από τον λόγο L/B (μήκος/πλάτος). Για τις περιπτώσεις θεμελιολωρίδας η σταθερά c προέκυψε, από τη στατιστική επεξεργασία (βλ. **Κεφ. 4**) ίση με $c=0.015$. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαστάσεων του θεμελίου στον συντελεστή c , οι δυναμικές καθιζήσεις των 3-Δ αριθμητικών αναλύσεων κανονικοποιήθηκαν προς τον όρο $[a_{max}(T_{exc}+T_{soil})^2(N+2)]$ και παρουσιάζονται συναρτήσει της αντίστροφης τιμής του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας

$1/F \cdot S_{deg}$. Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζονται οι αναλύσεις τετραγωνικών θεμελίων ($L/B=1.0$), ενώ στα διαγράμματα του **Σχήματος 5.2** οι συσχετίσεις για ορθογωνικά θεμέλια, ήτοι για λόγους $L/B=1.8, 3.0, 4.2$ και 5.0 . Επίσης στα διαγράμματα αυτά έχει σχεδιαστεί και η μορφή της αναλυτικής έκφρασης σύμφωνα με την εξίσωση **5.1**, για την τιμή του σταθερού όρου c , η οποία περιγράφει καλύτερα τα αριθμητικά αποτελέσματα.



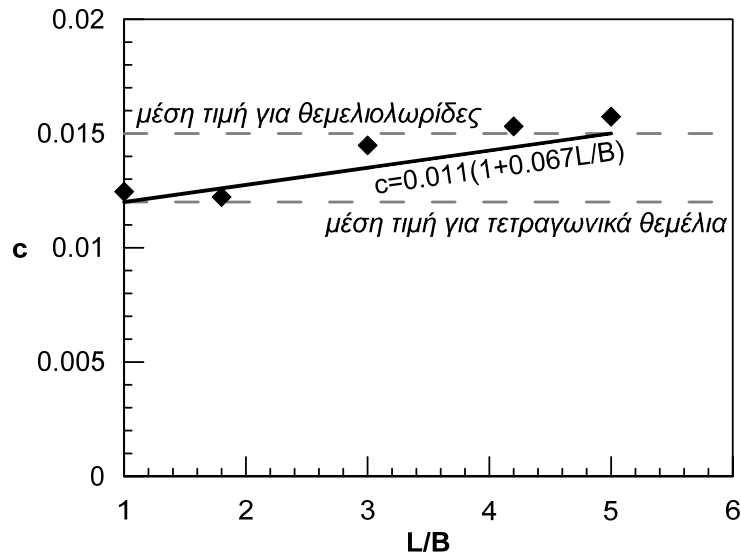
Σχήμα 5.1: Συσχέτιση των κανονικοποιημένων δυναμικών καθιζήσεων, με την αντίστροφη τιμή του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας για τετραγωνικά θεμέλια ($L/B=1.0$).



Σχήμα 5.2: Συσχέτιση των κανονικοποιημένων δυναμικών καθιζήσεων, με την αντίστροφη τιμή του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας για ορθογωνικά θεμέλια ($L/B > 1.0$).

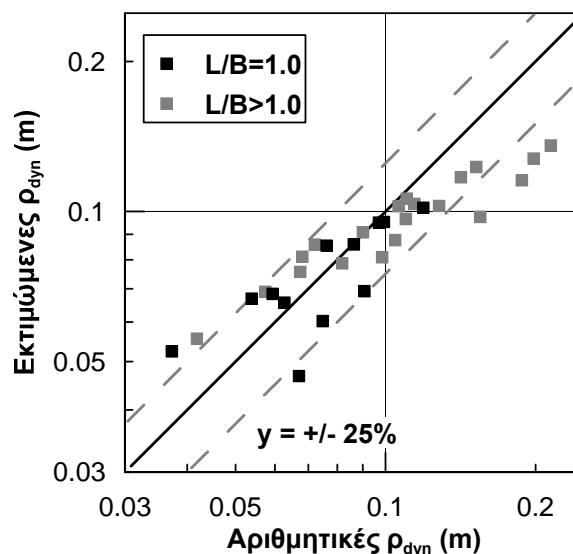
Η διακύμανση των μέσων τιμών του σταθερού όρου c συναρτήσει του λόγου L/B παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.3**. Παρατηρούμε ότι για τιμές του λόγου L/B μεγαλύτερες από 4-5, η απόκριση των ορθογωνικών θεμελίων περιγράφεται με μεγάλη ακρίβεια, από την προσέγγιση για θεμελιολωρίδες (μέση τιμή για θεμελιολωρίδες $c=0.015$). Για την ποσοτικοποίηση, λοιπόν της επίδρασης των διαστάσεων του θεμελίου, υιοθετήθηκε μια γραμμική μεταβολή της παραμέτρου c με τον λόγο L/B η οποία έχει σχεδιαστεί στο **Σχήμα 5.3** και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$c = 0.011 \cdot \left(1 + 0.067 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 0.015 \quad (5.2)$$

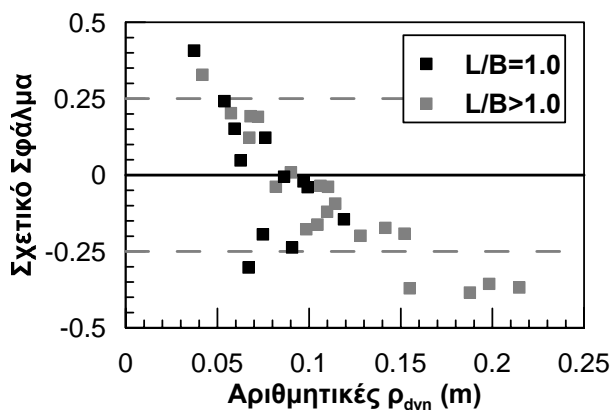


Σχήμα 5.3: Διακόμανση της παραμέτρου c συναρτήσει του λόγου L/B .

Η ακρίβεια της προτεινόμενης σχέσης αποτιμάται στα Σχήματα 5.4 και 5.5, με την ένα - προς - ένα σύγκριση μεταξύ αναλυτικών και αριθμητικών προβλέψεων, και σε όρους σχετικού σφάλματος αντίστοιχα. Στα συγκεκριμένα σχήματα με μαύρα τετραγωνάκια έχουν σχεδιαστεί οι περιπτώσεις τετραγωνικών θεμελίων ($L/B=1.0$), ενώ με γκρι οι περιπτώσεις ορθογωνικών θεμελίων ($L/B>1.0$). Όπως παρατηρείται, η σύγκριση είναι ικανοποιητική τόσο για τα τετραγωνικά όσο και για τα ορθογωνικά θεμέλια, ενώ η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος είναι $\pm 21\%$ και για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και αναλυτικά εκτιμώμενων τιμών καθιζήσεων για τετραγωνικά (μαύρο) και ορθογωνικά (γκρι) θεμέλια.



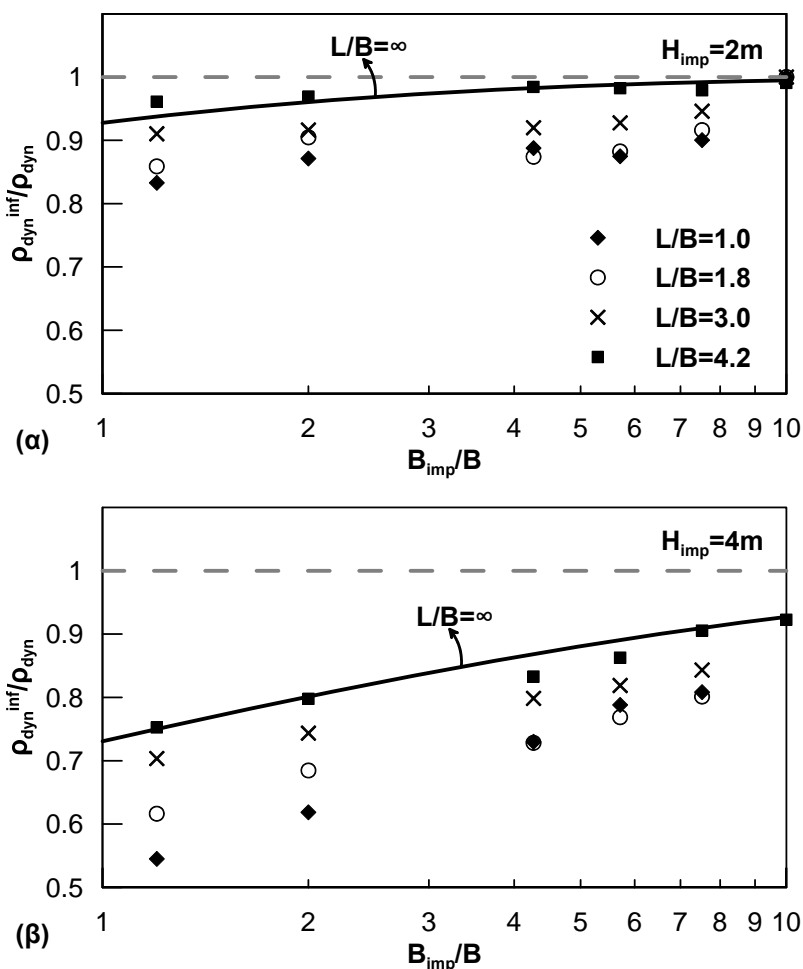
Σχήμα 5.5: Σχετικό σφάλμα μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων συναρτήσει των αριθμητικών προβλέψεων (ρ_{dyn}) για τετραγωνικά (μαύρο) και ορθογωνικά (γκρι) θεμέλια.

5.3 Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στις δυναμικές καθιζήσεις για ορθογωνικά θεμέλια.

Στις 2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο **Κεφ. 4**, οι δυναμικές καθιζήσεις συσχετίστηκαν με τη γεωμετρία της βελτιωμένης ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, στην αντίστοιχη αναλυτική σχέση συμπεριλαμβάνεται το πάχος, H_{imp} και το πλάτος, B_{imp} ($L_{imp} \rightarrow \infty$) της βελτιωμένης ζώνης, σύμφωνα με τη σχέση (5.3):

$$\frac{\rho_{dyn}^{inf}}{\rho_{dyn}} = 1 - \exp \left[-c_{imp} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B} \right)^{0.30} \right] \quad (5.3)$$

Όπου ρ_{dyn}^{inf} και ρ_{dyn} οι δυναμικές καθιζήσεις για «άπειρη» και περιορισμένη βελτίωση αντίστοιχα. Στις 2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας η παράμετρος c_{imp} λαμβάνει την τιμή $c_{imp}=1.05$. Για την στατιστική επεξεργασία των 3-Δ αναλύσεων ορθογωνικών θεμελίων με περιορισμένη βελτίωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση 5.3 λαμβάνοντας όμως υπόψη και τον λόγο L/B . Η επίδραση των διαστάσεων του θεμελίου ενσωματώνεται στην παράμετρο c_{imp} .



Σχήμα 5.6: Δυναμικές καθιζήσεις κανονικοποιημένες με την καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση ($\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$), σε σχέση με το κανονικοποιημένο πλάτος βελτίωσης B_{imp}/B , για διάφορες τιμές του λόγου L/B και για πάχη βελτίωσης (α) $H_{imp}=2m$ και (β) $H_{imp}=4m$.

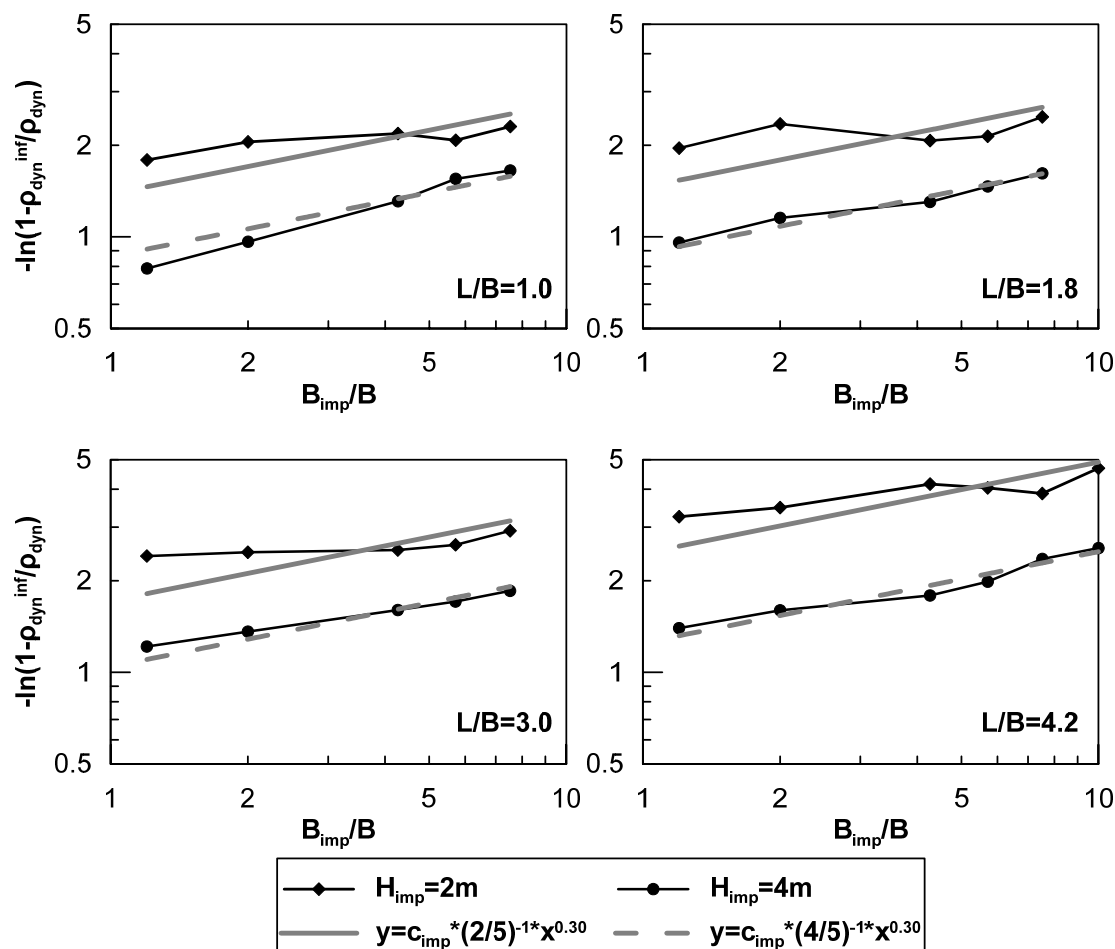
Στα διαγράμματα του **Σχήματος 5.6** παρουσιάζονται οι αριθμητικές τιμές των καθιζήσεων, κανονικοποιημένες προς τις αντίστοιχες τιμές για συνθήκες «άπειρης» βελτίωσης, $\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$, σε σχέση με το ανηγμένο πλάτος βελτίωσης, B_{imp}/B , για διάφορες τιμές του λόγου των διαστάσεων του θεμελίου, L/B και για πάχη βελτίωσης $H_{imp}=2$ και $4m$. Επίσης, σε κάθε διάγραμμα αποτυπώνεται με μαύρη γραμμή η αναλυτική σχέση για θεμελιολωρίδες ($L/B \rightarrow \infty$), σύμφωνα με την **Εξίσωση 5.3** και για τιμή της σταθεράς c_{imp} , $c_{imp}=1.05$. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι για ίδιες τιμές του λόγου B_{imp}/B , όσο μικρότερος είναι ο λόγος L/B , τόσο μικρότερες είναι οι τιμές του όρου $\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$, δηλαδή τόσο μεγαλύτερες οι αναπυσοσόμενες καθιζήσεις. Για παράδειγμα, για πάχος βελτίωσης $H_{imp}=4m$ (**Σχήμα 5.6(β)**) και ανηγμένο πλάτος βελτίωσης $B_{imp}/B=2$, ο λόγος $\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn}$ είναι σημαντικά χαμηλότερος για $L/B=1.0$

απ' ότι για $L/B=4.2$. Με βάση αυτήν την παρατήρηση, προκύπτει ότι η επίδραση της βελτίωσης είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος L/B . Σημαντική είναι και η παρατήρηση ότι η επίδραση του πλάτους βελτίωσης, B_{imp}/B μπορεί να περιγραφεί από την **Εξίσωση 5.3**, με κατάλληλη τροποποίηση του συντελεστή c_{imp} για να συμπεριλάβει την επίδραση του λόγου L/B , αφού η μορφή των αποτελεσμάτων συμπίπτει με την αναλυτική έκφραση.

Με βάση τα ανωτέρω η σχέση **5.3** μετασχηματίζεται ως εξής:

$$-\ln\left(1 - \frac{\rho_{dyn}^{inf}}{\rho_{dyn}}\right) = c_{imp} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B}\right)^{0.30} \quad (5.4)$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.7** σε δι-λογαριθμικό σύστημα αξόνων για όλες τις τιμές του λόγου L/B και τις δύο περιπτώσεις του $H_{imp}=2$ και $4m$. Επίσης στα διαγράμματα αυτά, έχει σχεδιαστεί με γκρι γραμμή η αναλυτική συσχέτιση σύμφωνα με την **Εξίσωση 5.4** με την κατάλληλη κάθε φορά τιμή του σταθερού όρου c_{imp} . Παρατηρείται ότι οι αριθμητικές προβλέψεις είναι σε καλή συμφωνία με την μορφή της αναλυτικής σχέσης **5.4** με εξαίρεση τις περιπτώσεις με $H_{imp}=2m$ (συνεχής γκρι γραμμή), στις οποίες υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις κυρίως ως προς την κλίση της ευθείας (0.30).

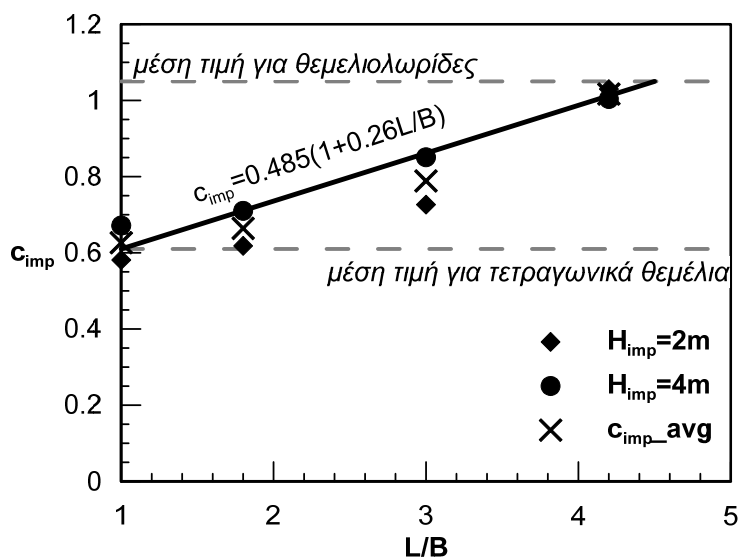


Σχήμα 5.7: Συσχέτιση της ποσότητας $-\ln(1-\rho_{dyn}^{inf}/\rho_{dyn})$, σε σχέση με το κανονικοποιημένο πλάτος βελτίωσης B_{imp}/B , σε δι-λογαριθμικό διάγραμμα για διάφορες τιμές του λόγου L/B και για πάχη βελτίωσης $H_{imp}=2m$ και $H_{imp}=4m$.

Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, στο **Σχήμα 5.8** παρουσιάζονται συνολικά οι τιμές της παραμέτρου c_{imp} για τους διάφορους λόγους L/B και τα δύο πάχη βελτίωσης. Επίσης στο διάγραμμα έχουν σημειωθεί και οι μέσες τιμές για κάθε λόγο L/B (από τις περιπτώσεις $H_{imp}=2$ και $4m$) καθώς και η προτεινόμενη σχέση που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση (5.5):

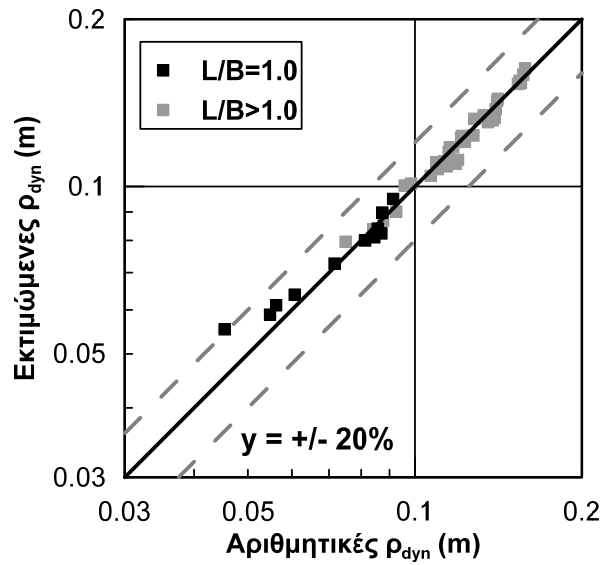
$$c_{imp} = 0.485 \cdot \left(1 + 0.26 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 1.05 \quad (5.5)$$

Αξιζει να σημειωθεί ότι, όπως και προηγουμένως, ο κρίσιμος λόγος L/B πέραν της τιμής του οποίου η απόκριση των ορθογωνικών θεμελίων (3-Δ) συμπίπτει πρακτικά με αυτή για θεμελιολωρίδες (2-Δ) είναι της τάξης $(L/B)_{cr}=4-5$.

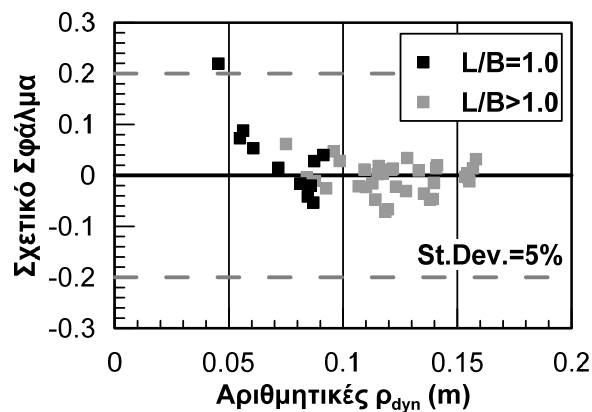


Σχήμα 5.8: Διακύμανση της παραμέτρου c_{imp} συναρτήσει του λόγου L/B .

Η ακρίβεια της προτεινόμενης σχέσης αποτιμάται στα **Σχήματα 5.9** και **5.10**, με την ένα - προς - ένα σύγκριση μεταξύ αναλυτικών και αριθμητικών προβλέψεων, και σε όρους σχετικού σφάλματος αντίστοιχα. Στα σχήματα αυτά με μαύρα τετραγωνάκια έχουν σχεδιαστεί οι περιπτώσεις τετραγωνικών θεμελίων ($L/B=1.0$), ενώ με γκρι οι περιπτώσεις ορθογωνικών θεμελίων ($L/B>1.0$). Όπως παρατηρείται, η σύγκριση είναι αρκετά ικανοποιητική τόσο για τα τετραγωνικά όσο και για τα ορθογωνικά θεμέλια, ενώ η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος είναι μόλις $\pm 5\%$ και για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και αναλυτικά εκτιμώμενων τιμών καθιζήσεων για τετραγωνικά (μαύρο) και ορθογωνικά (γκρι) θεμέλια.



Σχήμα 5.10: Σχετικό σφάλμα μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων συναρτήσει των αριθμητικών προβλέψεων (ρ_{dyn}) για τετραγωνικά (μαύρο) και ορθογωνικά (γκρι) θεμέλια.

5.4 Επίδραση διαστάσεων εδαφικής βελτίωσης στον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας για ορθογωνικά θεμέλια.

Στις 2-Δ αναλύσεις θεμελιολωρίδας, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο **Κεφ. 4**, ο υπολογισμός του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας για περιορισμένη βελτίωση, ήταν συνάρτηση της γεωμετρίας της βελτιωμένης ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, στον υπολογισμό συμπεριλαμβάνεται το πάχος, H_{imp} και το πλάτος, B_{imp} ($L_{imp} \rightarrow \infty$) της εδαφικής βελτίωσης, όπως περιγράφεται στη σχέση (5.6), με την σταθερά c_{imp} να λαμβάνει την τιμή $c_{imp}=0.65$:

$$\frac{F.S.deg}{F.S.deg^{inf}} = 1 - \exp \left[-c_{imp} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B} \right)^{0.14} \right] \quad (5.6)$$

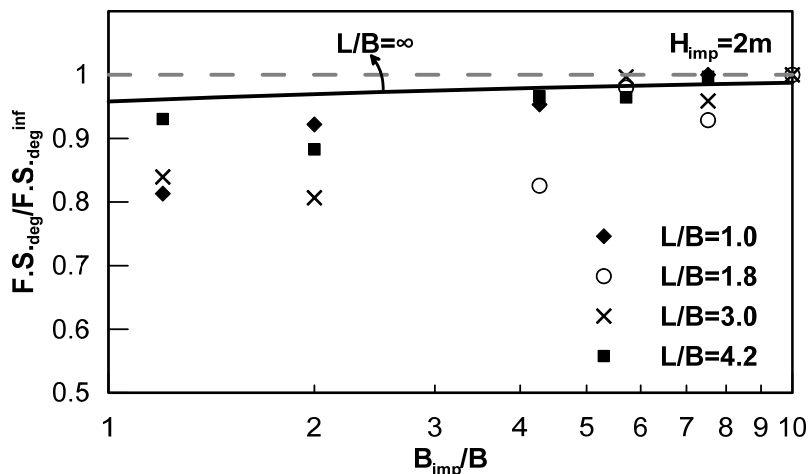
Όπου $F.S.deg^{inf}$ και $F.S.deg$ οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για «άπειρη» και περιορισμένη βελτίωση αντίστοιχα.

Για την στατιστική επεξεργασία των 3-Δ αναλύσεων ορθογωνικών θεμελίων με περιορισμένη βελτίωση, χρησιμοποιήθηκαν μόνον οι περιπτώσεις με πάχος βελτίωσης $H_{imp}=2m$, αφού για $H_{imp}=4m$ δεν υπήρχαν αρκετά διαθέσιμα αριθμητικά αποτελέσματα. Αυτή η έλλειψη δεδομένων οφείλεται στην πολυπλοκότητα του φαινομένου (φέρουσα ικανότητα ρευστοποιημένου / μερικώς ρευστοποιημένου εδαφικού προφίλ) και την αδυναμία σύγκλισης κατά την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων.

Στο διάγραμμα του **Σχήματος 5.11** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας, κανονικοποιημένα με τον συντελεστή ασφαλείας για «άπειρη» βελτίωση, $F.S.deg/F.S.deg^{inf}$, σε σχέση με το ανηγμένο πλάτος βελτίωσης, B_{imp}/B , για διάφορες τιμές του λόγου των διαστάσεων του θεμελίου, L/B . Επίσης, έχει σχεδιαστεί με μαύρη γραμμή και η αναλυτική σχέση για θεμελιολωρίδες ($L/B \rightarrow \infty$), σύμφωνα με την **Σχέση 5.6** με $c_{imp}=0.65$. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης του λόγου των διαστάσεων του θεμελίου, L/B , η σχέση (5.6) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$-\ln \left(1 - \frac{F.S.deg}{F.S.deg^{inf}} \right) = c_{imp} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B} \right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B} \right)^{0.14} \quad (5.7)$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.12** σε δι-λογαριθμικό σύστημα αξόνων για όλες τις τιμές του λόγου L/B για την περίπτωση $H_{imp}=2m$. Επίσης στα διαγράμματα αυτά, έχουν σχεδιαστεί με γκρι γραμμή οι συσχετίσεις σύμφωνα με την **Σχέση 5.7** με την κατάλληλη κάθε φορά τιμή του σταθερού όρου c_{imp} . Τα αποτελέσματα είναι σε μικρή σχετικά συμφωνία με την αναλυτική εξίσωση 5.7.

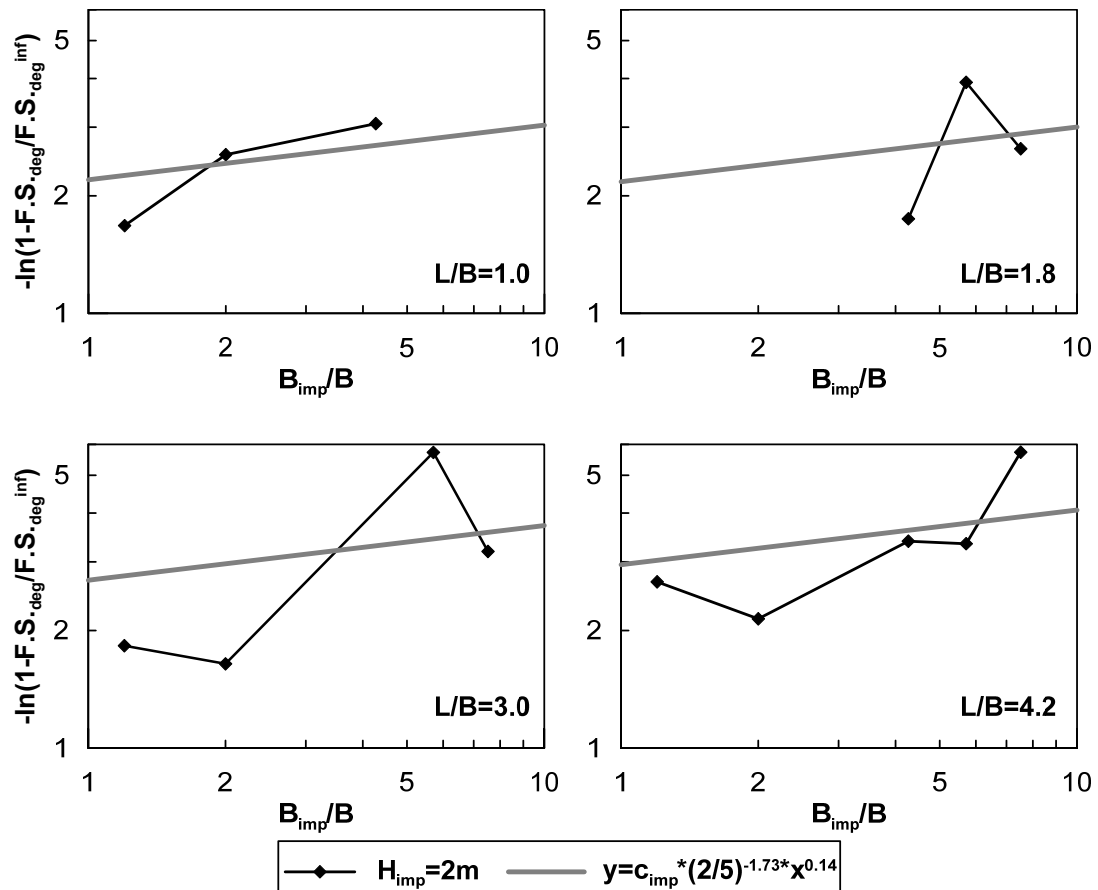


Σχήμα 5.11: Απομειωμένος συντελεστής ασφαλείας κανονικοποιημένος με τον συντελεστή ασφαλείας για «άπειρη» βελτίωση ($F.S._{deg} / F.S._{deg}^{inf}$), σε σχέση με το κανονικοποιημένο πλάτος βελτίωσης B_{imp}/B για διάφορες τιμές του λόγου L/B και πάχους βελτίωσης $H_{imp}=2m$.

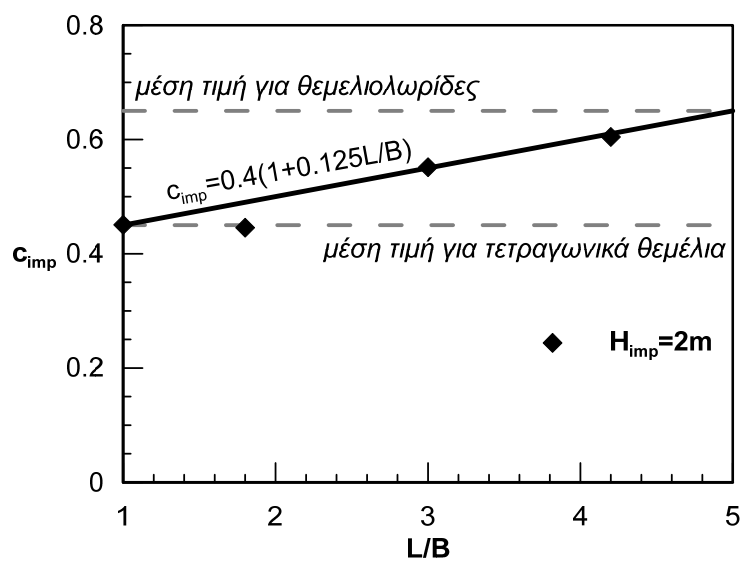
Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, στο **Σχήμα 5.13** παρουσιάζονται συνολικά οι τιμές της παραμέτρου c_{imp} για τους διάφορους λόγους L/B . Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει από την προσαρμογή της σχέσης (5.7) στα αριθμητικά δεδομένα. Στο **Σχήμα 5.13** σημειώνεται και η προτεινόμενη σχέση που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$c_{imp} = 0.4 \cdot \left(1 + 0.125 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 0.65 \quad (5.8)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως και προηγουμένως, ο κρίσιμος λόγος L/B πέραν της τιμής του οποίου τα ορθογωνικά θεμέλια (3-Δ) αποκρίνονται όπως οι θεμελιολωρίδες (2-Δ) είναι της τάξης $(L/B)_{cr}=4-5$.

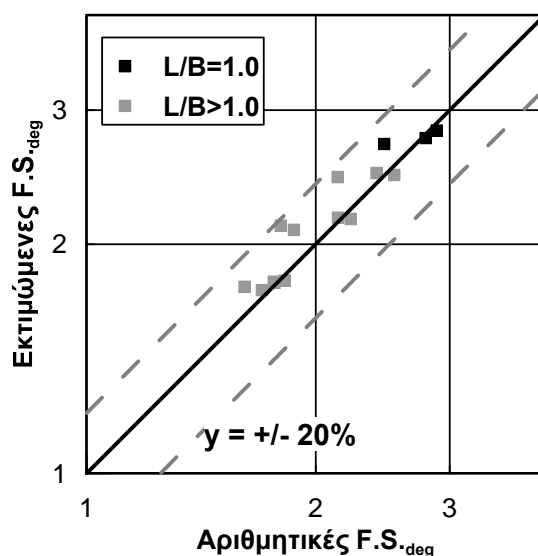


Σχήμα 5.12: Συσχέτιση της ποσότητας $-\ln(1 - F.S_{deg} / F.S_{deg}^{inf})$, σε σχέση με το κανονικοποιημένο πλάτος βελτίωσης B_{imp}/B , σε δι-λογαριθμικό διάγραμμα για διάφορες τιμές του λόγου L/B και πάχους βελτίωσης $H_{imp} = 2m$.

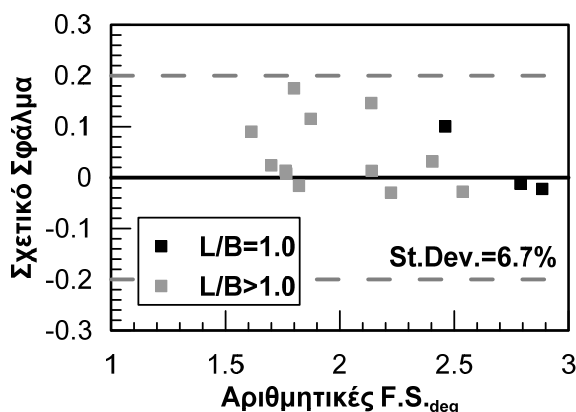


Σχήμα 5.13: Διακόμανση της παραμέτρου c_{imp} συναρτήσει του λόγου L/B .

Η ακρίβεια της προτεινόμενης σχέσης αποτιμάται στα Σχήματα 5.14 και 5.15, με την σύγκριση των αναλυτικών εκτιμήσεων με τις αριθμητικές προβλέψεις τόσο 1-1 όσο και σε όρους σχετικού σφάλματος. Στα σχήματα αυτά με μαύρα τετραγώνια έχουν σχεδιαστεί οι περιπτώσεις τετραγωνικών θεμελίων ($L/B=1.0$), ενώ με γκρι οι περιπτώσεις ορθογωνικών θεμελίων ($L/B>1.0$). Όπως παρατηρείται από τις λίγες διαθέσιμες τιμές, η σύγκριση είναι αρκετά ικανοποιητική τόσο για τα τετραγωνικά όσο και για τα ορθογωνικά θεμέλια, ενώ η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος είναι μόλις $\pm 7\%$ και για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 5.14: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και αναλυτικά εκτιμώμενων τιμών απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας για τετραγωνικά (μαύρο) και ορθογωνικά (γκρι) θεμέλια.



Σχήμα 5.15: Σχετικό σφάλμα μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών προβλέψεων συναρτήσει των αριθμητικών προβλέψεων ($F.S_{deg}$) για τετραγωνικά (μαύρο) και ορθογωνικά (γκρι) θεμέλια.

5.5 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τις αριθμητικές αναλύσεις ορθογωνικού θεμελίου (3-Δ), όπου ποσοτικοποιήθηκε η επίδραση των διαστάσεων του θεμελίου στις δυναμικές καθιζήσεις και στην απομειωμένη φέρουσα ικανότητα. Όπως παρουσιάστηκε, η μορφή των αριθμητικών δεδομένων, επέτρεψε την εφαρμογή των σχέσεων που προέκυψαν για θεμελιολωρίδες, με κατάλληλη όμως τροποποίηση για να συνοπολογιστούν οι επιδράσεις των διαστάσεων του θεμελίου. Προέκυψαν έτσι οι ακόλουθες αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των καθιζήσεων και του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας:

Συσχέτιση $\rho_{dyn} - F.S.deg$:

$$\rho_{dyn} = c \cdot a_{max} \cdot (T_{exc} + T_{soil})^2 \cdot (N + 2) \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^{0.5} \cdot \left[1 + 0.15 \cdot \left(\frac{1}{F.S.deg}\right)^5\right] \quad (5.1)$$

$$c = 0.011 \cdot \left(1 + 0.067 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 0.015 \quad (5.2)$$

Δυναμικές καθιζήσεις:

$$\frac{\rho_{dyn}^{inf}}{\rho_{dyn}} = 1 - \exp \left[-c_{imp1} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B}\right)^{0.30} \right] \quad (5.3)$$

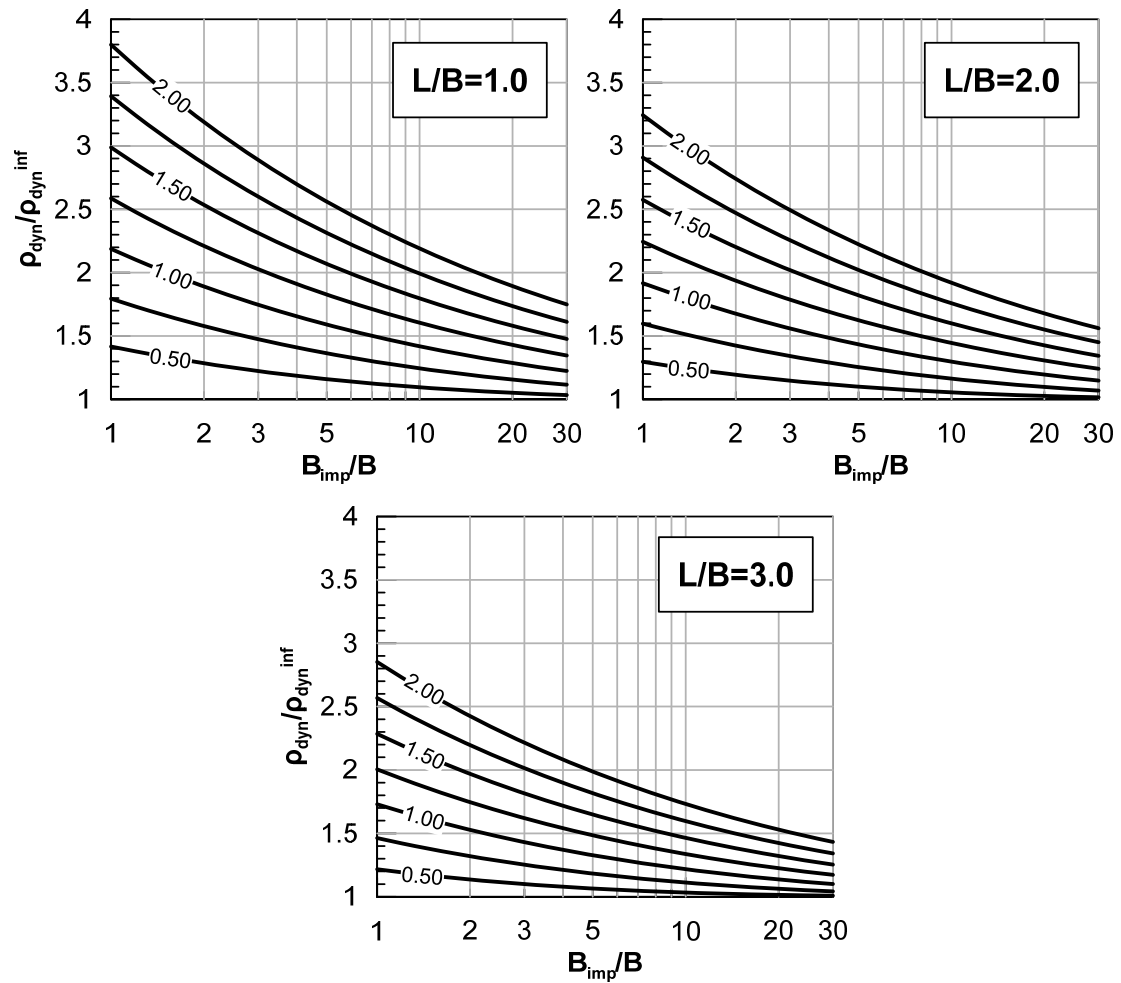
$$c_{imp1} = 0.485 \cdot \left(1 + 0.26 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 1.05 \quad (5.5)$$

Απομειωμένος Συντελεστής Ασφαλείας:

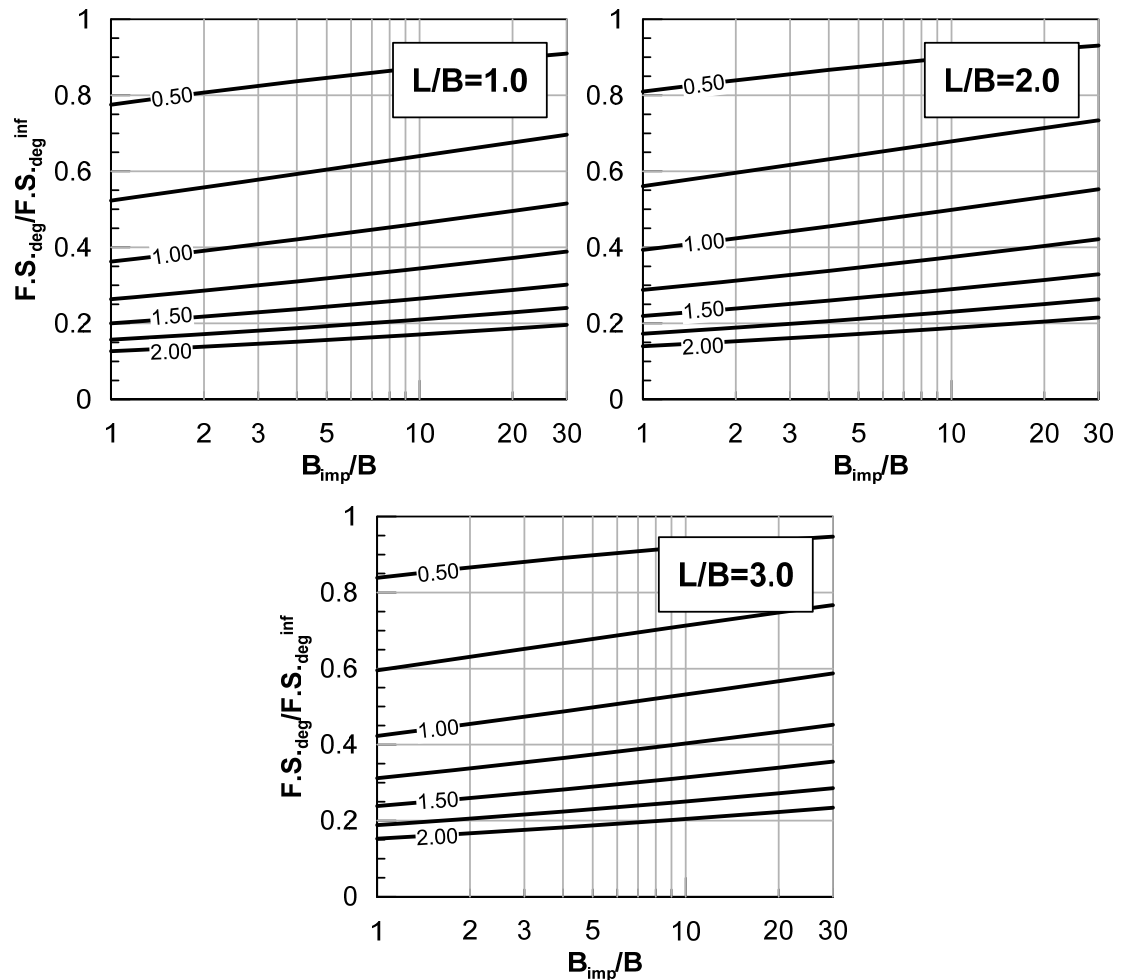
$$\frac{F.S.deg}{F.S.deg^{inf}} = 1 - \exp \left[-c_{imp2} \cdot \left(\frac{H_{imp}}{B}\right)^{-1.73} \cdot \left(\frac{B_{imp}}{B}\right)^{0.14} \right] \quad (5.6)$$

$$c_{imp2} = 0.4 \cdot \left(1 + 0.125 \cdot \frac{L}{B}\right) \leq 0.65 \quad (5.8)$$

Για ευκολότερη επιλογή των μέτρων εδαφικής βελτίωσης, οι παραπάνω αναλυτικές εκφράσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια σε διαγράμματα σχεδιασμού για ορθογωνικά θεμέλια ($L/B=1.0,2.0,3.0$), για διάφορες τιμές του ανηγμένου πάχους ($H_{imp}/B=0.50-2.00$) και του ανηγμένου πλάτους ($L_{imp}/B=1-30$) βελτίωσης.



Σχήμα 5.16: Διαγράμματα σχεδιασμού δυναμικής καθίζησης, κανονικοποιημένης ως προς την καθίζηση για «άπειρη» βελτίωση σε σχέση με το πλάτος βελτίωσης (B_{imp}/B) για ορθογωνικά θεμέλια ($L/B=1.0, 2.0, 3.0$) και για διάφορες τιμές του λόγου πάχους βελτίωσης προς πλάτος θεμελίου ($H_{imp}/B=0.50-2.00$).



Σχήμα 5.17: Διαγράμματα σχεδιασμού απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας, κανονικοποιημένου ως προς τον συντελεστή για «άπειρη» βελτίωση σε σχέση με το πλάτος βελτίωσης (B_{imp}/B) για ορθογωνικά θεμέλια ($L/B=1.0, 2.0, 3.0$) και για διάφορες τιμές του λόγου πάχους βελτίωσης προς πλάτος θεμελίου ($H_{imp}/B=0.50-2.00$).

Κεφάλαιο 6

Τελικά Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1 Τελικά Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Η περιγραφή της καμπύλης φορτίου - μετατόπισης με βάση το υπερβολικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας. Μάλιστα, η προκύπτουσα τιμή της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας είναι απαλλαγμένη από τις επιδράσεις των συνοριακών συνθηκών της διάταξης.
- Οι αναθεωρημένες προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις που παρουσιάζονται για την δυναμική καθίζηση και τον απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα οι τυπικές αποκλίσεις του σχετικού σφάλματος είναι της τάξης του: 22% για την εκτίμηση της καθίζησης σε «απείρως» εκτεινόμενη βελτίωση, 7% για την εκτίμηση της καθίζησης σε περιορισμένη βελτίωση και τέλος 15% για την εκτίμηση του απομειωμένου συντελεστή ασφαλείας σε περιορισμένη βελτίωση.
- Η απόκριση των ορθογωνικών θεμελίων (3-Δ αναλύσεις) σε όρους δυναμικής καθίζησης και απομειωμένης φέρουσας ικανότητας ταυτίζεται πρακτικά με αυτήν των θεμελιολωρίδων (2-Δ αναλύσεις) για τιμές του λόγου μήκος προς πλάτος θεμελίου μεγαλύτερες του $(L/B)_{cr}=4-5$.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Εν κατακλείδι, προσφέρεται ευρύ πεδίο για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο αυτό. Οι προτάσεις μελλοντικής έρευνας είναι οι ακόλουθες:

- Πολύτιμη θα ήταν η πειραματική διερεύνηση της μετασεισμικής φέρουσας ικανότητας, μερικώς βελτιωμένου ρευστοποιήσιμου εδάφους. Η υλοποίηση τέτοιων μοντέλων σε φυγοκεντριστή ή σεισμική τράπεζα, μπορεί να γίνει με την κατασκευή μιας διάταξης η οποία αμέσως μετά το τέλος της δόνησης θα επιβάλλει πρόσθετη φόρτιση στο προσομοιωθέν θεμέλιο, μέχρι την αποτυχία.
- Θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να εντοπισθούν στην βιβλιογραφία και να προσομοιωθούν πραγματικά ιστορικά περιστατικά, που αφορούν επιφανειακές θεμελιώσεις με προηγούμενη βελτίωση για την αποφυγή του κινδύνου ρευστοποίησης. Η επιβολή των πραγματικών χρονοϊστοριών και η σύγκριση των αναπτυσσόμενων σεισμικών καθιζήσεων θα είναι βασικής σημασίας.
- Η αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίου – ανωδομής είναι πρωταρχικής σημασίας για τις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις αλλά και για τον μετα-σεισμικό απομειωμένο συντελεστή ασφαλείας. Γι' αυτό το λόγο, θα πρέπει να προσομοιωθεί ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής και να εξεταστεί η επιρροή των αδρανειακών δυνάμεων στην απόκριση της θεμελίωσης.

Βιβλιογραφία

- Adalier, K., Elgamal, A., Meneses, J., Baez, J. I. (2003). "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 571-584.
- Andrianopoulos, K. (2006). "Numerical simulation of static and dynamic loading on elastoplastic soils", PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department.
- Andrianopoulos, K. I., Papadimitriou, A. G., Bouckovalas, G. D. (2010). "Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostuctures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No.10, pp. 895-911.
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K. K., Hossain, M. M., Fruth, L. S. (1992). "VELACS: Verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; laboratory testing - Soil Data Report", Technical Rep. Prepared for National Science Foundation, The Earth Technology Corporation, Irvine, CA.
- Bouckovalas, G. D., Dakoulas, P. (2007). "Liquefaction performance of shallow foundations in presence of a soil crust", 4th ICEGE, Thessaloniki, Greece 2007.
- Cascone, E., Bouckovalas, G. (1998). "Seismic bearing capacity of footings on saturated sand with a clay cap", *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France.
- Chaloulos, Y. K. (2012). "Numerical Investigation of Pile Response under Liquefaction and Ground Lateral Spreading", PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department.

- Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M., Wilson, D. (2010). "Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 1, pp. 151-164.
- Dimitriadi, V. (2014). "Performance based design and soil improvement methods of shallow foundations on liquefiable soils", PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department.
- Hatanaka, M., Suzuki, Y., Miyaki, M., Tsukuni, S. (1987). "Some factors affecting the settlement of structures due to sand liquefaction in shaking table tests", *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 1, March, pp. 94-101.
- Hausler, E., Sitar, N. (2002). "Performance of Improved Ground", *Annual Meeting Research Digest*, No.2002-16.
- Iai, S., Koizumi, K., Kurata, E. (1991). "Ground compaction area as a remedial measure against liquefaction", *Tsuchi-to-Kiso, JSSMFE*, Vol. 39, No. 2, pp. 35-40 (in Japanese).
- Itasca (2005). "Fast Lagrangian Analysis of Continua", Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota.
- Japanese Fire Defence Agency, JFDA (1974).
- Japanese Geotechnical Society, JGS (1998). "Remedial Measures Against Soil Liquefaction".
- Karamitros, D. (2010). "Development of a numerical algorithm for the dynamic elastoplastic analysis of geotechnical structures in two (2) and three (3) dimensions", PhD Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department.
- Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D., Chaloulos, Y. K. (2013). "Insight into the Seismic Liquefaction Performance of Shallow Foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No. 4, pp. 599-607.

- Liu, L., Dobry, R. (1997). "Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 6, pp. 557-567.
- Meyerhof, G. G., Hanna, A. M. (1978). "Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 565-572.
- Papadimitriou, A. G., Bouckovalas, G. D. (2002). "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 191-204.
- Permanent International Association of Navigation Congresses, PIANC (2001). "Seismic Design Guidelines for Port Structures".
- Politou, C. (2010). "Earthquake response analysis of a surface foundation of a bridge pier lying over a partially improved liquefiable soil", MSc Thesis, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Geotechnical Department.
- Port & Harbour Research Institute, PHRI (1997). "Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land".
- Richards, Jr. R., Elms, D. G., Budhu, M. (1993). "Seismic bearing capacity and settlements of foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 4, pp. 662-674.
- Shahir, H., Pak, A. (2009). "Numerical Investigation of the Effects of Soil Densification on the Reduction of Liquefaction-Induced Settlement of Shallow Foundations", *Transaction A: Civil Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 331-339.
- Sitar, N., Hausler, E. (2012). "Influence of Ground Improvement on Liquefaction Induced Settlement: Observations from Case Histories and Centrifuge Experiments", Invited Lecture Presented to the Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea, March 22, 2012.

- Structural Engineers Association of California, SEAOC (1999). "What Structural Engineers need to know about Liquefaction", Proc. of SEAOC 1999 Convention, pp. 45-63.
- Tokimatsu, K., Seed, B. H. (1987). "Evaluation of settlement in sands due to earthquake shaking", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 8, pp. 861-878.
- Tsuchida, H., Iai, S., Kurata, E. (1976). "On zone of soil property improvement of soils", Proc. of 14th Meeting of Earthquake Engineering, pp. 9-12 (in Japanese).
- Vesic, A. S. (1973). "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 99, No. SM1, pp. 45-73.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. (1977). "Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes", Soils and Foundations, Vol. 17, No. 1, pp. 23-38.
- Γκαζέτας, Γ. (2006). "Σημειώσεις Εδαφομηχανικής", Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Γκαζέτας, Γ. (2007). "Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής", Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Καββαδάς, Μ. (2007). "Σημειώσεις Θεμελιώσεων Τεχνικών Έργων", Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Μπουκοβάλας, Γ. (2006). "Στοιχεία Εδαφομηχανικής", Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Μπουκοβάλας, Γ. (2011). "13 Διαλέξεις Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής", Ε.Μ.Π., Αθήνα.

