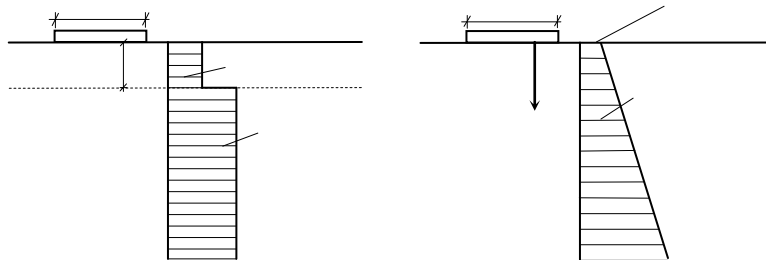


**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ  
(ΟΑΣΠ)**

Τελική Εκθεση  
του ερευνητικού έργου με τίτλο:

**ΟΡΙΑΚΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ  
ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ**



**Φορέας εκπόνησης :**  
Τομέας Γεωτεχνικής,  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ. Πολυτεχνείου

**Επιστημονικός Υπεύθυνος :**  
Μ. Καββαδάς, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Αύγουστος 2005



Τελική Εκθεση  
του Ερευνητικού έργου με τίτλο:

## ΟΡΙΑΚΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή – Σκοπός	5
2	Φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων σε ομοιογενή εδάφη	10
2.1	Γενικά	10
2.2	Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας	10
2.2.1	Μέθοδος ΕΑΚ 2000 / DIN 4017	11
2.2.2	Επίλυση κατά Meyerhof (1963)	12
2.2.3	Επίλυση κατά Terzaghi (1943)	14
2.2.4	Επίλυση κατά Brinch Hansen	15
2.2.5	Επίλυση κατά Vesic (1970)	18
2.2.6	Επίλυση κατά Skempton (1951)	21
2.2.7	Επίλυση κατά Prandtl-Sokolovski (1960)	21
2.2.8	Δυναμικές μέθοδοι - Μέθοδος κατά τον Ευρωκώδικα 8	22
2.2.9	Σύγκριση των αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας	25
2.3	Αριθμητικές επιλύσεις για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας	27
2.3.1	Επιλύσεις με το πρόγραμμα FLAC-3D	27
2.3.2	Αριθμητικές επιλύσεις με το FLAC-3D για ορθή κεντρική και έκκεντρη φόρτιση	30
3	Φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων σε δίστρωτο έδαφος υπό ορθή (κεντρική και έκκεντρη) φόρτιση	49
3.1	Γενικά	49
3.2	Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 0.5$	50
3.3	Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 1$	57
3.4	Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 1.5$	57
3.5	Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 2$	64
4	Φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων σε έδαφος με γραμμικά αυξανόμενη αντοχή υπό ορθή (κεντρική και έκκεντρη) φόρτιση	73
4.1	Γενικά	73
5	Διερεύνηση της επιρροής της μερικής αποκόλλησης στη φέρουσα ικανότητα πεδίων	80
5.1	Εισαγωγή	80
5.2	Μοντέλο υπολογισμού	81
5.3	Εξισώσεις της κίνησης	82
5.4	Παραμετρική Διερεύνηση	84
5.5	Ψευδοστατική θεώρηση	88
5.6	Αποτελέσματα για ημιτονική διέγερση	89
5.7	Παράδειγμα σεισμικής διέγερσης	109
5.8	Συμπεράσματα	114
6	Τελικά Συμπεράσματα	115
7	Βιβλιογραφικές αναφορές	121



# ΟΡΙΑΚΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ

## ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

### 1 Εισαγωγή – Σκοπός

Η παρούσα Τελική Έκθεση αφορά στο Ερευνητικό Έργο με τίτλο «Οριακή φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμικών δράσεων» που χρηματοδοτήθηκε από τον ΟΑΣΠ και εντάσσεται στον Τομέα του Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας και ειδικότερα στη Θεματική Ενότητα «Αντισεισμική τεχνολογία : Εδαφοτεχνικά θέματα - αστοχίες εδαφών - αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής».

Η Έκθεση αυτή υποβάλλεται σύμφωνα με το άρθρο 4 της σχετικής σύμβασης που υπογράφηκε μεταξύ του ΟΑΣΠ και του ΕΜΠ. Το ερευνητικό έργο εκπονήθηκε με επιστημονικό υπεύθυνο τον Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ Μ. Καββαδά και την ουσιαστική συμμετοχή του Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ Ι. Ψυχάρη. Για την παρακολούθηση την προόδου του προγράμματος, στις 7 Φεβρουαρίου 2002 έγινε ενημέρωση της Ειδικής Επιστημονικής Επιτροπής στα Γραφεία του ΟΑΣΠ από τον Επιστημονικό Υπεύθυνο (Μ. Καββαδάς) και τον συμμετέχοντα στο πρόγραμμα Επικ. Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ι. Ψυχάρη.

Έναυσμα για το παρόν ερευνητικό έργο αποτέλεσε το γεγονός ότι η εκτίμηση της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμικών δράσεων στην ανωδομή δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς (Pecker, 1996; Pecker & Pender, 2000). Αντιθέτως, έχει διερευνηθεί επαρκώς (κυρίως την δεκαετία 1980-90) η οιονεί-ελαστική συμπεριφορά των επιφανειακών θεμελιώσεων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση πριν την αστοχία, με την ανάπτυξη των σχέσεων που δίνουν τις σύνθετες δυσκαμψίες για διάφορα σχήματα επιφανειακών θεμελιώσεων καθώς και την διατύπωση σχέσεων που δίνουν την απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης και βεβαίως την οριακή περίπτωση της πλήρους «ρευστοποίησης». Κατά την εκτίμησή μας, ο κυριότερος λόγος για την υστέρηση αυτή είναι ότι, μέχρι σχετικά πρόσφατα, οι παρατηρηθείσες αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμών ήταν σπάνιες και συνεπώς το ενδιαφέρον των ερευνητών είχε επικεντρωθεί στην οιονεί-ελαστική απόκριση των επιφανειακών θεμελιώσεων μέσω της προσομοίωσής τους ως ισοδύναμων γραμμικών ελατηρίων κατά την δυναμική ανάλυση των ανωδομών υπό σεισμικές δράσεις. Εξαίρεση βεβαίως αποτελούν οι περιπτώσεις αστοχίας λόγω ρευστοποίησης, οι οποίες όμως οφείλονται κυρίως στη δραστική μείωση (πρακτικώς μέχρι μηδενισμού) της διατμητικής αντοχής του εδάφους

λόγω των αναπτυσσόμενων υπερπιέσεων πόρων και όχι σε μηχανισμό υπέρβασης της οριακής αντοχής του εδάφους λόγω των επιβαλλόμενων σεισμικών δράσεων από την ανωδομή.

Η κατάσταση αυτή άρχισε να αλλάζει από το 1985 οπότε παρατηρήθηκαν αρκετές αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων κατά τον σεισμό Michoacan-Guerezo στο Μεξικό, και στη συνέχεια στο Kobe Ιαπωνίας (1995) και στον πρόσφατο καταστροφικό σεισμό της Νικομήδειας (Izmit) στην Τουρκία (17 Αυγούστου 1999). Κατά τον σεισμό της Τουρκίας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις διαφορικών καθιζήσεων, περιστροφών, και ανατροπών των θεμελιώσεων δεκάδων κτιρίων στην πόλη Adapazari. Τα κτίρια αυτά παρέμεναν δομοστατικώς ακέραια. Καθ' όλες τις ενδείξεις οι παραμορφώσεις αυτές οφείλονται εν μέρει μόνον στην ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων στις ιλυο-αμμώδεις στρώσεις του υπεδάφους, κυρίως όμως στις σημαντικές οριζόντιες δυνάμεις και ροπές που η ανωδομή επέβαλε στην θεμελίωση (και προκάλεσαν υπέρβαση της οριακής φέρουσας ικανότητας των θεμελιώσεων, ουσιαστικά ανεξαρτήτως της όποιας συνεισφοράς της μείωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους). Τα φορτία αυτά φαίνεται ότι οδήγησαν σε υπέρβαση του οριακού φορτίου του θεμελίου (στις περιπτώσεις ανατροπής) ή σε μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις (στις περιπτώσεις στρωφών), τα οποία είναι και τα θέματα της προτεινόμενης έρευνας.

Αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμού μπορούν να οφείλονται στους εξής λόγους (και συνήθως σε συνδυασμό τους) :

1. Υψηλές σεισμικές δράσεις που υπερβαίνουν σημαντικά τις τιμές σχεδιασμού της θεμελίωσης, κυρίως σε λυγηρά κτίρια (πολυ-όροφα με μικρές διαστάσεις κατόψεως) και σεισμικά γεγονότα που διεγείρουν έντονα την πρώτη ιδιομορφή του κτιρίου.
2. Μείωση της διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχηματισμού λόγω :
  - (α) επαναλαμβανόμενης φόρτισης (ολιγοκυκλική «κόπωση»), και
  - (β) ανάπτυξης υδατικών υπερπιέσεων πόρωνσε σχέση με την αντοχή του εδαφικού σχηματισμού υπό μονοτονική φόρτιση (ακόμη και υπό αστράγγιστες συνθήκες) η οποία συνήθως χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση της φέρουσας ικανότητας των επιφανειακών θεμελιώσεων.
3. Ανεπάρκεια των συμβατικών μεθόδων ανάλυσης της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων για την περίπτωση σεισμικών δράσεων που μπορεί να οφείλεται :
  - (α) Στις πολύ μεγάλες εκκεντρότητες της φόρτισης των θεμελίων λόγω σεισμικών επιφορτίσεων (σε σχέση με τις τιμές επί τη βάσει των οποίων έχουν βαθμονομηθεί οι συνήθεις μέθοδοι ανάλυσης). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δυναμικές αναλύσεις πεδίων σε ελαστική θεμελίωση με μερική αποκόλληση λόγω μεγάλης εκκεντρότητας, δείχνουν ότι, ανάλογα και με τη γωνία στροφής του πεδίου, μπορεί η ενεργός επιφάνεια έδρασης να είναι πολύ μικρή και, επομένως, να υπάρχει μεγάλος κίνδυνος αστοχίας του εδάφους.
  - (β) Στην ύπαρξη σημαντικής τέμνουσας στη βάση του πεδίου (που μπορεί να ενεργοποιήσει και φαινόμενα ολίσθησης πέραν της κλασσικής αστοχίας)

Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα αναφέρεται κυρίως στον τελευταίο παράγοντα (ανεπάρκεια συμβατικών μεθόδων ανάλυσης) και για την διερεύνησή του ακολουθεί την εξής μεθοδολογία:

- (1) Παρουσιάζονται κλασσικές μέθοδοι υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση σε ομοιογενή εδάφη. Τέτοιες μέθοδοι είναι :
  - a. Η τροποποιημένη μέθοδος Meyerhof και Brinch-Hansen (όπως περιλαμβάνεται στο DIN 4017 και στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό ΕΑΚ 2000), καθώς και

η περαιτέρω τροποποίησή της (στον συντελεστή λοξότητας της φόρτισης) όπως αναφέρεται στο τελικό κείμενο του Ευρωκώδικα 7 (2004).

- b. Η μέθοδος υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων που περιλαμβάνεται στο πληροφοριακό Παράρτημα F του Ευρωκώδικα 8, όπως αναπτύχθηκε από τον Pecker (π.χ. Pecker, 1996) και βελτιώθηκε μεταγενέστερα.

Οι ανωτέρω μέθοδοι συγκρίνονται μεταξύ τους για διάφορες τιμές της εκκεντρότητας και λοξότητας της φόρτισης προκειμένου να επιβεβαιωθεί η συμβατότητά τους και οι τυχόν σχετικές αποκλίσεις τους. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των αναλυτικών μεθόδων συγκρίνονται με αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (πρόγραμμα PLAXIS – για λωριδωτό πέδιλο) και την μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (πρόγραμμα FLAC-3D –για τετραγωνικά, ορθογωνικά και λωριδωτά πέδιλα) υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση. Σκοπός των ανωτέρω συγκρίσεων είναι να βαθμονομηθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων (σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους) προκειμένου στη συνέχεια οι αριθμητικές μέθοδοι να χρησιμοποιηθούν για τη συναγωγή συμπερασμάτων στην περίπτωση θεμελιώσεων επί ανομοιογενούς εδάφους (όπου δεν υπάρχουν αναλυτικές επιλύσεις για σύγκριση).

- (2) Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων (με πεπερασμένα στοιχεία και πεπερασμένες διαφορές) για την οριακή φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων (τετραγωνικά, ορθογωνικά και λωριδωτά πέδιλα) υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση σε ανομοιογενείς σχηματισμούς και συγκεκριμένα :

a. Σε δίστρωτο σχηματισμό (με διαφορετική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στην ανώτερη και κατώτερη στρώση και ποικίλα πάχη της ανώτερης στρώσης) και

b. Σε εδαφικό σχηματισμό με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή με το βάθος (προκειμένου να προσομοιωθούν οι συνθήκες συνθήκες κανονικά στερεοποιημένων αργίλων).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με μορφή κανονικοποιημένων νομογραφημάτων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρύ φάσμα περιπτώσεων.

- (3) Σχολιάζεται η επιρροή των σεισμικών δράσεων στην απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους κάτω από το θεμέλιο, κυρίως μέσω της ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων. Το θέμα αυτό, αν και δεν σχετίζεται με το αντικείμενο της παρούσας έρευνας, έχει μεγάλη σημασία επειδή η απομείωσης της αντοχής του εδάφους επηρεάζει δραστικά την φέρουσα ικανότητα (μέχρι πρακτικού μηδενισμού της στην περίπτωση της ρευστοποίησης).

- (4) Διερευνάται η επιρροή της μερικής ανύψωσης των επιφανειακών πεδίων στην οριακή φέρουσα ικανότητα.

Η πρακτική χρησιμότητα των ανωτέρω διερευνήσεων τεκμηριώνεται από το γεγονός ότι στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ.–2000) δεν έχει δοθεί πλήρης γενική απάντηση στα θέματα του οριακού φορτίου (φέρουσας ικανότητας) επιφανειακών θεμελιώσεων (πεδίων, πεδιλοδοκών και κοιτοστρώσεων), αν και οι συγκεκριμένοι τρόποι θεμελίωσης αποτελούν τον πλέον συνηθισμένο τρόπο θεμελίωσης των οικοδομικών έργων. Συγκεκριμένα :

- α) Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός παρέχει μόνον μία *ενδεικτική* αναλυτική μέθοδο ψευδοστατικού υπολογισμού του οριακού φορτίου, υπό μορφή Παραρτήματος αναφερομένου σε θεμελίωση επί ομοιογενούς εδάφους. Ο μηχανικός δεν διαθέτει

πρακτικά βοηθήματα για να αντιμετωπίσει παράγοντες όπως η στρωματογραφική ανομοιογένεια και η ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων στο ίδιο το έδαφος.

- β) Σε περίπτωση μεγάλης ψευδοστατικής εκκεντρότητας (που υπερβαίνει το 1/3 της αντίστοιχης διάστασης του θεμελίου) ο κανονισμός επιβάλλει απλώς μερικούς περιορισμούς “ώστε να αποφεύγονται μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις”.
- γ) Ο ΕΑΚ 2000 δεν είναι συμβατός με τον Ευρωκώδικα 8 ο οποίος προτείνει τη μέθοδο Pecker για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων.

Σε σχέση λοιπόν με την οριακή φέρουσα ικανότητα των επιφανειακών θεμελιώσεων, υπάρχει διπλή ανάγκη : πρώτον, να ολοκληρωθούν, επεκταθούν και επιβεβαιωθούν οι μέθοδοι υπολογισμού του οριακού φορτίου σε σεισμική φόρτιση, και δεύτερον να συνταχθούν πρακτικά βοηθήματα για τον μηχανικό που εφαρμόζει τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό για περιπτώσεις θεμελιώσεων σε ανομοιογενείς εδαφικούς σχηματισμούς.

Με βάση το ανωτέρω σκεπτικό, κύριος σκοπός της προτεινόμενης έρευνας είναι η ποσοτική διερεύνηση της επιρροής των ακολούθων παραγόντων στην αστοχία των επιφανειακών θεμελιώσεων :

1. Του μεγέθους των σεισμικών δράσεων, δηλαδή :

(α) της **σχετικής εκκεντρότητας** της φόρτισης που εκφράζεται μέσω της αδιάστατης παραμέτρου :  $\hat{e} = M / (N B)$ , ή των δύο παραμέτρων :

$$\hat{e}_B = \frac{M_B}{N B} \quad \text{και} \quad \hat{e}_L = \frac{M_L}{N L}$$

σε περίπτωση διπλής εκκεντρότητας της επιβαλλόμενης φόρτισης, και

(β) της **σχετικής λοξότητας** της φόρτισης που εκφράζεται μέσω της αδιάστατης παραμέτρου :  $\hat{i} = Q / N$ , ή των δύο παραμέτρων :

$$\hat{i}_B = \frac{Q_B}{N} \quad \text{και} \quad \hat{i}_L = \frac{Q_L}{N}$$

σε περίπτωση διπλής λοξότητας της επιβαλλόμενης φόρτισης,

όπου M, Q, N είναι η ροπή, τέμνουσα και κατακόρυφη δράση στη στάθμη έδρασης της θεμελίωσης και B, L είναι το πλάτος και μήκος (L > B) του θεμελίου αντιστοίχως.

2. Της μεθόδου ανάλυσης της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων και ειδικότερα της μεθόδου που προτείνεται στον Ε.Α.Κ. 2000 (και στον Ευρωκώδικα 7) και της μεθόδου που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 8.
3. Της ανομοιογένειας του εδάφους θεμελίωσης (μεταβολή της διατμητικής αντοχής με το βάθος).

Οι αριθμητικές διερευνήσεις γίνονται με την παραδοχή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης (δηλαδή αναλύσεις τύπου  $\varphi=0$ ), με το σκεπτικό ότι η εκ σεισμού προκαλούμενη ανακυκλιζόμενη φόρτιση επιφανειακών θεμελιώσεων είναι αρκετά ταχεία ώστε η απόκριση του εδάφους να είναι πρακτικώς αστράγγιστη ακόμη και σε λεπτόκοκκους μή-συνεκτικούς σχηματισμούς (π.χ. ιλείς και λεπτόκοκκες ιλυώδεις άμμους). Περιπτώσεις χονδρόκοκκων μη-συνεκτικών σχηματισμών (π.χ. χονδρόκοκκες άμμοι και αμμοχάλικα), στους οποίους η παραδοχή της αστράγγιστης φόρτισης δεν είναι



ικανοποιητική, δεν προκαλούν συνήθως πρόβλημα υπέρβασης φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης<sup>1</sup> και συνεπώς δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης.

---

<sup>1</sup> Επειδή η φέρουσα ικανότητα ελέγχεται από τις ενεργές παραμέτρους διατμητικής αντοχής με αποτέλεσμα να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της σε περίπτωση όπου η αντοχή του εδάφους ελέγχεται από την αστράγιστη διατμητική αντοχή.

## 2 Φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων σε ομοιογενή εδάφη

### 2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται οι μέθοδοι ανάλυσης και τα αποτελέσματα των υπολογισμών της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων (λωριδωτών, ορθογωνικών και τετραγωνικών) με κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση που εδράζονται στην επιφάνεια (ή σε μικρό βάθος) ομοιογενούς εδάφους (δηλαδή σε ομοιογενή στρώση μεγάλου πάχους). Οι αντίστοιχες επιλύσεις για ανομοιογενές έδαφος παρουσιάζονται σε επόμενο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Κατ' αρχήν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλυτικών επιλύσεων (που βασίζονται στη μέθοδο της οριακής ισορροπίας – limit equilibrium) με έμφαση στη μέθοδο ανάλυσης που προτείνεται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό ΕΑΚ 2000 (μέθοδος DIN 4017 και μέθοδος Ευρωκώδικα 7 Γεωτεχνικής) και στην μέθοδο που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 8 (μέθοδος Pecker, 1996). Για την πληρότητα της παρουσίασης στο επόμενο εδάφιο αναπτύσσονται και άλλες αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του οριακού φορτίου επιφανειακών θεμελιώσεων. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν μικρές μόνον διαφορές από την μέθοδο του Ευρωκώδικα 7 και συνεπώς δεν αξιολογούνται περαιτέρω.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των ανωτέρω αναλυτικών μεθόδων (μέθοδος EC-7 και EC-8) συγκρίνονται μεταξύ τους και με τα αποτελέσματα αντίστοιχων αριθμητικών επιλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (πρόγραμμα FLAC-3D) και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (πρόγραμμα PLAXIS). Σκοπός των συγκρίσεων είναι :

- (α) Να διερευνηθεί η σχετική απόκλιση μεταξύ των μεθόδων του Ευρωκώδικα 7 (που ταυτίζεται με τη μέθοδο του ΕΑΚ 2000) και του Ευρωκώδικα 8.
- (β) Να διερευνηθεί ο βαθμός ακρίβειας των αριθμητικών μεθόδων στην πρόβλεψη του οριακού φορτίου των επιφανειακών θεμελιώσεων προκειμένου να γίνει αξιοποίηση των αριθμητικών μεθόδων στην εκτίμηση του οριακού φορτίου των επιφανειακών θεμελιώσεων σε ανομοιογενές έδαφος (δίστρωτο σχηματισμό και έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη αντοχή με το βάθος), περιπτώσεις για τις οποίες δεν διατίθενται αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού. Οι αναλύσεις για ανομοιογενές έδαφος παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

### 2.2 Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας

Οι σχέσεις αυτές βασίζονται στην μέθοδο της «οριακής ανάλυσης» (limit analysis) η οποία αναπτύχθηκε για ελαστικά – απολύτως πλαστικά υλικά. Με την εφαρμογή της οριακής ανάλυσης μπορεί να εκτιμηθεί :

- (1) Ένα κατώτερο όριο (lower bound) του οριακού φορτίου μέσω μιας στατικής αποδεκτής λύσης, δηλαδή μιας λύσης που ικανοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας χωρίς όμως να ικανοποιεί (υποχρεωτικά) και τις κινηματικές συνθήκες του προβλήματος (συνέχεια παραμορφώσεων και συνοριακές συνθήκες μετακινήσεων).
- (2) Ένα ανώτερο όριο (upper bound) του οριακού φορτίου μέσω μιας κινηματικής αποδεκτής λύσης, δηλαδή μιας λύσης που ικανοποιεί τις κινηματικές συνθήκες του προβλήματος (συνέχεια παραμορφώσεων και συνοριακές συνθήκες μετακινήσεων) χωρίς όμως να ικανοποιεί (υποχρεωτικά) τις εξισώσεις ισορροπίας.

Οι λύσεις που ακολουθούν είναι στατικώς αποδεκτές και συνεπώς αποτελούν κατώτερο όριο του πραγματικού οριακού φορτίου, δηλαδή αποτελούν συντηρητικές εκτιμήσεις του οριακού φορτίου.

### 2.2.1 Μέθοδος ΕΑΚ 2000 / DIN 4017

Στο παράρτημα Ζ του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (Ε.Α.Κ.) 2000 αναφέρεται μέθοδος για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου (ή αλλιώς της φέρουσας ικανότητας) ορθογωνικής επιφανειακής θεμελίωσης. Η μέθοδος αυτή αφορά στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους (τουλάχιστον μέχρι το βάθος επιρροής του θεμελίου). Η μέθοδος του ΕΑΚ 2000 είναι ίδια με τη μέθοδο που περιγράφεται στο DIN 4017 (Επιφανειακές θεμελιώσεις) και παρουσιάζει ελάχιστες διαφορές (μόνον ελαφρές διαφορές στους συντελεστές κλίσης του φορτίου) με τη μέθοδο που περιλαμβάνεται στο Πληροφοριακό Παράρτημα του Ευρωκώδικα 7 Γεωτεχνικής (EN 1997-1, 2004).

Σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 το οριακό αξονικό φορτίο  $R$  της θεμελίωσης είναι:

$$R/A' = cN_c\kappa_c i_c + q'N_q\kappa_q i_q + 0,5\gamma' B' N_\gamma \kappa_\gamma i_\gamma \quad (2.1)$$

όπου  $c$ ,  $\varphi$  είναι η συνοχή και η γωνία τριβής του εδάφους,  $q'$  είναι η ενεργός πίεση επιφόρτισης στη στάθμη της βάσης του θεμελίου (συνήθως λόγω βάθους έδρασης του πεδίου),  $\gamma'$  το ενεργό (ή υπό άνωση<sup>2</sup>) ειδικό βάρος του εδάφους ( $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ ) και  $A'$  είναι η ενεργός επιφάνεια του θεμελίου, στο κέντρο βάρους (εν κατόψει) της οποίας εφαρμόζεται η συνισταμένη των φορτίων.

Είναι:  $A' = B' * L'$  όπου  $B' = B - 2e_B$  είναι το ενεργό πλάτος του πεδίου και  $L' = L - 2e_L$  είναι το ενεργό μήκος του θεμελίου, ενώ  $e_B$  και  $e_L$  είναι οι εκκεντρότητες της φόρτισης στην διεύθυνση του πλάτους  $B$  και του μήκους  $L$  αντίστοιχα, δηλαδή:

$$e_B = M_B / N \quad \text{και} \quad e_L = M_L / N$$

όπου  $M_B$  είναι η εφαρμοζόμενη ροπή (ως προς τον άξονα του πεδίου) κατά το πλάτος ( $B$ ) του πεδίου και  $M_L$  είναι η εφαρμοζόμενη ροπή (ως προς τον άξονα του πεδίου) κατά το μήκος ( $L$ ) του πεδίου.

Οι αδιάστατοι συντελεστές φέρουσας ικανότητας  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$ , που κατά τον ΕΑΚ 2000 εκφράζουν την εδαφική αντίσταση του ομοιογενούς εδάφους, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$N_c = (N_q - 1) / \tan\varphi \quad (2.2\alpha)$$

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2(45 + \varphi/2) \quad (2.2\beta)$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) / \tan\varphi \quad (2.2\gamma)$$

όπου έχει γίνει η υπόθεση ότι έδραση του πεδίου στο έδαφος είναι τραχεία.

Οι συντελεστές σχήματος  $\kappa_c$ ,  $\kappa_q$ ,  $\kappa_\gamma$  εκφράζουν την επιρροή του σχήματος του θεμελίου και είναι:

$$\kappa_c = 1 + (B'/L') * (N_q/N_c) \quad (2.3\alpha)$$

$$\kappa_q = 1 + (B'/L') * \tan\varphi \quad (2.3\beta)$$

$$\kappa_\gamma = 1 - 0,3 * (B'/L') \quad (2.3\gamma)$$

<sup>2</sup> Εάν το έδαφος κάτω από τη στάθμη έδρασης του πεδίου βρίσκεται υπό τον υδροφόρο ορίζοντα

Οι συντελεστές κλίσεως  $i_c$ ,  $i_q$ ,  $i_\gamma$  εκφράζουν την μείωση της κατακόρυφης συνιστώσας του οριακού φορτίου (R) λόγω της ύπαρξης της τέμνουσας  $V_B$  (παράλληλης προς την πλευρά B) ή της  $V_L$  (παράλληλης προς την πλευρά L) και είναι:

$$i_{qB} = [1 - 0,7V_B / (N + B'L'c \cdot \cot\phi)]^3 \quad (2.4\alpha)$$

$$i_{\gamma B} = [1 - V_B / (N + B'L'c \cdot \cot\phi)]^3 \quad (2.4\beta)$$

$$i_{cB} = (i_{qB} N_q - 1) / (N_q - 1) \quad (2.4\gamma)$$

και :

$$i_{qL} = 1 - V_L / (N + B'L'c \cdot \cot\phi) \quad (2.5\alpha)$$

$$i_{\gamma L} = i_{qL} \quad (2.5\beta)$$

$$i_{cL} = (i_{qL} N_q - 1) / (N_q - 1) \quad (2.5\gamma)$$

όπου N είναι η ορθή δύναμη που μαζί με την τέμνουσα  $V_B$  (και  $V_L$ ) και τη ροπή  $M_B$  (και  $M_L$ ) μεταφέρονται στο έδαφος μέσω του θεμελίου. Στην γενική περίπτωση, κατά την οποία υπάρχει σύγχρονη δράση της  $V_B$  και  $V_L$ , οι τιμές των  $i_c$ ,  $i_q$ ,  $i_\gamma$  υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών  $i_{cB}$ ,  $i_{qB}$ ,  $i_{\gamma B}$  και  $i_{cL}$ ,  $i_{qL}$ ,  $i_{\gamma L}$  αντίστοιχα ως εξής:

$$i = i_B (1 - \theta/90) + i_L (\theta/90) \quad (2.6)$$

όπου :  $\tan\theta = V_B / V_L$ .

Στην ειδική (αλλά πολύ συνηθισμένη) περίπτωση της φόρτισης αργιλωδών εδαφών υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\phi_u = 0$  και  $c = c_u$ ), στο παράρτημα του ΕΑΚ 2000 αναφέρεται η παρακάτω σχέση υπολογισμού του οριακού φορτίου (που προκύπτει από τις ανωτέρω σχέσεις για  $\phi = 0$ ) :

$$R/A' = (\pi + 2)c_u \kappa_c i_c + q \quad (2.7)$$

όπου  $c_u$  είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους, q η ολική πίεση επιφόρτισης στη στάθμη της βάσης του θεμελίου και τα  $\kappa_c$  και  $i_c$  δίνονται από τις εξής σχέσεις :

$$\kappa_c = 1 + 0,2 (B'/L') \quad (2.8\alpha)$$

$$i_c = 0,5 * [1 + \text{sqrt} \{ 1 - V/(B'L'c_u) \} ] \quad (2.8\beta)$$

Για ταυτόχρονη δράση τεμνουσών και στις δύο διευθύνσεις, μπορεί να εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή της σχέσης (2.6) μεταξύ των τιμών  $i_{cB}$  και  $i_{cL}$  που προσδιορίζονται από την (2.8β).

Εκτός της ανωτέρω σχέσης, στη βιβλιογραφία αναφέρονται και άλλες σχέσεις υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων που συνοψίζονται παρακάτω.

### 2.2.2 Επίλυση κατά Meyerhof (1963)

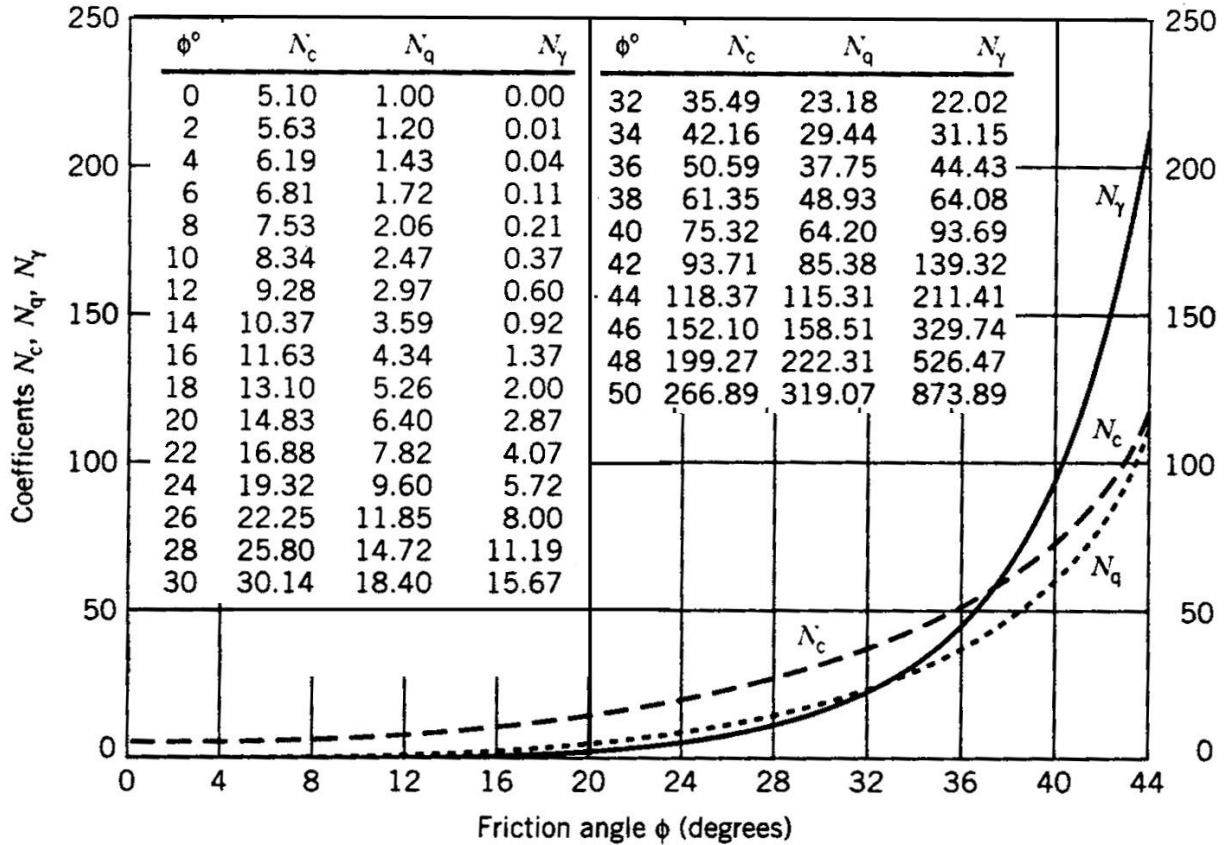
Ο Meyerhof (1963) λαμβάνοντας υπόψη την συνεισφορά της διατμητικής αντοχής του εδάφους που υπέρκειται της στάθμης θεμελιώσεως, υπολόγισε το οριακό φορτίο για την περίπτωση έκκεντρης και λοξής φόρτισης αβαθούς θεμελίου διαστάσεων  $B \times L$  ( $B \leq L$ ) που εδράζεται σε βάθος D ως εξής:

$$q_u = cN_c \kappa_c d_c i_c + \gamma_1 D N_q \kappa_q d_q i_q + 0,5 \gamma_2 B' N_\gamma \kappa_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (2.9)$$

όπου c η συνοχή του εδάφους,  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  το ειδικό βάρος του εδάφους πάνω και κάτω αντίστοιχα από τη στάθμη θεμελιώσεως και  $B'$  είναι το ενεργό πλάτος του θεμελίου και

ισούται με  $B'=B-2e_B$  ( $e_B$  η εκκεντρότητα κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$ ). Αν τυχόν υπάρχει εκκεντρότητα  $e_L$  κατά την διεύθυνση του μήκους  $L$ , τότε γίνεται και 2<sup>ος</sup> έλεγχος, θέτοντας στην σχέση του Meyerhof όπου  $B'$  το ενεργό μήκος  $L'=L-2e_L$  του θεμελίου.

Οι αδιάστατοι συντελεστές φέρουσας ικανότητας  $N_c$ ,  $N_q$  και  $N_\gamma$  εξαρτώνται από τη γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  του εδάφους και δίνονται κατά Meyerhof από τον ακόλουθο Πίνακα :



Συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά Meyerhof

Οι συντελεστές μορφής (ή συντελεστές σχήματος) του θεμελίου  $k_c$ ,  $k_q$ ,  $k_\gamma$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$k_c = 1 + 0,2N_\phi(B/L) \quad (2.10\alpha)$$

$$k_q = k_\gamma = 1 \quad \text{για } \phi=0^\circ \quad (2.10\beta)$$

$$k_q = k_\gamma = 1 + 0,1N_\phi(B/L) \quad \text{για } \phi>10^\circ \quad (2.10\gamma)$$

Οι συντελεστές βάθους  $d_c$ ,  $d_q$ ,  $d_\gamma$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$d_c = 1 + 0,2 \sqrt{N_\phi} * (D/B) \quad (2.11\alpha)$$

$$d_q = d_\gamma = 1 \quad \text{για } \phi=0^\circ \quad (2.11\beta)$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0,1 \sqrt{N_\phi} * (D/B) \quad \text{για } \phi>10^\circ \quad (2.11\gamma)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις είναι :  $N_\phi = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$ .

Οι συντελεστές λοξότητας  $i_c$ ,  $i_q$ ,  $i_\gamma$  του φορτίου δίνονται από τις σχέσεις:

$$i_c = i_q = (1 - \alpha/90^\circ)^2 \quad (2.12\alpha)$$

$$i_\gamma = (1 - \alpha/\phi)^2 \quad (2.12\beta)$$

όπου  $\alpha$  είναι η γωνία απόκλισης του φορτίου ως προς την κατακόρυφο.

### 2.2.3 Επίλυση κατά Terzaghi (1943)

Ο Terzaghi (1943) υπολόγισε τη φέρουσα ικανότητα μιας αβαθούς θεμελιολωρίδας πλάτους B η οποία εδράζεται σε βάθος D (με  $D < B$ ) σύμφωνα με την σχέση (2.13). Κατά την ανάλυση που έκανε, αγνόησε την συμβολή της διατμητικής αντοχής του εδάφους πάνω από την στάθμη θεμελίωσης και θεώρησε ότι συμβάλλει μόνο ως μια επιφόρτιση  $\gamma_1 D$  ( $\gamma_1$  είναι το ειδικό βάρος του εδάφους μέχρι τη στάθμη θεμελιώσεως).

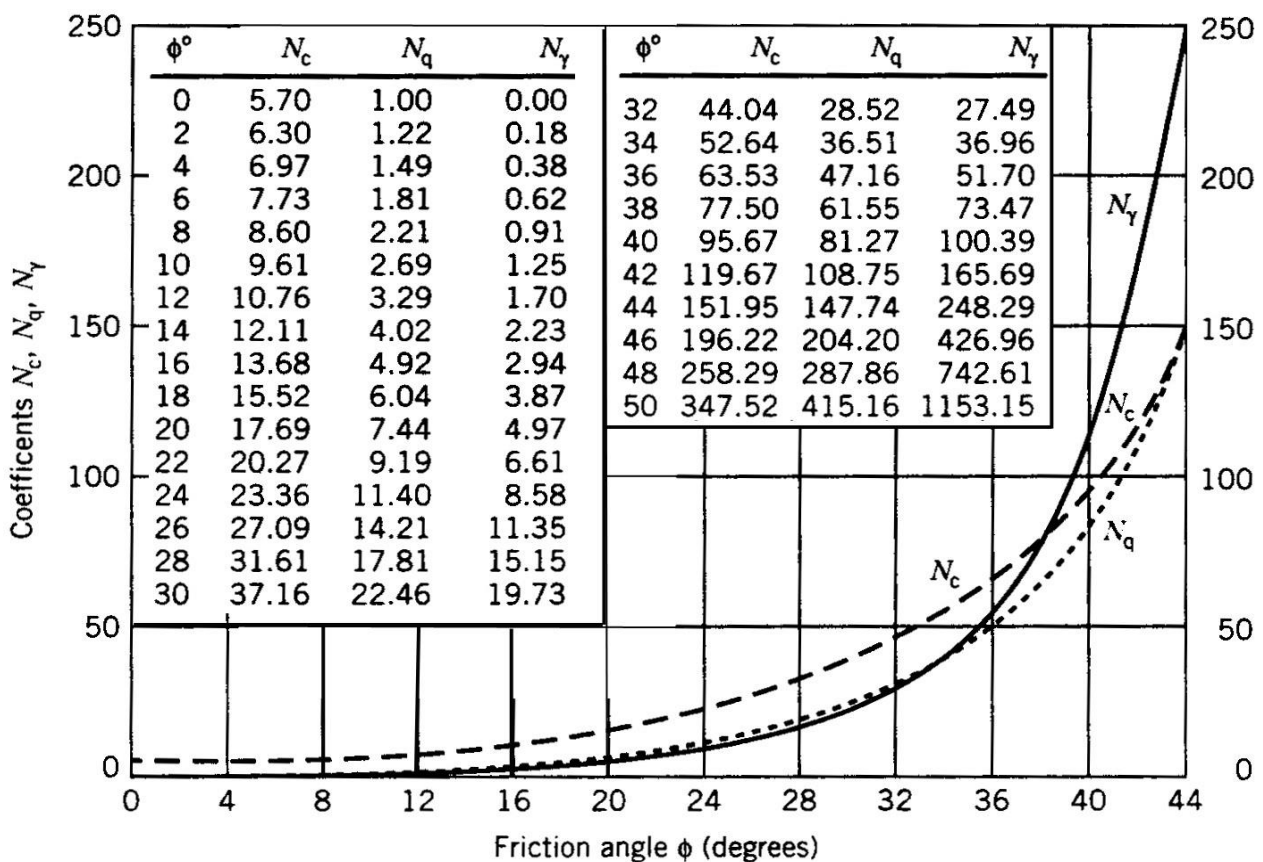
$$q_u = cN_c + \gamma_1 D N_q + 0,5 \gamma_2 B N_\gamma \quad (2.13)$$

όπου c είναι η συνοχή του εδαφικού υλικού και  $\gamma_2$  το ειδικό βάρος του εδάφους κάτω από την στάθμη θεμελιώσεως.

Οι αδιάστατοι συντελεστές φέρουσας ικανότητας  $N_c$ ,  $N_q$  και  $N_\gamma$  εξαρτώνται μόνο από τη γωνία τριβής  $\phi$  του εδαφικού υλικού και δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα και στο Σχήμα :

Πίνακας : Συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά Terzaghi

$\phi$	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
$N_c$	5,7	7,3	9,6	12,9	17,7	25,1	37,2	57,8	95,7	172	348
$N_q$	1,0	1,6	2,7	4,4	7,4	12,7	22,5	41,4	81,3	173	415
$N_\gamma$	0,0	0,5	1,2	2,5	5,0	9,7	19,7	42,4	100	298	1153



Συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά Terzaghi

Ο Terzaghi έδωσε επίσης ημιεμπειρικούς τύπους για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας στην περίπτωση ορθογωνικού, τετράγωνου ή κυκλικού πεδίου :

Ορθογωνικό πέδιλο διαστάσεων  $B \times L$  (όπου  $B < L$ ) :

$$q_u = cN_c(1+0,3 * B/ L ) + \gamma_1 DN_q + 0,5\gamma_2 BN_\gamma(1-0,2*B/L) \quad (2.14)$$

Τετράγωνο πέδιλο διαστάσεων  $B \times B$  :

$$q_u = 1,3cN_c + \gamma_1 DN_q + 0,4\gamma_2 BN_\gamma \quad (2.15)$$

Κυκλικό πέδιλο διαμέτρου  $B$ :

$$q_u = 1,3cN_c + \gamma_1 DN_q + 0,3\gamma_2 BN_\gamma \quad (2.16)$$

#### 2.2.4 Επίλυση κατά Brinch Hansen

Κατά Brinch Hansen, ο τύπος υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας αβαθούς θεμελίου διαστάσεων  $B \times L$  στη γενική περίπτωση της έκκεντρης και λοξής φόρτισης είναι:

$$q_u = cN_c K_c d_c i_c + q_o N_q K_q d_q i_q + 0,5\gamma B' N_\gamma K_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (2.17)$$

όπου  $c$ ,  $\phi$  είναι η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους αντίστοιχα,  $q_o$  η τυχόν επιφόρτιση λόγω του βάθους θεμελιώσεως,  $\gamma$  το ειδικό βάρος του εδάφους και  $B' = B - 2e_B$  το ενεργό πλάτος του θεμελίου με  $e_B$  την εκκεντρότητα κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$ . Αν υπάρχει εκκεντρότητα  $e_L$  και κατά την διεύθυνση του μήκους  $L$  του θεμελίου, τότε απαιτείται να γίνει και 2<sup>ος</sup> έλεγχος, βάζοντας στον τύπο του Brinch Hansen όπου  $B'$  το ενεργό μήκος  $L' = L - 2e_L$ .

Οι αδιάστατοι συντελεστές φέρουσας ικανότητας  $N_c$ ,  $N_q$  και  $N_\gamma$  δίνονται κατά Brinch Hansen από τον ακόλουθο Πίνακα συναρτήσεως της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$  του εδάφους.

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.142	1.000	0.000
1	5.379	1.094	0.003
2	5.632	1.197	0.014
3	5.900	1.309	0.032
4	6.185	1.433	0.060
5	6.489	1.568	0.099
6	6.813	1.716	0.151
7	7.158	1.879	0.216
8	7.527	2.058	0.297
9	7.922	2.255	0.397
10	8.345	2.471	0.519
11	8.798	2.710	0.665
12	9.285	2.974	0.839
13	9.807	3.264	1.045
14	10.370	3.586	1.289
15	10.977	3.941	1.576
16	11.631	4.335	1.913
17	12.338	4.772	2.307
18	13.104	5.258	2.767
19	13.934	5.798	3.304
20	14.835	6.399	3.930

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
20	14.835	6.399	3.930
21	15.815	7.071	4.661
22	16.833	7.821	5.512
23	18.049	8.661	6.504
24	19.324	9.603	7.661
25	20.721	10.662	9.011
26	22.254	11.854	10.558
27	23.942	13.199	12.432
28	25.803	14.720	14.590
29	27.860	16.443	17.121
30	30.140	18.401	20.093
31	32.671	20.631	23.591
32	35.490	23.177	27.715
33	38.638	26.092	32.590
34	42.164	29.440	38.366
35	46.124	33.296	45.228
36	50.586	37.753	53.404
37	55.630	42.920	63.178
38	61.352	48.933	74.899
39	67.867	55.957	89.007
40	75.313	64.195	106.054

Συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά Brinch Hansen.

Οι συντελεστές μορφής του θεμελίου  $k_c$ ,  $k_q$ ,  $k_\gamma$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις, αναλόγως της διεύθυνσεως (κατά την πλευρά B ή L) που γίνεται ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας:

$$k_{cB} = 1 + 0,2 i_{cB} (B'/L') \quad (2.18\alpha)$$

$$k_{qB} = 1 + \sin\phi \cdot i_{qB} (B'/L') \quad (2.18\beta)$$

$$k_{\gamma B} = 1 - 0,4 i_{\gamma B} (B'/L') \geq 0,6 \quad (2.18\gamma)$$

και

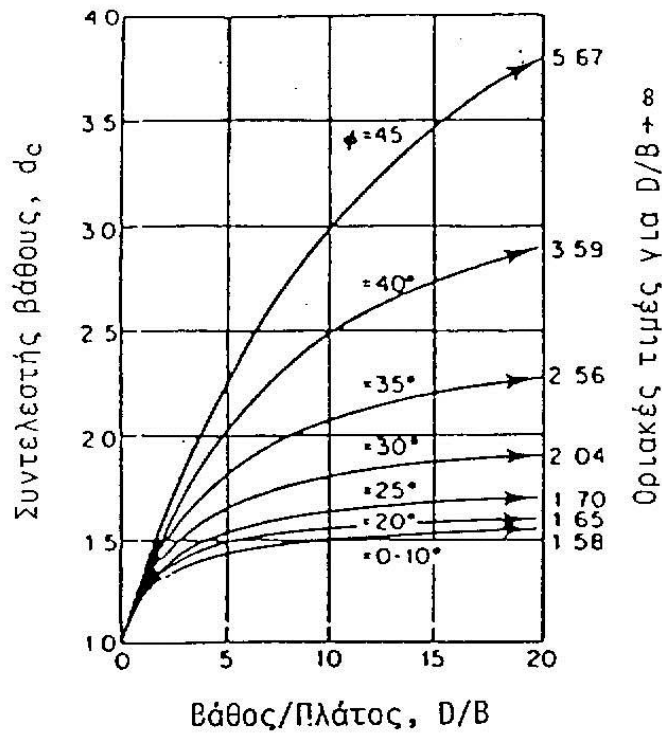
$$k_{cL} = 1 + 0,2 i_{cL} (L'/B') \quad (2.19\alpha)$$

$$k_{qL} = 1 + \sin\phi \cdot i_{qL} (L'/B') \quad (2.19\beta)$$

$$k_{\gamma L} = 1 - 0,4 i_{\gamma L} (L'/B') \geq 0,6 \quad (2.19\gamma)$$

Ο συντελεστής βάθους  $d_c$  δίνεται από το ακόλουθο Σχήμα :





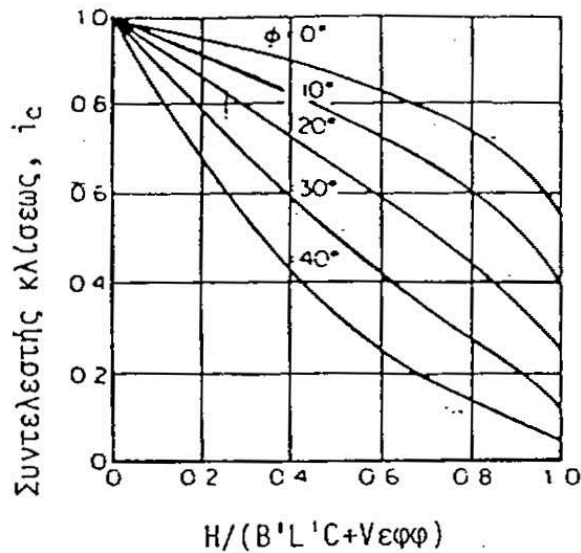
Συντελεστές βάθους  $d_c$  κατά Brinch Hansen.

και τα  $d_q$ ,  $d_\gamma$  από τις σχέσεις :

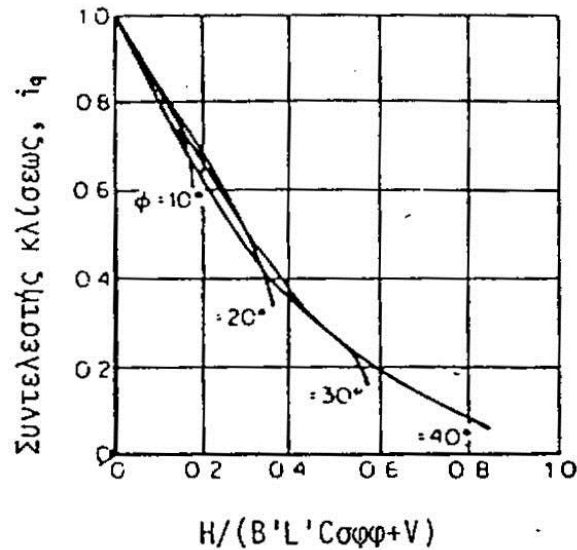
$$d_q = d_c - (d_c - 1) / (N_q) \quad (2.20\alpha)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (2.20\beta)$$

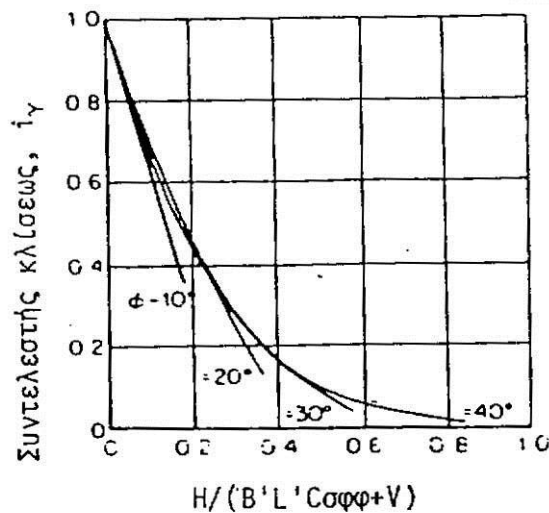
Οι συντελεστές κλίσεως (ή συντελεστές λοξότητας)  $i_c$ ,  $i_q$ ,  $i_\gamma$  του φορτίου προσδιορίζονται από τα ακόλουθα σχήματα (αντιστοίχως) :



Συντελεστής κλίσεως  $i_c$  κατά Brinch Hansen.



Συντελεστής κλίσεως  $i_q$  κατά Brinch Hansen.



Συντελεστής κλίσεως  $i_\gamma$  κατά Brinch Hansen.

ή δίνονται κατά προσέγγιση από τις σχέσεις:

$$i_q = [1 - 0,5 H / (V + B' L' c \cdot \cot \phi)]^5 \quad (2.21\alpha)$$

$$i_\gamma = [1 - 0,7 H / (V + B' L' c \cdot \cot \phi)]^5 \quad (2.21\beta)$$

όπου  $V$  και  $H$  είναι η κατακόρυφη και οριζόντια συνιστώσα αντίστοιχα του κεκλιμένου φορτίου του θεμελίου.

### 2.2.5 Επίλυση κατά Vesic (1970)

Σύμφωνα με τον Vesic (1970), η φέρουσα ικανότητα επιφανειακού θεμελίου διαστάσεων  $B \times L$  που εδράζεται σε βάθος  $D$  από την επιφάνεια του εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$q_u = c N_c k_c d_c i_c b_c g_c + q_o N_q k_q d_q i_q b_q g_q + 0,5 \gamma B' N_\gamma k_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma \quad (1.22)$$

όπου  $c$ ,  $\gamma$  είναι η συνοχή και το ειδικό βάρος αντίστοιχα του εδάφους,  $q_o$  η επιφόρτιση λόγω του βάθους θεμελιώσεως και  $B' = B - 2e_B$  το ενεργό πλάτος του θεμελίου ( $e_B$  είναι η εκκεντρότητα κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$ ).

Τα  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  είναι αδιάστατοι συντελεστές φέρουσας ικανότητας οι οποίοι κατά Vesic δίνονται από τον ακόλουθο Πίνακα :

Συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά Vesic

$\varphi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_q/N_c$
0°	5,14	1,00	0,00	0,20
1°	5,38	1,09	0,07	0,20
2°	5,63	1,20	0,15	0,21
3°	5,90	1,31	0,24	0,22
4°	6,19	1,43	0,34	0,23
5°	6,49	1,57	0,45	0,24
6°	6,81	1,72	0,57	0,25
7°	7,16	1,88	0,71	0,26
8°	7,53	2,06	0,86	0,27
9°	7,92	2,25	1,03	0,28
10°	8,35	2,47	1,22	0,30
11°	8,80	2,71	1,44	0,31
12°	9,28	2,97	1,69	0,32
13°	9,81	3,26	1,97	0,33
14°	10,37	3,59	2,29	0,35
15°	10,98	3,94	2,65	0,36
16°	11,63	4,34	3,06	0,37
17°	12,34	4,77	3,53	0,39
18°	13,10	5,26	4,07	0,40
19°	13,93	5,80	4,68	0,42
20°	14,83	6,40	5,39	0,43
21°	15,82	7,07	6,20	0,45
22°	16,88	7,82	7,13	0,46
23°	18,05	8,66	8,20	0,48
24°	19,32	9,60	9,44	0,50
25°	20,72	10,66	10,88	0,51

$\varphi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_q/N_c$
26°	22,25	11,85	12,54	0,53
27°	23,94	13,20	14,47	0,55
28°	25,80	14,72	16,72	0,57
29°	27,86	16,44	19,34	0,59
30°	30,14	18,40	22,40	0,61
31°	32,67	20,63	25,99	0,63
32°	35,49	23,18	30,22	0,65
33°	38,64	26,09	35,19	0,68
34°	42,16	29,44	41,06	0,70
35°	46,12	33,30	48,03	0,72
36°	50,59	37,75	56,31	0,75
37°	55,63	42,92	66,19	0,77
38°	61,35	48,93	78,03	0,80
39°	67,87	55,96	92,25	0,82
40°	75,31	64,20	109,41	0,85
41°	83,86	73,90	130,22	0,88
42°	93,71	85,38	155,55	0,91
43°	105,11	99,02	186,54	0,94
44°	118,37	115,31	224,64	0,97
45°	133,88	134,88	271,76	1,01
46°	152,10	158,51	330,35	1,04
47°	173,64	187,21	403,67	1,08
48°	199,26	222,31	496,01	1,12
49°	229,93	265,51	613,16	1,15
50°	266,89	319,07	762,89	1,20

Οι συντελεστές σχήματος  $\kappa_c$ ,  $\kappa_q$ ,  $\kappa_\gamma$  του θεμελίου δίνονται από τις εξής σχέσεις :

$$\kappa_c = 1 + (B'/L') \cdot (N_q/N_c) \quad (2.23\alpha)$$

$$\kappa_q = 1 + (B'/L') \cdot \tan\varphi \quad (2.23\beta)$$

$$\kappa_\gamma = 1 - 0,4 (B'/L') \quad (2.23\gamma)$$

Οι συντελεστές βάθους  $d_c$ ,  $d_q$ ,  $d_\gamma$  προσδιορίζονται από τις εξής σχέσεις :

Για  $\varphi \neq 0$  :

$$d_q = 1 + 2 \tan\varphi (1 - \sin\varphi)^2 (D/B) \quad \text{εάν } D \leq B \quad (2.24\alpha)$$

$$d_q = 1 + 2 \tan\varphi (1 - \sin\varphi)^2 \tan^{-1}(D/B) \quad \text{εάν } D > B \quad (2.24\alpha')$$

$$d_\gamma = 1 \quad (2.24\beta)$$

$$d_c = d_q - (1 - d_q) / (N_c \tan\varphi) \quad (2.24\gamma)$$

Εάν  $\varphi=0$ , η σχέση (2.24γ) αντικαθίσταται από την ακόλουθη:

$$d_c = 1 + 0,4 \tan^{-1}(D/B) \quad (2.24\gamma')$$

Οι συντελεστές λοξότητας  $i_c$ ,  $i_q$ ,  $i_\gamma$  δίνονται από τον τύπο:

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_c \tan\varphi) \quad \text{για } \varphi \neq 0 \quad (2.25\alpha)$$

$$i_c = 1 - mH / (B'L'cN_c) \quad \text{για } \varphi=0 \quad (2.25\alpha')$$

$$i_q = [1 - H / (V+B'L'c \cdot \cot\varphi)]^m \quad (2.25\beta)$$

$$i_\gamma = [1 - H / (V+B'L'c \cdot \cot\varphi)]^{m+1} \quad (2.25\gamma)$$

όπου  $V$  και  $H$  είναι η κατακόρυφη και οριζόντια συνιστώσα αντίστοιχα του κεκλιμένου φορτίου του θεμελίου και  $m$  συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αναλογία των διαστάσεων του θεμελίου ως εξής:

$$m = (2 + (B/L)) / (1 + (B/L))$$

Στη γενική περίπτωση κατά την οποία η οριζόντια συνιστώσα του κεκλιμένου φορτίου σχηματίζει γωνία  $\psi$  με την μεγαλύτερη διάσταση  $L$  του πεδίου, τότε το  $m$  λαμβάνεται ως :

$$m = m_B \sin^2 \psi + m_L \cos^2 \psi$$

όπου :  $m_B = (2 + (B/L)) / (1 + (B/L))$  και  $m_L = (2 + (L/B)) / (1 + (L/B))$ .

Στην περίπτωση θεμελίου με κεκλιμένη βάση εδράσεως (ως προς το οριζόντιο επίπεδο), λαμβάνονται οι συντελεστές κεκλιμένης βάσεως εδράσεως  $b_c$ ,  $b_q$ ,  $b_\gamma$  ως εξής:

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \tan \varphi) \quad \text{εάν } \varphi \neq 0 \quad (2.26\alpha)$$

$$b_c = 1 - 2\eta / (2 + \pi) \quad \text{εάν } \varphi = 0 \quad (2.26\alpha')$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \eta \tan \varphi)^2 \quad (2.26\beta)$$

όπου  $\eta$  είναι η γωνία που σχηματίζει η βάση εδράσεως του θεμελίου με το οριζόντιο επίπεδο.

Αν η επιφάνεια του εδάφους είναι κεκλιμένη και σχηματίζει γωνία  $\beta$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο, τότε λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές κεκλιμένης επιφάνειας εδάφους  $g_c$ ,  $g_q$ ,  $g_\gamma$  ως εξής :

$$g_c = g_q - (1 - g_q) / (N_c \tan \varphi) \quad \text{εάν } \varphi \neq 0 \quad (2.27\alpha)$$

$$g_c = 1 - 2\beta / (2 + \pi) \quad \text{εάν } \varphi = 0 \quad (2.27\alpha')$$

$$g_q = g_\gamma = (1 - \tan \beta)^2 \quad (2.27\beta)$$

### 2.2.6 Επίλυση κατά Skempton (1951)

Για την περίπτωση επιφανειακών θεμελίων, τα οποία εδράζονται σε βάθος  $D$  από την επιφάνεια του εδάφους (με  $D < 2,5 B$  όπου  $B$  είναι το πλάτος του πεδίου) και για αστράγγιστες συνθήκες (ταχεία φόρτιση:  $\varphi_u = 0$  και  $c = c_u$ ), ο Skempton (1951) διατύπωσε τον ακόλουθο ημι-εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας:

$$q_u = c_u N_c + \gamma D \quad (2.28)$$

όπου  $c_u$  είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους,  $\gamma$  το ειδικό βάρος του εδάφους και η τιμή του συντελεστή  $N_c$  για ορθογωνικό πέδιλο  $B \times L$  δίνεται από τον τύπο:

$$N_c = 5[1 + 0,2 (B/L)] * [1 + 0,2 (D/B)] \quad (2.29)$$

Στην περίπτωση αβαθών θεμελιώσεων σε συνεκτικό έδαφος με διαφορετικό  $c_u$  ως προς το βάθος, στην παραπάνω σχέση ως  $c_u$  χρησιμοποιείται η μέση τιμή τους για ένα βάθος  $3/4$  του  $B$  κάτω από την στάθμη θεμελίωσης, υπό την προϋπόθεση όμως ότι οι τιμές του  $c_u$  δεν διαφέρουν περισσότερο από 50% από τη μέση τιμή.

### 2.2.7 Επίλυση κατά Prandtl-Sokolovski (1960)

Ο Sokolovski (1960) βασιζόμενος στην επίλυση του Prandtl (1921) και υποθέτοντας ότι το έδαφος κάτω από τη στάθμη θεμελιώσεως είναι αβαρές και η βάση του πεδίου είναι «λεία», υπολόγισε τη φέρουσα ικανότητα με τον ακόλουθο τύπο:

$$q_u = c N_c + q N_q + 0,5 \gamma B N_\gamma \quad (2.30)$$

όπου  $c$  είναι η συνοχή του εδάφους,  $q$  είναι η τυχόν επιφόρτιση λόγω του βάθους θεμελίωσης,  $\gamma$  το ειδικό βάρος του εδάφους,  $B$  το πλάτος του πεδίου και οι αδιάστατοι

συντελεστές φέρουσας ικανότητας  $N_c$ ,  $N_q$  και  $N_\gamma$  δίνονται συναρτήσει της γωνίας τριβής  $\varphi$  του εδάφους ως εξής:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi \quad (2.31\alpha)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2(45 + \varphi/2) \quad (2.31\beta)$$

και το  $N_\gamma$  μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά κατά Vesic (1970) :

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi \quad (2.31\gamma)$$

### 2.2.8 Δυναμικές μέθοδοι - Μέθοδος κατά τον Ευρωκώδικα 8

Ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας επιφανειακής θεμελίωσης υπό δυναμικές (σεισμικές) συνθήκες επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τύπους μεθόδων :

#### 1. Ισοδύναμη στατική μέθοδος

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το εγκάρσιο δυναμικό φορτίο μεταφράζεται σε ισοδύναμη στατική οριζόντια φόρτιση και το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του θεμελίου υπό στατική φόρτιση, όπου όλο το φορτίο της ανωδομής είναι κεκλιμένο (λόγω της σεισμικής τέμνουσας στη βάση) και έκκεντρο (λόγω της σεισμικής ροπής ανατροπής). Η φόρτιση αυτή, που οφείλεται στην σεισμική επιπόνηση της ανωδομής ονομάζεται «αδρανειακή επιπόνηση». Επιπρόσθετα, η φέρουσα ικανότητα ενός θεμελίου επηρεάζεται και από την επιτάχυνση και παραμόρφωση που υφίσταται η εδαφική μάζα κάτω από το πέδιλο, επιρροή που συνήθως λέγεται «κινηματική επιπόνηση».

#### 2. Πλήρως δυναμική μέθοδος

Οι μέθοδοι αυτού του τύπου περιλαμβάνουν είτε ανάλυση εν χρόνω (για συγκεκριμένα επιταχυνσιο-γραφήματα) είτε φασματική ανάλυση διαφόρων τύπων. Οι μέθοδοι αυτές δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Στο πλαίσιο των ισοδύναμων στατικών μεθόδων, η επιρροή των αδρανειακών δυνάμεων του εδάφους μπορεί να αντιμετωπιστεί με τους παρακάτω τρόπους :

1. Με θεώρηση της κινηματικής και αδρανειακής επιπόνησης ως εξαρτημένων μεταβλητών. Οι Sarma and lossifelis (1990), οι Budhu and Al-Karni (1993) και οι Richards et al (1993) υπολόγισαν την δυναμική (σεισμική) φέρουσα ικανότητα επιφανειακής θεμελίωσης, θεωρώντας την κινηματική και την αδρανειακή επιπόνηση ως εξαρτημένες μεταβλητές με την μέθοδο της πλαστικής (οριακής) ισορροπίας. Οι μέθοδοι αυτές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η κινηματική επιπόνηση έχει ως αποτέλεσμα την δραματική μείωση της δυναμικής φέρουσας ικανότητας επιφανειακής θεμελίωσης. Έχουν όμως σημαντικά περιορισμένο πεδίο εφαρμογής και αμφισβητήσιμη ορθότητα.

2. Με θεώρηση της κινηματικής και αδρανειακής επιπόνησης ως ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι Pecker and Salencon (1991) Salencon and Pecker (1995a and b) και οι Paolucci and Pecker (1997a) υπολόγισαν τη δυναμική φέρουσα ικανότητα επιφανειακής θεμελίωσης με την μέθοδο της πλαστικής ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα με την θεωρία της διαρροής, αντιμετωπίζοντας την κινηματική και την αδρανειακή επιπόνηση ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Σύμφωνα με την κινηματική προσέγγιση της θεωρίας της διαρροής εξετάζονται όλοι οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας. Οι κρισιμότεροι μηχανισμοί αστοχίας είναι ο μηχανισμός A και ο μηχανισμός B. Ο μηχανισμός αστοχίας A είναι καταλληλότερος για τον υπολογισμό φέρουσας ικανότητας επιφανειακής θεμελίωσης στην περίπτωση μεγάλης εκκεντρότητας της συνισταμένης φόρτισης, ενώ ο μηχανισμός B στην περίπτωση μικρής εκκεντρότητας της συνισταμένης φόρτισης.

Στα επόμενα περιγράφεται συνοπτικά η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Pecker και περιλαμβάνεται στον Ευρωκώδικα 8 (Παράρτημα F).

Η ευστάθεια λωριδωτού πεδίλου που εδράζεται στην επιφάνεια ομοιογενούς εδάφους έναντι φέρουσας ικανότητας υπό σεισμικές δράσεις ελέγχεται μέσω της ακόλουθης ανισότητας που συνδέει την αντοχή του εδάφους, τις τιμές των δράσεων σχεδιασμού επί του πεδίλου (ορθή δράση  $N_{Ed}$ , οριζόντια τέμνουσα δράση  $V_{Ed}$  και ροπή  $M_{Ed}$ ) και τις αδρανειακές δράσεις επί του εδάφους ( $F$ ) :

$$\frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{(\bar{N})^a \left[ (1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c'_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{(\bar{N})^c \left[ (1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^d} - 1 \leq 0 \quad (2.32)$$

όπου :

$$\bar{N} = \frac{\gamma_{Rd} N_{Ed}}{N_{max}}, \quad \bar{V} = \frac{\gamma_{Rd} V_{Ed}}{N_{max}}, \quad \bar{M} = \frac{\gamma_{Rd} M_{Ed}}{B N_{max}} \quad (2.33)$$

$N_{Ed}$ ,  $V_{Ed}$ ,  $M_{Ed}$  = τιμές των δράσεων σχεδιασμού επί του πεδίλου (ορθή δράση, οριζόντια τέμνουσα δράση και ροπή).

$N_{max}$  είναι η οριακή φέρουσα ικανότητα του θεμελίου υπό ορθή κεντρική φόρτιση, όπως ορίζεται κατωτέρω

$B$  είναι το πλάτος του θεμελίου

$\bar{F}$  αδιάστατη τιμή της αδρανειακής δύναμης

$\gamma_{Rd}$  επιμέρους συντελεστής προσομοίωσης, με τιμές που αναφέρονται παρακάτω.

$a, b, c, d, e, f, m, k, k', c_T, c_M, c'_M, \beta, \gamma$  = αριθμητικές παράμετροι που εξαρτώνται από το είδος του εδάφους (βλέπε κατωτέρω).

Στην περίπτωση καθαρώς συνεκτικού εδάφους (δηλαδή υλικών με  $\varphi=0$ ):

(1) Η οριακή φέρουσα ικανότητα  $N_{max}$  υπό ορθή κεντρική φόρτιση δίνεται από τη σχέση :

$$N_{max} = (\pi + 2) \frac{c_u}{\gamma_M} B \quad (2.34)$$

όπου :

$c_u$  είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή

$\gamma_M$  είναι ο επιμέρους συντελεστής του εδαφικού υλικού ( $= 1.40$ )

(2) Η αδιάστατη παράμετρος της αδρανειακής δύναμης  $\bar{F}$  δίνεται από τη σχέση :

$$\bar{F} = \frac{\rho a_g SB}{c_u} \quad (2.35)$$

όπου :

$\rho$  είναι η πυκνότητα του εδαφικού υλικού

$a_g$  η τιμή σχεδιασμού της σεισμικής εδαφικής επιτάχυνσης

$S$  η εδαφική παράμετρος που αναφέρεται στο εδάφιο 3.2.2.2 του Ευρωκώδικα 8 (EN1998-1).

Στην ανωτέρω σχέση υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί :

$$0 < \bar{N} \leq 1 \quad , \quad |\bar{V}| \leq 1 \quad (2.36)$$

Στην περίπτωση καθαρώς μή-συνεκτικών εδαφών (δηλαδή υλικά με μηδενική συνοχή –  $c = 0$ ) :

(1) Η οριακή φέρουσα ικανότητα  $N_{\max}$  υπό ορθή κεντρική φόρτιση δίνεται από τη σχέση :

$$N_{\max} = \frac{1}{2} \rho g \left( 1 \pm \frac{a_v}{g} \right) B^2 N_\gamma \quad (2.37)$$

όπου:

$g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,

$a_v$  είναι η τιμή σχεδιασμού της κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής επιτάχυνσης στο έδαφος – η οποία συνήθως λαμβάνεται κατά σύμβαση ίση με  $0.5a_g$  ( $a_g$  είναι η τιμή σχεδιασμού της σεισμικής εδαφικής επιτάχυνσης), και

$N_\gamma$  είναι ένας συντελεστής φέρουσας ικανότητας, που εξαρτάται από την τιμή σχεδιασμού της γωνίας διατμητικής αντοχής (γωνία τριβής) του εδάφους  $\phi'_d$  (τιμή που περιλαμβάνει τον επιμέρους συντελεστή υλικού  $\gamma_M = 1.25$ ).

(2) Η αδιάστατη τιμή της αδρανειακής δύναμης  $\bar{F}$  δίνεται από τη σχέση :

$$\bar{F} = \frac{a_g}{g \tan \phi'_d} \quad (2.38)$$

Στην προηγούμενη σχέση ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί :

$$0 < \bar{N} \leq \left( 1 - m\bar{F} \right)^{k'} \quad (2.39)$$

Οι τιμές των αριθμητικών παραμέτρων  $a, b, c, d, e, f, m, k, k', c_T, c_M, c'_M, \beta, \gamma$  που υπεισέρχονται στην σχέση υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας (σχέση 2.32) φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα :



	Καθαρώς συνεκτικά υλικά ( $\varphi = 0, c = c_u$ )	Καθαρώς μή-συνεκτικά υλικά ( $\varphi \neq 0, c = 0$ )
a	0,70	0,92
b	1,29	1,25
c	2,14	0,92
d	1,81	1,25
e	0,21	0,41
f	0,44	0,32
m	0,21	0,96
k	1,22	1,00
k'	1,00	0,39
$c_T$	2,00	1,14
$c_M$	2,00	1,01
$c'_M$	1,00	1,01
$\beta$	2,57	2,90
$\gamma$	1,85	2,80

Σε συνήθεις περιπτώσεις καθαρώς συνεκτικών εδαφών, η τιμή του σεισμικού συντελεστή  $\bar{F}$  μπορεί να αμεληθεί. Σε καθαρώς μή-συνεκτικά εδάφη, η τιμή του σεισμικού συντελεστή  $\bar{F}$  μπορεί να αμεληθεί εάν η ανηγμένη σεισμική επιτάχυνση ( $\alpha$ ) είναι αρκετά μικρή (δηλαδή εάν :  $\alpha S < 0.1$ ).

Οι τιμές του επιμέρους συντελεστή  $\gamma_{Rd}$  φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα :

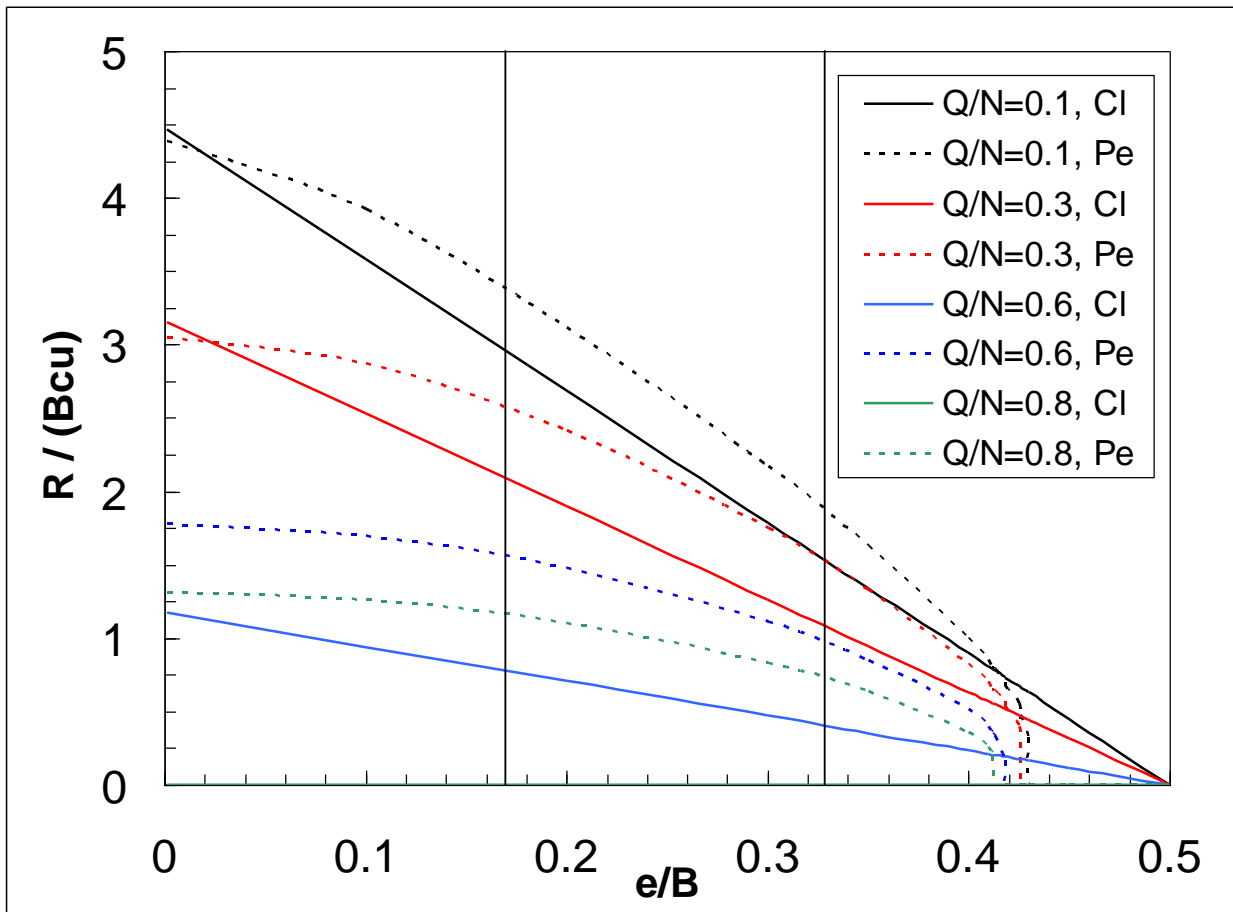
Μέσης πυκνότητας και πυκνές άμμοι	Χαλαρή, ξηρή άμμος	Χαραρή, κορεσμένη άμμος	Αργίλοι μικρής ευαισθησίας	Ευαίσθητες άργιλοι
1,0	1,15	1,50	1,0	1,15

### 2.2.9 Σύγκριση των αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας

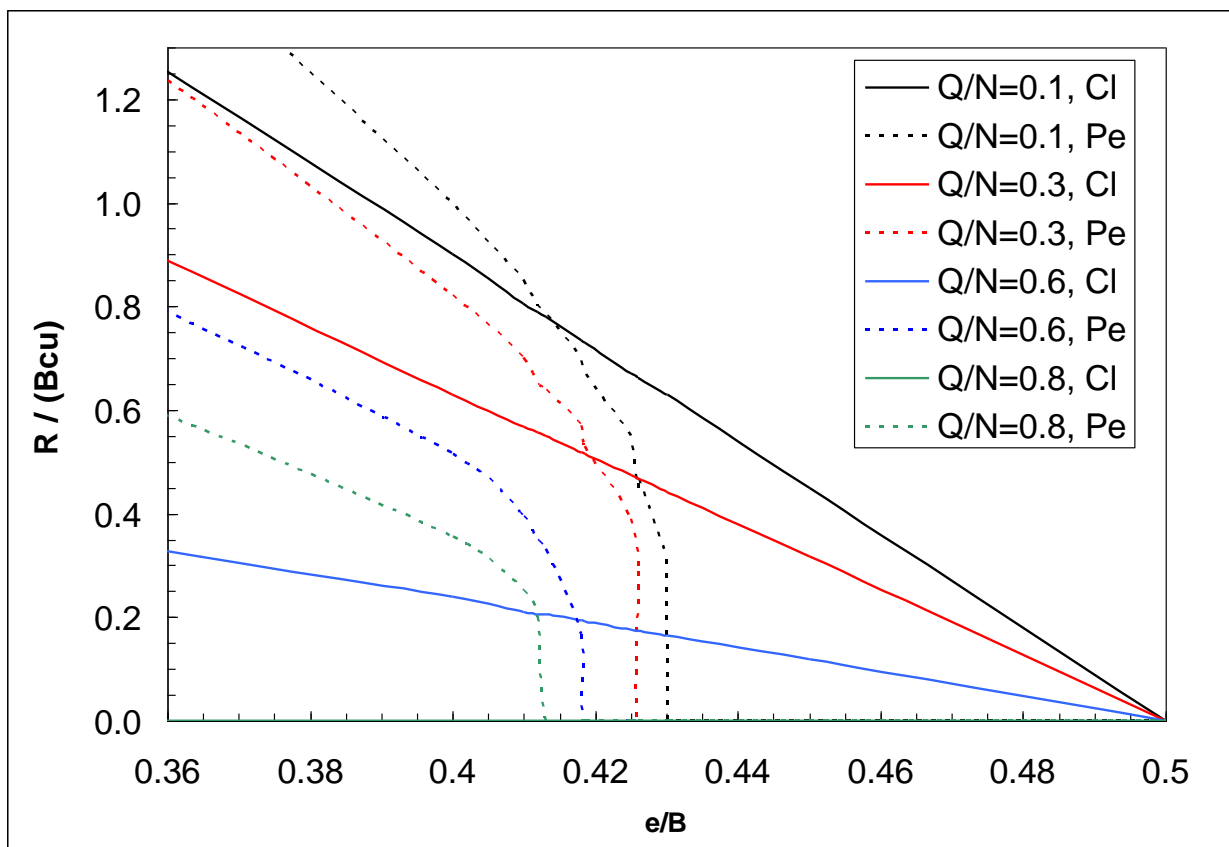
Από τις ανωτέρω αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων, πλέον ουσιαστικές είναι η μέθοδος του Ευρωκώδικα 7 (που πρακτικώς ταυτίζεται με τη μέθοδο του EAK 2000 και τη μέθοδο του DIN 4017) και η μέθοδος του Ευρωκώδικα 8 (Pecker, 1996). Οι υπόλοιπες μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο εδάφιο παρουσιάζουν μικρές μόνον διαφορές από την μέθοδο του Ευρωκώδικα 7 και συνεπώς δεν αξιολογούνται περαιτέρω.

Οι ανωτέρω δύο μέθοδοι (EC-7 και EC-8) συγκρίνονται μεταξύ τους για διάφορες τιμές της εκκεντρότητας ( $e = M/N$ ) και λοξότητας της φόρτισης ( $Q/N$ ,  $Q =$  τέμνουσα,  $N =$  ορθή δύναμη) προκειμένου να επιβεβαιωθεί η συμβατότητά τους και οι τυχόν σχετικές αποκλίσεις τους.

Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων φαίνονται στα ακόλουθα δύο σχήματα που παρουσιάζουν τα διαγράμματα του οριακού φορτίου ( $R$ ) λωριδωτού πεδίλου στην επιφάνεια ομοιογενούς και καθαρώς συνεκτικού εδάφους (αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$ ), αδιαστατοποιημένου με το πλάτος του πεδίου και την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$ . Η γραφική παράσταση γίνεται ως προς την ανηγμένη εκκεντρότητα της φόρτισης ( $e/B$ ). Παρουσιάζονται διάφορες καμπύλες που αφορούν σε διάφορες τιμές της λοξότητας της φόρτισης, εκφρασμένης μέσω του λόγου της οριζόντιας (τέμνουσας) δύναμης ( $Q$ ) προς την αντίστοιχη ορθή δύναμη ( $N$ ). Οι πλήρεις γραμμές (ευθείες) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της μεθόδου του EAK 2000 ενώ οι εστιγμένες καμπύλες παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεθόδου του Ευρωκώδικα 8 (μέθοδος Pecker).



Το δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζει απλώς την λεπτομέρεια του πρώτου διαγράμματος στην περιοχή των ανηγμένων εκκεντροτήτων κοντά στην οριακή τιμή 0.50.



Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων προκύπτει ότι οι διαφορές των δύο μεθόδων είναι σχετικώς μικρές για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας που δεν υπερβαίνουν το 1/3. Για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας, οι δύο μέθοδοι διαφέρουν σημαντικά. Ειδικώς, η μέθοδος του ΕΑΚ-2000 δίνει μή-μηδενικές τιμές του οριακού φορτίου (αλλά αρκετά μικρές) ακόμη και για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας που κοντά στο 0.50, ενώ η μέθοδος του Ευρωκώδικα 8 δεν επιτρέπει τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας μεγαλύτερες από 0.42 περίπου.

## 2.3 Αριθμητικές επιλύσεις για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας

Στο εδάφιο αυτό, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλυτικών μεθόδων (δηλαδή της μεθόδου του ΕΑΚ-2000 - EC-7 και του EC-8) με αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (πρόγραμμα PLAXIS – για λωριδωτό πέδιλο) και την μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (πρόγραμμα FLAC-3D – για τετραγωνικά, ορθογωνικά και λωριδωτά πέδιλα) υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση επί ομοιογενούς εδάφους. Σκοπός των ανωτέρω συγκρίσεων είναι να βαθμονομηθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων (σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους) προκειμένου στη συνέχεια οι αριθμητικές μέθοδοι να χρησιμοποιηθούν για τη συναγωγή συμπερασμάτων στην περίπτωση θεμελιώσεων επί ανομοιογενούς εδάφους (όπου δεν υπάρχουν αναλυτικές επιλύσεις για σύγκριση).

### 2.3.1 Επιλύσεις με το πρόγραμμα FLAC-3D

#### 2.3.1.1 Γενικά

Το FLAC<sup>3D</sup> είναι ένα τρι-διάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών για την μελέτη και ανάλυση της συμπεριφοράς ενός συνεχούς τρισδιάστατου μέσου τόσο κατά την ελαστική όσο και κατά την πλαστική ισορροπία του. Η ανάλυση απαιτεί την κατάλληλη

προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης με κάποιο μαθηματικό μοντέλο και την χρησιμοποίηση μιας συγκεκριμένης αριθμητικής μεθόδου για την αριθμητική επίλυση. Το μαθηματικό μοντέλο (προσομοίωμα) εξιδανικεύει την πραγματική κατάσταση και περιλαμβάνει παραδοχές για την γεωμετρία, τη φόρτιση, την εντατική κατάσταση, τις συνθήκες στήριξης και τις συνοριακές συνθήκες, τις αρχικές συνθήκες, τους καταστατικούς νόμους που διέπουν την συμπεριφορά των υλικών, κτλ.

Η αριθμητική μέθοδος για την επίλυση χαρακτηρίζεται κατ' αρχήν από την διακριτοποίηση του πραγματικού συνεχούς μέσου (ή της πραγματικής κατασκευής), με ένα άλλο ισοδύναμο στο οποίο όλες οι επιβαλλόμενες δυνάμεις και μετακινήσεις καθώς και όλες οι αντιδράσεις είναι συγκεντρωμένες στους κόμβους ενός τρισδιάστατου δικτύου πεπερασμένων "στοιχείων". Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο πρόβλημα προσεγγίζονται από πεπερασμένες διαφορές, λαμβάνοντας υπόψη γραμμική μεταβολή (ή γενικότερα μια διακύμανση που ακολουθεί κάποιο νόμο) μέσα σε κάποιο πεπερασμένο διάστημα χώρου ή χρόνου. Η επίλυση που ακολουθεί, γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλης επαναληπτικής μεθόδου (κατάλληλου αλγορίθμου), όπου η επιβολή του φορτίου ή της μετατόπισης ή της οποιασδήποτε εντατικής κατάστασης γίνεται με μικρά επαυξητικά βήματα. Η σύγκλιση της μεθόδου ελέγχεται συγκρίνοντας τη διαφορά των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στους κόμβους μείον τις δυνάμεις που αντιστοιχούν στις εσωτερικές τάσεις (ή κάποιας άλλης παραμέτρου των κόμβων) με μία τιμή που ορίζεται ως αποδεκτό όριο σύγκλισης.

Μία από τις εφαρμογές του προγράμματος FLAC<sup>3D</sup> στα γεωτεχνικά προβλήματα είναι σε προβλήματα επιφανειακών θεμελιώσεων (υπολογισμός καθιζήσεων, φέρουσας ικανότητας, ευστάθειας πρανών, κτλ). Βεβαίως, το πρόγραμμα έχει χρησιμοποιηθεί και σε προβλήματα βαθιών θεμελιώσεων (φέρουσα ικανότητα και καθιζήσεις πασσάλων), καθώς και στην ανάλυση υπογείων έργων (σήραγγες). Στην παρούσα εργασία το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου (φέρουσας ικανότητας) των επιφανειακών θεμελιώσεων και συγκεκριμένα ορθογωνικών και λωριδωτών πεδίων σε ομοιογενές έδαφος (στο παρόν κεφάλαιο) και σε ανομοιογενές έδαφος (σε επόμενο κεφάλαιο). Και στις δύο περιπτώσεις, η ανάλυση γίνεται για την περίπτωση αστράγγιστων συνθηκών σε καθαρώς συνεκτικά εδάφη ( $\phi_u=0$  και  $c=c_u$ ). Τέτοιες συνθήκες προσεγγίζονται σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη, όταν ο χρόνος επιβολής της φόρτισης είναι σχετικά σύντομος, όπως στην περίπτωση φόρτισης λόγω σεισμικών δράσεων.

Κατά την προσομοίωση του προβλήματος φέρουσας ικανότητας ορθογωνικού επιφανειακού θεμελίου σε ομοιογενές έδαφος, απαιτείται ο ορισμός ενός τρισδιάστατου δικτύου στοιχείων στη γεωμετρία του εδάφους θεμελίωσης. Το εξιδανικευμένο μοντέλο του εδάφους έχει συγκεκριμένες διαστάσεις (αριστερά και δεξιά κατακόρυφα οριακά επίπεδα και συγκεκριμένο βάθος), έτσι ώστε να υπάρχει οικονομία στο υπολογιστικό κόστος. Τα όρια αυτά, που αποτελούν τα τεχνητά ή συμβατικά σύνορα του μοντέλου, πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος και την εντατική κατάσταση. Συνήθως στα προβλήματα φέρουσας ικανότητας, που είναι προβλήματα πλαστικής ισορροπίας, επειδή η πλαστικοποίηση του εδάφους γίνεται σε σχετικά μικρή απόσταση από το θεμέλιο, τα τεχνητά σύνορα μπορούν να βρίσκονται δεξιά, αριστερά και κάτω από το επιφανειακό θεμέλιο σε απόσταση 3 με 5 φορές το πλάτος του θεμελίου ή και λιγότερο. Αντιθέτως σε προβλήματα υπολογισμού καθιζήσεων και παραμορφώσεων, τα οποία είναι προβλήματα ελαστικής ισορροπίας, απαιτείται η ύπαρξη αρκετά μεγαλύτερων περιθωρίων μέχρι τα τεχνητά σύνορα.

Στο FLAC<sup>3D</sup>, ο ορισμός της γεωμετρίας του εδάφους και του τρισδιάστατου δικτύου των στοιχείων που το διακριτοποιούν γίνεται με την εντολή "generate", ενώ τα τεχνητά σύνορα

καθορίζονται με την εντολή “fix x... y... z...” και με την χρήση των ανάλογων συντεταγμένων. Το θεμέλιο που για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε άκαμπτο και απολύτως τραχύ, προσομοιώθηκε στο FLAC<sup>3D</sup> με την εντολή “fix x y z range x... y... z...” σαν μια άκαμπτη επιφάνεια, η οποία μπορεί να επιβάλει στην επιφάνεια του εδάφους γραμμικώς μεταβαλλόμενες μετακινήσεις.

Για την ολοκλήρωση του αριθμητικού μοντέλου ορίζεται ο καταστατικός νόμος που διέπει την συμπεριφορά του συνεχούς μέσου (του εδάφους, στην προκειμένη περίπτωση). Μερικά από τα μοντέλα που διαθέτει το FLAC<sup>3D</sup> για την εξιδανίκευση του εδαφικού υλικού είναι το ιστροπικό ελαστικό, το ορθοτροπικό ελαστικό, το εγκάρσια ιστροπικό, το μοντέλο Mohr-Coulomb, το ελαστοπλαστικό μοντέλο Drucker-Prager και άλλα πιο σύνθετα μοντέλα. Στις αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα ελαστικό – απολύτως πλαστικό μοντέλο με διαρροή κατά το κριτήριο Mohr-Coulomb, για το οποίο το FLAC<sup>3D</sup> απαιτεί να δοθούν εξής οι παράμετροι :

- το μέτρο ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης K (elastic bulk modulus) :

$$K = \sigma_0 / \varepsilon_{VOL} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / [3 * (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)] = E / 3(1 - 2\nu)$$

όπου  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , και  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  είναι οι ορθές τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις και (E ,  $\nu$ ) είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson, αντιστοίχως.

- το μέτρο διάτμησης G (elastic shear modulus), όπου:

$$G = E / 2(1 + \nu) = 3K(1 - 2\nu) / [2(1 + \nu)]$$

- η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους  $\phi$  (internal angle of friction)

- η συνοχή του εδάφους c (cohesion)

- η γωνία πλαστικής διόγκωσης ή γωνία διαστολικότητας  $\delta$  (dilation angle), όπου:

$$\tan \delta = \varepsilon_{VOL} / \varepsilon_1 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) / \varepsilon_1$$

- η αντοχή σε εφελκυσμό του εδάφους  $\sigma_t$  (tension limit)

Αφού οριστεί η γεωμετρία του προσομοιώματος, δηλαδή τα σύνορα, η θέση και οι διαστάσεις του θεμελίου καθώς και το μοντέλο συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού, επιβάλλεται η φόρτιση του άκαμπτου θεμελίου με μικρές επαυξητικές κατακόρυφες μετακινήσεις (που αντιστοιχούν στην εντατική κατάσταση λόγω της φόρτισης του θεμελίου). Το πρόγραμμα επιλύει το πρόβλημα για κάθε επιβαλλόμενη μετακίνηση του πεδίου και στη συνέχεια αθροίζει τις τάσεις κάτω από το θεμέλιο υπολογίζοντας έτσι το αντίστοιχο επιβαλλόμενο φορτίο και ροπή. Με την βαθμιαία αύξηση των επιβαλλόμενων μετακινήσεων, η φόρτιση φθάνει τελικώς σε κάποια οριακή τιμή που αποτελεί το οριακό φορτίο (φέρουσα ικανότητα) του πεδίου. Παρακάτω αναφέρεται ενδεικτικά ένα τυπικό παράδειγμα του κώδικα που χρειάζεται να δοθεί στο πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου ενός επιφανειακού θεμελίου :

```
generate zone brick p0 0 0 0 p1 21 0 0 p2 0 45 0 p3 0 0 9 &
size 28 45 18 rat 1.0 1.0 1.0
fix x range x -0.1 0.1
fix x range x 20.9 21.1
fix y range y -0.1 0.1
fix y range y 44.9 45.1
fix z range z -0.1 0.1
fix x y z range x 11.2 12.1 y 14.9 30.1 z 8.9 9.1
model mohr
prop bul 30000 sh 18000 coh 100
prop fri 0. dil 0. ten 1.e10
```

```

ini zvel 67.5e-5 grad -6.0e-5 0 0 range x 11.2 12.1 y 14.9 30.1 z 8.9 9.1
def p_load
  pnt = gp_head
  pload = 0.0
  n = 0
  loop while pnt # null
    if gp_zpos(pnt) > 8.9 then
      if gp_xpos(pnt) > 11.2 then
        if gp_xpos(pnt) < 12.1 then
          if gp_ypos(pnt) > 14.9 then
            if gp_ypos(pnt) < 30.1 then
              pload = pload + gp_zfunbal(pnt)
              n = n + 1
            end_if
          end_if
        end_if
      end_if
    end_if
    pnt = gp_next(pnt)
  end_loop
  p_load = pload
end
hist n 50
hist p_load
hist unbal
pl hist 1
set mechanical ratio 2.0e-5
solve
save file1701.sav

```

### 2.3.2 Αριθμητικές επιλύσεις με το FLAC-3D για ορθή κεντρική και έκκεντρη φόρτιση

Στο εδάφιο αυτό συνοψίζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων με το πρόγραμμα FLAC-3D για την περίπτωση ομοιογενούς εδάφους. Σκοπός των αναλύσεων είναι ο υπολογισμός του οριακού φορτίου (φέρουσας ικανότητας) ορθογωνικών και λωριδωτών επιφανειακών θεμελίων (εδραζόμενων στην επιφάνεια του εδάφους) και η σύγκρισή του με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλυτικών επιλύσεων ώστε να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία των αριθμητικών αναλύσεων του προγράμματος FLAC-3D. Η ανάλυση έγινε με παραδοχή αστράγγιστων συνθηκών σε συνεκτικό έδαφος ( $\varphi_u=0$  και  $c=c_u$ ), το οποίο διαρρέει κατά το κριτήριο Mohr-Coulomb.

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές των εδαφικών παραμέτρων :

- μέτρο ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης :  $K = 30000$  kPa
- μέτρο διάτμησης  $G = 18000$  kPa (που αντιστοιχεί σε λόγο Poisson  $\nu = 0.25$ )
- γωνία πλαστικής διόγκωσης (διαστολικότητας)  $\delta = 0$
- γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους  $\varphi_u = 0$  (αστράγγιστες συνθήκες)
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους  $c_u = 100$  kPa

Εκτός των ανωτέρω τιμών, διερευνήθηκαν και άλλες τιμές των ελαστικών παραμέτρων (καθώς και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής) και προέκυψε ότι η υπολογιζόμενη τιμή

του οριακού φορτίου (κανονικοποιημένη με την τιμή του  $c_u$ ) είναι πρακτικώς αναίσηθη σε μεταβολές των ελαστικών παραμέτρων, ενώ είναι ευθέως ανάλογη της τιμής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω συμπερασμάτων, οι τιμές του οριακού φορτίου (R) παρουσιάζονται αδιαστατοποιημένες με την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $C_u$ ) του εδάφους, δηλαδή μέσω της σχέσης :  $R/(B*L*C_u)$ .

Όσον αφορά στη γεωμετρία του πεδίου, εξετάστηκαν ορθογωνικά άκαμπτα θεμέλια με τις εξής διαστάσεις :

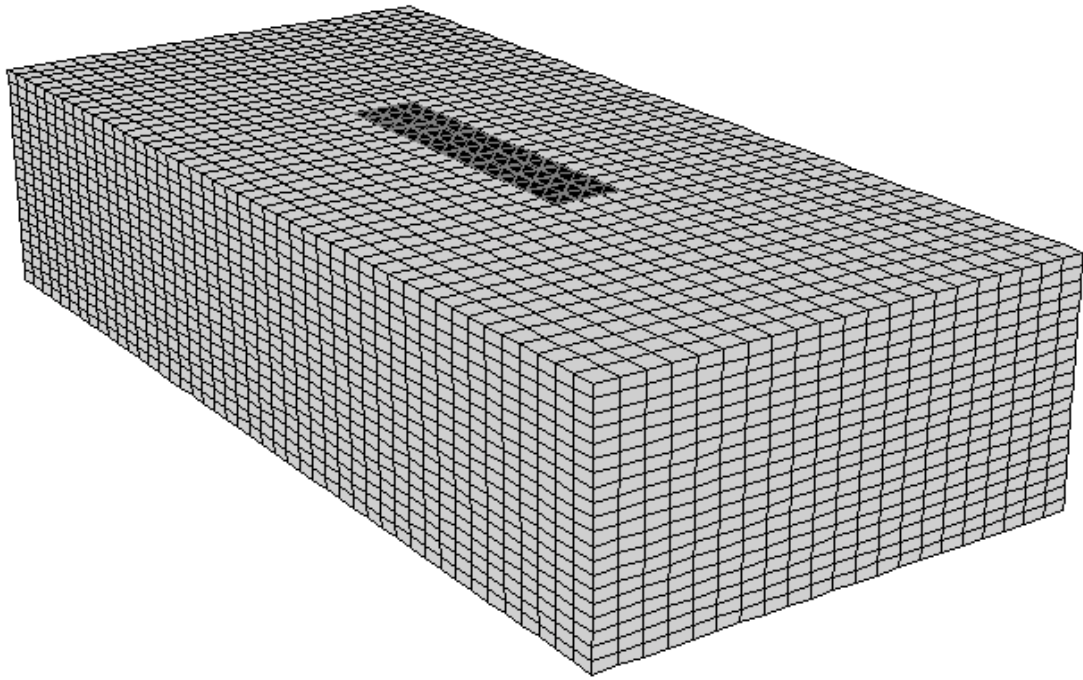
- Τετράγωνο θεμέλιο πλάτους  $B=3m$  (και μήκους  $L=B$ )
- Ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=3m$  και μήκους  $L=3B$
- Λωριδωτό πέδιλο το οποίο, για λόγους προσομοίωσης προσομοιώθηκε με ορθογωνικό πλάτους  $B=3m$  και μήκους  $L=5B$  (όπως αναφέρεται στα επόμενα, έγιναν και αναλύσεις με το δι-διάστατο πρόγραμμα PLAXIS, όπου το λωριδωτό πέδιλο προσομοιώθηκε ακριβώς).

Ο υπολογισμός του οριακού φορτίου του πεδίου έγινε για κατακόρυφη (ορθή) φόρτιση υπό τις εξής τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας ( $e/B$ ) :

$$e/B = 0 \text{ (κεντρική φόρτιση), } 1/12, 1/6, 1/4, 1/3 \text{ και } 5/12$$

Σημειώνεται ότι η μέγιστη δυνατή ανηγμένη εκκεντρότητα ( $e/B = 1/2$ ) αντιστοιχεί στην επιβολή του ορθού φορτίου στο άκρο του πεδίου. Η εκκεντρότητα λαμβάνεται υπόψη μόνο κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$  του θεμελίου, ενώ κατά την διεύθυνση του μήκους  $L$  θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει εκκεντρότητα.

Η γεωμετρία του προσομοιώματος του εδάφους που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις (διαστάσεις, αριστερό και δεξί περιθώριο μεταξύ του θεμελίου και των συνόρων καθώς και το βάθος του εδαφικού προσομοιώματος) φαίνεται στους ακόλουθους Πίνακες για το τετράγωνο θεμέλιο  $3,00m*3,00m$  ( $L=B$ ), το ορθογωνικό  $3,00m*9,00m$  ( $L=3B$ ) και το “λωριδωτό” θεμέλιο  $3,00m*15,00m$  ( $L=5B$ ) αντίστοιχα. Στους ίδιους Πίνακες φαίνεται και ο αριθμός των στοιχείων στα οποία είναι διακριτοποιημένο το έδαφος σε κάθε μία από τις τρεις διευθύνσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , καθώς και ο συνολικός αριθμός των στοιχείων για κάθε περίπτωση ανάλυσης με το  $FLAC^{3D}$ . Προφανώς, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των στοιχείων στα οποία διακριτοποιείται το έδαφος, τόσο μικρότερος ο χρόνος υπολογισμού και οι ανάγκες αποθήκευσης δεδομένων. Για το λόγο αυτό, σε κάθε ανάλυση με το πρόγραμμα γίνεται προσπάθεια ο χωρισμός σε στοιχεία να είναι όσο το δυνατόν πιο αραιός, προσέχοντας βέβαια αυτό να μην επηρεάζει την ακρίβεια και αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος.



*Προσομοίωμα του εδάφους και χωρισμός του σε στοιχεία με το πρόγραμμα  $FLAC^{3D}$ .*



Ανάλυση FLAC<sup>3D</sup> για τετράγωνο θεμέλιο 3,00m\*3,00m (L=B) και για διάφορες εκκεντρότητες

Εκκεντρότητα e	Διαστάσεις εδαφικού μοντέλου	άξονας x (αριστερό περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου, διαστάσεις θεμελίου, δεξί περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου)	άξονας y (αριστερό περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου, διαστάσεις θεμελίου, δεξί περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου)	άξονας z (βάθος εδαφικού μοντέλου)	Αριθμός στοιχείων εδαφικού μοντέλου
0	21m*21m*10m	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	10,00m	$21*21*20=$ 8820
B/12	21m*21m*10m	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	10,00m	$21*21*20=$ 8820
2B/12=B/6	21m*21m*10m	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	10,00m	$21*21*20=$ 8820
3B/12=B/4	21m*21m*10m	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	10,00m	$84*21*20=$ 35280
4B/12=B/3	21m*21m*10m	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	10,00m	$42*21*10=$ 8820
5B/12	21m*21m*10m	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	$3B + B + 3B$ (9,00m+3,00m+9,00m)	10,00m	$28*21*10=$ 5880

Ανάλυση FLAC<sup>3D</sup> για ορθογωνικό θεμέλιο 3,00m\*9,00m (L=3B) και για διάφορες εκκεντρότητες.

Εκκεντρότητα e	Διαστάσεις εδαφικού μοντέλου	άξονας x (αριστερό περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου, διαστάσεις θεμελίου, δεξί περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου)	άξονας y (αριστερό περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου, διαστάσεις θεμελίου, δεξί περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου)	άξονας z (βάθος εδαφικού μοντέλου)	Αριθμός στοιχείων εδαφικού μοντέλου
0	21m*27m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	3B + 3B + 3B (9,00m+9,00m+9,00m)	9,00m	21*27*18= 10206
B/12	21m*27m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	3B + 3B + 3B (9,00m+9,00m+9,00m)	9,00m	21*27*18= 10206
2B/12=B/6	21m*27m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	3B + 3B + 3B (9,00m+9,00m+9,00m)	9,00m	21*27*18= 10206
3B/12=B/4	21m*27m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	3B + 3B + 3B (9,00m+9,00m+9,00m)	9,00m	84*27*18= 40824
4B/12=B/3	21m*27m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	3B + 3B + 3B (9,00m+9,00m+9,00m)	9,00m	42*27*18= 20412
5B/12	21m*27m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	3B + 3B + 3B (9,00m+9,00m+9,00m)	9,00m	28*27*18= 13608

Ανάλυση FLAC<sup>3D</sup> για λωριδωτό θεμέλιο 3,00m\*15,00m (L=5B) και για διάφορες εκκεντρότητες.

Εκκεντρότητα e	Διαστάσεις εδαφικού μοντέλου	άξονας x (αριστερό περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου, διαστάσεις θεμελίου, δεξί περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου)	άξονας y (αριστερό περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου, διαστάσεις θεμελίου, δεξί περιθώριο μεταξύ θεμελίου και ορίου)	άξονας z (βάθος εδαφικού μοντέλου)	Αριθμός στοιχείων εδαφικού μοντέλου
0	21m*45m*10m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	5B + 5B + 5B (15,00m+15,00m+15,00m)	10,00m	21*45*20= 18900
B/12	21m*45m*10m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	5B + 5B + 5B (15,00m+15,00m+15,00m)	10,00m	21*45*20= 18900
2B/12=B/6	21m*45m*10m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	5B + 5B + 5B (15,00m+15,00m+15,00m)	10,00m	21*45*20= 18900
3B/12=B/4	21m*45m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	5B + 5B + 5B (15,00m+15,00m+15,00m)	9,00m	28*45*18= 22680
4B/12=B/3	21m*45m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	5B + 5B + 5B (15,00m+15,00m+15,00m)	9,00m	42*45*9= 17010
5B/12	21m*45m*9m	3B + B + 3B (9,00m+3,00m+9,00m)	5B + 5B + 5B (15,00m+15,00m+15,00m)	9,00m	28*45*9= 11340

Ο ακόλουθος Πίνακας δίνει τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> και τη σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της μεθόδου που προτείνεται στον ΕΑΚ 2000 (τα αποτελέσματα της μεθόδου του EC-8<sup>3</sup> είναι πρακτικώς ίδια με τον ΕΑΚ 2000, με εξαίρεση αυτά που αφορούν ανηγμένες εκκεντρότητες μεγαλύτερες του 1/3). Στην πρώτη στήλη του Πίνακα αναφέρεται η τιμή της εκκεντρότητας  $e$  (κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B=3,00\text{m}$  του θεμελίου), ενώ στην δεύτερη στήλη αναφέρεται η τιμή της ανηγμένης εκκεντρότητας  $e/B$ . Στην τρίτη στήλη φαίνεται η τιμή του οριακού φορτίου  $R$  (φέρουσα ικανότητα) του θεμελίου που υπολογίζεται με το FLAC<sup>3D</sup>, ενώ στην τέταρτη στήλη του Πίνακα αναγράφεται ο αδιάστατος λόγος  $R/(B \cdot L \cdot c_u)$  όπου  $c_u (=100\text{kPa})$  είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Τέλος, στην τελευταία στήλη του πίνακα δίνεται η θεωρητική τιμή του αδιάστατου λόγου  $R/(B \cdot L \cdot c_u)$  που υπολογίσθηκε με τη μέθοδο του ΕΑΚ 2000. Για λόγους πληρότητας του πίνακα, αναφέρεται και η περίπτωση όπου η εκκεντρότητα λαμβάνει την μέγιστη δυνατή τιμή της, δηλαδή την τιμή  $e=B/2$ . Σ' αυτήν την περίπτωση θεωρείται ότι το οριακό φορτίο είναι μηδέν.

Οριακό φορτίο επιφανειακού θεμελίου  $B \times L$  (αποτελέσματα FLAC<sup>3D</sup>)  
σε ομοιογενές έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες  
για ορθή κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση  
**Τετράγωνο θεμέλιο 3,00m\*3,00m (L=B)**

Εκκεντρότητα $e$	Ανηγμένη εκκεντρότητα $e/B$	Οριακό φορτίο $R$ (kN)	$R/(B \cdot L \cdot c_u)$ <b>FLAC</b>	$R/(B \cdot L \cdot c_u)$ <b>ΕΑΚ 2000</b>
0	0,000	4950	5,50	6,17
B/12	0,083	4083	4,54	5,00
2B/12 = B/6	0,167	3203	3,56	3,88
3B/12 = B/4	0,250	2412	2,68	2,83
4B/12 = B/3	0,333	1600	1,78	1,83
5B/12	0,417	761	0,85	0,89
6B/12 = B/2	0,500	0	0,00	0

<sup>3</sup> η μέθοδος του EC-8 αφορά μόνον σε λωριδωτά πέδιλα

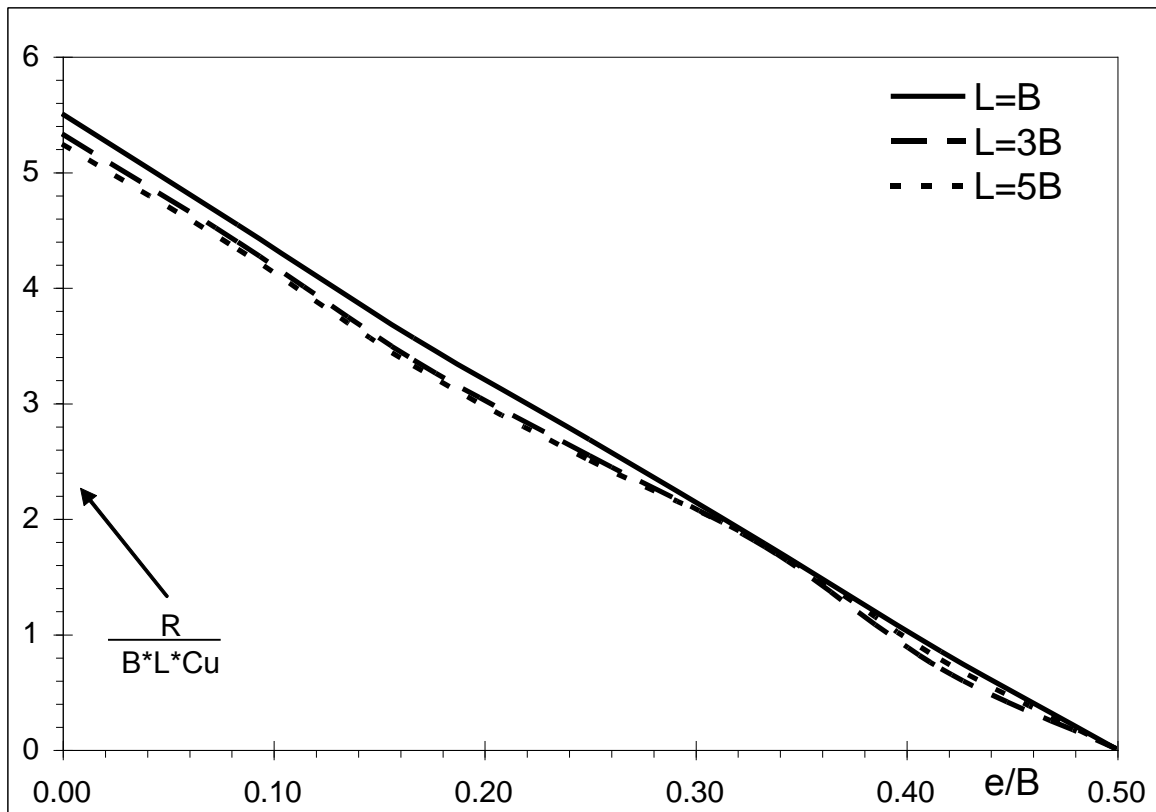
**Ορθογωνικό θεμέλιο 3,00m\*9,00m (L=3B)**

Εκκεντρότητα $e$	Ανηγγμένη εκκεντρότητα $e/B$	Οριακό φορτίο $R$ (kN)	$R/(B*L*C_U)$ <b>FLAC</b>	$R/(B*L*C_U)$ <b>EAK 2000</b>
0	0,000	14378	5,33	5,48
B/12	0,083	11846	4,39	4,52
2B/12 = B/6	0,167	9090	3,37	3,58
3B/12 = B/4	0,250	6863	2,54	2,66
4B/12 = B/3	0,333	4725	1,75	1,75
5B/12	0,417	1878	0,70	0,87
6B/12 = B/2	0,500	0	0,00	0

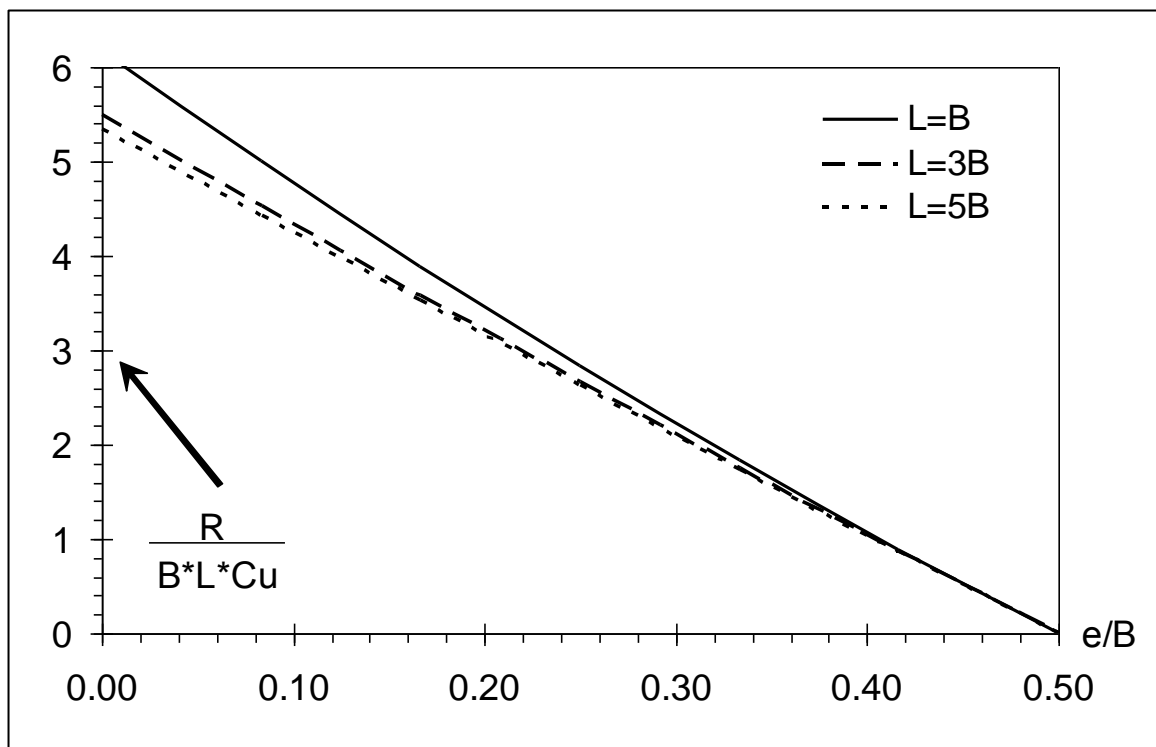
**“Λωριδωτό” θεμέλιο 3,00m\*15,00m (L=5B)**

Εκκεντρότητα $e$	Ανηγγμένη εκκεντρότητα $e/B$	Οριακό φορτίο $R$ (kN)	$R/(B*L*C_U)$ <b>FLAC</b>	$R/(B*L*C_U)$ <b>EAK 2000</b>
0	0,000	23569	5,24	5,35
B/12	0,083	19477	4,33	4,43
2B/12 = B/6	0,167	14930	3,32	3,52
3B/12 = B/4	0,250	11246	2,50	2,62
4B/12 = B/3	0,333	7955	1,77	1,74
5B/12	0,417	3484	0,77	0,86
6B/12 = B/2	0,500	0	0,00	0

Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται η γραφική παράσταση του αδιάστατου λόγου  $R/(B*L*C_U)$  συναρτήσει της ανηγμένης εκκεντρότητας  $e/B$ , για τις τρεις περιπτώσεις θεμελίων που εξετάστηκαν. Φαίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC και τα αποτελέσματα των «θεωρητικών» προβλέψεων με τη μέθοδο του EAK 2000. Η μέγιστη απόκλιση (σφάλμα) μεταξύ των δύο μεθόδων είναι 10% (για μηδενική εκκεντρότητα) ενώ συνήθως η διαφορά περιορίζεται στο 5%. Οι διαφορές οφείλονται κυρίως στην ελαστική παραμόρφωση της ανάλυσης με το πρόγραμμα FLAC, ενώ οι προβλέψεις της μεθόδου της οριακής ισορροπίας αναφέρονται σε υλικό που είναι απαραμόρφωτο μέχρι την αστοχία.



Διάγραμμα υπολογισμού του οριακού φορτίου επιφανειακού θεμελίου διαστάσεων  $B \times L$  σε ομοιογενές έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες, για ορθή κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση. Αποτελέσματα του προγράμματος  $FLAC^{3D}$



Διάγραμμα υπολογισμού του οριακού φορτίου επιφανειακού θεμελίου διαστάσεων  $B \times L$  σε ομοιογενές έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες, για ορθή κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση. Αποτελέσματα της μεθόδου του EAK 2000

Τα αποτελέσματα των προβλέψεων κατά τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000, παράρτημα Ζ) έχουν προκύψει με εφαρμογή της σχέσης (που αναφέρθηκε προηγουμένως) :

$$R/A' = (\pi+2)c_u \kappa_c i_c$$

όπου  $c_u$  είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους και τα  $\kappa_c$  (συντελεστής σχήματος του θεμελίου) και  $i_c$  (συντελεστής κλίσεως) ισούνται με:

$$\kappa_c = 1 + 0,2 (B'/L')$$

$$i_c = 0,5 * [1 + \text{sqrt} \{ 1 - Q / (B'L'c_u) \} ]$$

Η ενεργός επιφάνεια του θεμελίου είναι  $A'=B' \cdot L'$  όπου  $B'=B-2e_B$  το ενεργό πλάτος και  $L'=L-2e_L$  το ενεργό μήκος του θεμελίου και  $e_B$  και  $e_L$  η εκκεντρότητα στην διεύθυνση του πλάτους  $B$  και του μήκους  $L$  αντίστοιχα.

Στην ειδική περίπτωση όπου η φόρτιση είναι ορθή (δηλαδή μηδενική τέμνουσα δύναμη  $Q=0$ ) και με εκκεντρότητα του φορτίου μόνο ως προς τη διεύθυνση του πλάτους  $B$ , ισχύει :  $e_B=e$  ,  $e_L=0$  και  $i_c = 1$  και επομένως η προηγούμενη σχέση δίνει :

$$R / (BLc_u) = (\pi+2) * \kappa_c * (1-2e/B)$$

όπου :  $\kappa_c = 1 + 0,2 * (B/L) * (1-2e/B)$

Από τις τελευταίες σχέσεις υπολογίζεται το οριακό φορτίο  $R$  συναρτήσει των  $B$ ,  $L$ ,  $e$  και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής :  $c_u$ .

Οι ανωτέρω σχέσεις μπορούν να γραφούν και με την εξής μορφή :

$$\frac{R}{BLc_u} = (\pi+2) \left(1 - 2 \frac{e_B}{B}\right) \left(1 - 2 \frac{e_L}{L}\right) \kappa_c i_c$$

όπου :

$$\kappa_c = 1 + 0.2 \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{1 - 2 \frac{e_B}{B}}{1 - 2 \frac{e_L}{L}}\right) \quad \text{και} \quad i_c = 0.5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{Q}{BLc_u}\right)}{\left(1 - 2 \frac{e_B}{B}\right) \left(1 - 2 \frac{e_L}{L}\right)}}\right)$$

Ειδικές περιπτώσεις :

1. Στην ειδική (και αρκετά συνήθη) περίπτωση της φόρτισης ενός πεδίου με εκκεντρότητα μόνον κατά την διεύθυνση του πλάτους (δηλαδή για  $e_L = 0$ ), η ανωτέρω σχέση απλοποιείται ως εξής :

$$\frac{R}{BLc_u} = (\pi+2) \left(1 - 2 \frac{e_B}{B}\right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{B}{L}\right) \left(1 - 2 \frac{e_B}{B}\right)\right] i_c$$

$$\text{όπου : } i_c = 0.5 \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{\left( \frac{Q}{BLc_u} \right)}{\left( 1 - 2 \frac{e_B}{B} \right)}} \right)$$

2. Στην ειδική περίπτωση λωριδωτού πεδίου ( $L = \infty$ ), η φέρουσα ικανότητα  $R_s$  (σε kN/m) μπορεί να γραφεί (επειδή  $\kappa_c = i_c = 1$ ) :

$$\frac{R_s}{Bc_u} = (\pi + 2) \left( 1 - 2 \frac{e_B}{B} \right)$$

Με βάση τα ανωτέρω, η φέρουσα ικανότητα ( $R$ ) ενός πεδίου διαστάσεων  $B \times L$ , μπορεί να γραφεί ως εξής :

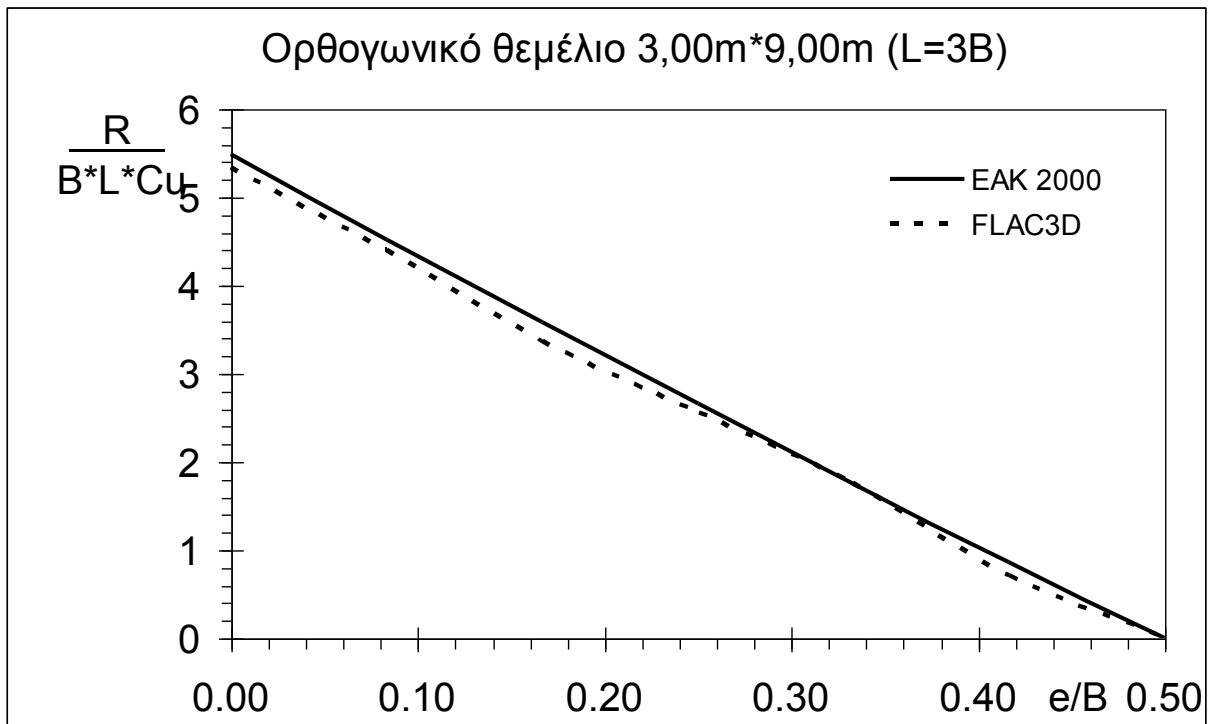
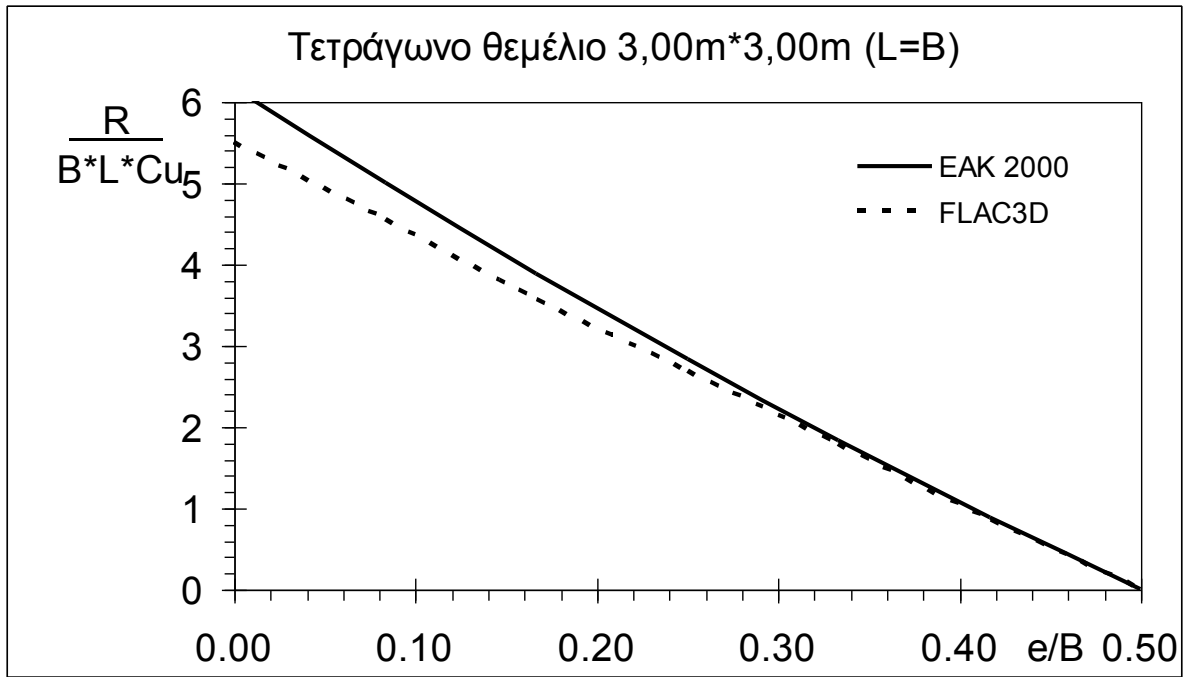
$$\frac{R}{R_s L} = \left( 1 - 2 \frac{e_L}{L} \right) \kappa_c i_c$$

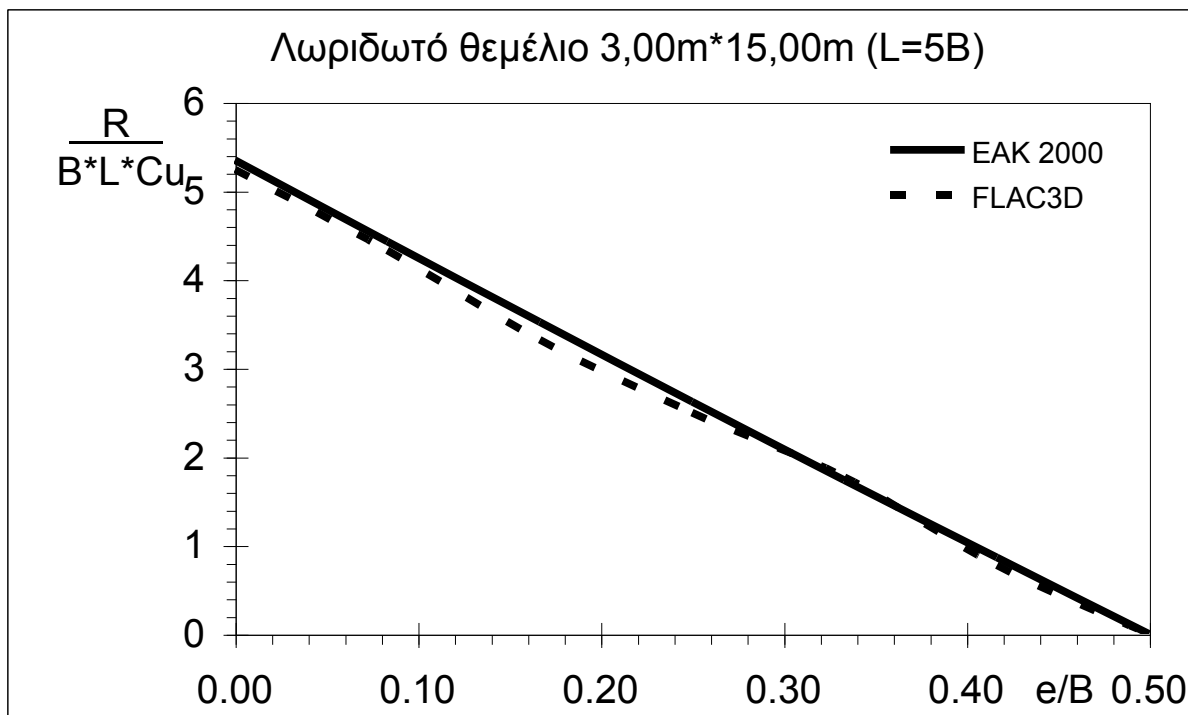
όπου  $R_s$  είναι η φέρουσα ικανότητα (ανά τρέχον μέτρο) του λωριδωτού πεδίου με το ίδιο πλάτος και :

$$\kappa_c = 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \left( \frac{1 - 2 \frac{e_B}{B}}{1 - 2 \frac{e_L}{L}} \right) \quad \text{και} \quad i_c = 0.5 \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{\left( \frac{Q}{BLc_u} \right)}{\left( 1 - 2 \frac{e_B}{B} \right) \left( 1 - 2 \frac{e_L}{L} \right)}} \right)$$

Στο ακόλουθο σχήμα συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC-3D και με την μέθοδο του EAK 2000. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η καμπύλη της κανονικοποιημένης οριακής φέρουσας ικανότητας  $R/(B^*L^*c_u)$  συναρτήσει της ανηγμένης εκκεντρότητας  $e/B$ , για τις τρεις περιπτώσεις των θεμελίων που εξετάστηκαν. Από το σχήμα αυτό προκύπτει μια αρκετά καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων του προγράμματος FLAC<sup>3D</sup> με τις τιμές της μεθόδου του EAK 2000.







Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων  $FLAC^{3D}$  και EAK 2000 για το οριακό φορτίο επιφανειακού θεμελίου  $B \times L$  σε ομοιογενές έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες, για ορθή κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση

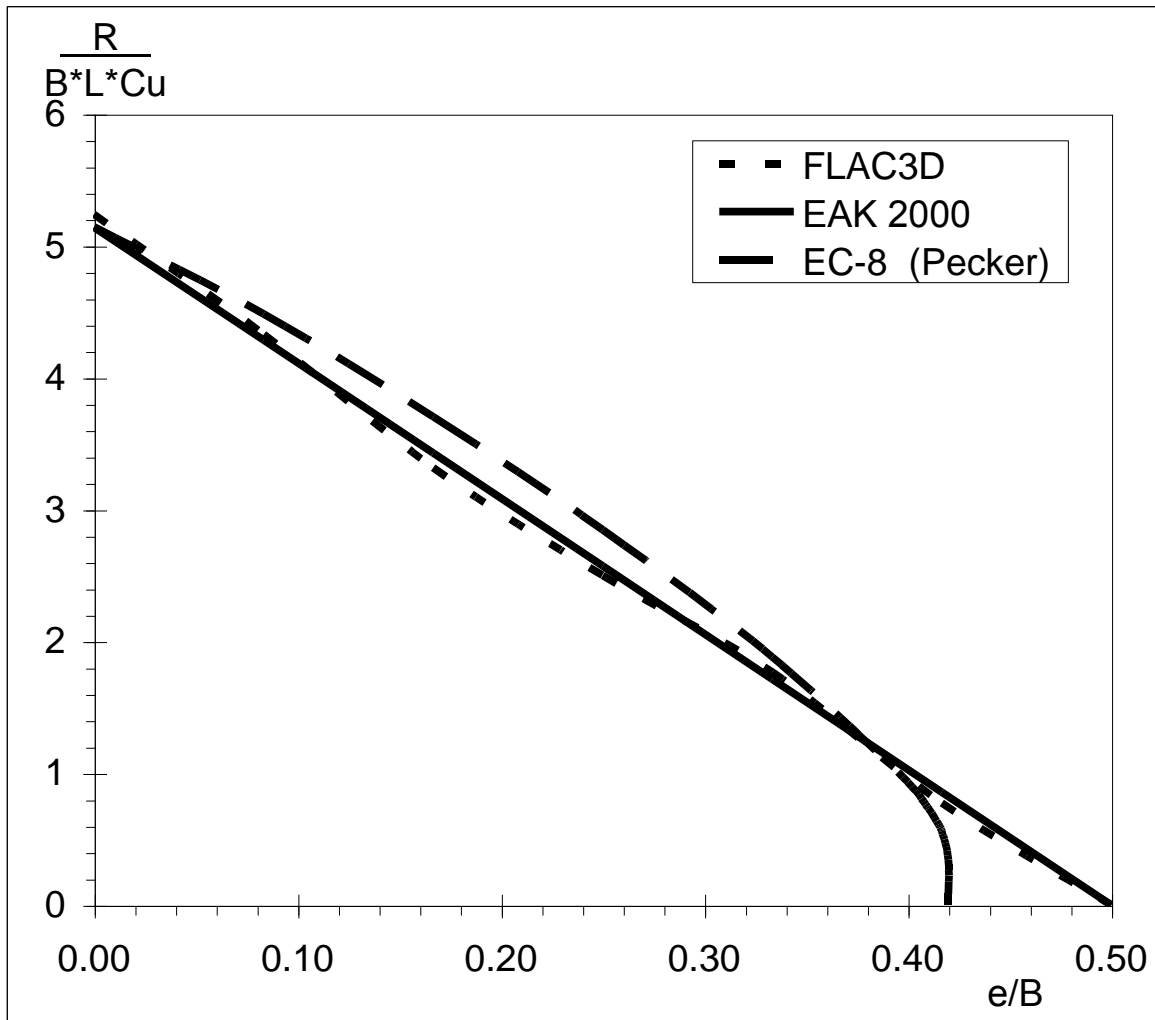
Για την περίπτωση του λωριδωτού πεδίου, ο ακόλουθος πίνακας συγκρίνει τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το πρόγραμμα  $FLAC-3D$ , και των αναλυτικών επιλύσεων με τη μέθοδο του EAK 2000 και τη μέθοδο του EC-8 (Pecker, 1996). Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης με το πρόγραμμα  $FLAC-3D$  αφορούν σε πέδιλο διαστάσεων 3m x 15m (που προσεγγίζει την λωρίδα) ενώ οι αναλυτικές σχέσεις του EAK-2000 και του EC-8 αναφέρονται σε πέδιλο-λωρίδα :

**“Λωριδωτό” θεμέλιο**

Εκκεντρότητα e	Ανηγμένη εκκεντρότητα e/B	R/(B*L*C <sub>υ</sub> ) <b>FLAC *</b>	R/(B*L*C <sub>υ</sub> ) <b>EAK 2000</b>	R/(B*L*C <sub>υ</sub> ) <b>EC-8</b>
0	0,000	5,24	5,14	5,14
B/12	0,083	4,33	4,28	4,48
2B/12 = B/6	0,167	3,32	3,43	3,70
3B/12 = B/4	0,250	2,50	2,57	2,84
4B/12 = B/3	0,333	1,77	1,71	1,88
5B/12	0,417	0,77	0,86	0,56
6B/12 = B/2	0,500	0,00	0	0

\* Για πέδιλο διαστάσεων 3,00m\*15,00m (L=5B)

Τα ανωτέρω αποτελέσματα συνοψίζονται στο ακόλουθο Σχήμα :



Διάγραμμα υπολογισμού του οριακού φορτίου ( $R$ ) επιφανειακού λωριδωτού θεμελίου σε ομοιογενές έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες, για ορθή κεντρική ή εκκεντρή φόρτιση. Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με το πρόγραμμα  $FLAC^{3D}$ , την μέθοδο του EAK 2000 και την μέθοδο του EC-8.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων όλων των μεθόδων είναι πολύ ικανοποιητική μέχρι την τιμή 0.40 της ανηγμένης εκκεντρότητας. Για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας, η μέθοδος του EC-8 δίνει αρκετά μικρότερες τιμές.

### Σύγκριση του οριακού φορτίου του λωριδωτού πεδύλου με το τετραγωνικό και ορθογωνικό :

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (EAK 2000, παράρτημα Z) το οριακό φορτίο  $R$  ορθογωνικής επιφανειακής θεμελίωσης σε ομοιογενές έδαφος, υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\phi_u=0$  και  $c=c_u$ ) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$R = A'(\pi+2)c_u k_c i_c + q$$

όπου  $A'$  είναι η ενεργός επιφάνεια του θεμελίου ( $A'=B' \cdot L'$  με  $B'=B-2e_B$  το ενεργό πλάτος και  $L'=L-2e_L$  το ενεργό μήκος του θεμελίου και  $e_B$  και  $e_L$  η εκκεντρότητα στην διεύθυνση του πλάτους  $B$  και του μήκους  $L$  αντίστοιχα),  $c_u$  είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους,  $q$  είναι η επιφόρτιση στη στάθμη της

βάσης του πεδίου και τα  $\kappa_c$  (συντελεστής σχήματος του θεμελίου) και  $i_c$  (συντελεστής κλίσεως) ισούνται με:

$$\kappa_c = 1 + 0,2(B'/L')$$

$$i_c = 0,5*[1 + \text{sqrt}\{1 - Q/(B'L'c_u)\}]$$

Στην περίπτωση ορθής φόρτισης (δηλαδή η τέμνουσα δύναμη είναι μηδέν  $Q=0$ ) θεμελίου εδραζόμενου στην επιφάνεια του εδάφους (δηλαδή με μηδενική επιφόρτιση  $q=0$ ), τότε ο συντελεστής κλίσεως είναι  $i_c = 1$  και η οριακή φέρουσα ικανότητα δίνεται από τη σχέση :

$$R_R = (B-2e_B)(L-2e_L)(\pi+2)c_u\kappa_c$$

όπου :  $\kappa_c = 1 + 0,2(B-2e_B)/(L-2e_L)$ .

Στην περίπτωση λωριδωτού θεμελίου απείρου μήκους ( $L$ ) και πλάτους  $B$ , εφαρμόζοντας τους ανωτέρω τύπους προκύπτει ότι  $\kappa_c = 1$  και το οριακό φορτίο ( $R_S$ ) ανά μέτρο μήκους πεδίου είναι :

$$R_S = (B-2e_B)(\pi+2)c_u$$

Εάν  $R_R$  είναι το οριακό φορτίο του ορθογωνικού θεμελίου με διαστάσεις  $B \times L$  τότε ο λόγος των δύο οριακών φορτίων είναι :

$$R_R/R_S = (L-2e_L)\kappa_c = (1-2e_L/L)L\kappa_c$$

όπου :  $\kappa_c = 1 + 0,2(B-2e_B)/(L-2e_L)$ .

Στις αναλύσεις που έγιναν στο παρόν κεφάλαιο με το FLAC<sup>3D</sup> χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνο θεμέλιο 3,00m\*3,00m, ορθογωνικό 3,00m\*9,00m και λωριδωτό θεμέλιο 3,00m\*15,00m, ενώ η φόρτιση ήταν ορθή με εκκεντρότητα  $e_B$  μόνο ως προς τη διεύθυνση του πλάτους  $B$  ( $e_L=0$ ). Το οριακό φορτίο ανά μονάδα μήκους του λωριδωτού θεμελίου 3,00m\*15,00m, το οποίο προέκυψε από την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει χωρίς σημαντικό σφάλμα το αντίστοιχο οριακό φορτίο του απειρομήκους θεμελίου με το ίδιο πλάτος  $B=3,00m$ . Επομένως, αν διαιρεθεί το οριακό φορτίο του λωριδωτού θεμελίου με το μήκος του  $L=15,00m$ , προκύπτει το ανηγμένο φορτίο  $R_S$  ανά μονάδα μήκους.

Οριακό φορτίο λωριδωτού θεμελίου σε ομοιογενές έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες,  
για ορθή φόρτιση, με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup>.

Λωριδωτό θεμέλιο 3,00m*15,00m (L=5B)			
Εκκεντρότητα e	Ανηγγμένη εκκεντρότητα e/B	Οριακό φορτίο R (kN)	R <sub>S</sub> (kN/m)
0	0,000	23569	1571
B/12	0,083	19477	1298
2B/12 = B/6	0,167	14930	995
3B/12 = B/4	0,250	11246	750
4B/12 = B/3	0,333	7955	530
5B/12	0,417	3484	232
6B/12 = B/2	0,500	0	0

Με τη βοήθεια του προγράμματος FLAC<sup>3D</sup> υπολογίστηκαν επίσης οι τιμές της φέρουσας ικανότητας R<sub>R</sub> του τετράγωνου (3,00m\*3,00m) και ορθογωνικού θεμελίου (3,00m\*9,00m), οι οποίες παρουσιάζονται στην τρίτη στήλη του επόμενου Πίνακα, διαιρώντας πάλι με το αντίστοιχο μήκος L του κάθε θεμελίου, ανάγουμε το οριακό φορτίο στη μονάδα μέτρησης του μήκους και παίρνουμε το λόγο R<sub>R</sub>/L :

Για να συγκρίνουμε το οριακό φορτίο ανά μονάδα μήκους R<sub>R</sub>/L του ορθογωνικού θεμελίου με το αντίστοιχο φορτίο R<sub>S</sub> του λωριδωτού διαιρούμε τις τιμές της τέταρτης στήλης του επόμενου Πίνακα με τις τιμές της τέταρτης στήλης του προηγούμενου Πίνακα. Ο αδιάστατος λόγος (R<sub>R</sub>/L) / R<sub>S</sub> δίνεται στην πέμπτη στήλη του επόμενου Πίνακα τόσο για το τετράγωνο, όσο και για το ορθογωνικό θεμέλιο. Ο λόγος αυτός παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα και όσο το μήκος του θεμελίου αυξάνει (δηλαδή όσο το B/L πλησιάζει το άπειρο και προσεγγίζουμε το άπειρο μήκος θεμελίου), τόσο ο λόγος (R<sub>R</sub>/L) / R<sub>S</sub> τείνει στην τιμή 1.

Σύμφωνα με την σχέση

$$R_R/R_S = (L-2e_L)k_c = (1-2e_L/L)Lk_c$$

μπορούμε να βρούμε τη θεωρητική συσχέτιση του οριακού φορτίου ορθογωνικού και λωριδωτού θεμελίου. Οι τιμές του λόγου R<sub>R</sub>/R<sub>S</sub>, για ορθή φόρτιση με εκκεντρότητα μόνο ως προς την διεύθυνση του πλάτους B και e<sub>L</sub>=0, υπολογίζονται στην έκτη στήλη του επόμενου Πίνακα. Ο λόγος R<sub>R</sub>/R<sub>S</sub> δεν είναι αδιάστατος, αλλά έχει μονάδες μήκους. Για να αδιαστατοποιηθεί πρέπει να διαιρέσουμε με το αντίστοιχο μήκος L του θεμελίου, οπότε θα έχουμε το αδιάστατο μέγεθος (R<sub>R</sub>/L) / R<sub>S</sub>, οι τιμές του οποίου παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του επόμενου Πίνακα.

Όπως και προηγουμένως με τα αποτελέσματα του FLAC<sup>3D</sup> έτσι και τώρα οι θεωρητικές αυτές τιμές είναι κοντά στο 1, και η προσέγγιση στη μονάδα είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλώνει η διάσταση του μήκους L σε σχέση με το πλάτος B.

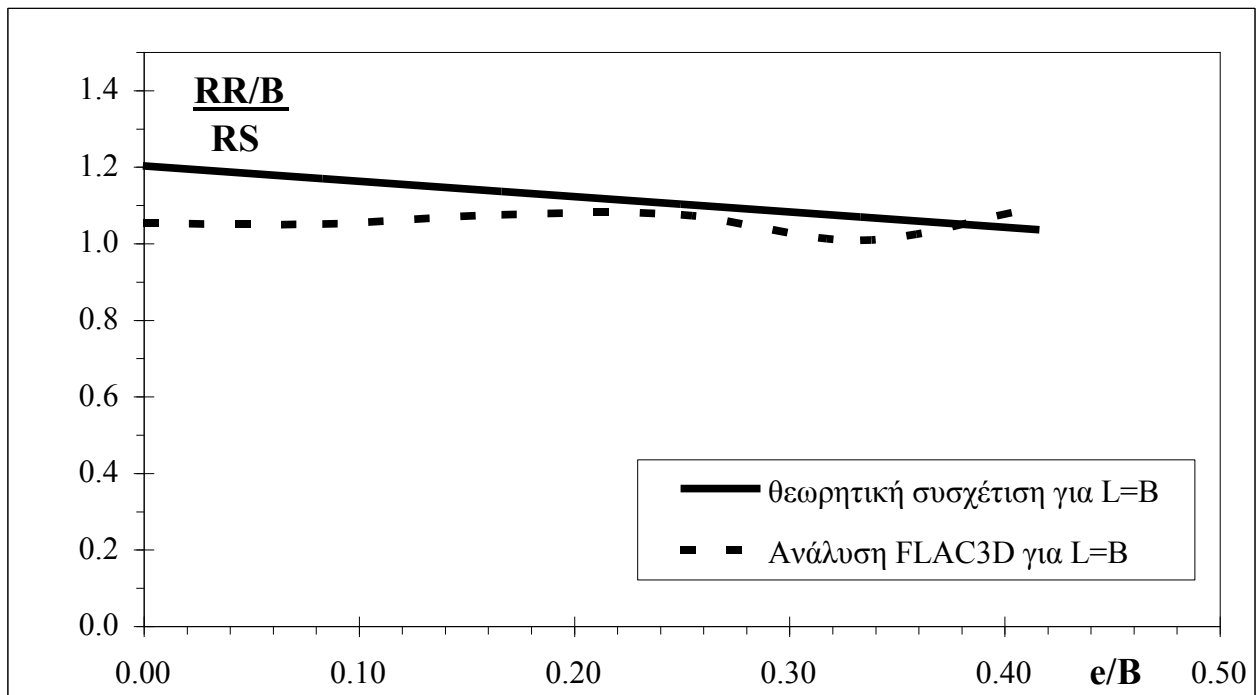
Επιπλέον, όσο μεγαλώνει η εκκεντρότητα  $e$  της φόρτισης, τόσο το  $(R_R/L) / R_S$  τείνει στην μονάδα. Μάλιστα, στην εξεταζόμενη περίπτωση της ορθής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες με  $e_L=0$  και εκκεντρότητα μόνο κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$ , θεωρητικώς ο αδιάστατος λόγος  $(R_R/L)/R_S$  πρέπει να ισούται με τον συντελεστή σχήματος  $k_c$  του θεμελίου.

Η σύγκριση των θεωρητικών τιμών του λόγου  $(R_R/L)/R_S$  (τελευταία στήλη του επόμενου Πίνακα) με αυτές που υπολογίζονται από την ανάλυση του προγράμματος FLAC<sup>3D</sup> (πέμπτη στήλη του επόμενου Πίνακα), φαίνεται στα επόμενα δύο Σχήματα : σύγκριση τετράγωνου με λωριδωτό θεμέλιο και σύγκριση ορθογωνικού και λωριδωτό θεμέλιο. Από αυτά τα δύο σχήματα παρατηρείται γενικώς ότι η υπολογιστική καμπύλη (FLAC<sup>3D</sup>) προσεγγίζει την θεωρητική, κυρίως στην περίπτωση του ορθογωνικού θεμελίου ενώ για το τετράγωνο η προσέγγιση είναι λιγότερο ικανοποιητική. Και στις δύο περιπτώσεις όμως, η καμπύλη με βάση το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> είναι κάτω από την θεωρητική, το FLAC<sup>3D</sup> δίνει δηλαδή μικρότερες τιμές για το λόγο  $(R_R/L)/R_S$  από ότι η θεωρητική σχέση του λόγου  $R_R/R_S$ . Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στις δύο τιμές παρατηρείται στην περίπτωση του τετράγωνου με το λωριδωτό θεμέλιο και είναι της τάξεως του 10% περίπου, ενώ στην περίπτωση του ορθογωνικού με το λωριδωτό η διαφορά είναι σχετικά μικρότερη.

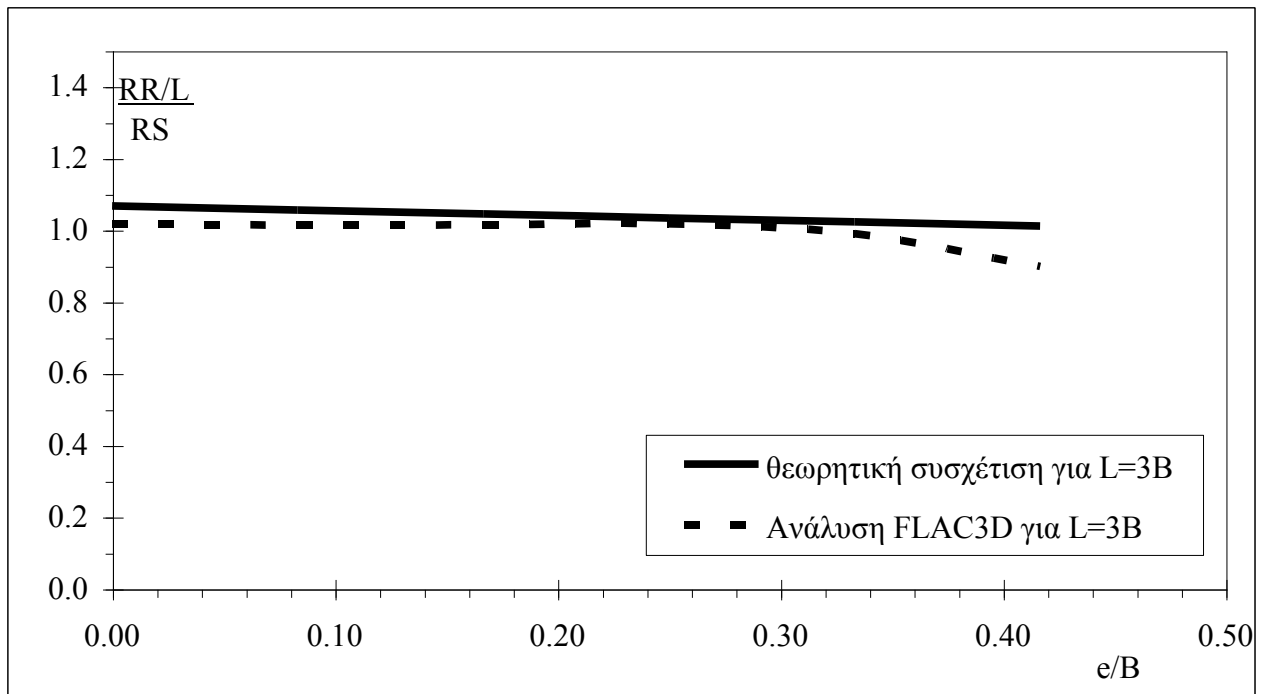
Σύγκριση οριακού φορτίου ορθογωνικού και λωριδωτού θεμελίου.  
Οριακό φορτίο επιφανειακού θεμελίου  $B \times L$  σε ομοιογενές έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες και ορθή φόρτιση, με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup>

Τετράγωνο θεμέλιο 3,00m*3,00m (L=B)						
Εκκεντρότητα $e$	Ανηγγμένη εκκεντρότητα $e/B$	Οριακό φορτίο $R_R$ (kN)	$R_R/L$ (kN/m)	$(R_R/L) / R_S$	$R_R / R_S$ (θεωρητική συσχέτιση)	$(R_R/L) / R_S$ (θεωρητική συσχέτιση)
0	0,000	4950	1650	1,05	3,60	1,20
B/12	0,083	4083	1361	1,05	3,50	1,17
B/6	0,167	3203	1068	1,07	3,40	1,13
B/4	0,250	2412	804	1,07	3,30	1,10
B/3	0,333	1600	533	1,01	3,20	1,07
5B/12	0,417	761	254	1,09	3,10	1,03
B/2	0,500	0	0	-	-	-

Ορθογωνικό θεμέλιο 3,00m*9,00m (L=3B)						
Εκκεντρότητα $e$	Ανηγγμένη εκκεντρότητα $e/B$	Οριακό φορτίο $R_R$ (kN)	$R_R/L$ (kN/m)	$(R_R/L) / R_S$	$R_R / R_S$ (θεωρητική συσχέτιση)	$(R_R/L) / R_S$ (θεωρητική συσχέτιση)
0	0,000	14378	1598	1,02	9,60	1,07
B/12	0,083	11846	1316	1,01	9,50	1,06
B/6	0,167	9090	1010	1,01	9,40	1,04
B/4	0,250	6863	763	1,02	9,30	1,03
B/3	0,333	4725	525	0,99	9,20	1,02
5B/12	0,417	1878	209	0,90	9,10	1,01
B/2	0,500	0	0	-	-	-



Συσχέτιση του οριακού φορτίου τετράγωνου θεμελίου ( $R_R$ ) πλάτους  $B$  και λωριδωτού θεμελίου ( $R_S$ ), σε ομοιογενές έδαφος, υπό αστράγγιστες συνθήκες και ορθή φόρτιση



*Συσχέτιση του οριακού φορτίου ορθογωνικού θεμελίου ( $R_R$ ) πλάτους  $B$  και μήκους  $L$ , με λωριδωτό θεμέλιο ( $R_S$ ), σε ομοιογενές έδαφος, υπό αστράγγιστες συνθήκες και ορθή φόρτιση*

Από τις ανωτέρω συσχετίσεις προκύπτει η πολύ καλή ακρίβεια των αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC-3D. Συνεπώς, τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το πρόγραμμα αυτό μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα και στην περίπτωση ανομοιογενούς εδάφους, όπως περιγράφεται στα επόμενα Κεφάλαια (δίστρωτο έδαφος, και έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή).



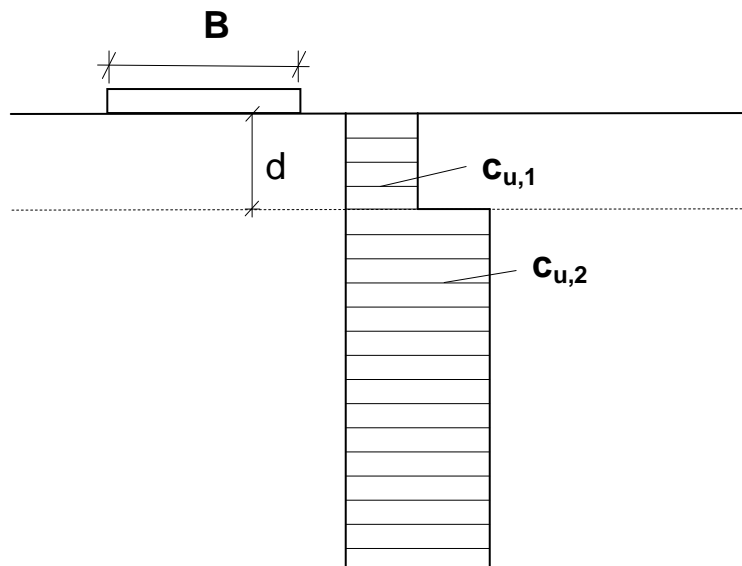
### 3 Φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων σε δίστρωτο έδαφος υπό ορθή (κεντρική και έκκεντρη) φόρτιση

#### 3.1 Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αυτής της εργασίας αναφέρθηκαν διάφορες σχέσεις της βιβλιογραφίας για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου επιφανειακών θεμελιώσεων. Κοινό γνώρισμα αυτών των σχέσεων είναι ότι υποθέτουν ομοιογένεια του εδάφους θεμελίωσης του πεδίου (τουλάχιστον μέχρι το βάθος επιρροής του θεμελίου). Ομοίως και η μέθοδος που παρέχει ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000, παράρτημα Ζ) καθώς και η μέθοδος του Ευρωκώδικα 8, αναφέρεται σε θεμελίωση επί ομοιογενούς εδάφους και δεν λαμβάνει υπόψη τυχόν στρωματογραφική ανομοιογένεια του εδάφους μέχρι το βάθος επιρροής του θεμελίου.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται ο υπολογισμός του οριακού φορτίου επιφανειακών θεμελιώσεων σε ανομοιογενές έδαφος με χρήση του προγράμματος Πεπερασμένων Διαφορών FLAC-3D. Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η περίπτωση δίστρωτου εδάφους, δηλαδή εδάφους αποτελούμενου από δύο οριζόντιες στρώσεις με διαφορετικές τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για την κάθε στρώση. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα θεωρηθεί φόρτιση του πεδίου υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\varphi_u=0$  και  $c=c_u$ ).

Σε έδαφος με δύο οριζόντιες στρώσεις, ο υπολογισμός του οριακού φορτίου επιφανειακής θεμελίωσης εξαρτάται από το πάχος της ανώτερης στρώσης ( $d$ ), και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_{u,1}$  και  $c_{u,2}$  της ανώτερης και κατώτερης στρώσης αντίστοιχα.



*Επιφανειακή θεμελίωση σε έδαφος με δύο οριζόντιες στρώσεις.*

Το πάχος ( $d$ ) του ανώτερου στρώματος παίρνει τιμές από μηδέν έως κάποια συμβατικώς μέγιστη τιμή που ισούται με το πάχος επιρροής του πεδίου. Όταν  $d=0$ , το πρόβλημα εκφυλίζεται σε πρόβλημα ομοιογενούς εδάφους με  $c_u=c_{u,2}$  ενώ

όταν το  $d$  είναι πολύ μεγάλο, τότε η επίλυση ισοδυναμεί με ομοιογενές έδαφος που έχει αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u=c_{u,1}$ . Προφανώς, έχει νόημα να εξετασθούν τιμές του ( $d$ ) μέχρι το βάθος επιρροής του θεμελίου. Στην παρούσα εργασία, θα θεωρηθεί ως μέγιστη τιμή του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης στρώσης, το πλάτος ( $B$ ) του θεμελίου. Η τιμή αυτή προσεγγίζει επαρκώς το βάθος επιρροής της θεμελίωσης, όπως προέκυψε από παραμετρικές αναλύσεις με μεγαλύτερα πάχη ( $d$ ). Συγκεκριμένα, διερεύνηση της επιρροής του πάχους της ανώτερης στρώσης έδειξε ότι όταν  $d > B$ , η επιρροή του βάθους  $d$  είναι πρακτικώς αμελητέα στην υπολογιζόμενη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου.

Σχετικά με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή των δύο εδαφικών στρώσεων, εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις κατά τις οποίες το κατώτερο εδαφικό στρώμα έχει σταθερή αντοχή  $c_{u,2} = 100$  kPa, ενώ το ανώτερο στρώμα έχει είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη αντοχή, με τις εξής τιμές :

$$c_{u1} = 50 \text{ kPa}, 100 \text{ kPa}, 150 \text{ kPa} \text{ και } 200 \text{ kPa}$$

δηλαδή εξετάζονται οι εξής περιπτώσεις του αδιάστατου λόγου αντοχών  $c_{u1} / c_{u2}$  :

$$c_{u1} / c_{u2} = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$$

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων ανομοιογενούς εδάφους. Κάθε φορά γίνεται σύγκριση της φέρουσας ικανότητας του λωριδωτού με το ορθογωνικό και τετράγωνο θεμέλιο. Τέλος, παρουσιάζεται η διακύμανση του οριακού φορτίου του θεμελίου σε σχέση με την αντοχή των εδαφικών στρώσεων.

### 3.2 Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 0.5$

Αυτή η σειρά των αναλύσεων για δίστρωτο έδαφος με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>3D</sup> περιλαμβάνει ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\varphi_u=0$  και  $c=c_u$ ) όπου το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστο-πλαστικά (αστοχία κατά το μοντέλο Mohr-Coulomb) και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες :

- μέτρο ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης  $K_{\text{κάτω}} = 30000$  kPa και  $K_{\text{άνω}} = 15000$  kPa
- μέτρο διάτμησης  $G_{\text{κάτω}} = 18000$  kPa και  $G_{\text{άνω}} = 9000$  kPa
- γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους  $\varphi_u = 0$  (αστράγγιστες συνθήκες)
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους  $c_{u,\text{κάτω}} = 100$  kPa και  $c_{u,\text{άνω}} = 50$  kPa
- γωνία πλαστικής διόγκωσης (ή γωνία διαστολικότητας)  $\delta = 0$

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνο, ορθογωνικό και λωριδωτό θεμέλιο με τις εξής διαστάσεις :

- 4,00m\*4,00m (τετράγωνο θεμέλιο πλάτους  $B=4,00$ m και μήκους  $L=B$ )
- 4,00m\*12,00m (ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=4,00$ m και μήκους  $L=3B$ )
- 4,00m\*20,00m (λωριδωτό θεμέλιο πλάτους  $B=4,00$ m και μήκους  $L=5B$ )

Κατά την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> θεωρήθηκε ότι όλα τα παραπάνω θεμέλια είναι απολύτως άκαμπτα.

Ο υπολογισμός του οριακού φορτίου έγινε για κατακόρυφη (ορθή) φόρτιση και για εκκεντρότητες  $e=0$  (κεντρική φόρτιση),  $e=B/6$  και  $e=B/3$ . Η εκκεντρότητα λαμβάνεται υπόψη μόνο κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$  του θεμελίου, ενώ κατά την διεύθυνση του μήκους  $L$  δεν υπάρχει εκκεντρότητα. Για την μελέτη της επίδρασης του πάχους  $d$  του πάνω στρώματος του εδάφους στο οριακό φορτίο, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $d=0$ ,  $d=B/4=1,00m$ ,  $d=B/2=2,00m$ ,  $d=3B/4=3,00m$  και  $d=B=4,00m$ . Το κατώτερο στρώμα του εδάφους θεωρήθηκε ότι επεκτείνεται μέχρι το κάτω σύνορο του εδαφικού προσομοιώματος (σε μεγάλο βάθος).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνοψίζονται στους ακόλουθους Πίνακες :

1. Τετράγωνο πέδιλο ( $L / B = 1$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5.79	3.53	1.64
1 / 4	4.33	2.66	1.17
1 / 2	2.97	1.81	0.82
3 / 4	2.90	1.78	0.82
$\geq 1$	2.90	1.77	0.81

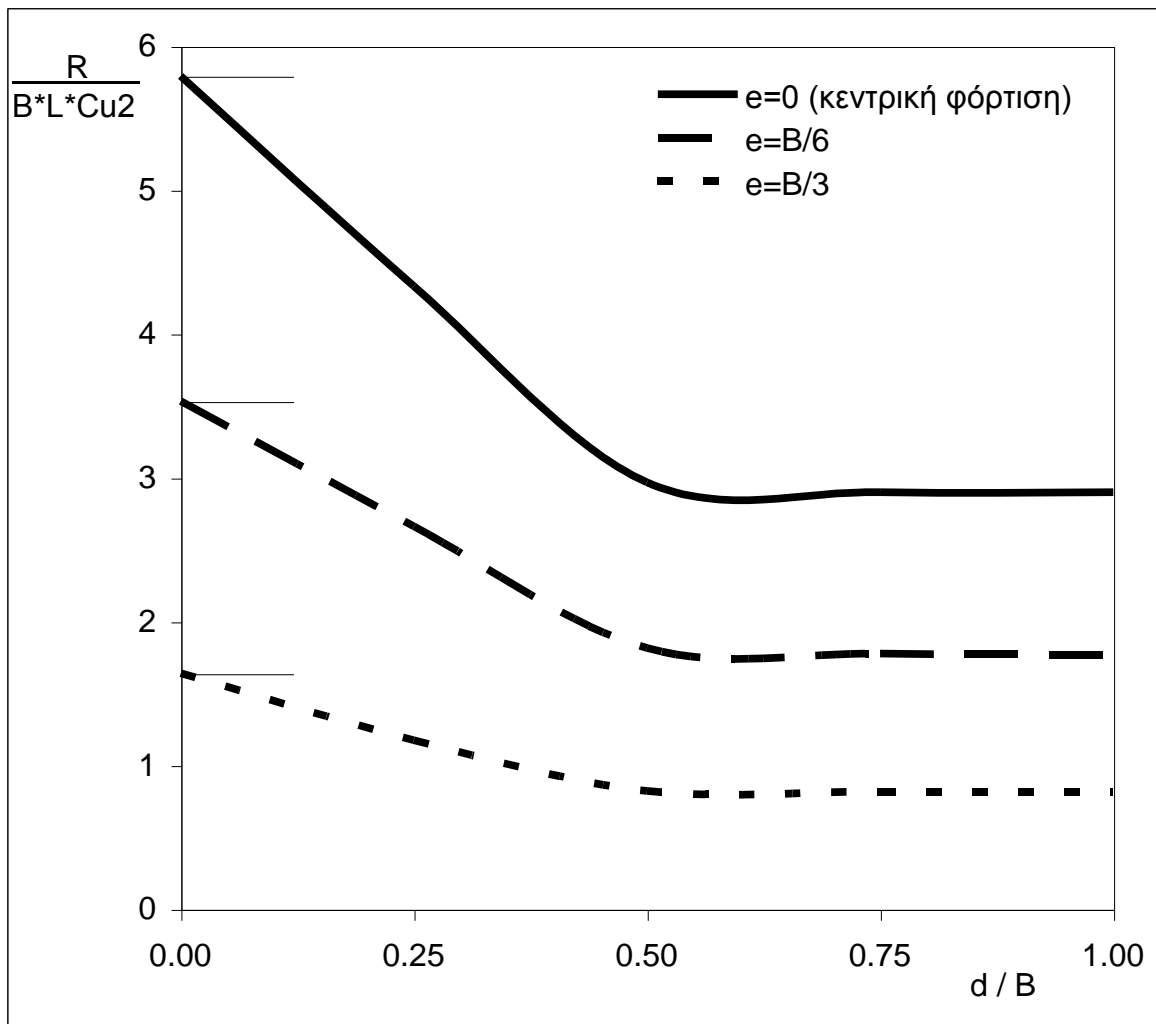
2. Ορθογωνικό πέδιλο ( $L / B = 3$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5.61	3.39	1.53
1 / 4	4.50	2.81	1.18
1 / 2	3,05	1.93	0.80
3 / 4	2.90	1.76	0.79
$\geq 1$	2.81	1.72	0.78

3. Λωριδωτό πέδιλο ( $L / B = 5$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

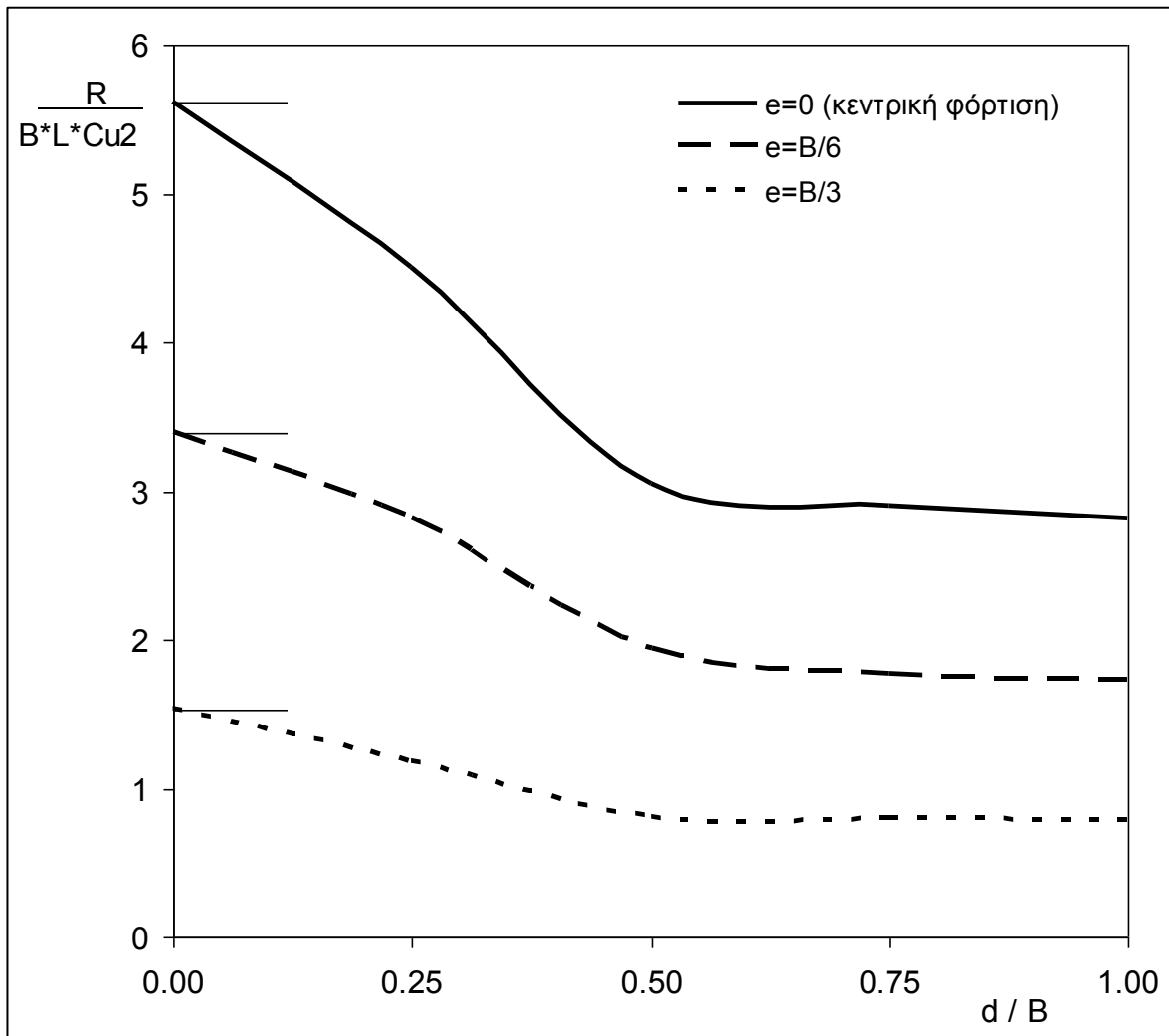
	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5.49	3.26	1.56
1 / 4	4.47	2.76	1.14
1 / 2	3,07	1.95	0.78
3 / 4	2.82	1.74	0.77
$\geq 1$	2.76	1.66	0.77

Τα ανωτέρω αποτελέσματα συνοψίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα :

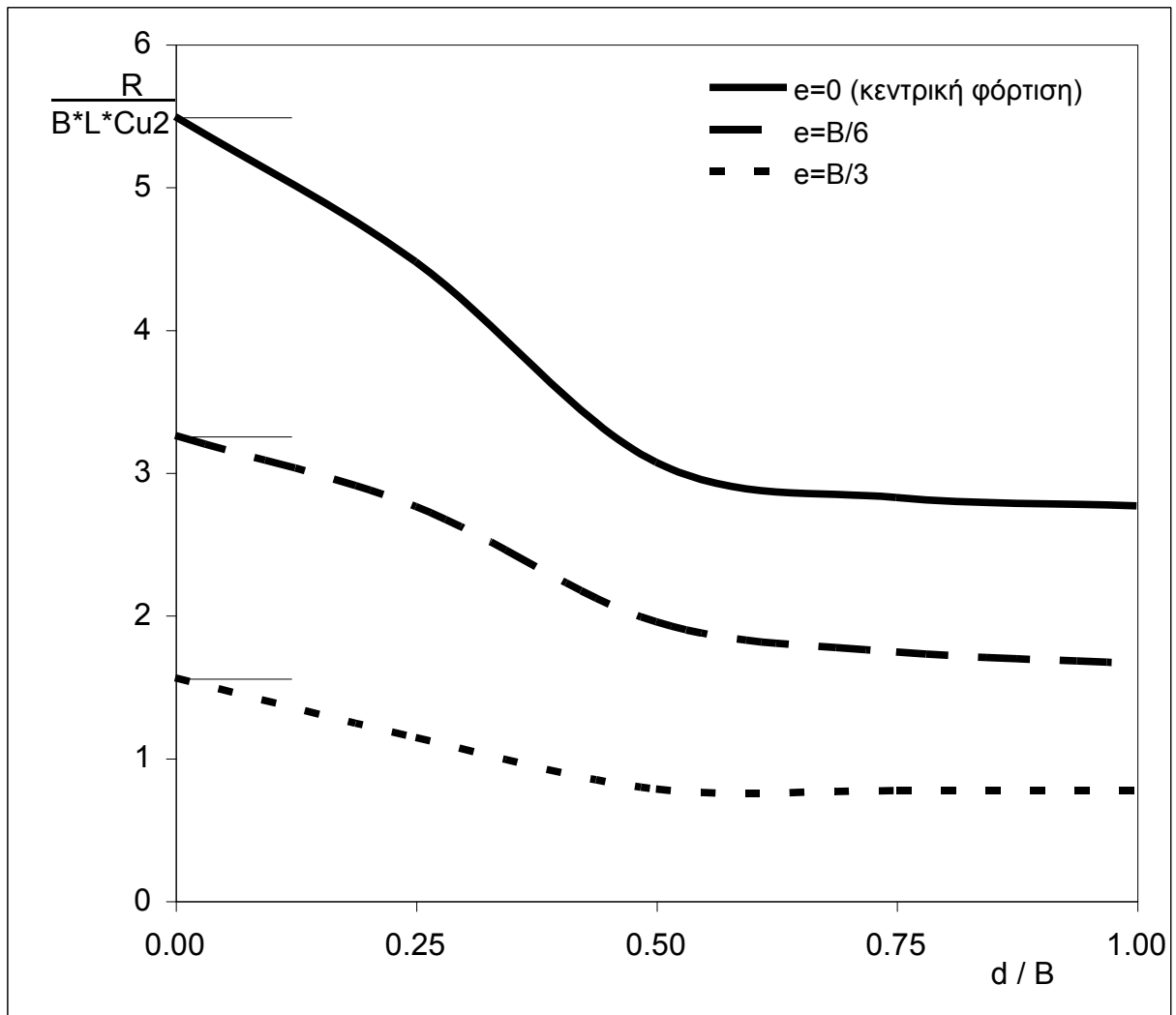


Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 0.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για τετραγωνικό πέδιλο και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η

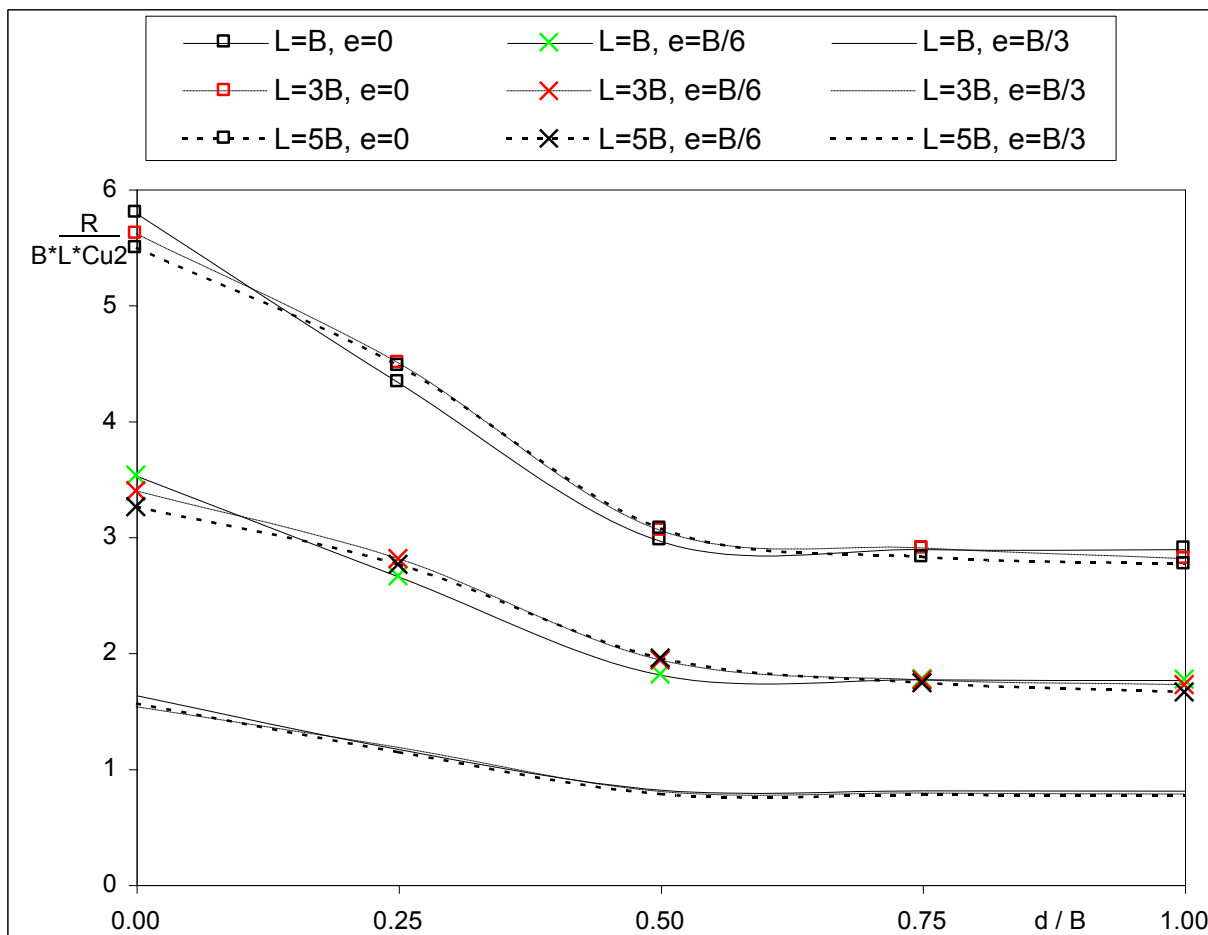
περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.5 B$ .



Οριακό φορτίο  $\frac{R}{L B c_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 0.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για ορθογωνικό πέδιλο ( $L / B = 3$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.5 B$ .



Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 0.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για λωριδωτό πέδιλο ( $L / B = 5$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.5 B$ .



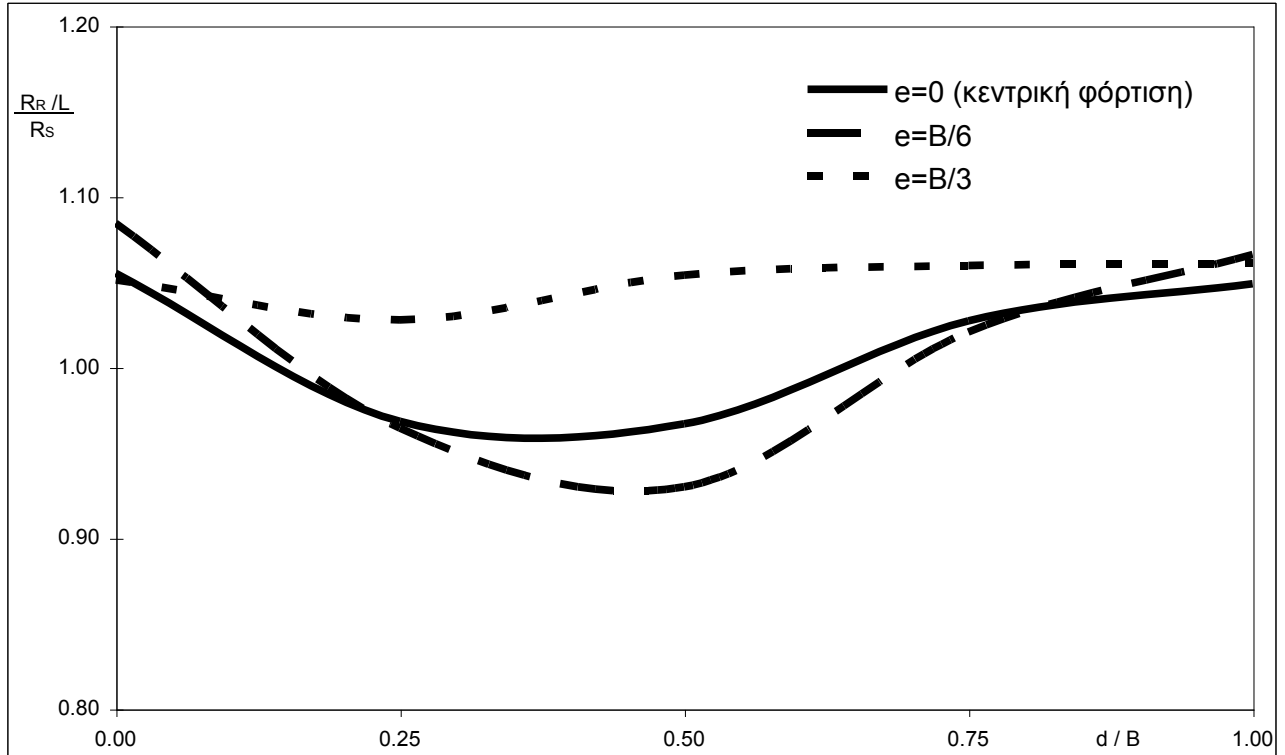
Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσει του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 0.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για διάφορα σχήματα πεδίου ( $L / B = 1, 3, 5$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.5 B$ . Επίσης φαίνεται ότι η επιρροή του σχήματος του πεδίου ( $L/B$ ) είναι πολύ μικρή σε σχέση με την επιρροή του πάχους  $d/B$ .

Από τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτει μια πρακτικώς γραμμική μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του πεδίου ως προς τον λόγο  $d/B$ , μεταξύ της τιμής

$\frac{R}{LBc_{u2}}$  που αντιστοιχεί στην περίπτωση  $d=0$  και της τιμής  $\frac{R}{LBc_{u1}}$  που αντιστοιχεί στην περίπτωση  $d > B/2$ .

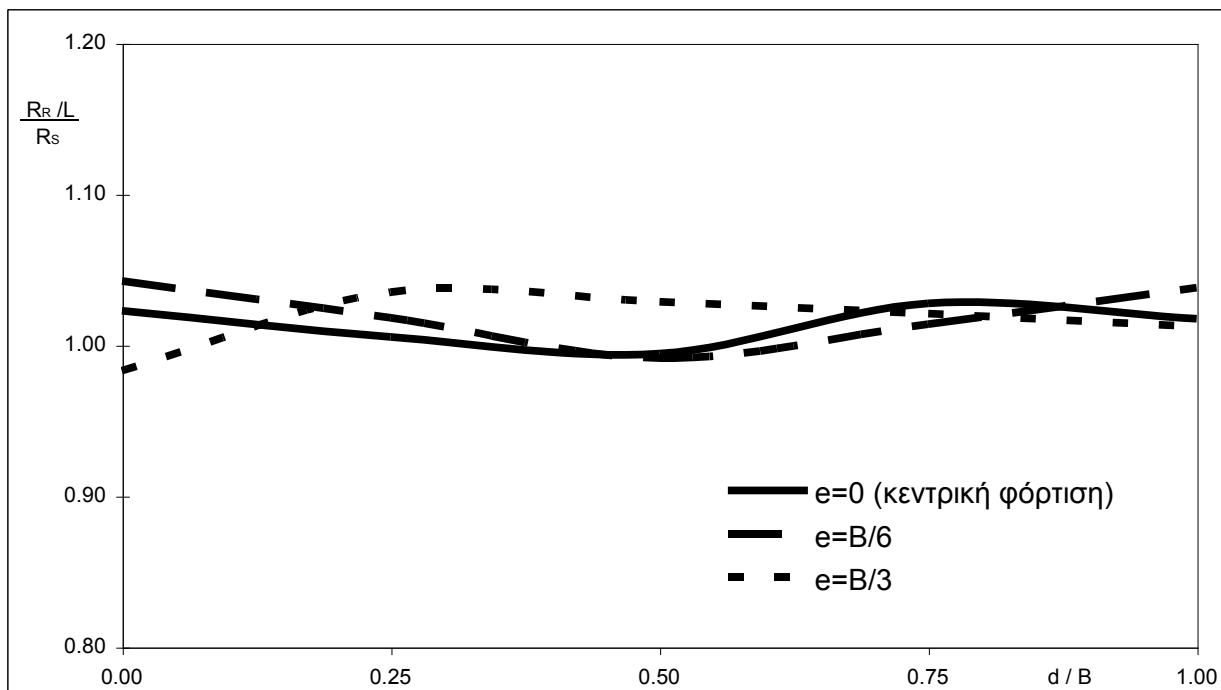
Η πολύ μικρή επιρροή του σχήματος του πεδίου φαίνεται και από τα ακόλουθα σχήματα που συγκρίνουν το οριακό φορτίο ανά μέτρο μήκους του τετράγωνου (ή του ορθογωνικού) θεμελίου με αυτό του λωριδωτού. Ο λόγος  $(R_R/L)/R_S$  παρουσιάζεται γραφικά συναρτήσει του  $d/B$  ( $d$ =πάχος άνω εδαφικής στρώσης,  $B=4,00m$ =πλάτος θεμελίου). Ο αδιάστατος λόγος  $(R_R/L)/R_S$  παίρνει τιμές πλησίον της μονάδας και η αντίστοιχη καμπύλη  $(R_R/L)/R_S - d/B$  κυμαίνεται κοντά στην

οριζόντια γραμμή με τεταγμένη 1,00. Η προσέγγιση στην μονάδα είναι καλύτερη για την περίπτωση του ορθογωνικού θεμελίου (απόκλιση έως 4%), ενώ για το τετράγωνο έχουμε μεγαλύτερες αποκλίσεις έως και 8%. Οι παρατηρήσεις αυτές συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> για ομοιογενές έδαφος, όπου η απόκλιση για μεν το ορθογωνικό θεμέλιο ήταν γύρω στο 3%, για δε το τετράγωνο η απόκλιση ήταν 9% περίπου.



Σύγκριση της οριακής φέρουσας ικανότητας τετραγωνικού πεδίου ( $R_R$ ) – ανά μονάδα μήκους - και λωριδωτού πεδίου ( $R_S$ ). Οι αποκλίσεις δεν υπερβαίνουν το 8%.





Σύγκριση της οριακής φέρουσας ικανότητας ορθογωνικού πεδίου ( $R_R$ ) με λόγο διαστάσεων  $L/B=3$  – ανά μονάδα μήκους  $L$  - και λωριδωτού πεδίου ( $R_S$ ). Οι αποκλίσεις δεν υπερβαίνουν το 3%.

### 3.3 Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 1$

Η περίπτωση αυτή δεν εξετάζεται αφού αφορά σε ομοιογενή σχηματισμό. Ισχύουν τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (ομοιογενείς σχηματισμοί).

### 3.4 Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 1.5$

Αυτή η σειρά των αναλύσεων για δίστρωτο έδαφος με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών  $FLAC^{3D}$  περιλαμβάνει ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\varphi_u=0$  και  $c=c_u$ ) όπου το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστο-πλαστικά (αστοχία κατά το μοντέλο Mohr-Coulomb) και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες :

- μέτρο ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης  $K_{κάτω} = 30000$  kPa και  $K_{άνω} = 45000$  kPa
- μέτρο διάτμησης  $G_{κάτω} = 18000$  kPa και  $G_{άνω} = 27000$  kPa
- γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους  $\varphi_u = 0$  (αστράγγιστες συνθήκες)
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους  $c_{u,κάτω} = 100$  kPa και  $c_{u,άνω} = 150$  kPa
- γωνία πλαστικής διόγκωσης (ή γωνία διαστολικότητας)  $\delta = 0$

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνο, ορθογωνικό και λωριδωτό θεμέλιο με τις εξής διαστάσεις :

- 4,00m\*4,00m (τετράγωνο θεμέλιο πλάτους B=4,00m και μήκους L=B)
- 4,00m\*12,00m (ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους B=4,00m και μήκους L=3B)
- 4,00m\*20,00m (λωριδωτό θεμέλιο πλάτους B=4,00m και μήκους L=5B)

Όλα τα παραπάνω θεμέλια θεωρήθηκε κατά την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> ότι είναι άκαμπτα.

Ο υπολογισμός του οριακού φορτίου έγινε για κατακόρυφη (ορθή) φόρτιση και για εκκεντρότητες  $e=0$  (κεντρική φόρτιση),  $e=B/6$  και  $e=B/3$ . Η εκκεντρότητα λαμβάνεται υπόψη μόνο κατά την διεύθυνση του πλάτους B του θεμελίου, ενώ κατά την διεύθυνση του μήκους L δεν υπάρχει εκκεντρότητα. Για την μελέτη της επίδρασης του πάχους d του πάνω στρώματος του εδάφους στο οριακό φορτίο, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $d=0$ ,  $d=B/4=1,00m$ ,  $d=B/2=2,00m$ ,  $d=3B/4=3,00m$  και  $d=B=4,00m$ . Το κατώτερο στρώμα του εδάφους θεωρήθηκε ότι επεκτείνεται μέχρι το κάτω σύνορο του εδαφικού προσομοιώματος (σε μεγάλο βάθος).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνοψίζονται στους ακόλουθους Πίνακες :

1. Τετράγωνο πέδιλο ( $L / B = 1$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5,79	3,53	1,64
1 / 4	6,98	4,17	2,00
1 / 2	8,02	4,77	2,33
3 / 4	8,54	5,15	2,41
$\geq 1$	8,68	5,26	2,42

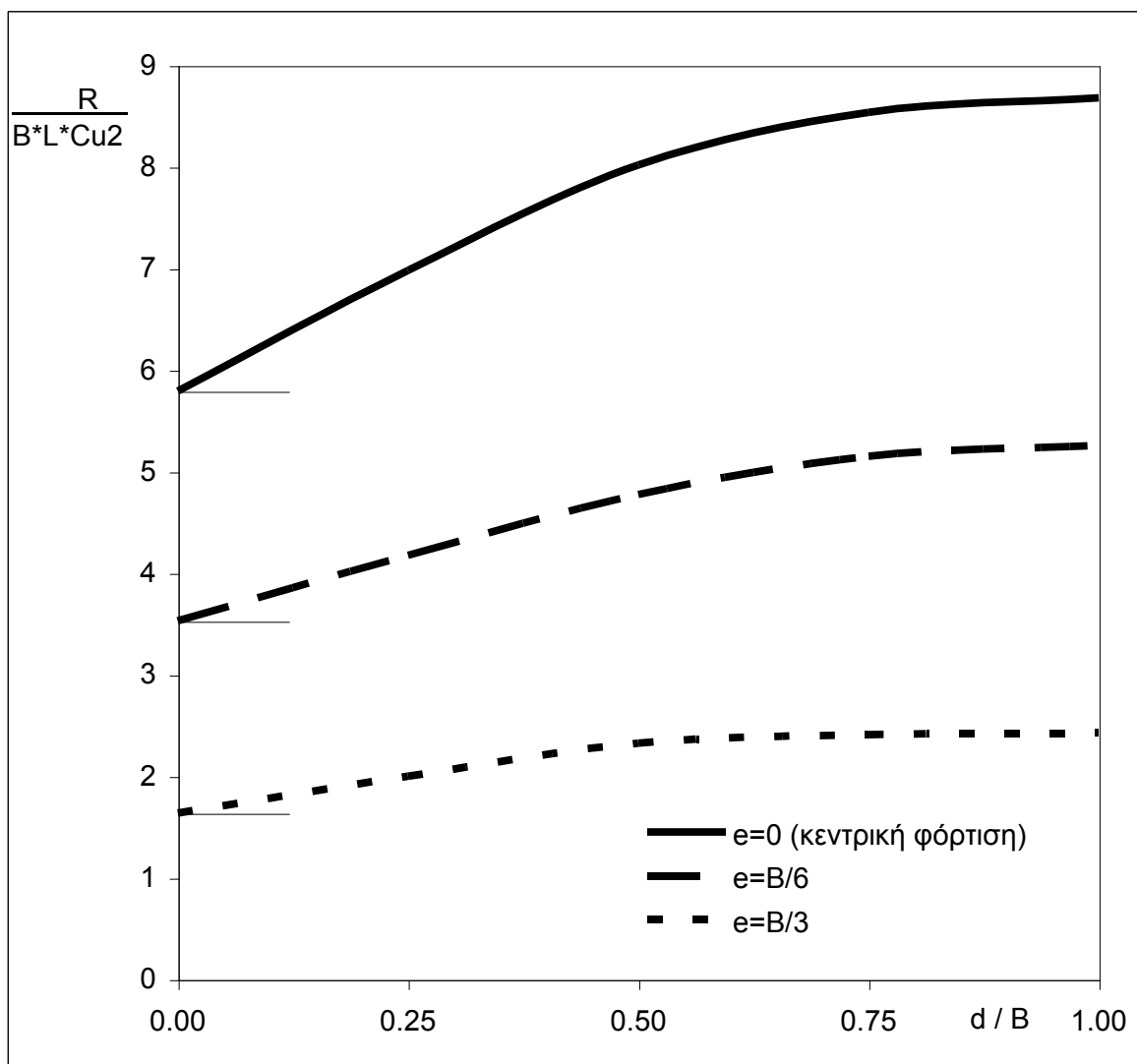
2. Ορθογωνικό πέδιλο ( $L / B = 3$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5,61	3,39	1,53
1 / 4	6,44	3,80	1,83
1 / 2	7,23	4,19	2,10
3 / 4	7,80	4,57	2,26
$\geq 1$	8,23	4,86	2,29

3. Λωριδωτό πέδιλο ( $L / B = 5$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

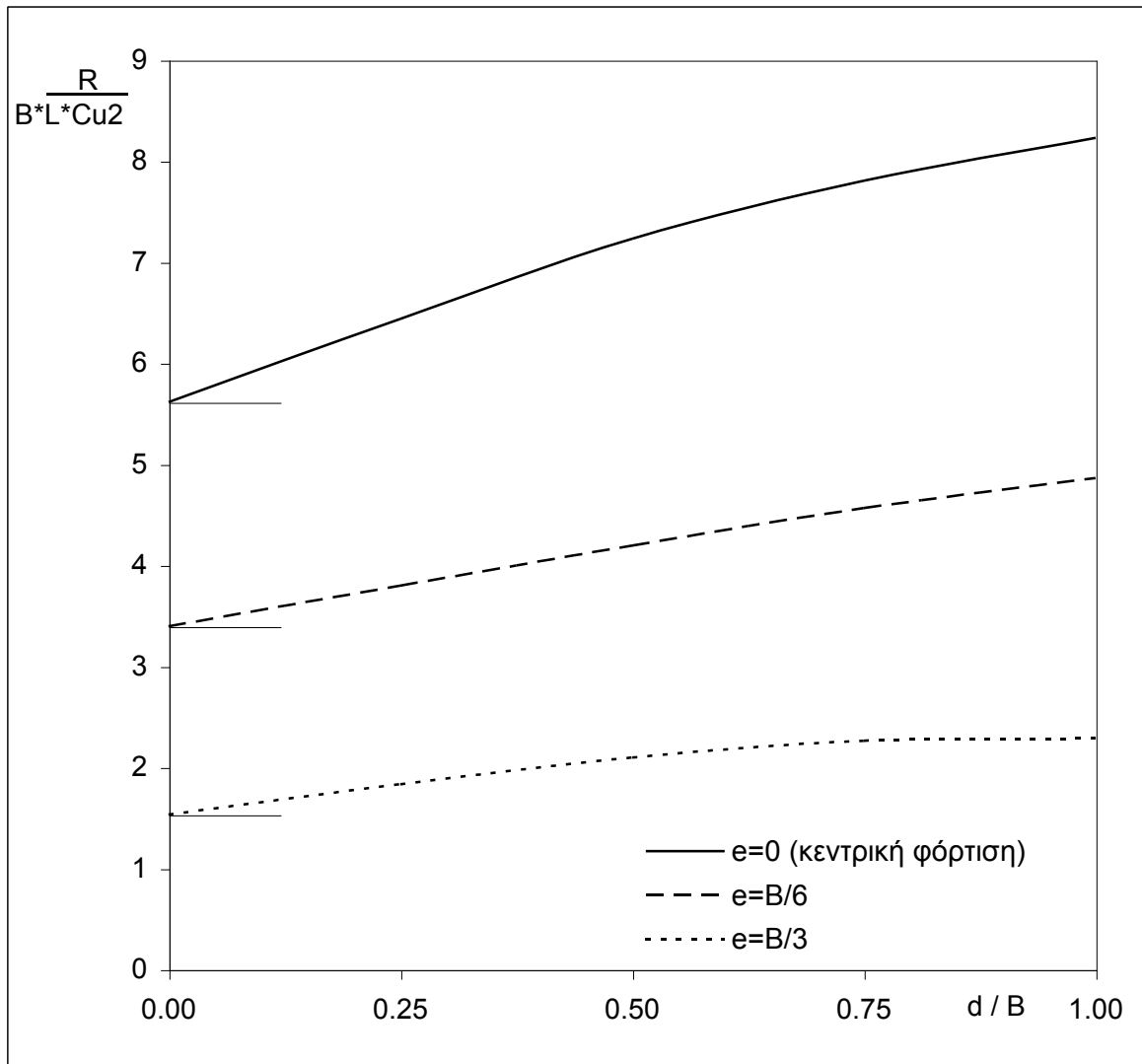
	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5,49	3,26	1,56
1 / 4	6,25	3,49	1,73
1 / 2	6,94	3,69	1,96
3 / 4	7,48	3,97	2,18
$\geq 1$	7,91	4,29	2,27

Τα ανωτέρω αποτελέσματα συνοψίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα :

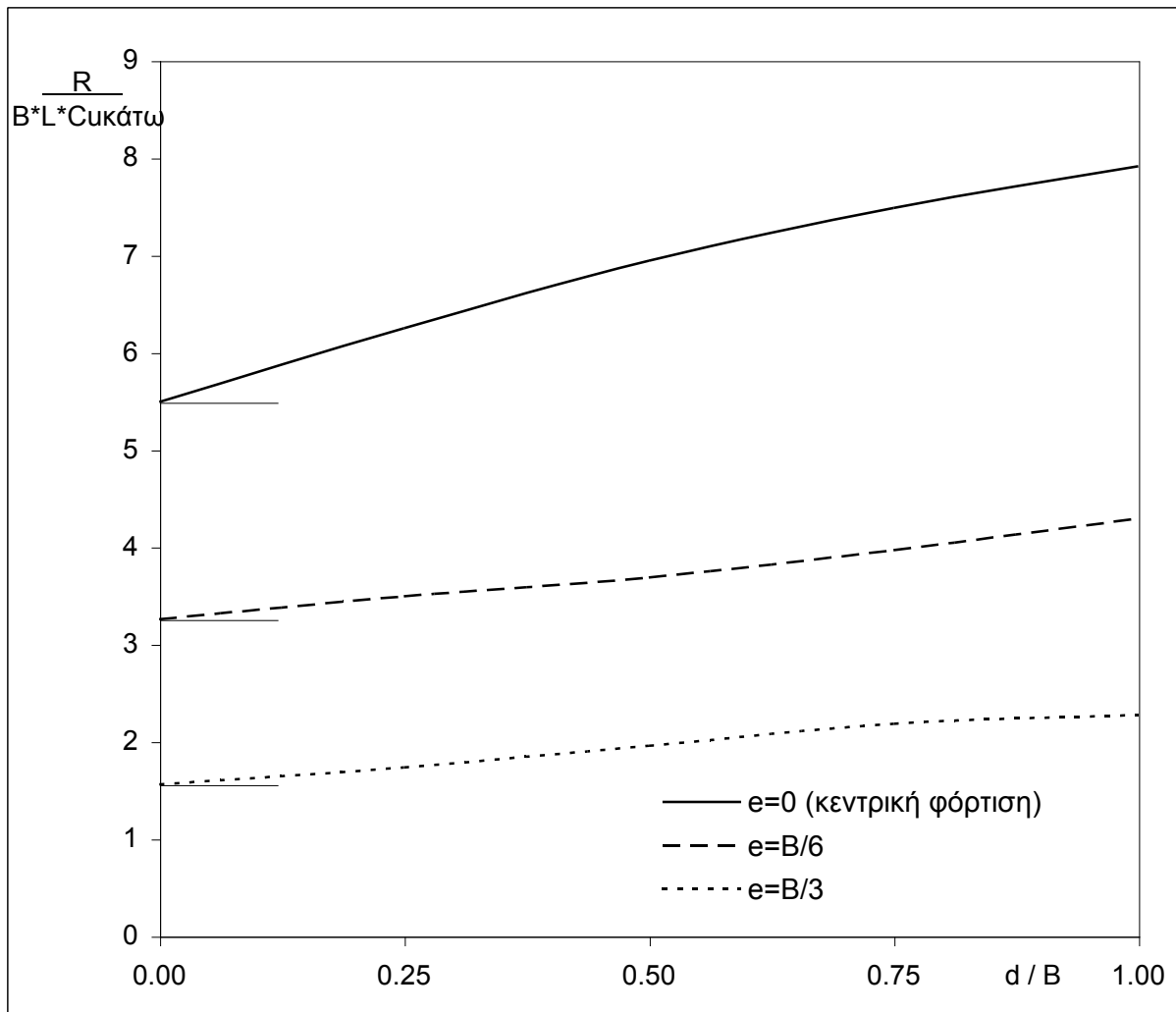


Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 1.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για τετραγωνικό πέδιλο και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η

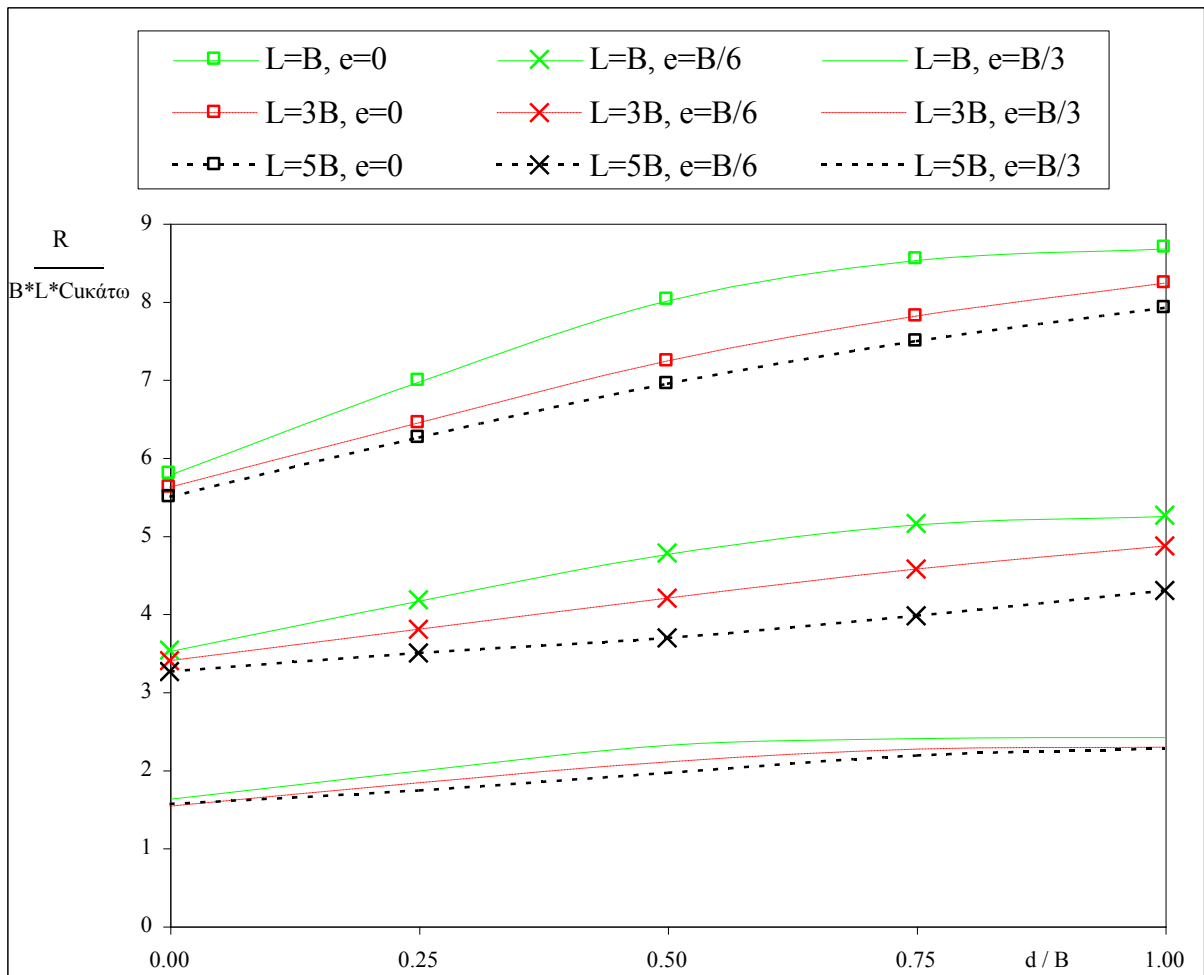
περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.6 B$ .



Οριακό φορτίο  $\frac{R}{L B c_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 1.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για ορθογωνικό πέδιλο ( $L / B = 3$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.6 B$ .



Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσει του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 1.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για λωριδωτό πέδιλο ( $L / B = 5$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.7 B$ .



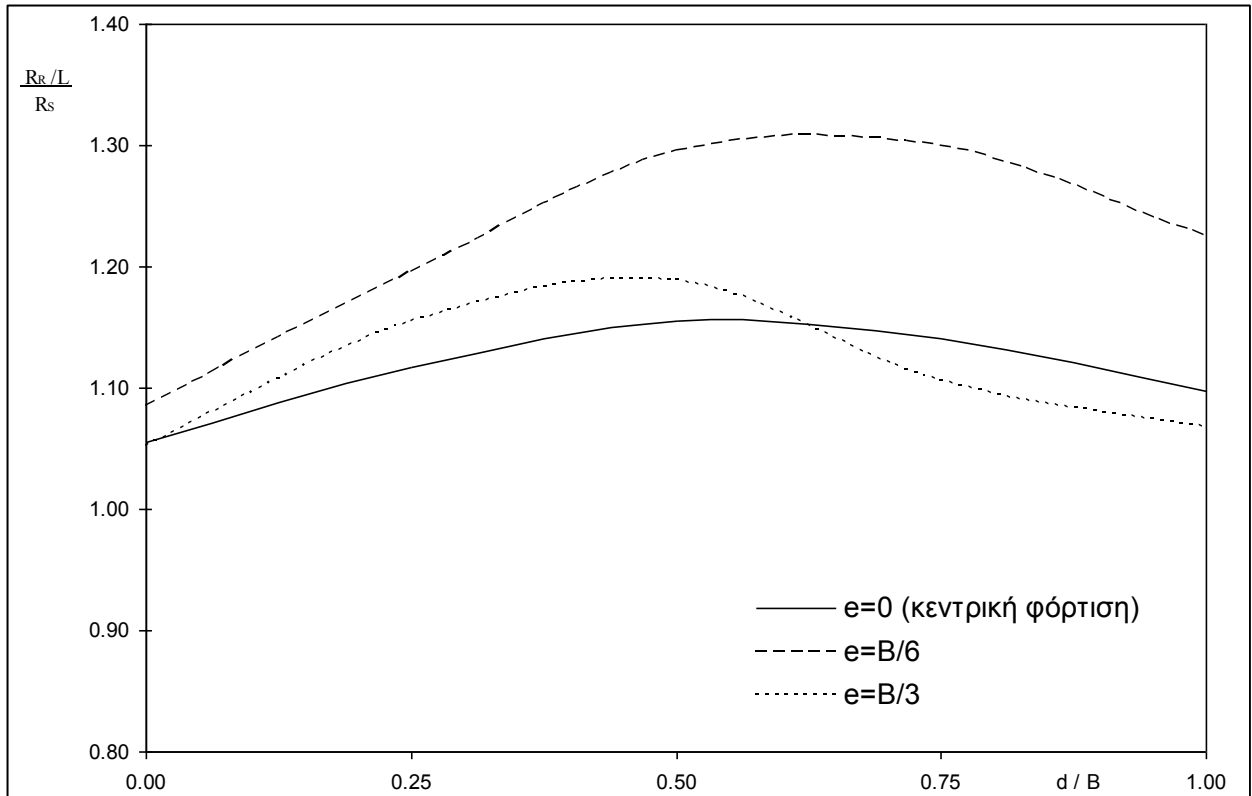
Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 1.5$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για διάφορα σχήματα πεδίου ( $L / B = 1, 3, 5$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.7 B$ . Επίσης φαίνεται ότι η επιρροή του σχήματος του πεδίου ( $L/B$ ) είναι πολύ μικρή σε σχέση με την επιρροή του πάχους  $d/B$ .

Από τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτει μια πρακτικώς γραμμική μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του πεδίου ως προς τον λόγο  $d/B$ , μεταξύ της τιμής

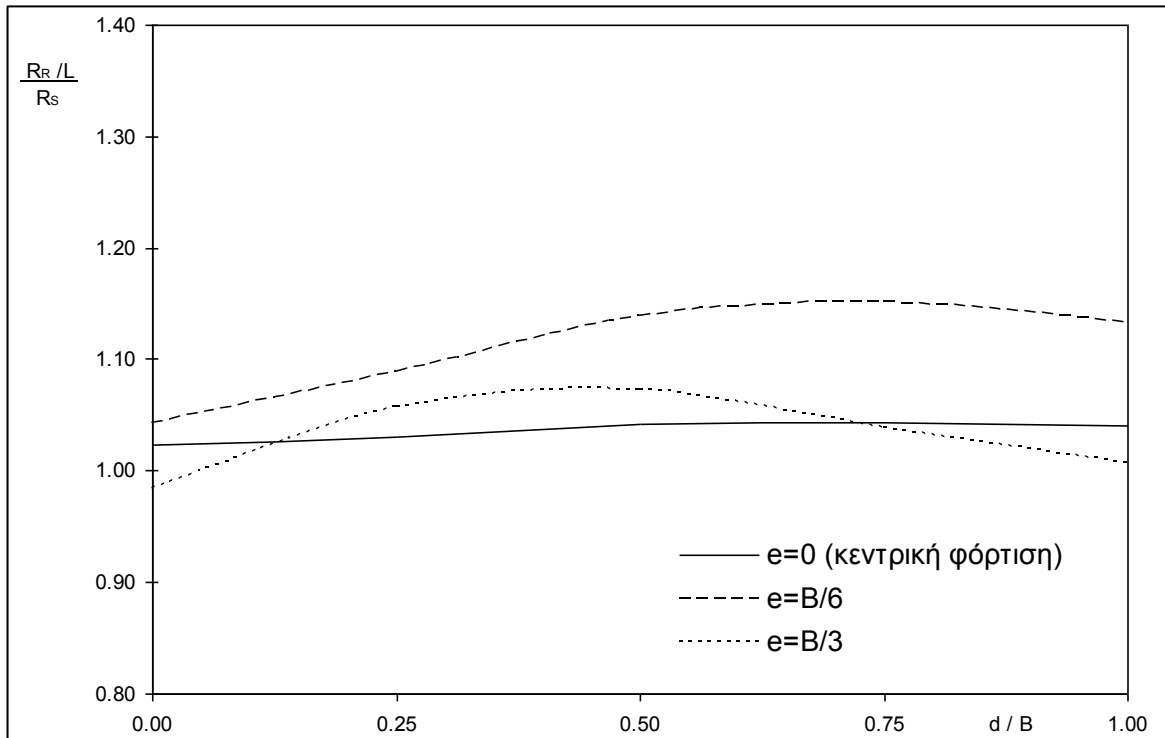
$\frac{R}{LBc_{u2}}$  που αντιστοιχεί στην περίπτωση  $d=0$  και της τιμής  $\frac{R}{LBc_{u1}}$  που αντιστοιχεί στην περίπτωση  $d > 0.7 B$ .

Η πολύ μικρή επιρροή του σχήματος του πεδίου φαίνεται και από τα ακόλουθα σχήματα που συγκρίνουν το οριακό φορτίο ανά μέτρο μήκους του τετράγωνου (ή του ορθογωνικού) θεμελίου με αυτό του λωριδωτού. Ο λόγος  $(R_R/L)/R_S$  παρουσιάζεται γραφικά συναρτήσεως του  $d/B$  ( $d$ =πάχος άνω εδαφικής στρώσης,

$B=4,00\text{m}$ =πλάτος θεμελίου). Ο αδιάστατος λόγος  $(R_R/L)/R_S$  παίρνει τιμές πλησίον της μονάδας και η αντίστοιχη καμπύλη  $(R_R/L)/R_S - d/B$  κυμαίνεται κοντά στην οριζόντια γραμμή με τεταγμένη 1,00. Η προσέγγιση στην μονάδα είναι καλύτερη για την περίπτωση του ορθογωνικού θεμελίου (απόκλιση έως 6%), ενώ για το τετράγωνο έχουμε μεγαλύτερες αποκλίσεις έως και 12%. Οι παρατηρήσεις αυτές συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> για ομοιογενές έδαφος, όπου η απόκλιση για μεν το ορθογωνικό θεμέλιο ήταν γύρω στο 3%, για δε το τετράγωνο η απόκλιση ήταν 9% περίπου.



*Σύγκριση της οριακής φέρουσας ικανότητας τετραγωνικού πεδίου ( $R_R$ ) – ανά μονάδα μήκους - και λωριδωτού πεδίου ( $R_S$ ). Οι αποκλίσεις δεν υπερβαίνουν το 12%.*



Σύγκριση της οριακής φέρουσας ικανότητας ορθογωνικού πεδίου ( $R_R$ ) με λόγο διαστάσεων  $L/B=3$  – ανά μονάδα μήκους  $L$  - και λωριδωτού πεδίου ( $R_S$ ). Οι αποκλίσεις δεν υπερβαίνουν το 6%.

### 3.5 Δίστρωτο έδαφος με $c_{u1} / c_{u2} = 2$

Αυτή η σειρά των αναλύσεων για δίστρωτο έδαφος με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών  $FLAC^{3D}$  περιλαμβάνει ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\varphi_u=0$  και  $c=c_u$ ) όπου το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστο-πλαστικά (αστοχία κατά το μοντέλο Mohr-Coulomb) και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες :

- μέτρο ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης  $K_{κάτω} = 30000$  kPa και  $K_{άνω} = 60000$  kPa
- μέτρο διάτμησης  $G_{κάτω} = 18000$  kPa και  $G_{άνω} = 36000$  kPa
- γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους  $\varphi_u = 0$  (αστράγγιστες συνθήκες)
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους  $c_{u,κάτω} = 100$  kPa και  $c_{u,άνω} = 200$  kPa
- γωνία πλαστικής διόγκωσης (ή γωνία διαστολικότητας)  $\delta = 0$

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνο, ορθογωνικό και λωριδωτό θεμέλιο με τις εξής διαστάσεις :

- 4,00m\*4,00m (τετράγωνο θεμέλιο πλάτους  $B=4,00$ m και μήκους  $L=B$ )
- 4,00m\*12,00m (ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=4,00$ m και μήκους  $L=3B$ )
- 4,00m\*20,00m (λωριδωτό θεμέλιο πλάτους  $B=4,00$ m και μήκους  $L=5B$ )



Όλα τα παραπάνω θεμέλια θεωρήθηκε κατά την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> ότι είναι άκαμπτα.

Ο υπολογισμός του οριακού φορτίου έγινε για κατακόρυφη (ορθή) φόρτιση και για εκκεντρότητες  $e=0$  (κεντρική φόρτιση),  $e=B/6$  και  $e=B/3$ . Η εκκεντρότητα λαμβάνεται υπόψη μόνο κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$  του θεμελίου, ενώ κατά την διεύθυνση του μήκους  $L$  δεν υπάρχει εκκεντρότητα. Για την μελέτη της επίδρασης του πάχους  $d$  του πάνω στρώματος του εδάφους στο οριακό φορτίο, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $d=0$ ,  $d=B/4=1,00\text{m}$ ,  $d=B/2=2,00\text{m}$ ,  $d=3B/4=3,00\text{m}$  και  $d=B=4,00\text{m}$ . Το κατώτερο στρώμα του εδάφους θεωρήθηκε ότι επεκτείνεται μέχρι το κάτω σύνορο του εδαφικού προσομοιώματος (σε μεγάλο βάθος).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνοψίζονται στους ακόλουθους Πίνακες :

1. Τετράγωνο πέδιλο ( $L / B = 1$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5,79	3,53	1,64
1 / 4	8,00	4,72	2,34
1 / 2	9,87	5,79	2,97
3 / 4	11,09	6,56	3,27
$\geq 1$	11,55	6,91	3,27

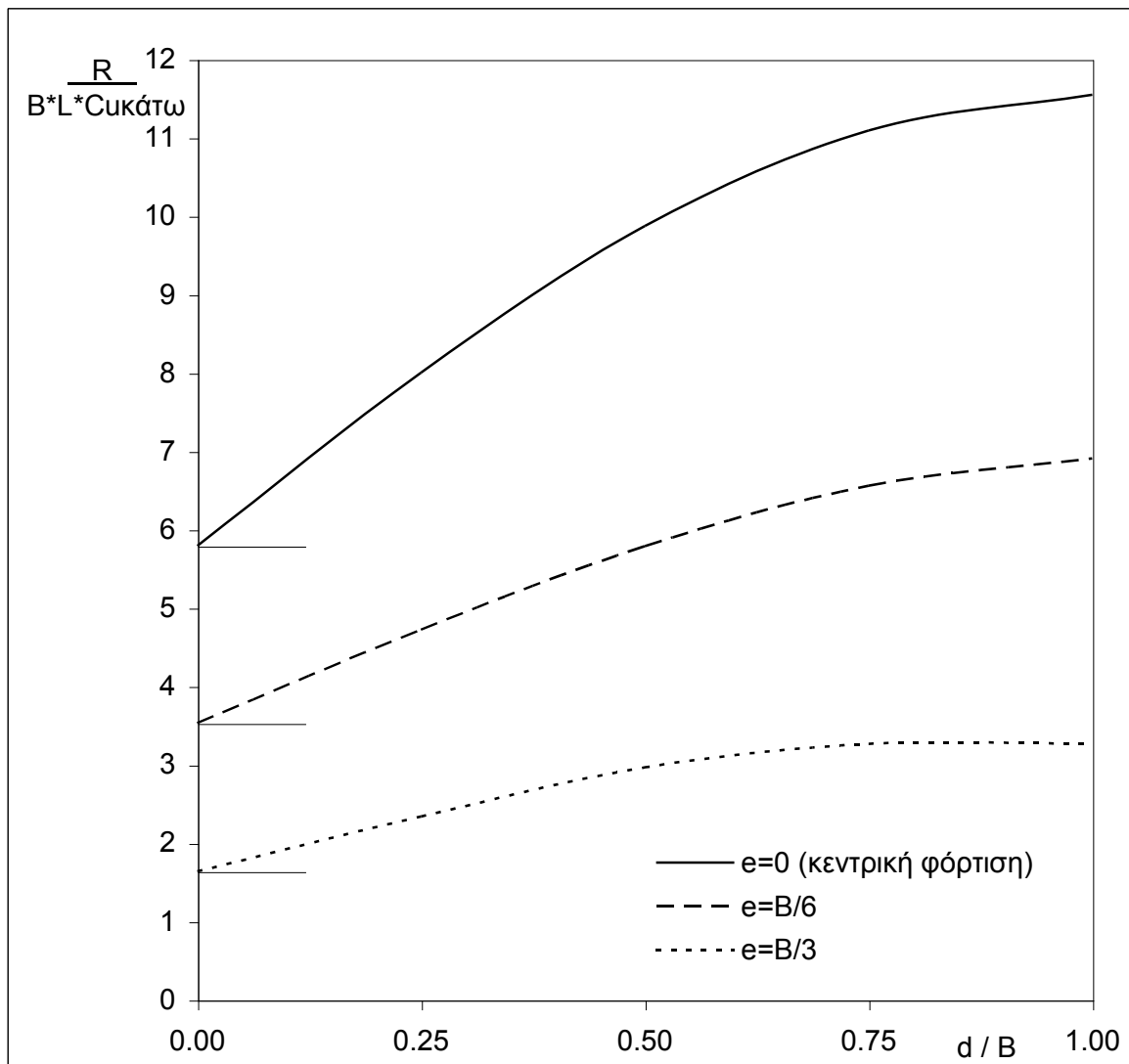
2. Ορθογωνικό πέδιλο ( $L / B = 3$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5,61	3,39	1,53
1 / 4	7,12	4,13	2,05
1 / 2	8,49	4,76	2,50
3 / 4	9,59	5,49	2,99
$\geq 1$	10,46	6,15	3,13

3. Λωριδωτό πέδιλο ( $L / B = 5$ ) : Τιμές του οριακού φορτίου :  $\frac{R}{LBc_{u2}}$

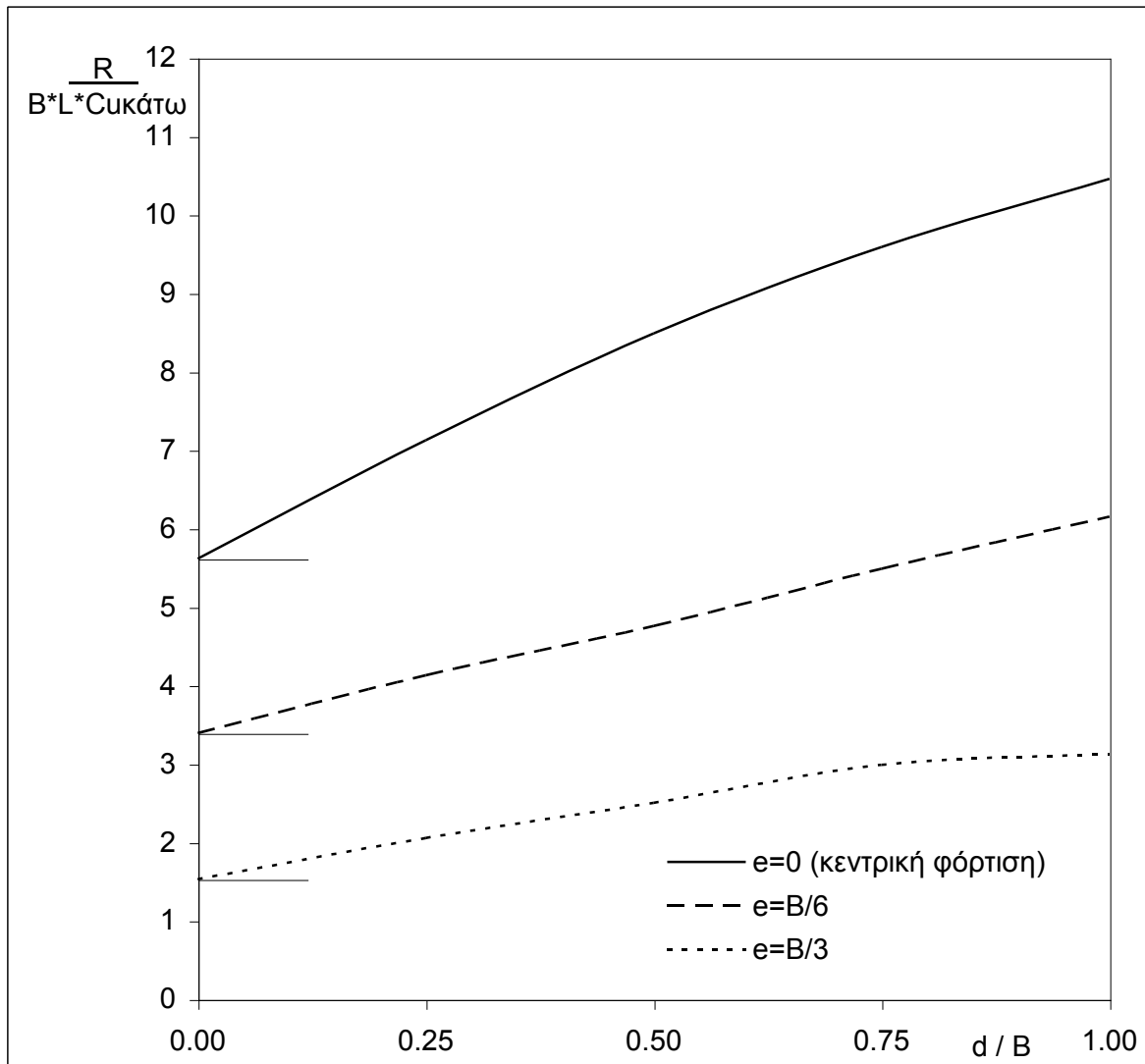
	$e / B = 0$	$e / B = 1 / 6$	$e / B = 1 / 3$
$d / B = 0$	5,49	3,26	1,56
1 / 4	6,86	3,97	1,97
1 / 2	8,03	4,43	2,39
3 / 4	8,99	5,03	2,82
$\geq 1$	9,86	5,68	3,05

Τα ανωτέρω αποτελέσματα συνοψίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα :

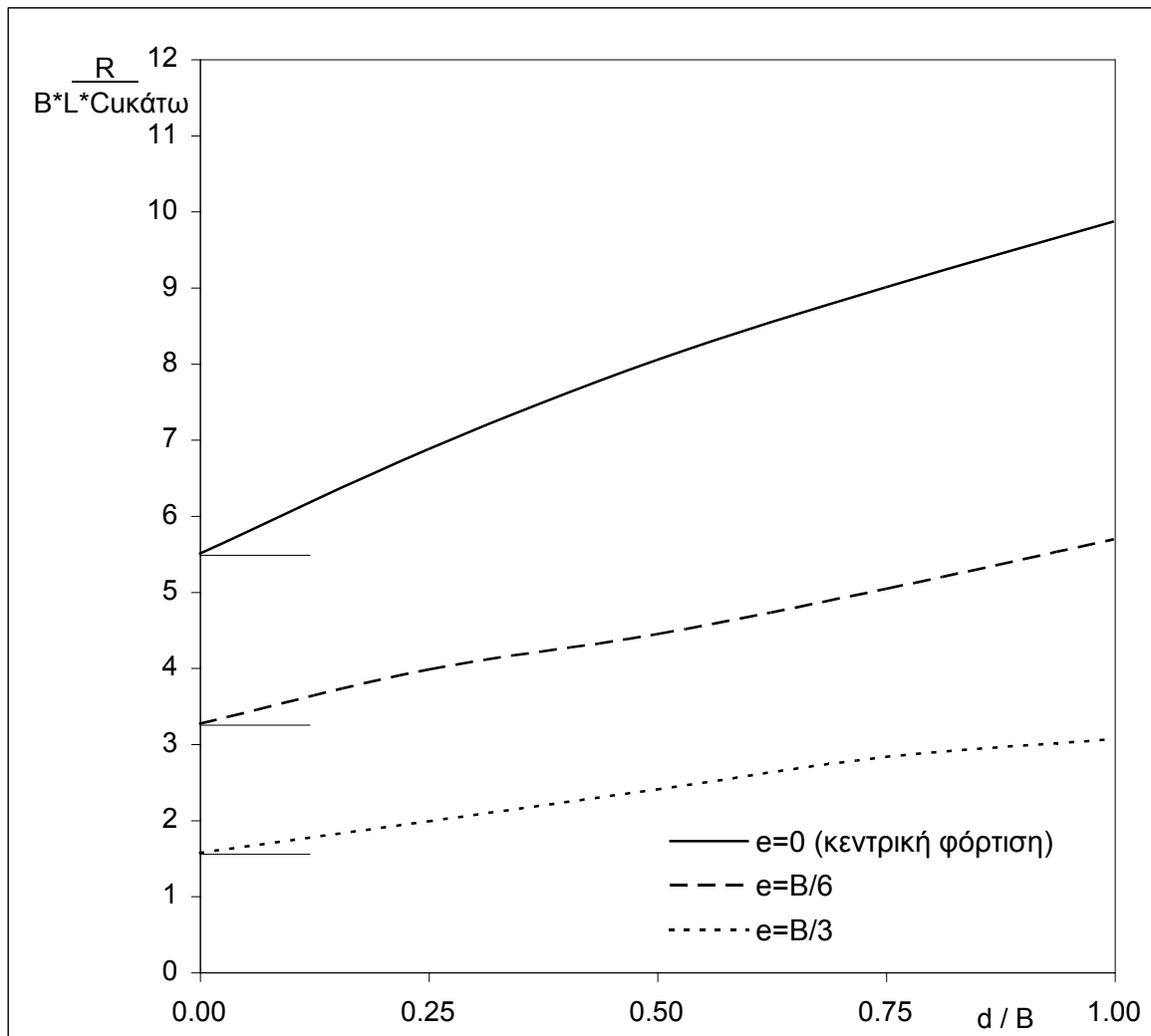


Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσεως. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 2.0$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για τετραγωνικό πέδιλο και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η

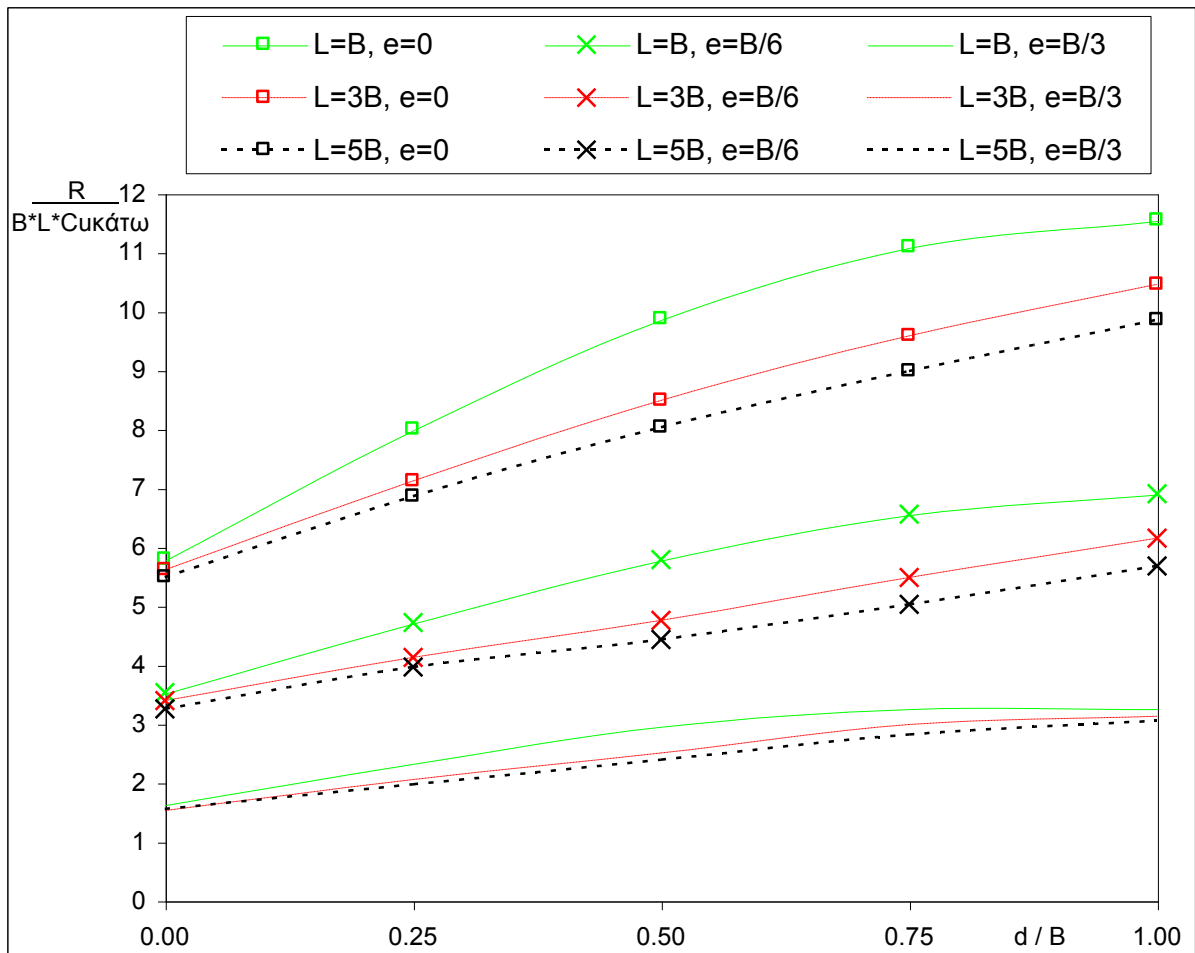
περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.9 B$ .



Οριακό φορτίο  $\frac{R}{L B c_{u2}}$  συναρτήσει του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 2.0$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για ορθογωνικό πέδιλο ( $L / B = 3$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.9 B$ .



Οριακό φορτίο  $\frac{R}{L B c_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 2.0$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για λωριδωτό πέδιλο ( $L / B = 5$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.9 B$ .



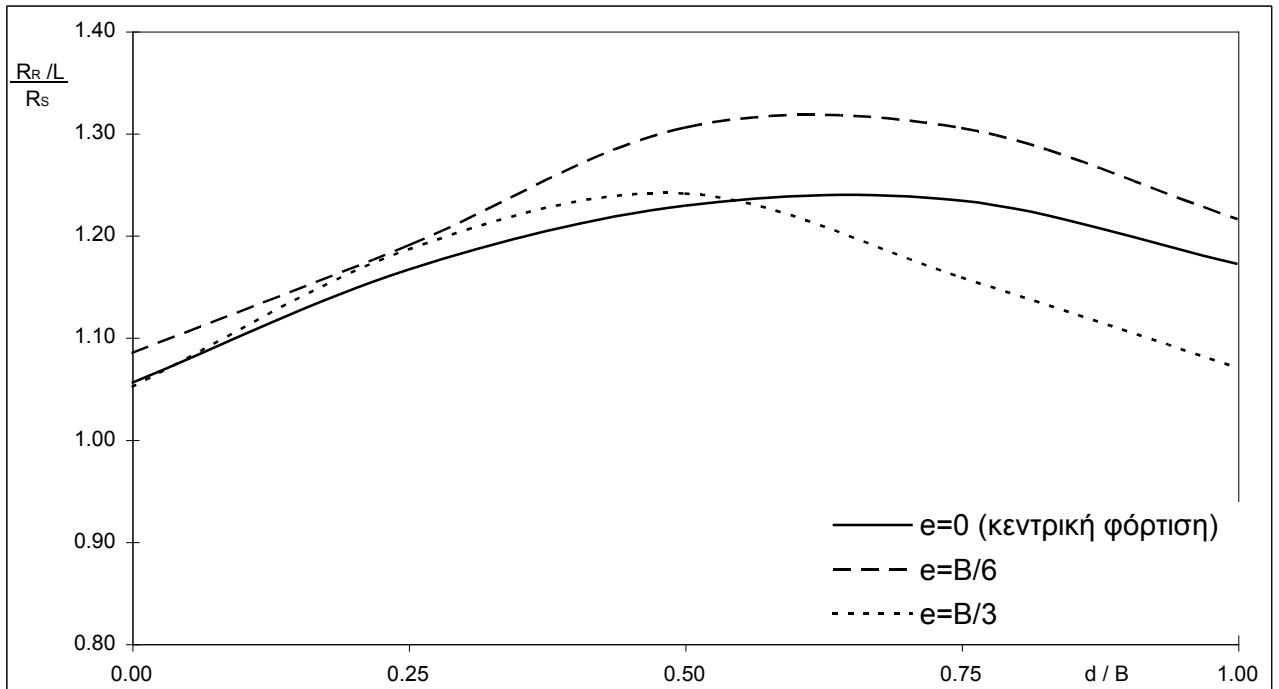
Οριακό φορτίο  $\frac{R}{LBc_{u2}}$  συναρτήσεως του πάχους ( $d$ ) της ανώτερης εδαφικής στρώσης. Περίπτωση :  $c_{u1} / c_{u2} = 2.0$ . Αποτελέσματα αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για διάφορα σχήματα πεδίου ( $L / B = 1, 3, 5$ ) και διάφορες τιμές της εκκεντρότητας της φόρτισης. Η περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους αντιστοιχεί σε  $d = 0$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιρροή του πάχους ( $d$ ) φθάνει μέχρι την τιμή  $d = 0.9 B$ . Επίσης φαίνεται ότι η επιρροή του σχήματος του πεδίου ( $L/B$ ) είναι πολύ μικρή σε σχέση με την επιρροή του πάχους  $d/B$ .

Από τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτει μια πρακτικώς γραμμική μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του πεδίου ως προς τον λόγο  $d/B$ , μεταξύ της τιμής

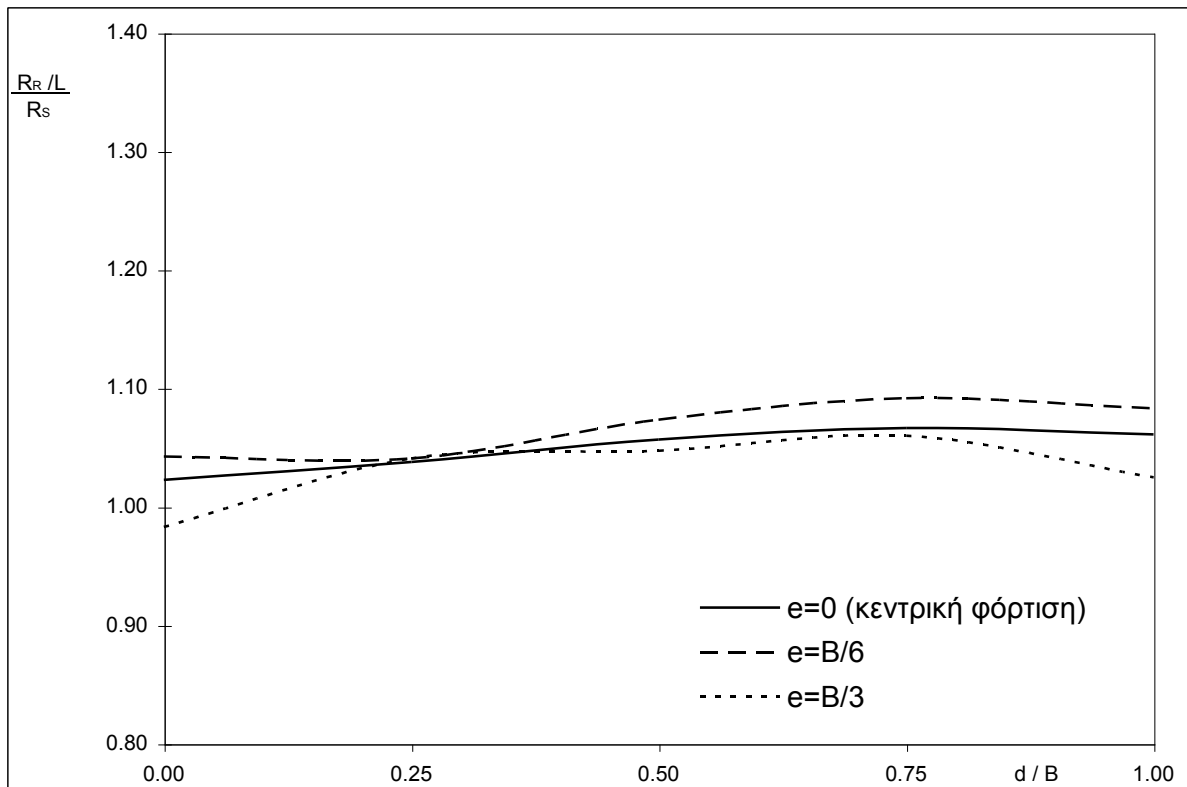
$\frac{R}{LBc_{u2}}$  που αντιστοιχεί στην περίπτωση  $d=0$  και της τιμής  $\frac{R}{LBc_{u1}}$  που αντιστοιχεί στην περίπτωση  $d > 0.9 B$ .

Η πολύ μικρή επιρροή του σχήματος του πεδίου φαίνεται και από τα ακόλουθα σχήματα που συγκρίνουν το οριακό φορτίο ανά μέτρο μήκους του τετράγωνου (ή του ορθογωνικού) θεμελίου με αυτό του λωριδωτού. Ο λόγος  $(R_R/L)/R_S$  παρουσιάζεται γραφικά συναρτήσεως του  $d/B$  ( $d$ =πάχος άνω εδαφικής στρώσης,  $B=4,00m$ =πλάτος θεμελίου). Ο αδιάστατος λόγος  $(R_R/L)/R_S$  παίρνει τιμές πλησίον

της μονάδας και η αντίστοιχη καμπύλη  $(R_R/L)/R_S - d/B$  κυμαίνεται κοντά στην οριζόντια γραμμή με τεταγμένη 1,00. Η προσέγγιση στην μονάδα είναι καλύτερη για την περίπτωση του ορθογωνικού θεμελίου (απόκλιση έως 6%), ενώ για το τετράγωνο έχουμε μεγαλύτερες αποκλίσεις έως και 16%. Οι παρατηρήσεις αυτές συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> για ομοιογενές έδαφος, όπου η απόκλιση για μεν το ορθογωνικό θεμέλιο ήταν γύρω στο 3%, για δε το τετράγωνο η απόκλιση ήταν 9% περίπου.



*Σύγκριση της οριακής φέρουσας ικανότητας τετραγωνικού πεδίου ( $R_R$ ) – ανά μονάδα μήκους - και λωριδωτού πεδίου ( $R_S$ ). Οι αποκλίσεις δεν υπερβαίνουν το 16%.*



Σύγκριση της οριακής φέρουσας ικανότητας ορθογωνικού πεδίου ( $R_R$ ) με λόγο διαστάσεων  $L/B=3$  – ανά μονάδα μήκους  $L$  - και λωριδωτού πεδίου ( $R_S$ ). Οι αποκλίσεις δεν υπερβαίνουν το 6%.

#### Συμπεράσματα για τη φέρουσα ικανότητα πεδίων σε δίστρωτο έδαφος :

Από τις ανωτέρω αριθμητικές επιλύσεις μπορεί να συναχθεί η ακόλουθη προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων διαστάσεως  $B \times L$  ( $L > B$ ), υπό κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση σε δίστρωτο σχηματισμό όπου :

$d$  = πάχος της ανώτερης εδαφικής στρώσης

$c_{u1}$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της ανώτερης εδαφικής στρώσης (πάχους  $d$ )

$c_{u2}$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της κατώτερης εδαφικής στρώσης (μεγάλου πάχους)

- Υπολογίζεται η ισοδύναμη (μέση) αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $\hat{c}_u$  του σχηματισμού από τη σχέση :

$$\text{Εάν } d = 0 : \hat{c}_u = c_{u2}$$

$$\text{Εάν } 0 < d < 0.6 B : \hat{c}_u = c_{u1} \left( \frac{d}{0.6 B} \right) + c_{u2} \left( 1 - \frac{d}{0.6 B} \right)$$

$$\text{Εάν } d > 0.6 B : \hat{c}_u = c_{u1}$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι το βάθος επιρροής της θεμελίωσης (όσον αφορά στην οριακή φέρουσα ικανότητα) είναι της τάξεως του 0.6 B.

2. Η αδιάστατη τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας (R) για την περίπτωση απλής εκκεντρότητας κατά την διεύθυνση του πλάτους B, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{BL\hat{c}_u} = (\pi + 2) \left(1 - 2\frac{e}{B}\right) \left[1 + 0.2\left(\frac{B}{L}\right)\left(1 - 2\frac{e}{B}\right)\right] i_c$$

$$\text{όπου : } i_c = 0.5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\frac{R}{BL\hat{c}_u} i}{1 - 2\frac{e}{B}}}\right) \text{ και } i = Q / R$$

και (e) είναι η εκκεντρότητα της φόρτισης κατά την διεύθυνση του πλάτους (B).

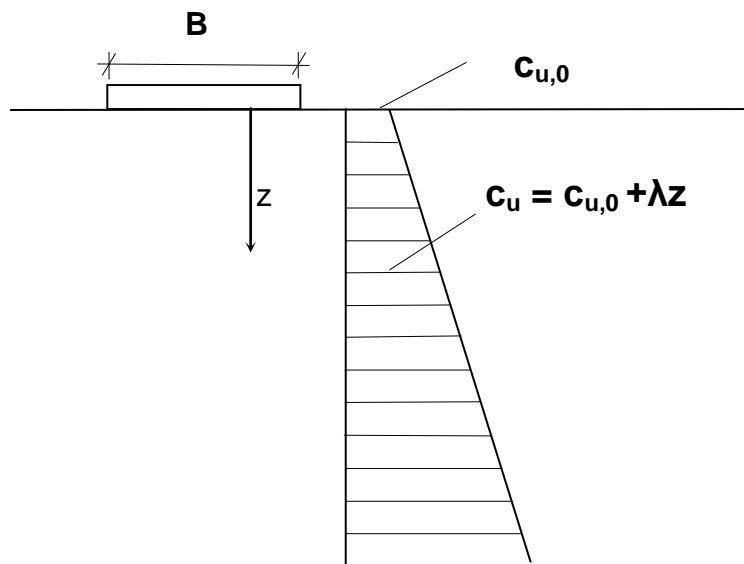
Η ανωτέρω σχέση προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων με ακρίβεια  $\pm 5\%$  για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας (e/B) έως 0.35 περίπου, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας οι αποκλίσεις φθάνουν το  $\pm 15\%$ . Με το σκεπτικό ότι ανηγμένες εκκεντρότητες άνω του 0.35 είναι μάλλον ασυνήθεις, η ανωτέρω προσεγγιστική σχέση θεωρείται πολύ ικανοποιητική. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους, η ανωτέρω σχέση μεταπίπτει στην γνωστή αναλυτική σχέση του ΕΑΚ 2000 θέτοντας  $c_u = \hat{c}_u$ .



## 4 Φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων σε έδαφος με γραμμικά αυξανόμενη αντοχή υπό ορθή (κεντρική και έκκεντρη) φόρτιση

### 4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αριθμητικών επιλύσεων με το πρόγραμμα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC-3D για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου επιφανειακών θεμελιώσεων σε ανομοιογενές έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή με το βάθος. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, θεωρείται φόρτιση του πεδίου υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\varphi_u=0$  και  $c=c_u$ ).



*Επιφανειακή θεμελίωση σε έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενο  $c_u$  με το βάθος.*

Στις αναλύσεις με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> υπεισέρχεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_{u,0}$  στην επιφάνεια του εδάφους και ο ρυθμός αύξησης του  $c_u$  ως προς το βάθος. Το μέγεθος που δίνει αυτό το ρυθμό αύξησης του  $c_u$  ως προς το βάθος συμβολίζεται με  $\lambda$ , και έχει μονάδες kPa/m και εκφράζει σε μονάδες τάσης, το πόσο αυξάνεται το  $c_u$  για κάθε μέτρο βάθους. Προφανώς, αφού η αύξηση του  $c_u$  είναι γραμμική, το  $\lambda$  είναι σταθερό καθ' όλο το βάθος. Αν επομένως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην επιφάνεια του εδάφους είναι  $c_{u,0}$ , τότε σε βάθος  $z$  από την επιφάνεια θα είναι:

$$c_u = c_{u,0} + \lambda z$$

Η περίπτωση εδαφών με γραμμικώς αυξανόμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι αρκετά συνήθης και αφορά στις κανονικά στερεοποιημένες και ελαφρώς υπερ-στερεοποιημένες αργίλους. Στους σχηματισμούς αυτούς, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης στερεοποίησης (λόγω της μείωσης της φυσικής υγρασίας με τη συμπίεση). Σε κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, η γραμμική αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $\Delta c_u$ ) με την κατακόρυφη τάση στερεοποίησης ( $\Delta \sigma'_v$ ) μπορεί να γραφεί ως:

$$\Delta c_u = \xi \Delta \sigma'_v$$

Όπου ο συντελεστής "ξ" έχει τιμές :  $\xi = 0.20 - 0.40$ . Θεωρώντας ότι η αύξηση της κατακόρυφης ενεργού τάσης ( $\Delta\sigma'_v$ ) με το βάθος (z) δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta\sigma'_v = \gamma' \Delta z$$

όπου  $\gamma'$  είναι το ειδικό βάρος του σχηματισμού (ολικό, εάν η άργιλος βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του υπογείου ορίζοντα και ενεργό – δηλαδή υπό άνωση, εάν η άργιλος βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υπογείου ορίζοντα).

Συνδυασμός των ανωτέρω σχέσεων δίνει :

$$\Delta c_u = \xi \gamma' \Delta z$$

Για πιθανές μεταβολές των παραμέτρων "ξ" και "γ'" με τιμές :  $\xi = 0.20 - 0.40$  και  $\gamma' = 8 - 21 \text{ kN/m}^3$  (το εύρος αυτό αντιστοιχεί σε υπό άνωση και ολικές τιμές του ειδικού βάρους του εδάφους), η ανωτέρω σχέση δίνει :

$$\Delta c_u = \xi \gamma' \Delta z \Rightarrow \Delta c_u = 1.6 - 8.4 \Delta z$$

δηλαδή,  $\Delta c_u = \lambda \Delta z$  όπου  $\lambda = 1.6 - 8.4$ .

Στην περίπτωση πολύστρωτων σχηματισμών όπου κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι έχουν αποτεθεί επί υπερ-στερεοποιημένων αργίλων, η "ισοδύναμη" αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος μπορεί να αντιστοιχεί σε τιμές του "λ" αρκετά μεγαλύτερες από τις ανωτέρω (δηλ. από  $\lambda = 1.6 - 8.4$ ). Έτσι, στις αριθμητικές επιλύσεις που ακολουθούν εξετάζονται τιμές του "λ" μεταξύ 0 και 100 kPa/m. Τιμές της παραμέτρου "λ" από 0 έως 30kPa/m, θεωρείται ότι αντιστοιχούν σε έδαφος με σχετικώς μικρή αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$  ως προς το βάθος. Τιμές του λ από 50kPa/m έως 100 kPa/m αντιστοιχούν σε έδαφος με αρκετά έντονη μεταβολή του  $c_u$  με το βάθος. Τέλος, σχετικώς με την τιμή του  $c_u$  στην επιφάνεια του εδάφους, στις αναλύσεις θεωρήθηκε ότι  $c_{u,0}=20\text{kPa}$  (με το σκεπτικό ότι για μεγαλύτερες τιμές του  $c_{u,0}$ , ο σχηματισμός μπορεί να θεωρηθεί ως δίστρωτος (και να αναλυθεί με βάση όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο).

Αυτή η σειρά των αναλύσεων με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>3D</sup> περιλαμβάνει ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\phi_u=0$  και  $c=c_u$ ) όπου το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστο-πλαστικά (αστοχία κατά το μοντέλο Mohr-Coulomb) και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες :

- μέτρο ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους :  $K_o = 6000 \text{ kPa}$
- μέτρο διάτμησης στην επιφάνεια του εδάφους :  $G_o = 3600 \text{ kPa}$
- γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους  $\phi_u = 0$  (αστράγγιστες συνθήκες)
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην επιφάνεια του εδάφους :  $c_{u,0} = 20 \text{ kPa}$
- γωνία πλαστικής διόγκωσης (ή γωνία διαστολικότητας)  $\delta = 0$

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνο, ορθογωνικό και λωριδωτό θεμέλιο με τις εξής διαστάσεις :

- 4,00m\*4,00m (τετράγωνο θεμέλιο πλάτους  $B=4,00\text{m}$  και μήκους  $L=B$ )
- 4,00m\*12,00m (ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=4,00\text{m}$  και μήκους  $L=3B$ )
- 4,00m\*20,00m (λωριδωτό θεμέλιο πλάτους  $B=4,00\text{m}$  και μήκους  $L=5B$ )

Όλα τα παραπάνω θεμέλια θεωρήθηκε κατά την ανάλυση με το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> ότι είναι άκαμπτα.

Ο υπολογισμός του οριακού φορτίου έγινε για κατακόρυφη (ορθή) φόρτιση και για εκκεντρότητες  $e=0$  (κεντρική φόρτιση),  $e=B/6$  και  $e=B/3$ . Η εκκεντρότητα λαμβάνεται υπόψη μόνο κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$  του θεμελίου, ενώ κατά την διεύθυνση του μήκους  $L$  δεν υπάρχει εκκεντρότητα. Για την μελέτη της επίδρασης του πάχους  $d$  του πάνω στρώματος του εδάφους στο οριακό φορτίο, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $d=0$ ,  $d=B/4=1,00\text{m}$ ,  $d=B/2=2,00\text{m}$ ,  $d=3B/4=3,00\text{m}$  και  $d=B=4,00\text{m}$ . Το κατώτερο στρώμα του εδάφους θεωρήθηκε ότι επεκτείνεται μέχρι το κάτω σύνορο του εδαφικού προσομοιώματος (σε μεγάλο βάθος).

Οι τιμές του  $K_0$ ,  $G_0$  και  $c_{u,0}$  που αναφέρονται, αφορούν την στάθμη  $z=0$  του εδάφους (δηλαδή την επιφάνεια του εδάφους). Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$  αυξάνει γραμμικώς με το βάθος και σε τυχαίο βάθος  $z$  δίνεται από την σχέση  $c_u = c_{u,0} + \lambda z$ , όπου  $c_{u,0} = 20 \text{ kPa}$ . Για τον συντελεστή  $\lambda$  ο οποίος εκφράζει τον ρυθμό αύξησης του  $c_u$  ανά μέτρο βάθους, επιλέχθηκαν οι ακόλουθες 11 τιμές:

$\lambda = 0, 5\text{kPa/m}, 10\text{kPa/m}, 15\text{kPa/m}, 20\text{kPa/m}, 30\text{kPa/m}, 35\text{kPa/m}, 40\text{kPa/m}, 50\text{kPa/m}, 70\text{kPa/m}$  και  $100\text{kPa/m}$ .

Οι ακόλουθοι Πίνακες συνοψίζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το πρόγραμμα FLAC για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου ( $R$ ) επιφανειακού πεδίου με γραμμική αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους.

1. Τετραγωνικό πέδιλο ( $L / B = 1$ ) :

$\lambda$ (kPa/m)	$\lambda B / c_{u0}$	Τιμή της αδιάστατης αντοχής : $R / (BLc_{u0})$		
		για $e / B = 0$	για $e / B = 1/6$	για $e / B = 1/3$
0	0	5.79	3.53	0.96
5	1	6.63	4.07	1.09
10	2	7.31	4.49	1.2
15	3	7.99	4.9	1.31
20	4	8.67	5.34	1.41
30	6	10.01	6.18	1.62
35	7	10.67	6.58	1.72
40	8	11.34	7.01	1.8
50	10	12.66	7.97	2
70	14	15.3	9.62	2.39
100	20	19.26	11.97	2.99

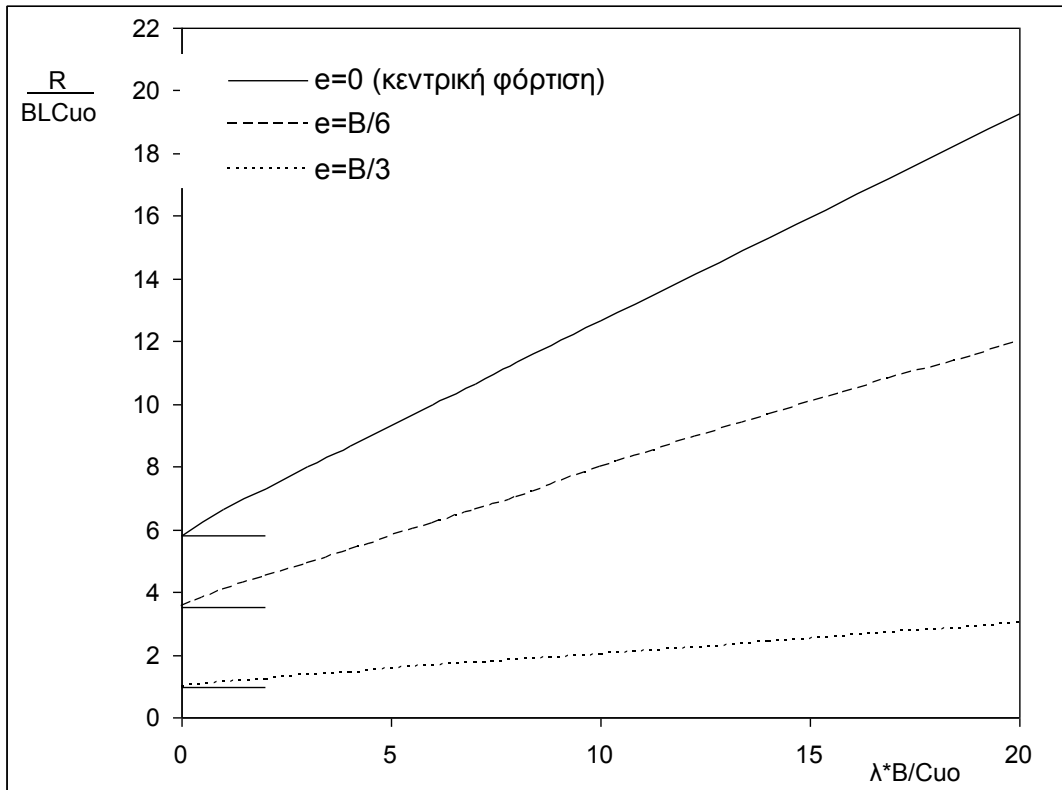
2. Ορθογωνικό πέδιλο ( $L / B = 3$ ) :

$\lambda$ (kPa/m)	$\lambda B / c_{uo}$	Τιμή της αδιάστατης αντοχής : $R / (BLc_{uo})$		
		για $e / B = 0$	για $e / B = 1/6$	για $e / B = 1/3$
0	0	5.61	3.44	0.94
5	1	6.76	4.24	1.08
10	2	7.62	4.78	1.2
15	3	8.36	5.27	1.31
20	4	9.11	5.74	1.43
30	6	10.59	6.67	1.65
35	7	11.32	7.15	1.76
40	8	12.05	7.62	1.87
50	10	13.54	8.54	2.09
70	14	16.44	10.38	2.52
100	20	20.84	13.12	3.17

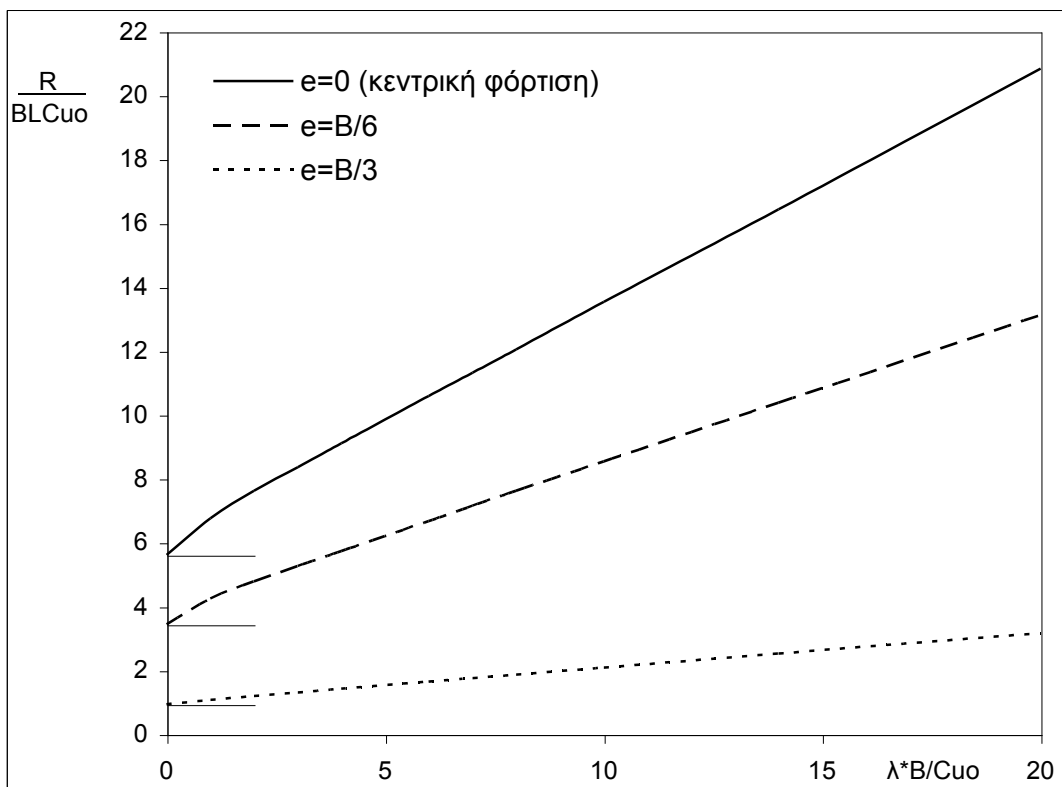
3. Λωριδωτό πέδιλο ( $L / B = 5$ ) :

$\lambda$ (kPa/m)	$\lambda B / c_{uo}$	Τιμή της αδιάστατης αντοχής : $R / (BLc_{uo})$		
		για $e / B = 0$	για $e / B = 1/6$	για $e / B = 1/3$
0	0	5.53	3.39	0.93
5	1	6.78	4.28	1.08
10	2	7.68	4.89	1.2
15	3	8.45	5.38	1.31
20	4	9.2	5.84	1.43
30	6	10.71	6.79	1.66
35	7	11.46	7.28	1.77
40	8	12.21	7.76	1.88
50	10	13.71	8.7	2.1
70	14	16.69	10.6	2.54
100	20	21.15	13.44	3.19

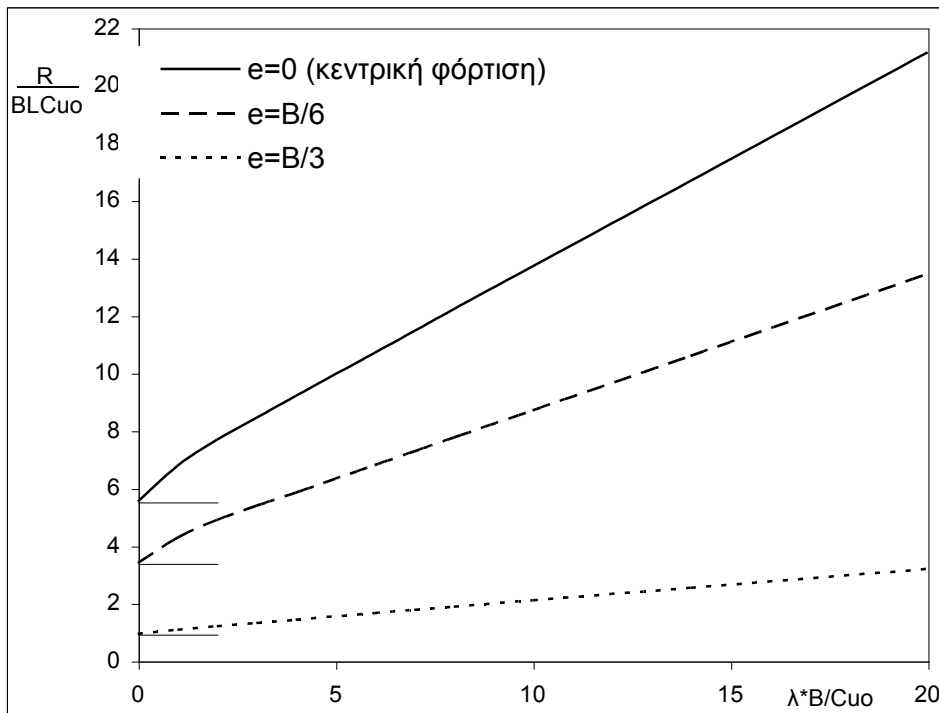
Τα ανωτέρω αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα επόμενα Σχήματα :



Οριακό φορτίο τετραγωνικού πεδίου ( $L/B = 1$ )

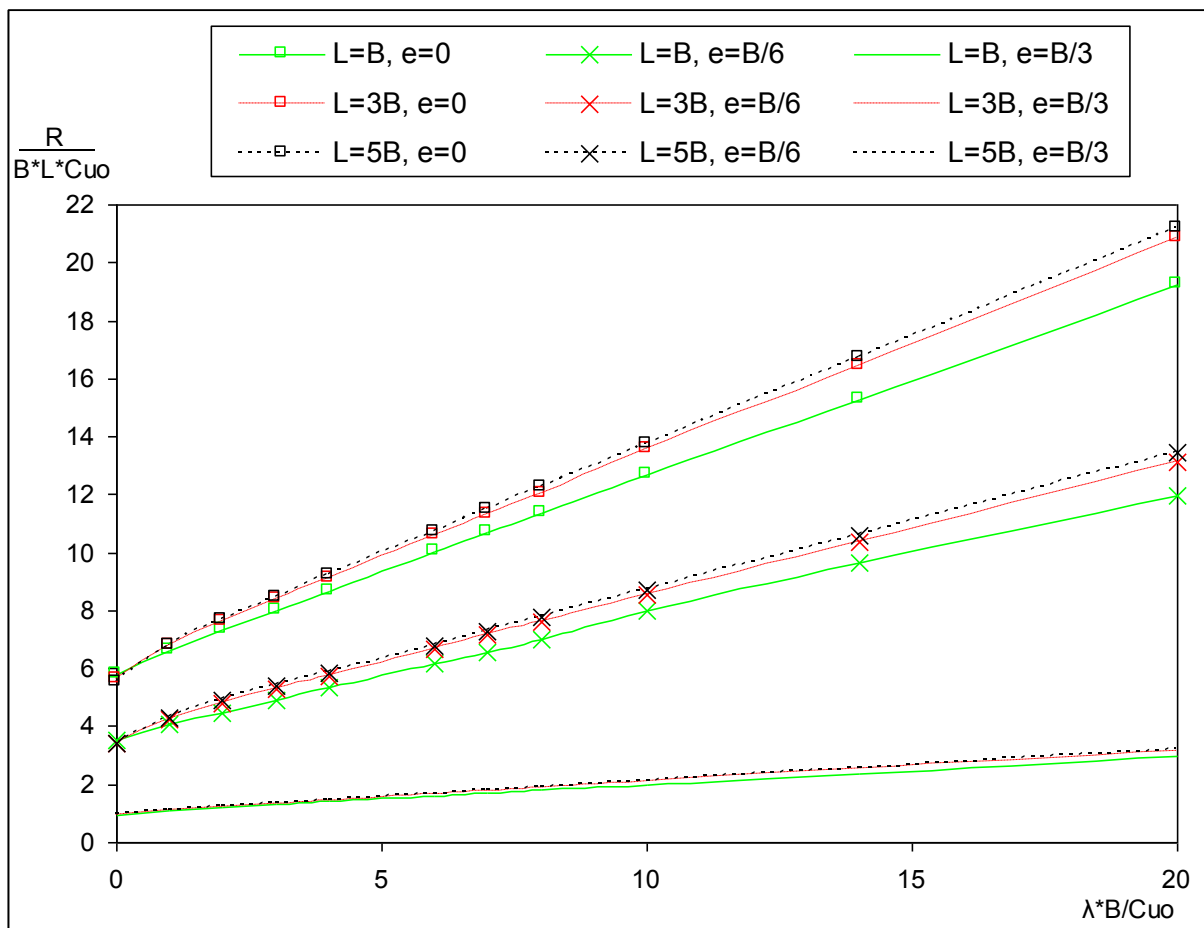


Οριακό φορτίο ορθογωνικού πεδίου ( $L/B = 3$ )



Οριακό φορτίο λωριδωτού πεδίου ( $L/B = 5$ )

Και συνοψίζονται στο ακόλουθο Σχήμα για διάφορες τιμές του λόγου  $L/B$ .



Οριακό φορτίο πεδίων με διάφορες τιμές του λόγου  $L/B$

### Συμπεράσματα για τη φέρουσα ικανότητα πεδίων σε έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή :

Από τις ανωτέρω αριθμητικές επιλύσεις μπορεί να συναχθεί η ακόλουθη προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων διαστάσεως  $B \times L$  ( $L > B$ ), υπό κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση σε εδαφικό σχηματισμό με γραμμικώς αυξανόμενη (με το βάθος) αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατά τη σχέση :  $c_u = c_{u0} + \lambda z$ , όπου :

$c_{u0}$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην επιφάνεια του εδάφους ( $z=0$ )

$z$  = βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

$\lambda$  = συντελεστής αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος (σε kPa/m)

Η αδιάστατη τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας ( $R$ ) για την περίπτωση απλής εκκεντρότητας κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$ , δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{B L c_{u0}} = (\pi + 2) \left(1 - 2 \frac{e}{B}\right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{B}{L}\right) \left(1 - 2 \frac{e}{B}\right)\right] i_c A$$

$$\text{όπου : } i_c = 0.5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{R}{B L c_{u0}}\right)}{\left(1 - 2 \frac{e}{B}\right)}}\right) \text{ και } i = Q / R$$

$$\text{και : } A = 1 + \left\{0.125 - 0.70 \left(\frac{e}{B}\right)^2\right\} \left(\frac{\lambda B}{c_{u0}}\right)$$

ενώ,  $e$  είναι η εκκεντρότητα της φόρτισης κατά την διεύθυνση του πλάτους ( $B$ ). Η ανωτέρω σχέση ισχύει για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας έως 0.4226 (δηλαδή για  $e / B < 0.4226$ ), με το σκεπτικό ότι για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας η φέρουσα ικανότητα δεν ορίζεται (κατά την μέθοδο του Ευρωκώδικα 8).

Στην ανωτέρω σχέση, η επιρροή της αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος εμφανίζεται μέσω του αδιάστατου συντελεστή  $A$ . Στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους, οπότε  $\lambda = 0$ , η ανωτέρω σχέση μεταπίπτει στην γνωστή αναλυτική σχέση του ΕΑΚ 2000, αφού  $A = 1$ . Επίσης, για ανηγμένη εκκεντρότητα  $e / B = 0.4226$  (δηλαδή τη μέγιστη τιμή για την οποία ορίζεται η φέρουσα ικανότητα), ισχύει  $A = 1$ .

Η ανωτέρω σχέση προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων με ακρίβεια  $\pm 5\%$  για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας ( $e/B$ ) έως 0.35 περίπου, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας (έως 0.4226) οι αποκλίσεις φθάνουν το  $\pm 20\%$ . Με το σκεπτικό ότι ανηγμένες εκκεντρότητες άνω του 0.35 είναι μάλλον ασυνήθεις, η ανωτέρω προσεγγιστική σχέση θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

## 5 Διερεύνηση της επιρροής της μερικής αποκόλλησης στη φέρουσα ικανότητα πεδίων

### 5.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών είναι πολύ πιθανόν να συμβεί μερική αποκόλληση (uplift) κάποιου πεδίου από τη θεμελίωση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αδυναμία του εδάφους να παραλάβει εφελκυστικές δυνάμεις με αποτέλεσμα τμήμα της βάσης να χάνει την επαφή με το έδαφος εάν η γωνία στροφής του πεδίου γύρω από οριζόντιο άξονα είναι μεγαλύτερη από κάποια κρίσιμη τιμή. Η τιμή της κρίσιμης γωνίας εξαρτάται από τις διαστάσεις του πεδίου, την ελαστικότητα της θεμελίωσης και τα στατικά φορτία. Μεταβάλλεται επίσης ανάλογα με τη δυναμική απόκριση του πεδίου στην κατακόρυφη διεύθυνση. Γενικώς, αποκόλληση συμβαίνει όταν η προς τα άνω κατακόρυφη μετακίνηση σε κάποιο άκρον του πεδίου, η οποία προκύπτει ως συνδυασμός της κατακόρυφης και της στροφικής απόκρισης, είναι μεγαλύτερη από την ελαστική υποχώρηση λόγω των στατικών φορτίων.

Κατά τη διάρκεια της δυναμικής απόκρισης, το πέδιλο συνεχώς αλλάζει μεταξύ των “καταστάσεων” της πλήρους επαφής και της μερικής αποκόλλησης. Εάν οι κατακόρυφες ταλαντώσεις είναι μεγάλες, είναι δυνατόν να συμβεί και πλήρης αποκόλληση του πεδίου από το έδαφος για κάποιο χρονικό διάστημα, οι συνέπειες όμως μιας τέτοιας συμπεριφοράς δεν διερευνώνται στην παρούσα εργασία.

Η μερική αποκόλληση του πεδίου από το έδαφος κατά τη διάρκεια της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής οδηγεί σε σημαντική αύξηση των τάσεων του εδάφους, αφού τα κατακόρυφα φορτία παραλαμβάνονται από μικρότερη επιφάνεια έδρασης. Από δυναμική άποψη, η μερική αποκόλληση οδηγεί σε μη-γραμμική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται αφ’ ενός στις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης που διέπουν το φαινόμενο και αφετέρου στο γεγονός ότι το σύστημα συνεχώς αλλάζει κατάσταση μεταξύ της πλήρους επαφής και της μερικής αποκόλλησης.

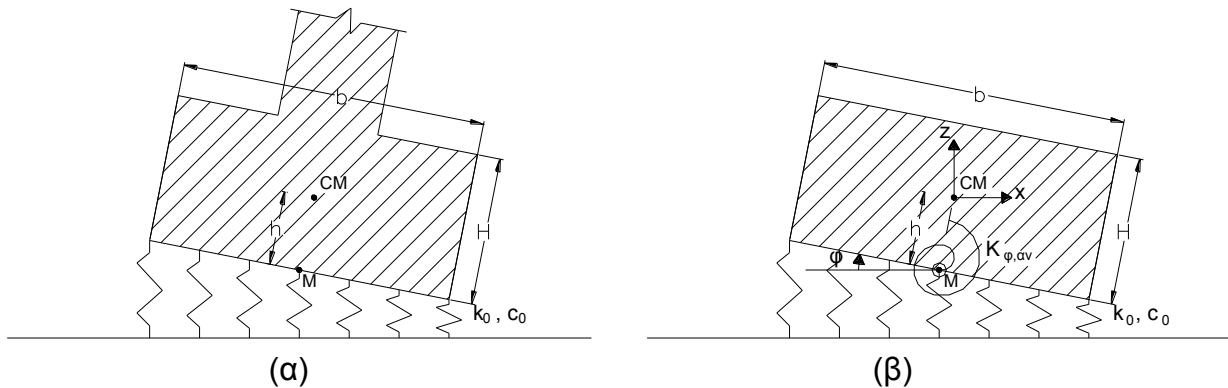
Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς πεδίων με μερική αποκόλληση. Εξετάζεται η επιρροή όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με το φαινόμενο στην τιμή της μέγιστης γωνίας στροφής, της ελάχιστης επιφάνειας έδρασης κατά τη διάρκεια της αποκόλλησης και στην τιμή της μέγιστης τάσης (τάση αιχμής) που αναπτύσσεται στο έδαφος. Η διερεύνηση γίνεται για ημιτονική διέγερση, επειδή με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να διερευνηθεί καλύτερα η επιρροή κάθε παραμέτρου στην απόκριση. Αντίθετα, στη σεισμική διέγερση η απομόνωση της επιρροής των επιμέρους παραμέτρων είναι σχεδόν αδύνατη, αφού μπορούν να συμβούν φαινόμενα “συντονισμού” που είναι δύσκολο να ελεγχθούν. Στο τελευταίο τμήμα παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα για πραγματική σεισμική διέγερση. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίνονται με αυτά που θα προέβλεπε μία ψευδοστατική θεώρηση του φαινομένου, με βάση τις μέγιστες τιμές των σεισμικών φορτίων.



## 5.2 Μοντέλο υπολογισμού

Οι δυναμικές αναλύσεις γίνονται για ένα μεμονωμένο πέδιλο, που εδράζεται σε ελαστική θεμελίωση Winkler. Είναι γνωστόν ότι η θεμελίωση Winkler δεν μπορεί να προσομοιάσει με ακρίβεια ταυτόχρονα τις στρωφικές και τις κατακόρυφες ταλαντώσεις του πεδίου, αφού οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες προκύπτουν εξαρτημένες η μία από την άλλη. Για να επιτευχθεί η ανεξαρτητοποίηση των ταλαντώσεων απαιτείται ανώτερης τάξης μοντελοποίηση, όπως αυτή που προτείνεται από τους Hall *et al* (1979). Στην παρούσα εργασία, επειδή αφ' ενός σκοπός είναι κυρίως η ποιοτική διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση και όχι ο ακριβής υπολογισμός των μετακινήσεων και των στρωφών και αφετέρου η μερική αποκόλληση του πεδίου από το έδαφος οδηγεί σε εξαιρετικά πολύπλοκες εξισώσεις κίνησης, χρησιμοποιείται η απλή μορφή της θεμελίωσης Winkler που χαρακτηρίζεται μόνο από το δείκτη εδάφους  $k_0$  και την απόσβεση  $c_0$ .

Για λόγους απλότητας εξετάζεται μόνο η περίπτωση ενός απαραμόρφωτου, ορθογωνικού πεδίου διαστάσεων  $b \times H$ , όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Το μήκος του πεδίου στην εγκάρσια διεύθυνση λαμβάνεται ίσο με 1.00 m.



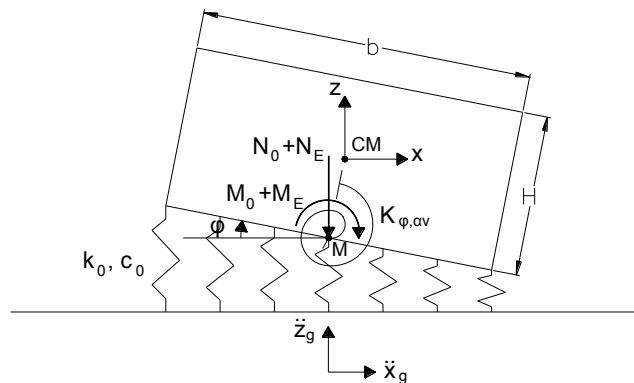
Σχ. 1. (α) Ορθογωνικό πέδιλο σε ελαστική θεμελίωση Winkler και (β) ισοδύναμο μοντέλο υπολογισμού.

Η ανάλυση γίνεται θεωρώντας το πέδιλο ως ελεύθερα λικνιζόμενο σώμα, λαμβάνοντας όμως υπόψη τα φορτία και τη δυσκαμψία της ανωδομής που μεταφέρονται στο πέδιλο μέσω του υποστυλώματος με το οποίο συνδέεται. Επειδή, όπως αναφέρεται παρακάτω, οι εξισώσεις κίνησης εκφράζονται ως προς το κέντρο της βάσης M, η στρωφική δυσκαμψία που προσφέρει το υποστύλωμα εκφράζεται με ένα ισοδύναμο στρωφικό ελατήριο στο σημείο M. Εάν  $K_\phi$  και  $K_x$  είναι αντίστοιχα η στρωφική και η μεταφορική (στην οριζόντια διεύθυνση) δυσκαμψία στη βάση του υποστυλώματος, τότε:

$$K_{\phi,av} = K_\phi + H \cdot K_x \quad (1)$$

Όλες οι αναλύσεις γίνονται με την παραδοχή ότι εμποδίζεται η οριζόντια κίνηση του πεδίου και επιτρέπεται μόνο κατακόρυφη κίνηση,  $z$  και στρόφη,  $\phi$ , γύρω από οριζόντιο άξονα που διέρχεται από το μέσον της βάσης M (Σχ. 1). Το Κ.Β. του πεδίου, όμως, έχει οριζόντια μετακίνηση λόγω της στρώφης, ίση με  $x = h \cdot \phi$ , όπου  $h = H/2$  είναι το ύψος, στο οποίο βρίσκεται το Κ.Β. Λόγω αυτού του περιορισμού στην οριζόντια κίνηση δεν λαμβάνεται υπόψη και η οριζόντια δυσκαμψία του υποστυλώματος, εκτός από τη συμμετοχή της στη συνολική στρωφική ακαμψία της ανωδομής  $K_{\phi,av}$ , σύμφωνα με την εξίσωση (1).

Τα φορτία της ανωδομής θεωρούνται επίσης ανηγμένα στο μέσον της βάσης M, όπως φαίνεται στο Σχ.2, και είναι αυτά που θα προέκυπταν για πλήρη πάκτωση της θεμελίωσης. Στα φορτία δεν λαμβάνεται υπόψη η οριζόντια τέμνουσα, επειδή εμποδίζεται η οριζόντια κίνηση του πεδίλου, λαμβάνεται όμως υπόψη η επιρροή της τέμνουσας στη βάση του στύλου στον υπολογισμό της συνολικής ροπής της ανωδομής ως προς το σημείο M. Τα φορτία της ανωδομής θεωρούνται ανηγμένα σε 1.00 m μήκους πεδίλου (στην εγκάρσια διεύθυνση) και είναι δύο ειδών: στατικά φορτία που συμβολίζονται με το δείκτη “0” και δυναμικά φορτία που προκύπτουν από τη σεισμική απόκριση της ανωδομής και συμβολίζονται με το δείκτη “E”, τα οποία είναι συναρτήσεις του χρόνου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τα παρακάτω σύμβολα:



Σχ. 2. Φορτία ανωδομής και σεισμική διέγερση.

- $N_0$  = στατικό αξονικό φορτίο του στύλου, θετικό όταν είναι θλιπτικό
- $M_0$  = στατική ροπή ανηγμένη στο σημείο M
- $N_E(t)$  = σεισμικό αξονικό φορτίο του στύλου
- $M_E(t)$  = σεισμική ροπή ανηγμένη στο σημείο M.

### 5.3 Εξισώσεις της κίνησης

Οι εξισώσεις κίνησης που δίνονται παρακάτω προέκυψαν από τις αντίστοιχες εξισώσεις του ελεύθερου λικνιζόμενου στερεού σώματος (Psycharis and Jennings, 1983) με την προσθήκη των απαραίτητων όρων που αναφέρονται στα φορτία και την ακαμψία της ανωδομής. Συγκεκριμένα λαμβάνονται υπόψη οι εξής τροποποιήσεις:

- Για τις κατακόρυφες ταλαντώσεις, στη μάζα του πεδίλου προστίθεται και η μάζα  $N_0/g$  που αντιστοιχεί στην ανωδομή, επειδή και αυτή συμμετέχει στην κατακόρυφη κίνηση.
- Στη στρωφική ακαμψία της θεμελίωσης προστίθεται και η στρωφική ακαμψία της ανωδομής  $K_{\phi,av}$ .
- Στα φορτία προστίθενται και τα στατικά και σεισμικά φορτία της ανωδομής.

Οι εξισώσεις κίνησης υπολογίζονται με την παραδοχή μικρών γωνιών στρωφής  $\varphi$  έτσι ώστε  $\cos\varphi \approx 1.0$  και  $\sin\varphi \approx \varphi$  και μπορούν να γραφούν ως εξής:

**Πλήρης επαφή :**

$$\left(I_M + \frac{1}{2}mbh\varphi\right)\ddot{\varphi} + \frac{1}{12}c_0b^3\dot{\varphi} + k_0b\left(\frac{b^2}{12} - h\delta\right)\varphi + K_{\varphi,av}\varphi + \frac{1}{2}mb\ddot{x}_g\varphi + k_0bh\dot{z}\varphi = -mh\ddot{x}_g + M_0 + M_E \quad (2\alpha)$$

$$\left(m + \frac{N_0}{g}\right)\ddot{z} + c_0b\dot{z} + k_0bz = -\left(m + \frac{N_0}{g}\right)\ddot{z}_g - N_E \quad (2\beta)$$

**Με μερική αποκόλληση ( $\varphi > 0$ ) :**

$$\begin{aligned} &\left(I_M + \frac{1}{2}mbh\varphi\right)\ddot{\varphi} + c_0\left(\frac{b^3}{24} - \frac{b^2h\varphi}{8} + \frac{h\delta^2}{2\varphi} + \frac{h\delta z}{\varphi} + \frac{hz^2}{2\varphi^2} + \frac{\delta^3}{3\varphi^3} + \frac{z^3}{3\varphi^3} + \frac{\delta^2z}{\varphi^3} + \frac{\delta z^2}{\varphi^3}\right)\dot{\varphi} \\ &\quad - c_0\left(\frac{b^2}{8} - h\delta - \frac{bh\varphi}{2} + hz - \frac{\delta^2}{2\varphi^2} - \frac{z^2}{2\varphi^2} + \frac{\delta z}{\varphi^2}\right)\dot{z} \\ &+ k_0\left[\frac{b}{2}\left(\frac{b^2}{12} - h\delta\right)\varphi + \frac{bh\dot{z}\varphi}{2} - \left(\frac{b^2}{8} - h\delta\right)z - \frac{\delta^3}{6\varphi^2} - \frac{\delta z^2}{2\varphi^2} + \frac{\delta^2z}{2\varphi^2} + \frac{z^3}{6\varphi^2} - \frac{hz^2}{2} - \frac{b^2h\varphi^2}{8}\right] \\ &+ K_{\varphi,av}\varphi + \frac{1}{2}mb\ddot{x}_g\varphi = -\frac{1}{2}k_0\delta\left(\frac{b^2}{4} - h\delta\right) - mh\ddot{x}_g + M_0 + M_E \end{aligned} \quad (3\alpha)$$

$$\begin{aligned} &\left(m + \frac{N_0}{g}\right)\ddot{z} + c_0\left[\left(\frac{b}{2} + \frac{\delta}{\varphi} - \frac{z}{\varphi}\right)\dot{z} - \left(\frac{b^2}{8} - \frac{\delta^2}{2\varphi^2} + \frac{\delta z}{\varphi^2} - \frac{z^2}{2\varphi^2}\right)\dot{\varphi}\right] \\ &+ k_0\left(\frac{bz}{2} - \frac{b^2\varphi}{8} - \frac{\delta^2}{2\varphi} + \frac{\delta z}{\varphi} - \frac{z^2}{2\varphi}\right) = -\frac{1}{2}(mg + N_0) - \left(m + \frac{N_0}{g}\right)\ddot{z}_g - N_E \end{aligned} \quad (3\beta)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα του πεδίλου,  $I_M$  είναι η ροπή αδράνειας μάζας του πεδίλου ως προς το σημείο M και  $\delta$  είναι η στατική υποχώρηση που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{N_0 + mg}{k_0b} \quad (4)$$

Για ορθογωνικό πέδιλο διαστάσεων  $b \times H$  ισχύει:  $I_M = m\left(\frac{b^2}{12} + \frac{H^2}{3}\right)$ .

Οι εξισώσεις κίνησης με μερική αποκόλληση και  $\varphi < 0$  είναι ανάλογες με τις (3α) και (3β) και μπορούν να προκύψουν από αυτές με αλλαγή της διεύθυνσης του άξονα  $x$  και αντίστοιχη αλλαγή των προσήμων των φορτίων που επηρεάζονται.

Στις παραπάνω εξισώσεις δίνονται όλοι οι όροι, συμπεριλαμβανομένων και αυτών ανώτερης τάξης. Για τις εξισώσεις όμως που αντιστοιχούν στην πλήρη επαφή, οι όροι αυτοί μπορούν να αμεληθούν χωρίς σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα, οπότε οι αντίστοιχες εξισώσεις προκύπτουν γραμμικές.

### Αρχική γωνία στροφής

Στην επίλυση των παραπάνω εξισώσεων κίνησης πρέπει να ληφθεί υπόψη η αρχική γωνία στροφής,  $\varphi_0$ , του πεδίλου, που οφείλεται στη στατική ροπή  $M_0$ . Η γωνία αυτή εξαρτάται από τη συνολική στροφική δυσκαμψία  $K_{\varphi,ολ} = K_{\varphi,\varepsilon\delta} + K_{\varphi,av}$ , όπου

$$K_{\varphi, \varepsilon \delta} = \frac{k_0 b^3}{12} \quad (5)$$

είναι η δυσκαμψία που οφείλεται στη θεμελίωση Winkler και  $K_{\varphi, \alpha \nu}$  η δυσκαμψία που οφείλεται στην ανωδομή και δίνεται από τη σχέση (1). Επομένως:

$$\varphi_0 = \frac{M_0}{K_{\varphi, \varepsilon \delta} + K_{\varphi, \alpha \nu}} \quad (6)$$

### Έναρξη / τέλος μερικής αποκόλλησης

Η μετάβαση από την κατάσταση της πλήρους επαφής στην κατάσταση της μερικής αποκόλλησης, ή αντίστροφα, συμβαίνει όταν η κατακόρυφη μετακίνηση οποιουδήποτε άκρου του πεδίου ισούται με τη στατική υποχώρηση  $\delta$ . Αυτό συμβαίνει όταν:

Έναρξη αποκόλλησης:

$$z + \frac{b}{2}|\varphi| \geq \delta \quad (7\alpha)$$

Τέλος αποκόλλησης:

$$z + \frac{b}{2}|\varphi| \leq \delta \quad (7\beta)$$

Τα κριτήρια αυτά θα πρέπει να ελέγχονται σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης των εξισώσεων κίνησης. Επειδή όταν ικανοποιείται κάποιο κριτήριο αλλάζει η κατάσταση, στην οποία βρίσκεται το σύστημα, και οι εξισώσεις κίνησης και οι τελικές συνθήκες της μίας κατάστασης χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες για την άλλη, το βήμα ολοκλήρωσης πρέπει να είναι αρκετά μικρό, ώστε οι σχέσεις (7α) και (7β) να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην ισότητα. Σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν σε αυτή την εργασία, το βήμα ολοκλήρωσης ήταν 0.0002 sec, ενώ στο παράδειγμα της σεισμικής διέγερσης ήταν 0.001 sec.

## 5.4 Παραμετρική Διερεύνηση

Η διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων που συμμετέχουν στο φαινόμενο γίνεται σε σχέση με τη μέγιστη απόκριση του πεδίου. Συγκεκριμένα εξετάζονται τρεις ποσότητες:

- Η μέγιστη γωνία στροφής, όπως προκύπτει από την επίλυση
- Το ελάχιστο μήκος επαφής  $s$ , που εκφράζεται με το λόγο  $s/b$ . Το μήκος  $s$  υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$s = b \quad \text{για πλήρη επαφή} \quad (8\alpha)$$

$$s = \frac{b}{2} + \frac{\delta}{|\varphi|} - \frac{z}{|\varphi|} \quad \text{για μερική αποκόλληση} \quad (8\beta)$$

- Η μέγιστη τάση εδάφους (τάση αιχμής) που υπολογίζεται από τη μετακίνηση των άκρων του πεδίου. Η τάση αιχμής υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_{\max} = k_0 \left( \delta - z + \frac{b|\varphi|}{2} \right) \quad \text{για πλήρη επαφή} \quad (9\alpha)$$

$$\sigma_{\max} = k_0 s |\varphi| \quad \text{για μερική αποκόλληση} \quad (9\beta)$$

Η μέγιστη τάση εκφράζεται με τον αδιάστατο όρο  $\sigma_{\max}/\sigma_0$ , όπου

$$\sigma_0 = \frac{mg + N_0}{b} + \frac{6M_0}{b^2} \quad (10)$$

είναι η αντίστοιχη μέγιστη τάση από τα στατικά φορτία μόνο (για τα στατικά φορτία θεωρούμε ότι το πέδιλο βρίσκεται σε πλήρη επαφή με το έδαφος).

Στην παραμετρική διερεύνηση, οι παράμετροι που υπεισέρχονται στις εξισώσεις κίνησης και επηρεάζουν αυτές τις ποσότητες εκφράζονται μέσω αδιάστατων όρων, όπως περιγράφεται παρακάτω. Σε κάθε επίλυση μεταβάλλεται μόνο ένας αδιάστατος όρος και όλοι οι υπόλοιποι παραμένουν σταθεροί. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

### 1. Ακαμψία εδάφους

Η ακαμψία του εδάφους εξαρτάται από το δείκτη  $k_0$  (ελαστική σταθερά της θεμελίωσης Winkler). Στην παρούσα ανάλυση, η ακαμψία του εδάφους εκφράζεται με τον αδιάστατο όρο:

$$\Pi_1 = \frac{\omega_\phi}{\rho} \quad (11)$$

όπου

$$\omega_\phi = \sqrt{\frac{K_{\phi,\varepsilon\delta} + K_{\phi,\alpha\nu}}{I_M}} \quad (12)$$

είναι η στροφική ιδιοσυχνότητα του πεδύλου για την κατάσταση της πλήρους επαφής και

$$\rho = \sqrt{\frac{mgh}{I_M}} \quad (13)$$

είναι η χαρακτηριστική συχνότητα του ελεύθερα λικνιζόμενου πεδύλου γύρω από το σημείο M, ανάλογη με αυτή που εκφράστηκε από τον Housner για λικνιζόμενο στερεό σώμα σε απαραμόρφωτη βάση (Housner, 1963). Η ακαμψία του εδάφους  $k_0$  υπεισέρχεται στον όρο της στροφικής δυσκαμψίας της θεμελίωσης Winkler,  $K_{\phi,\varepsilon\delta}$ , όπως φαίνεται στην εξίσωση (5).

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι για δεδομένο λόγο διαστάσεων  $b/H$  του πεδύλου και δεδομένο ειδικό βάρος, η χαρακτηριστική συχνότητα  $\rho$  είναι ένα μέτρο των απόλυτων διαστάσεων του πεδύλου. Υπενθυμίζεται ότι το απόλυτο μέγεθος παίζει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση των ελεύθερα λικνιζομένων σωμάτων και αναμένεται να επηρεάζει τη συμπεριφορά και στην περίπτωση πεδύλων με αποκόλληση. Για σταθερή όμως τιμή της παραμέτρου  $\Pi_1$ , οι απόλυτες διαστάσεις δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

### 2. Στροφική δυσκαμψία ανωδομής

Η στροφική δυσκαμψία της ανωδομής,  $K_{\phi,\alpha\nu}$ , εξετάζεται κανονικοποιημένη ως προς τη στροφική δυσκαμψία του εδάφους,  $K_{\phi,\varepsilon\delta}$ , με τον αδιάστατο όρο:

$$\Pi_2 = \frac{K_{\phi,\alpha\nu}}{K_{\phi,\varepsilon\delta}} \quad (14)$$

### 3. Περίοδος διέγερσης (για ημιτονική διέγερση)

Στην περίπτωση της ημιτονικής διέγερσης με περίοδο  $T$ , εξετάζεται η επιρροή του λόγου:

$$\Pi_{3,\alpha} = \frac{T}{T_\phi} \quad (15)$$

όπου  $T_\phi = 2\pi/\omega_\phi$  είναι η ιδιοπερίοδος των στροφικών ταλαντώσεων για πλήρη επαφή. Επειδή όμως συντονισμός δεν συμβαίνει μόνο όταν  $T \approx T_\phi$ , αλλά και όταν  $T \approx T_z$ , όπου  $T_z = 2\pi/\omega_z$  είναι η ιδιοπερίοδος των κατακόρυφων ταλαντώσεων κατά τη διάρκεια της πλήρους επαφής, με

$$\omega_z = \sqrt{\frac{k_0 b}{m + N_0 / g}} \quad (16)$$

στα διαγράμματα των αποτελεσμάτων δίνεται και ο άξονας που αντιστοιχεί στο λόγο:

$$\Pi_{3,\beta} = \frac{T}{T_z} \quad (17)$$

Οι αδιάστατοι όροι  $\Pi_{3,\alpha}$  και  $\Pi_{3,\beta}$  δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και μπορεί ο ένας να εκφραστεί συναρτήσει του άλλου για δεδομένες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων που εξετάζονται. Για ορθογωνικό πέδιλο, εύκολα αποδεικνύεται ότι οι ιδιοσυχνότητες  $\omega_\phi$  και  $\omega_z$  συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\left(\frac{\omega_\phi}{\omega_z}\right)^2 = \frac{(1 + \Pi_8)(1 + \Pi_2)}{1 + 4\Pi_5^3} \quad (18)$$

όπου οι αδιάστατοι παράμετροι  $\Pi_5$  και  $\Pi_8$  περιγράφονται παρακάτω.

#### 4. Απόσβεση εδάφους

Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις κίνησης που δίνονται παραπάνω, απόσβεση λαμβάνεται υπόψη μόνο στο έδαφος με το συντελεστή απόσβεσης  $c_0$  της θεμελίωσης Winkler. Υποτίθεται ότι η απόσβεση της ανωδομής έχει ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό των σεισμικών φορτίων  $M_E(t)$  και  $N_E(t)$  που αντιστοιχούν στην απόκριση για πλήρη πάκτωση στη βάση. Στην παρούσα ανάλυση, η απόσβεση του εδάφους μετρίεται με το συντελεστή απόσβεσης για στροφικές ταλαντώσεις κατά τη διάρκεια της πλήρους επαφής. Αμελώντας τους όρους δεύτερης τάξης στην εξίσωση (2α) προκύπτει:

$$\Pi_{4,\alpha} = \zeta_\phi = \frac{C_{\phi,\varepsilon\delta}}{2\sqrt{I_M(K_{\phi,\varepsilon\delta} + K_{\phi,\alpha\nu})}} \quad (19)$$

όπου

$$C_{\phi,\varepsilon\delta} = \frac{c_0 b^3}{12} \quad (20)$$

είναι η στροφική απόσβεση της θεμελίωσης Winkler. Αντί για το συντελεστή απόσβεσης  $\zeta_\phi$  θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ο συντελεστής απόσβεσης  $\zeta_z$  για κατακόρυφες ταλαντώσεις κατά τη διάρκεια της πλήρους επαφής:

$$\Pi_{4,\beta} = \zeta_z = \frac{c_0 b}{2\sqrt{(m + N_0 / g)k_0 b}} \quad (21)$$

Και οι αδιάστατοι όροι  $\Pi_{4,\alpha}$  και  $\Pi_{4,\beta}$  δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και μπορεί ο ένας να εκφραστεί συναρτήσει του άλλου για δεδομένες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων που εξετάζονται.

#### 5. Σχετικές διαστάσεις πεδίου

Οι σχετικές διαστάσεις του πεδίου εξετάζονται με το λόγο ύψους προς πλάτος:

$$\Pi_5 = \frac{H}{b} \quad (22)$$

### 6. Στατική εκκεντρότητα

Η στατική εκκεντρότητα  $e_0$  της στατικής ροπής ως προς τη συνολική αξονική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$e_0 = \frac{M_0}{N_0 + mg} \quad (23)$$

και είναι ένα μέτρο του μεγέθους της ροπής  $M_0$ . Στην παρούσα ανάλυση, η επιρροή της εκκεντρότητας  $e_0$  εξετάζεται με τον αδιάστατο όρο:

$$\Pi_6 = \frac{e_0}{b} \quad (24)$$

Θεωρούμε ότι αρχικά το πέδιλο βρίσκεται σε πλήρη επαφή και επομένως πρέπει να ισχύει:  $e_0/b < 1/6$ .

### 7. Σεισμική ροπή ανωδομής

Η μέγιστη τιμή της ροπής  $M_E$ , που αναπτύσσεται στο στύλο κατά τη διάρκεια της διέγερσης, λαμβάνεται υπόψη μέσω της δυναμικής εκκεντρότητας σε σχέση με το κατακόρυφο φορτίο:

$$e_E = \frac{M_E}{N_0 + mg} \quad (25)$$

και στην ανάλυση θεωρείται ανηγμένη ως προς το πλάτος του πεδίου:

$$\Pi_7 = \frac{e_E}{b} \quad (26)$$

Στην ανάλυση λαμβάνονται υπόψη μόνο θετικές τιμές της παραμέτρου  $\Pi_7$ , ώστε η δυναμική εκκεντρότητα να προστίθεται στη στατική.

### 8. Στατικό αξονικό φορτίο ανωδομής

Το αξονικό φορτίο  $N_0$ , που μεταφέρεται στο πέδιλο από το στύλο, λαμβάνεται υπόψη ανηγμένο στο βάρος του πεδίου  $W_{\text{πεδ}} = mg$  με το λόγο:

$$\Pi_8 = \frac{N_0}{W_{\text{πεδ}}} \quad (27)$$

### 9. Σεισμικό αξονικό φορτίο ανωδομής

Η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου  $N_E$ , που αναπτύσσεται στο στύλο κατά τη διάρκεια της διέγερσης, λαμβάνεται υπόψη ανηγμένη στο αντίστοιχο στατικό φορτίο  $N_0$  με το λόγο:

$$\Pi_9 = \frac{N_E}{N_0} \quad (28)$$

Επειδή κατά τη διάρκεια ενός σεισμού μπορούν να αναπτυχθούν και εφελκυστικές σεισμικές αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα, η παράμετρος  $\Pi_9$  παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές.

### 10. Μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης

Στην παρούσα ανάλυση λαμβάνεται υπόψη μόνο η οριζόντια συνιστώσα  $\ddot{x}_g$  της σεισμικής διέγερσης στη βάση του πεδίου, θεωρώντας ότι η κατακόρυφη συνιστώσα  $\ddot{z}_g$  δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, λόγω της υψηλής μορφής της. Επισημαίνεται ότι η επιτάχυνση του εδάφους επηρεάζει μόνο τα

αδρανειακά φορτία που αναπτύσσονται στο πέδιλο, αφού η απόκριση της ανωδομής έχει ήδη ληφθεί υπόψη μέσω των σεισμικών φορτίων  $M_E(t)$  και  $N_E(t)$ .

Η μέγιστη τιμή  $A = \max(\ddot{x}_g)$  της οριζόντιας επιτάχυνσης του εδάφους λαμβάνεται υπόψη ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας με το λόγο:

$$\Gamma_{10} = \frac{A}{g} \quad (29)$$

## 5.5 Ψευδοστατική θεώρηση

Τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων συγκρίνονται με αυτά που θα προέκυπταν από μία ψευδοστατική θεώρηση χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές των σεισμικών φορτίων. Σύμφωνα με το Σχ.2, τα συνολικά μέγιστα φορτία στο σημείο M είναι:

$$M_{ολ} = M_0 + M_E + mgAh \quad (30α)$$

$$N_{ολ} = N_0 + N_E + mg \quad (30β)$$

όπου  $M_E$ ,  $N_E$  και  $A$  είναι οι μέγιστες τιμές της σεισμικής ροπής της ανωδομής, της σεισμικής αξονικής δύναμης της ανωδομής και της επιτάχυνσης του εδάφους, αντίστοιχα.

Η συνολική στροφική ακαμψία του συστήματος είναι το άθροισμα των στροφικών ακαμψιών της ανωδομής και του εδάφους:  $K_{φ,ολ} = K_{φ,εδ} + K_{φ,αν}$ . Επομένως, η μέγιστη στροφή του πεδίου προκύπτει από τη σχέση:

$$\varphi_{max} = \frac{M_{ολ}}{K_{φ,εδ} + K_{φ,αν}} \quad (31)$$

Η γωνία αυτή είναι η γωνία στροφής που θα προέκυπτε θεωρώντας ότι δεν συμβαίνει αποκόλληση του πεδίου από το έδαφος, αφού λαμβάνεται υπόψη η πλήρης δυσκαμψία του εδάφους. Στην πραγματικότητα, μετά τη μερική αποκόλληση του πεδίου, η δυσκαμψία του εδάφους μειώνεται και επομένως η σχέση (31) υποεκτιμά τη μέγιστη γωνία στροφής. Η εκτίμηση όμως της μειωμένης τιμής της δυσκαμψίας του εδάφους θα απαιτούσε μία επαναληπτική διαδικασία, η οποία συνήθως δεν γίνεται στην πράξη. Αυτό που συνήθως γίνεται είναι επίλυση και υπολογισμός των φορτίων που μεταφέρονται στο πέδιλο, λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη δυσκαμψία του εδάφους  $K_{φ,εδ}$ , και στη συνέχεια έλεγχος του πεδίου με αυτά τα φορτία, ανεξάρτητα του εάν συμβαίνει αποκόλληση ή όχι. Η θεώρηση που γίνεται εδώ είναι σύμφωνη με αυτή τη συνήθη πρακτική.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η  $M_{ολ}$  είναι η συνολική ροπή που αντιστοιχεί σε πάκτωση στη βάση του υποστυλώματος. Ένα τμήμα αυτής παραλαμβάνεται από την ανωδομή μέσω του στροφικού ελατηρίου  $K_{φ,αν}$  και η υπόλοιπη από το έδαφος μέσω της στροφικής δυσκαμψίας της θεμελίωσης Winkler,  $K_{φ,εδ}$ . Το τμήμα της ροπής που αναλαμβάνεται από την ανωδομή αντιστοιχεί ουσιαστικά στην εκτόνωση της ροπής στη βάση του υποστυλώματος λόγω της στροφής του πεδίου. Επομένως, η τελική ροπή στη βάση του στύλου θα είναι:

$$M_{υποστ} = (M_0 + M_E) - K_{φ,αν} \varphi_{max} \quad (32)$$

Αντίστοιχα, η ροπή που παραλαμβάνει το πέδιλο ισούται με:

$$M_{πεδ} = K_{φ,εδ} \varphi_{max} = M_{υποστ} + mgAh \quad (33)$$

Για τα παραπάνω φορτία του πεδίου μπορούν να υπολογιστούν το μήκος επαφής και η μέγιστη τάση αιχμής από τις κλασικές σχέσεις της ψευδοστατικής ανάλυσης:

**Πλήρης επαφή :**



$$s = b \quad (34\alpha)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\text{ολ}}}{b} + \frac{6M_{\text{πεδ}}}{b^2} \quad (34\beta)$$

**Μερική αποκόλληση :**

$$s = \frac{3}{2}b - \frac{3M_{\text{πεδ}}}{N_{\text{ολ}}} \quad (35\alpha)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{2N_{\text{ολ}}}{s} \quad (35\beta)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι για μεγάλες τιμές ροπής και μικρές τιμές αξονικής δύναμης, η εξίσωση (35α) μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές τιμές  $s$ , που δεν έχουν φυσικό νόημα. Σε αυτές τις περιπτώσεις θέτουμε  $s=0$ , θεωρώντας ότι έχει συμβεί πλήρης αποκόλληση του πεδίου από το έδαφος. Φυσικά, όταν συμβαίνει αυτό η τάση εδάφους απειρίζεται.

## 5.6 Αποτελέσματα για ημιτονική διέγερση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παραμετρική διερεύνηση γίνεται για ημιτονικά σεισμικά φορτία, ώστε να είναι ευκολότερη η εξαγωγή συμπερασμάτων. Η ανάλυση γίνεται με τις παρακάτω παραδοχές:

- Τα σεισμικά φορτία της ανωδομής είναι ημιτονικές συναρτήσεις συχνότητας  $\omega=2\pi/T$ :

$$M_E(t) = M_E \cdot \sin(\omega t) \quad (36\alpha)$$

$$N_E(t) = N_E \cdot \sin(\omega t) \quad (36\beta)$$

- Λαμβάνεται υπόψη μόνο η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης του εδάφους με την ίδια συχνότητα  $\omega$  με τα φορτία της ανωδομής:

$$\ddot{x}_g(t) = A \cdot \sin(\omega t) \quad (37)$$

Εδώ γίνεται η παραδοχή ότι τα σεισμικά φορτία της ανωδομής έχουν την ίδια συχνότητα με τη διέγερση. Η παραδοχή αυτή είναι σωστή για τη “steady-state” απόκριση της ανωδομής σε ημιτονική διέγερση, αλλά δεν ισχύει για την άμεση απόκριση της κατασκευής, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενός σεισμού, επειδή, αμέσως μετά την επιβολή της διέγερσης η απόκριση της ανωδομής επηρεάζεται κυρίως από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Επειδή όμως στην παρούσα ανάλυση η επιτάχυνση του εδάφους επηρεάζει μόνο τα σεισμικά φορτία που οφείλονται στη μάζα του πεδίου, τα οποία είναι γενικώς μικρά σε σύγκριση με τα σεισμικά φορτία της ανωδομής, η εισαγωγή μιας επιπλέον παραμέτρου, που θα αντιστοιχούσε σε διαφορετική συχνότητα εδαφικής κίνησης, μάλλον θα περιέπλεκε, παρά θα διευκόλυνε την εξαγωγή συμπερασμάτων.

- Οι αναλύσεις γίνονται για ορθογωνικό πέδιλο με ειδικό βάρος  $\gamma=25 \text{ KN/m}^3$  και πλάτος  $b=4.00 \text{ m}$ . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η επιρροή των απόλυτων διαστάσεων του πεδίου λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση με την αδιάστατη παράμετρο  $\Pi_1 = \omega_\phi / \rho$ , γι’ αυτό και σε όλες τις αναλύσεις το πλάτος  $b$  παραμένει σταθερό. Η απόδειξη ότι η τιμή του πλάτους  $b$  δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα γίνεται στη διερεύνηση της επιρροής της παραμέτρου  $\Pi_1$ .

- Στις περιπτώσεις που η δυναμική ανάλυση οδηγεί σε πλήρη αποκόλληση του πεδίου από το έδαφος, ο υπολογισμός της απόκρισης σταματάει και τίθεται  $s=0$ . Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι τιμές της μέγιστης γωνίας στροφής και της μέγιστης τάσης εδάφους που δίνονται στα διαγράμματα αντιστοιχούν στην απόκριση του πεδίου μέχρι τη στιγμή της πλήρους αποκόλλησης. Αντίθετα, στην ψευδοστατική θεώρηση δεν δίνεται τιμή για την τάση εδάφους, αφού αυτή απειρίζεται για  $s=0$ .
- Για τη διερεύνηση της επιρροής κάθε παραμέτρου υπολογίζονται τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές της συγκεκριμένης παραμέτρου, ενώ όλες οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές. Σε όλες τις περιπτώσεις, για τις παραμέτρους που δεν μεταβάλλονται χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τιμές:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \omega_\varphi / \rho = 30.00 \\ \Pi_2 &= K_{\varphi, \text{αν}} / K_{\varphi, \text{εδ}} = 2.00 \\ \Pi_3 &= T / T_\varphi = 2.00 \text{ (αντιστοιχεί σε } T / T_z = 0.40) \\ \Pi_4 &= \zeta_\varphi = 0.15 \text{ (αντιστοιχεί σε } \zeta_z = 0.05) \\ \Pi_5 &= H / b = 0.20 \\ \Pi_6 &= e_0 / b = 0.05 \\ \Pi_7 &= e_E / b = 1.00 \\ \Pi_8 &= N_0 / W_{\text{πεδ}} = 7.50 \\ \Pi_9 &= N_E / N_0 = 0.20 \\ \Pi_{10} &= A / g = 0.50 \end{aligned}$$

#### **Επιρροή της παραμέτρου $\Pi_1 = \omega_\varphi / \rho$ :**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παράμετρος  $\Pi_1$  είναι ένα μέτρο της δυσκαμψίας της θεμελίωσης Winkler. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχ. 3, όπου διακύμανση των τιμών της σταθεράς  $k_0$  της θεμελίωσης Winkler, που αντιστοιχούν στις τιμές του λόγου  $\omega_\varphi / \rho$  που εξετάζονται, δίνεται επίσης στο πάνω μέρος κάθε διαγράμματος.

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι, ενώ η γωνία στροφής μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνεται ο λόγος  $\omega_\varphi / \rho$ , που είναι λογικό αφού αυξάνεται αντίστοιχα και η δυσκαμψία του εδάφους, το ελάχιστο μήκος επαφής και η ανηγμένη μέγιστη τάση εδάφους παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα, εκτός από πολύ μαλακά εδάφη. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά έχουν προκύψει για σταθερή τιμή της παραμέτρου  $\Pi_3$ . Η αλλαγή της ελαστικότητας της θεμελίωσης οδηγεί σε αλλαγή των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος και επομένως η διατήρηση σταθερού λόγου  $\Pi_3$  σημαίνει αντίστοιχη αλλαγή της συχνότητας διέγερσης. Τα αποτελέσματα του Σχ. 3 δεν ισχύουν για σταθερή διέγερση, αφού σε αυτή την περίπτωση μπορούν να συμβούν φαινόμενα συντονισμού, σαν αυτά που περιγράφονται παρακάτω, όταν διερευνάται η επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_3$ .

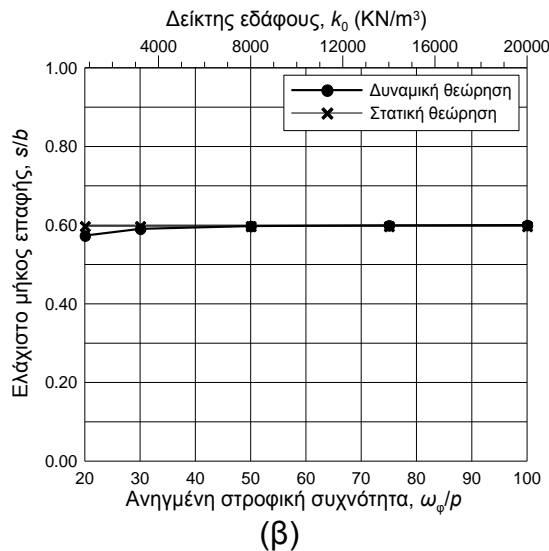
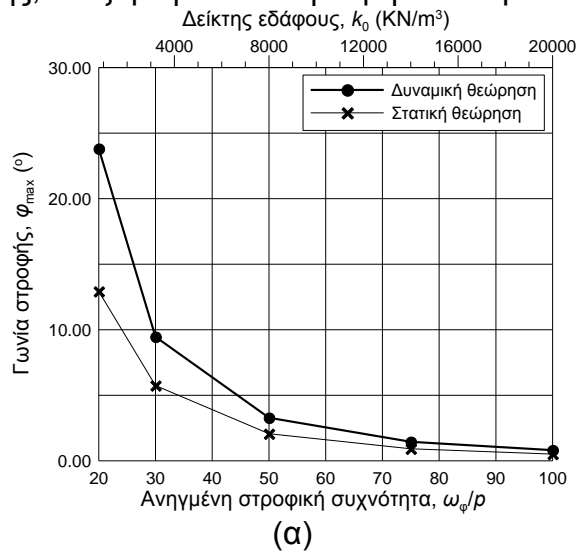
Σε σύγκριση με την ψευδοστατική ανάλυση, η δυναμική ανάλυση δίνει σχεδόν το ίδιο ελάχιστο μήκος επαφής αλλά μεγαλύτερες τάσεις εδάφους κατά 10% περίπου, που οφείλονται στις μεγαλύτερες γωνίες στροφής. Δεδομένου όμως του ότι η τάση εδάφους είναι πρακτικά ανεξάρτητη από το λόγο  $\omega_\varphi / \rho$ , η διαφορά αυτή μεταξύ δυναμικής και ψευδοστατικής ανάλυσης δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως τυπική και θα είναι διαφορετική για άλλες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων.

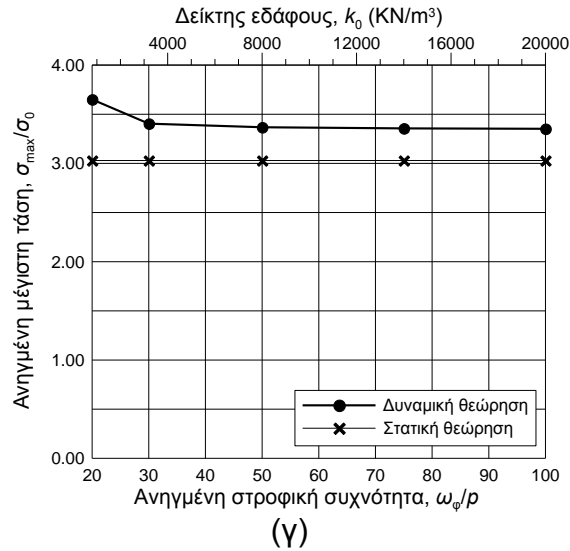
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 3 έχουν προκύψει για πλάτος πεδίου  $b=4.00$  m. Αναλύσεις έγιναν και για πλάτος πεδίου  $b=2.00$  m και τις ίδιες τιμές παραμέτρων. Προέκυψαν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα, γεγονός που

αποδεικνύει ότι η όποια επιρροή του απόλυτου μεγέθους του πεδίου λαμβάνεται υπόψη αυτόματα, εφόσον η παράμετρος  $\Pi_1$  διατηρείται σταθερά.

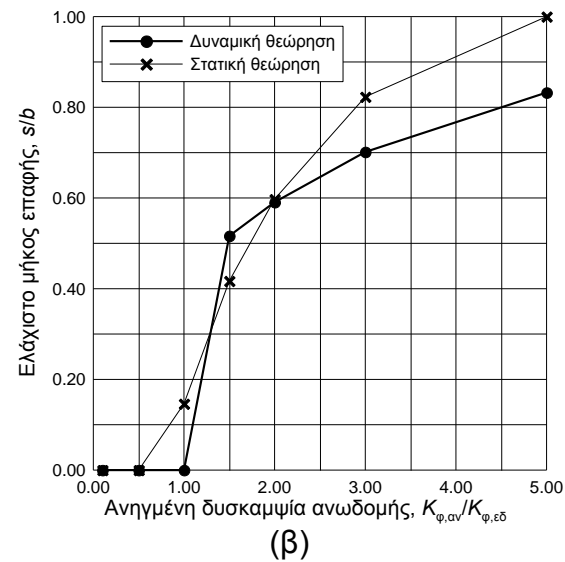
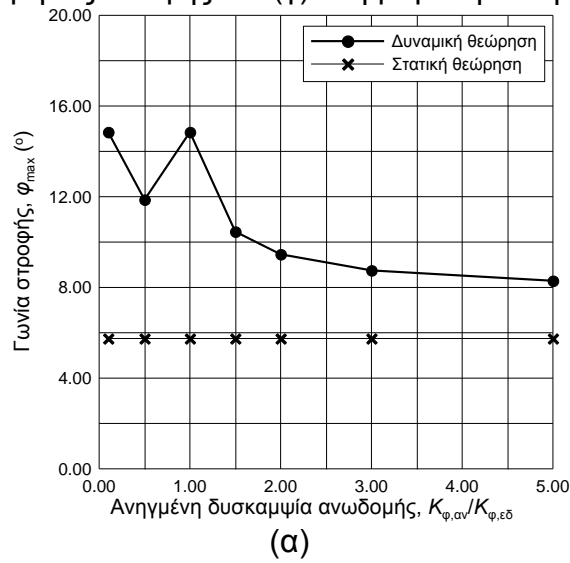
**Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_2=K_{\varphi,αν}/K_{\varphi,εδ}$  :**

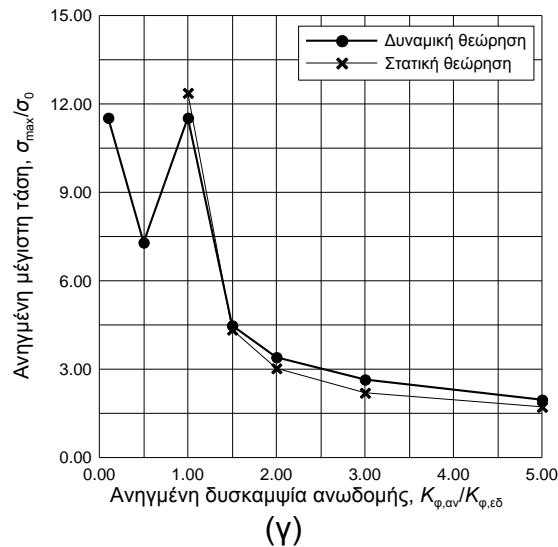
Η παράμετρος  $\Pi_2$  αναφέρεται στη σχετική δυσκαμψία της ανωδομής ως προς τη δυσκαμψία της θεμελίωσης Winkler. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχ. 4 και δείχνουν ότι η δυσκαμψία της ανωδομής επηρεάζει σημαντικά την απόκριση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε σταθερή τιμή του αθροίσματος  $K_{\varphi,αν}+K_{\varphi,εδ}$ , ανεξάρτητα από το λόγο  $K_{\varphi,αν}/K_{\varphi,εδ}$ , αφού η τιμή της παραμέτρου  $\Pi_1$ , που εξαρτάται από τη συνολική στρωφική ακαμψία, παραμένει σταθερή. Γι' αυτό και η ψευδοστατική θεώρηση, που υπολογίζει τη γωνία στρώφης από τη συνολική στρωφική δυσκαμψία για πλήρη επαφή [βλ. εξ. (31)], προβλέπει την ίδια γωνία στρώφης, ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου  $K_{\varphi,αν}/K_{\varphi,εδ}$ .





Σχ. 3. Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_1 = \omega_\phi/\rho$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.





Σχ. 4. Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_2=K_{\phi,av}/K_{\phi,\epsilon\delta}$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.

Αντίθετα, στη δυναμική ανάλυση προκύπτει γενικώς αύξηση της γωνίας στροφής όσο μειώνεται ο λόγος  $K_{\phi,av}/K_{\phi,\epsilon\delta}$ , επειδή λαμβάνεται υπόψη η πραγματική δυσκαμψία του εδάφους κατά τη διάρκεια της αποκόλλησης, η οποία είναι μικρότερη για μικρότερες τιμές της  $\Pi_2$ , επειδή και το μήκος έδρασης του πεδίου είναι μεγαλύτερο, όπως προκύπτει από το διάγραμμα (β) του Σχ. 4.

Οι ανωμαλίες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα της γωνίας στροφής και της τάσης εδάφους για  $K_{\phi,av}/K_{\phi,\epsilon\delta} < 1$  δεν είναι αξιόπιστες, επειδή σε αυτές τις περιπτώσεις συμβαίνει πλήρης αποκόλληση και οι αντίστοιχες τιμές των διαγραμμάτων έχουν προκύψει από την απόκριση μέχρι τη στιγμή της πλήρους αποκόλλησης.

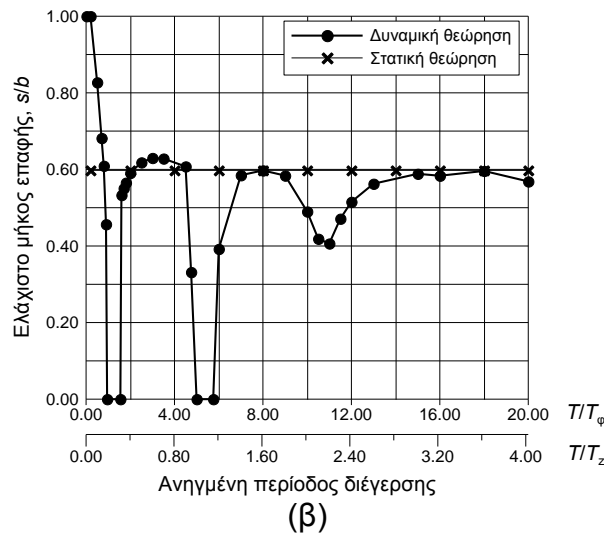
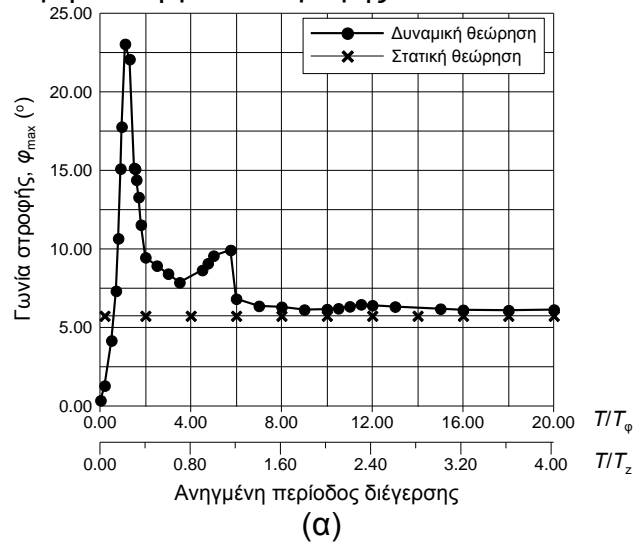
Γενικώς, τα αποτελέσματα που δίνονται στο Σχ. 4 ήταν αναμενόμενα, αφού η αύξηση του λόγου  $K_{\phi,av}/K_{\phi,\epsilon\delta}$  αυξάνει το τμήμα της ροπής που παραλαμβάνεται από την ανωδομή και μειώνει τη ροπή που μεταφέρεται στο πέδιλο, όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (32) και (33). Γι' αυτό και η τάση εδάφους μειώνεται με την αύξηση της  $\Pi_2$ .

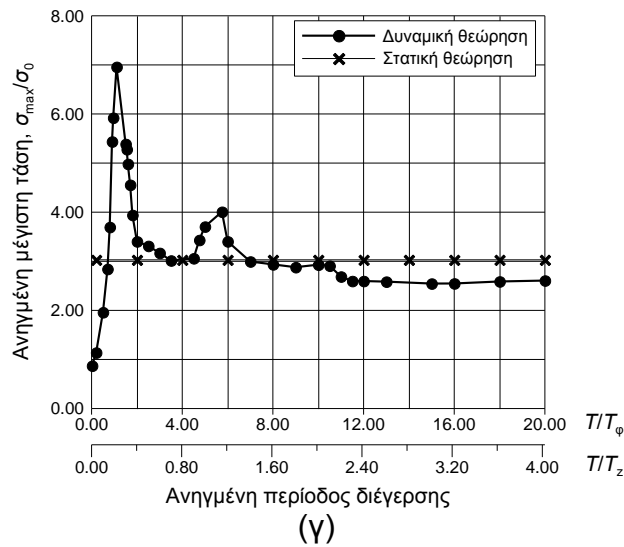
Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρότι η ψευδοστατική θεωρήση υποεκτιμά τη γωνία στροφής, προβλέπει ικανοποιητικά το ελάχιστο μήκος επαφής και τη μέγιστη τάση εδάφους, τουλάχιστον για τις παραμέτρους που αντιστοιχούν στα διαγράμματα του Σχ. 4.

### Επιρροή των παραμέτρων $\Pi_{3,\alpha}=T/T_{\phi}$ και $\Pi_{3,\beta}=T/T_z$

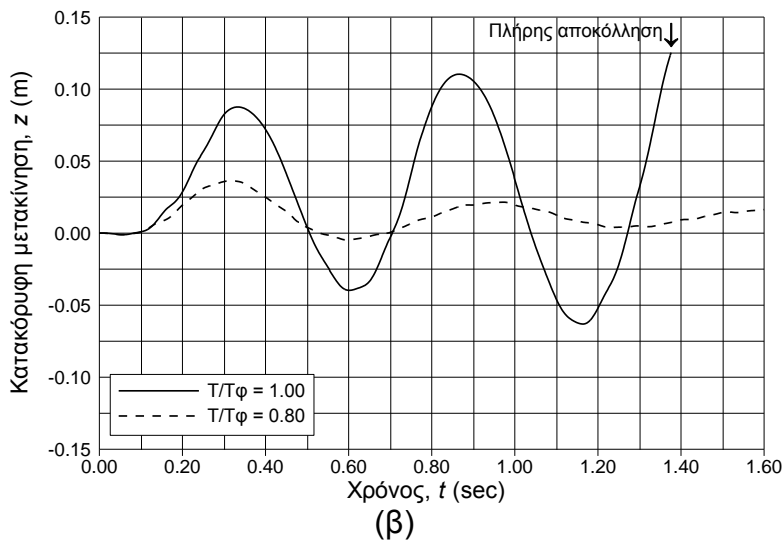
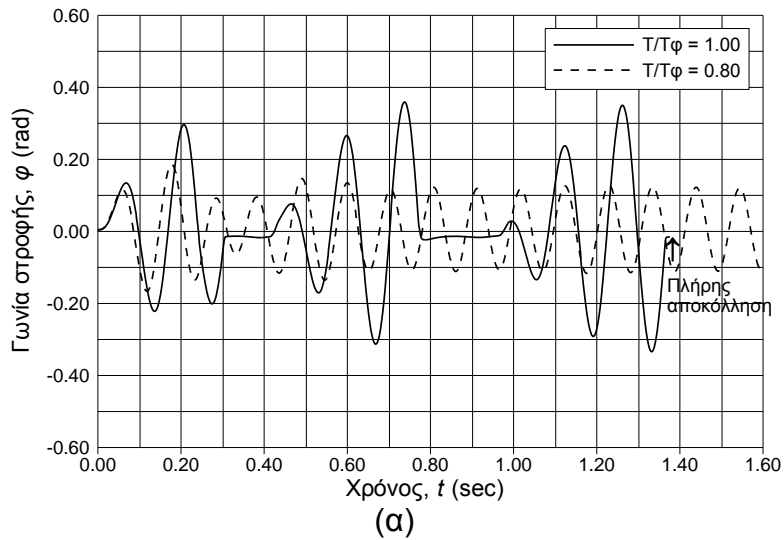
Οι παράμετροι  $\Pi_{3,\alpha}$  και  $\Pi_{3,\beta}$  εκφράζουν την τιμή της περιόδου διέγερσης συναρτήσει των ιδιοπεριόδων των στροφικών και κατακόρυφων ταλαντώσεων του συστήματος για πλήρη επαφή. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχ. 5, όπου στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων δίνονται οι τιμές και για τους δύο λόγους  $T/T_{\phi}$  και  $T/T_z$ . Όπως αναμενόταν, φαινόμενα συντονισμού παρατηρούνται όταν  $T/T_{\phi} \approx 1.0$  και  $T/T_z \approx 1.0$ , που είναι περισσότερο έντονα στο διάγραμμα (β) του Σχ. 5. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θεωρητικές κορυφές των καμπύλων συντονισμού σε αυτό το διάγραμμα αντιστοιχούν σε τιμές των λόγων  $T/T_{\phi}$  και  $T/T_z$  λίγο μεγαλύτερων από τη μονάδα, που οφείλεται στην αύξηση των "ενεργών" περιόδων  $T_{\phi}$  και  $T_z$  λόγω της μερικής αποκόλλησης.

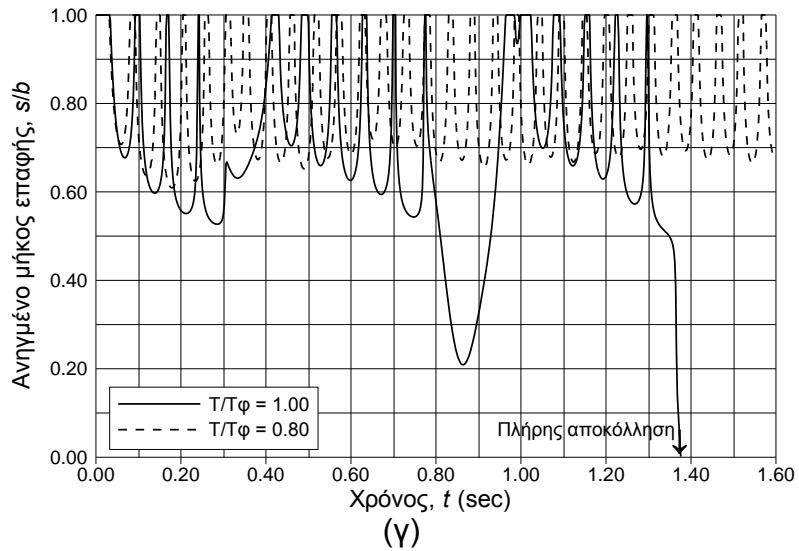
Τα φαινόμενα συντονισμού που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος φαίνονται και στις χρονοϊστορίες της απόκρισης για  $T/T_\phi=0.80$  και  $T/T_\phi=1.00$ , που δίνονται στο Σχ. 6. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση ο συντονισμός συμβαίνει επειδή η περίοδος διέγερσης είναι περίπου ίση με την ιδιοπερίοδο για στροφικές ταλαντώσεις, η πλήρης αποκόλληση δεν συμβαίνει όταν η γωνία στροφής γίνεται μέγιστη, αλλά όταν η προς τα πάνω κατακόρυφη μετακίνηση φθάσει τη μέγιστη τιμή της, η οποία συμβαίνει για σχεδόν μηδενική γωνία στροφής.



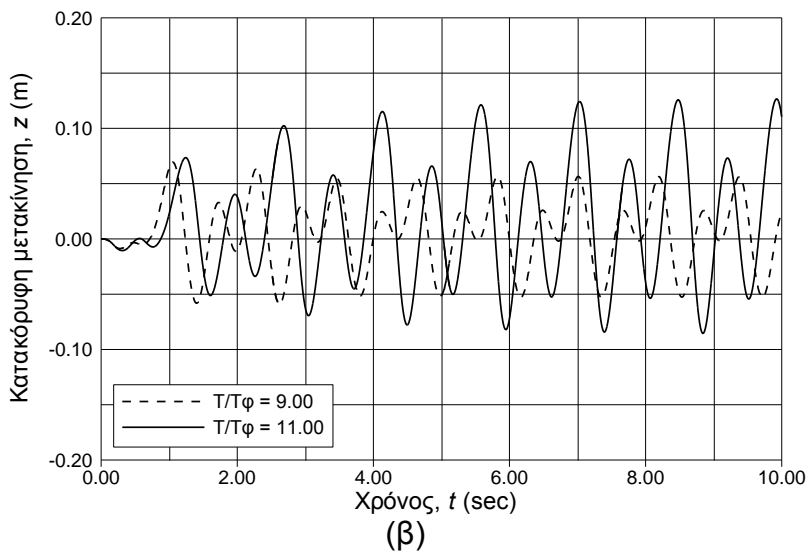
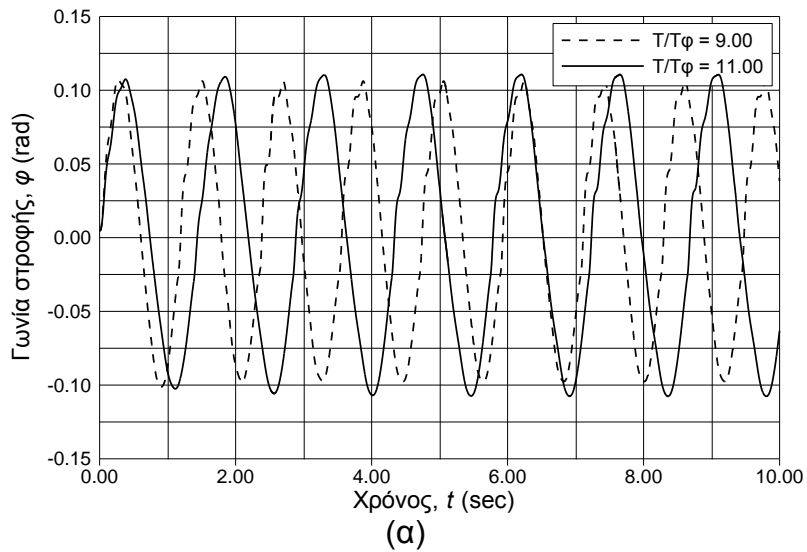


Σχ. 5. Επιρροή των παραμέτρων  $\Pi_{3,\alpha}=T/T_\phi$  και  $\Pi_{3,\beta}=T/T_z$  (α) στη μέγιστη γωνία στρωφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.

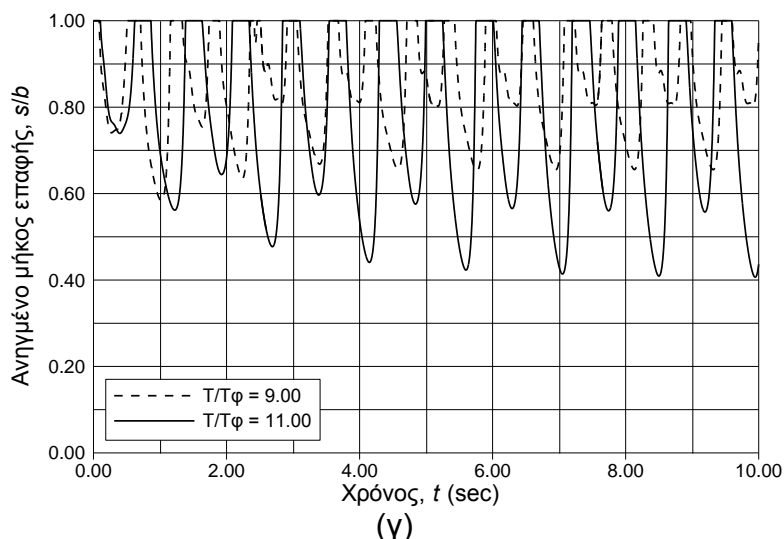




Σχ. 6. Χρονο-ιστορία της απόκρισης για  $T/T_\phi=0.80$  και  $T/T_\phi=1.00$ .







Σχ. 7. Χρονο-ιστορία της απόκρισης για  $T/T_{\phi}=9.00$  και  $T/T_{\phi}=11.00$ .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, γενικώς, πριν συμβεί αποκόλληση οι στροφικές και οι κατακόρυφες ταλαντώσεις είναι πρακτικά ασύζευκτες, αλλά μετά την πρώτη φορά που συμβαίνει αποκόλληση οι δύο τύποι ταλαντώσεων είναι συζευγμένοι μεταξύ τους.

Κρίνοντας από το διάγραμμα (β) του Σχ. 5, φαίνεται ότι συντονισμός παρατηρείται και για έναν άλλο λόγο της ανηγμένης περιόδου, που για τα δεδομένα των συγκεκριμένων αναλύσεων βρίσκεται στις περιοχές  $T/T_{\phi} \approx 11.0$  και  $T/T_z \approx 2.2$ . Αυτός ο τρίτος συντονισμός δεν ήταν αναμενόμενος και δεν είναι προφανές πού οφείλεται, αφού το σύστημα διαθέτει μόνο δύο ιδιοσυχνότητες, που αντιστοιχούν στις στροφικές και τις κατακόρυφες ταλαντώσεις. Η περίοδος της διέγερσης που αντιστοιχεί στην τιμή  $T/T_{\phi}=11.0$  είναι  $T=1.45$  sec, δηλαδή διέγερση μεγάλης περιόδου που είναι μάλλον απίθανο να συμβεί σε περίπτωση σεισμού.

Όπως προκύπτει από τις χρονοϊστορίες της απόκρισης που δίνονται στο Σχ. 7, ο συντονισμός αυτός φαίνεται να αντιστοιχεί σε κατακόρυφες ταλαντώσεις, αφού σύγκριση των αποκρίσεων για  $T/T_{\phi}=9.0$  και  $T/T_{\phi}=11.0$  δείχνει μικρή μεταβολή της γωνίας στροφής αλλά σημαντική μεγέθυνση της κατακόρυφης κίνησης με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του μήκους επαφής. Πρέπει να σημειωθεί ότι αναλύσεις που έγιναν με μικρότερες τιμές του συντελεστή απόσβεσης της θεμελίωσης, που δεν παρουσιάζονται εδώ για λόγους οικονομίας, έδειξαν πολύ πιο έντονα φαινόμενα συντονισμού σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Σε κάθε περίπτωση, παρότι το φαινόμενο δεν φαίνεται να επηρεάζει τις συνήθεις περιπτώσεις της πράξης, χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

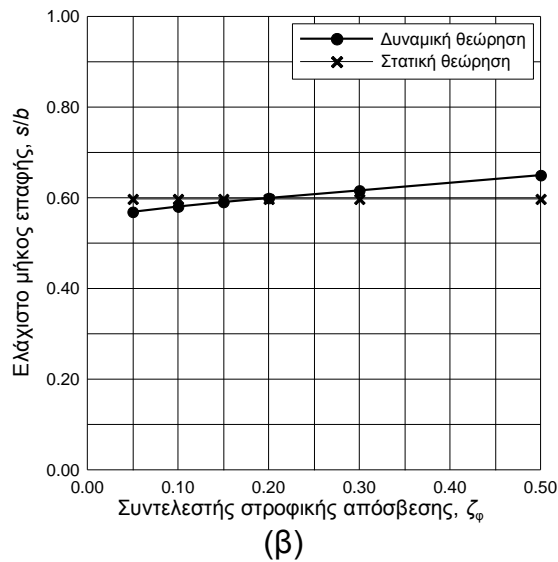
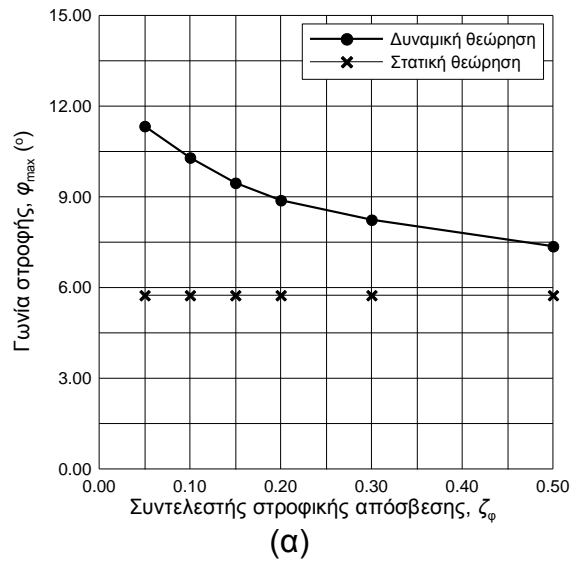
Αντίθετα με τις δυναμικές αναλύσεις, η ψευδοστατική θεώρηση δίνει σταθερές τιμές για τη μέγιστη γωνία στροφής και τους λόγους  $s/b$  και  $\sigma_{\max}/\sigma_0$ , ανεξάρτητα από την τιμή της περιόδου διέγερσης, αφού βασίζεται μόνο στις μέγιστες τιμές των δυναμικών φορτίων. Είναι προφανές, επομένως, ότι η στατική θεώρηση υποεκτιμά σημαντικά την απόκριση του πεδίου εάν υπάρχει κίνδυνος συντονισμού.

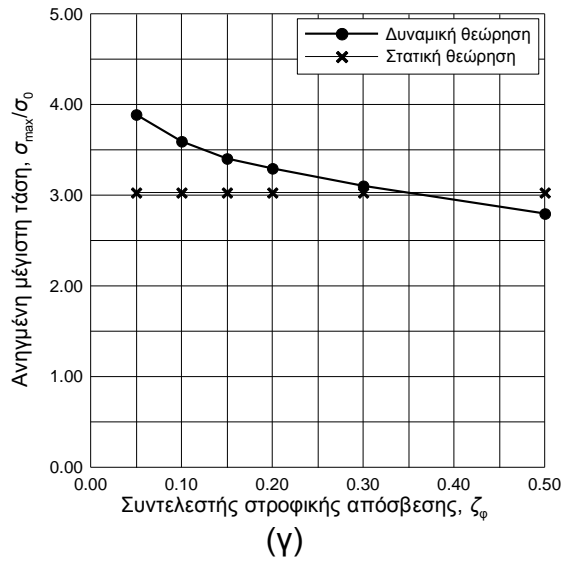
#### Επιρροή της παραμέτρου $P4=\zeta\phi$ :

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση της απόσβεσης της θεμελίωσης μειώνει τη γωνία στροφής και τις τάσεις εδάφους, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα που δίνονται στο Σχ. 8. Αντίθετα, το ελάχιστο μήκος επαφής δεν φαίνεται να

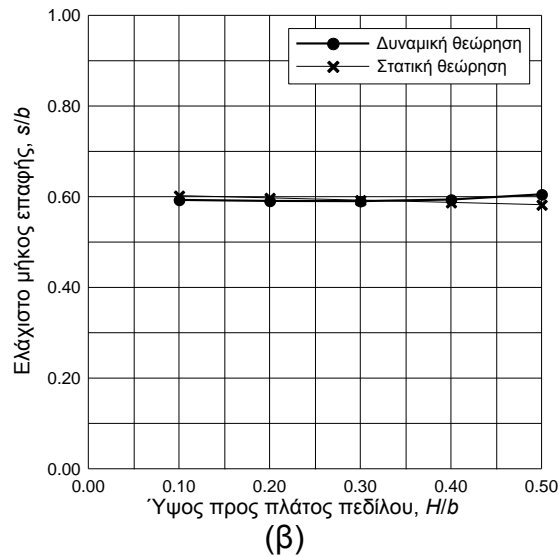
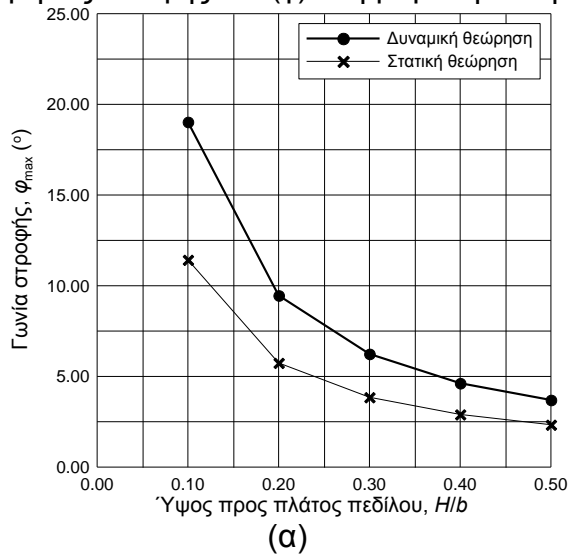
επηρεάζεται σημαντικά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διακύμανση του συντελεστή απόσβεσης  $\zeta_{\phi}$  των στροφικών ταλαντώσεων μεταξύ των τιμών 0.05 και 0.50 αντιστοιχεί σε συντελεστή απόσβεσης των κατακόρυφων ταλαντώσεων  $\zeta_z$  που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.02 και 0.16.

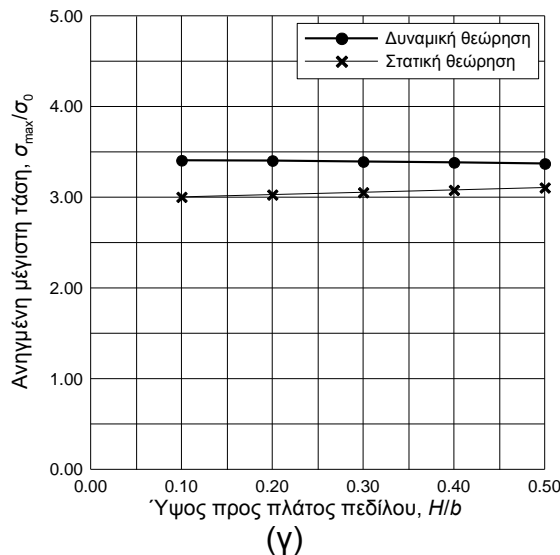
Η ψευδοστατική ανάλυση δεν επηρεάζεται από το συντελεστή απόσβεσης και γενικώς υποεκτιμά τη γωνία στροφής και την τάση εδάφους, ιδιαίτερα για μικρές τιμές της απόσβεσης.





Σχ. 8. Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_4 = \zeta_\phi$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.





Σχ. 9. Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_5=H/b$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.

#### Επιρροή της παραμέτρου $\Pi_5=H/b$ :

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα που δίνονται στο Σχ. 9, ο λόγος  $H/b$  δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το μήκος επαφής και την ανηγμένη τάση εδάφους, ενώ η γωνία στροφής μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του λόγου  $H/b$ . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι αναλύσεις γίνονται για σταθερό πλάτος πεδίου  $b=4.00$  m. Επομένως, ο λόγος  $H/b$  καθορίζει το ύψος του πεδίου και τη μάζα του. Εφόσον οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές, η αλλαγή της μάζας του πεδίου όταν αλλάζει ο λόγος  $H/b$  οδηγεί σε διαφορετικές τιμές των φορτίων αλλά και της δυσκαμψίας του εδάφους. Για το λόγο αυτό, η μείωση της γωνίας στροφής με την αύξηση του λόγου  $H/b$  δεν είναι εύκολο να εξηγηθεί.

Η ψευδοστατική θεώρηση και σε αυτή την περίπτωση φαίνεται να υποεκτιμά τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης. Η διαφορά όμως μεταξύ των καμπυλών που αντιστοιχούν στη δυναμική και τη στατική θεώρηση, που δίνονται στο Σχ. 9, μπορεί να είναι διαφορετική για διαφορετικές τιμές των υπολοίπων παραμέτρων.

#### Επιρροή της παραμέτρου $\Pi_6=e_0/b$

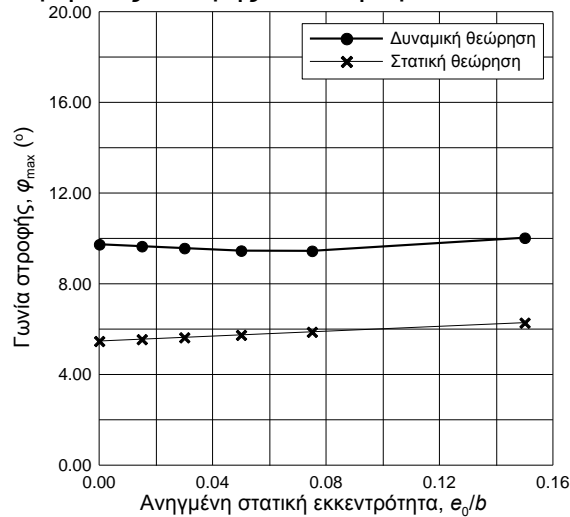
Η παράμετρος  $\Pi_6$  είναι ένα μέτρο της στατικής ροπής  $M_0$  στη βάση του υποστυλώματος, η οποία συνήθως είναι αρκετά μικρότερη από τη ροπή  $M_E$  που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Γι' αυτό και στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 10 φαίνεται ότι ο λόγος  $e_0/b$  δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα.

Το γεγονός ότι η ανηγμένη τάση εδάφους μειώνεται με την αύξηση της στατικής ροπής  $M_0$  οφείλεται στο ότι αυξάνεται η τάση  $\sigma_0$ , με βάση την οποία γίνεται η κανονικοποίηση, ενώ η μέγιστη τάση δεν αυξάνεται ανάλογα, επειδή οφείλεται κυρίως στη σεισμική ροπή, που παραμένει σταθερή.

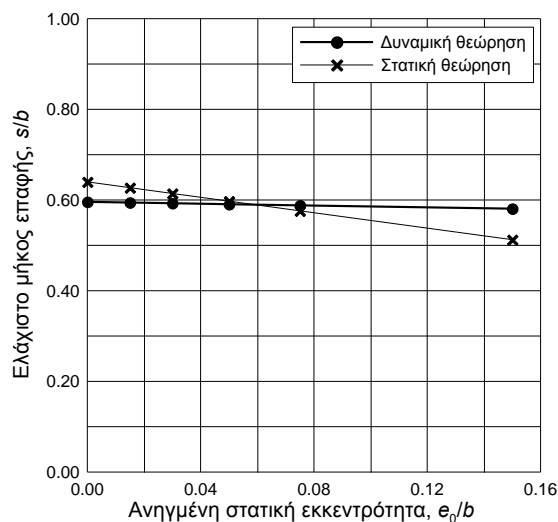
#### Επιρροή της παραμέτρου $\Pi_7=eE/b$

Η παράμετρος  $\Pi_7$  εκφράζει το μέγεθος της σεισμικής ροπής  $M_E$  που αναπτύσσεται στη βάση του υποστυλώματος, και όπως είναι αναμενόμενο επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του Σχ. 11, με την αύξηση της σεισμικής ροπής αυξάνονται σχεδόν γραμμικά η γωνία στροφής και η τάση εδάφους και μειώνεται δραστικά η ελάχιστη επιφάνεια επαφής.

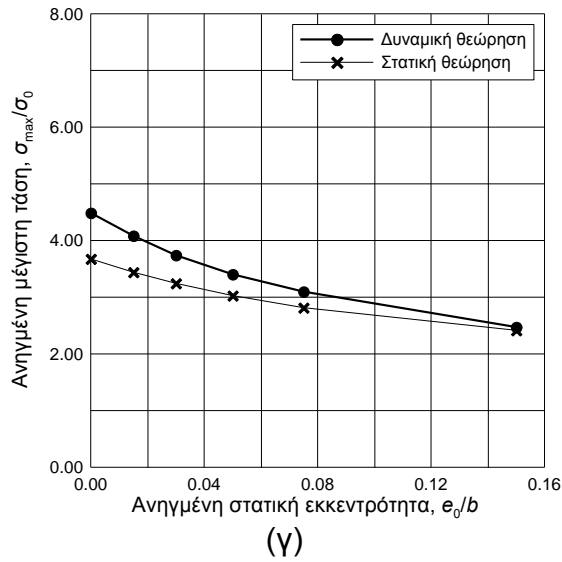
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης με αυτά της ψευδοστατικής. Έτσι, ενώ η στατική θεώρηση υποεκτιμά σημαντικά τη μέγιστη γωνία στροφής, εκτιμά αρκετά ικανοποιητικά τη μέγιστη τάση εδάφους για μικρές τιμές του λόγου  $e_E/b$ , έως την τιμή 1.25 περίπου. Για μεγαλύτερες όμως τιμές της δυναμικής εκκεντρότητας, και ιδιαίτερα για τιμές κοντά σε αυτές που προκαλούν ανατροπή του πεδίου, η στατική ανάλυση υπερεκτιμά σημαντικά την τάση εδάφους, αφού προβλέπει σχεδόν εκθετική αύξηση της  $\sigma_{max}$  με την τιμή της  $e_E$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για  $e_E/b > 1.75$  και η δυναμική ανάλυση οδηγεί σε πλήρη αποκόλληση, αλλά χωρίς σημαντική αύξηση της μέγιστης τάσης εδάφους μέχρι τη στιγμή που συμβαίνει αυτό. Ενδιαφέρουσα είναι επίσης η αρκετά καλή εκτίμηση του ελάχιστου μήκους επαφής από την ψευδοστατική θεώρηση.



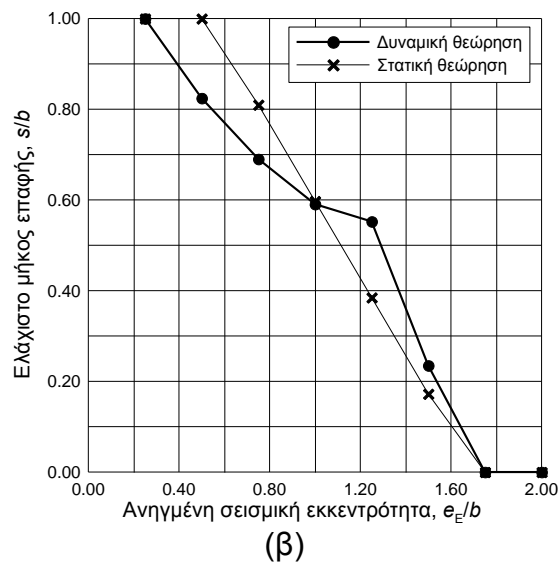
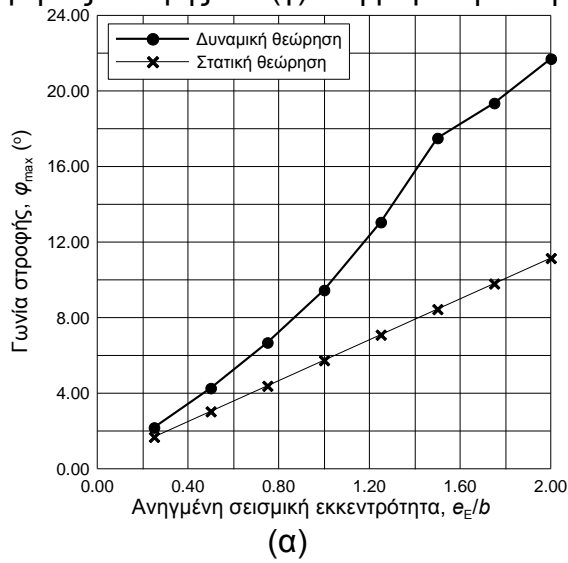
(α)

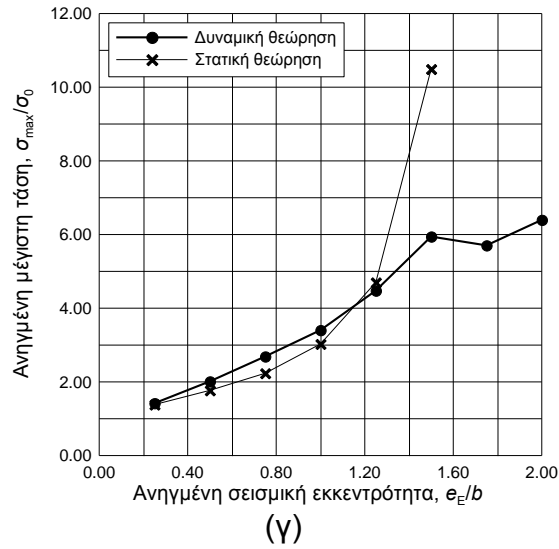


(β)

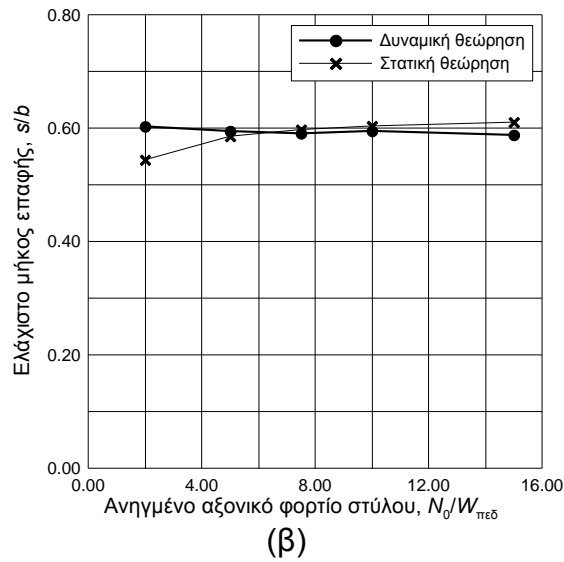
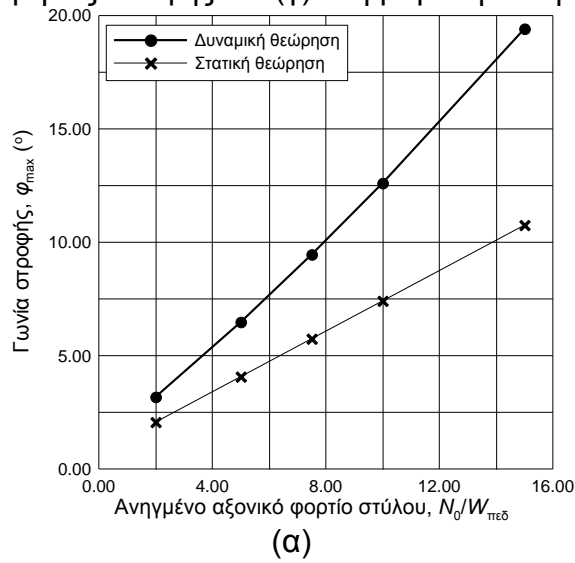


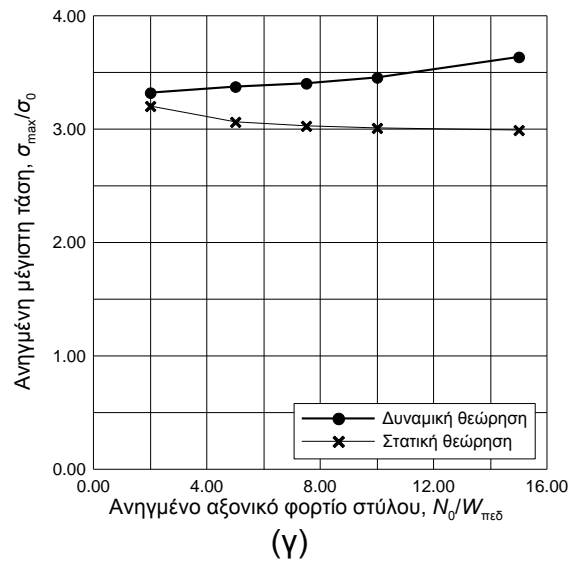
Σχ. 10. Επιρροή της παραμέτρου  $\Gamma_6=e_0/b$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.





Σχ. 11. Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_7=e_E/b$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.





Σχ. 12. Επιρροή της παραμέτρου  $\Gamma_8=N_0/W_{TTE\delta}$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.



### **Επιρροή της παραμέτρου $\Pi_8=N_0/W_{πεδ}$ :**

Η παράμετρος  $\Pi_8$  εκφράζει το μέγεθος του στατικού αξονικού φορτίου του υποστύλωματος σε σύγκριση με το βάρος του πεδίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 12, και δείχνουν ότι ενώ η γωνία στροφής αυξάνεται γραμμικά με το λόγο  $N_0/W_{πεδ}$ , η ανηγμένη τάση εδάφους και η ελάχιστη επιφάνεια επαφής δεν φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά.

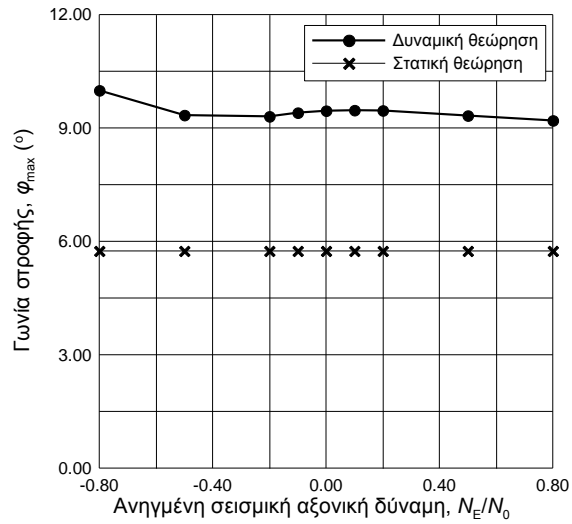
Η αύξηση της γωνίας στροφής με την παράμετρο  $\Pi_8$  οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της  $N_0$  επηρεάζει ανάλογα και τις ροπές  $M_0$  και  $M_E$ , αφού οι λόγοι  $e_0/b$  και  $e_E/b$  παραμένουν σταθεροί. Το γεγονός ότι η ανηγμένη τάση εδάφους παραμένει σχεδόν σταθερή οφείλεται στο ότι και η τάση  $\sigma_0$ , με βάση την οποία γίνεται η κανονικοποίηση, αυξάνει ανάλογα.

### **Επιρροή της παραμέτρου $\Pi_9=N_E/N_0$**

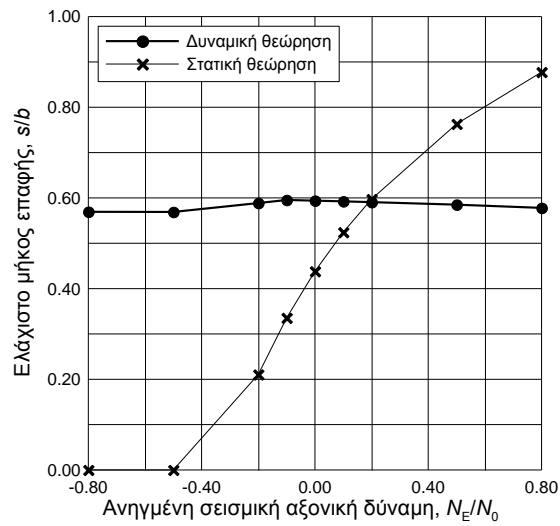
Η σεισμική αξονική δύναμη  $N_E$  που αναπτύσσεται στο υποστύλωμα κατά τη διάρκεια του σεισμού δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση του πεδίου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης που δίνονται στο Σχ. 13. Το συμπέρασμα αυτό είναι σημαντικό γιατί διαφοροποιεί πολύ τη δυναμική από την ψευδοστατική θεώρηση. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του Σχ. 13, στην ψευδοστατική θεώρηση, η μείωση της αξονικής δύναμης  $N_E$  μειώνει ταχύτατα το ελάχιστο μήκος επαφής και αυξάνει σημαντικά την τάση εδάφους, ιδιαίτερα για αρνητικές τιμές της  $N_E$  (εφελκυσμός). Είναι χαρακτηριστικό ότι για εφελκυστικές δυνάμεις μεγαλύτερες από το  $1/2$  της στατικής δύναμης  $N_0$ , η ψευδοστατική ανάλυση προβλέπει μηδενισμό του μήκους επαφής και άπειρη τάση εδάφους. Αντίθετα, οι δυναμικές επιλύσεις δείχνουν σχεδόν μηδενική εξάρτηση της απόκρισης με τη δύναμη  $N_E$ .

Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η ψευδοστατική θεώρηση βασίζεται στην παραδοχή ότι η μέγιστη ροπή και η μέγιστη αξονική δύναμη του υποστύλωματος συμβαίνουν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του μήκους επαφής, εάν η αξονική δύναμη είναι εφελκυστική. Αντίθετα, στις δυναμικές αναλύσεις η σεισμική αξονική δύναμη του υποστύλωματος προκαλεί μικρές μόνο διαφοροποιήσεις στις κατακόρυφες ταλαντώσεις, οι οποίες δεν είναι αρκετά μεγάλες ώστε να διαφοροποιήσουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Αυτό φαίνεται και στις χρονοϊστορίες της απόκρισης που δίνονται στο Σχ. 14 για  $N_E/N_0=0.50$  και  $N_E/N_0=-0.50$ .

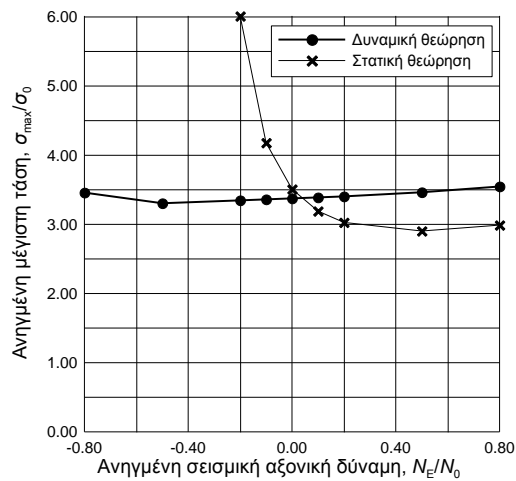
Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, πιστεύουμε ότι η αντιμετώπιση της ψευδοστατικής θεώρησης οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα και ότι τα αποτελέσματα θα ήταν αρκετά πιο κοντά στην πραγματικότητα εάν είχε αμεληθεί η επιρροή της σεισμικής αξονικής δύναμης του υποστύλωματος και η στατική ανάλυση είχε γίνει για  $N_E=0$ .



(α)

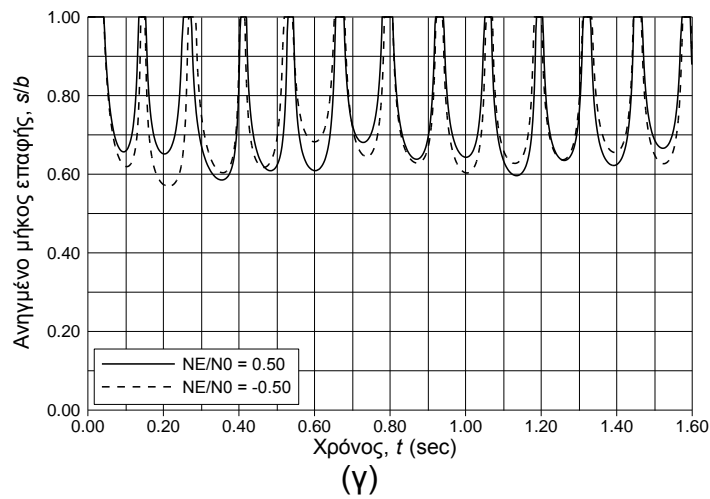
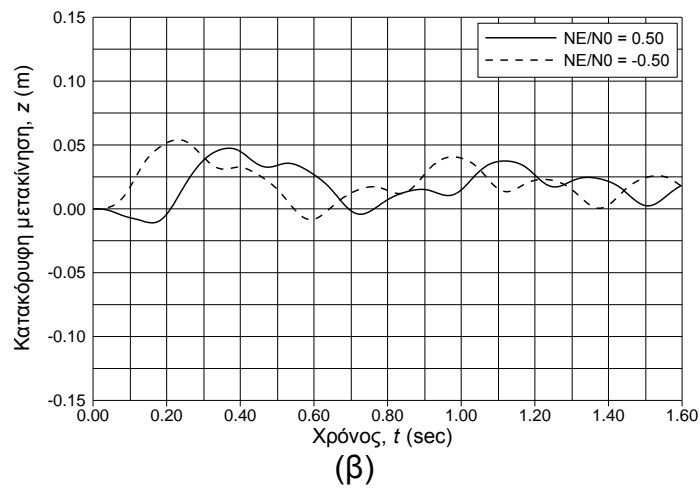
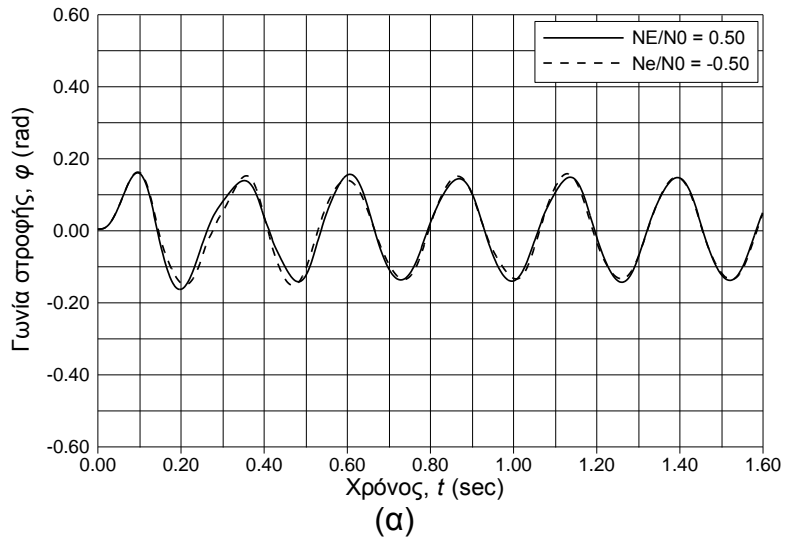


(β)

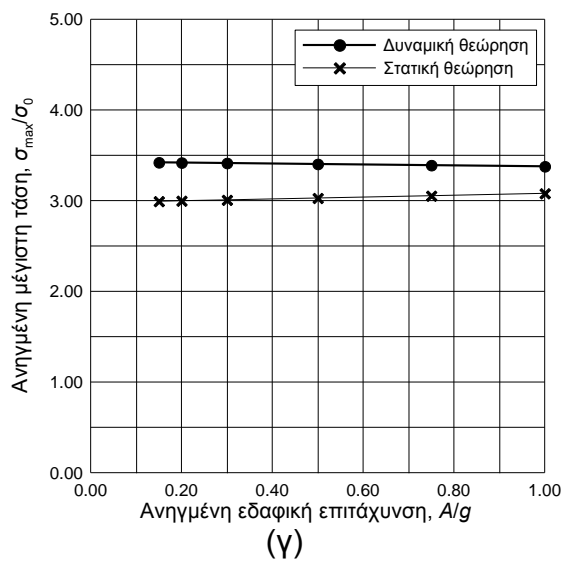
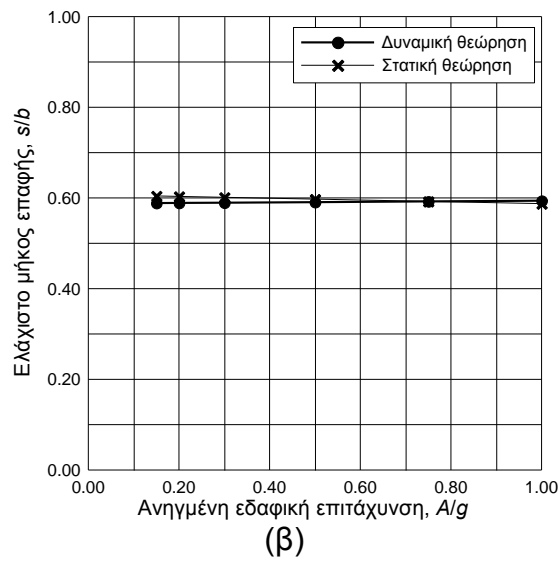
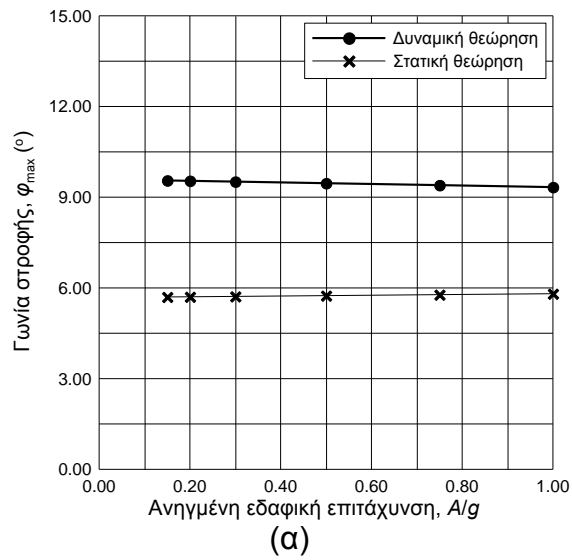


(γ)

Σχ. 13. Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_9=N_E/N_0$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.



Σχ. 14. Χρονοϊστορία της απόκρισης για  $N_E/N_0=0.50$  και  $N_E/N_0=-0.50$ .



Σχ. 15. Επιρροή της παραμέτρου  $\Pi_{10}=A/g$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.

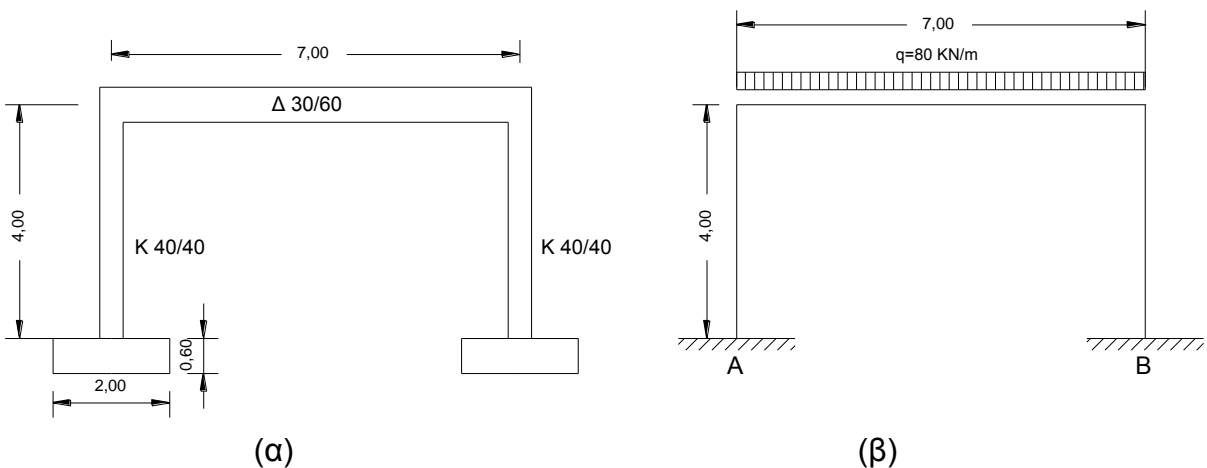
### Επιρροή της παραμέτρου $\Pi_{10}=A/g$

Η παράμετρος  $\Pi_{10}$  ισούται με την ανηγμένη επιτάχυνση του εδάφους,  $A/g$ , η οποία υπεισέρχεται στους υπολογισμούς μόνο στον υπολογισμό των σεισμικών φορτίων του πεδίου, αφού τα σεισμικά φορτία της ανωδομής εκφράζονται μέσω των παραμέτρων  $M_E$  και  $N_E$ . Όπως ήταν αναμενόμενο επομένως, η παράμετρος αυτή δεν επηράζει σημαντικά την απόκριση του πεδίου, η οποία καθορίζεται κυρίως από τα σεισμικά φορτία της ανωδομής.

Ας σημειωθεί ότι σε πραγματικά προβλήματα της πράξης, τα σεισμικά φορτία της ανωδομής είναι πρακτικά ανάλογα της τιμής της  $A/g$ . Στην παρούσα ανάλυση, όμως, η επιρροή κάθε παραμέτρου διερευνάται θεωρώντας όλες τις υπόλοιπες σταθερές, γι' αυτό και τα διαγράμματα του Σχ. 15 έχουν προκύψει για σταθερά σεισμικά φορτία ανωδομής και δείχνουν πολύ μικρή επιρροή της επιτάχυνσης του εδάφους στην απόκριση του πεδίου.

### 5.7 Παράδειγμα σεισμικής διέγερσης

Η δυναμική απόκριση των πεδίων θεμελίωσης υπολογίζεται και για ένα παράδειγμα ενός επίπεδου πλαισίου που υποβάλλεται σε μία πραγματική σεισμική διέγερση. Τα γεωμετρικά στοιχεία και τα φορτία της κατασκευής που λαμβάνεται υπόψη στις αναλύσεις δίνονται στο Σχ. 16(α). Τα πέδιλα θεωρούνται διαστάσεων  $2.00 \times 2.00 \times 0.60 \text{ m}^3$ .



Σχ.16. (α) Επίπεδο πλαίσιο αναλύσεων, (β) μοντέλο υπολογισμού για πάκτωση στη βάση.

Για την κατασκευή αυτή γίνεται κατ' αρχήν μία επίλυση για πλήρη πάκτωση στη βάση των στύλων [βλ. ΣΧ. 16(β)]. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει:

Στατικά φορτία:  $M_A=M_B=73.93 \text{ KNm}$

$$V_A=-V_B=55.60 \text{ KN}$$

$$N_A=N_B=327.50 \text{ KN}$$

$P_x=100 \text{ KN}$  στο ζύγωμα:  $M_A=-M_B=-105.85 \text{ KNm}$

$$V_A=V_B=-50.10 \text{ KN}$$

$$N_A=-N_B=-27.00 \text{ KN}$$

$$\delta=5.05 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Στροφή  $1.00 \text{ rad}$  στο A:  $M_A=34836 \text{ KNm}$

Με αυτά τα αποτελέσματα έχουμε:

Στροφική ακαμψία ανωδομής (στύλου):  $K_{\phi,av} = 34836/1.00 = 34836$   
 KNm/rad (αμελείται η ακαμψία  $K_x$  του υποστυλώματος)

Στατικά φορτία πεδίου:  $N_0 = 327.50$  KN  
 $M_0 = 73.93 + 55.60 \times 0.60 = 107.29$  KNm

Σεισμ. φορτία πεδίου (για φορτίο  $P_E$ ):  $N_{E,A} = -0.27 P_E$  (KN),  $N_{E,B} = +0.27 P_E$  (KN)

Οριζόντια ακαμψία ανωδομής:  $M_E = (1.06 + 0.50 \times 0.60) P_E = 1.36 P_E$  (KNm)  
 $K = 100/0.00505 = 19802$  KN/m

Μάζα ανωδομής:  $m_{av} = [0.30 \times 0.60 \times 7.00 \times 25.00 +$   
 $2 \times \frac{1}{2} \times 0.40 \times 0.40 \times 2.00 \times 25.00 + 80 \times 7.00]/$   
 $9.81 = 61.11$  Mgr

Ιδιοπερίοδος ανωδομής (για πλήρη πάκτωση):  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} = 0.35$  sec.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

- Επίλυση ενός μονοβάθμιου συστήματος με ιδιοπερίοδο  $T=0.35$  sec και απόσβεση  $\zeta=0.05$  για τη σεισμική διέγερση που εξετάζεται. Από την επίλυση αυτή προκύπτει η χρονοϊστορία της απόκρισης της ανωδομής  $u(t)$ , θεωρώντας πλήρη πάκτωση στη βάση.
- Από τη χρονοϊστορία της απόκρισης της ανωδομής προκύπτουν οι χρονοϊστορίες των σεισμικών φορτίων  $M_E(t)$  και  $N_E(t)$  που εφαρμόζονται στο πέδιλο με χρήση των παραπάνω σχέσεων και για σεισμικό φορτίο:  $P_E(t) = m_{av}(\ddot{x}_g(t) + \ddot{u}(t))$ , όπου  $m_{av}$  είναι η μάζα της ανωδομής.
- Προσδιορισμός της απόκρισης του πεδίου με ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης (2) και (3).
- Ψευδοστατική ανάλυση με χρήση των μέγιστων τιμών των φορτίων  $M_E(t)$  και  $N_E(t)$  και της επιτάχυνσης  $\ddot{x}_g(t)$ .

Επιλύσεις γίνονται για τις παρακάτω περιπτώσεις:

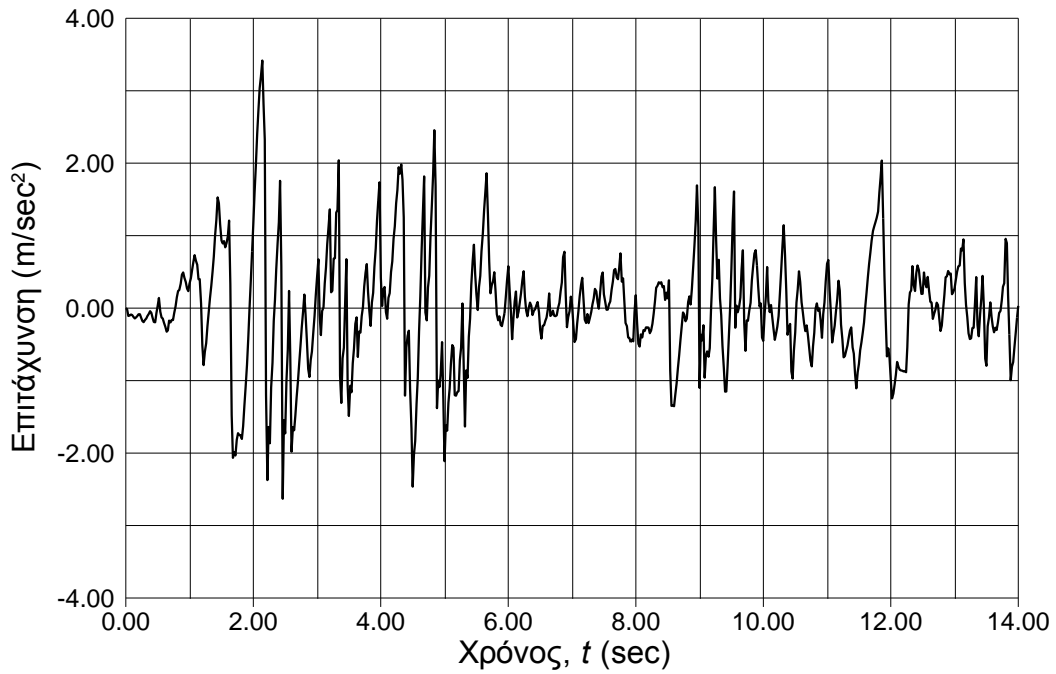
#### A. Σεισμική διέγερση

Χρησιμοποιείται η οριζόντια συνιστώσα του σεισμού του El Centro, 1940, που είναι ένας σεισμός πλούσιος σε φασματικό περιεχόμενο. Η χρονοϊστορία του σεισμού δίνεται στο Σχ. 17. Επιλύσεις γίνονται για σεισμική διέγερση μεγεθυμένη κατά 20%.

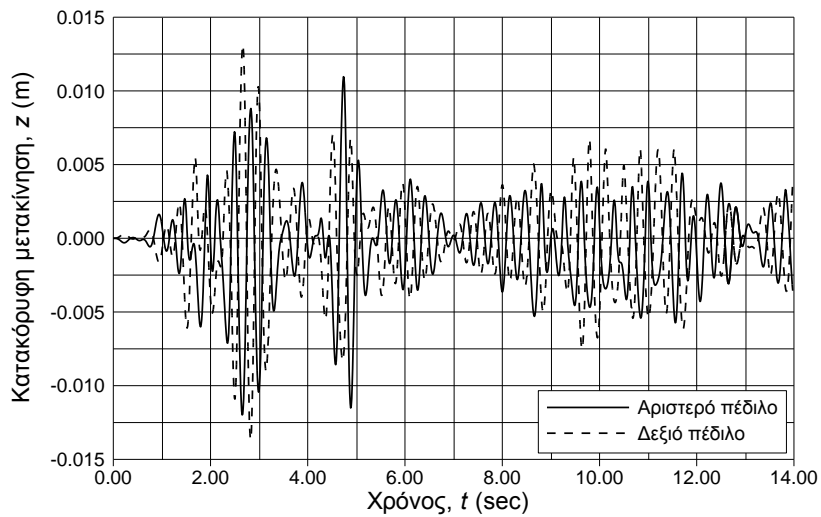
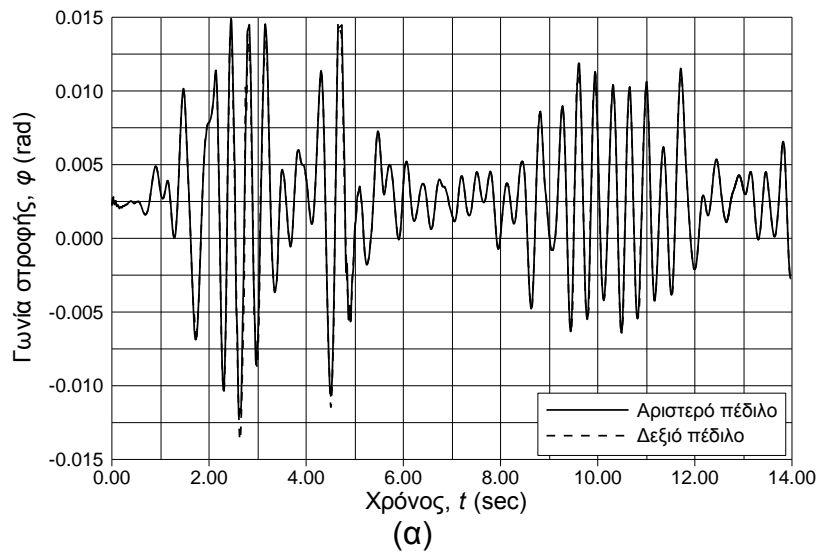
#### B. Ακαμψία εδάφους

Επιλύσεις γίνονται για διάφορες τιμές του δείκτη εδάφους, συγκεκριμένα:  $k_0=2500$  KN/m<sup>3</sup>,  $k_0=5000$  KN/m<sup>3</sup>,  $k_0=7500$  KN/m<sup>3</sup>,  $k_0=10000$  KN/m<sup>3</sup>,  $k_0=12500$  KN/m<sup>3</sup>,  $k_0=15000$  KN/m<sup>3</sup>,  $k_0=17500$  KN/m<sup>3</sup> και  $k_0=20000$  KN/m<sup>3</sup>.

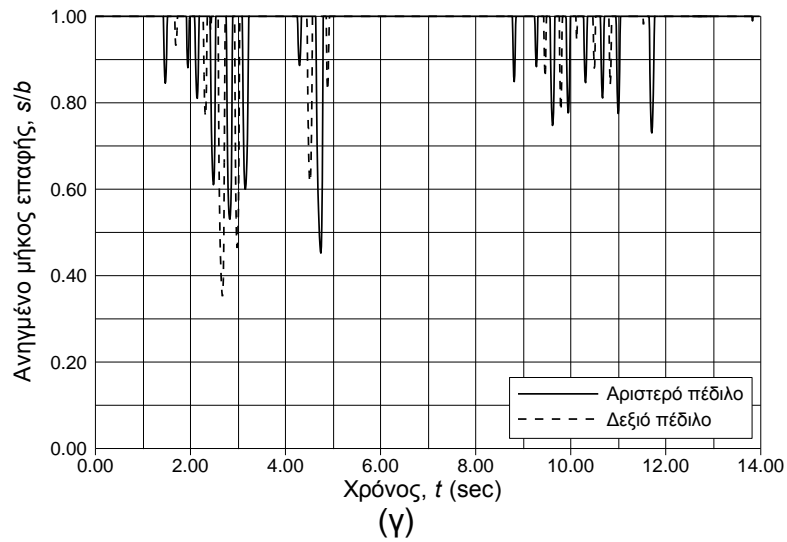
Σε όλες τις περιπτώσεις, η στροφική απόσβεση του εδάφους λαμβάνεται ίση με  $\zeta_\phi=0.15$ .



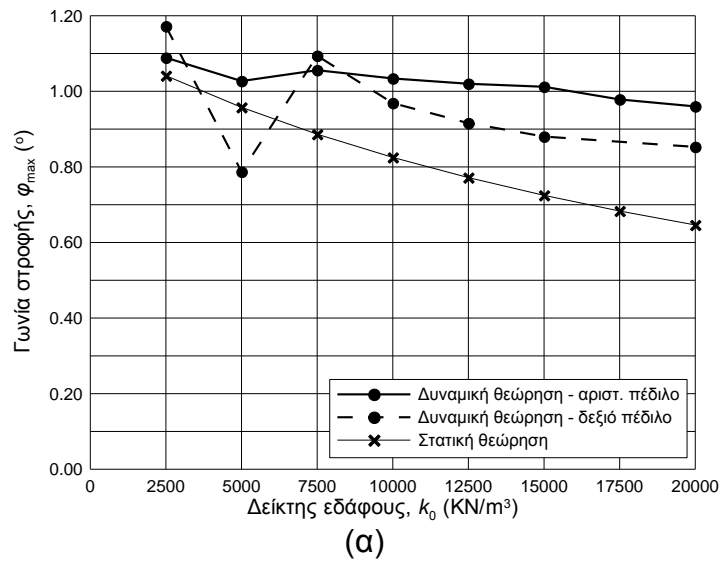
Σχ.17. Επιταχυνσιογράφημα El Centro, 1940.



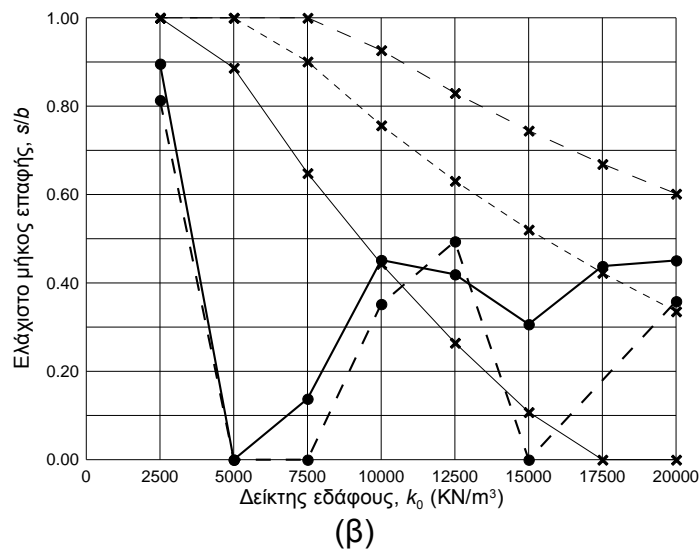
(β)



Σχ. 18. Χρονοϊστορία της απόκρισης για  $k_0=10000 \text{ KN/m}^3$ .

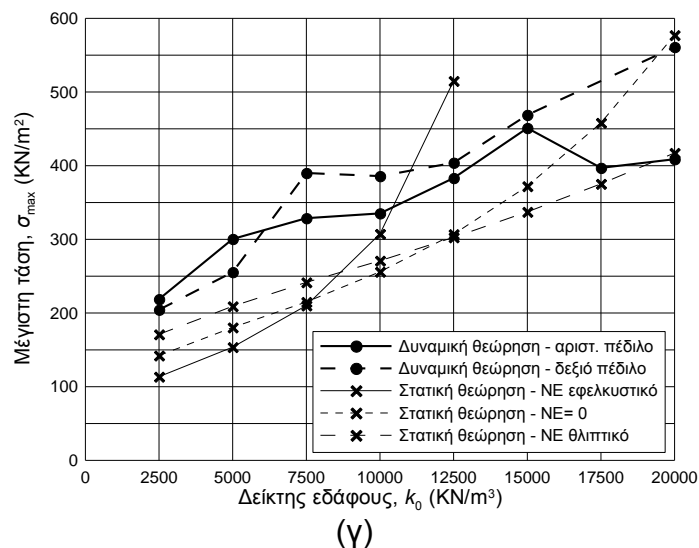


(α)



(β)





Σχ. 19. Επιρροή του δείκτη εδάφους  $k_0$  (α) στη μέγιστη γωνία στροφής, (β) στο ελάχιστο μήκος επαφής και (γ) στη μέγιστη τάση εδάφους.

Ενδεικτικά αποτελέσματα της απόκρισης του πεδίου παρουσιάζονται στο Σχ. 18, όπου φαίνεται ότι η γωνία στροφής ελάχιστα διαφοροποιείται μεταξύ των δύο πεδίων, ενώ η κατακόρυφη μετακίνηση είναι σχεδόν αντίθετη μεταξύ των δύο πεδίων, επειδή το σεισμικό αξονικό φορτίο των υποστυλωμάτων είναι αντίθετο. Αυτό όμως δεν φαίνεται να επηρεάζει ουσιαστικά την ελάχιστη τιμή του μήκους επαφής, η οποία είναι περίπου ίδια στα δύο πέδιλα, συμβαίνει όμως σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι, γενικά, όταν το ένα πέδιλο βρίσκεται σε μερική αποκόλληση το άλλο είναι σε πλήρη επαφή.

Συγκεντρωτική παρουσίαση των ακραίων τιμών της γωνίας στροφής, του μήκους επαφής και της τάσης εδάφους (αιχμής) για τις διάφορες τιμές του δείκτη εδάφους  $k_0$  δίνεται στο Σχ. 19. Στο ίδιο σχήμα δίνονται και οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την ψευδοστατική θεώρηση για τις μέγιστες τιμές των σεισμικών φορτίων. Η ψευδοστατική θεώρηση γίνεται για τρεις τιμές του σεισμικού αξονικού φορτίου του υποστυλώματος:  $N_E > 0$  (θλιπτικό),  $N_E < 0$  (εφελκυστικό) και  $N_E = 0$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης για ημιτονική διέγερση είχε προκύψει ότι η ελαστικότητα του εδάφους δεν επηρεάζει το ελάχιστο μήκος επαφής και την ανηγμένη τάση εδάφους (Σχ. 3), υπό την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Το συμπέρασμα αυτό δεν έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης για σεισμική διέγερση, τα οποία δείχνουν μία σημαντική μεταβολή του μήκους επαφής  $s$  με το δείκτη εδάφους  $k_0$  [Σχ. 19(β)]. Η εξάρτηση του  $s$  από το  $k_0$  οφείλεται σε φαινόμενα “συντονισμού”, αφού η μεταβολή της τιμής του  $k_0$  αλλάζει τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος και επομένως και τις τιμές των λόγων  $T/T_\phi$  και  $T/T_z$ , αν με  $T$  συμβολιστεί η δεσπόζουσα περίοδος του κραδασμού ή της απόκρισης της ανωδομής. Τα διαγράμματα του Σχ. 19, επομένως, θα πρέπει να συγκριθούν με ένα συνδυασμό των διαγραμμάτων των Σχ. 3 και 5 για να μπορέσει να γίνει μία σύγκριση των αποτελεσμάτων της σεισμικής με την ημιτονική διέγερση.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ψευδοστατική θεώρηση υποεκτιμά την απόκριση των πεδίων και προβλέπει μικρότερες γωνίες στροφής και, γενικά, μικρότερες τάσεις

εδάφους. Εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις σκληρού εδάφους με εφελκυστικό σεισμικό φορτίο υποστυλώματος, που οδηγούν σε μεγάλες τάσεις εδάφους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για  $k_0 > 15000 \text{ KN/m}^3$  η ψευδοστατική ανάλυση υποδεικνύει ανατροπή του πεδίου (αρνητικές τιμές του μήκους επαφής  $s$ ) και άπειρη τιμή για την τάση εδάφους.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο διάγραμμα ( $\gamma$ ) του Σχ. 19 επαληθεύουν το συμπέρασμα της παραμετρικής ανάλυσης για ημιτονική διέγερση, ότι η χρήση εφελκυστικού σεισμικού φορτίου στην ψευδοστατική θεώρηση μπορεί να οδηγήσει σε εξωπραγματικά μεγάλες τάσεις εδάφους, που δεν επαληθεύονται από τις δυναμικές αναλύσεις. Αντίθετα, για μαλακά εδάφη η εφελκυστική αξονική δύναμη οδηγεί σε μικρότερες τιμές της τάσης εδάφους απότι η θλιπτική και είναι εναντίον της ασφάλειας. Η υιοθέτηση της πρότασης που γίνεται στην παρ. 6.9 για εφαρμογή της στατικής ανάλυσης με μηδενικό αξονικό φορτίο υποστυλώματος ( $N_E=0$ ) φαίνεται να οδηγεί στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

### 5.8 Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία γίνεται μία διερεύνηση της επιρροής όλων των παραμέτρων, που επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση πεδίων με μερική αποκόλληση από το έδαφος, στις ακραίες τιμές της απόκρισης και συγκεκριμένα στη μέγιστη γωνία στροφής, στο ελάχιστο μήκος επαφής και στη μέγιστη τάση εδάφους που αναπτύσσεται στο άκρον του πεδίου (τάση αιχμής). Αρχικά γίνεται μία διερεύνηση της επιρροής της αδιάστατης έκφρασης κάθε παραμέτρου χωριστά, για ημιτονική διέγερση, και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα παράδειγμα ενός πλαισίου υπό σεισμική διέγερση. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση είναι:

1. Η ελαστικότητα του εδάφους, που καθορίζεται από την τιμή του δείκτη  $k_0$  της θεμελίωσης Winkler, επηρεάζει σημαντικά το ελάχιστο μήκος επαφής αλλά και την τάση εδάφους, αφού αλλάζει τις ιδιοπεριόδους των στροφικών και των κατακόρυφων ταλαντώσεων και μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα συντονισμού. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει κίνδυνος συντονισμού, η ελαστικότητα της θεμελίωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα.
2. Όπως ήταν αναμενόμενο, η στροφική ακαμψία του υποστυλώματος που συνδέεται με το πέδιλο είναι σημαντική. Μείωση της στροφικής ακαμψίας του υποστυλώματος, σε σύγκριση με τη στροφική ακαμψία του εδάφους, οδηγεί σε μεγαλύτερη ροπή πεδίου με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού αποκόλλησης και των τάσεων εδάφους.
3. Φαινόμενα συντονισμού παρατηρούνται όταν η συχνότητα διέγερσης είναι κοντά σε κάποια από τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος για στροφικές ή κατακόρυφες ταλαντώσεις με αποτέλεσμα η απόκριση του πεδίου να μεγαλώνει σημαντικά, με αντίστοιχη μείωση του μήκους επαφής και αύξηση των τάσεων του εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ψευδοστατική ανάλυση υποεκτιμά σημαντικά την απόκριση, αφού βασίζεται στις μέγιστες μόνο τιμές των σεισμικών φορτίων και δεν λαμβάνει υπόψη φαινόμενα συντονισμού.
4. Αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση φαινομένων συντονισμού και σε μία τρίτη περιοχή περιόδων διέγερσης, αρκετά μεγαλύτερων από τις ιδιοπεριόδους

των στροφικών και των κατακόρυφων ταλαντώσεων, που δεν είναι εύκολο να εξηγηθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

5. Η επιρροή της απόσβεσης της θεμελίωσης περιορίζεται κυρίως στη γωνία στροφής, ενώ το ελάχιστο μήκος επαφής και οι τάσεις εδάφους επηρεάζονται πολύ λιγότερο.
6. Η παραμετρική διερεύνηση δείχνει ότι η ψευδοστατική ανάλυση υποεκτιμά, γενικώς, τα αποτελέσματα, ακόμη και σε περιοχές συχνοτήτων διέγερσης μακράν του συντονισμού, Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που η στατική θεώρηση οδηγεί σε εξαιρετικά δυσμενή αποτελέσματα, πολύ δυσμενέστερα αυτών της δυναμικής ανάλυσης. Τέτοιες περιπτώσεις είναι:
  - Για μεγάλες τιμές της μέγιστης σεισμικής ροπής  $M_E$ , κοντά στις τιμές που αντιστοιχούν σε ανατροπή του πεδίου.
  - Για μεγάλες τιμές αξονικού σεισμικού φορτίου του υποστυλώματος,  $N_E$ . Ενώ οι δυναμικές αναλύσεις δείχνουν πολύ μικρή επιρροή της απόκρισης από το αξονικό φορτίο του υποστυλώματος, η ψευδοστατική θεώρηση οδηγεί σε υπερβολικά μεγάλες τιμές της τάσης εδάφους, εάν το φορτίο  $N_E$  είναι εφελκυστικό. Αντίθετα, για θλιπτικό αξονικό φορτίο τα αποτελέσματα είναι εναντίον της ασφάλειας. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται η ψευδοστατική ανάλυση να εφαρμόζεται αμελώντας το σεισμικό αξονικό φορτίο του υποστυλώματος ( $N_E=0$ ). Η θεώρηση αυτή φαίνεται να οδηγεί στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

## 6 Τελικά Συμπεράσματα

Η παρούσα Τελική Έκθεση αφορά στο Ερευνητικό Έργο με τίτλο «Οριακή φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμικών δράσεων» που χρηματοδοτήθηκε από τον ΟΑΣΠ και εντάσσεται στον Τομέα του Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας και ειδικότερα στη Θεματική Ενότητα «Αντισεισμική τεχνολογία : Εδαφοτεχνικά θέματα - αστοχίες εδαφών - αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής». Έναυσμα αποτέλεσε το γεγονός ότι η εκτίμηση της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμικών δράσεων στην ανωδομή δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς. Αντιθέτως, έχει διερευνηθεί επαρκώς (κυρίως την δεκαετία 1980-90) η οιονεί-ελαστική συμπεριφορά των επιφανειακών θεμελιώσεων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση πριν την αστοχία, με την ανάπτυξη των σχέσεων που δίνουν τις σύνθετες δυσκαμψίες για διάφορα σχήματα επιφανειακών θεμελιώσεων καθώς και την διατύπωση σχέσεων που δίνουν την απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης και βεβαίως την οριακή περίπτωση της πλήρους «ρευστοποίησης». Κατά την εκτίμησή μας, ο κυριότερος λόγος για την υστέρηση αυτή είναι ότι, μέχρι σχετικά πρόσφατα, οι παρατηρηθείσες αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμών ήταν σπάνιες και συνεπώς το ενδιαφέρον των ερευνητών είχε επικεντρωθεί στην οιονεί-ελαστική απόκριση των επιφανειακών θεμελιώσεων μέσω της προσομοίωσής τους ως ισοδύναμων γραμμικών ελατηρίων κατά την δυναμική ανάλυση των ανωδομών υπό σεισμικές δράσεις. Αντιθέτως, από το 1985 παρατηρήθηκαν αρκετές αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων κατά τον σεισμό Michoacan-Guerego στο Μεξικό, και στη συνέχεια στο Kobe Ιαπωνίας (1995) και στον πρόσφατο καταστροφικό σεισμό της Νικομήδειας (Izmit) στην

Τουρκία (17 Αυγούστου 1999), κατά τον οποίο ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις διαφορικών καθιζήσεων, περιστροφών, και ανατροπών των θεμελιώσεων δεκάδων κτιρίων στην πόλη Adapazari.

Αν και αστοχίες επιφανειακών θεμελιώσεων υπό σεισμικές δράσεις μπορεί να οφείλονται σε πολλούς λόγους, το παρόν Ερευνητικό Έργο εντοπίζεται κυρίως στη συμπλήρωση των συμβατικών μεθόδων ανάλυσης της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων με έμφαση :

- (α) Στις μεγάλες εκκεντρότητες της φόρτισης των θεμελίων λόγω σεισμικών επιφορτίσεων (σε σχέση με τις τιμές επί τη βάση των οποίων έχουν βαθμονομηθεί οι συνήθεις μέθοδοι ανάλυσης).
- (β) Στην λοξότητα της φόρτισης, δηλαδή στην ύπαρξη σημαντικής τέμνουσας στη βάση του πεδίου (που μπορεί να ενεργοποιήσει και φαινόμενα ολίσθησης πέραν της κλασσικής αστοχίας).
- (γ) Στην ετερογένεια του εδαφικού σχηματισμού θεμελίωσης, η οποία διερευνάται αφενός μεν μέσω δίστρωτου σχηματισμού αφετέρου δε μέσω σχηματισμού με γραμμική αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος.
- (δ) Στην επιρροή της μερικής αποκόλλησης της θεμελίωσης λόγω της επιβολής αυξημένων καμπτικών ροπών.

Οι ανωτέρω διερευνήσεις γίνονται μέσω :

- (1) Της σύγκρισης των κλασσικών μεθόδων υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων υπό κεντρική, έκκεντρη και λοξή φόρτιση σε ομοιογενή εδάφη, δηλαδή της μεθόδου που προτείνεται στον ΕΑΚ-2000 (και στον Ευρωκώδικα 7) και της μεθόδου που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 8) με αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (πρόγραμμα PLAXIS – για λωριδωτό πέδιλο) και την μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (πρόγραμμα FLAC-3D για τετραγωνικά, ορθογωνικά και λωριδωτά πέδιλα). Σκοπός της σύγκρισης είναι να βαθμονομηθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων (σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους) προκειμένου στη συνέχεια οι αριθμητικές μέθοδοι να χρησιμοποιηθούν για τη συναγωγή συμπερασμάτων στην περίπτωση θεμελιώσεων επί ανομοιογενούς εδάφους (όπου δεν υπάρχουν αναλυτικές επιλύσεις για σύγκριση). Τα αποτελέσματα των ανωτέρω συγκρίσεων είναι πολύ ικανοποιητικά (ακρίβεια  $\pm 5\%$ ) για τιμές της σχετικής εκκεντρότητας ( $e/B$ ) που πλησιάζουν μέχρι το 0.40 και αποδεικνύουν ότι οι ανωτέρω αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για την εκτίμηση της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων με μεγάλες εκκεντρότητες και σημαντική λοξότητα φόρτισης.
- (2) Της εκτέλεσης μεγάλου αριθμού αριθμητικών αναλύσεων με τις ανωτέρω μεθόδους σε ανομοιογενείς εδαφικούς σχηματισμούς (υπό συνθήκες αστράγγιστης φόρτισης) και συγκεκριμένα :
  - a. Σε δίστρωτο σχηματισμό (με διαφορετική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στην ανώτερη και κατώτερη στρώση και ποικίλα πάχη της ανώτερης στρώσης) και
  - b. Σε εδαφικό σχηματισμό με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή με το βάθος (προκειμένου να προσομοιωθούν οι συνήθεις συνθήκες κανονικά στερεοποιημένων αργίλων).

Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων παρουσιάζονται με μορφή κανονικοποιημένων νομογραφημάτων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρύ φάσμα περιπτώσεων.

Από τις αναλύσεις αυτές προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

### 1. Φέρουσα ικανότητα πεδίων σε δίστρωτο έδαφος :

Προτείνεται η ακόλουθη προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων διαστάσεως  $B \times L$  ( $L > B$ ), υπό κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση σε δίστρωτο σχηματισμό όπου :

$d$  = πάχος της ανώτερης εδαφικής στρώσης

$c_{u1}$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της ανώτερης εδαφικής στρώσης (πάχους  $d$ )

$c_{u2}$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της κατώτερης εδαφικής στρώσης (μεγάλου πάχους)

1. Υπολογίζεται η ισοδύναμη (μέση) αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $\hat{c}_u$  του σχηματισμού από τη σχέση :

$$\text{Εάν } d = 0 : \hat{c}_u = c_{u2}$$

$$\text{Εάν } 0 < d < 0.6 B : \hat{c}_u = c_{u1} \left( \frac{d}{0.6 B} \right) + c_{u2} \left( 1 - \frac{d}{0.6 B} \right)$$

$$\text{Εάν } d > 0.6 B : \hat{c}_u = c_{u1}$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι το βάθος επιρροής της θεμελίωσης (όσον αφορά στην οριακή φέρουσα ικανότητα) είναι της τάξεως του  $0.6 B$ .

2. Η αδιάστατη τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας ( $R$ ) για την περίπτωση απλής εκκεντρότητας κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$ , δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{B L \hat{c}_u} = (\pi + 2) \left( 1 - 2 \frac{e}{B} \right) \left[ 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \left( 1 - 2 \frac{e}{B} \right) \right] i_c$$

$$\text{όπου : } i_c = 0.5 \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{\frac{R}{B L \hat{c}_u}}{1 - 2 \frac{e}{B}}} \right) \text{ και } i = Q / R$$

και ( $e$ ) είναι η εκκεντρότητα της φόρτισης κατά την διεύθυνση του πλάτους ( $B$ ).

Η ανωτέρω σχέση προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων με ακρίβεια  $\pm 5\%$  για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας ( $e/B$ ) έως  $0.35$  περίπου, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας οι αποκλίσεις φθάνουν το  $\pm 15\%$ . Με το σκεπτικό ότι ανηγμένες εκκεντρότητες άνω του  $0.35$  είναι μάλλον ασυνήθεις, η ανωτέρω προσεγγιστική σχέση θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους, η ανωτέρω σχέση μεταπίπτει στην γνωστή αναλυτική σχέση του ΕΑΚ 2000 θέτοντας  $c_u = \hat{c}_u$ .

## 2. Φέρουσα ικανότητα πεδίων σε έδαφος με γραμμικώς αυξανόμενη διατμητική αντοχή :

Προτείνεται η ακόλουθη προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων διαστάσεως  $B \times L$  ( $L > B$ ), υπό κεντρική ή έκκεντρη φόρτιση σε εδαφικό σχηματισμό με γραμμικώς αυξανόμενη (με το βάθος) αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατά τη σχέση :  $c_u = c_{u0} + \lambda z$ , όπου :

$c_{u0}$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην επιφάνεια του εδάφους ( $z=0$ )

$z$  = βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

$\lambda$  = συντελεστής αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος (σε kPa/m)

Η αδιάστατη τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας ( $R$ ) για την περίπτωση απλής εκκεντρότητας κατά την διεύθυνση του πλάτους  $B$ , δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{BLc_{u0}} = (\pi + 2) \left(1 - 2 \frac{e}{B}\right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{B}{L}\right) \left(1 - 2 \frac{e}{B}\right)\right] i_c A$$

$$\text{όπου : } i_c = 0.5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{R}{BLc_{u0}}\right)}{\left(1 - 2 \frac{e}{B}\right)}}\right) \text{ και } i = Q / R$$

$$\text{και : } A = 1 + \left\{0.125 - 0.70 \left(\frac{e}{B}\right)^2\right\} \left(\frac{\lambda B}{c_{u0}}\right)$$

ενώ,  $e$  είναι η εκκεντρότητα της φόρτισης κατά την διεύθυνση του πλάτους ( $B$ ). Η ανωτέρω σχέση ισχύει για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας έως 0.4226 (δηλαδή για  $e / B < 0.4226$ ), με το σκεπτικό ότι για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας η φέρουσα ικανότητα δεν ορίζεται (κατά την μέθοδο του Ευρωκώδικα 8).

Στην ανωτέρω σχέση, η επιρροή της αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος εμφανίζεται μέσω του αδιάστατου συντελεστή  $A$ . Στην περίπτωση ομοιογενούς εδάφους, οπότε  $\lambda = 0$ , η ανωτέρω σχέση μεταπίπτει στην γνωστή αναλυτική σχέση του ΕΑΚ 2000, αφού  $A = 1$ . Επίσης, για ανηγμένη εκκεντρότητα  $e / B = 0.4226$  (δηλαδή τη μέγιστη τιμή για την οποία ορίζεται η φέρουσα ικανότητα), ισχύει  $A = 1$ .

Η ανωτέρω σχέση προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων με ακρίβεια  $\pm 5\%$  για τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας ( $e/B$ ) έως 0.35 περίπου, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας (έως 0.4226) οι αποκλίσεις φθάνουν το  $\pm 20\%$ . Με το σκεπτικό ότι ανηγμένες εκκεντρότητες άνω του 0.35 είναι μάλλον ασυνήθεις, η ανωτέρω προσεγγιστική σχέση θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

Τέλος, όσον αφορά στην επιρροή της αποκόλλησης, γίνεται μία διερεύνηση της επιρροής όλων των παραμέτρων, που επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση πεδίων με μερική αποκόλληση από το έδαφος, στις ακραίες τιμές της απόκρισης και συγκεκριμένα στη μέγιστη γωνία στροφής, στο ελάχιστο μήκος επαφής και στη μέγιστη τάση εδάφους που αναπτύσσεται στο άκρον του πεδίου (τάση αιχμής). Αρχικά γίνεται μία διερεύνηση της επιρροής της αδιάστατης έκφρασης κάθε παραμέτρου χωριστά, για ημιτονική διέγερση, και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα παράδειγμα ενός πλαισίου υπό σεισμική διέγερση. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση είναι:

1. Η ελαστικότητα του εδάφους, που καθορίζεται από την τιμή του δείκτη  $k_0$  της θεμελίωσης Winkler, επηρεάζει σημαντικά το ελάχιστο μήκος επαφής αλλά και την τάση εδάφους, αφού αλλάζει τις ιδιοπεριόδους των στροφικών και των κατακόρυφων ταλαντώσεων και μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα συντονισμού. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει κίνδυνος συντονισμού, η ελαστικότητα της θεμελίωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα.
2. Όπως ήταν αναμενόμενο, η στροφική ακαμψία του υποστυλώματος που συνδέεται με το πέδιλο είναι σημαντική. Μείωση της στροφικής ακαμψίας του υποστυλώματος, σε σύγκριση με τη στροφική ακαμψία του εδάφους, οδηγεί σε μεγαλύτερη ροπή πεδίου με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού αποκόλλησης και των τάσεων εδάφους.
3. Φαινόμενα συντονισμού παρατηρούνται όταν η συχνότητα διέγερσης είναι κοντά σε κάποια από τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος για στροφικές ή κατακόρυφες ταλαντώσεις με αποτέλεσμα η απόκριση του πεδίου να μεγαλώνει σημαντικά, με αντίστοιχη μείωση του μήκους επαφής και αύξηση των τάσεων του εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ψευδοστατική ανάλυση υποεκτιμά σημαντικά την απόκριση, αφού βασίζεται στις μέγιστες μόνο τιμές των σεισμικών φορτίων και δεν λαμβάνει υπόψη φαινόμενα συντονισμού.
4. Αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση φαινομένων συντονισμού και σε μία τρίτη περιοχή περιόδων διέγερσης, αρκετά μεγαλύτερων από τις ιδιοπεριόδους των στροφικών και των κατακόρυφων ταλαντώσεων, που δεν είναι εύκολο να εξηγηθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.
5. Η επιρροή της απόσβεσης της θεμελίωσης περιορίζεται κυρίως στη γωνία στροφής, ενώ το ελάχιστο μήκος επαφής και οι τάσεις εδάφους επηρεάζονται πολύ λιγότερο.
6. Η παραμετρική διερεύνηση δείχνει ότι η ψευδοστατική ανάλυση υποεκτιμά, γενικώς, τα αποτελέσματα, ακόμη και σε περιοχές συχνοτήτων διέγερσης μακράν του συντονισμού. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που η στατική θεώρηση οδηγεί σε εξαιρετικά δυσμενή αποτελέσματα, πολύ δυσμενέστερα αυτών της δυναμικής ανάλυσης. Τέτοιες περιπτώσεις είναι:
  - Για μεγάλες τιμές της μέγιστης σεισμικής ροπής  $M_E$ , κοντά στις τιμές που αντιστοιχούν σε ανατροπή του πεδίου.
  - Για μεγάλες τιμές αξονικού σεισμικού φορτίου του υποστυλώματος,  $N_E$ . Ενώ οι δυναμικές αναλύσεις δείχνουν πολύ μικρή επιρροή της απόκρισης από το αξονικό φορτίο του υποστυλώματος, η ψευδοστατική θεώρηση οδηγεί σε υπερβολικά μεγάλες τιμές της τάσης εδάφους, εάν το φορτίο  $N_E$  είναι εφελκυστικό. Αντίθετα, για θλιπτικό αξονικό φορτίο τα αποτελέσματα είναι εναντίον της ασφάλειας. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται

η ψευδοστατική ανάλυση να εφαρμόζεται αμελώντας το σεισμικό αξονικό φορτίο του υποστυλώματος ( $N_E=0$ ). Η θεώρηση αυτή φαίνεται να οδηγεί στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.



## 7 Βιβλιογραφικές αναφορές

- Bowles J.E.(1997) " Foundation analysis and design", McGraw – Hill, New York
- Chen W.F. (1975) " Limit analysis and soil plasticity "Elsevier, Amsterdam
- Chen W.F. and McCarron W.O.(1991) : "Bearing capacity of shallow foundations ", Foundation engineering handbook, Van Nostran Reinhold, New York
- Eurocode 7 - Part 1 (October 2004) : EN 1997-1 "Geotechnical Design – General Rules", European Committee for Standardization, Brussels
- Eurocode 8 - Part 5 (December 2003) : pr EN 1998-5 "Design of structures for earthquake resistance - Foundations, retaining structures and geotechnical aspects", European Committee for Standardization, Brussels.
- Hall, J. R. Jr, Constantopoulos, I. V. and Michalopoulos A. P. (1979), "Higher Order Winkler Model for Soil-Structure Interaction", *3<sup>rd</sup> International Conference on Numerical Methods in Geomechanics* , Aachen, 2-6 April 1979, pp. 933-938.
- Housner, G. W. (1963), "The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53 No. 2, pp. 403-417.
- Pecker A. (1996) "Seismic Bearing Capacity of Shallow Foundations", Proc. 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No 2076, Elsevier
- PLAXIS Finite element code for soil and rock analysis (Version 7), Delft, The Netherlands
- Psycharis, I. N. and Jennings, P. C. (1983), "Rocking of Slender Rigid Bodies Allowed to Uplift", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, pp. 57-76.
- Pecker A. & Pender M.J. (2000) "Earthquake Resistant Design of Foundations : New Construction", Proc. GEO 2000 Conference, Melbourne Australia, Nov. 2000.
- Αναγνωστόπουλος Α. Γ. και Παπαδόπουλος Β. Π. (1989) : "Επιφανειακές Θεμελιώσεις", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
- Γκαζέτας Γ. (1996) : " Σημειώσεις Εδαφομηχανικής", Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός Ε.Α.Κ. (2000), Έκδοση Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Αθήνα
- Καββαδάς Μ., Frank R. και Αναγνωστόπουλος Α. (2001) : " Εφαρμογές των μεθόδων ανάλυσης γεωτεχνικών έργων μέσω οριακών καταστάσεων κατά

τον Ευρωκώδικα 7”, Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, Τόμος 2

Καβαδάς Μ. και Ψυχάρης Ι. (2002) : “ Οριακή φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω σεισμικών δράσεων”, Πρώτη τακτική έκθεση προόδου προς Ο.Α.Σ.Π.

Λύτρας Γ. 2002. « Οριακό Φορτίο Επιφανειακών Θεμελιώσεων σε Ομοιογενές και Ανομοιογενές Έδαφος με το πρόγραμμα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC 3D”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Μιχαηλίδης Μ., Λουκάκης Κ. και Γκαζέτας Γ.(1997) : “ Ανάλυση κατακόρυφου οριακού φορτίου υπό ταυτόχρονη εγκάρσια επιπόνηση”, Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, Τόμος 1

Νικολαΐδης Ι. & Ψαλτάκου Α. 2002. «Οριακή Φέρουσα Ικανότητα Επιφανειακών Θεμελιώσεων λόγω Σεισμικών Δράσεων», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Παναγόπουλος Γ. (2002) : «Φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων υπό κεκλιμένη – έκκεντρη συνισταμένη φόρτιση», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Ρίζος Δ. (2001) «Φέρουσα ικανότητα ορθογωνικού θεμελίου υπό ισχυρή εγκάρσια φόρτιση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών», Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.